

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

YENİ MİKROPİKSELLİ SELVARİ FOTODİODLARIN İŞLƏNMƏSİ, FİZİKİ XASSƏLƏRİNİN TƏDQIQI VƏ RADİASİYA SPEKTROMETRİNDƏ TƏTBİQİ

İxtisas: 2225.01- Radiasiya materialşünaslığı

Elm sahəsi: Fizika

Elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş

DİSSERTASIYA

İddiaçı: _____ f.ü.f.d, dos, Fərid İbrahim oğlu Əhmədov
(imza) (elmi dərəcəsi, elmi adı, adı, atasının adı, soyadı)

Elmi məsləhətçi: _____ f.-r. e. d. Zirəddin Yaqub oğlu Sadıqov
(imza) (elmi dərəcəsi, elmi adı, adı, atasının adı, soyadı)

Bakı-2021

MÜNDƏRİCAT

	Səh.
GİRİŞ	4
I FƏSİL MÖVCUD İONLAŞDIRICI RADİASIYA DETEKTORLARI	12
1.1. İonlaşdırıcı zərrəciklərin və qamma şüaların mühitlə qarşılıqlı təsir mexanizmi	12
1.2. İonlaşdırıcı radiasiyanı qeydetmə metodları	18
1.3. Vakuum fotoelektron gücləndiriciləri və onlar əsaslı ssintilyator detektorları	23
1.4. Yarımkəçirici radiasiya detektorları	36
1.5. Mikro-pikselli selvari fotodiodlar və onlar əsaslı ssintilyator detektorları	51
1.6. Nəticələr	76
II FƏSİL TƏCRÜBİ QURĞULAR VƏ ELEKTRON BLOKLARI	78
2.1. Mikropikselli selvari fotodiodların xassələrini ölçmək üçün istifadə edilən təcrübi qurğu	78
2.2. Gərginlik çeviricilərin hesablanması və yığılması	86
2.3. Sıqnal gücləndiricilərinin və komparatorun hesablanması və yığılması	89
III FƏSİL MSFD FOTODİODLARIN STRUKTURU VƏ İŞLƏK PARAMETRLƏRİ	100
3.1. MSFD fotodiodların işlək parametrlərinin tədqiqi	100
3.2. MSFD fotodiodların kvant effektivliklərinin və xəttiliyinin təyini	130
3.3. MSFD-3NK və MPPC-S12572-010 fotodiodlarının aşağı temperaturlarda tədqiqi.	136
3.4. MSFD fotodiodlarının kənar işıq fonu şəraitində tədqiqi	146
3.5. Ardıcıl və paralel qoşulmuş MSFD fotodiodların tədqiqi	150
3.6. Nəticələr	153
IV FƏSİL MSFD FOTODİODLARININ YENİ QURULUŞUNUN İŞLƏNMƏSİ	155
4.1. Dərin piksellə yeni MSFD fotodiodlarının işlənməsi	155
4.2. MSFD fotodiodlarının kvant effektivliyinin artırılması üsulları	166
4.3. MSFD tip fotodiodlarda selvari prosesi xarakterizə edən yeni iterativ model	172
4.4. MSFD fotodiodlar əsasında 16 elementli matrislərin	183

	hazırlanması	
4.5.	Səthi piksellə yeni MSFD fotodiodların işlənməsi	189
4.6.	Nəticələr	197
V FƏSİL	MSFD FOTODİOD VƏ SSİNTİLYATOR ƏSASLI YENİ DETEKTOR MODULLARININ TƏDQIQI	199
5.1.	Ssintilyatorlu detektorlarda istifadə edilən MSFD fotodiodlarının parametrləri	199
5.2.	Üzvü və maye ssintilyatorlar əsasında hazırlanmış detektor modullarının radiasiyaya həssaslığının tədqiqi	201
5.3.	Qeyri üzvü ssintilyator əsasında hazırlanmış detektor modullarının radiasiyaya həssaslığının tədqiqi	219
5.4.	MSFD fotodiodlar əsasında fosfiç detektorlarının hazırlanma imkanlarının tədqiqi	228
5.5.	MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış ssintilyator detektorunun qamma şüalara həssaslığının müqayisəli tədqiqi	235
5.6.	Nəticələr	243
VI FƏSİL	MSFD FOTODİOD ƏSASLI QAMMA SPEKTROMETR VƏ ONUN RADİASİYAYA DAVAMLILIĞININ TƏDQIQI	244
6.1.	MSFD fotodiodlar əsasında qamma-spektrometrlərin işlənməsi	244
6.2.	MSFD fotodiodlarının radiasiyaya davamlılığının öyrənilməsi	251
6.3.	MSFD əsaslı qamma-spektrometrdə istifadə edilən gücləndiricilərin radiasiya davamlılığının öyrənilməsi	266
6.4.	Nəticələr	269
	DİSSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ	270
	DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ İŞLƏRİN SİYAHISI	272
	ƏDƏBİYYAT	275
	ŞƏRTİ İŞARƏLƏRİN SİYAHISI	295

GİRİŞ

Mövzunun aktuallığı və işlənmə dərəcəsi. Müasir dövrdə tibb sahəsinin, nüvə fizikasının, habelə sənaye və təhlükəsizlik sahələrinin inkişafında ionlaşdırıcı zərrəcik və şüa mənbələrinin rolu danılmazdır. Radioaktiv mənbələrin buraxdığı zərrəcik və şüaların enerjisini, növünü və sayını yüksək dəqiqliklə təyin etmək aparılan təcrübələr üçün olduqca vacibdir. Qeyd edilən bu parametrlərin dəqiq təyin edilməsi yeni yaranan izotopların növünü, sayını, onların yarada biləcəyi effektləri və nüvə daxili prosesləri düzgün analiz etməyə imkan verir. Bu məqsədlə müxtəlif növ ssintilyator əsaslı və yarımkeçirici əsaslı detektorlar geniş tətbiq edilir. Yarımkeçirici əsaslı detektorların qiymətə baha başa gəlməsi, aşağı temperaturlarda işləməsi və radiasiya davamlılığının aşağı olması onların geniş tətbiqi üçün problemlər yaradır və ona görə də ssintilyator əsaslı radiasiya detektorları daha geniş istifadə olunur. Bununla yanaşı, ssintilyator əsaslı detektorlarda istifadə olunan vakuum fotoelektron gücləndiriciləri (FEG) bu tip detektorlar üçün də bir sıra problemlər yaradır. Vakuum fotoelektron gücləndiricilərinin kompakt olmaması, yüksək gərginlikdə işləməsi (~ 1000 V), foton qeydetmə effektivliyinin kiçik olması (~ 20 %), maqnit sahəsinə həssas olması və zərbəyə davamsız olması bunlar əsasında yüksək effektivli və portativ ssintilyatorlu radiasiya sayğaclarının və spektrometrlərinin yaradılmasına imkan vermir. Hazırda yeni ssintilyatorlu radiasiya sayğaclarının və spektrometrlərinin yaradılması üçün yarımkeçirici əsaslı fotoelektron gücləndiriciləri – normal rejimli selvari fotodiodlar və Heyger rejimli mikropikselli selvari fotodiodlar (MSFD) geniş tədqiq edilir. Bu selvari fotodiodlardan MSFD tipli fotodiodlar portativ və yüksək effektivli ssintilyator əsaslı sayğaclarının və spektrometrlərinin hazırlanması üçün ən optimal qeydedici hesab edilir. Hazırda, müxtəlif firmaların istehsalı olan MSFD fotodiodlarda piksel sıxlığının və foton qeydetmə effektivliyinin (FQE-nin) kiçik olması bunların geniş tətbiq olunmasına imkan vermir. Məhz bu məqsədlə yeni ssintilyator detektorların yaradılması üçün yeni nəsil MSFD fotodiodların işlənməsi böyük maraq kəsb edir. Bunun üçün MSFD-lərin işləmə mexanizminin dərinləndirilməsi, onun işlək parametrlərinin

(gücləndirmə əmsalının, foton qeydetmə effektivliyinin, cəldliyinin və s.) temperaturdan, şüalanma dozəsindən asılılığının tədqiqi, onların əsasında yeni ionlaşdırıcı radiasiya detektorlarının və spektrometrlərin yaradılması gündəmdə olan aktual elmi məsələlərdəndir.

Dissertasiya işinin məqsədi və vəzifələri:

Heyger rejimində işləyən mikropikselli selvari fotodiodların fiziki işləmə mexanizminin nəzəri və təcrübi analizindən, onların parametrlərinin təkmilləşdirilməsindən, bu fotodiodların ssintilyatorlu radiasiya detektorlarında tətbiqi zamanı qamma şüaların, beta zərrəciklərin və neytronların siqnalların yaranma mexanizminə təsirinin öyrənilməsindən və optimal parametrlərə malik olan yeni mikropikselli selvari fotodiodlar əsasında radiasiya spektrometrlərinin hazırlanma imkanlarının araşdırılmasıdır.

Qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli nəzərdə tutulmuşdur.

- MSFD tipli fotoqəbuledicilərin fiziki işləmə mexanizminin nəzəri və təcrübi öyrənilməsi;
- MSFD tipli fotoqəbuledicilərin parametrlərinin temperatur sabilliyinin tədqiqi;
- Səthi piksellə MSFD fotoqəbuledicilərin parametrlərinin təkmilləşdirilməsi metodlarının işlənməsi;
- Dərin piksellə MSFD fotoqəbuledicilərin işlək parametrlərinin tədqiqi və onların analoqlarla müqayisəsi;
- Dərin piksellə MSFD tipli fotoqəbuledicilər əsasında matrislərin hazırlanması imkanlarının öyrənilməsi;
- MSFD tipli fotoqəbuledicilər və müxtəlif növ ssintilyatorlar əsasında hazırlanan detektorların qamma şüalara, beta zərrəciklərə və neytronlara həssaslığının tədqiqi;
- MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanan ssintilyasiya detektorlarının müxtəlif enerjili qamma şüalara həssaslığının tədqiqi;

- MSFD əsaslı ssintilyatorlu detektorla impuls formasına görə şüalanma növünün ayırdetməsinin tədqiqi;
- MSFD fotodiodların radiasiya davamlılığının öyrənilməsi;
- MSFD əsaslı spektrometrin elektronik hissələrinin işlənməsi;
- MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanan spektrometrlərin parametrlərinin ölçülməsi;

Tədqiqat obyektı və metodları:

Heyger rejimində işləyən silisium əsaslı mikropikselli selvari fotodiodlar və onlar əsasında hazırlanmış ssintilyatorlu spektrometrik modullardır. Tədqiqat obyektinin xassələri müxtəlif radiasiya şəraitində və xarici təsirlərdə öyrənilmişdir. Cihazdan alınan siqnalın amplitudu riyazi modelləşdirilmə metodundan və ionlaşdırıcı şüalanmanın növünü təyin etmək üçün isə impuls formasına görə ayırd etmə metodundan istifadə edilmişdir.

Müdafiyyə çıxarılan əsas elmi müddəalar aşağıdakılardan ibarətdir:

1. Dərin piksellı MSFD fotodiodların qoruyucu stop-kanalını və pikselin ölçüsünü təkmilləşdirərək yeni selvari fotoqəbuledicinin işlənməsi və sınaqdan keçirilməsi.
2. Səthi piksellı MSFD fotodiodların gücləndirmə əmsalını, qeydetmə effektivliyini artırmağa və maya dəyərini aşağı salmağa imkan verən yeni strukturun işlənməsi.
3. MSFD tipli fotodiodların işləmə mexanizmini düzgün ifadə etmək üçün həcmi yüklər oblastının müqavimətini nəzərə alan yeni iterativ modelin işlənməsi.
4. Səthi piksellı MSFD fotodiodların cəldliyinə ifrat gərginliyin və parazit tutumun təsirinin nəzəri öyrənilməsi.
5. MSFD tipli fotodiodlar əsasında hazırlanacaq radiasiya detektorları üçün gərginlik çeviricisinin və 45 MHz buraxma zolağı olan siqnal gücləndiricisinin işlənməsi və onların geniş temperatur intervalında yoxlanması.
6. MSFD-3NK və MSFD-3N1P tip fotodiodlar və müxtəlif tip üzvi ssintilyator əsaslı ionlaşdırıcı şüa detektorlarının işlənməsi və belə detektorlarda qamma şüaları Kompton kənarına görə identifikasiya qanuna uyğunluğunun müəyyən edilməsi.

7. MSFD-3NK və qeyri-üzvi ssintilyator əsasında yeni qamma spektrometrin hazırlanması və onların analoqları ilə müqayisəsi.
8. MSFD-3NK tipli foto qəbuledicilərin qaranlıq cərəyanına,deşilmə gərginliyinə, xüsusi tutumuna və enerji ayırdetməsinə ≈ 1.25 MeV enerjili qamma şüaların təsirinin öyrənilməsi.
9. MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış detektor modullarında istifadə edilən LT-1357 tipli mikro-çip əməliyyat gücləndiricilərin fiziki xassələrinə $\approx 1,25$ MeV enerjili qamma şüaların təsirinin araşdırılması.

Tədqiqat nəticəsində əldə edilən elmi yeniliklərəşağıdakılardan ibarətdir:

- MSFD tipli fotoqəbulediciləri 1,17 MeV – 1,33 MeV enerjili qamma şüaları ilə 250 kQr dozaya qədər şüalandırdıqdan sonra fotodiodun qaranlıq cərəyanı düz və tərs istiqamətdə xətti olaraq artır;
- MSFD fotodiodlarındeşilmə gərginliyinin idarə edilməsinin mümkünlüyü piksellərin ölçülərini və aşqar konsentrasiyasını dəyişməklə mümkün olduğu göstərilmiş və zəif oblastın konsentrasiyasını $3,7 \times 10^{15}/\text{sm}^3$ kimi artırıdıqdadeşilmə gərginliyini 60 V-a qədər azaltmağın mümkün olması.
- Selvari fotodiodların işləmə mexanizmini düzgün ifadə edən yeni modelin işlənməsi. Yeni modelə əsasən müəyyən edilmişdir ki, SPAD fotodiodların gücləndirmə əmsalı R_s həcmi yüklər oblastının müqavimətindən asılı olaraq maksimum real qiymətdən 2 dəfə böyük ola bilər.
- SPAD fotodiodların ön frontunun davam etmə müddətini yaxşılaşdırmaq üçün fotodiodların ifrat gərginliyini artırmaq lazımdır, eləcə də fotodiodun parazit tutumu pikselin tutumunun 1 % -dən yüksək olmalıdır.
- Bizim tərəfimizdən hazırlanmış MSFD fotodiodlarındeşilmə gərginliyi sabiti 61 mV olmuş, MPPC fotodiodlarına nisbətəndeşilmə gərginliyi sabiti 7 % daha az olmuş və qeydetmə effektivliyi 5 dəfə yüksək olmuşdur.
- Müəyyən edilmişdir ki, MSFD fotodiodlarının qaranlıq sayı temperaturdan asılı olaraq eksponensial qanunla dəyişir və xarici mühitin temperatur fərqi -

80 °C olduqda qaranlıq say 169 dəfə azalmışdır. Qaranlıq sayın belə azalması generasiya cərəyanının azalması hesabına baş vermişdir.

- MSFD-3NK fotodiodları üçün 16 elementli matris hazırlanmışdır. Hazırlanmış matrisin ümumi sahəsi 289 mm^2 ($17 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$) və aktiv sahəsi isə 219 mm^2 olmuşdur. Yeni 16 elementli matrisin həndəsi faktoru 76 % olmuşdur. Bu matrislər yüksək enerjilər fizikası və PET üçün optimal qeydedici hesab edilmişdir.
- Müəyyən edilmişdir ki, MSFD və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorları qamma şüaları Kompton kənarına görə fərqləndirir və detektorla qeyd edilən siqnalın amplitudu enerjidən asılı olaraq xətti dəyişir: $ADC=535.22+E_{\text{Kompton kənarı}} \times 0.31$. Bununla yanaşı MSFD və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar enerjisi təqribən 0, 626 MeV olan mono energetik elektrona uyğun gələn enerji ayırdetməsi 22 % olmuşdur. Göstərilmişdir ki, MSFD və p-terfenil ssintilyator əsaslı hazırlanmış detektorlar qamma sayğaclarının hazırlanmasında tətbiq oluna bilər.
- MSFD fotodiodlar əsasında matrislərin hazırlanması, elementlərin ardıcıl birləşməsi zamanı matrisin tutumu elementlərin sayı qədər azalmış və enerji ayırdetməsi 20 % alınmışdır. MSFD fotodiodlar paralel qoşulduqda isə matrisin tutumu elementlərin sayı qədər artmış və enerji ayırdetməsi ~18 % alınmışdır. Alınan nəticələrdən müəyyən edilmişdir ki, sayğac rejimində və uçuş müddətinin təyin edilməsində MSFD fotodiodların ardıcıl birləşməsi və spektrometrik cihazların hazırlanmasında isə paralel birləşməsindən istifadə daha effektivdir;
- LFS+p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar 0,662 MeV enerjili qamma şüaların və 0,626 MeV enerjili monoenergetik beta zərrəciklərin ssintilyatorlarda yaratdığı impulsları formasına görə bir-birindən ayırdetməyə imkan verir;
- MSFD-3NK fotodiodları və Yaponiyanın Hamamatsu şirkətinin istehsalı olan MPPC-S12572-010P fotodiodları LFS ssintilyatoru əsasında hazırlanmış

detektorların 0,26 MeV – 1,33 MeV enerji intervalında həssaslığı tədqiq edilmiş və 0,662 MeV enerjili qamma şüası üçün MSFD foto qeydedici əsaslı detektor analoquna nisbətən 34 % daha kiçik enerji ayırdetməsi göstərmişdir. Alınmış nəticə MSFD-3NK fotodiodlarının analoqlarına nisbətən spektroskopik təcrübələr üçün daha optimal olduğunu göstərmişdir.

- Selvari fotodiodların əsasında hazırlanacaq qeydedicilər üçün yeni gərginlik çevirici, gücləndiricilər, diskriminatorlar və elektronik hissələrin simulyasiyası hazırlanması;
- Standart CMOS texnologiyası əsasında hazırlanması nəzərdə tutulan yeni tipli MSFD fotodiodların hazırlanması təklif edilmişdir. Təklif edilən yeni qurğuda səthi piksellə analoqlarından fərqli olaraq, söndürücü müqavimət olaraq çox saylı p-n keçidlərdən istifadə edilmiş və nəticədə qurğunun fotonları qeydetmə effektivliyi (və ya kvant effektivliyi) artmışdır. Qurğunun gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün p-n keçidlərin sayını artırmaq təklif edilmişdir;

İşin nəzəri və praktiki əhəmiyyəti:

İlk dəfə olaraq MSFD tipli fotoqəbuledicilərdə selvari prosesi düzgün ifadə edən yeni model işlənmişdir. Yeni model göstərmişdir ki, MSFD-lərin gücləndirməsi həcmi yüklər oblastının müqavimətindən asılı olaraq dəyişir. MSFD fotodiodların parametrlərini yaxşılaşdırmaq üçün yeni təkliflər verilmişdir. Bu təkliflər əsasında MSFD fotodiodların gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün kiçik ölçülü p-n keçidlərə düşən gərginlikdən istifadə edilmişdir. P-n keçidlərin sayını artırmaqla ifrat gərginliyi, foton qeydetmə effektivliyini artırmaq və maya dəyərini aşağı salmaq mümkün olmuşdur. MSFD fotodiodların parametrlərinin təkmilləşdirilməsi üçün pikselin radiusunun, fon konsentrasiyasının və anti-qaytarıcının seçilməsi prinsipləri öyrənilmişdir. MSFD və müxtəlif ssintilyatorlu detektorlar üçün elektronik hissələr simulyasiya edilmiş və dövrlər işlənmişdir. Hazırlanmış detektor modulu əksər analoqlarından fərqli olaraq 0,026 MeV – 4,44 MeV enerji intervalında xətti kalibrləmə əyrisinə malik olmuşdur. Detektorların beta, alfa zərrəciklərlə yanaşı neytronlara qarşı həssaslıqları tədqiq edilmişdir. Hazırlanmış detektorlarda

Yaponiyanın Hamamatsu şirkətinin MPPC-S12572-010P fotodiodu ilə alınmış nəticələrlə müqayisə edilmiş 34 %-ə qədər yaxşı enerji ayırdetməsi alınmışdır. MSFD fotodiodlar əsasında matrislərin hazırlanması, onların aşağı temperaturalarda işləməsi və eyni ilə 1,17 MeV və 1,33 MeV enerjili qamma şüaların MSFD fotodiodların xassələrinə təsiri öyrənilmişdir. Hazırlanmış detektor modulları yüksək enerjilər fizikasında, kosmik fəza tədqiqatlarında, tibbdə, təhlükəsizlik sahəsində, qamma spektroskopiyada və sənayedə geniş tətbiq oluna bilər.

İşin nəticələrinin təsdiq edilməsi və tətbiqi:

Dissertasiya işinin əsas nəticələri

- Beynəlxalq Konfrans «Ssintilyasiya Materialları Mühəndisliyi və Radiasiya Texnologiyaları » (2016, Minsk-Belarusiya),
- Radiasiya Görüntü Dedektorları üzrə Beynəlxalq seminar, iWoRID-2016 (2016, Barselona-İspaniya),
- Müxtəlif Tədqiqat Sahələrində Radiasiya və onun Tətbiqlərinə dair 3-cü Beynəlxalq Konfrans, (2015, Çernoqoriya)
- Silisium Fotoelektron Gücləndiricilərin İnkişafına dair Beynəlxalq Konfrans (2018, Switziqer - Almaniya)
- 8-ci beynəlxalq konfrans Fotoqeydetmədə yeni inkişafılar (2017, Tours- Fransa)
- “Nüvə Elmləri və Texnologiyaları” Beynəlxalq Elmi Forumu (2018, Qazaxıstan)
- Yarımkeçirici İz Dedektorlarının İnkişafına və Tətbiqinə dair 12-ci Beynəlxalq "Hiroşima" Simpoziumu (2019, Hiroşima-Yaponiya)

kimi beynəlxalq konfrans və seminarlarda müzakirə edilmişdir.

Çap edilmiş işlər. Dissertasiyanın mövzusu üzrə 22 elmi iş dərc olunmuşdur. Bu işlərdən 15-i AAK tələblərinə cavab verən jurnallarda, digərləri isə Beynəlxalq konfrans və seminarlarda müzakirəsi aparılmış və tezislər şəklində dərc edilmişdir.

Dissertasiya işinin yerinə yetirildiyi təşkilatın adı:

Təqdim edilən dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutunun “İnnovativ ionlaşdırıcı şüa qəbulediciləri” laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir.

Dissertasiyanın quruluşu və həcmi. Dissertasiya işi titullar sənədi-1 sənəd, məndəricat- 2 sənəd (2801 işarə), giriş- 8 sənəd (14518 işarə), 1-ci fəsil- 66 sənəd (132583 işarə), 2-ci fəsil- 22 sənəd (38615 işarə), 3-cü fəsil- 55 sənəd (87456 işarə), 4-cü fəsil- 44 sənəd (72177 işarə), 5-ci fəsil- 45 sənəd (68755 işarə), 6-cı fəsil- 26 sənəd (41595 işarə), əsas nəticələr-2 sənəd (3166 işarə), dissertasiyanın əsas nəticələri üzrə çap olunmuş işlərin siyahısı-3 sənəd (52384 işarə) və 200 adda istifadə edilən ədəbiyyat siyahısı- 20 sənəd (38404 işarə) və şərti işarələrin siyahısı- 3 sənəd (2024 işarə) olmaqla ümumilikdə 297 sənəddən, o cümlədən 202 kompüter çap sənədi (443707 işarə), 118 şəkil və 3 cədvəldən ibarətdir. Dissertasiyada mövcud olan ümumi işarələrin həcmi 507328

I FƏSİL

MÖVCUD İONLAŞDIRICI RADİASIYA DETEKTORLARI

İonlaşdırıcı radiasiya detektorlarının hazırlanması və tətbiqi ilk dəfə Ernest Rezerfordun 1907-ci ildə apardığı təcrübələrlə aktualıq qazanmışdır. Rezerfordun təcrübələrində ionlaşdırıcı radiasiya detektoru olaraq ZnS ssintilyatoru və onda yaranan işıq parıltılarını qeyd etmək üçün mikroskopdan istifadə edərək göz vasitəsi ilə qeyd edilirdi. İonlaşdırıcı radiasiya qeydedicisi kimi istifadə edilən bu primitiv vasitə ionlaşdırıcı şüalanmanın növü, enerjisi və intensivliyi haqqında məlumat əldə etməyə imkan vermirdi [117, c.38, s.1- 38, 133, s.452]. Lakin aparılan bu təcrübə bir daha göstərmişdir ki, atom və nüvə daxilində gedən hadisələri müşahidə etmək üçün yeni tip qeydedici detektorların hazırlanmasına və tətbiqinə ehtiyac duyulur. Belə detektorların hazırlanması və təbii yüksək enerjilər fizikasının, astronomiyanın, kosmik fəza tədqiqatlarının, nüvə texnologiyalarının, tibbin və sənayenin hazırkı inkişafında xüsusi rol oynamışdır. İonlaşdırıcı radiasiya qeydediciləri olaraq hazırda müxtəlif növ detektorlar, o cümlədən, qaz sayğacları, fotoelektron gücləndirici əsaslı ssintilyatorlu detektorlar və yarımkeçirici əsaslı detektorlar geniş istifadə edilir [29, c.73, s. 26-35, 31,s.279; s.(8,14,15), 34, c.10, s. 1-7 , 55, c. 48, s. 84-90 , 61,c.7, s.1047-1050, 117, c.38, s.1- 38, 145, c.1,s. 228-240, 176, c. 294, s.283-289, 184, c.156 ,s. 236-243, 186, s.152; s.71, 190, c.483, s. 676-688].

1.1 İonlaşdırıcı zərrəciklərin və qamma şüaların mühitlə qarşılıqlı təsir mexanizmi

İonlaşdırıcı şüaların qeyd edilməsi prosesinin düzgün başa düşülməsi üçün ilk növbədə ionlaşdırıcı şüaların mühitlə qarşılıqlı təsir mexanizmlərini bilmək olduqca vacibdir. İonlaşdırıcı şüalanmanın mühitlə qarşılıqlı təsir mexanizmlərinin öyrənilməsi spektrdə müşahidə edilən piklərin və hadisələrin düzgün analiz edilməsində böyük rol oynayır. Təbii ionlaşdırıcı radiasiya mənbələri alfa zərrəciklər,

beta zərrəciklər, neytronlar və qamma şüaları kimi kvalifikasiya olunur [99, s.802; s. 30]. Bu şüalanma növündən xüsusi maraq kəsb edən qamma şüalardır. Qamma şüa mənbələri tibbdə, elmi təcrübələrdə və sənayedə geniş tətbiq edilir. Qamma şüalarının qarşılıqlı təsirdə olma dərəcəsi onların enerjisindən kəskin asılıdır. Belə qarşılıqlı təsir zamanı əsasən fotoeffekt, Kompton səpilməsi, cütün yaranması və foto nüvə reaksiyaları baş verir. Fotoeffekt hadisəsi aşağı enerjiddə, Kompton səpilməsi orta enerjiddə, cütün əmələ gəlməsi 1 MeV-dən böyük enerjilərdə, fotonüvə reaksiyaları isə 5 MeV-dən böyük enerjilərdə müşahidə edilir [33, s.529, 96, s.858, 143, s.560, 183, s.501]. Aşağı enerjili qamma şüalarının spektri çəkilən zaman fotonüvə reaksiyaları nəzərə alınmır. Buna səbəb olaraq isə əksər spektrometrlərin 1 keV–3 MeV intervalında işləməsidir [173, s.315].

Fotoeffekt zamanı qamma şüası atomun rabitə elektronlarından biri tərəfindən tam udulur. Fotoeffektin baş vermə ehtimalı effektiv kəskinlə xarakterizə edilir: $\sigma \sim Z^n$ burada Z -mühitin atom sıra nömrəsi, n isə qamma şüasının enerjisindən asılı olaraq 4 ilə 4,6 arasında dəyişir. Aşağı və yuxarı enerjilərdə bu asılılığın indeksləri dəyişə bilər [95, s.506; s.187, 151, c.10, s. 3141-3155]. Kompton səpilməsi zamanı qamma şüası sərbəst elektronla qarşılıqlı təsirdə olur və enerjisinin bir hissəsini elektrona verir.

Elektrona verilən enerji belə ifadə edilir: $E_e = E_q - E_q^I$ və ya $E_e = E_q \left\{ 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{E_q(1 - \cos\theta)}{m_0 c^2}\right)} \right\}$

burada E_q -düşən qamma şüasının enerjisi, E_q^I -səpilən qamma şüasının enerjisi, θ -səpilmə bucağı, m_0 -elektronun sükunət kütləsi və c - işıq sürətidir. Düsturdan görüldüyü kimi, qamma şüaları maksimum enerjisini 180 dərəcə bucaq altında səpildikdə verir [99, s.802; s.324]. Lakin reallıqda Kompton səpilməsi rabitədə olan elektrondan səpilir və rabitə enerjisi çox kiçik olduğundan enerji itkisində kəskin fərq yaratmır. Kompton səpilməsinin baş vermə ehtimalı əsasən mühitin atom sıra nömrəsindən asılıdır $\sigma \approx \text{const} \times Z$ [95, s.506; s.188]. Digər növ qarşılıqlı təsirlərdən fərqli olaraq cütün əmələ gəlmə prosesi həm elektronlarla, həm də nüvə ilə qarşılıqlı təsirdə olduqda yaranır. Cütün əmələ gəlməsi qamma şüasının nüvənin kulon sahəsi ilə qarşılıqlı təsiri zamanı yaranır. Qamma şüasının təsiri ilə cütün əmələ gəlməsi üçün qamma şüasının astana enerjisi belə ifadə edilir $E_{q, \text{ast}} = 2mc^2(1+m/M)$, burada

m-elektronun sükunət kütləsi və M-nüvənin atom kütləsidir. Bu zaman qamma şüası yox olur və elektron pozitron cütü yaranır. Bu hadisə yalnız enerjisi elektronun sükunət kütləsindən ($2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$) iki dəfə böyük olan qamma şüaları ilə baş verir. Cütün əmələ gəlməsi elektronun kulon sahəsində baş verə bilər, lakin bu hadisənin baş vermə ehtimalı kiçik olur. Elektronun kulon sahəsində cütün yaranması prosesinin baş verməsi üçün yuxarıda yazılmış ifadədə $m=M$ götürsək, qamma şüasının enerjisi elektronun sükunət kütləsindən dörd dəfə böyük olduğu alınır. Cütün yaranması zamanı yeni yaranan elektron və pozitronlar öz enerjilərini mühit daxilində itirirlər və termal enerjiyə yaxınlaşırlar. Bu zaman pozitronlar mühitin rabitə elektronları ilə anihilyasiya edilərək enerjisi 511 keV olan iki qamma şüası buraxır. Lakin realıqda anihilyasiya olunan qamma şüalarının enerjisi nəzəri hesablanan qiymətdən təqribən 7.7 eV fərqlənir. Bu fərq elektronun rabitə enerjisi hesabına yaranır. Cütün əmələ gəlmə hadisəsi təqribən 1 ns müddətində baş verir. Detektorlarda yaranan yükün toplanma müddətinin 100 ns -lər tərtibində olduğundan anihilyasiya zamanı yaranan 511 keV enerjili iki qamma şüasının enerjisi 1022 keV olan bir hadisə kimi görünür. Cütün əmələ gəlmə prosesinin baş vermə ehtimalı mühitin atom sıra nömrəsindən asılıdır: $\sigma_{\text{pair.nuc}} = 4\alpha r_e^2 Z^2 \times \left(\frac{7}{9} \ln \left(\frac{183}{Z} \right) - \frac{1}{54} \right)$; burada r_e - elektronun klassik radiusu, α - incə quruluş sabitidir. Cütün əmələ gəlmə hadisəsi 10 MeV enerjilərdən böyük qiymətlərdə üstünlük təşkil edir [106, s.430, 180, s.763; s.97].

Yüklü zərrəciklərin maddə ilə qarşılıqlı təsiri atomların həyacanlandırma, ionizasiya, tormozlanma şüalanması, Çerenkov şüalanması və nüvə reaksiyaları ilə nəticələnə bilər [89, c.86, s.228-252, 104, c.75, s.1220-1231, 172, c.307, s.1085-1088]. Qamma şüalardan fərqli olaraq yüklü zərrəciklər həm elektronlarla, həm də nüvələrlə qarşılıqlı təsirdə ola bilər. Nüvələrlə qarşılıqlı təsirdə olduqda tormozlanma şüalanması və nüvə reaksiyaları müşahidə edilir. Yüklü zərrəciklər elektronlarla qarşılıqlı təsirdə olduqda isə həyacanlandırma, ionizasiya və Çerenkov şüalanması müşahidə edilir [96, s.858; s.206]. Yüklü zərrəciklər istiqamətini yalnız nüvə ilə

qarşılıqlı təsirdə olduqda dəyişir və belə elastik toqquşma zamanı çox az enerji itkisi olur. Yüksək enerjili zərrəciklər atomun elektronlarla qeyri-elastik qarşılıqlı təsirdə olduqda elektrona verə biləcəyi maksimum enerji (W_{\max}) bu ifadə ilə hesablanır:

$$W_{\max} = \frac{2 \times m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{m_e \times 2 \times \gamma}{M} + \left(\frac{m_e}{M}\right)^2},$$
 burada m_e - elektronun kütləsi, c - işıq sürəti, v - zərrəciyin

sürəti, $\beta = \frac{v}{c}$, γ - relyativistik parametr, M - ionlaşdırıcı zərrəciyin kütləsidir [97, c.38,

s.1-1676]. Ağır ionlaşdırıcı zərrəciklər üçün $\frac{m_e}{M} \ll 1$ olduğundan, maksimal verilə

biləcək enerji sadələşərək belə ifadə edilir: $2 \times m_e c^2 \gamma^2 \beta^2$ [89, c.86, s. 228-252].

Yüksək enerjili zərrəciklər enerjilərinin bir hissəsini nüvələrlə qarşılıqlı təsirdə olaraq tormozlanma şüalanması buraxılması nəticəsində itirirlər. Bu zaman itirilən enerji aşağıda göstərilən ifadə ilə hesablanır :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Brem}} = E \times 4 \frac{Z(Z+1)}{137} \rho \times \left(\frac{e^2}{m_e c^2}\right)^2 \left(\ln\left(\frac{2 \times E}{m_e c^2}\right) - \frac{4}{3}\right) \quad (1.1.1)$$

Burada ρ – mühitin sıxlığı, e -elektronun yükü, c -ışıq sürəti, Z - uyğun olaraq mühitin atom sıra nömrəsi və E -isə ionlaşdırıcı zərrəciyin yüküdür [180, s. 763; s.128]. Bu ifadədən göründüyü kimi, tormozlanma şüalanması yüngül zərrəciklərlə daha aşağı enerjilərdə buraxılır. Yuxardakı ifadəni sadələşdirərək bu formada yazmaq olar:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{Brem}} = \frac{E}{X_0}.$$
 Bu ifadənin hər iki tərəfini inteqrallasaq $E(x)=E_0 \exp(-x/X_0)$

alınır.

Beləliklə, ionlaşdırıcı zərrəciyin enerjisi maddənin daxilində qaçış məsafəsindən (x) eksponensial asılı olaraq öz enerjisini tormozlanma şüalanması hesabına itirir. Əgər $x=X_0$ olarsa bu zaman zərrəciyin tormozlanma hesabına itirdiyi enerji $E=0,307 \times E_0$ olur. Enerjinin bəzi qiymətlərində tormozlanma hesabına itirilən enerji ionizasiya hesabına itirilən enerjiyə bərabər olur. Enerjinin bu qiyməti kritik qiymət adlandırılır və elektron üçün belə hesablanır $E_c = 800 \text{ MeV} / (Z+1,2)$.

Məsələn, silisium yarım keçiricisində ionizasiya və tormozlanma şüalanması hesabına itirilən enerjinin eyni olması üçün düşən beta zərrəciyinin enerjisi 39,3 MeV olmalıdır [180, s. 763; s.128].

Enerjisi yüksək olan yüklü zərrəciklər maddə ilə qarşılıqlı təsirdə olduqda Çerenkov şüalanmasında müşahidə edilir. Çerenkov şüalanması yüklü zərrəciyin sürəti işığın həmin mühitdəki faza sürətindən böyük olduqda baş verir. Çerenkov şüalanmasının yaranma mexanizmi yüksək enerjili zərrəcik mühitdən keçərkən onun atomlarını polyarizasiya edir və bu atomlar əvvəlki hala qayıtdıqda enerjisi 1,55 eV (800 nm) – 4.13 eV (300 nm) intervalında olan işıq fotonları buraxır. Bu foton spektrinin maksimum qiyməti təqribən 3,38 eV (366 nm) düşür, yəni ultrabənövşəyi oblastda şüalanma üstünlük təşkil edir [198,c.11, s.1-31]. Bu şüalanma zərrəciyin düşmə istiqamətindən θ_c ($\theta_c = \arccos(\frac{c}{n \times v})$) bucaq altında buraxılır [180, s.763;s.126]. Yüklü zərrəciklərin Çerenkov şüalanması yaratması üçün onların enerjisi astana enerjisindən böyük olmalıdır ($T_{ast} = 0.511(\frac{n}{\sqrt{n^2-1}} - 1)$) [197, c.57, s.3800-3806]. Bu ifadədən göründüyü kimi zərrəciyin kütləsi artdıqca Çerenkov şüalanmasının astana enerjisi də artır. Şüalanma hesabına yaranan fotonların sayı aşağıda verilmiş ifadə ilə müəyyən edilir:

$$\left(\frac{d^2N}{dEdl}\right)_{ch} = \frac{\alpha}{c \times h} \times \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) = \frac{\alpha}{c \times h} \times \sin^2 \theta \quad (1.1.2)$$

Burada N- dE enerji intervalında dl yolunda yaranan fotonların sayı, $n(\lambda)$ – optik sındırma əmsalı, θ -Çerenkov şüalanmasının buraxılma bucağı, h - Plank sabiti, c - işıq sürəti və $\beta = \frac{v}{c}$ - zərrəciyin sürətinin işıq sürətinə nisbətidir [66, s. 1251; s.132].

Yüklü zərrəciyin Çerenkov şüalanması hesabına itirdiyi enerji çox kiçik olur və ionizasiya hesabına itirilən enerjinin bir neçə faizini təşkil edir. Buna misal olaraq yüksək enerjili zərrəciklərmühitdən keçərkən Çerenkov şüalanması hesabına hər

MeV enerjiyə təqribən 100-300 foton yaratmasını göstərmək olar. İtirilən bu enerji ionizasiya hesabına itirilən enerjinin 0,1 % təşkil edir [197, c.57, s. 3800-3806].

Ağır yüklü zərrəciklərin maddələrlə qarşılıqlı təsiri zamanı ionizasiya hesabına itirdiyi enerjini xarakterizə etmək üçün Beta-Blox ifadəsindən istifadə edilir :

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right)_{col} = K \times \frac{Z_{nuc}}{A} \left(\frac{Z^2}{\beta^2}\right) \times \left(\frac{1}{2} \ln \left[\frac{2c^2 m_e \beta^2 \gamma^2 E_{Tmax}}{I^2} \right] - \beta^2 - \frac{\delta(\beta)}{2} \right) \quad (1.1.3)$$

Burada $K = 4\pi \times r_e \times N_a \times m_e c^2$, r_e - klassik elektronun radiusu, Z - düşən zərrəciyin atom sıra nömrəsi (proton və alfa zərrəcik üçün Z qiyməti 1 və 2 olur), c - işıq sürəti, v - zərrəciyin sürəti, $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ - relyativistik parametr, ρ - maddənin sıxlığı, $\beta = \frac{v}{c}$ - zərrəciyin sürətinin işıq sürətinə nisbəti, Z_{nuc} - maddənin atom sıra nömrəsi, A - maddənin nisbi atom kütləsi, I - ionizasiya enerjisinin orta qiyməti və T_{max} - elektrona verilən maksimum enerjidir [61, s. 1251; s.6].

Beləliklə, ionlaşdırıcı zərrəciyin mühitlə qarşılıqlı təsiri zamanı itirdiyi tam enerjini aşağıdakı kimi ifadə etmək olar

$$-\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brem} \quad (1.1.4)$$

Göstərilən hər üç hadisəyə görə enerji itkisi zərrəciklərin identifikasiya və enerjilərinin müəyyən edilməsində geniş istifadə edilir. İonlaşdırıcı şüalanmanın detektorla qarşılıqlı təsiri zamanı onun enerjisinin detektorda tam itməsi və itirilən enerjinin elektron deşik cütlərinə çevrilərək itki baş vermədən elektrodda toplanması ionlaşdırıcı şüalanmanı xarakterizə edən kəmiyyətlərin müəyyən edilməsində əsas rol oynayır [92, s.802; s.44].

1.2. İonlaşdırıcı radiasiyanı qeydetmə metodları

Nüvə və yüksək enerjili zərrəciklər fizikasında aparılan təcrübələrin əsasını ilkin şüalanma və onun yaratdığı məhsulların qeyd edilməsi təşkil edir. Bu məqsədlə qaz sayğacları, ssintilyator əsaslı və yarımkeçirici əsaslı detektorlar geniş istifadə edilir [64, s.260, 67, s.1251; s.237,74, s.477; s.13, 102, s.361; s.179, 105, s.251; s.42, 135, s.441; s.96, 136, c.347, s.75-110, 138, c.34, s. 4594-4601, 138, c.45, s. 506-511, 184, c.156, s.236-243]. Bu zaman ionlaşdırıcı şüalanmanın qeyd edilməsi atomun elektronları ilə birbaşa qarşılıqlı-təsir və ya ikinci məhsulların təsiri ilə baş verir. Eyni bir detektor müxtəlif effektlərə görə fərqli növ şüalanmaların qeyd edilməsində istifadə oluna bilər [72, s. 497; 4, 68, 120, c.23, s.2561-2581,]. Misal üçün, Heyger-Müller sayğacı ionizasiya nəticəsində istənilən növ yüklü zərrəcikləri qeyd edə bilər [29, c.73, s.26-35, 145, c.1, s.229-240, 190, c.483, s.676-688]. Ssintilyasiya sayğaclarının qamma şüasını qeydetməsi onun enerjisindən asılı olaraq fotoeffekt, Kompton səpilməsi və ya cütün yaranması nəticəsində baş verir. Çerenkov sayğacları sürəti işığın mühitdəki sürətindən böyük olan zərrəcikləri qeyd etmək üçün istifadə edilir [192, c.2, s. 1-14, 197, c. 57, s. 3800-3806]. Sürətli neytronların qeyd edilməsi isə təpmiş sürətli protonların ionizasiya etməsi, termal neytronların qeyd edilməsi isə borun parçalanması zamanı yaranan alfa zərrəciyinin hesabına qeyd edilir [90, c.60, s.864-870]. Bu zaman istifadə edilən detektor bir şüalanma növü haqqında dəqiq məlumat versə də, digər parametrləri haqqında dolğun məlumat verə bilmir. Misal üçün, yarımkeçirici detektorlar alfa zərrəciyinin tam enerjisi haqqında dəqiq məlumat əldə etməyə imkan verir, lakin kiçik zaman ayırdetməsi əldə etmək mümkün olmur. Digər bir misal, Çerenkov sayğaclarını göstərmək olar bu detektorlar çox kiçik zaman ayırdetməsinə malikdir, lakin yerə görə pis ayırdetməsi mövcuddur. Zərrəciklər detektordan keçdikdə belə detektorların effektiv qeydetməsi (EQ) çox geniş oblastda dəyişə bilər. Birbaşa ionizasiya hesabına qeydedilmə zamanı EQ ~ 1 olur. Neytronların qeyd edilməsi zamanı effektiv qeydetmə yuxarı enerjilərdə bir neçə faiz, termal enerjilərdə isə vahidə kimi artır. Eynilə, qamma şüalarının qeyd edilməsi zamanı detektorların EQ-si enerjidən asılı olaraq dəyişir. İonlaşdırıcı

şüalanmanı qeyd etmək üçün istifadə edilən ideal detektor aşağıdakı parametrlərə malik olmalıdır: yüksək qeydetmə effektivliyi, yüksək sayma sürəti, yüksək enerji ayırdetməsi, xəttilik reaksiyası, istənilən ionlaşdırıcı şüalanmanı qeyd edə bilməsi, geniş enerji diapazonunda işləməsi, zərrəciklərin növünə görə diskriminasiyası və yüksək radiasiya davamlılığı [144, s. 166; s.39, 151, c.10, s. 3141-3155].

Ssintilyator əsaslı detektorlar ionlaşdırıcı radiasiyanı qeyd etmək üçün istifadə edilən əsas qeydedicilərdən biri sayılır. Bu tip detektorların qaz detektorlarından fərqli olaraq çox böyük üstünlükləri mövcuddur: sıxlığının yüksək olması, istənilən ölçüdə hazırlanması, ucuz olması və aşqarların əlavə edilməsi ilə ionlaşdırıcı şüalanmanı (qamma şüaları, beta, alfa zərrəcikləri və neytronları) qeyd etmə effektivliyinin kəskin yüksəlməsi [91, s. 376; s.18]. Bu isə ionlaşdırıcı şüaların enerjisini və selini düzgün təyin etməyə, başqa sözlə, radioizotopların növünü təyin etməyə imkan verir. Məhz buna görə də ssintilyatorlu detektorlar qaz sayğaclarından fərqli olaraq daha geniş tətbiq edilir. Ssintilyator detektorları əsas iki hissədən ibarətdir: ssintilyator və fotoqeydedici.

Ssintilyator - ionlaşdırıcı şüalanmanın enerjisini ultra bənövşəyi və görünən işıq dalğası oblastına çevirən materialdır. Ssintilyatorlardan ssintilyasiya fotonlarının buraxılması həyacanlanmış elektronların əsas hala keçidi zaman baş verir. Ssintilyatorlar qaz, maye və bərk halda olur. Bərk halda olan ssintilyatorlara əksər halda əlavə aktivatorlar vuraraq foton çıxışını artırırlar. Ssintilyator materialları şəffaf, temperaturdan zəif asılı olan və zədəsiz olmalıdır ki, əlavə foton itkisinə yol verilməsin. Ssintilyatorlar işıq çıxışına, maksimal şüalandırdığı fotonun dalğa uzunluğuna, sönmə müddətinə, sıxlığına və digər parametrlərinə görə xarakterizə edilir. Ssintilyasiya çıxışı udulan hər MeV enerjiddə yaranan fotonların sayını göstərir [66, s.1251; s.365]. Udulan enerjinin miqdarı artdıqca yaranan ssintilyasiya fotonlarının sayı da mütənasib olaraq artır. Ssintilyasiya çıxışı əlavə olaraq aşağıdakı parametrlərdən asılıdır: ionlaşdırıcı şüalanmanın növündən, enerjisindən və mühitin temperaturundan. Ssintilyatorların işıq çıxışı 6000 – 80000 foton arasında dəyişir. Xüsusi olaraq qeyd etmək lazımdır ki, ssintilyasiya fotonları hesabına itirilən enerji ionlaşdırıcı zərrəciyin itirdiyi enerjinin bir neçə faizini təşkil edir və itirilən enerjinin

əsas hissəsi ssintilyator daxilində itir. Bu səbəbdən də effektivlik kiçik alınır. İonlaşdırıcı zərrəcik ssintilyatorada udulduqda $N_i = E_i / \varepsilon$ sayda yüklər yaradır (ion yaradır) və burada E_i - düşən zərrəciyin enerjisi və ε - elektron deşik (ion) yaratmaq üçün lazım olan enerjidir. Bu zaman yeni yaranmış ionlar digər ionları cəzb edərək həyacanlanmış molekul yaradır və öz növbəsində özünə bir elektron cəzb edir. Bu proses həyacanlanmış molekulun öz enerjisini luminisent mərkəzlərə verməsi kimi baş verir. Lakin bu proses çoxda effektiv proses olmur və nəticədə enerjinin böyük hissəsi aşqar molekullara verilir. Belə prosesin effektivliyi ξ ilə ifadə edilir və ionlar tərəfindən aktivləşdirilən lüminisent mərkəzlərin sayı $N_{lum} = \xi \times E_i / \varepsilon$ olur. Lakin bu mərkəzlərin hamısı ssintilyasiya fotonları buraxmır. Bu hal kvant effektivliyi ilə xarakterizə edilir $q = N_s / N_{lum}$ burada N_s - buraxılan ssintilyasiya fotonlarının sayıdır. Son hər iki ifadədən istifadə etməklə buraxılan ssintilyasiya fotonlarının sayını tapmaq olar $N_s = q \times N_{lum} = q \times \xi \times E_i / \varepsilon$. Burada ε - elektron deşik və ya ion yaratmaq üçün lazım olan enerjidir və ssintilyatorlar üçün $\varepsilon = \gamma \times E_g$, γ -ssintilyatorlar üçün 3–8 arasında dəyişir və E_g - qadağan olunmuş zonanın enidir. Ssintilyatorun buraxdığı foton selinə uyğun gələn spektrin müşahidə edilən maksimumu oblastı ssintilyatoru xarakterizə edən maksimal şüalandırılan dalğa uzunluğu adlandırılır. Yuxarıda qeyd edilən ifadələrdən istifadə edərək ssintilyasiya fotonları hesabına itirilən enerjini hesablamaq üçün aşağıdakı ifadə alınır [180, s.763; s.334]:

$$E_s = N_s \times E_{mak} = \left(q \times \xi \times \frac{E_i}{\varepsilon} \right) \times \left(\frac{h \times c}{\lambda_{mak}} \right) \quad (1.2.1)$$

burada N_s - buraxılan ssintilyasiya fotonlarının sayı, $E_{mak} = \frac{h \times c}{\lambda_{mak}}$ ssintilyatorun spektrində maksimum dalğa uzunluğuna uyğun gələn fotonun enerjisi, q - elektronun yükü, ε - elektron deşik və ya ion yaratmaq üçün lazım olan enerji, h - Plank sabiti, c - işıq sürəti və λ_{mak} - maksimum dalğa uzunluğuna uyğun gələn fotonun dalğa uzunluğudur. Ssintilyatorun enerjiyə görə effektivliyini təyin etmək üçün bu ifadədən

istifadə edilir: $\eta = \frac{E_s}{E_i} = \frac{(q \times \xi \times \frac{E_i}{\varepsilon} \times \frac{h \times c}{\lambda_{mak}})}{E_i} = (q \times \xi \times \frac{h \times c}{\varepsilon \times \lambda_{mak}})$. Göründüyü kimi

ssintilyatorların effektivliyi əsasən buraxılan fotonun enerjisindən və yükdaşıyıcı yaratmaq üçün lazım olan enerjiden asılı olur. Maksimal effektivlik $q \times \xi = 1$ olduqda alınır. Əksər istifadə edilən ssintilyatorlarda effektivlik 1–30 % arasında dəyişir. Ssintilyatorların işıq çıxışı zərrəciyin növündən asılı olaraq da dəyişə bilər [180, s.763; s.335]. Bu zaman ağır zərrəciklər öz qaçış yollarının sonunda çox böyük sıxlıqda yükdaşıyıcılar yaradırlar və bu zaman yükdaşıyıcıların əksəriyyəti luminisent mərkəzlər tərəfindən tutulmadan rekombinasiya olunur, bu isə işıq çıxışı kəskin azaldır. Məhz bu səbəbdən 1 MeV alfa zərrəciyinin yaratdığı işıq çıxışı 100 keV qamma şüasının yaratdığı ssintilyasiya işığı tərtibində olur. Yuxarıda sadalanan parametrləri bizim təcrübələrdə istifadə edilən LFS ssintilyatorları üçün hesablamaq olar. Nəzərə alsaq ki, 1 MeV (1000 keV) enerjili qamma şüası LFS ssintilyatorunda dalğa uzunluğu 425 nm olan 35000 sayda foton yaradır. Bu zaman ssintilyasiya fotonlarının ümumi itirilən enerjinin neçə faizini təşkil etdiyini müəyyən etmək olar. Bir fotona uyğun gələn enerjinin $E = \frac{h \times c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 2,99 \times 10^8}{0,425 \times 10^{-6}} = 4,66 \times 10^{-19} \text{ C} = \frac{4,66 \times 10^{-19} \text{ C}}{1,602 \times 10^{-19}} = 2,91 \text{ eV}$ olduğu müəyyən edilir. Yekun yaranan ssintilyasiya fotonlarının tam enerjisi $E_f = 35000 \times 2,91 \text{ eV} = 101850 \text{ eV} = 101,85 \text{ keV}$ olur. Bu isə tam itirilən enerjinin $\eta = (101,85 \text{ keV} / 1000 \text{ keV}) \times 100 \% = 10,2 \%$ -ni təşkil edir. Bununla yanaşı ssintilyatorlarda işıq çıxışı temperaturdan asılı olaraq da sönmə müşahidə edilir. Temperatur artdıqca əksər ssintilyatorların işıq çıxışı azalır və bəzilərində bu dəyişmə daha kəskin olur. Ssintilyatorların buraxdığı fotonların dalğa uzunluğunun maksimumu əksər hallarda 390 – 550 nm oblastında yerləşir. Bu oblast isə əksər fotoqeydedicilərin işlək oblastına düşür [66, s.1251; s.435, 437].

Ssintilyatorları xarakterizə edən digər kəmiyyət ssintilyasiya hadisəsinin sönmə müddətidir. Sönmə müddəti ionlaşdırıcı şüalanma mühiti ilə qarşılıqlı təsirdə olduqdan sonra ssintilyasiya fotonlarının buraxmasının davam etmə müddətini göstərir. Ssintilyatorların sönmə müddəti 3 nsn – 1 mksn arasında dəyişir [97, c.38, s.1-1676]. Sönmə müddəti böyük olduqda siqnalın tam yaranması üçün böyük zaman tələb edilir və bu hal saygac rejimində işləyən detektorlar üçün əlverişsiz hal hesab edilir. Ssintilyatorun çıxışında müşahidə edilən foton seli impuls

paketi kimi buraxılır. Bu impulsun ön və arxa frontu zamandan asılı olaraq eksponensial qanunla dəyişir. Ön (L_r) və arxa front (L_d) zamandan asılı olaraq bu qanunla dəyişir [180, s.789;s.325]:

$$L_r \sim L_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau_r}}), \quad L_d \sim L_0 e^{-\frac{t}{\tau_d}} \quad (1.2.2)$$

burada L - hər hansı vahidlə ifadə edilmiş fotonun intensivliyi (amplitudu), L_0 - impulsun maksimumu və t - zamandır. Ön front üçün olan ifadədə $t = \tau_r$ qəbul etsək $L_r \sim L_0(1 - \exp(-1)) = 0,63 \times L_0$ və arxa front üçün isə $t = \tau_d$ qəbul etsək $L_d \sim L_0 \exp(-1) = 0,37 \times L_0$ alınır. Beləliklə, τ_r - müddəti maksimal amplitudun 63 %-i kimi lazım olan vaxt götürülür və τ_d - isə arxa frontda maksimumun 37 %-i uyğun gələn müddət kimi qəbul edilir. Ssintilyatorun sönmə müddəti nəinki ssintilyatorun növündən, həm də ionlaşdırıcı zərrəciyin növündən və enerjisindən də asılıdır. Sönmə müddətinin zərrəciyin növündən asılılığı onların ionizasiya enerjisi itkisinə görə baş verir. Məsələn, alfa zərrəciklər ssintilyatorlarda uzun müddətli halları daha çox doldururlar, bu halda elektronlar uzun müddət qalırlar və nəticədə əsas hala keçid üçün lazım olan davam etmə müddəti artır. Bəzi ssintilyatorlarda bu xassələrdən istifadə edərək zərrəcikləri impuls formasına görə diskriminasiya edilir. Bəzi hallarda ssintilyasiya fotonlarının buraxdığı fotonların dalğa uzunluğunu artırmaq üçün əlavə dalğauzuluq artırıcıdan istifadə edilir. Belə artırıcılar fotoqeydedicilərin həssaslıq oblastına görə seçilir. Ssintilyatorlarda yaranan fotonların fotoqeydediciyə çatdırılması olduqca əhəmiyyətlidir. Bəzi hallarda ssintilyatorun ölçülərinin foto qeydedicinin ölçülərinə uyğun gəlməməsi yaranan fotonların itkisinə səbəb olur. Bu məqsədlə işıq yönəldicilər istifadə edilir. Işıq yönəldicilər (İY) ssintilyator ilə fotoqeydedicini birləşdirir və fotonların ötürülməsi zamanı minimum foton itkisi baş verir. Işıq yönəldicilər müxtəlif konfigurasiyada hazırlansalar da onların əsas iş prinsipi işığın əks olunmasına əsaslanır. Işığın əks olunması zamanı bəzi hallarda işığın udulması da müşahidə edilir və bu səbəbdən də intensivlik azalır. Reallıqda bütün bucaqlar altında düşən fotonların tam əks olunaraq foto qeydediciyə çatması mümkün olmur. Bu

səbəbdən də İY bəzən əlavə materialardan da istifadə olunur. İY material kifayət qədər şəffaf olmalıdır ki, fotonlar udulmadan qeydediciyə çatsın. Bununla yanaşı, ssintilyatorların sındırma əmsalının fotodiodlar üçün optimal olmaması da əksər hallarda fotonların fotodiod tərəfindən qeydedilmədən səpilərək itməsinə səbəb olur. Bu məqsədlə xüsusi optik jellər istifadə edilir. Foton selində baş verən hər-hansı dəyişmə detektorların çıxışındakı siqnalın amplitudunun kəskin dəyişməsinə səbəb olur [99, s.802;s. 250].

Ssintilyator detektorunun digər əsas hissəsi fotoqeydedicidir. Fotoqeydedici ionlaşdırıcı şüaların yaratdığı ssintilyasiya fotonlarını qeyd etmək üçün istifadə edilir. Hazırda bu məqsədlə fotoelektron gücləndirici trubkalar, adi yarımkeçirici fotodiodlar, normal rejimli selvari fotodiodlar və Heyger rejimli selvari fotodiodlar istifadə edilir [18,s. 323-326, 118,s.376, 147,c.527, s.15-20].

1.3. Vakuum fotoelektron gücləndiriciləri və onlar əsaslı ssintilyator detektorları

Fotoelektron gücləndirici trubkalar və ya vakuum fotoelektron gücləndiriciləri (FEG) fotokatod materialından və ikinci elektron emissiyası olan kaskad qurğudan ibarətdir. İlk dəfə triod fotoelektron gücləndirici si 1935-ci ildə İams tərəfindən hazırlanmışdır. Bu tip fotoelektron gücləndirici katod, tək dinod və anoddan ibarət idi. Daha sonra 1936-cı ildə Zvorkin çox saylı dinodlardan ibarət olan fotoelektron gücləndirici hazırladı və bu gücləndiricidə elektronların idarə edilməsi elektrik və maqnit sahəsi hesabına baş verirdi. Daha sonra 1939-cu ildə Zvorkin və Racman elektrostatik fokuslama əsaslı hazırkı FEG-nin əsasını təşkil edən gücləndiricini hazırladılar. Hazırlanan bu FEG fotokatodu Ag-O-Cs, Ag-Bi-O-Cs və Sb-Cs əsasında hazırlanmışdır. Hazırlanan FEG-lər özlərində giriş pəncərəsi, fotokatod, gücləndirici diodlar, fokuslayıcı elektrod və anoddan ibarətdir [55, c.48, s.84-90, 109, c.567,s.236-238, 121, s.63-66].

Zəif işıq selini qeyd edən belə qeydedicilərin hazırlanması fotonun kvant təbiətinin, onun mühitlə qarşılıqlı təsir mexanizminin öyrənilməsini və qarşılıqlı təsir nəticələrinin elektrik siqnallarına çevirilməsi mexanizmlərinin öyrənilməsində böyük

rol oynamışdır. FEG-yə daxil olan fotonlar qeyd edilir və çıxış siqnalların yaranması bu ardıcılıqla baş verir [108, c.835, s. 94-98]: işıq giriş pəncərəsindən keçir və fotokatodda elektronları həyacanlandırır, fotoeffekt nəticəsində elektronlar vakuuma buraxılır, fotoelektronlar sürətləndirilir və fokuslayıcı elektrod vasitəsi ilə birinci dinoda yönəldilir; dinodlarda ikinci elektron emissiyası nəticəsində elektronların güclənməsi baş verir və bu hər dinodda təkrarlanır; gücləndirilmiş elektronlar axırınıc dinoddan anoda toplanılır və siqnal yaranması baş verir (şək. 1.3.1). Fotokatod materialını xarakterizə edən əsas kəmiyyətlərdən biri də kvant effektivliyidir. Kvant effektivliyi fotokatod üzərinə düşən fotonların elektronlara çevrilmə payını göstərir və belə ifadə edilir :

$$QE = \frac{1237 \times e}{h \times c} \times \frac{N_e}{N_\gamma} \quad (1.3.1)$$

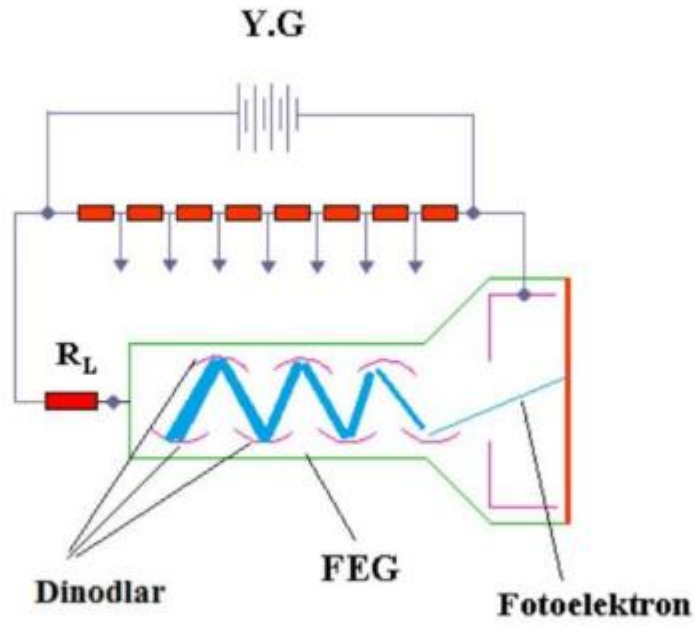
burada e – elektronun yükü, h – Plank sabiti, c – işıq sürəti, N_e – yaranan fotoelektronların sayı və N_γ – düşən fotonların sayıdır. FEG-lərin maksimal kvant çıxışı 10-30 % arasında dəyişir. Yaranan foto elektronların birinci dinoda toplanması katodun və dinodun formasından və birinci dinodla fotokatod arasındakı sahənin paylanmasından asılıdır [180, s.789; s.384]. Elektronların gücləndirməsi bu ardıcılıqla baş verir: birinci dinoda düşən fotoelektronların sayı n_k , dinodun gücləndirməsi g_1 olduqda yaranan ikinci elektronların sayı $n_k \times g_1$ olur və ikinci dinodda yaranan elektronların sayı $n_k \times g_1 \times g_2$ olur. Bu proses dinodların sayı qədər davam edir və sonda anoda toplanır. Elektronların sayı $n_a = n_k \times \prod_{i=1}^N g_i$ olur, burada n_a -anoda toplanan elektronların sayı və g_i –dinodların gücləndirmə əmsalidir. Beləliklə, FEG-nin gücləndirmə əmsalını belə ifadə etmək olar: $M = \frac{n_a}{n_k} = \prod_{i=1}^N g_i = 4^{10} \sim 10^6$ və nəzərə alsaq ki, dinodların sayı 10, hər dinodun gücləndirməsi 4-ə bərabərdir, bu zaman gücləndirmə əmsalı üçün 10^6 alınır [27, c.798, s.1-6,73, s.311; s.13]. Gücləndirmə əmsalının belə yüksək olması bu fotoqeydedicilərin bir sıra təcrübələrdə tətbiqinə imkan verir. Fotoelektron

gücləndiricisində gedən proses statistik proses olduğundan gücləndirmə əmsalında kənar çıxımlar müşahidə edilir.

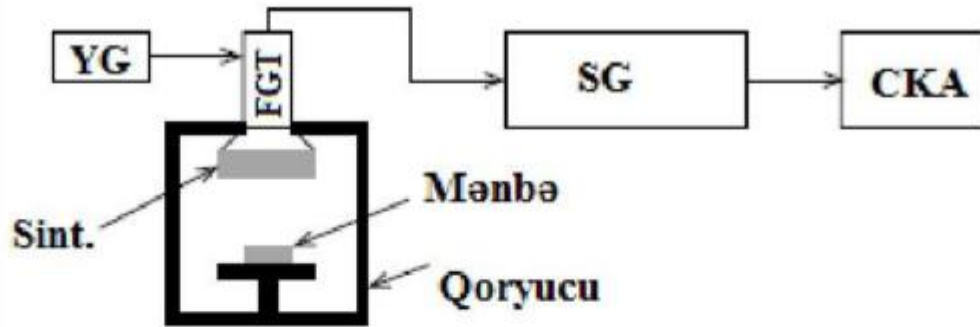
FEG-nin gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün dinodlara tətbiq edilən gərginliyi, və yaxud dinodların sayını artırmaq lazım gəlir. Bu tip qeydedicilər yüksək gərginlikdə işlədiyindən onların dinod gərginliyinin fluktasiyasının çox kiçik olması olduqca vacibdir.

FEG-lərin siqnal-küy nisbəti müxtəlif amillərdən asılıdır. Buna misal üçün fotokatodların və dinodların temperatur hesabına elektron emissiyasını, FEG-in korpusunda elektronların bir qismi şüşə ilə qarşılıqlı təsir hesabına əlavə ssintilyasiya fotonun yaranmasını, FEG-nin hazırlanması zamanı baş verən qeyri-dəqiqliyi və çirklənmələr hesabına yaranan qaranlıq cərəyanı göstərmək olar. Bununla yanaşı, FEG-lərin aşağıdakı əsas çatışmazlıqları mövcuddur: yüksək işçi gərginlik, kiçik kvant effektivliyi, maqnit sahəsinə həssas olması, zərbəyə davamsız olması, xəttliliyinin məhdud olması, vakuum texnologiyasından istifadə və.s. [73,s.311; s.31,195,201, 98,c.83, s. 1-8,139, c.58, s.3392-3402, 144, s.166, 146, c.486, s.164-169, 147, c.527, s.15-20, 148, c.567,s.48-56, 149, c.4, s. 1-57].

Şəkil 1.3.2-də ssintilyator və FEG əsaslı ionlaşdırıcı radiasiya detektorunun dövrəsi verilmişdir. Dövrə ssintilyator, FEG, yüksək gərginlik mənbəsi, gücləndirici, impuls formalaşdırıcı, multi kanallı analizator və ya sayğacdən ibarətdir. İonlaşdırıcı şüalar ssintilyator üzərinə düşdükdə ssintilyasiya fotonları yaradır. Yaranan bu fotonlar FEG-nin katodunda udularaq orada fotoelektronlar yaradır və onlar çoxsaylı dinodlarda gücləndirilərək anoda toplanır [193, c.503, s. 375-387]. Əksər hallarda detektorların çıxışında alınan impulsların amplitudunun kiçik və kəskin olması onların amplitudunun düzgün təyin edilməsində müəyyən çətinliklər yaradır. Reallıqda amplitudun ölçülməsi zamanı impulsun amplitudun maksimuma çatması və bu vəziyyətdə müəyyən qədər qalaraq qısa müddət ərzində sifira qədər azalması tələb olunur. Bu məqsədlə gücləndiricilərdən geniş istifadə edilir [28, c.14, s.1-5, 62, s. 749, 75, s.97-100, 79, s.389;s.62, 113,s.173;s.93, 125, s.340]. Detektorlarda yaranan siqnallar gücləndiricilər vasitəsi ilə gücləndirilir və bu zaman düşən ionlaşdırıcı şüanın enerjisindən asılı olaraq gücləndiricinin çıxışında müxtəlif amplitudlu və



Şəkil 1.3.1. Fotoelektron gücləndiricinin quruluşu [180, s.789;s. 368].



Şəkil 1.3.2. Ssintilyator və FEG əsəşli ionlaşdırıcı radiasiya detektoru [180, s.789; s.674].

müxtəlif enli siqnallar müşahidə edilir. Son dövrlərdə əməliyyat gücləndiriciləri (ƏG) spektroskopiya və dozimetriya sahəsində geniş tətbiq edilir. Əməliyyat gücləndiricisinin gücləndirmə əmsalını əsasən əks əlaqə müqaviməti təşkil edir. Əməliyyat gücləndiricisinin girişlərində mövcud olan hər hansı bir gərginlik fərqi əks əlaqə gücləndirməsi qədər gücləndirilir [187, s.8; s.895]. Əgər ƏG-sinin invert (-) girişindəki müsbət potensiallar fərqi noninvert (+) girişindəkidən böyük olarsa bu zaman çıxışda gərginliyi mənfi qütübündə müşahidə edilir. ƏG-si iki konfigurasiyada işləyirlər: invert və noninvert konfigurasiyası. Invert konfigurasiyasında giriş siqnalı ilə çıxış siqnalı fazasını dəyişir (şək. 1.3.3). Əgər girişə V_{in} gərginliyi verilsə bu zaman R_G giriş müqavimətindən axan cərəyan $I_1 = V_{in}/R_G$ olur. ƏG-lərin daxili impedansı sonsuz olduğu qəbul edildiyindən, invert girişindən heç bir cərəyan axmır. Bu səbəbdən I_1 cərəyanı yalnız əks əlaqə müqavimətindən axacaqdır. Bu zaman ƏG-si invert terminalına yerə nisbətdə təsir edərək çıxış gərginliyinin $V_{out} = I_1 \times R_F$ olmasını təmin edir. Burada R_F - əks əlaqə müqavimətidir. Cərəyan və çıxış gərginliyi üçün alınan ifadələrdən istifadə edərək gücləndirmə əmsalı üçün aşağıdakı ifadəni almaq olar:

$$V_p = -\frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_f \times I_1}{R_G \times I_1} = -\frac{R_f}{R_G} \quad (1.3.2)$$

Burada V_{in} - giriş gərginliyi, V_{out} - çıxış gərginliyi, R_F - əks əlaqə müqaviməti və R_G - giriş müqavimətidir. ƏG-lərinin noninvert konfigurasiyası şəkil 1.3.3 (b)- də göstərilmişdir. Bu zaman giriş və çıxış siqnalları eyni bir fazada olur. Belə konfigurasiyanın gücləndirmə əmsalı aşağıdakı kimi hesablanır [187, s.895; s.8].:

$$V_p = -\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_f}{R_G} \quad (1.3.3)$$

ƏG-lərin gücləndirmə əmsalının seçilməsi zamanı müqavimətlərin seçilməsinə xüsusi diqqət verilir. Əgər seçilən müqavimətlər çox kiçik olarsa bu zaman ƏG işləməsi üçün böyük cərəyan tələb olunur və nəticədə ƏG-ləri qızır. Temperaturun artması

ƏG-lərinin parametrlərini dəyişməsinə və hətta sıradan çıxmasına səbəb olur. Digər tərəfdən ƏG-lərin gücləndirməsini təyin edən müqavimətləri çox böyük götürmək olmur. Buna səbəb küyün artması, parazit tutumun artması, buraxma zolağının azalması və siqnalın amplitudunda qeyri-stabillik müşahidə edilir. Bu səbəbdən bu müqavimətlər 10 Om və 1 MOm arasında seçilir. Gücləndiricilər həm siqnalın gücləndirməsini, həm də formalaşdırmasını təmin edir. Gücləndiriciləri xarakterizə edən əsas kəmiyyətlərdən biri də onların gücləndirmə əmsalını sabit saxlanmasıdır. Spektrometrik ölçmələr zamanı spektrin tam çəkilməsi zamanı gücləndirmə əmsalının dəyişməsi 0,003 % tərtibində olmalıdır ki, kiçik enerji ayırdetməsi alınsın. ƏG-lər əksər hallarda elektron dövrlərdə komparator kimi istifadə edilir [187,s.895;s.157].

Gücləndiriciləri xarakterizə edən digər bir kəmiyyət də onun həssaslığıdır. Həssaslıq $V_p/E \sim \text{mV/MeV}$ ifadə edilir. Bu həssaslıq detektorun tipindən əks əlaqə tutumundan asılı olur və belə ifadə edilir:

$$V_p = \frac{E \times e \times 10^6}{W \times C_f} = \frac{Q}{C_f} \quad (1.3.4)$$

burada $Q = E \times e \times 10^6 / W$ - ionlaşdırıcı şüalanma hesabına yaranan yüküdür, E - detektorda udulan enerji (MeV), C_f - əks əlaqə tutumu, e - elektronun yükü və W - elektron deşik cütü yaratmaq üçün lazım olan enerjidir. Əks əlaqə tutumu nə qədər kiçik olarsa, gücləndiricinin gücləndirməsi də o qədər böyük olur. Əgər 1 MeV enerjili şüalanma silisiumda udularsa, silisiumda elektron deşik yaratmaq üçün 3,62 eV enerji lazım olduğunu nəzərə alsaq və əks əlaqə tutumu olaraq $C_f = 0,5 \text{ pF}$ götürsək, onda həssaslıq üçün $V_p/E \sim 88 \text{ mV/MeV}$ alınır [93, s. 237; s.211].

Spektrometrin əsas hissələrindən biri də komparator sayılır. Komparatorun əsas məqsədi lazım olan siqnalların işlənməsinə, lazımsız siqnalların dövrəyə buraxılmasını və amplituda görə işləmə zolağını təmin edir. Komparatorlar əsasən ƏG əsasında təkmilləşdirilir. Reallıqda, gücləndiricinin çıxışında alınan siqnalın amplitudunda dəyişmə müşahidə edilir və bu dəyişmə elektronik küydən, yaranan

yükdən, toplanan yükdən və əsas xəttin dəyişməsindən asılı olaraq dəyişir. Bunun nəticəsində pikin yarımını artır və detektorların enerji ayırdetməsi pisləşir. Küyün dəyişməsindən asılı olaraq qeydedici sistemin siqnal-küy nisbəti müəyyən edilir. Başqa sözlə, qeyd edilən siqnalın amplitudu küydən kiçik olduğu halda bu hadisə siqnal kimi qeyd edilmir və siqnal küy fonunda itir [66, s.1251; s.64].

Spektrometr əsas hissələrindən biri də multikanallı analizatordur. Multikanallı analizatorların (MKA) əsas məqsədi verilmiş amplitud intervalında (gərginlik intervalında) müşahidə edilən impulsların amplitudunu və onların sayını qeyd etməkdir [26, c. 22, s. 1190-1201, 199, c.39, s.428-433]. Qeyd edilən impulsların amplitudu detektorda udulan enerji ilə mütnasib olaraq dəyişir. Bəzi hallarda qamma şüalarının spektrini çəkmək üçün tək kanallı analizatordan (TKA) istifadə etmək daha əlverişli sayılır. TKA-da iki elektronik astana sərhəddi mövcuddur: aşağı dərəcə səviyyəsi (ADS) E_a - hansı ki, gücləndirilmiş siqnalın amplitudu bu qiymətdən kiçik olarsa onlar bloklanır və yuxarı dərəcə səviyyəsində (YDS) isə gücləndirilmiş siqnalın amplitudu E_y böyük olan siqnallar bloklanır. Bu intervalı dəyişməklə müxtəlif enerjilərə uyğun gələn impulsların sayını tapmaq mümkündür [199, c.39, s.428-433]. Bu onu göstərir ki, TKA-dan istifadə etməklə də amplitud paylanma spektrinin qurulması mümkündür. Bu spektrin qurulması üçün çox uzun zaman müddəti tələb olunur. Bu yaxınlaşmada enerji ayırdetməsi pisləşir və kanaların sayının çoxaldılması çətinləşir. Bu çətinlik Analoq rəməm çeviricisindən (ARÇ) istifadə etməklə aradan qaldırılır. MKA-lar əsas bir neçə funksiyanı yerinə yetirir:

- gücləndiricinin çıxışda astana sərhədini keçən impulsları rədd edir;
- qeyd edilən siqnalların amplitudunu müəyyən edir və ona uyğun gələn hadisələrin amplituduna müvafiq olan kanalla ifadə edilən yaddaş yerinə hadisələrin sayını əlavə edir;
- nəticələri spektr formasında göstərir və məlumatların saxlama qurğusuna yazılmasına imkan verir.

Girişə verilən siqnalın MKA-da işlənməsi zamanı onun amplitudun ölçülməsi, saxlanması və digər zaman parametrləri şəkil 1.3.4-də göstərilmişdir. Burada T_p -pikin maksimumun müşahidə edilmə müddəti, T_{LG} - xətti inteqrallama müddəti (giriş

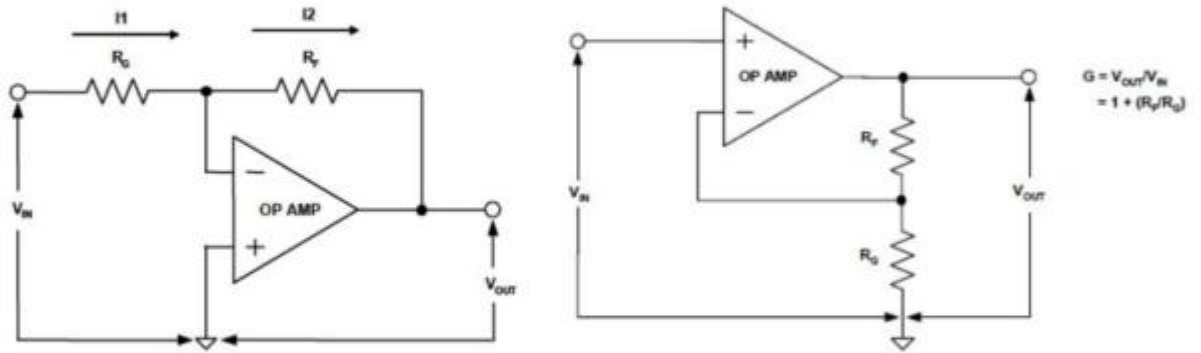
verilən siqnal TKA müqayisə edilməsi və pəncərəni açmasına sərf edilən müddətdir), T_F -düşmə müddəti, T_W -impulsun eni, T_D - ARÇ çevirmə vaxtı (analoq siqnalı rəqəmsal siqnala çevirmək üçün lazım olan müddətdir) və T_S -məlumatın yadda saxlanmasına sərf edilən müddətdir. Xətti giriş müddəti gücləndiricinin gücləndirməsindən asılı olaraq 2,5 dəfə zaman sabiti qədər fərqlənə bilər. Əgər nəzərə alsaq gücləndiricinin impulsunun formalaşdırma müddəti 100 nsan-dır. Bu zaman xətti giriş pəncərəsi $2,5 \times 100 \text{ nsan} = 250 \text{ nsan}$ müddətdən sonra açılacaq və siqnalı qəbul edəcəkdir. Çevirmə müddəti ARÇ asılı olaraq müxtəlif olur. ARÇ- lərinin çevirmə müddəti çevirmə sürətindən asılıdır [54, c.64, s.2543-2550, 94, c.2, s.100-103]. Hər çevrilən siqnal ARÇ-nin müəyyən bir N kanalına uyğun gəlir. Çevirmə müddəti belə ifadə edilir:

$$T_D = \frac{(N+X)}{v} + R \quad (1.3.5)$$

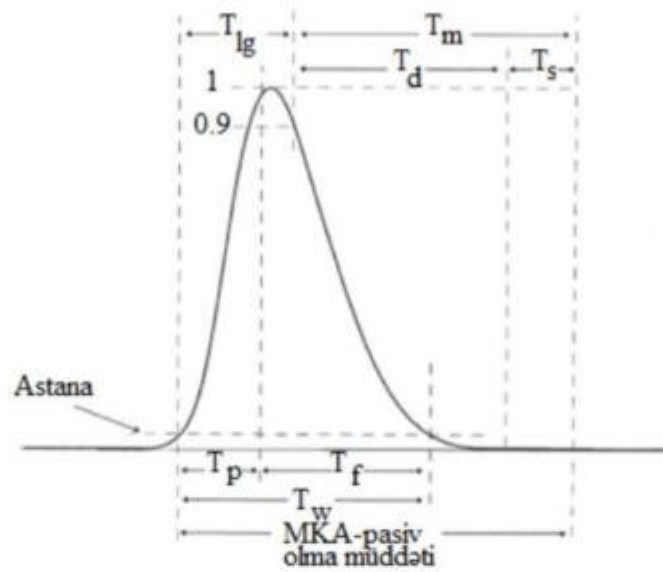
Burada N - kanalların sayı, X - rəqəmsal ofset (çox halda 0 qəbul edilir), v - sayma tərəfindən müəyyən edilir. Məsəl üçün sayma tezliyi 100 MHz, fiks olunmuş zaman müddəti 1,5 mksan olarsa, bu zaman çevirmə müddəti 1,5–83,4 mksan arasında dəyişir. Bütün məlumatlar binar formatda saxlanıldığından ayırdetmə bitlərlə tezliyi və R - fiks olunmuş bir zaman qiymətidir və xətti ramp (ingiliscə-linear ramp) xarakterizə edilir. Əgər nəzərə alsaq ki, ayırdetmə 8 bit ($2^8=256$), bu zaman analoq girişləri 256 fərqli səviyyədən biri kimi kodlaşdırmaq olar. Ayırdetmə çox vaxt voltlarla da ifadə edilir. ARÇ-lərin hər hansı kod səviyyəsini fərqləndirməsi üçün onların ən kiçik miqdarda bit (ingiliscə-least significant bit (LSB)) anlayışı istifadə edilir. ARÇ-nin gərginlik ayırdetməsi belə ifadə edilir [142, s.363-377].

$$E = \frac{\Delta U}{2^M} \quad (1.3.6)$$

Burada ΔU - ARÇ ölçəcəyi maksimum amplitud intervalı və M- intervalların sayı olub və ayırdetmə ilə mütənasibdir. Əgər nəzərə alsaq ki, ARÇ “+1”–“-1” V



Şəkil 1.3.3 Əməliyyat gücləndiricilərinin qoşulma dövrəsi [187, s.895; s.60].



Şəkil 1.3.4. MKA-da siqnalın işlənmə müddəti.

gərginlik intervalında işləyir və kanallarının sayı 10 bit ($2^{10}=1024$)-dir, bu halda amplituda görə ayırdetmə $E=(1V-(-1 V))/1024=0,0019=1,9$ mV alınır. Başqa sözlə, bu ARÇ-lər 1,9 mV kiçik olan siqnalları qeyd edə bilmir. Alınmış rəqəmsal siqnalın analiz edilməsi üçün xüsusi yazılmış alqoritmlərdən istifadə edilir. Yazılmış alqoritmlər detektorun tipindən və təyin etdiyi kəmiyyətdən asılı olaraq tərtib edilir [56, c.61, s.673-682].

MKA analizatorlarla işlədikdə spektrin ölçüsünün seçilməsi çox böyük əhəmiyyət kəsb edir. Kiçik spektrin ölçüsü (1 bin) götürüldükdə hər kanala çox böyük sayda hadisələr düşür və bu zaman iki yanaşı pikləri bir-birindən ayırmaq mümkün olmur. Böyük ölçülü spektrlərin seçilməsi pikləri ayırdetmək üçün ən əlverişli hal hesab edilir və bu zaman bir kanala düşən hadisələr kəskin azalır [99, s.796; s.688].

MKA-nı xarakterizə edən digər kəmiyyət onların xəttliliyidir. ARÇ-nin işləmə diapazonundakı xəttliliyinin kənara çıxması 0,025 %-dən böyük olmamalıdır. Bununla yanaşı, xarici mühitin temperaturundan asılı olaraq əksər ARÇ-lərində siqnalın amplitudu dəyişə bilər. Belə dəyişmə hər 10 °C üçün bir kanal sürüşmə qəbul edilir. Məhz bu səbəbdən də təcrübi şəraitin uzun müddətli ölçmələr zamanı sabit saxlamaq olduqca əhəmiyyətlidir. Əlbəttə, sadalanan bu amillər detektorun enerji ayırdetməsinə təsir edir [30, c.102, s. 1-4].

Gücləndirilmiş siqnal impuls formalaşdırıcı vasitəsi ilə formalaşdırılaraq, təcrübənin şərtindən asılı olaraq, sayğaca və ya çox kanallı analizatora yönəldilir. İmpuls rejimi nüvə spektroskopiyasında geniş istifadə edilir. Bu rejimdə hər ssintilyasiya impulsundakı fotonların sayı ssintilyatorada udulan qamma şüasının enerjisi ilə mütənasibdir və enerji ayırdetməsi udulan enerjinin kökaltı ifadəsindən asılıdır. Lakin bu hal yuxarı enerjili qamma şüalarında ödənmir, yəni enerji ayırdetməsi 50 % çox alınır. Belə fərqin yaranmasına ssintilyatorun həcmində ssintilyasiya effektivliyinin eyni olmaması ilə, katod həssaslığının bircins olmaması və ssintilyatorada enerji çevrilmə prosesində baş verən dəyişmələr səbəb ola bilər [66, s.1251; s. 438].

Ssintilyator üzərinə qamma şüası düşdükdə ssintilyasiya fotonlarının

buraxılması intensivliyi zamandan asılı olaraq belə dəyişir:

$$L(t) = \frac{n_{p,s}}{\tau} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.3.7)$$

burada $n_{p,s}$ - hər ssintilyasiya impulsunda olan fotonların orta qiyməti və τ - ssintilyatorun sönmə müddətidir. Bu zaman FEG-nin anoduna toplanan elektronların sayı $S(t) = L(t) \times R_{\delta}(t)$, burada $R_{\delta}(t)$ - FEG-nin impuls həssaslığıdır. Əgər FEG-nin impuls həssaslıq eninin ssintilyatorun sönmə müddətindən çox kiçik olduğunu nəzərə alsaq, onda anoda toplanan elektronların sayının $S(t) = \frac{n_{a,s}}{\tau} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ və anod cərəyanının $i(t) = \frac{q_{a,s}}{\tau} \times \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ olduğu alınır [73, s.311; s.6-7]. Burada $n_{a,s}$ - hər ssintilyasiya impulsundakı anod fotoelektronlarının orta sayıdır. Anod cərəyanı yükləmə müqaviməti ilə götürülən impuls gərginliyinin də artmasına səbəb olur $V_a(t) = \frac{q_{a,s}}{C} \times \frac{\theta}{\tau - \theta} \times (\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\theta}\right))$. Sıqnalın amplitudu üçün belə ifadə alınır:

$$V_a(t) = \frac{q_{a,s}}{C} \times \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{\frac{1}{1-\frac{\theta}{\tau}}} \quad (1.3.8)$$

burada $q_{a,s}$ - hər ssintilyasiya impulsundakı anod fotoelektronlarına uyğun gələn orta yük, τ - ssintilyatorun sönmə müddəti, θ - xarakteristik zaman sabiti ($\theta = R_L \times C$), R_L – yükləmə müqaviməti və C - tutumudur. Ssintilyatorlu detektorlarla işləyərkən $k = \frac{\theta}{\tau}$ nisbətində xüsusi diqqət etmək lazımdır. Bu nisbət həm sıqnalın amplituduna, həm də formasına ciddi təsir göstərir. Əgər detektorun xarakteristik zaman sabiti ssintilyatorun sönmə müddətindən çox kiçik olarsa, yəni $\theta \ll \tau$ onda, anodda yaranan sıqnalın amplitudu $V_a = \frac{q_{a,s}}{C} \times \frac{\theta}{\tau}$ olur. Bu hal sayğac rejimi üçün optimal hal hesab edilir. Detektorun xarakteristik zaman sabiti ssintilyatorun sönmə müddətinə bərabər olduqda $\theta = \tau$ sıqnalın amplitudu eksponensial qədər azalaraq $V_a = \frac{q_{a,s}}{C} \times \exp(-1)$

olur. Maksimal amplitud isə yalnız $\theta \gg \tau$ olduqda alınır, yəni $V_a = \frac{q_{as}}{C} = V_{a.mak}$ olur. Məhz qamma şüalarının enerjisi bu qeyd edilən amplitud vasitəsi ilə müəyyən edilir [99, s.802; s.294]. Qamma şüası detektora düşdükdə yaranan ssintilyasiya impulsunun uzun müddət davam etməsi yaranan fotonların sayında kənara çıxmaların müşahidə edilmə ehtimalını artırır. Əgər qəbul etsək ki, ssintilyasiya impulsundakı fotonların sayı ($n_{f,s}$) çox böyükdür, onda siqnalın yaranması Qauss paylanmasına tabe olur. Bu zaman yaranan fotoelektronların sayı da ($n_{f,e}$) Qauss paylanmasına tabe olur. Fotoelektronların sayında baş verən standart kənara çıxmanı tapmaq üçün bu ifadədən istifadə edilir: $\sigma_f = \sqrt{n_{f,e}}$, burada $n_{f,e}$ - yaranan fotoelektronların sayıdır. Bu kənara çıxma detektorların enerji ayırdetməsinə bir başa təsir edir. Spektrometləri xarakterizə edən əsas kəmiyyətlərdən biri də enerji ayırdetməsidir və FEG-lər üçün belə ifadə olunur:

$$R_e = 2.36 \sqrt{v_{np,s} + \frac{1-\rho+v_G}{\rho \times n_{p,s}}} \quad (1.3.9)$$

Burada ρ –fotokatodun kvant effektivliyi, v_G –gücləndirmə əmsalının nisbi dəyişməsi və $v_{np,s}$ - foton paylanmasının nisbi dəyişməsidir və empirik yolla hesablanır. Əgər düşən qamma şüasının enerjisini foto katoda düşən fotonların sayına nisbətini $k = \frac{E_{ph}}{n_{p,s}}$ qəbul etsək, onda enerji ayırdetməsi üçün belə ifadə alınır $R_e^2 = \alpha + \frac{\beta}{E_{ph}}$ burada $\alpha = 2.36^2 \times v_{n,p,s}$ $\beta = 2.36^2 \times (1 - \rho + v_G) \frac{k}{\rho}$ və E_{ph} -qamma şüasının enerjisidir [73, s.311; s.6-20]. Lakin təcrübələrdə siqnalların enerjiyə görə ayırdetməsini müəyyən etmək üçün yuxarıda qeyd edilən empirik sabitlərin tapılmasından istifadə edilmir. Bunun üçün Qauss paylanmasından istifadə edərək spektrdən pikin maksimumu müəyyən edilir: $G(H) = \frac{A}{\sigma \sqrt{2 \times 3.14}} * \exp(-\frac{(H-H_0)^2}{2 \times \sigma^2})$ burada, A - spektrdə müşahidə edilən pikin sahəsi, σ - amplitudun standart kənara çıxması və H_0 - pikin amplitudunun orta qiymətidir. Bu zaman pikin Qauss paylanmasına görə tapılan standart kənara çıxma ilə maksimum hündürlüyün yarım

eni (W) arasında bu cür asılılıq mövcuddur $W = 2.35 \times \sigma$, burada σ - amplitudun standart kənara çıxmasıdır [97, c.38, s.1-1676]. Siqnalların enerjiyə görə ayırdetməsini müəyyən etmək üçün $R = \sigma_H/H_0$ formasından istifadə edilir [97, c.38, s.1-1676]. Spektrometrik ölçmələr zamanı maksimumun yarım eninin dəyişməsinə əsas üç amil: yaranan yükün toplanmasındakı kənara çıxmalar, elektronik küylər və yükdaşıyıcıların yaranmasındakı fluktasiyalar təsir edir.

Ssintilyatorlu detektorları xarakterizə edən digər kəmiyyət zamana görə ayırdetmədir. Zamana görə ayırdetmə ssintilyatordan, FEG-dən və elektronik hissələrdən asılıdır. Zamana görə ayırdetmə detektorların qeydetmə performansını müəyyən edir. İonlaşdırıcı radiasiya detektorlarını xarakterizə edən digər parametr isə qeydetmə effektivliyidir. Detektorların qeydetmə effektivliyi detektorun materialından, həndəsi ölçüsündən, ionlaşdırıcı şüanın düşmə istiqamətindən, detektorun qalınlığından, düşən ionlaşdırıcı şüalanmanın tipindən və enerjisindən asılı olaraq dəyişə bilər [171, c.7, s.1040-1043]. Yüklü zərrəciklər (beta, alfa, proton və digər ağır yüklü zərrəciklər) birbaşa ionizasiya hesabına öz enerjilərini detektor daxilində itirdiklərinə görə, onların qeydedilmə effektivlikləri yüksək olur. Ssintilyatorun materialını dəyişməklə detektorların qeydetmə effektivliyini digər tip ionlaşdırıcı şüalar üçün dəyişmək mümkündür. Misal üçün NaI, CsI, LFS və digər ağır ssintilyator materialları qamma şüalarını qeyd etmək üçün əlverişli hesab edilir [12, s.189-191, 34, c.10, s.1-7, 36, s.252, 38, s.383-385, 39, c.36, s.20-22, 40, s.13, 42, c.21, s.20-22, 44, c.24, s.341-344, 46, s.1-6, 48, s.1, 49, s.2, 53, s.357-362, 83, c.38, s.1-11]. Yüklü zərrəcikləri qeyd etmək üçün yüngül plastik və maye ssintilyatorlar daha əlverişli hesab edilir. Lakin yüksüz və kütləsi az olan ionlaşdırıcı şüaları (neytronlar, neytrino, qamma şüalar) qeyd etdikdə, ilk növbədə ionlaşdırıcı şüalanmanın mühitlə qarşılıqlı təsirdə olma ehtimalını nəzərə almaq lazımdır. Hər hansı ehtimalla qarşılıqlı təsir baş verərsə, bu zaman yuxarı enerjili yüklü zərrəciklər yaranır. Yaranmış bu zərrəciklərin itirdiyi ionizasiya enerjisi hesabına siqnalın yaranması təmin edilir. Məhz bu səbəbdən də belə ionlaşdırıcı şüalanmaların qarşılıqlı təsirdə olması az ehtimallı proses olduğundan, onlar hər dəfə detektor tərəfindən qeyd edilə bilmir və nəticədə, detektorun bu tip ionlaşdırıcı şüalanma üçün

qeydetmə effektivliyi 100 %-dən aşağı olur [82, c.44, s.281-286]. Detektorların mütləq effektivliyi olaraq qeyd edilən qamma şüalarının radioaktiv mənbədən buraxılan qamma şüalarına nisbəti, həqiqi effektivliyi isə qeyd edilən qamma şüaların detektora düşən qamma şüalara nisbəti qəbul edilir. Detektorların fotopik effektivliyi isə qeyd edilən amplitud paylanmasıdakı fotopikə uyğun gələn sahənin tam qeyd edilən sahəyə nisbəti kimi qəbul edilir. Bu hal ən çox qamma və Rentgen şüaları üçün istifadə edilir .

1.4. Yarımkeçirici radiasiya detektorları

Yarımkeçirici detektorlardan Si və Ge əsaslı detektorlar digər analoqlarından fərqli olaraq geniş tətbiq edilmə imkanlarına malikdir. Lakin bununla yanaşı, son dövrlərdə mürəkkəb quruluşlu yarımkeçiricilərə maraq kəskin artmışdır. İlk mürəkkəb tərkibli yarımkeçirici detektorlar 1945-ci ildə Van Heerden tərəfindən AgCl kristalından istifadə edərək alfa zərrəciklərin və qamma şüaların qeydedilməsini tədqiq etmişdir. Mürəkkəb yarımkeçiricilərin qadağan olunmuş zonasının, atom sıra nömrəsinin, sıxlığının və radiasiya davamlılığının böyük olması bu tip materialların qamma şüa detektorlarının hazırlanmasında geniş tətbiq edilməsinə imkan verir [76, s.351, 174, c.9, s.3491-3526, 195, c.51, s.1417-1427]. Bu detektorların yeganə çatışmazlığı mürəkkəb yarımkeçiricilərin yetişdirilmə texnologiyasının hələ tam arzu olunan səviyyədə olmamasıdır. Bu tip detektorlar Ge və Si əsaslı detektorlardan fərqli olaraq otaq və yuxarı temperaturda işləyirlər [76, s.351; s.93]. Mürəkkəb tərkibli yarımkeçirici birləşmələr əsasən dövrü sistemin III - V (GaAs) və II - VI (CdTe) təşkil edir [14, s.277; s.191, 60, c.12, s.59-73, 123, s.188, 174, c.9, s.3491-3526].

Si və Ge yetişdirilmə texnologiyasında əldə edilmiş naliyyətlər bunlar əsasında hazırlanmış detektorların digər analoqlarına nisbətən daha ucuz olmasına və geniş enerji diapazonunda tətbiqinə imkan verir [13, c.17, s.44-47, 56, c.61, s.673-682, 61, s.1047-1050,111, c.8, s.189-209, 168, c.44, s.761-764, 171, c.7, s.1040-1043]. Yarımkeçirici detektorların əsasını çox saylı p-n keçidlər təşkil edir və onlar bir-

birinə tam əks keçiriciliyə malik olurlar. Bu p-n keçidləri bir sıra kəmiyyətlərlə xarakterizə edilir: yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, potensial çəpərin hündürlüyü, maksimal sahə, deşilmə gərginliyi, doyma cərəyanı, p-n keçiddin tutumu, həcmi yüklər oblastı və onların cərəyanı. P-n keçidin hər iki tərəfindəki mövcud olan fərqli elektrik xassələrə malik olan aşqar atomları p-n keçiddə elektrik sahəsinin yaranmasına səbəb olur. Yaranan bu elektrik sahəsi isə öz növbəsində p-n keçidlərin düz və tərs istiqamətdə qoşulma zamanı axan cərəyanın xassəsini müəyyən edir. N-tip yarımkəçiricidə əsasən donor tip üstünlük təşkil edir. Bu aşqar atomlarının konsentrasiyası belə ifadə edilir $n_{no}=N_D$ və əsas yükdaşıyıcılar elektronlar olur. P-tip yarımkəçiricilərdə isə akseptor atomlarla aşqarlanır və deşik keçiriciliyi üstünlük ($p_{po}=N_A$) təşkil edir. N-tip və p-tip yarımkəçiricilərdə qeyri əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və aşağıda göstərilən ifadə ilə müəyyən edilir [76, s. 351; s.12]:

$$n \times p = n_i^2, n = 2 \times \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{1.5} \times e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} \quad p = 2 \times \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{1.5} \times e^{-\frac{E_F - E_V}{kT}} \quad (1.4.1)$$

Burada m_p – deşiklərin effektiv kütləsi, h - Plank sabiti, m_n – elektronların effektiv kütləsi, n - donor atomlarının konsentrasiyası, p - akseptor atomlarının konsentrasiyası, E_g - qadağan olunmuş zonanın eni, k - Bolsman sabiti, T - temperatur, E_v , E_c və E_F uyğun olaraq, valent, keçirici və Fermi səviyyəsidir.

N və p-tip yarımkəçiricilərdə elektron və deşiklərin konsentrasiyası yüksək olduğundan bunların kontaktı zamanı bir tərəfdən digər tərəfə yükdaşıyıcıların diffuziyası baş verir. Yükdaşıyıcıların bu diffuziyası yarımkəçiricinin kontakt oblastı yaxınlığında yüklərdən yoxsullaşmış oblastının yaranmasına səbəb olur. Diffuziya etmiş yükdaşıyıcılar hesabına hər iki yarımkəçiricinin kontakt oblastında kompensasiya edilməmiş yüklər hesabına elektrik sahəsinin artması müşahidə olunur. Bu elektrik sahəsi öz növbəsində p-n keçiddə diffuziya cərəyanına (\dot{I}_{diff}), əks istiqamətdə əlavə dreyf cərəyanının (\dot{I}_{dreyf}) yaranmasına səbəb olur. Tarazlıqda olduqda hər iki cərəyan bir-birinə bərabər olur. Dreyf və diffuziya cərəyanı belə ifadə edilir [106, s.430; s. 130]:

$$I_{diff} = q \times D_p \frac{dp}{dx} I_{dreyf} = q \times p \times \mu_p E E = - \frac{dV}{dx} \quad (1.4.2)$$

Burada q - elektronun yükü, μ_p - deşiklər üçün dielektrik nüfuzluğu, D_p - deşiklərin diffuziya əmsalı, E - p-n keçiddə yaranan elektrik sahəsi və p - deşiklərin konsentrasiyasıdır. Eynşteyin əlaqəsindən istifadə etsək $D_p = (k \times T \times \mu_p) / q$ p-n keçidin hər iki tərəfdəki yükdaşıyıcıların konsentrasiyası üçün aşağıdakı ifadəni alarıq:

$$\frac{p_{p0}}{p_{n0}} = \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{\frac{qV_0}{kT}} \quad (1.4.3)$$

burada p_{p0} - p oblastında əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, n_{n0} - n oblastındakı əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, p_{n0} - p oblastındakı qeyri əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, n_{p0} - n oblastındakı qeyri əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası və V_0 p-n keçiddə dreyf sahəsini yaradan gərginlikdir (buna potensial çəpərin hündürlüyü də deyilir). Yuxarıda alınmış (1.16) və (1.18) ifadələrdən istifadə edərək potensial çəpərin hündürlüyü üçün aşağıdakı ifadə alınır [76,s.352; s.73]:

$$qV_0 = kT \times \log\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = E_g + kT \times \log\left(\frac{N_A N_D}{N_V N_C}\right) \quad (1.4.4)$$

Bu ifadədən göründüyü kimi, potensial çəpərin hündürlüyü, qadağan olunmuş zonanın enindən, temperaturdan, konsentrasiyadan və hal sıxlığından asılıdır. Puasson tənliyini p-n keçid üçün həll etsək p-n keçidin kontakt nöqtəsindəki maksimum sahəsi üçün belə ifadə alınır:

$$/E_{mv}/ = qN_A \frac{x_p}{\epsilon_s} = qN_D \frac{x_n}{\epsilon_s} \quad (1.4.5)$$

Burada x_n və x_p – donor və akseptor oblastdakı həcmi yüklər oblastının enidir. Kontakt potensiallar fərqi ilə sahə arasında aşağıda ifadə edilən asılılıq mövcuddur $U_0 = \frac{1}{2} \times (E_m W) = \frac{1}{2} \times (E \times (x_n + x_p))$ harda k_1 W -fəza yüklər oblastının enidir. Simmetrik keçidlər üçün fəza yüklər oblastının eni yuxarıdakı son iki bərabərlikdən istifadə etməklə həcmi yüklər oblastı üçün aşağıdakı ifadə tapılır [66 , s.1251;s. 387]:

$$W = \left(\frac{2\varepsilon_s \times (N_A + N_D) \times V_{bi}}{(N_A \times N_D) \times q} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4.6)$$

Burada q - elektronun yükü, N_A və N_D – akseptor və donor mərkəzlərin konsentrasiyası, U_0 - kontakt potensiallar fərqi və ε_s - dielektrik nüfuzluğudur. Əgər bu ifadəni kəskin keçidlərə ($N_A \gg N_D$) tətbiq etsək onda fəza yüklər oblastının eni sadələşərək belə ifadə olunur: $W = \left(\frac{2\varepsilon_s \times V_{bi}}{N_D \times q} \right)^{\frac{1}{2}}$.

P-n keçiddən cərəyanın axması üçün yükdaşıyıcıların əldə etdiyi enerji potensial çəpərin hündürlüyündən böyük olmalıdır. Bu isə termal aktivasiya yolu ilə mümkündür və bu çəpəri keçən yükdaşıyıcıların konsentrasiyası belə ifadə edilir:

$$n \sim e^{\frac{qV_0}{kT}} \quad (1.4.7)$$

Burada q - elektronun yükü, k - Bolsman sabiti, T - temperatur və V_0 p-n keçiddə yaranan potensial çəpərin hündürlüyüdür. Bu ifadədən görüldüyü kimi çəpəri aşan yükdaşıyıcıların sıxlığı temperaturdan (T) və potensial çəpərin hündürlüyündən (V_0) asılıdır. Əgər p-n keçiddə sıfır gərginlik tətbiq etsək dreyf cərəyanı diffuziya cərəyanını kompensasiya edəcək və bunlar bir yerdə I_0 cərəyanını yaradırlar. Əgər biz p-n keçiddə düz istiqamətdə gərginlik tətbiq etsək $V > 0$ bu zaman potensial çəpərin hündürlüyü V_0 -dan $V_0 - V$ kimi azalır və ona görə də diffuziya cərəyanı $e^{\frac{qV}{kT}}$ faktoru qədər artır və diffuziya cərəyanı üstünlük təşkil edir. Bu zaman dreyf cərəyanı dəyişməz qalır [182, s.815;s. 100] .

Əgər p-n keçiddə tərs istiqamətdə gərginlik versək $V < 0$ diffuziya cərəyanı $e^{-\frac{qV}{kT}}$ faktoru qədər azalır. Beləliklə p-n keçiddən axan cərəyan üçün belə bir ifadə alınır [76, s.351; s.45]:

$$\dot{I} = \dot{I}_0 \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right), \quad \dot{I} = qA \left[\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n} \right] \left(e^{\frac{qV_0}{kT}} - 1 \right) \quad (1.4.8)$$

Burada D_p, D_n - deşiklərin və elektronların diffuziya əmsalı, L_p, L_n - deşiklərin və elektronların diffuziya uzunluğu, p_{n0}, n_{p0} - qeyri əsas yükdaşıyıcıların konsentrasiyası, V_0 - potensial çəpərin hündürlüyü və \dot{I}_0 - tarazlıq ($V=0$) halında diffuziya və dreyf cərəyanını xarakterizə edir. Xüsusi ilə qeyd etmək lazımdır ki, əgər tərs istiqamətdə sonsuz böyük gərginlik tətbiq etsək ($V \sim -\infty$) bu zaman diffuziya cərəyanı 0 olur və yalnız dreyf cərəyanı qalır və yuxarıdakı ifadədə bunu nəzərə alsaq onda $\dot{I} = -\dot{I}_0$ olur. Yuxarıda alınmış ifadə ideal p-n keçidlər üçün doğrudur. Bu cərəyan tərs istiqamətdə doyma cərəyanı adlanır və məhz bu cərəyan detektorların qaranlıq cərəyanı adlanır. P-n keçiddə düz istiqamətdə gərginlik qoşduqda diffuziya cərəyanı kəskin artır və bu zaman diffuziya cərəyanı üstünlük təşkil edir. Tərs istiqamətdə \dot{I}_0 cərəyanı qeyri əsas yükdaşıyıcılar hesabına yaranır. Bu cərəyanın yaranmasında əsas yükdaşıyıcılar iştirak etmir. Tərs keçidlərdə doyma cərəyanı aşağıdakı kimi ifadə edilir [175, s.558]:

$$\dot{I}_0 = qA \left[\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n} \right] \times N_V N_C e^{-\frac{E_g}{kT}} = qA \left[\frac{D_p N_A}{L_p} + \frac{D_n N_D}{L_n} \right] \times e^{-\frac{qV_0}{kT}} \quad (1.4.9)$$

Alınan ifadədən göründüyü kimi, doyma cərəyanı əsasən temperaturdan (T), qadağan olunmuş zonadan (E_g) və çəpərin hündürlüyündən (V_0) eksponensial asılıdır. Reallıqda isə p-n keçidlərdən axan cərəyanı aşağıda sadalanan hadisələrdən birbaşa təsir edir: yüklərin rekombinasiyası, generasiyası, əsas yükdaşıyıcıların injeksiyası və omik itki. Həcmi yüklər oblastında yüklərin rekombinasiya dərəcəsi belə ifadə edilir: $R \sim \frac{1}{n_i} = e^{\frac{qV}{2kT}}$. P-n keçidə tərs istiqamətdə gərginlik tətbiq etdikdə həcmi

yüklər oblastında mövcud olan generasiya mərkəzləri hesabına generasiya cərəyanı yaranır. Generasiya cərəyanı birbaşa olaraq həcmi yüklər oblastının enindən asılıdır. İdeal p-n keçidlərdə biz qəbul etdik ki, cərəyanın yaranması yalnız qeyri əsas yükdaşıyıcılar hesabına formalaşır və əsas yükdaşıyıcılar bu halda rol oynamır. Lakin gərginliyin böyük qiymətlərində bir tərəfdən digər tərəfə əsas yükdaşıyıcıların axını (injeksiyası) baş verir və bu zaman axan cərəyanda əsas yükdaşıyıcıların təsiri nəzərə alınmalıdır. Bu zaman düz istiqamət cərəyanın dəyişməsində $\dot{I} = e \frac{qV}{2kT}$ asılılığı üstünlük təşkil edir. P-n keçidlərin volt-ampere xarakteristikasına təsir edən digər kəmiyyət omik itkidir. Məlumdur ki, p-n keçidlər müəyyən müqavimətə (R_s) malik olduğundan onlarda müəyyən $\dot{I}R_s$ gərginlik düşür. Bu zaman real p-n keçiddə düşən gərginlik belə ifadə edilir: $V = V_{ext} - \dot{I} \times R_s$ [182, s.815; s. 100]. P-n keçidi xarakterizə edən digər bir kəmiyyət onun tutumudur. P-n keçidin tutumunu təyin etmək üçün aşağıdakı ifadədən istifadə edilir

$$C = \frac{dQ_c}{dV} = \frac{d(qN_B W)}{d\left(\frac{qN_B W^2}{2\varepsilon_s}\right)} = \frac{\varepsilon_s}{W} = \left(\frac{qN_B \varepsilon_s}{2(U_0 \pm U)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.4.10)$$

Burada, dQ_c - p-n keçidin vahid səthdə yüklərin dəyişməsini göstərir, N_B - zəif oblastın konsentrasiyası, W - fəza yüklər oblastının eni, U_0 - potensial çəpərin hündürlüyü, U - tətbiq edilən gərginlik, q - elektronun yükü və ε_s - dielektrik nüfuzluğudur [180, s.789; s. 290].

Yarımkəçirici əsasında hazırlanan detektorlar əsasən əks gərginlikdə işləyirlər. Buna misal olaraq silisium əsasında hazırlanmış detektorları göstərmək olar. Adi silisium detektorlarında otaq temperaturunda termik tarazlıq halında olduqda sərbəst yükdaşıyıcıların sayı $\sim 1 \times 10^{10}$ olur [14, s.400; s. 13]. Əlbəttə bu zaman minimum ionlaşdırıcı şüaların yaratdığı yükdaşıyıcıların sayı bu qiymətdən 10^5 dəfə kiçik olur. Bu fonda ionlaşdırıcı şüalanmanın qeyd edilməsi mümkün olmur. Məhz bu səbəbdən də sərbəst yükdaşıyıcıların sayını azaltmaq tələb olunur. Sərbəst yükdaşıyıcıların sayını azaltmaq üçün p-n keçidi tərs istiqamətdə qoşmaq əlverişli hesab edilir. P-n

keçid tərs istiqamətdə qoşulduqda potensial çəpərin hündürlüyü tətbiq olunan gərginlik qədər artır ($U_{bi}+U$). Bu zaman həcmi yüklər oblastının eni də artmağa başlayır. Elektron və deşiklərin p-n keçiddən axını kəskin azalaraq nəzərə alınmayacaq qədər olur. Tərs istiqamətdə tətbiq edilən gərginliyi artırmaqla həcmi yüklər oblastı tam əhatə etmək mümkün olur. Bu zaman ən kiçik ionlaşma qabiliyyətli zərrəciyin yaratdığı 10^3e yükdaşıyıcıların sayı termal yolla yaranan saydan 1000 dəfələrlə yüksək olur və nəticədə ionlaşdırıcı zərrəciyi qeyd etmək mümkün olur. Bundan başqa, p-n keçidin temperaturunu aşağı salmaqla termal generasiya yükdaşıyıcıların sayını azaltmaqla bu tip qeydedicilərin enerji ayırdetməsini azaltmaq mümkün olur .

Yarımkeçirici detektorların işləmə prinsipini tətbiq edilən gərginlikdə ionlaşdırıcı şüaların ionizasiya hesabına itirdiyi enerji tərəfindən yaranan yüklərin toplanması təşkil edir. İonlaşdırıcı şüanın enerjisindən və növündən asılı olaraq müxtəlif parametrlı yarımkeçirici detektorlar seçilir. Yarımkeçirici detektorlar anod və katoddan ibarət sadə quruluşa malik olurlar. Şəkil 1.4.1-də ionlaşdırıcı foton yarımkeçirici ilə qarşılıqlı təsirdə olduqda ionizasiya hesabına ($\frac{dE}{dx_{ion}}$) itirdiyi enerjiyə görə həcmi yüklər oblastında elektron-deşik cütü yaradır. Elektron-deşik cütünün yaranması əsasən fotoeffekt və Kompton səpilməsi hesabına baş verir. Fotoeffekt zamanı yaranan elektron və deşiklərin sayı $N = E/\varepsilon$ olur, burada ε - elektron-deşik cütü yaratmaq üçün lazım olan orta ionizasiya enerjisi və E – düşən ionlaşdırıcı şüalanmanın enerjisidir [79, s.389;s. 133]. Bu zaman yaranan yük belə ifadə edilir:

$$q_0 = \frac{q \times E}{w} \quad (1.4.11)$$

Burada q - elektronun yükü, w - elektron-deşik cütü yaratmaq üçün lazım olan orta ionizasiya enerjisi (yarımkeçiricinin növündən asılı olaraq dəyişir) və E – düşən

ionlaşdırıcı şüalanmanın enerjisidir. Hər hansı müsbət yük (q_0) $d\phi$ potensiallar fərqiində (Ramo teoreminə görə) udduğu enerjini belə ifadə etmək olar :

$$dE = -q_0 \times d\phi \quad (1.4.12)$$

Burada, q_0 – hərəkət edən müsbət yük və $d\phi$ - elektrodalara tətbiq edilən potensiallar fərqi. Eyni ilədə elektrik sahəsi $\varepsilon(x)$ ilə potensiallar fərqi arasındakı ($\varepsilon(x) = -\frac{d\phi}{dx}$) asılılığından istifadə etsək onda (1.4.12) ifadəsini belə təsvir etmək olar [99, s.802; s. 421]:

$$\frac{dE}{dx} = q_0 \times \varepsilon(x) = q_0 \times \frac{V_0}{L} \quad (1.4.13)$$

Burada, V_0 - tətbiq edilən gərginlik və L - detektorun həcmi yüklər oblastının enidir. Bu zaman q_0 yükün x_0 – dan x məsafəsinə getdiyi zaman udduğu enerjini tapmaq üçün (1.4.13) ifadəsini inteqrallasaq udulan enerji üçün aşağıdakı ifadə alınır:

$$\Delta E = q_0 \times \frac{V_0}{L} (x - x_0) \quad (1.4.14)$$

Əgər detektoru paralel müstəvi ion qaz kamerası kimi qəbul etsək bu zaman udulan enerjiyə uyğun gələn siqnalın gərginliyi və yükü üçün aşağıdakı ifadələri alırıq:

$$\Delta V_R = \frac{\Delta E}{C \times V_0} = \frac{q_0}{C} \times \frac{(x-x_0)}{L} \quad \Delta Q = \Delta V_R \times C = q_0 \times \frac{(x-x_0)}{L} \quad (1.4.15)$$

Detektorda siqnalın yaranması məhz $Q(t)$ yükünün zamandan asılı olaraq dəyişməsi hesabına formalaşır. Yaranan $Q(t)$ yükü elektronların və deşiklərin hərəkəti hesabına yaranan yükün cəminə bərabər olur:

$$Q(t) = \frac{q_0}{L} \times (x_e + x_d) \quad (1.4.16)$$

Burada, q_0 - ionlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı yüküdür, L - detektorun aktiv həcmnin qalınlığı, x_e - elektronun dreyf məsafəsi və x_d - deşiyin dreyf məsafəsidir. İonlaşdırıcı şüalanma zamanı yaranan yük sıfırdan başlayaraq (q_0) maksimum qiymətinə kimi artır. Yükün maksimum qiyməti olaraq ionlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı elektronlar və deşiklərin tam toplanması təşkil edir. Əgər qəbul etsək ki, yükdaşıyıcılar katoddan x məsafədə yaranıb, bu zaman elektronların katoda çatma müddəti $t_e = \frac{x}{\mu_e E}$ və deşiklərin anoda çatma müddəti isə $t_d = \frac{L-x}{\mu_d E}$ olur. Alınmış bu ifadələri (1.4.16)-də nəzərə alsaq siqnalın formalaşmasını təşkil edən yük üçün aşağıdakı ifadə alınır:

$$Q(t) = \frac{q_0}{L} \times t(v_e + v_d) \quad (1.4.17)$$

Burada, v_e, v_d - elektron və deşiklərin doyma sürəti, μ_n, μ_p – elektron və deşiklərin yürüklüyü, q_0 - ionlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı yüklər və L - detektorun həcmi yüklər oblastının enidir [99, s.802; s. 422, 151].

Şəkil 1.4.1-də 3 müxtəlif nöqtədə qamma şüasının təsiri ilə yaranan elektron və deşiklərin alınan ümumi siqnalın yaranma mexanizminə təsiri göstərilmişdir. Elektronların yürüklüyü deşiklərdən dəfələrlə böyük olduğuna görə siqnalın ön hissəsini məhz elektronlar yaradır. Birinci halda yaranan deşiklər anoda çox yaxın olduğundan onlar qısa müddət ərzində ora toplanırlar. Bu zaman elektronların toplanması üçün çox vaxt tələb olunur və sonunda siqnal formalaşır. İkinci halda hadisə həcmi yüklər oblastının mərkəzində baş verir. Bu zaman elektronların katoda toplanması 1-ci halla nisbətən daha qısa müddətdə baş verir və ön front tez yaranır. Lakin deşiklərin toplanması üçün lazım olan müddət artır və siqnal tam formalaşması uzanır. Qamma şüası katod yaxınlığında (3) udulduqda isə yaranan elektronların əksəriyyəti katoda qısa müddətdə çatır. Siqnalın yaranmasını təşkil edən deşiklərin anoda çatması uzun müddət davam edir və siqnalın davam etmə müddəti kəskin artır. Lakin buna baxmayaraq yükün toplanması 10^{-8} san müddətində tamamlanır. Məhz bu səbəbdən detektorların çıxışındakı siqnalarda ön frontun yerini dəyişməsi müşahidə

edilir. Lakin reallıqda yaranan yüklərin miqdarında həmişə azalma müşahidə edilir. Bu azalma tutma və rekombinasiya mərkəzləri hesabına baş verir. Bu hadisələr mürəkkəb birləşmələrdə daha tez-tez müşahidə edilir və tam yükün toplanması azalır. Lakin planar detektorlarda bircins elektrik sahəsinin olması tutma mərkəzlərinin yaratdığı effekti nəzərə almamağa imkan verir. Yükün toplanma əmsalı aşağıdakı forma ilə hesablanır [66, s.1251; s. 403]

$$CCE = \frac{Q}{Q_0} = \left[\frac{\lambda_h}{L} \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_h}} \right) + \frac{\lambda_e}{L} \left(1 - e^{-\frac{L-x}{\lambda_e}} \right) \right] \quad (1.4.18)$$

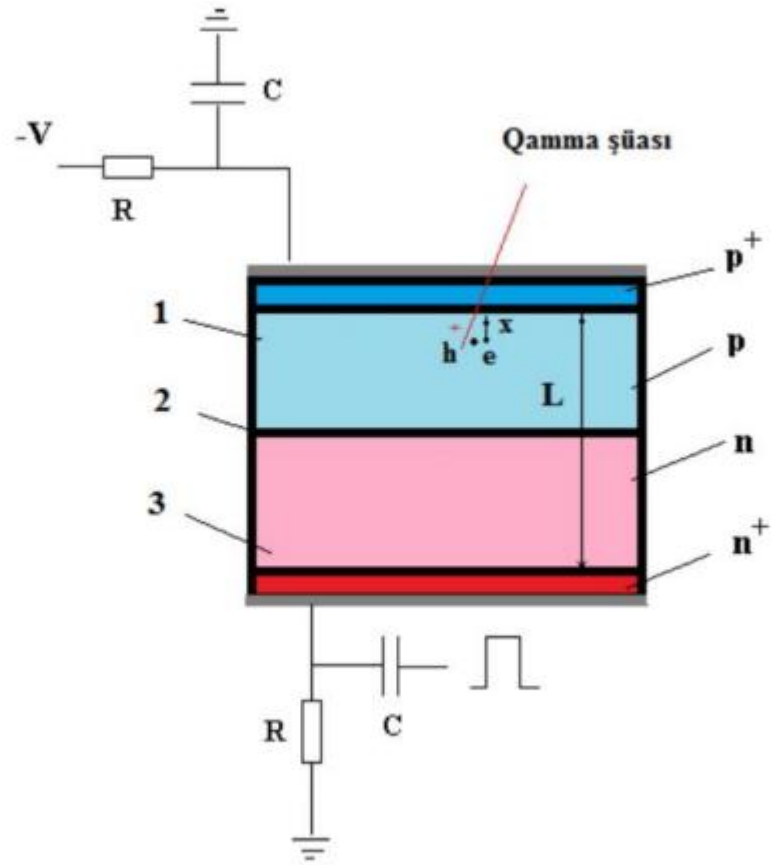
Burada, Q - detektorda qeyd edilən yük, Q_0 - ionlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı yükün miqdarı, L - detektorun aktiv həcmnin qalınlığı, $\lambda_h = \mu_h \times \tau_h \times E$ və $\lambda_e = \mu_e \times \tau_e \times E$ - elektron və deşiklərin dreyf uzunluğunun orta qiymətidir. Yük toplama əmsalı yalnız λ_h və λ_e deyil, həmçinin də qamma şüasının düşmə nöqtəsindən asılıdır. Yük toplama əmsalı $\frac{\lambda}{L}$ nisbəti artdıqca artır, fluktasiyası isə azalır. Yarımkəçirici detektorların əsas xassələrindən biri də yarımkəçiricidə yüklərin ötürülüməsi xassəsidir və bu elektron və deşiklərin yürüklülük və yaşama müddəti ilə xarakterizə edilir. Yarımkəçiriciyə elektrik sahəsi tətbiq etdikdə elektron və deşiklər sahəyə paralel istiqamətdə dreyf sürəti ilə hərəkət edirlər. Yürüklüləklə elektrik sahəsi (ε) və dreyf sürəti ($v_{de,h}$) arasında aşağıdakı asılılıq mövcuddur: $v_{de,h} = \mu_{e,h} \times \varepsilon_{e,h}$. Burada, aşağıda göstərilən indekslər elektron və deşiklərə məxsus olduğunu göstərir. Yürüklülük həmçinin də elektrodlar arasındakı həcmi yüklər oblastının eni d olan detektorda elektron və deşiklərin dreyf müddətini (τ_d) müəyyən edir: $\mu_{e,h} = d / (\varepsilon \times \tau_d)$. Detektorun çıxışında alınan siqnalın böyük və sürətli olması üçün yürüklüyün böyük olması və dreyf müddətinin kiçik olması vacibdir. Yarımkəçirici detektorda yaranan yükü xarakterizə edən digər bir kəmiyyət yükdaşıyıcıların dreyf uzunluğunun orta qiymətidir ($\lambda_{e,h}$). Detektorlar üçün $\mu_{e,h} \times \tau_{e,h}$ kəmiyyəti (yürüklüləklə yaşama müddətinin hasili) detektorun materialının keyfiyyətindən asılıdır [122, c.9,s.34-45]. Əgər yürüklülük və yaşama müddəti az

olarsa, λ kiçik alınır və buna görə də $\frac{\lambda}{L}$ nisbəti kiçik alınır. Bu nisbət detektorların maksimal qalınlığını və enerji intervalını müəyyən edir. Mürəkkəb birləşmələrdə yüklərin ötürülməsi daha zəif olur və bu isə tutma mərkəzlərinin mövcud olması ilə bağlıdır. Belə tutma mərkəzləri quruluş defektləri və aşqarlar hesabına formalaşır. Yüklü zərrəciklərin yarımkeçirici detektorla qarşılıqlı təsiri zamanı əsas enerji itkisi məhz ionizasiya hesabına baş verir.

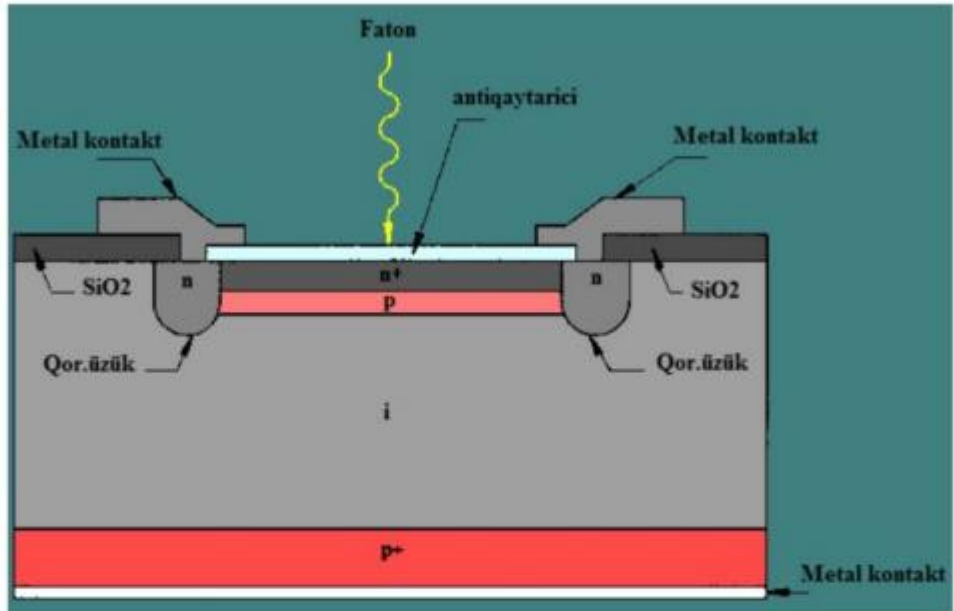
Normal rejimli MSFD fotodiodlara 5,5 MeV enerjili alfa zərrəciyi düşdükdə bu zaman fotodiodun öz tutumundan axan gərginlik mV tərtibində olur. Nəzərə alsaq ki, bizim tərəfimizdən hazırlanan normal MSFD fotodiodun tutumu 130×10^{-12} F və silisiumda elektron deşik cütü yaratmaq üçün lazım olan orta enerji 3,6 eV-dur. Bu zaman 5,5 MeV enerjili alfa zərrəcik $N = (5,5 \times 10^6 / 3,6) = 1,5 \times 10^6$ sayda yükdaşıyıcı yaradır və yükü $q = N \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Kl} = 1,5 \times 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Kl} = 2,4 \times 10^{-13} \text{ Kl}$ olur. Fotodiodun tutumundakı gərginlik $V = q(G)/C = 2,4 \times 10^{-13} \text{ Kl} / 130 \times 10^{-12} \text{ F} = 1,8 \text{ mV}$ tərtibində alınır. Bu hal gücləndirmə əmsalı vahid olduqda doğru olur. Fotodiodun gücləndirmə əmsalı artdıqca bu gərginlikdə təqribən xətti artır və çıxışdakı siqnalın amplitudu 100 mV tərtibinə qədər artır. Yükün toplanma əmsalı spektrometrik qeydedicilər üçün olduqca əhmiyyətli kəmiyyətdir və onun enerji ayırdetməsinə təsir edir. Yüksək yük toplama əmsalına malik olma yaxşı enerji ayırdetməsinin alınmasına imkan verir.

P-İ-N tipli silisium və germanium əsaslı yarımkeçirici detektorların fəza yüklər oblastının qalınlığı 10 mkm – 50000 mkm tərtibində olur. Bu tip qeydedicilərin işləmə gərginlikləri bəzi hallarda 1000 V-a kimi qalxa bilir. Əksər hallarda, yarımkeçirici detektorlarla yüksək enerji ayırdetmə alınması üçün otaq temperaturundan aşağı və ya azot temperaturu ($77 \text{ }^{\circ}\text{K}$, təqribən $-200 \text{ }^{\circ}\text{C}$) istifadə edilir. Yarımkeçirici detektorlar nəzəri olaraq FEG-lər və qaz sayğaclarından fərqli olaraq 15 T qədər maqnit sahəsinə həssas deyil. Yarımkeçirici detektorların kvant çıxışı 400–550 nm dalğa uzunluğu oblastında 70 – 90 % arasında dəyişir. Başqa sözlə, bu qeydedicilər yüksək enerjilər, tibb və digər sahələrdə istifadə edilən ssintilyatorların şüalandırdığı dalğa uzunluğu oblastına tam uyğun gəlir [86, s.523-

526, 188, c.1, s.122-134]. Bu tip P-İ-N fotodiodlar yüksək enerjilər fizikasında, spektroskopiya və dozimetriya sahəsində geniş şəkildə tətbiq edilir [17, s.355-358]. P-İ-N fotodiodların sadə quruluşa malik olmasına baxmayaraq çatışmayan cəhəti daxili gücləndirməyə malik olmamasıdır. Məhz ona görə də P-İ-N fotodiodlardan alınan siqanalların analiz edilməsi üçün onların gücləndirilməsinə ehtiyac duyulur. Belə əlavə gücləndiricilərin istifadəsi detektor modulunun qiymətinin yüksəlməsinə və əlavə küyün formalaşmasına səbəb olur. Bu səbəbdən də P-İ-N fotodiodlar zəif işıq impulsunu qeyd etmə həssaslığına malik deyildir. Məhz bu səbəbdən də əksər təcrübələrdə daxili gücləndirmə əmsalı 10–100 intervalında olan normal rejimli selvari fotodiodlar istifadə edilir. Normal rejimli selvari fotodiodlarda yükdaşıyıcıların gücləndirməsi p-n keçiddə yaranan elektrik sahəsi hesabına formalaşır. Şəkil 1.4.2 – də normal rejimli selvari fotodiodların struktur tərkibi göstərilmişdir. Bu fotodiodlar zəif foton selini qeyd etmək üçün, nəzərdə tutulmuşdur. Quruluşdan görüldüyü kimi, bu tip fotodiodlar p⁺-tip altlıq üzərində az konsentrasiyalı π-tip epitaksial təbəqə yetişdirilir. Epitaksial təbəqə üzərində ion implantasiyası metodundan istifadə edərək p⁺ və n⁺-tip keçiriciliyə malik hissələr yaradılır [14, s.400; s.171, 81, c.24, s.3592-3600, 110, c.86, s.1-6, 132, s.606, 150, c.7080, s. 1-11, 189, c.12, s.95-104]. Normal rejimli selvari fotodiodların elektrodlarına tərs istiqamətdə gərginlik tətbiq edilir. Gərginliyin müəyyən qiymətində aktiv həcmi oblastı tam fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunur. Gərginliyin daha böyük qiymətlərində fəza yüklər oblastında sahə artır və maksimal elektrik sahəsi p-n⁺ keçidin sərhəddində olur. Tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyinə bərabər və ya ona yaxınlaşdıqda p-n⁺ keçiddə sahə ifrat qiymətə yaxınlaşır. Bu zaman yükdaşıyıcıların sərbəst qaçış yolunda əldə etdiyi enerji hesabına zərbə ilə ionizasiya baş verir. Belə toqquşma hesabına yaranan yükdaşıyıcılar çox saylı sürətlənərək yükdaşıyıcıların sayının kəskin artmasına səbəb olur. Bu proses sonsuz davam etdikdə p-n keçidin temperaturu və cərəyanı artaraq fotodiodun sıradan çıxmasını reallaşdırır. Normal rejimdə işləyən selvari fotodiodların işləmə gərginlik intervalı həmişə deşilmə gərginliyindən kiçik olmalıdır. Selvari proses ionizasiya əmsalı ilə xarakterizə edilir. Yarımkəçiricidə yaranan elektron və deşiklər otaq



Şəkil 1.4.1 YK əsəşli detektorda siqnalın yaranması [99, s.802; s. 422].



Şəkil 1.4.2. Normal rejimli selvari fotodiodun strukturu [122,c.9,s.34-45].

temperaturunda sahə tətbiq edilmədikdə onların sürəti $v=(3 \times kT/m)^{0.5}$ formulu ilə hesablanır. Burada, k - Bolsman sabiti ($1,38 \times 10^{-23}$), T - temperatur ($^{\circ}K$), m - yükdaşıyıcının kütləsidir. Silisiumda otaq temperaturunda yaranan elektron və deşikin sürəti $2,33 \times 10^5$ m/san və $1,58 \times 10^5$ m/san olur. Bu zaman elektron və deşiklərin sərbəst qaçış yolunun uzunluğu elektronlar üçün ~ 46 nm və 23 nm olur. Lakin p-n keçiddə gərginlik tətbiq edildikdə yükdaşıyıcılar sahə hesabına sürətləndirilir. Bu zaman yükdaşıyıcıların sahə hesabınaaldığı sürət $v_y = (q \times E \times \tau)/m$ olur. Burada, E - elektrik sahəsinin qiyməti, τ - iki toqquşma arasındakı zaman, q - elektronun yükü və m -yükdaşıyıcının kütləsidir. Bu ifadədən görüldüyü kimi,tətbiq edilən sahənin 1×10^4 V/sm qiymətindən sonra elektronların sürəti doyma qiymətinə yaxınlaşır $v_{sat} \sim 10^7$ sm/san [76, s.352; s.53]. Yükdaşıyıcının sürəti üçün alınmış doyma qiyməti əsas orta qiyməti təşkil edir. Sahənin sonrakı böyük qiymətlərində sürətin əsas orta qiyməti artmır və bu zaman yükdaşıyıcıların əldə etdiyi enerji qəfəslə təsirdə olaraq öz enerjisinin müəyyən hissəsini optik fononlar şəkilində qəfəsə verir. Silisiumda bu fononlara uyğun gələn enerji 63 meV qəbul edilir. Lakin reallıqda sahənin belə böyük qiymətlərində elektronlar doyma sürətindən böyük qiymətlərdə alırlar və belə yükdaşıyıcıların sayı paylanmanın yuxarı enerji oblastını əhatə edir (kiçik sayda - Maksvel paylanmasına görə). Elektrik sahəsində böyük enerji almış bu elektronlar atomun elektronları ilə toqquşaraq valent səviyyədən elektronları keçirici zonaya keçirə bilir. Sürətlənmiş yükdaşıyıcıların silisiumda elektron-deşik cütü yaratması üçün astana enerjisi 1,68 eV ($1,5 \times E_g$) böyük olmalıdır. Sonra isə hər yeni yaranmış cüt sahə hesabına sürətləndirilərək yeni elektron-deşik cütü yaradır. Bu zaman vahid sərbəst yükün elektrik sahəsi istiqamətində vahid uzunluqda yaratdığı sərbəst yükdaşıyıcıların sayına ionizasiya əmsalı deyilir. Silisium əsaslı fotodiodlarda aktiv həcmdə selvari prosesin baş verməsi üçün maksimal elektrik sahəsinin qiyməti $1,5 \times 10^5 - 6 \times 10^5$ V/sm intervalında olur [107, s.223; s.2, 199, c.29, s. 1-3]. Sahənin daha böyük qiymətlərində tunel keçidləri üstünlük təşkil etməyə başlayır. Bu zaman yükdaşıyıcıların qaçış yolları nanometrlər tərtibində olur. Elektron və deşik üçün ionizasiya əmsalları sahədən asılı olaraq kəskin dəyişirlər. Selvari prosesin baş verməsi üçün lazım olan sahənin orta qiymətində (3×10^5 V/sm) elektron və deşiklərin

ionizasiya əmsalı 5 dəfəyə yaxın fərqlənir. Başqa sözlə, elektronlar tərəfindən başladılan ionizasiya prosesinin şiddəti dəşiklərə nisbətən 5 dəfə yüksək olur. Sahənin aşağı qiymətlərində bu fərq daha kəskin fərqlənir. Selvari fotodiodlarda selvari proses gücləndirmə (çoxaltma) əmsalı ilə xarakterizə edilir. Selvari fotodiodlarda gücləndirmə əmsalı fotonların udulması nəticəsində yaranan fotoelektronların selvari prosesdə iştirak etməsi nəticəsində alınan tam yükün selvari prosesi yaradan ilkin fotoelektronların yükünün nisbətinə deyilir. Təcrübi olaraq gücləndirmə əmsalını hesablamaq üçün empirik Miller formulasından geniş istifadə edilir [107, s.223; s.95, 133, s.452]:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{app}}{V_{br}}\right)^{\alpha}} \quad (1.4.19)$$

Burada V_{br} - deşilmə gərginliyi, V_{app} - fotodioda tətbiq edilən tərs gərginlik (normal rejimli fotodiodlar üçün deşilmə gərginliyindən az olur və ifrat həssas fotoqeydedicilər üçün isə bu qiymət deşilmə gərginliyindən yüksək olur) və $\alpha = 1 - 4$ empirik parametrdir. Empirik parametr α yarımkəçiricinin parametrlərindən və selvari cərəyanın təbiətindən asılıdır. Yuxarıda göstərilən 1.34 ifadəsindən göründüyü kimi, tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyinə bərabər olduqda ($V_{app}=V_{br}$) gücləndirmə əmsalı sonsuz olaraq artır. Reallıqda yükdaşıyıcıların selvari prosesdə iştirakı zamanı onların gücləndirməsində müəyyən kənara çıxmalar müşahidə edilir. Gücləndirmə əmsalının bu fluktasiyaları ifrat küy əmsalı ilə xarakterizə edilir. Normal rejimli selvari fotodiodlarda ifrat küy əmsalı hər zaman vahiddən böyük olur. İfrat küy əmsalının kəskin böyüməsi gücləndirmə əmsalı artdıqca kəskin dəyişir [1, s.158]. Küy əmsalının belə kəskin dəyişməsi selvari fotodiodun çıxışında müşahidə edilən fotosiqnalın amplitudunda dəyişmələr yaranmasına səbəb olur və ona görə də detektorun enerji ayırdetməsi kəskin pisləşir. Hazırda istifadə edilən normal rejimli selvari fotodiodların ifrat küy əmsalı 2-dən xeyli böyük olur və gücləndirmə əmsalı $G \sim 50-1000$ arasında dəyişir. Bu tip selvari fotodiodlar P-I-N fotodiodlardan fərqli

olaraq 100-lərlə fotonu qeydetmə həssaslığına malikdir [147, c.527, s.15-20, 148, c.567, s.48-56]. Bu tip selvari fotodiodlarda zəif gücləndirmə əmsalı olan gücləndiricilər istifadə edilir. Normal rejimli selvari fotodiodların həssas oblastının qalınlığı 10–30 mkm tərtibində olur. Bu səbəbdən də normal rejimli selvari fotodiodları aşağı enerjili Rentgen (X-ray) şüalarını birbaşa (ssintilyatorsuz) qeyd edə bilər. Qamma şüaların enerjisi artdıqca birbaşa qeydetmə effektivliyi kəskin azalır. Selvari fotodiodlarda həssas oblastın qalınlığının kiçik olması yüklü zərrəciklərin ssintilyatordan çıxaraq bir başa nüvə sayma effekti yaratması ehtimalı çox kiçik olur. Beləliklə P-İ-N fotodiodlardan fərqli olaraq, normal rejimli selvari fotodiodların daxili gücləndirməyə, nüvə sayma effekti yaranma ehtimalının çox kiçik olmasına, radiasiya davamlılığına və daha zəif siqnalları qeyd etmə həssaslığına malikdir. Normal rejimli selvari fotodiodların əsas çatışmazlıqları isə küy əmsalının vahiddən böyük olması, gücləndirmə əmsalının kiçik olması və həssaslığının 100-lərlə foton tərtibində olmasıdır. Məhz bu çatışmazlıqlar normal rejimli selvari fotodiodlar əsasında yeni nəsil detektorların və spektrometrlərin hazırlanmasını demək olar ki, mümkün deyil [19, c.39, s.7-12, 146, c.486, s.164-169, 147, c.527, s.15-20, 160, c.567, s. 70-73, 161, c.158, s.1-6, 162].

1.5. Mikro-pikselli selvari fotodiodlar və onlar əsaslı ssintilyator detektorları

Məlumdur ki, silisium əsaslı fotoqeydedicilər əsasən üç rejimdə işləyir. Bunlardan birincisi və sadəsi P-İ-N fotodiod rejimidir (qaz sayğaclarında bu ionizasiya rejiminə uyğun gəlir). Bu rejimdə daxili gücləndirmə əmsalı $M=1$ olur. Siqnalın yaranmasını ionlaşdırıcı radiasiya şüalanmasının yaratdığı elektron-deşik cütləri təşkil edir. $Q_d=M \times Q_i=Q_i$. Burada Q_i - ionlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı yükün miqdarıdır. İkinci hal normal rejimli selvari fotodiod rejimidir (qaz sayğaclarında bu mütənasib rejimə uyğun gəlir). Bu rejimdə fotodioda tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyinə çox yaxın olur, ancaq ona çatmır. Burada p-n keçiddə yaranan sahənin yüksək olması hesabına zərbə ilə ionizasiya baş verir. Bu rejimdə işləyən fotoqeydedicilərin gücləndirmə əmsalı 1000-ə qədər ola bilər. Bu fotodiodlarda

gücləndirmə əmsalının yüksək qiymətlərində ifrat küy faktoru şiddətlə artdığı üçün onları $M \leq M_{cr.} \approx 100$ rejimində istifadə etmək mümkün olur. Bu zaman ionlaşdırıcı radiasiya şüalanmasının yaratdığı yük daşıyıcıları maksimal sahə hesabına sürətləndirilərək yeni elektron-deşik cütləri yaradır və siqnalın yaranmasını təşkil edən yük $Q_d = M \times Q_i \approx 100 \times Q_i$ təşkil edir. Yuxarıda qeyd edilən hər iki rejimdə, qaz sayğaclarında olduğu kimi, ionlaşdırıcı şüalanmanın enerjisi və sayı haqqında məlumat almaq mümkündür. Üçüncü hal Heyger rejimli selvari fotodiodların işlədiyi haldır (qaz sayğaclarında bu Heyger sayğacının işlədiyi rejiminə uyğun gəlir). Heyger rejimli selvari fotodiodlar (HRSF) deşilmə gərginliyindən bir-neçə volt yuxarı gərginlikdə işləyirlər [34, c.10, s.1-7, 35, c.31, s.14-17, 36, s.252, 45, c.912, s.287-289, 119, s.203, 148, c.567, s.48-56, 177, c.6119, s.1-10]. İlk kiçik ölçülü tək elementli HRSF-lər Makintayer və Haitz tərəfindən yaradılmışdır [147, c.527, s.15-20]. Ədəbiyyatda bu tip selvari diodlar “tək foton selvari diodu” adı ilə məşhurdur (ingiliscə, SPAD - Single Photon Avalanche Diode). Bəs necə olur ki, HRSF fotodiodlar deşilmə gərginliyindən bir neçə volt yuxarı gərginlikdə işləyir. Məsələ ondadır ki, HRSF-ların sahəsi elə seçilir ki, xarakteristik $R_q \times C_d$ zaman müddətində tək elementli pikseldə selvari prosesi başlanan qaranlıq elektronun generasiya olunması ehtimalı çox-çox kiçik olur (burada, R_q – dövrədəki ardıcıl müqavimət, C_d – diodun tutumudur). Bu halda, sərbəst yükdaşıyıcılar olmadığına görə, diodun yoxsullaşmış oblastı özünü dielektrik kimi aparır və ona görə də fotodioda deşilmə gərginliyindən böyük gərginlik tətbiq etmək mümkün olur. Lakin selvari proses baş verdikdə gücləndirmənin sonsuz olmaması üçün və onu söndürmək üçün əlavə söndürücü müqavimətdən istifadə edilir. Bu zaman söndürücü müqavimətə düşən gərginlik nəticəsində fotodioda tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyindən az olur. Daha doğrusu, selvari proses müddətində söndürücü müqavimət imkan vermir ki, elektrik mənbəyi diodu dolduraraq əvvəlki vəziyyətə gətirsin. Bunun nəticəsində diodun potensialı deşilmə potensialından aşağı düşür və selvari proses sönür. Aparılan təcrübələr göstərir ki, bu tip fotodiodların işlək vəziyyətə qayıtması üçün uzun müddət tələb olunur [147, c.527, s.15-20]. İlk zamanlar hazırlanmış bu tip fotodiodların maksimal sayma sürəti 100 kHz tərtibində idi. Yarımkeçirici

texnologiyanın inkişaf etməsindən sonra və aktiv söndürücü dövrənin təkmilləşdirilməsi nəticəsində ifrat həssas fotodiodların bərpa olunma müddəti dəfələrlə azaldıldı. İlk hazırlanan tək elementli HRSF diodların foton qeydetmə effektivliyi yüksək olmasa da tək foto elektronu qeydetmə həssaslığına malik idi. Bu tip HRSF fotodiodlar qaz sayğaclarında mövcud olan Heyger sayğacları kimi yalnız hadisələrin sayı haqqında məlumat almağa imkan verirdi. Lakin ilk dəfə olaraq HRSF fotodiodlar əsasında işləyən qeydedicilərlə şüalanmanın enerjisi haqqında məlumat əldə etmək üçün imkan verən yeni bir quruluş hazırlandı [148, c.567, s.48-56, 149, c.4, s. 1-53, 152, c.25, s.4122-4126, 160, c.567, s.70-73]. Yeni yaradılmış bu quruluş bir-birinə paralel qoşulmuş çox saylı p-n keçidlərdən və söndürücü mikro rezistorlardan ibarət idi. Yeni yaradılan bu HRSF fotodiodlar mikropikselli selvari fotodiodlar (MSFD) adlandırıldı [160, c.567, s.70-73]. Bu tip mikropikselli selvari fotodiodların xassələri mövcud fotoelektron gücləndiriciləri ilə müqayisədə aşağıda qeyd edilən üstünlüklərə malikdir: yüksək maqnit sahəsində işləməsi, aşağı işləmə gərginliyi, kiçik ölçüdə olması, görmə oblastında yüksək kvant effektivliyi, radioaktiv çirklənməsinin az olması, zərbəyə davamlı olması, ucuz başa gəlməsi və sair [22, s.168-169,23, s.352-353,148, c.567, s.48-56].

Mikropikselli selvari fotodiodlarda verilmiş gərginlikdə hər p-n keçidlərdən ibarət pikselin daxili güclənməsi sabit olduğundan, bu zaman pikselin çıxışında alınan yük belə ifadə edilir:

$$Q = 2 \times C_{\text{pik}} \times \Delta U = 2 \times C_{\text{pik}} \times (V_{\text{ap}} - V_{\text{br}}) \quad (1.5.1)$$

Burada C_{pik} – p-n keçidlərdən ibarət olan bir pikselin tutumu, V_{ap} - işləmə gərginliyi (deşilmə gərginliyindən böyük olur) və V_{br} – pikselin aktiv sahəsinin deşilmə gərginliyidir. Selvari fotoqəbuledicinin üzərinə düşən foton selinə uyğun olaraq piksellərdə selvari güclənmə yaranır və fotodiodun çıxışında müşahidə edilən yük $Q_t = 2 \times C_{\text{pik}} \times (V_{\text{ap}} - V_{\text{br}}) \times N_f$ olur. Burada N_f - fotonların selvari prosesi başlatdığı piksellərin sayıdır [6, c.5, s. 5-16]. İonlaşdırıcı şüalanmanın enerjisi

artdıqca işləyən piksellərin sayı artaraq yekun siqnalın amplitudunun artmasına səbəb olurdu. MSFD foto qeydedicilərin gücləndirmə əmsalı $10^{-4} - 10^{-7}$ tərtibində dəyişir [47, s.167, 166, c.824, s.137-138, 169]. Selvari fotoqəbuledicilərdə olan çox saylı piksellər Heyger rejimində işlədiyindən onların daxili güclənməsi çox kiçik fərqlənir. Başqa sözlə piksellərdən birində selvari proses digər piksellərə nisbətən aşağı gərginlikdə başlayarsa, ona ardıcıl qoşulmuş söndürücü müqavimət gücləndirmənin sonrakı artmasına imkan vermir. Nəticədə digər piksellərdəki gücləndirmə əmsalı bu qiymətə gəlib çatır və gücləndirmənin küy əmsalı ($F \sim 1$) vahid tərtibində qiymətlər alır. Küy əmsalının böyük qiymətlərində fotoqeydedicin ayırdetmə xassəsi pisləşir. MSFD fotodiodlarda tək fotoelektrona uyğun gələn siqnalın amplitudunu (50 Om yükləmə müqavimətində) amplitudu gücləndirmə əmsalından asılı olaraq 2 – 40 mV tərtibində müşahidə etmək olar. MSFD fotodiodların yüksək daxili gücləndirməyə malik olduğundan bunlardan alınan siqnalı gücləndirmək üçün sadə yük və cərəyan gücləndiriciləri istifadə edilir. MSFD fotodiodların həssas həcmi yüklər oblastının maksimal qalınlığı 10 mkm tərtibində olur. Bu isə Heyger rejimli selvari fotoqeydedicilərə digər tip yarımkeçirici əsaslı sadə quruluşlu P-İ-N və normal rejimli analoqlarına nisbətən kiçik nüvə əks təsirinə və yüksək radiasiya davamlığına malik olmasına imkan verir. Selvari fotoqeydedicilərin çıxışında müşahidə edilən siqnal onun qeyd etdiyi foton selinə mütənasib olmalıdır. Əksər hallarda təcrübələrdə istifadə edilən selvari fotoqeydedicilər üçün bu şərt ödənmir. Bu çatışmazlıq foto qeydedicinin küy əmsalı, gecikən impuls hadisəsi, qaranlıq say, foton qeydetmə effektivliyi, piksellərin sayı və çarpaz görüşmə hadisəsi ilə bağlı olur. Bu kəmiyyətlərdən xüsusi ilə də foton qeydetmə effektivliyi və piksellərin sayı fotoqeydedicinin xətti işləmə diapazonunun müəyyən edilməsində əsas rol oynayır. Fotoqəbuledicilərin xəttlik diapazonunu hesablamaq üçün aşağıda verilmiş ifadədən istifadə edilir [6, c.5, s. 5-16, 148, c.567, s.48-56]:

$$A_i = N_{is.piks} = N_{tam} \left(1 - e^{-\frac{N_{foton} \times FQE}{N_{um}}} \right) \quad (1.5.2)$$

burada, $N_{\text{tam}} = (N_p \times S)$ - selvari fotoqeydedicinin piksellərin tam sayı (N_p - 1 mm² olan piksellərin sayı, S – fotoqeydedicinin ümumi sahəsidir), $N_{\text{iş.piks}}$ – foto elektronların selvari prosesi başlatdığı piksellərin sayı, N_{foton} – qeydedicinin aktiv səthinə düşən fotonların sayı və FQE – verilmiş gərginlikdə qeydedicinin foton qeydetmə effektivliyidir [6, c.5, s. 5-16].

Fotoqeydedicilərin zaman xarakteristikası qısa zaman anında zərbə ilə ionizasiya hesabına yaranan yükdaşıyıcıların yaratdığı siqnalın ön hissəsinin formalaşması və selvari prosesin sönməsi üçün lazım olan müddətlə xarakterizə olunur. [101, s.352]. Selvari fotoqeydedicilərin əsas p-n keçidlərində elektrik sahəsinin bir neçə 10⁵ V/sm olduğunu, elektronun sürətinin silisium üçün ~10⁷ sm/san və aktiv oblastın qalınlığının mikronlar tərtibində olduğunu nəzərə alsaq ön hissənin formalaşması müddətinin ~30 psan olduğunu tapmaq olar. Ön hissənin formalaşmasına həmçinin pikselin tam tutumu, kontak və neytral hissələrin müqavimətlərində mənfi təsir edir. Siqnalın ön hissəsinin formalaşma müddəti piksellərin tam tutumundan və fəza yüklər oblastının müqavimətindən xətti asılıdır : $\tau_{\text{boşalma}} \sim C_d \times R_d$. Burada C_d – pikselin tam tutumu ($C_d = C_{\text{pik}} + C_{\text{par.}}$, C_{pik} – pikselin tutumu, $C_{\text{par.}}$ – parazit tutum) və R_d - fəza yüklər oblastının müqavimətidir [6, c.5, s. 5-16].

Selvari fotoqeydedicilərdə yüksək elektrik sahəsinin yaranması məhz piksellərin tutumlarının müəyyən bir gərginliklə dolması hesabına formalaşır. Zərbə ilə ionizasiya hadisəsi olduqda piksellərin tutumları qısa zaman anında boşalır və pikseldə selvari proses sönür. Piksellərə düşən gərginliyin işləmə gərginliyinə qədər çatması müddəti pikselin tutumundan və selvari prosesi söndürən müqavimətdən asılıdır. Bu müddət selvari fotoqeydedicilərin bərpa olma müddəti adlanır: $\tau_{\text{dolma}} = R_q \times C_d$ harada ki, R_q – pikselin söndürücü müqaviməti və C_d – pikselin tam tutumudur [6, c.5, s. 5-16, 147, c.527, s.15-20].

Selvari fotoqeydedicilərin digər bir parametri qaranlıq elektronlar hesabına yaranan qaranlıq saydır (QS). Qaranlıq sayın yaranması yarımkeçiricilərin yetişdirilmə və hazırlanma texnologiyası ilə bağlıdır. Yaranan qaranlıq elektronlardan

yalnız aktiv həcmi yüklər oblastında olanlar selvari prosesdə iştirak edir. Qaranlıq say həmçinin də xarici təsirlərdən də asılıdır. Temperaturdan asılı olaraq qaranlıq sayı azaltmaq mümkündür. Fotoqeydedicilrin parametrlərinə QS-nin təsirini azaltmaq üçün əksər hallarda aşağı temperaturlardan geniş istifadə edilir. Qaranlıq sayı azaltmaq üçün aktiv həcm qalınlığının azaldılmasında istifadə olunur. Selvari fotoqeydedicilərin qaranlıq sayı onların minimum qeydetmə həssaslığına və həmçinin də xəttlik diapazonuna təsir edir [6, c.5, s. 5-16, 191, s.154].

Heyger rejimli selvari fotoqeydedicilərin digər bir parametri çarpaz görüşdür (ÇG). Bu hadisə selvari fotoqeydedicilərin əsas p-n keçidlərində gücləndirmə əmsalı 1×10^5 -dən böyük olduqda baş verir. Bu zaman selvari güclənmə nəticəsində yaranan hər 100000 elektronun çox kiçik hissəsi rekombinasiya olunaraq enerjisi 1 eV-dən böyük olan təqribən 3 fotonun buraxılması müşahidə edilir [84, c.16, s.8381-8394, 116, c.61, s.1488-1492]. ÇG-nin olma ehtimalı qeydedicilərin (pikselin ölçüsündən və onlar arası addımdan) və gücləndirmə əmsalından asılıdır. ÇG-nin hesabına yaranan fotonlar müxtəlif istiqamətlərdə hərəkət edirlər. Bu fotonlardan bəziləri yaxınlıqdakı pikseldə (1) və ya aktiv həcm müəyyən hissəsində udularaq (2) fotoelektron yaradır. Yaranan fotoelektronlar piksellərdə zərbə ilə ionizasiyanı başlatdırır (şək.1.5.1) [6, c.5, s. 5-16]. Nəticədə yalançı hadisə (və ya əlavə yük) yaranır. Əksər hallarda aktiv həcm sonunda yüksək aşqarlanmış keçidlər hazırlanılır. Bu keçidlər fotonların udulması hesabına altlıqda yaratdığı elektronların və ya deşiklərin zərbə ilə ionizasiya hadisəsində iştirak etməsinin qarşısını almaq üçün potensial çəpər yaradır (həmçinin sahəni məhdudlaşdırır). Nəzərə alsaq ki ÇG-e hesabına yaranan fotonlar səthdə istifadə edilən çox qatlı təbəqələrdən də səpilərək (3-a) müxtəlif tərəflərdə olan piksellərdə zərbə ilə ionizasiyanı başlatdıra bilər. Bu hadisə həmçinin dərinlikdə udulmuş foton hesabında baş verə bilər (3-b). Bu şərt 700 nm və ondan böyük dalğa uzunluqlu fotonlar üçün ödənilir. Fotoqeydedicilərdə ÇG hesabına həcmdə yaranan fotonların təsirini azaltmaq üçün uduculuğu yüksək olan metallardan istifadə olunur. Yaranan fotonun dalğa uzunluğu nəzərə alınaraq uducu materialın qalınlığı hesablanır [6, c.5, s. 5-16]. Çarpaz görüşməni azaltmaq üçün piksellər "V" formalı polisilisiyum maniyə ilə əhatə olunur (şək.1.5.1 (b)).

Çəpərin hündürlüyü və eni arasında aşağıdakı asılılıq mövcuddur. Məsələn, $h=d/(2 \times \text{ctg}(57.74^\circ))=d/1,4$ V formalı maniyənin eninin 3 mkm olduğunu qəbul etsək, bu zaman qoruyucu maniyənin dərinliyi 2,14 mkm alınır. Göründüyü kimi, bu yaxınlaşma da çarpaz görüşməni tam azaltmağa imkan vermir. Bu fotonlar qonşu pikseldə selvari prosesi yenidən yaradır. Qəbul etsək ki, p-n keçiddən təşkil olunmuş piksellər arası addım 3-5 mkm tərtibindədir və bu zaman ÇG-e hesabına yaranan fotonlar $t_c \approx (n \times d)/c$ zamanından sonra yaxın pikseldə zərbə ilə ionizasiya baş verir. Burada n- yarımkeçiricinin sındırma əmsalı, d- piksellər arası addım və c- işıq sürətidir. Əgər silisium əsaslı qeydedici üçün bu zaman müddətini hesablasaq ($n=3,96$, $d=3$ mkm və $c=3 \times 10^{10}$ sm/san) $t_c \approx 0,04$ psan olduğu alınır. Başqa sözlə bu fotonlar hesabına qeydedilən siqnalın amplitudu artır [6, c.5, s. 5-16]. Piksellərin sahəsi və onlar arası addımın uzunluğu artdıqca çarpaz görüş ehtimalı dəyişir. Təcrübi olaraq ÇG-ni təyin etmək üçün zəif işıq seli istifadə edilir. Bu zaman birinci fotoelektronun amplitudunun 1,5 ($N_{1,5Asi}$) və 0,5 ($N_{0,5Asi}$) hissəsinə uyğun gələn hadisələrin sayının nisbətindən istifadə edilir: $P_{cg.} = N_{1,5Asi}/N_{0,5Asi}$. Çarpaz görüşmə təyin edilərkən otaq temperaturundan aşağı temperaturlar istifadə edilir. Bu zaman qaranlıq cərəyanın təsiri minimuma endirilir. Çarpaz görüşmə ehtimalının artması detektor sistemlərində qeyd edilən zərrəciyin enerjisinin təyin edilmə dəqiqliyini azaldır [148, c.567, s.48-56]. Piksellər arasında yerləşən izolyasiya cəpəri ÇG-nin bir neçə faizə qədər azalmasına imkan verir. Bu isə selvari fotoqeydedicilərlə ölçülən parametrlərin dəqiqliyini artırır [6, c.5, s. 5-16].

Yarımkeçirici materialların yetişdirilmə və cihazların hazırlanma texnologiyasından asılı olaraq fotoqeydedicilərin aktiv həcmində defektlər yaranır. Bu defektlərin bəziləri tutma (tələ), rekombinasiya və generasiya mərkəzi rolunu oynayır [59, c.62, s.1151-1157]. Yaranan tutma mərkəzləri əksər hallarda selvari prosesdə yaranan yükdaşıyıcıları tutur və müəyyən andan sonra buraxırlar. Tutma mərkəzləri tərəfindən tutulan yükdaşıyıcılar əksər hallarda selvari proses qurtardıqdan sonra buraxılır. Bu isə əsas siqnalıdan fərqli olaraq əlavə gecikən hadisə və ya impuls kimi qeyd edilir. Bu impulsa gecikən impuls (Gİ) deyilir. Bu hadisənin olma ehtimalı belə ifadə edilir [6, c.5, s. 5-16]:

$$P_{ap}(t) = \frac{P_t \times P_{tr} \times e^{-\frac{t}{\tau_t}}}{\tau_t} \quad (1.5.3)$$

Burada P_t – tutma mərkəzləri tərəfindən yükdaşıyıcının tutulma mümkünlüyüdür. Elektronun tutulma ehtimalı yarımkeçirici quruluşdakı aşqar atomların konsentrasiyasından və zərbə ilə ionizasiya hesabına əmələ gələn elektron və deşikləri miqdarından asılıdır. τ_t – tutma mərkəzlərinin xarakteristik müddətidir. Tutma mərkəzlərinin xarakteristik müddəti onların qadağan olunmuş zonadakı səviyyəsindən və temperaturundan asılı olaraq dəyişir. P_{tr} – güclü elektrik sahəsində elektron və deşiklərin zərbə ilə selvari gücləndirməni tətikləmə ehtimalıdır. Bu ehtimal piksellərin aktiv hissəsində yaranan elektrik sahəsindən və fotonların piksellərin hansı hissəsində udulmasından asılıdır (piksellərin bütün səthi boyunca sahə tam sabit olmur). Yuxarda ki ifadədən görünürkü piksellərdə elektrik sahəsi böyüdükcə gecikən impulsun baş verməsi daha çox müşahidə edilir. Gecikən impulsun yaranma müddəti pikseldəki sahənin tam bərpa olma müddətindən kiçik olarsa, bu zaman həmin pikseldəki sahə az olur və nəticədə piksel siqnalı eyni gücləndirə bilmir. Tutma mərkəzlərinin parametrlərindən asılı olaraq onların yükdaşıyıcını buraxma müddəti maksimum mikro saniyələr tərtibində olur. Bu hadisələr qeydedicilərin enerji ayırdetməsinə və sayma performansına mənfi təsir edir [6, c.5, s. 5-16, 68, c.62, s.3727-3733].

Heyger rejimli fotoqeydedicilərin qeydetmə performansı foton qeydetmə effektivliyi (FQE) ilə müəyyən edilir. Hazırda istifadə edilən selvari foto qeydedicilərin əsas üstünlüyü onların FQE-si hesabına aparılır. Yuxarda qeydedilən parametrlərdən fərqli olaraq bu kəmiyyət qeydedicinin səthinə düşən işıq selinin yaratdığı yükdaşıyıcıların hansı hissəsinin pikseldə zərbə ilə gücləndirməni başlatmasını göstərir. Foton qeydetmə effektivliyinə qeydedicinin kvant effektivliyi, həndəsi faktoru və zərbə ilə ionizasiyanı tətikləmə ehtimalı təsir edir. Foton qeydetmə effektivliyi belə ifadə edilir [6, c.5, s. 5-16, 63, c.718, s.262-265, 148, c.567, s.48-56]:

$$FQE = QE \times \varepsilon \times P_{\text{tətik}} = QE \times \frac{A_{\text{həs.}}}{A_t} \times P_{\text{tətik}} \quad (1.5.4)$$

Burada, QE- fototqeydedicinin kvant effektivliyi (yaranan yükdaşıyıcıların sayının düşən fotonların sayına nisbətində), $\varepsilon = \frac{A_{\text{həs.}}}{A_t}$ həndəsi faktor (qeydedicinin həssas sahəsinin onun tam sahəsinə nisbətində), $A_{\text{həs.}}$ - qeydedicinin həssas hissəsinin sahəsi, A_t - qeydedicinin tam sahəsi, $P_{\text{tətik}}$ – yükdaşıyıcıların zərbə ilə ionizasiyanı tətikləmə mümkünlüyüdür [6, c.5, s. 5-16]. Foto qeydedicidə udulan işıq selinin yaratdığı yükdaşıyıcıların hamısı zərbə ilə ionizasiyanı tətikləyə bilmir. Yükdaşıyıcıların zərbə ilə ionizasiyanı tətikləmə mümkünlüyü yükdaşıyıcının əmələ gəldiyi yer və ifrat gərginliklə (hansı ki deşilmə gərginliyindən böyük olur) müəyyən edilir. Səthi piksellə fotoqeydedicilərdə vahid sahəyə düşən piksel sayı artdıqca ε pisləşir və nəticədə onların foton qeydetmə effektivliyi azalır [6, c.5, s. 5-16]. Məlumdur ki hazırki silisium foto qeydedicilərində gücləndirmə 1 olduqda QE-si 55-90 % arasında qiymət alır. QE-nin belə yüksək olması işıq əks etdirməyən qaytarıcı təbəqənin qalınlığının optimal və səthdəki yüksək aşqarlanmış (n və ya p tip) təbəqənin qalınlığının maksimum 100 nm olması ilə bağlıdır. Bununla yanaşı hazırlanan qeydedicilər 150-250 nm dalğa uzunluqlu işıq selini qeyd edəcəksə, onların aktiv p-n kecidlərinin qalınlığının udulma əmsalına hasili vahiddən çox böyük olmalıdır: $\alpha(\lambda) \times L_d \gg 1$ [6, c.5, s. 5-16, 180, s.789; s.382]. Fotoqeydedicilərin tətbiq sahəsindən asılı olaraq müxtəlif n və p tip altlıqlar istifadə edilir. Əgər qısa dalağa uzunluqlu işıq seli qeyd ediləcəksə bu zaman n-tip altlıq və onun səthində p layı tətbiq olunur. Bu zaman səthdə udulan fotonun yaratdığı fotoelektron + gərginlik tətbiq edilmiş altlıqda doğru hərəkət edir və həcmdə zərbə ilə ionizasiyanı tətikləyir. Qırmızı və infraqırmızı oblasta işləyən fotoqeydedici hazırlamaq üçün isə p-tip altlıq və n layı istifadə edilir. Bu zaman altlığa – gərginlik tətbiq edilir və deşiklər həcimə doğru elektronlar isə səthə doğru hərəkət edərək zərbə ilə ionizasiyanı tətikləyir [6, c.5, s. 5-16].

Selvari fotoqeydedicilər üçün əhəmiyyət kəsb edən parametrlərdən biri də qaranlıq cərəyandır. Bu cərəyan qeydedicilərin küyünü müəyyən edir. Qeydedicilərin

cərəyanını səthdə mövcud olan kontakt oblastından sızan səthi cərəyan, aktiv həcmi yüklər oblastında yaranan generasiya və diffuziya cərəyanı təşkil edir [6, c.5, s. 5-16]:

$$\dot{I} = \dot{I}_{\text{səth}} + \dot{I}_{\text{diffuziya}} + \dot{I}_{\text{gener}} \quad (1.5.5)$$

Burada $\dot{I}_{\text{səth}}$ - səthi cərəyan, $\dot{I}_{\text{diffuziya}}$ - diffuziya cərəyanı və \dot{I}_{gener} - generasiya cərəyanıdır.

Qeydedicilərin səthi cərəyanı onların istehsalı prosesində baş verən çirklənmə nəticəsində yaranır. Belə çirklənmələr əksər hallarda qoryucu təbəqələrin mənfi və ya müsbət yüklənməsinə səbəb olur. Nəticədə inversiya layı formalaşır və yükdaşıyıcıların axını baş verir [6, c.5, s. 5-16].

Diffuziya cərəyanı p-n keçidin kontaktı zamanı elektronların p tərəfdən n tərəfə və deşiklərin isə n tərəfdən p tərəfə diffuziyası nəticəsində yaranır [182, s.815; s.94]:

$$\dot{I}_{\text{diff}} = q \times A \times n_i^2 \times \left(\frac{D_p}{N_D \times L_p} + \frac{D_n}{N_A \times L_n} \right) \quad (1.5.6)$$

Burada q - elektronun yükü, A - p-n keçidin sahəsi, n_i , N_A , N_D - məxsusi keçiriciliyin və aşqar atomlarının (akseptor və donor) konsentrasiyası, D_n , D_p , L_n , L_p — elektron və deşiyin diffuziya əmsalı və diffuziya uzunluğudur. \dot{I}_{diff} -nin temperaturun dəyişməsi ilə dəyişməsi n_i^2 temperaturdan asılılığına əsaslanır [6, c.5, s. 5-16].

Generasiya cərəyanı yarımkeçiricidə aşqarların və defektlərin yaratdığı mərkəzlər nəticəsində yaranır. Bu mərkəzlərə uyğun gələn enerji səviyələri $E_g/2$ -nin yaxın ətrafında yerləşirlər. Generasiya cərəyanı belə ifadə edilir [6, c.5, s. 5-16, 107, s.223; s.28]:

$$\dot{I}_{\text{gen}} = \frac{q \times A \times n_i \times W}{\tau_0} \quad (1.5.7)$$

Burada A – p-n keçidin sahəsi, n_i - məxsusi keçiriciliyin konsentrasiyası, W - həcmi yüklər oblastının eni, τ_{eff} - effektiv yükdaşıyıcıların yaşama müddəti və V – tətbiq

edilən əks gərginlikdir. Diffuziya cərəyanında olduğu kimi generasiya cərəyanında temperaturdan əsasən məxsusi keçiricilik hesabına asılı olur [6, c.5, s. 5-16]. Əgər qəbul etsək ki, diffuziya cərəyanı və generasiya cərəyanı temperaturdan yalnız məxsusi keçiricilik hesabına asılıdır, onda bu cərəyanları belə ifadə etmək olar: $I_{diff} = A_1 \times T^3 \exp(-E_g/(k_B T))$ və $I_{gener} = A_2 \times T^{3/2} \exp(-E_{g0}/(k_B T))$, burada $E_{g0} - 0$ °K-də qadağan olunmuş zonanın enidir. Diffuziya və generasiya cərəyanına nisbətən səthi cərəyanın temperaturdan daha zəif asılılığı mövcuddur. P-n keçidlərə düşən gərginlik ifrat gərginlik olduqda (deşilmə gərginliyindən yuxarı gərginlik) keçidlərin görüş yerlərində yükdaşıyıcılar güclü elektrik sahəsi hesabına enerji əldə edərək zərbə ilə ionizasiya hesabına güclənmə yaradır (M), bu zaman p-n keçidin aktiv sahəsində yaranan cərəyan güclənməyə məruz qalır və səthi cərəyan bu təsirə məruz qalmır. Beləliklə selvari fotoqeydedicilər üçün tam cərəyan $I = I_{səth} + I_{həcm} = I_{səth} + M \times I_{həcm}$ olur [6, c.5, s. 5-16, 119, s.203].

MSFD fotodiodların selvari oblastında baş verən ionizasiyanı xarakterizə etmək üçün gücləndirmə əmsalından istifadə edilir. Gücləndirmə əmsalı selvari prosesdən alınan elektrik yükün selvari prosesi başlayan yükdaşıyıcıların yükünə olan nisbətidir. MSFD fotodiodların gücləndirmə əmsalı fotodiodun tutumundan və ifrat gərginlikdən asılıdır, və belə ifadə edilir $M = Q_{sel}/q = 2C_d \times (V_{ap} - V_{br})$, burada, q - elektronun yükü, Q_{sel} - selvari proses nəticəsində yaranan yükün miqdarı, C_d - fotodiodun tutumu (bura parazit tutumda daxildir), V_{ap} –fotodioda tətbiq edilən gərginlik, V_{br} - deşilmə gərginliyidir. MSFD fotodiodların deşilmə gərginliyi temperaturdan asılı olaraq dəyişir. Buna səbəb yükdaşıyıcıların sərbəst qaçış yollarında enerjilərini optik fanonların yaranmasına sərf etməsidir. Sərbəst qaçış yolu temperatur artdıqca azalır və nəticədə sabit bir sahədə eyni bir məsafədə yükdaşıyıcılar enerjilərini kristal qəfəsə verirlər. Məhz buna görə də elektron və deşiklərin kifayət qədər enerji əldə edərək zərbə ilə yeni yükdaşıyıcılar yaratması üçün gərginliyi artırmaq lazım olur. Baraf nəzəriyyəsinə görə yükdaşıyıcıların ionizasiya əmsalı aşağıdakı əsas üç parametrlə ifadə edilir:

- İonlaşmanın astana enerjisi (silisium üçün- $E_i = \frac{3 \times E_g}{2} = 1,68$ eV);

- Optik fanonların yaranması üçün yükdaşıyıcıların sərbəst qaçış yolu (silisiumda elektronlar üçün 0,65 nm deşiklər üçün isə 0,45 nm);
- Yaranan Raman optik fanonun enerjisi (silisium üçün $E_r=0,063$ eV).

Yarımkəçiricilərdə ionlaşma astana enerjisinin temperaturdan asılılığı qadağan olunmuş zonan eninin temperatur asılılığı vasitəsi ilə ifadə edilir. Silisium üçün qadağan olunmuş zonanın eninin temperaturdan asılılığı üçü aşağıdakı empirik formadan istifadə edilir [106, s.430; s. 73]:

$$E_g = 1.17eV - 4.73 \times 10^{-4} \times \left(\frac{T^2}{T + 636} \right) \quad (1.5.8)$$

burada E_g – silisiumun qadağan olunmuş zonasının eni, T isə kelvinlə ifadə edilmiş temperaturdur. İfadədən göründüyü kimi, qadağan olunmuş zonanın eninin 1 % dəyişməsi üçün temperatur 50 dərəcəyə qədər artmalıdır. Lakin silisiumda temperaturun bu qədər artması onun qaranlıq cərəyanın kəskin artmasına səbəb olur. Qaranlıq cərəyanın belə kəskin artması fotosiqnalın müşahidə edilmə ehtimalını kəskin azaldır. Eyni zamanda yükdaşıyıcıları ionizasiya əmsalın da azalır.

Optik fanonların yaranması üçün vacib olan sərbəst qaçış yolu temperaturdan asılı olaraq bu qanunla dəyişir: $\lambda = \lambda_0 \tanh(E_r/(2k_B T))$ burada λ_0 – 0 °K-də sərbəst qaçış yolu, E_r - optik fanonun enerjisi, k_B - Bolsman sabiti və T - temperaturdur. Sərbəst qaçış yolunun tərs qiyməti isə vahid uzunluqdakı toquşmaların sayıdır. Vahid uzunluqda itirilən enerji temperaturdan asılı deyil [106, s.430; s. 73].

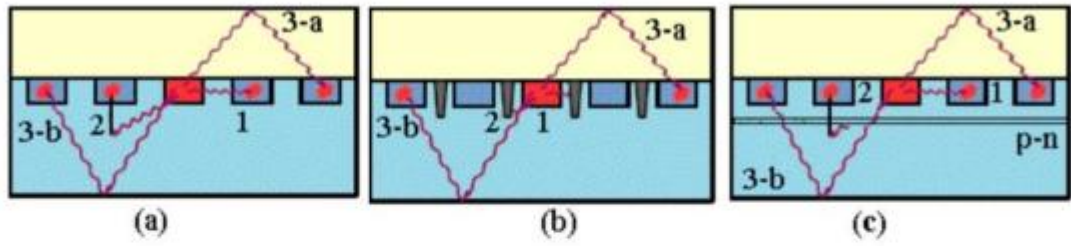
Hazırda MSFD fotodiodların iki tipi geniş tətbiq edilir: pikselləri səthdə yerləşən və pikselləri dərinlikdə yerləşən selvari fotodiodlar [22, s.168-169, 23, s.352-354, 24, 25, 159,s.1, 160, c.567, s. 70-73, 161, c.158, s.1-6, 162, 178, c.74, s.12-25]. Pikselləri səthdə yerləşən MSFD strukturlar hazırda Hamamatsu, SensL, Ketek, FBK, Zekotek digər firmalar tərəfindən istehsal edilir. Lakin pikselləri dərinlikdə yerləşən MSFD fotodiodlar isə yalnız Zekotek firması tərəfindən istehsal edilir.

Şəkil 1.5.2-də FBK firması tərəfindən hazırlanmış pikselləri p^{++} - tip altlıq üzərində yerləşən selvari fotodiodların quruluşu göstərilib [71, c.912, s.309-314]. FBK firması tərəfindən hazırlanan səthi piksellə MSFD fotodiodlarda piksellerin ölçüləri 10 – 100 mkm arasında dəyişir. Səthi MSFD fotodiodunun həssas həcmi p^{++} - tip altlıq üzərində yetişdirilmiş qalınlığı 2 – 3 mkm olan p^- - tip epitaksial təbəqə təşkil edir. Piksellər epitaksial təbəqə üzərində yerləşir. Piksellərdə selvari proses baş verdikdə səth və kənar hissələrdən baş verəcək yük axınıni ekranlamaq üçün piksellərin hər iki tərəfində ion implantasiyadan istifadə edilərək yüksək p^{++} tipli qoruyucu həlqələr hazırlanılır. Piksellərin səthini cirkənmələrdən və oksidləşmədən qorunması üçün SiO_2 təbəqəsi ilə örtülmüşdür. Qoruyucu təbəqələrdə müxtəlif şəffaf SiO_2 və Si_3N_2 çox saylı birləşmələrindən istifadə edilərək həssaslığı xeyli artırmaq mümkün olur. Səthi MSFD-lərdə hər bir piksel bir-birinə paralel olaraq söndürücü müqavimətlə (10^5 – 10^7 Om olan mikro-rezistor) ana xəttə qoşulmuşdur [71, c.912, s.309-314]. Səthi MSFD-lərə tərs istiqamətdə gərginlik tətbiq edildikdə birinci olaraq p^- - tip epitaksial təbəqə fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunmağa başlayır. Tətbiq edilən gərginliyin müəyyən qiymətində p^- - tip epitaksial təbəqə tam fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunur. Gərginliyin böyük qiymətləri isə piksellər oblastında (p^+-n^+ keçiddə) sahənin artmasına sərf olunur. MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginlik deşilmə və ya ifrat gərginliyə bərabər olduqda piksellər oblastındakı p^+-n^+ keçidlərdə maksimal sahə $3,5 \times 10^5$ V/sm-dən böyük olur. Bu zaman fotoeffekt nəticəsində yaranan fotoelektronlar və deşiklər piksellərin p^+-n^+ keçidlərdə mövcud olan yüksək sahə hesabına sərbəst qaçış yolunda sürətlənərək kifayət qədər enerji əldə edərək zərbə ilə ionizasiya hadisəsini başlatdırır. Bu fotodiodların gücləndirmə əmsalı 10^4 – 10^7 arasında dəyişir [146, c.486, s.164-169, 160, c.567, s.70-73]. Selvari proses baş verdikdə kifayət qədər böyük yük yaranır və tətbiq edilən gərginliyin müəyyən hissəsi piksellərə ardıcıl qoşulmuş söndürücü müqavimətə düşür. Yekunda MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyindən kiçik ($U_{tətbiq} - I_{sel} \times R_{sön} < U_{br.dow}$) olur və selvari proses sönür. Pikseldəki gərginliyin ifrat gərginliyə qədər çatması üçün müəyyən bir zaman sərf olunur, və bu müddətdən sonra güclənmə normal qaydada baş verir. Selvari proses nəticəsində hər pikseldə yaranan yüklər

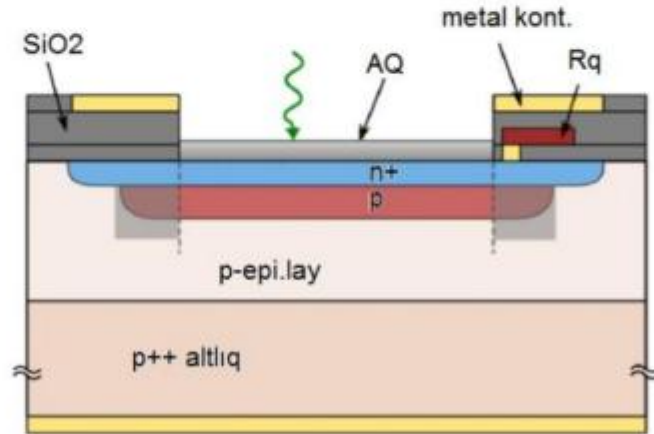
ümumi ana xəttə ötürülür ki, bu da cihazda siqnalın yaranmasını təmin edir. Tək elementli selvari fotodiodlardan fərqli olaraq MSFD diodlarda yaranan siqnalın amplitudu birbaşa olaraq selvari proses baş verən pikselərin sayından asılı olaraq artır. Səthi MSFD diodların quruluşundan görüldüyü kimi, fotodiodun səthinin həssas hissəsinin müəyyən bir qismi söndürücü müqavimətlər və ümumi ana xəttlərlə tutulmuşdur. Bu isə fotodiodun həndəsi faktorunun və eyni zamanda FQE-sinin azalmasına səbəb olur. Bu tip fotodiodlarda piksel sıxlığı artdıqca həndəsi faktor və FQE-si kəsin azalır. Buna misal olaraq, eyni quruluşa malik olan Hamamatsu firmasının son modellərini göstərmək olar [85]: MPPC S13720-1310CS, MPPC S13720-1325CS, MPPC S13720-1350CS və MPPC S13720-1375CS. MPPC fotodiodların 1mm^2 -də olan piksel sıxlığı 177, 400, 1600 və 10000 olduqda, bu zaman fotodiodların FQE-si 10 %, 25 %, 40 %, 82 % və həndəsi faktoru isə 33 %, 47 %, 74 % və 82 % olmuşdur.

Göründüyü kimi piksel sıxlığı 400-dən 5000-ə qədər artırıdığında həndəsi faktor 40 % -dan 60 % kimi və FQE-si isə 30 %-dan 10 % kimi azalır. Məhz bu çatışmazlıqlar belə quruluşda yüksək piksel sıxlıqlı və yüksək FQE-li MSFD fotodiodların hazırlanmasının mümkün olmadığını göstərir. Bu çatışmazlıq səthi MSFD fotodiodların yüksək enerjili zərrəciklərin qeyd edilməsində və spektroskopiyada istifadəsini məhdudlaşdırır.

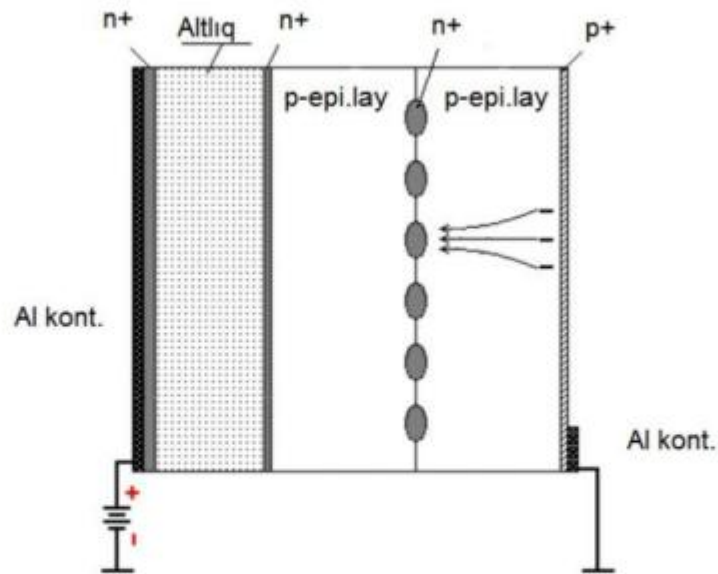
Selvari MSFD fotodiodların digər tipi pikselləri epitaksial təbəqələrin daxilində yerləşən dərin piksellə MSFD fotodiodlardır. Şəkil 1.5.3-də Z. Sadıqov tərəfindən təklif edilən və Zecotek Photonis Inc. firmasının dəstəyi ilə istehsal edilən dərin piksellə MSFD fotodiodlardır [1, s.158; s.137, 16, s.21,20, n.1, s.27-34,21, c.10, s.103-107, 34, c.10, s.1-7, 35, c.31, s.14-17, 36, s.252, 37, c.10, s.778-779, 38, s.383-385, 39, c.36, s.20-22, 40, s.13, 41, c. 1, s.33-36, 42, c.21, s.17-18, 43, c.12, s.1-7, 44, c.24, s.341-344, 45, c.912, s.287-289, 46, s.1-6, 47, s.167, 48, s.1, 49, s. 42, 53, s.357-362,154, c.2, s.16-20,155, s.49-50,156, c.845, s.621-622,157, c.3, s.9-19, 158, c.824, s.135-136, 159, s.1, 160, c.567, s.70-73,161, c.158, s.1-6, 162, 163, c.19, s.17-19,164, c.10, s.780-782, 165, c.504, s.301-303, 166, c.824, s.137-138, 169]. Bu tip fotoqeydedicilərin aktiv həcmi adətən 2 eyni və ya müxtəlif tip (p-p və ya n-p)



Şəkil 1.5.1 Səthi MSFD fotodiodlarda çarpaz görüşmə [116, c.61, s.1488-1492].



Şəkil 1.5.2 FBK firmasının istehsalı olan səthi selvari fotodiodların strukturu [71, c. 912, s.309-314].



Şəkil 1.5.3 Dərin piksellə fotoqeydedicilərin quruluşu [1, s.158; s.137, 6, c.5, s. 5-16].

aşqarlarla aşqarlanmış epitaksial təbəqədən təşkil olunur. Dərin piksellə foroqeydedicilərin aktiv həcmənin toplam qalınlığı 7–12 mkm arasında dəyişir. İstifadə edilən quruluşda elektrik sahəsinin biricinsliyinin təmin edilməsi və həmçinin altlıq daxilində yaranan yükdaşıyıcıların aktiv həcmə daxil olmaması üçün nazik yüksək aşqarlanmış lay yaradılır (fosfor ion ilə implantasiya metodu). Fotoqeydedicilərin əsas hissəsi sayılan piksellər isə dəmlənmə temperaturunda zəif diffuziya edən ağır As ionlarının (implantasiya metodu) aşqarlanması hesabına alınır. Piksellər arası addım 2 mkm və ya 3 mkm olmaqla radiusları 1,5 mkm- 3,5 mkm arasında dəyişir [6, c.5, s. 5-16, 32, 34, c.10, s.1-7, 35, c.31, s.14-17, 36, s.252, 37, c.10, s.778–779, 38, s.383-385, 43, c.12, s.1-7, 44, c.24, s.341-344, 45, c.912, s.287-289, 46, s.1-6, 42, s.168, 48, s.1, 49, s.42]. Bu tip fotoqeydedicilərdə zərbə ilə ionizasiya hesabına olan güclənmənin sönməsi yalnız pikselə birləşən 1-ci epitaksial layın müqaviməti hesabına baş verir. Məhz bu üstünlük bu tip fotoqeydedicilərdə hər vahid sahəyə (1 mm²) düşən piksel sayını 10000–40000 pikselə qədər yüksəltməyə imkan verir [6, c.5, s. 5-16]. MSFD fotodiodların həssaslıq oblastını ikinci epitaksial təbəqənin qalınlığı təyin edir. Bu təbəqənin qalınlığını artırmaqla MSFD fotodiodların qırmızı və infra-qırmızı oblasta həssaslığını artırmaq mümkündür. Bu tip fotoqeydedicilərin elektrodları əks istiqamətdə qoşulurlar. Belə olduğu halda ilk həcmi yüklər oblastı silisium altlıq üzərində olan yüksək aşqarlanmış n⁺ ekranlaşdırıcı təbəqə ilə 1-ci epitaksial təbəqə arasında yaranır. Elektrodla əks istiqamətdə tətbiq edilən gərginlik yüksəldikcə həcmi yüklər oblastı piksellərlə olan 2-ci keçidə çatır. Tətbiq edilən gərginlik yüksəldikcə 2-ci epitaksial təbəqədə tam aktivləşir. Bu zaman piksellər bir-birindən tam ayrılır və paralel qoşulmuş şəkildə işləyir və tətbiq edilən gərginlik yüksəldikcə maksimum sahə piksellə 2-ci epitaksiya layı arasında yaranır [1, s.158; s.137, 6, c.5, s. 5-16]. Fotonların yaratdığı yükdaşıyıcılar dərinlikdə yerləşən piksellərə doğru yönəlir və zərbə ilə ionizasiya hesabına güclənmə baş verir. Bu tip fotoqeydedicilərdə piksellərin formasının sferik olması onlarda zərbə ilə ionizasiyanın aşağı gərginlikdə yaranmasına səbəb olur. Bu zaman zərbə ilə ionizasiya hesabına yaranan yükdaşıyıcı piksellərə toplanır. Piksellərə toplanan elektronlar piksellə 2-ci epitaksial təbəqə arasındakı güclü sahəni zəiflədir. Bununla

yanaşı zərbə ilə ionizasiya hesabına olan güclənmənin tam sönməsi piksellə 1-ci epitaksial lay arasında yaranan kanalın müqaviməti hesabına dayanır. Epitaksial layın müqaviməti aşqarların konsentrasiyası ilə yanaşı onun hansı tip olmasındanda asılıdır [6, c.5, s. 5-16]. Əgər misal üçün biz MSFD-3N və MSFD-3NK fotoqeydedicilərinə baxsaq onlardan birində 1-ci epitaksial lay akseptor digərində isə donor tip keçiricilik üstünlük təşkil edir. Belə olduğu halda vahid həcmdəki yükdaşıyıcıların sayı bərabər olduğuna baxmayaraq onların xüsusi müqaviməti belə hesablanır: $\rho_n = 1/(\mu_e \times N_D \times e)$ və $\rho_p = 1/(\mu_h \times N_A \times e)$, [6, c.5, s. 5-16] burada μ_e , μ_h – elektronun və deşiklərin yürüklüyü, N_D , N_A – donor və akseptroların konsentrasiyası və e - elektron yüküdür. Məlumdur ki silisiumda elektronun yürüklüyü deşiklərin yürüklüyündən təqribən 3 dəfə çoxdur. Belə olduğu halda ($N_D = N_A$) donor tip keçiriciliyə malik layların xüsusi müqaviməti akseptor keçiriciliyə malik olan layın müqavimətindən təqribən üç dəfə az alınır. Dərin piksellə selvari fotoqeydedicilərdə zərbə ilə ionizasiya hesabına olan güclənməni söndürən kanal müqaviməti aşağıdakı ifadədə ilə hesablanır [6, c.5, s. 5-16]:

$$R_m = \rho \times \frac{W_n}{\pi \times r^2} \quad (1.5.9)$$

Burada ρ – kanalın xüsusi müqaviməti, W_n - pikselin altındakı layın-qalınlığı (~4 mkm) və r - pikselin radiusudur. Beləliklə dərin piksellə selvari fotoqeydedicilər (MSFD-3N və MSFD-3NK) üçün söndürücü müqavimət təqribən 900 kOm alınmışdır [6, c.5, s. 5-16, 76, s.351; s.305].

Dərin piksellə MSFD fotodiodların aşağıdakı modellərini göstərmək olar: MSFD-3B, MSFD-3A, MSFD-3N, MSFD-3N1P və MSFD-3K. Bu tip MSFD fotodiodların 1 mm²-də olan piksel sıxlığı 40000, 15000, 15000, 15000 və 10000 olmuşdur. Bu zaman fotodiodların FQE-si 10 %, 15 %, 25 %, 30 %, 40 % və həndəsi faktoru isə 100 % olmuşdur. Pikselləri səthdə yerləşən MSFD analoqları ilə müqayisədə dərin piksellə MSFD fotodiodlar üstünlüklərə malikdirlər [1, s.158; s. 126, 2, s.25-28, 3, s.80,53, s.357-362]: həndəsi faktorun yüksək olması, piksel

sıxlığının 40000 piksel/mm² olması, fotoqeydetmə əmsalının 30 – 40 % olması və yüksək radiasiya davamlılığına malik olması. Məhz bu üstünlüklər dərin pikselli MSFD fotodiodların geniş tətbiq edilmə imkanını artırır [34, c.10, s.1-7, 35, c. 31, s. 14-17, 36, s.252, 37, c.10, s.778–779, 38, s.383-385, 39, c.36, s.20-22, 40, s.13, 41, c.1, s.33-36, 42, c.21, s.17-18, 43, c.12, s.1-7, 53, s.357-362].

Piksəlləri səthdə yerləşən MSFD fotodiodların həndəsi faktoru və piksel sıxlığını artırmaq üçün Çinin NDL laboratoriyası səthi piksellərdəki selvari prosesi söndürmək üçün piksellərin altında yerləşən epitaksial təbəqənin həcmi müqavimətin istifadə edilmişdir [92, c.1, s.2-8, 153, c.10255, s.1-6]. Bu quruluşda piksel sıxlıqlar həcmi MSFD fotodiodlarda olduğu kimi çox yüksəkdir. Fotodiodlar n⁺ altlıq üzərində yetişdirilmişdir. Altlıq üzərində n⁻ epitaksial təbəqə və onun üzərində isə ion implantasiya yolu ilə n⁺ və p keçidlər yaradılmışdır. Bu keçidlər birbaşa olaraq piksel rolunu oynayır. Piksellər arası polisilisiyum isə çarpaz görüşməni azaltmaq üçün istifadə edilmişdir. Piksellərdəki selvari prosesi piksellərin altında yerləşən epitaksial təbəqənin müqaviməti nəticəsində sönür. Polisilisiyum çəpərin hündürlüklüyünü artırmaqla piksellərin söndürücü müqavimətinin və deşilmə gərginliyinin dəyişməsinin mümkün olduğu da müəyyən edilmişdir. NDL-n istehsal etdiyi MSFD fotodiodların piksel sıxlığı 10000 piksel tərtibindədir. Bu strukturun əsas çatışmazlığı fotoqeydetmə effektivliyinin çox kiçik olması və stabil olmamasıdır. Bununla yanaşı Hamamatsu, KETEK, SensL və digər mərkəzlərin hazırladığı səthi pikselli fotoqeydedicilərin ionlaşdırıcı şüalanmanı qeydetmə həssaslığı ssintilyatorlarla tədqiq edilmişdir [7, c.5, s. 33-43, 57, s.1-5, 70, s.92-96, 85, 103, s.1-6, 115, c.652, s.866-869, 124, s.1-15, 127, c.7, s.1-15, 128, s.1-4, 129, c. 57, s.1008-1014, 130, 131, s.187, 140, c.8859, s.1-8, 181, c.60, s.1533-1540, 200, c.91, s.1-10]. Hamamatsu firmasının MPPC-C10507-11- 100U fotodiodlarından və CsI ssintilyatorundan istifadə edərək qamma şüaları qeydetmə performansını tədqiq edilmişdir [70, s.92-96]. Burada pikselinin sahəsi 100×100 mkm və sıxlığı 900 piksel olan MPPC fotodiodlardan istifadə edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, belə detektorla maksimal enerji ayırd etməsi 662 keV enerjili qamma şüası üçün 13 % olmuşdur. Lakin işdə MPPC fotodiodun xəttiliyinin pozulması nəzərə alınmamışdır. Həmçinin də MPPC-

C10507-11- 100U fotodiodlarının FQE-sinin 50 % olmasına baxmayaraq yaxşı enerji ayırdetməsi alınmamışdır.

Bir məqalənin müəllifi Ce:GAGG ssintilyatorundan və 3×3 mm² ölçülü SensL firmasının MSFD fotodiodlarından istifadə edərək qamma şüaları qeydetmə həssaslığını tədqiq etmişdir [170, c.63, s.503-508]. Bu tip fotoqeydedicinin maksimum foton qeydetmə effektivliyi 31 %, pikselin eni və uzunluğunun hər biri 35 mkm və 9 mm² sahədə olan tam piksel sayı 4774 piksel olmuşdur. SensL firmasının MSFD fotodiodlarına tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyindən 5V yüksək olduqda belə ssintilyator qeydediciləri 0,511 MeV enerjili qamma şüaların amplitudunu düzgün təyin edə bilməmişdir. Bu isə qeydedicinin xətti işləmə oblastının məhdud olması ilə bağlı olmuşdur. FQE-ni azaltmaq üçün müəllif işləmə gərginliyini azaltmağı təklif etmişdir. FQE-nin azaldılması metodu belə fotoqeydedicilər əsasında hazırlanan detektorların 1000 keV enerjili qamma şüaların amplitudunu düzgün təyin etməyə imkan vermir [7, c.5, s. 33-43]. Bununla yanaşı, müəllif enerji ayırdetməsinin temperaturdan asılılığına baxmış və göstərmişdir ki, enerji ayırdetməsi temperaturdan asılı deyil.

Başqa bir məqalədə MPPC-S10985-025C və MPPC-S10985-050C 4 elementli matrislərdən istifadə edərək BGO və LSO ssintilyatorlarla qamma şüaları qeydetmə həssaslığı öyrənilmişdir [77, c.65, s.2525-2530]. MPPC-S10985-025C fotodiodu və BGO və LSO əsasında hazırlanmış detektor enerjisi 0,511 MeV olan elektromaqnit şüası üçün amplitudun maksimumunun yarım eninin amplituda nisbəti 12 % və 11 % olmuşdur. BGO və MPPC-S10985-050C fotodiod vasitəsi ilə enerjisi 0,511 MeV olan elektromaqnit şüası üçün amplitudun maksimumunun yarım eninin amplituda nisbəti 11,25 % alınmışdır [7, c.5, s. 33-43]. Müəllif göstərmişdiki matrislərdən gələn siqnallar toplandıqda enerji ayırdetməsini 10 %-ə yaxın yaxşılaşır. Bununla yanaşı bu tip detektorla minimum qeyd edilən enerjisi 100 keV tərtibində olmuşdur. Lakin bu yaxınlaşma da detektorların xətilik problemini tam həll edə bilmir.

Başqa bir məqalədə piksellərinin ölçüsü 40 mkm və sahəsi 1×1 mm² olan FBK-irs firmasının fotodiodlarının LSO ssintilyatorları ilə qamma şüaları qeydetmə performansını göstərmişdir [69, s.186]. Bu tip fotodiodlar 511 keV enerjidedə artıq

xəttiliydən kənara çıxdığı müşahidə edilmişdir. Müəllif həmçinin xəttiliyi artırmaq üçün hər birinin ölçüsü $1 \times 1 \text{ mm}^2$ (piksel sahəsi 50 mkm) olan 16 elementli matrisdən istifadə etmişdir. Bu matrislərdə olan toplam piksellərin sayı 6400 piksel olmuşdur. Müxtəlif 2 – 4 V ifrat gərginlikdə detektorun xəttiliyinin dəyişməsi analiz edilmişdir. Ən yaxşı xəttiliy ifrat gərginlik 2 V olduqda 1 MeV enerjiyə qədər müşahidə edilmişdir. İfrat gərginliyin 3 V və 4 V qiymətində FQE-si artmış və xəttiliy oblasti 662 keV və 511 keV qədərə azalmışdır. Bu zaman 511 keV enerjili qamma şüası üçün ən optimal enerji ayırdetməsi ifrat gərginlik 4 V olduqda alınmışdır 14,06 %. Başqa sözlə FBK MSFD-lərin ən optima işləmə gərginliyi məhz ifrat gərginlik 4 V olduqda olmalıdır. Lakin bu halda detektorun xəttiliyi kəskin pisləşir. Məhz bu çatışmamazlıq bu fotodiodlar əsasında geniş enerji intervalında işləyən qamma spektrometrlərin və dozimetrlərin hazırlanmasını mümkünəz etmişdir [53, s.357-362, 148, c.567, s.48-56].

Başqa bir məqalədə JET-də (Joint European Torus) ITER təcrübələrində enerjiləri bir neçə MeV olan qamma şüalarını qeyd etməyə imkan verən sayma sürəti 1 MHz olan və 1,1 MeV enerjili qamma şüası üçün enerjiayırdetməsi 5 % olan detektorların hazırlanması təklif edilmişdir [200, c.91, s.1-10]. Bunun üçün ssintilyator olaraq böyük işıq çıxışı olan CeBr_3 kristaldan istifadə edilmişdir. Ssintilyatordan alınan foton selini qeyd etmək üçün isə 16 elementli hər birinin sahəsi $3 \times 3 \text{ mm}^2$ olan MPPC- S12642-040 modulundan istifadə edilmişdir. Matrisin toplam piksel sayı 57600 olmuşdur. İşdə enerjisi 0,511 MeV olan elektromaqnit şüası üçün amplitudun maksimumunun yarım eninin amplituda nisbəti 6,8 % alınmışdır. Lakin detektor modulunun xəttiliyi artıq 2 MeV enerjidən böyük olduqda pozulmuşdur. Xüsusi ilə qeyd etmək lazımdır ki, MPPC fotodiodu optimal rejimdən aşağı ifrat gərginlikdə işlədilmişdir. Detektorun yuxarı enerji oblastındakı xətilik məsələsi MPPC fotodiodlar üçün tam həll edilməmişdir.

Başqa bir məqalədə iki müxtəlif firmanın istehsal etdiyi 4×4 elementli fotoqeydedicilər istifadə edilərək CsI ($13 \times 13 \times 13 \text{ mm}^3$) və LaBr_3 ($6 \times 6 \text{ mm}^2$) ssintilyatorları ilə qamma şüaları qeydetmə performansını tədqiq edilmişdir [65, s.351-358]. SensL firmasının 4×4 elementli fotoqeydedicilərindəki piksellərin eni və

uzunluğu 35 mkm və belə piksellərin tam sayı isə 58700 olmuşdur [7, c.5, s. 33-43]. SensL firmasının 4×4 elementli fotoqeydedicilərin ($\lambda \sim 470 - 500\text{nm}$) foton qeydetmə effektivliyi 28 % olmuşdur. Hamamtsu firmasının 4×4 elementli fotoqeydedicilərindəki piksellərin eni və uzunluğu 25 mkm və belə piksellərin tam sayı isə 57600 olmuşdur. Bu fotoqeydedicinin foton qeydetmə effektivliyi 23 %-ə çatmışdır ($\lambda \sim 420\text{ nm}$). SensL və Hamamatsu firmasının matrisləri və CsI, LaBr₃ kristalları əsasında hazırlanan qeydedici 511 keV – 1330 keV enerji oblastında xəttliliyini tam saxlamışdır. Nöqtəvi sezium-137 radioizotopundan şüalanən 0,662 MeV enerji üçün amplitudun maksimumunun yarım eninin amplituda nisbəti ~ 8 % olmuşdur [7, c.5, s. 33-43]. Bu işdə həmçinin siqnalın amplitudunun və enerji ayırdetməsinin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə də baxılmışdır. Məlum olmuşdur ki, Hamamatsu firmasının matrisləri əsasında hazırlanmış detektorlar temperatur 0 – 50 °C intervalında artdıqda 0,662 MeV enerjili qamma şüasına uyğun gələn enerji ayırdetməsi 8 %-dən başlayaraq 14 %-ə kimi artmış və siqnalın amplitudu isə 160 ADC-dən 70 ADC-ə kimi azalmışdır. Belə bir dəyişmə SensL firmasının matrisləri əsasında hazırlanmış detektorlarda da müşahidə edilmişdir. CsI əsasında hazırlanmış bu detektorun 25 °C temperaturda 0,662 MeV enerjili qamma şüasına uyğun gələn enerji ayırdetməsi 16 % olmuşdur. Temperatur 0 – 50 °C intervalında dəyişdikdə isə enerji ayırdetməsi 35 % kimi artmışdır. Ən yaxşı enerji ayırdetməsi -25 °C-də müşahidə edilmişdir (11 %). Photopikə uyğun gələn siqnalın amplitudu isə bu zaman 350 ADC-dən 150 ADC-ə kimi azalmışdır.

Digər işdə FC30035 tipli səthi pikselləli fotoqeydedici və LaBr₃(Ce) ssintilyator əsaslı detektorun müxtəlif enerjili şüalanmanı qeydetmə həssaslığı öyrənilmişdir [57, s.1-5]. FC30035 tipli səthi pikselləli fotoqeydedicinin tam sahəsi 9 mm² və onun səthində tam 4774 piksel yerləşmişdir. Təcrübədə istifadə edilən LaBr₃(Ce) ssintilyatorunun radiusu ~ 2,5 mm, hündürlüyü ~ 10 mm və maksimal buraxılan ssintilyasiya fotonlarının dalğa uzunluğu 380 nm olmuşdur [7, c.5, s. 33-43]. İstifadə edilən fotoqeydedicinin foton qeydetmə effektivliyi 25 % olmuşdur. LaBr₃(Ce) ssintilyatorunda 1 keV enerjili ionlaşdırıcı şüalanma 63 foton yaradır. İşdə 0,031 MeV enerjili qamma şüası üçün uyğun gələn siqnalın amplitudu 10 mV olduğu

və 0,662 MeV enerjili şüalanma üçün uyğun gələn siqnalın amplitudu isə 400 mV göstərilmişdir. Amerisium radioizotopunun şüalandırdığı 0,0596 MeV enerjili şüalanma üçün amplitudun maksimumunun yarım eninin amplituda nisbəti 16,7 % tapılmışdır. Nöqtəvi seziyum radioizotopundan şüalanən 0,662 MeV enerjili şüalanma üçün amplitudun maksimumunun yarım eninin amplituda nisbəti 4,9 % tapılmışdır [7, c.5, s. 33-43]. Müəllifin təqdim etdiyi detektor modulu 0,032 – 0,662 MeV enerji intervalında xəttiliyin saxlanması haqqında məlumat verilməmişdir. Nəzəri olaraq göstərmək olar ki, əgər 60 keV enerjili qamma şüası ssintilyatorda tam udularsa, bu zaman yaranan ssintilyasiya fotonlarının sayı $N_s \sim ((60 \text{ keV} \times 63 \text{ foton}) / (1 \text{ keV})) \sim 2016$ foton olur. Piksəllərdə selvari prosesi başlanan fotoelektronların sayı isə $N_{f.e} \sim FQE \times N_s \times 25\% \times 2016 = 500$ fotoelektron alınır. Başqa sözlə, MSFD-de olan piksellərin toplam sayı 4774 olduğu üçün demək olar ki, bu detektor xətti rejimdə işləmişdir. Lakin analogi hesablamaları 0,662 MeV enerjili qamma şüası üçün hesablayaq. Qamma şüasının udulması nəticəsində yaranan ssintilyasiya fotonlarının sayı $N_s \sim ((662 \text{ keV} \times 63 \text{ foton}) / (1 \text{ keV})) \sim 41706$ foton alınır, və bu da selvari prosesi başlatdırıyan fotoelektronların sayının $N_{f.e} \sim FQE \times N_s \times 25\% \times 41706 = 10426$ fotoelektrona uyğun gəlir. Göründüyü kimi, 0,662 MeV enerjili qamma şüası üçün alınmış fotoelektronları sayı MSFD-FC30035 modulunda mövcud olan toplam piksellərin sayından $\sim 2,2$ dəfə yüksək alınır. Başqa sözlə, bir pikselə eyni anda 2-dən çox fotoelektron düşür. Nəzərə alsaq ki, MSFD qəbuledicilər əsasında hazırlanmış detektorların xətti rejimdə işləməsi üçün hər pikseldə selvari prosesi eyni zamanında yalnız bir fotoelektron başlatmalıdır, onda aparılan hesablamalar göstərir ki, LaBr₃ və MSFD-FC30035 əsasında hazırlanmış detektorlar artıq 0,662 MeV enerjiddə xəttiliyini itirmişdir.

Başqa bir məqalədə sürətli deuterium və tritium ionlarının plazama qarşığı zamanı və ${}^9\text{Be}({}^4\text{He}, n){}^{12}\text{C}$ reaksiyalarından alınan 4,4 MeV enerjili qamma şüaların qeyd edilməsi üçün Hamamatsu firmasının istehsalı olan MPPC fotodiodları təklif edilmişdir [58, c.123, s.940-944]. Bu təcrübədə lazım olan detektor üçün əsas şərt bu idi ki, detektorların 3 – 6 MeV enerjili qamma şüaları üçün ayrıldıqca bir neçə faiz tərtibində olsun. Bu təcrübədə 16 elementli matris üçün piksellərinin ölçüsü 50 mkm

olan 16 ədəd MPPC-S12642-0404PB-50 tipli fotodiod istifadə edilmişdir. Hər fotodiodda mövcud olan piksellərin sayı 3600 piksel olmuşdur. Matrisdə mövcud olan toplam piksellərin sayı isə 57600 olmuşdur. Ssintilyator olaraq diametri 2,5 sm və uzunluğu 2,5 sm olan CeBr_3 kristalından (ssintilyatorundan) istifadə edilmişdir. Qamma mənbəsinin enerji intervalı 241 – 2615 keV olmuşdur. Bu tip detektorla 511keV və 2210keV enerjili qamma şüası üçün uyğun olaraq 7,6 % və 3,5 % enerji ayırılması əldə edilmişdir. Detektor öz xəttliliyinin tam saxlamışdır. Həmçinin, müəllif öz işində matrislərə 14 MeV enerjili sürətli neytronların təsirini də tədqiq etmişdir. Neytronla şüalanma dozasının 4×10^9 n/san qiymətində 511 keV enerjili qamma şüasına uyğun gələn pikin ayırılması 9,1 %-ə kimi artmış və pikin yeri isə 1402 kanalda müşahidə edilmişdir. Lakin şüalanma dozasının 2×10^{10} n/san qiymətində 511 keV enerjili qamma şüasına uyğun gələn pikin enerji ayırılması 14,9 % kimi artmış və pikin yeri isə 1148-ci kanalda müşahidə edilmişdir. Beləliklə, hətta aşağı şüalanma dozasında detektorun 511 keV enerjili qamma şüasına uyğun gələn pikin enerji ayırılması 96 % pisləşmiş, və fotopikin maksimal amplitudu isə 21 % azalmışdır.

Başqa bir məqalədə Hadron Kalorimetrində N61 təcrübəsində Hamamatsu və bizim kolaborasiya tərəfindən istehsal edilmiş MSFD-3A fotodiodlarından istifadə edilmişdir [78, s.1-4]. Bu fotodiodlar enerjiləri 20 –158 GeV arasında dəyişən və p+p, p+Pb, Be+Be, Ar+Sc, Xe+La və Pb+Pb toquşmalarını analiz etmək üçün hazırlanacaq kalorimetrdə istifadə ediləcəkdir. Məqsəd PSD (ingiliscə- Projectile Spectator Detector) detektor modullu ilə toquşmalarda iştirak etməyən sürətləndirilmiş ionların sayını və enerjisini tapmaqdır. PSD detektoru ölçüsü 10×10 sm² olan 16 kiçik mərkəzi moduldan və sahəsi 20×20 sm² olan 28 böyük moduldan ibarətdir. Hər modulun uzunluğu isə 1200 mm olmuşdur. Hər modul qalınlığı 16 mm olan qurğuşun və 4 mm qalınlıqlı 60 təbəqədən ibarətdir. Ssintilyatorlardan yaranan fotonlar dalğa uzunluğu sürüşdürücü fiberlə MSFD fotodiodlara toplanır. Təcrübədə istifadə edilən MSFD-3A fotodiodunun foton qeyetmə effektivliyi 15 % tərtibində olmuşdur. Lakin MPPC S12572-010C/P fotodiodlarının FQE-si 10 %-dan az olmuşdur. Müəllif bu işdə düşən ion selinin intensivliyi 160000 hadisə/san olduqda

MSFD fotodiodla qeyd edilən siqnalın amplitudunun 20 % azaldığını müəyyən etmiş, və buna əsaslanaraq MPPC fotodiodlarının bu təcrübələr üçün uyğun olduğunu göstərmişdir. Lakin reallıqda siqnalın amplitudu birbaşa olaraq fotodiodların FQE-sindən asılıdır. Məhz buna görə də nəzrə almaq lazımdır ki MSFD-3A fotodiodlarının FQE-si MPPC fotodiodun FQE-sindən 50 % daha yüksəkdir. Başqa sözlə, eyni bir gücləndirmə əmsalında MSFD-3A fotodiodlarından alınan siqnalın amplitudu MPPC fotodiodu ilə müqayisədə 50 % daha yüksək alınır. Hətta qəbul etsək ki, hadisələrin tezliyi 160000 hadisə/san olduqda MSFD-3A fotodiodlarında amplitudu 20 % azalır yekunda MSFD-3A fotodiodunun çıxışında müşahidə edilən siqnalın amplitudu MPPC fotodiodla müqayisədə 30 % yüksək olmalıdır. PSD detektor modullu üçün ikinci şərt enerji ayırdetməsi $\frac{\sigma}{E} < \frac{60\%}{\sqrt{E(\text{GeV})}}$ kiçik olmalıdır. MPPC S12572-010C/P fotodiodlar əsasında yığılmış detektor modulu üçün enerji ayırdetməsi 68.36 % alınmışdır, və göründüyü kimi, bu qiymət PSD üçün lazım olan ikinci şərti ödəmir. Lakin MSFD-3A fotoqeydedicisi əsaslı qeydedici üçün enerji ayırdetməsi 56,1 % alınmışdır. Beləliklə, göstərilmişdir ki, MSFD-3A fotodiodu əsasında hazırlanmış detektor modulları analoqlarına nisbətən 22 % daha yaxşı nəticə göstərir. Əlbəttə, alınan nəticələrin yaxşılaşdırılması üçün PSD kalorimetrlərində FQE-si 30 – 40 % arasında olan MSFD-3N, 1P və 3NK fotodiodları istifadə edilərsə enerji ayırdetməsi 40 % kimi azala (yaxşılaşa) bilər.

Başqa bir məqalədə Hamamatsu firması tərəfindən hazırlanmış qamma detektor modulunun portotipi göstərilmişdir [68]. Detektor modulunun işləmə temperaturu $-10\text{ }^{\circ}\text{C} - +50\text{ }^{\circ}\text{C}$ intervalında, və işləmə gərginliyi $+5\text{V}$ olmuşdur. Modulun minimum qeyd etdiyi doza $0,01\text{ mkZv/saat}$, və minimum qeydetdiyi enerji 32 keV olmuşdur. ^{137}Cs izotopunun buraxdığı və 662 keV enerjili qamma şüası üçün enerji ayırdetməsi $8 - 10\%$ arasında alınmışdır [85].

Başqa bir məqalədə SensL firmasının istehsalı olan yeni səthi MSFD fotodiodun performansını göstərilmişdir [169, s.1-5]. Yeni MSFD fotodiod analoqlarından fərqli olaraq iki çıxışa malik olmuşdur. Birinci çıxış adi selvari fotodiodlarda mövcud olan çıxış olmuşdur. İkinci çıxışda siqnal piksellərdən əlavə kiçik tutumla (kondensatorla)

götürülmüşdür. Belə kiçik tutumun seçilməsi nəticəsində RC parametri kəskin kiçilmiş, və sürətli çıxışda davam etmə müddət 2 nsan olan siqnallar alınmışdır, yəni adi çıxışdan alınan siqnaldan, təqribən 25 dəfə kiçik davam etmə müddətli siqnal müşahidə edilir. LSO ssintilyatorundan istifadə edilərək zamana görə ayırdetməni 190 psan olmuşdur. Bu tip fotodiodların birinci çıxışının ionlaşdırıcı şüalanmanın enerjisi haqqında məlumat almaq üçün və ikinci sürətli çıxışını isə uçuş müddətinin təyin edilməsində istifadə oluna bilər. Lakin bu MSFD-nin çatışmayan cəhəti ondan ibarətdir ki, sürətli çıxışda alınan siqnalın amplitudunun real amplituddan dəfələrlə kiçikdir. Belə detektorların hazırlanması uçuş müddətinin təyin edilməsi və ionlaşdırıcı qeydedici sayğacların hazırlanmasında istifadə üçün nəzərdə tutulmuşdur. Lakin bu tip fotodiodlarda bir sıra çatışmamazlıqlar mövcuddur: impulsun amplitudunun itirilməsi, məhdud piksel sıxlığı və kiçik ölçüdə istehsal edilməsi. Sadalanan bu çətinliklər MAPD kolobarasiyası tərəfindən təkmilləşdirilən mikropikselli fototransistorlar vasitəsi ilə aradan qaldırılmışdır [156, c.845, s.621-622, 158, c.824, s.135–136].

MSFD fotodiodlar əsasında qamma detektorları hazırladıqda onlar ən çox elə məhz qamma şüaların təsirinə məruz qalırlar. Buna görə də bu tip foto qeydedicilərin qamma şüalara qarşı radiasiya davamlılığı bəzi tədqiqatçılar tərəfindən tədqiq edilmişdir [62, c.762, s.149-161, 114, 137, s.347-352].

Başqa bir məqalədə müəllif Hamamatsu firmasının istehsalı olan piksel ölçüsü 50mkm olan MPPC-S10362-050 fotodiodlarının enerjisi 300 keV olan Rentgen şüalarından istifadə edərək 200 Qr-dən başlayaraq 20 MQr dozaya qədər şüalandırmışdır. Şüalanma dozasının maksimal qiymətində 20 MQr dozada fotodiodun qaranlıq cərəyanı 2000 dəfə artaraq 200 mka olmuşdur [62, c.762, s.149-161]. Belə böyük şüalanma dozasından sonra piksellərin tutumunun azalması 6,7 % müşahidə olunmuşdur. Qaranlıq cərəyanın belə kəskin artması quruluşda yaranan sadə deffektlərlə bağlı olmuşdur, və bu da fotodiodun həssaslığını kəskin azaltmışdır.

Başqa bir məqalədə müəllif daha yuxarı enerjili (1,17 MeV və 1,33 MeV) qamma şüalarından istifadə edərək MPPC fotodiodlarının radiasiya davamlılığı tədqiq edilmişdir [114]. Radioaktiv mənbə olaraq ^{60}Co mənbəsindən istifadə edilmişdir.

Piksəllərinin ölçüsü 100 mkm olan MPPC-11-100C fotodiodları 240 Qr dozaya qədər şüalandırılmışdır. MPPC fotodiodun işləmə gərgiliyində qaranlıq cərəyan təqribən 2 dəfəyə yaxın, fotodiodun küyü isə 1,7 dəfə artmışdır.

Başqa bir məqalədə müəllif 1,17 MeV və 1,33MeV enerjili qamma şüalarından istifadə edərək toplam piksel sayı 400, aktiv sahəsi 0,64 mm və həndəsi faktoru 0,47 % olan ST Microelectronics firması tərəfindən istehsal olunan MSFD fotodiodlarının radiasiya davamlığı tədqiq edilmişdir [137, c.767, s.347-352]. MSFD fotodiodar 10 Qr dozadan başlayaraq 4 mərhələdə 9,4 kQr dozaya qədər şüalandırılmışdır. Şüalanma dozasının yalnız aşağı qiymətlərində tək fotoelektronlu piklərin paylanması müşahidə edilmişdir. Şüalanma dozasının 1,3 kQr doza qiymətində isə artıq tək fotoelektronlu piklərin paylanması müşahidə edilməmişdir. Şüalanma dozasının 136 Qr qiymətində fotodiodun qaranlıq cərəyanı 1,7 dəfə, şüalanma dozasının 9,4 kQr maksimal qiymətində isə 17 dəfə artmışdır.

Başqa bir məqalədə müəllif Hamamatsu firmasının MPPC-15,25 və 50 mkm fotodiodlarının ^{60}Co radioizotopu ilə radiasiya davamlılığını tədqiq etmişdir. MPPC-15 fotodiodlarının qamma şüası ilə şüalanma dozasının 1 MQr qiymətində işləmə gərginliyində fotodiodun qaranlıq cərəyanı təqribən 41 dəfə, MPPC-25 fotodiodunun qaranlıq cərəyanı 60 dəfə və MPPC-S10362-050CK fotodiodunun qaranlıq cərəyanı isə 100 dəfə artmışdır. Göstərilmişdir ki, piksellin sahəsi artdıqca MPPC fotodiodlarının radiasiya davamlılığı pisləşir.

1.6. Nəticələr

Beləliklə aparılan geniş ədəbiyyat icmalından göründüyü kimi, müxtəlif tipli MSFD fotodiodlar və ssintilyatorlar əsasında hazırlanmış qamma detektorların əksəriyyəti hətta 662 keV enerji intervalında öz xəttilyindən çıxır. Tədqiqatçılar bu çətinliyin aradan qaldırılması üçün çox elementli matrislər təklif etdirlər. Lakin bu təklif detektorun qiymətinin dəfələrlə artmasına səbəb olur. MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış detektorların digər bir problemi yuxarı enerji ayırdetməsinə malik olmasıdır. Bu isə birbaşa MSFD fotodiodların FQE-sinin kiçik olması ilə

bağlıdır. Beləliklə, yeni hazırlanacaq qamma spektrometrlərin hazırlanmasında istifadə ediləcək MSFD fotodiodlar yüksək piksel sıxlığına, yüksək FQE-yə malik olmalı və radiasiyaya davamlı olmalıdır. Belə MSFD-3K fotodiodları MAPD kolaborasiya tərəfindən hazırlanmışdır. Məhz ona görə də MSFD-3K tipli fotodiodları təkmilləşdirilərək onların əsasında ionlaşdırıcı radiasiya detektorlarının işlənməsi və onların fiziki xassələrinin tədqiqi güdəmdə duran məsələlərdir.

II FƏSİL

TƏCRÜBİ QURĞULAR VƏ ELEKTRON BLOKLARI

2.1. Mikropikselli selvari fotodiodların xassələrini ölçmək üçün istifadə edilən təcrübi qurğu

Heyger rejimində işləyən mikropikselli selvari fotodiodların bərpa olunma müddətini, gücləndirmə əmsalını, kvant effektivliyini, foton qeydetmə effektivliyini, xəttliliyini, qaranlıq sayın sürətini, çarpaz əlaqəni, qaranlıq cərəyanını və ionlaşdırıcı radiasiyanın qeydetmə həssaslığını ölçmək üçün istifadə edilən eksperimental dövrə şəkil 2.1.1.-də verilmişdir. Mikropikselli selvari fotodiodlar (MSFD) ətraf mühitdən gələn işıq fotonlarına həssas olduğundan, ölçmələr zamanı fotodiod və gücləndirici dövrlər hər tərəfi tam örtülmüş metal qutuda yerləşdirilmişdir. MSFD fotodiodları tam qaranlıq metal qutuya yerləşdirməklə fotodiodlarda yaranan cərəyanın yalnız fotodiodun qaranlıq və fotocərəyan hesabına yaranması təmin edilmişdir. İstifadə edilən dəmir bokus həmçinin ekranlayıcı kimi də istifadə edilmişdir. Təcrübələrdə istifadə edilən MSFD fotodiodlarını gərginliklə təmin etmək üçün Keithley-6487 Picoammeter/Gərginlik mənbəsindən istifadə olunmuşdur. Keithley-6487 Picoammeter/Gərginlik mənbəsi diodu 0–500 V gərginlik intervalında gərginliklə təmin edir. Başqa sözlə, bu gərginlik mənbəyi təcrübələrdə istifadə edilən işləmə gərginliyi 30 V olan P-İ-N fotodiodlardan başlayaraq işləmə gərginliyi 140 V-a yaxın olan tək elementli SPAD (R4532 seriyalı) fotodiodların tam işləmə gərginliyini 200 mKV gərginliklə təmin edir. Həmçinin, Keithley-6487 Picoammeter/Gərginlik mənbəsi istifadə edilən fotodiodların qaranlıq cərəyanlarını 1nA dəqiqliklə təyin etməyə imkan verir. Keithley-6487 Picoammeter/Gərginlik mənbəsinin çıxışına RC-filtir yığılmışdır ki, bu da gərginlik fluktasiyalarını azaltmaq üçün istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodlara tətbiq edilən gərginliklər tərs istiqamətdə qoşulmuşdur. Başqa sözlə, mənfi qütüblü gərginlik MSFD fotodiodun anoduna RC filtri vasitəsi ilə qoşulur və katod isə yerə yükləmə müqaviməti (1 kOm seçilir) ilə birləşir. MSFD fotodiodda yaranan fotosiqnal yükləmə müqavimətindən 100 nF tutumlu kondensator

vasitəsi ilə götürülür. Siqnal götürülən kondensator fotodiodun tutumuna ardıcıl birləşdiyindən MSFD fotodiodun tutumu əsas tutum olur. MSFD fotodiodlardan götürülən siqnallar tranzistorlar və operativ əməliyyat gücləndiriciləri əsasında yığılmış gücləndirmə əmsalı 200, 130, 30 və 36 olan xətti gücləndiricilərə ötürülür. İstifadə edilən siqnal gücləndiricilərin işləmə gərginliyi +12 V, +6 V, -6 V və işləmə zolaqları isə 160 kHz – 300 MHz intervalında olmuşdur.

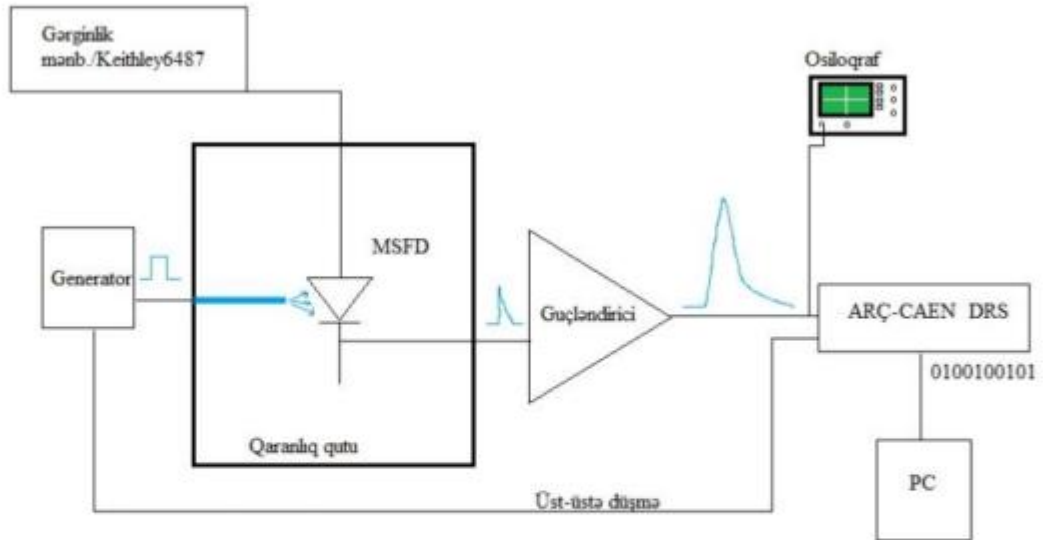
Təcrübələrdə istifadə edilən fotodiodların gücləndirmə əmsalını, FQE-sini, qaranlıq sayma sürəti, çarpaz əlaqəsi ölçülərkən generatorndan və ionlaşdırıcı şüaların (qamma, beta, alfa, neytron) qeydedilməsi zamanı isə işıq mənbəsi olaraq ssintilyatorlardan və ya işıqsaçan dioddan istifadə edilmişdir (şək. 2.1.1). Selvari fotodiodların foto xassələrini təyin edərkən 450 nm və 650 nm dalğa uzunluqlu göy və qırmızı işıqsaçan diodları (ingiscə, LED – Light Emitting Diode) istifadə edilmişdir. LED diodlarını işlətmək üçün Tektronix AFG-3022B impuls generatorundan istifadə edilmişdir.

Tektronix AFG-3022B Generatoru iki BNC-50 tipli çıxışa malikdir. Bu generatorlar vasitəsi ilə verilən minimal düzbucaqlı impulsun eni 10 nsan, və impulsun ön və arxa frontunun qalxma müddətlərinin hər biri 5 nsan olmuşdur. Başqa sözlə, alınan minimal siqnalın eni frontlarla bir yerdə 20 nsan tərtibində olmuşdur. Lakin buna baxmayaraq bu tip generatorlar impulsun amplitudunun çox geniş oblastda (1 mV – 10 V) dəyişməyə imkan verir. Tektronix AFG-3022B generatoru ilə maksimal olaraq 25 MHz tezlikli impulslar vermək mümkündür. Əksər təcrübələrdə generatorun çıxışının biri amplitud-rəqəmsal çeviricini (ARÇ-ni) sinxronlaşdırmaq üçün istifadə edilmişdir. Aparılan təcrübələrdən asılı olaraq Tektronix AFG-3022B generatorundan LED diodlara amplitudu -2,5 V – -7 V intervalında dəyişən, və tezliyi 1 – 100 kHz intervalında dəyişən müxtəlif davam etmə müddətli düzbucaqlı impulslar verilmişdir. Selvari fotodiodlar və LFS, NaI və LiF ssintilyatorları əsasında hazırlanmış detektorların yoxlanılması zamanı CAEN ARÇ-sindən istifadə edilmişdir. CAEN ARÇ-si hər girişinin ayırdetməsi 12 bit olan 4 limo tipli girişə malikdir. Hər qonşu nöqtə arasında minimum müddət 4 nsan və sayma sürəti isə 250 MHz olmuşdur. P-terfenil, stilben, fiber və maye ssintilyatorlardan

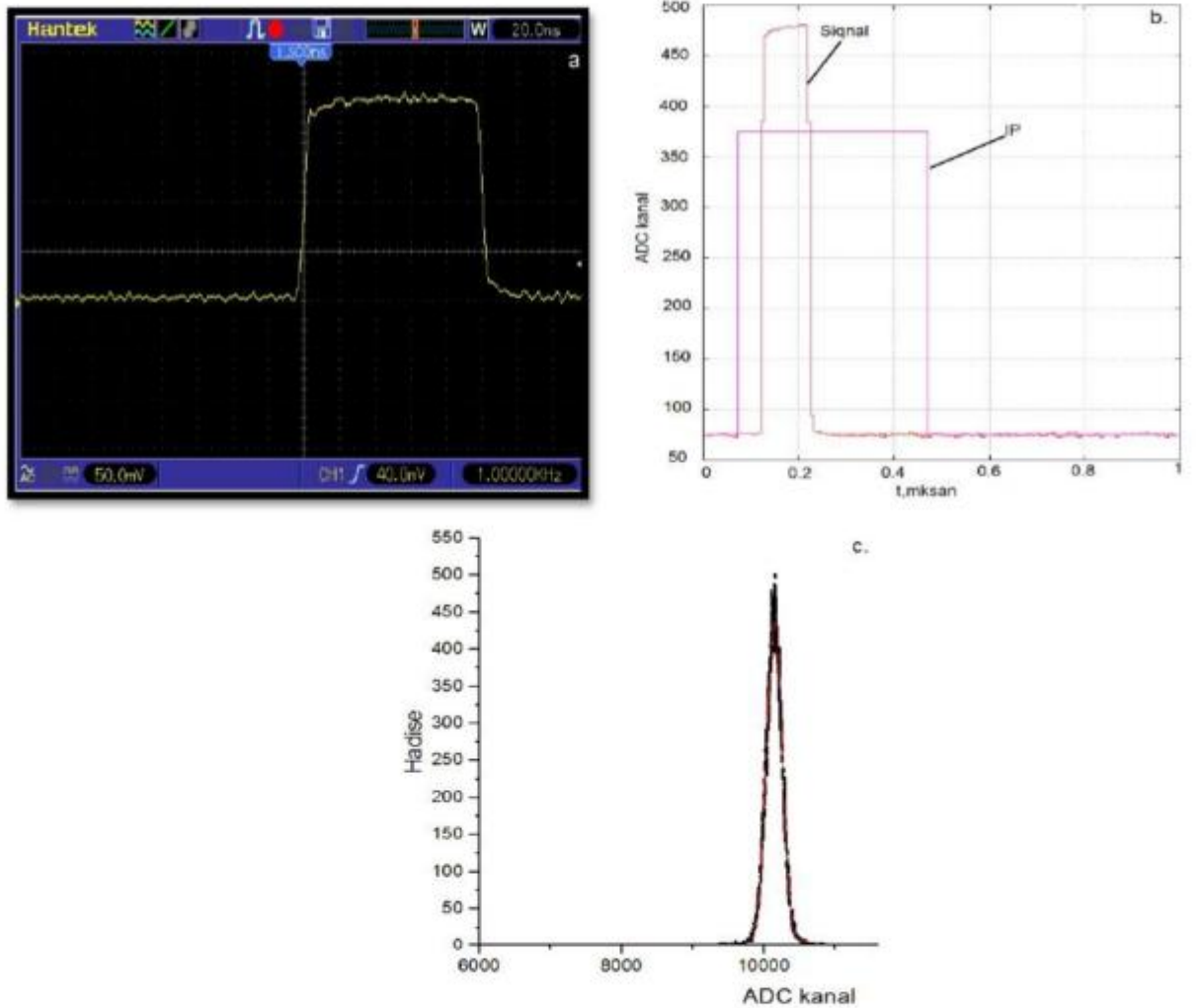
alınan siqnalların eni bir neçə nanosaniyə olduğundan onlardan alınan siqnalları qeyd etmək üçün DRS4 ARÇ-si istifadə edilmişdir. DRS4 ARÇ-si CAEN-ə oxşar olaraq ayırdetməsi 13 bit olan 4 SMA tipli girişə malikdir. DRS4 ARÇ-si iki nöqtəsi arasındakı minimum müddəti 200 psan və maksimal sayma sürəti isə 5 GHz olmuşdur [141, s.1-4]. Şəkil 2.1.2-də təsvir edilmiş ossiloqraf siqnalın tam ilkin məlumatlarının müəyyən edilməsində və siqnalların formasının saxlanması istifadə edilmişdir. Hər iki ARÇ-si məlumatlar rəqəmsal siqnala çevirərək “txt” və ya “binar” formatda saxlamağa imkan verir. Rəqəmsal siqnallara çevrilmiş məlumatlar C++ proqram dilində yazılmış xüsusi alqoritmlərdən istifadə edərək siqnallar inteqrallanır və siqnala uyğun gələn amplitud, enerji ayırdetməsi, diskriminasiya və sayları müəyyən edilir.

Təcrübələrdə əksər ssintilyatorlardan alınan siqnalların (LFS, NaI və LiF) eni 40 nsan böyük olduğundan CAEN-5720 ARÇ-si daha geniş istifadə edilir. CAEN-5720 qurğusu eni 20 nsan – 10 mksan intervalında olan siqnalları inteqrallamaq üçün istifadə edilir. Bu qurğunun bir kanalına düşən yükün miqdarı 40 fKl-ur. CAEN-5720 qurğusunun bir kanalına düşən yükü tapmaq üçün ARÇ-nin maksimum qeyd edə biləcəyi amplitudu (2 V) onun ayırdetməsinə (12 bit) bölmək lazımdır. Bu zaman minimum qeyd edilən amplitud $2 \text{ V}/4096 \sim 0,49 \text{ mV}$ alınır. ARÇ-nin girişlərinin 50 Om olduğunu nəzərə alsaq, bu zaman girişdən axan cərəyan $I=0,49 \text{ mV}/50 \text{ Om} = 0,0098 \times 10^{-3} \text{ A}$ olur. Nəzərə alsaq ki, CAEN-5720 qurğusunun vahid zamanda maksimal sayma sürəti 250×10^6 -dir, onda asanlıqla görmək olar ki, bir nöqtəni qeyd etmək üçün ARÇ-yə $t \sim 1/250 \times 10^6 = 0,004 \times 10^{-6} = 4 \times 10^{-9} \text{ san} = 4 \text{ nsan}$ lazımdır. Buradan isə CAEN-5720 hər kanalına uyğun gələn yükü tapmaq olar: $Q=I \times t = 0,0098 \times 10^{-3} \text{ A} \times 4 \times 10^{-9} \text{ san} = 9,8 \times 4 \times 10^{-15} \text{ Kl} = 39,2 \times 10^{-15} \text{ Kl} \sim 40 \text{ fKl}$ alınır. Beləliklə CAEN, qurğusunun bir kanalına uyğun gələn yükün təqribən 40 fKl olması müəyyən edilir. ARÇ-nin kanalına uyğun gələn yükü təcrübi yoxlamaq üçün generatordan ossiloqrafa davam etmə müddəti 100 nsan və amplitudu 200 mV olan düzbucaqlı siqnal tətbiq edilir. Ossiloqrafın siqnal verilən girişinə 50 Om yüklənmə müqaviməti birləşdirilir. Şəkil 2.1.2 (a)-da ossiloqrafda müşahidə edilən siqnalın təsviri verilmişdir. Göründüyü kimi, siqnalın amplitudu $\sim 200 \text{ mV}$ və davam etmə müddəti isə 100 nsan

olur. Bu zaman impulsa uyğun gələn cərəyan $I=U/R=(200\times 10^{-3}\text{V})/(50\ \text{Om})=4\times 10^{-3}\text{A}$ olur. Siqnala uyğun gələn yükü isə $Q=I\times t=4\times 10^{-3}\text{A}\times 100\times 10^{-9}\ \text{san}=4,0\times 10^{-10}\ \text{Kl}=400\ \text{pKl}$ alınır. Bu nəticənin CAEN qurğusunda alınması üçün siqnal ilk növbədə DPP (ingiliscə-digital puls procecing) proqramının köməkliyi ilə inteqrallanma pəncərəsinə salınır. İnteqrallanma pəncərəsinin eni kifayət qədər böyük seçilir, bizim halda bu 1000 nsan təşkil edir. Astana amplitudu olaraq 15 mV qəbul edilir. Şəkil 2.1.2 (b)-də CAEN qurğusunun ossiloqrafının ekranının göstəricisi verilmişdir. Göründüyü kimi siqnal inteqrallanma pəncərəsi daxilinə tam düşür. X - oxunda zaman, Y-oxunda isə siqnalın amplitudu verilmişdir. Y-oxunun hər kanalı CAEN qurğusunun xətti işləmə oblastına uyğun gələn amplitudun (2 V) onun ayırdetməsinə ($2^{12}=4096$) nisbətindən (yəni, $2\ \text{V}/4096$) təyin edilir. Bu halda amplitudun hər kanalına 0,488 mV uyğun gəlir. Generatorun verən siqnalın amplitudu göründüyü kimi, $410\times 0,488\ \text{mV}\sim 200\ \text{mV}$ təşkil edir. Şəkil 2.1.2 (c)-də artıq inteqrallanma pəncərəsinə düşən siqnalın inteqrallanmış spektri verilmişdir. Spektrin X-oxu ARÇ-nin kanalına (yükklə ifadə edilən amplituda) və Y-oxu isə düşən hadisələrin sayına uyğun gəlir. Alınan siqnal daha sonra Qauss paylanması vasitəsi ilə fit edilir (təsvir edilir) və onun maksimumu müəyyən edilir. Göründüyü kimi, bu siqnalın maksimumu 10143-cü kanala düşür. Bu halda siqnalın amplituduna uyğun gələn yük $Q=10143\times 40\times 10^{-15}\ \text{Kl}=404\times 10^{-12}\ \text{Kl}$ alınır. Başqa sözlə, ARÇ-nin kanalına uyğun gələn minimum yükün 40 fKl olduğu təcrübi olaraq təsdiq edilmiş olur, yəni analoq siqnalın ossiloqraf vasitəsi ilə təyin edilmiş qiyməti rəqəmsal metodla təyin edilmiş qiymətə tam uyğun gəlir. Ölçmələrdə istifadə edilən Keithley-4867 cihazının dəqiqliyini yoxlamaq üçün generatorun davam etmə müddəti 300 nsan və amplitudu 9 V olan siqnal işıqlandırıcı LED dioda verilir və yaranan siqnal P-İ-N fotodiodla qeyd edilir. Bu zaman P-İ-N fotodiodda yaranan siqnalın parametrləri ossiloqraf vasitəsi ilə təyin edilir. Ossiloqrafda yaranan siqnalın amplitudu 4 mV və davam etmə müddəti 300 nsan olduğu təyin edilir. Bu zaman bu siqnala uyğun gələn cərəyan $I=U/R=(4\times 10^{-3}\ \text{V}/50\ \text{Om})=8\times 10^{-5}\ \text{A}$ olur. Sonra isə yük tapılır: $Q=I\times t=8\times 10^{-5}\ \text{A}\times 300\times 10^{-9}\ \text{san}=24\times 10^{-12}\ \text{Kl}$. Alınmış bu ifadəni tezliyə bölsək bir impulsa düşən yükü tapmaq olar: $Q_{\text{impuls}}=24\times 10^{-12}\ \text{Kl}\times 1000=24\times 10^{-9}\ \text{Kl}$.



Şəkil 2.1.1 Fotoqeydiciyərdən signalın oxunması üçün istifadə edilən dövrə



Şəkil 2.1.2 Ossiloqrafda qeyd edilən analoq signal (a), signalın inteqrallanma pəncərəsinə salınması (b) və CAEN ARČ-nin qeyd etdiyi amplitud paylanması (c).

Bu ifadə Keithley-4867 ilə alınan nəticələrlə tam uyğunluq təşkil edir.

MSFD fotodiodların tutumu təyin edilərkən E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС cihazından istifadə edilmişdir. E7-20 cihazı induktivliyi, tutumu və müqavimətini ölçməyə imkan verən avadanlıqdır. Bu cihaz 1 GOm qədər müqaviməti, 1 fF tutumdan başlayaraq 1 F qədər tutumu təyin etməyə imkan verir. Qurğu tətbiq edilən sinusoidal siqnalın amplitudunu 40 mV – 1 V intervalında dəyişməyə imkan verir. Eyni zamanda, sinusoidal siqnalın tezliyini 1Hz–2MHz tezlik intervalında dəyişmək mümkündür. E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС avadanlığı dəqiqliyi 20 mV olan addımla dəyişən 0 – 40 V gərginlik intervalında gərginlik mənbəyi kimi də istifadə edilir. Təcrübələrdə istifadə edilən MSFD fotodiodların hamısı artıq 20 – 30 V gərginlikdə həcmi yüklər oblastı ilə taməhatə olunur. Ona görə də E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС qurğusu MSFD fotodiodların tutumunu kifayət qədər dəqiq təyin etməyə imkan verir.

MSFD fotodiodların kvant effektivliyini təyin edərkən MS-3504i monoxromatorundan istifadə edilmişdir. MS-3504i monoxromatorunda işıq mənbəsi olaraq ksenon lampası istifadə edilmişdir. Düşən işıq selində fluktasiyaların olması 3 %-dan az olmuşdur. MS-3504i monoxromatoru 250 nm – 2000 nm dalğa uzunluqlu işıq mənbəyi kimi istifadə edilmişdir. Alınan işıq selinin bircinsliyi və fokuslanması üçün xüsusi toplayıcı linzalardan istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodların sahəsi bir-birindən fərqli olduğundan, onlara eyni sayda fotonun düşməsinə təmin etmək üçün əlavə kollimatordan istifadə edilmişdir. İstifadə edilən kollimator qalınlığı 1 mm olan mis lövhə əsasında hazırlanmışdır. Kollimatorun diametri 3 mm seçilmişdir. Etalon fotodiod olaraq Hamamatsu firmasının S1231-1 P-İ-N fotodiodundan istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodlara gərginlik tətbiq etmək üçün Keithley-4867 mənbəsindən istifadə edilmişdir. Fotodiodlara tətbiq edilən gərginliklər fotodiodların tipindən asılı olaraq 20 – 35 V arasında dəyişmişdir. Fotodiodlardan axan cərəyanı təyin etmək üçün Keithley-4867 picoammetrdən istifadə edilmişdir. Kvant effektivliyinin ölçülməsi zamanı dövredə 5 kOm müqavimətli RC filtrindən istifadə edilmişdir. Fotocərəyanın ölçülməsi zamanı fotocərəyan 6 nA – 32 mkA intervalında dəyişmişdir. Dövredən maksimum (32 mkA) cərəyan axan zaman 5 kOm

müqavimətə düşən gərginlik $U \sim 5000 \times 32 \times 10^{-6} = 0,16$ V olmuşdur. Başqa sözlə, fotodioda tətbiq edilən tam gərginliyin dəyişməsi 0,0045 % olmuşdur. Bu zaman gərginliyin ciddi dəyişməsi müşahidə edilməmişdir. Bununla yanaşı, fotodiodlar P-İ-N rejimdə istifadə edildiyindən burada gərginliyin bir neçə volt dəyişməsi həssaslığı ciddi dəyişmir.

İonlaşdırıcı şüalarla şüalanma zamanı istifadə edilən MSFD fotodiodların xassələri ölçülən zaman şəkil 2.1.1 dövrəsində mövcud olan yüksək müqavimətlər kiçik müqavimətlərlə əvəz edilmişdir. MSFD fotodiodların şüalanması zamanı qaranlıq cərəyanın kəskin artması əksər hallarda fotodiodun deşilmə və işləmə gərginliyinin ($U_d = U_r - I \times R$) azalmasına səbəb olur. Bunun nəticəsində MSFD fotodiodun gücləndirmə əmsalı azalır ($M \sim \Delta U$). Burada U_d - fotodioda düşən real gərginlik, U_r isə dövrəyə tətbiq edilən gərginlikdir. Bu zaman nəzərə almaq lazımdır ki, şüalanmadan sonra MSFD fotodiodların qaranlıq cərəyanları 100 mka qədər arta bilər. Çox elementli matrislərdə mövcud olan fotodiodların ardıcıl və paralel birləşməsi zamanı alınan siqnalların amplitudunun və formasının birləşmənin növündən asılılığını tədqiq etmək üçün xüsusi dövrlər yığılmışdır. Elementlərə verilən yekun gərginlik $U = 3 \times (-94,5V) = -283,5$ V olmuşdur. Fotodiodlardan alınan siqnal ümumi bir gücləndiriciyə verilir və gücləndirilmiş siqnallar analoq rəqəmsal çeviriciyə verilərək onun amplitud paylanması və siqnal forması analiz edilir. Paralel birləşmə zamanı hər bir element ayrıca RC filtirlə təmin edilmir və fotodioda -94,5V gərginlik tətbiq edilir.

Detektor modulunun gücləndirici, çevirici, komparator və digər elektron hissələrinin yığılması zamanı "Proteus 8 Professional" proqram paketindən istifadə edilmişdir. Bu proqram çoxlu sayda element bazasına və simulyasiya imkanlarına malikdir. İlkin olaraq "Proteus 8 Professional" proqramında uyğun element hissələri seçilir, daha sonra element hissələri dövrəyə uyğun formada yığılır. Hazırlanmış dövrə simulyasiya edilir. Nəticədə çıxışda alınan siqnalın amplitudu, gərginliyi və cərəyan sərfiyyatı müəyyən edilir. Dövrənin ilkin variantı hazırlandıqdan sonra bu fayl ARES proqramına ötürülür. ARES proqramında dövrənin element hissələrinin düzgün yerləşdirilməsi və əlavə kontakt hissələrinin

yeri müəyyənləşdirilir. Bu proqram vasitəsi ilə elektron platanın ölçüləri müəyyən edilir. Elektron dövrələr tam hazır olduqdan sonra fayllar gerber fayla çevrilir. Hazırlanmış gerber fayl "Proto Mat-45" qurğusunun proqram təminatına tanıtılır. Daha sonra "Proto Mat-45" qurğusu elektron dövrələrin hazırlanmasını 1mm qalınlıqlı tekstalit üzərində yerinə yetirir. Hazırlanmış dövrələrin üzərinə nazik lehim təbəqəsi çəkilir və sonunda elektronik dövrə elementlərinin yerləşdirilməsi üçün hazır vəziyyətə gətirilir. Elektronik platanın çıxış parametrləri plata üzərində yerləşdirilmiş elementlərin parametrlərindən kəskin asılıdır. Məhz bu səbəbdən də elementlərin parametrlərinin düzgün ölçülməsi olduqca əhəmiyyətlidir. Elektronik plataların hazırlanmasında istifadə edilən elementlərin korpuslarının səthi mantajda istifadə üçün nəzərdə tutulduğundan, onların parametrlərinin standart avadanlıqlarla yoxlanılması mümkün olmur. Bu səbəbdən də elementlərin parametrləri təyin edilərkən MS8910 SMD smart avadanlığından istifadə edilmişdir. Hər bir element yerləşdirildikdən sonra dövrənin gərginlik bloklarının işlənməsi yoxlanılmış və sonra digər hissələrin yoxlanılması həyata keçirilmişdir. Elektron dövrələrin gərginlik bloklarının yoxlanılması zamanı QJE-5003E mənbəsindən istifadə edilmişdir. Bu gərginlik mənbəsi – və + gərginlik mənbəsi kimi istifadə olunmaqla yanaşı, dövrədən axan cərəyanı 0,1 mA dəqiqliklə ölçməyə imkan verir. Gərginlik çevirici blokların çıxışdakı gərginlik MT5201 multimetri vasitəsi ilə təyin edilmişdir. Bu tip multimetrler gərginliyi 50 mV dəqiqliklə təyin etməyə imkan verir. Gücləndiricilərin yoxlanması zamanı isə UTG-9010C generatorlarından və Singlet ossiloqraflarından istifadə edilmişdir. Hazırlanmış elektronik platalar otaq temperaturunda bir neçə saat dayanmadan işlədilərək parametrlərinin dəyişməsinə baxılmışdır. Məlum olmuşdur ki, hazırlanmış bloklar öz xassələrini geniş temperatur intervalında sabit saxlayır. Beləliklə, hazırlanmış elektronik blokların parametrləri yüksək dəqiqliklə təyin edilmişdir.

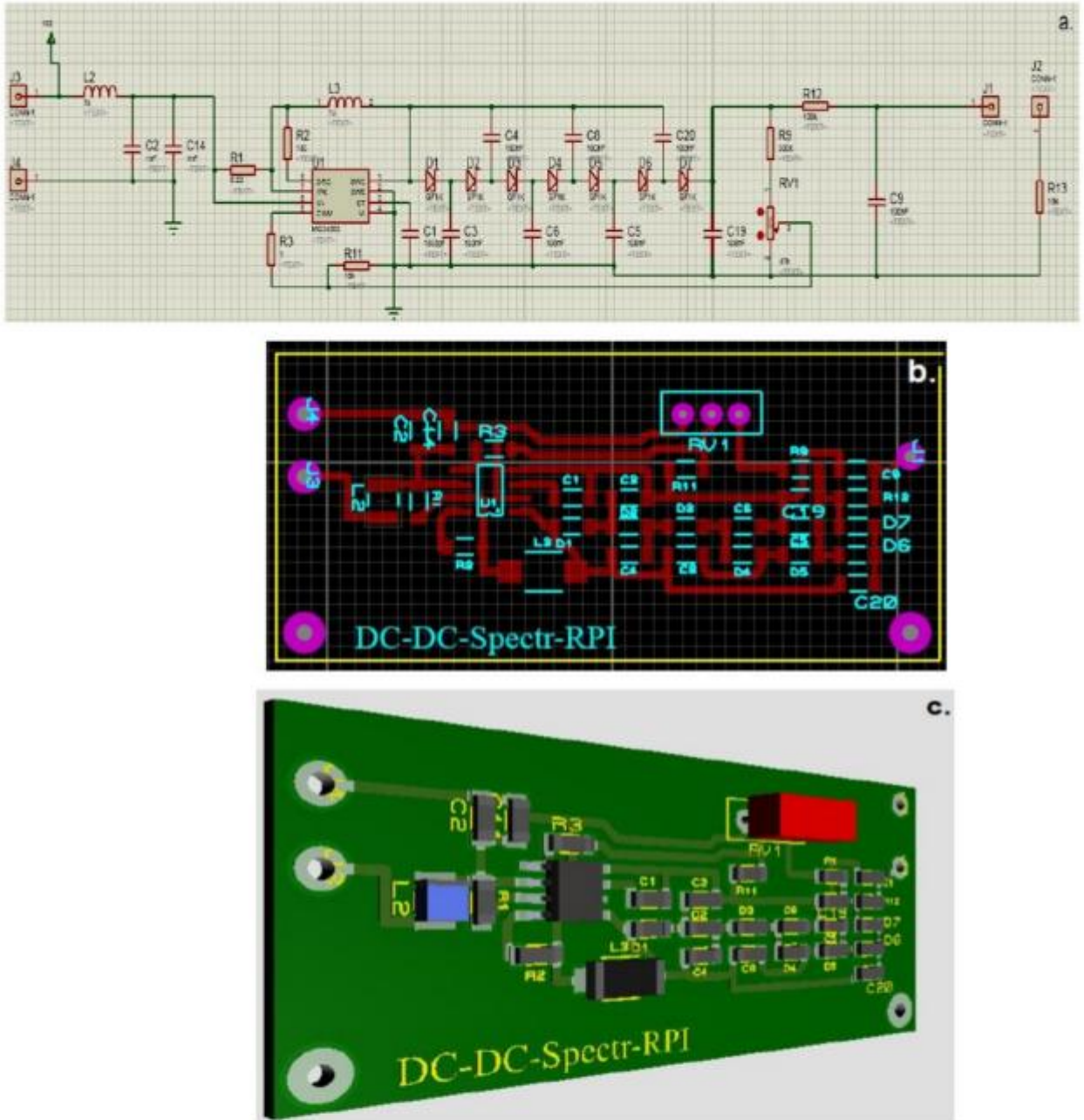
2.2. Gərginlik çeviricilərin hesablanması və yığılması

Əksər təcrübələrdə isitfadə edilən selvari fotodiodları gərginliklə təmin etmək üçün kompakt hazırlanmış gərginlik qidalandırıcılara ehtiyac duyulur. Bu məqsədlə işdə istifadə edilən əksər selvari fotoqeydedicilərin işləmə rejimini təmin edən yüksək sabit gərginlik çevirici (SGÇ) dövrə hazırlanmışdır (şək. 2.2.1 (a,b,c)) [7, c.5, s. 33-43]. Əksər təcrübələrdə tətbiq edilən qeydedicilərin ifrat gərginlik oblastı 65–127 V intervalında olduğundan, yeni yığılacaq SGÇ-lər yuxarda göstərilən gərginlik intervalını təmin etməlidir. SGÇ-lər MC34063A monolit çox funksiyalı çip əsasında hazırlanmışdır. MC34063A monolit çox funksiyalı çip, etalona görə daxili temperatur kompensasiya edici, komparator, effektiv cərəyan limiti olan idarə olunan ossilyator, idarə edici və yüksək cərəyan çıxış keçidi kimi elementlərə malikdir [7, c.5, s. 33-43].

Monolit çox funksiyalı çipin qidalanması +3 V və +5 V intervalında dəyişən sabit gərginlik mənbəsi ilə yerinə yetirilmişdir. Çox funksiyalı çipin çıxışlarından biri gərginlik çeviricidə impuls mənbəyi olaraq tətbiq olunur. Bu çıxışda alınan siqnalın vahid zamandakı düzbucaqlı paketlərinin sayının 10,5 MHz olması üçün dövrəyə əlavə 30 pF tutum qoşulmuşdur. Tezliyin bu qiyməti seçilərkən çox funksiyalı çipin cərəyan sərfiyyatının aşağı olması təmin edilmişdir. Çox funksiyalı çipin impuls çıxışından alınan siqnallar induktivliyə (4.7 mH) yönəldilir. Bu zaman induktivliyə enerjinin toplanması baş verir [7, c.5, s. 33-43]. Növbəti mərhələdə induktivliyin enerjisi düzləndirici diod vasitəsi ilə qütblü kondensatora boşalır (0.01 mkF). Belə kombinasiyaların sayını dəyişməklə SGÇ-nin çıxış gərginliyinin qiyməti yolverilən qiymətə qədər yüksəldilir. SGÇ-lərin yüksək faydalı iş əmsalına malik olması üçün onlar $\dot{I}_{in} \times U_{in} = \dot{I}_{out} \times U_{out}$ şərtini ödəməlidir (burada U_{in} , U_{out} -giriş və çıxış gərginliyi və \dot{I}_{in} , \dot{I}_{out} -giriş və çıxış cərəyanıdır). SGÇ-nin qidalandırıcı giriş gərginliyi + 5 V (U_{in}) və cərəyanı tələbatı 1 A (\dot{I}_{in}) olarsa və çıxış gərginliyinin 150 V (U_{out}) olmağını istəyiriksə bu zaman çevrici mənbənin təmin edəbiləcəyi maksimal çıxış cərəyanı 33,3 mA (\dot{I}_{out}) ola bilər. SGÇ-nin çıxışında selvari fotoqeydedicilərin işləmə gərginliyini 50 mV dəqiqliklə idarə edə bilən gərginlik tənzimləyici yığılmışdır [7, c.5, s. 33-43]. Bundan əlavə DC-DC gərginlik çeviricisinin çıxışındakı gərginliyin

fluktasiyasını minimuma endirmək üçün Zenner diodları tətbiq olunmuşdur. MC34063A çox funksiyalı idarə edici dövrənin qidalandırılmasında Li-ion batareyalarından istifadə edildiyindən, zaman keçdikcə batareyanın gərginliyi 3,3 V-dən aşağı gərginliklərə düşür. Belə olduğu halda, çıxış gərginliyində dəyişmələr müşahidə edilir. Bu çətinliyin aradan qaldırılması üçün MC34063A monolit idarə edici dövrənin əks əlaqə çıxışından istifadə edilmişdir. Gərginlik çeviricisinin cərəyan tələbatını təyin etmək üçün Tektronik PVS2185 gərginlik qidalandırıcıdan istifadə edilmişdir. Gərginliyin 5,5 V qiymətində potensiometrin müqavimətini dəyişməklə çıxışda alınan gərginliyin 95,2 V olması təmin edilmişdir [7, c.5, s.33-43, 43,c.12, s.1-7]. Ampermetrdən istifadə edərək dövrənin cərəyan tələbatının 35 mA olduğu müəyyən edilmişdir. Əgər tətbiq edilən gərginliyi 0,2 V addımı ilə azaltsaq, çıxış gərginliyinin 95,2 V sabit qiyməti 3,6 V gərginliyə kimi tam saxlanılır. Gərginliyin bu intervalında dövrənin cərəyan sərfiyyatı 35 – 43 mA arasında artmışdır. Qidalandırıcı mənbənin gərginliyi 3,5 – 3 V intervalında dəyişdikdə çıxış gərginliyi 94,9 V-dən 91 V-a kimi azalmış və cərəyan sərfiyyatı 45 mA qədər artmışdır. Beləliklə müəyyən edilmişdir ki, yeni yığılmış kompakt SGÇ çeviriciləri akkumulyatorla qidalandırıldıqda, onun gərginliyi 6 V – 3,6 V arasında dəyişdikdə çıxışda alınan gərginliyinin fluktasiyası 0,01 % az olacaqdır. Yeganə fərq ondadır ki, qidalandırıcı gərginlik 6 V olduqda onun akkumulyatorla işləmə müddəti 3,6 V ilə müqayisədə təqribən 19 % daha uzun ömürlü olur. MC34063A monolit idarə edici dövrənin bu funksiyasından istifadə etməklə girişə verilmiş gərginlik 3,6 V – 6 V arasında dəyişdikdə, DC-DC çıxışındakı gərginlik həmişə eyni bir qiymət alır və toplam gərginlik fluktasiyası $\pm 0,009$ V ətrafında olur.

Bu tip gərginlik çeviricisinin temperaturdan asılı olaraq xassələrinin necə dəyişməsinə analiz etmək üçün “LRH-150 Lab Cooling” inkubator markalı qurğudan istifadə edilmişdir. Qurğunun yuxarı temperatur dəqiqliyi $\pm 0,5$ °C, aşağı temperaturdəqiqliyi isə ± 1 °C olmuşdur. Gərginlik çeviricisinin girişinə +5 V gərginlik verilmişdir və çıxışında 95,8 V gərginlik müşahidə edilmişdir. Daha sonra 9 müxtəlif temperaturda: +50 °C, +40 °C, +25 °C, +20 °C, +15 °C, +10 °C, +5 °C, +0 °C və -5 °C gərginlik çeviricisinin cərəyan tələbatının temperaturdan asılı olaraq



Şəkil 2.2.1 Gərginlik çeviricilərinin elektrik dövrəsi [43,c.12, s.1-7]
a-gücləndiricinin çəkilmiş ilkin dövrəsi, b-elementlərin yerləşdirilməsi və
c- 3D görünüşü.

dəyişməsinə baxılmışdır. Cərəyan tələbatını ölçmək üçün “Tektronix-PWS2185DC power supply” qurğusundan istifadə edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, temperaturun $+50\text{ }^{\circ}\text{C} - -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ intervalında gərginlik çeviricisinin cərəyan tələbatı 35 mA olmuşdur. Eyni ilə də, çıxış gərginliyində dəyişmə müşahidə edilməmişdir. Başqa sözlə, hazırlanmış gərginlik çeviricisi $+50\text{ }^{\circ}\text{C} - -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatur intervalında öz işlək parametrlərini tam saxlamışdır.

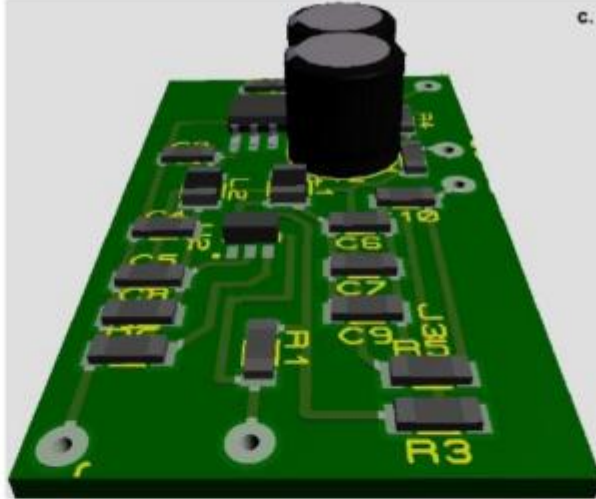
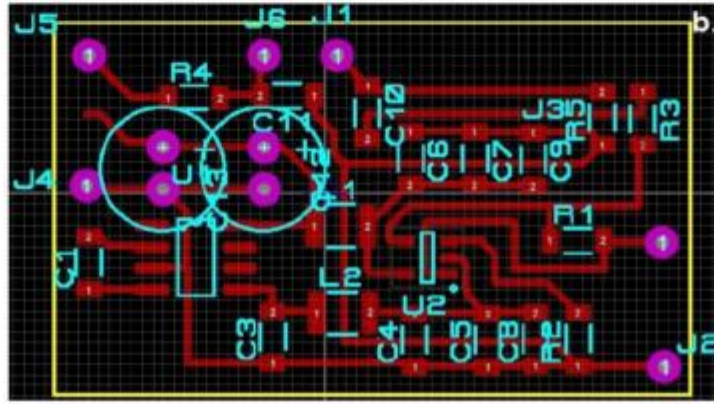
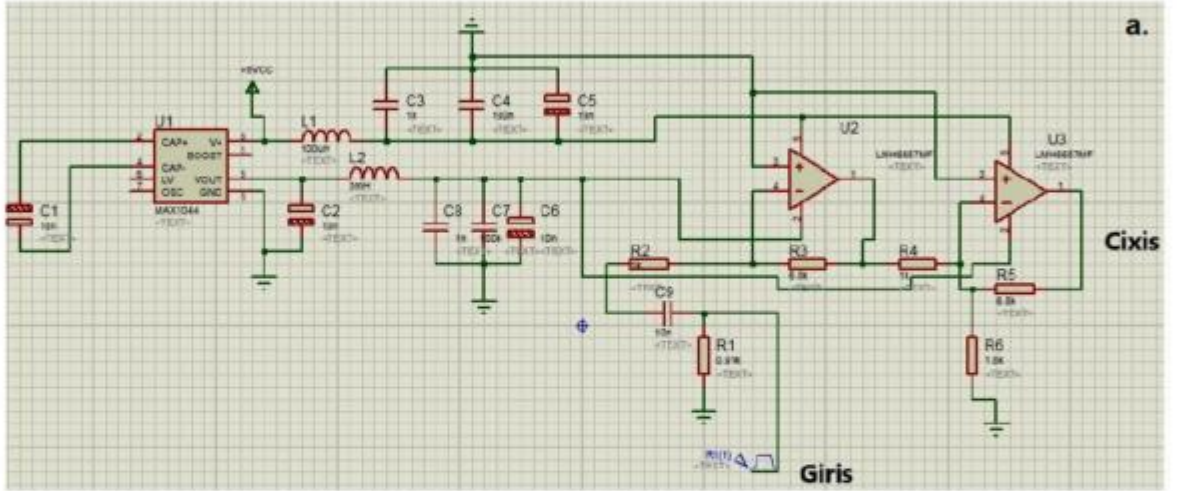
2.3. Siqnal gücləndiricilərinin və komparatorun hesablanması və yığılması

Təcrübələrdə sönmə müddəti müxtəlif olan ssintilyatorlar istifadə edildiyindən, onlardan alınan siqnalların gücləndirilməsini təmin etmək üçün əlavə gücləndiricilərdən istifadə edilir. Məsələn, əgər təcrübədə fiber, p-terfenil, maye və stilben ssintilyatorları istifadə edilirsə, bu zaman onların sönmə müddəti 2– 6 nsan arasında dəyişir. Belə olduğu halda bu siqnalları qeyd etmək üçün bir neçə kaskadlı tranzistorlu, və ya əməliyyat gücləndiricilərindən (məsələn, AD-8002, buraxma eni 800 MHz) istifadə edilir. Əgər istifadə edilən ssintilyatorlar NaI, LFS və ya LiF kristallarındırsa, bu zaman onların sönmə müddəti 30 nsan – 1 mksan arasında dəyişdiyinə görə, siqnalların gücləndirməsi üçün operativ əməliyyat gücləndiriciləri olaraq biz LMH-6657 (buraxma zolağının eni -270 MHz) və LT-1357 (buraxma zolağının eni -25 MHz) istifadə etmişik. İstifadə edilən əməliyyat gücləndiriciləri iki rejimdə işlədilmişdir: çevrilmiş (invert) və çevrilməmiş (non invert).

Aparılan bəzi eksperimentlərdə yaranan siqanlları qeydetmək üçün LMH-6657 əməliyyat gücləndiricisi istifadə edilmişdir. Bu tip gücləndiricilər iki qütblü işləmə gərginliyində ($\pm 3\text{ V}$) işləyir və onların gücləndirdiyi siqanlın maksimuma çatma sürəti 0,7 kV/mksan olmuşdur. Bu tip əməliyyat gücləndiricisi bazasında hazırlanmış siqnal gücləndiricinin istehsalat ardıcılığı şəkl. 2.3.1 (a,b,c)-də göstərilmişdir [7, c.5, s. 33-43]. Operativ əməliyyat gücləndiricilərindən istifadə zamanı gücləndirmə əmsalı ilə buraxma zolağı arasında mövcud olan asılılığı nəzərə alınmışdır. Bu asılılığın düzgün seçilməsi çıxışda müşahidə edilən siqnalın amplitudunun impulsun enindən asılılığı problemini aradan qaldırır. Buna misal olaraq fosfiç detektorlarında

iki müxtəlif sönmə müddətli ssintilyatordan alınan eyni amplitudlu, lakin fərqli davamətmə müddətinə malik siqnalların gücləndiricidə fərqli gücləndirməsini qeyd etmək olar. Məhz buna görə də, operativ əməliyyat gücləndiricilərin gücləndirmə əmsalını və buraxma zolağının enini uyğun seçmək olduqca vacibdir. Bu tip əməliyyat gücləndiricilərinin (ingiliscə, noninvert çevirici olmayan) gücləndirməsi $G = 1 + R_{\text{a.a}}/R_g$ ifadəsinə əsaslanaraq hesablanılır harada ki, $R_{\text{a.a}}$ - əməliyyat gücləndiricisinin giriş ilə çıxışı birbaşa kontakt edən əks əlaqə müqavimətidir, R_g isə gücləndiricinin girişinə qoşulan müqavimətdir. Bu tip siqnal gücləndiricilərinin kaskadları yığılarkən tətbiq edilən elementlər (rezistorlar və tutumlar) onların məlumat bazasında olan etalon qiymətlərə yaxın seçilir [7, c.5, s. 33-43]. Əməliyyat gücləndiricilərin çıxışında alınan siqnalın amplitudunun maksimal qiyməti bu şərti ödəməlidir: $A(V) \leq U_{\text{is}}/2$ burada $A(V)$ - əməliyyat gücləndiricisinin çıxışında alınan siqnalın maksimal amplitudu, U_{is} - gücləndiricini işlətmək üçün tətbiq edilən gərginlikdir.

Əməliyyat gücləndiricilərinin gücləndirməsini seçərkən onların gücləndiriləcək impulsun eninidə nəzərə almaq lazımdır. Əməliyyat gücləndiricilərinin gücləndirməyə görə buraxma zolağını hesablamaq üçün aşağıdakı ifadədən istifadə edilmişdir: $G_{\text{BW}} = BW/G$ burada, G_{BW} - seçilmiş gücləndirmə əmsalında gücləndiricinin normal işləmə zolağı, BW - seçilmiş gücləndirmə 1 olduqda əməliyyat gücləndiricisinin normal işləmə zolağı (məlumat bazasından seçilir) və G - seçilmiş gücləndirmə əmsalıdır [7, c.5, s. 33-43]. Bu tip operativ əməliyyat gücləndiricisinin gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün əlavə olaraq bir neçə kaskaddan istifadə edilir. Gücləndirmə əmsalı 36, buraxma zolağı isə 45 MHz olan gücləndirici yığmaq üçün, hər kaskadının gücləndirmə əmsalı 6 olan iki kaskaddan ibarət gücləndirmə yığmaq lazım gəlir. Bu halda gücləndiricinin tam gücləndirmə əmsalı kaskadların gücləndirmə əmsallarının hasilinə bərabər olur $G=6 \times 6=36$. Bu zaman gücləndiricinin hər bir kaskadının normal işləmə zolağı $G_{\text{BW}} = \frac{BW}{G} = \frac{270 \text{ MHz}}{6} = 45 \text{ MHz}$ olur [7, c.5, s. 33-43, 10, c.31, s.81-85]. Bununla yanaşı bu tip iki qütblü gərginliklə işləyən gücləndiricinin işləməsini təmin etmək üçün xarici



Şekil 2.3.1 Fotoqeydedicilərin çıxış impulslarını gücləndirmək üçün yığılmış gücləndirici blok [7, c.5, s.33-43, 10, c.31, s.81-85]
a-gücləndiricinin çəkilmiş ilkin dövrəsi, b-elementlərin yerləşdirilməsi və c- 3D görünüşü.

mənbədən verilən + 5 V gərginliyi – 5 V gərginliyə çevirən yeni gərginlik çevirici dövrəsi hazırlanmışdır. Bu dövrənin yığılmasında xüsusi olaraq MAX 1044 çipi tətbiq edilmişdir [7, c.5, s. 33-43]. Bu çipdə mövcud olan 8 kanaldan II-ci və IV-cü kanallarına qütbləşdirilmiş tutum ilə bir-birinə qoşulmuşdur. Bununla yanaşı VIII-ci kanala verilən + qütblü xarici giriş gərginliyi həmçinin də induktivlik və çox saylı tutumlardan ibarət filtdən keçirilərək gücləndiriciyə qoşulmuşdur. Çipin III-cü kanalı birbaşa yerə və əsas V-ci çıxış kanalından alınan – qütblü gərginlik isə induktivlik və çox saylı qütbləşdirilmiş və sadə kondensatordan ibarət filtirlərdən keçərək gücləndiriciyə qoşulmuşdur. Bu yaxınlaşma həmçinin gücləndiricinin qidalandırıcı gərginliyin fluktasiyasını və yarana biləcək küyləri azaltmaq üçün edilmişdir. Beləliklə gücləndiricinin normal rejimdə tam işləməsi təmin edilmişdir [7, c.5, s. 33-43]. Növbəti mərhələdə fotoqeydedicidən siqnalı götürmək üçün yük müqavimətindən istifadə olunur və yalnız dəyişən siqnalların buraxılması üçün siqnal kondensatorun köməyi ilə gücləndiriciyə ötürülmüşdür. Hazırlanmış 2 kaskadlı siqnal gücləndirici normal rejimdə işlədikdə onun cərəyan tələbatı 0,005 A-dan az olmuşdur [7, c.5, s. 33-43]. İstifadə edilən element siyahısı cədvəl 2.3.1-də verilmişdir.

Hazırlanmış iki kaskadlı gücləndiricinin parametrlərini tədqiq etmək üçün müxtəlif davamətmə müddəti olan düzbucaqlı impulslardan istifadə edilmişdir. Düzbucaqlı impuls mənbəyi olaraq Tektronix AFG3101C tipli generatorundan istifadə edilmişdir. Tektronix AFG3101C generatorundan davamətmə müddətləri 20 nsan, 25 nsan, 50 nsan, 100 nsan, 250 nsan və 500 nsan olan impulsların amplitudları 2,5 mV – 72 mV intervalında dəyişən və tezliyi 10 kHz olan impulslar iki kaskadlı gücləndiricinin girişinə verilmişdir. İmpulsların amplitudunun 2,5 mV – 72 mV arasında dəyişməsinə təmin etmək üçün zəifləndirilməsi 100 olan zəifləndirici (attenyuator) istifadə edilmişdir. İki kaskadlı gücləndiricinin çıxışında alınan siqnal 50 Om yüklə müqaviməti ilə siqnalın amplitudunun analiz edilməsi üçün Hantek DSO-5202BM ossiloqrafına verilmişdir. Hantek DSO-5202BM ossiloqrafının minimum qeyd edəbiləcəyi siqnal 1,5 mV, zamana görə ayırd etməsi isə 5 nsan olmuşdur. Başqa sözlə, Hantek DSO-5202BM ossiloqrafı iki kaskadlı gücləndiricidən alınan siqnalın tam analiz edilməsinə imkan vermişdir. Aparılan ölçmələr zamanı

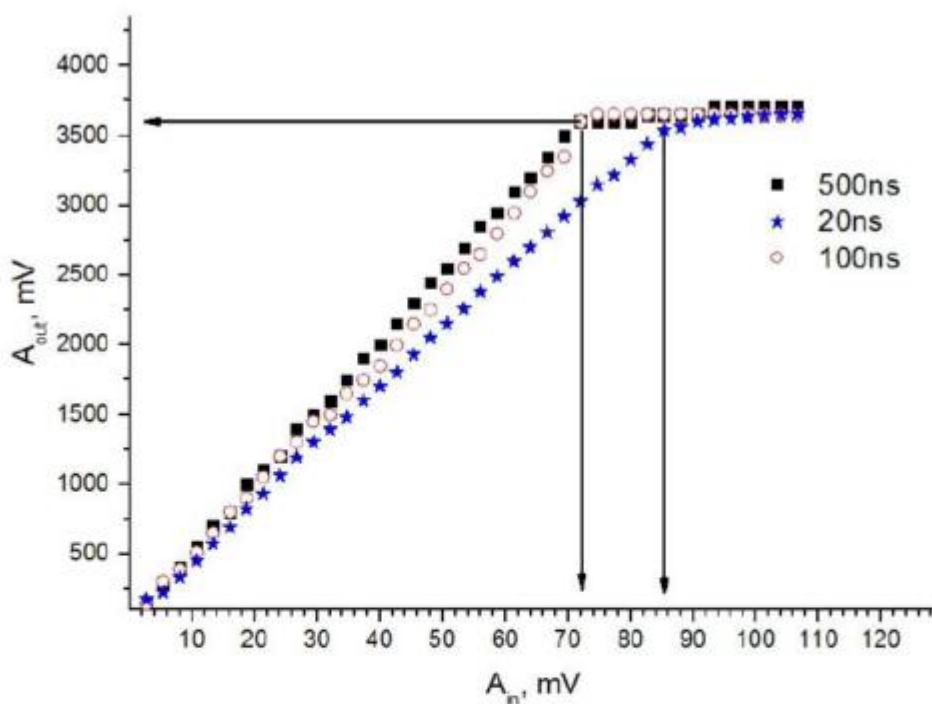
müəyyən edilmişdir ki, hazırlanmış iki kaskadlı gücləndiricinin çıxışında müşahidə edilən siqnalın amplitudu 125 mV – 3600 mV intervalında dəyişir. Şəkil 2.3.2-dən görüldüyü kimi, generatordan verilən düzbucaqlı siqnalın eni 25–500 nsan intervalında olduqda asılılıqlar üst–üstə düşür. Başqa sözlə, bu hallarda gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı 50 olmuşdur. Lakin generatordan verilən düzbucaqlı siqnalın eni 20 nsan olduqda görmək olar ki, iki kaskadlı gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı azalır ($G \sim 42 \pm 2$) və bu azalma birbaşa olaraq buraxma zolağının eninin kiçik olması hesabına olmuşdur. Generatordan verilən düzbucaqlı siqnalın amplitudunun 72 mV-dan böyük qiymətlərində giriş siqnalının amplitudu ilə çıxış siqnalının amplitudu arasındakı xəttlilik doyma halına yaxınlaşır [43, c.12, s.1-7, 80]. Təcrübələrdə davam etmə müddəti daha kiçik olan siqnalların analiz edilməsi üçün AD8002 əməliyyat gücləndiriciləri əsasında gücləndiricilər yığılmışdır. AD8002 əməliyyat gücləndiriciləri son dövrdə geniş tətbiq edilən gücləndiricilərdən hesab edilir. AD8002 əməliyyat gücləndiriciləri ± 5 V gərginlikdə işləyir və iki gücləndirmə kanalına malikdir. AD8002 əməliyyat gücləndiricilərinin vahid gücləndirmə əmsalında buraxma zolağı 600 MHz və qalxma sürəti 1200 V/mksan olmuşdur. Bu tip əməliyyatgücləndiricisinin cərəyan tələbatı 5 mA olmuşdur. Görüldüyü kimi, AD8002 əməliyyat gücləndiricilərindən istifadə edərək toplam gücləndirməsi 36 olan gücləndirici hazırladıqda onun buraxma zolağı 100 MHz alınır.

NaI ssintilyatorundan buraxılan ssintilyasiya impulsunun eni 350 nsan-dan başlayaraq yavaş hissəsi mikrosaniyəyə qədər davam edir. Belə işıq paketlərini qeyd etmək üçün LT-1355 əməliyyat gücləndiricilərindən istifadə edilmişdir (şək. 2.3.3). LT-1355 əməliyyat gücləndiriciləri iki gücləndirmə kanalına malik olan və işləmə gərginliyi $\pm 2,5$ V – ± 15 V kimi geniş intervalda dəyişən gücləndiricilərdən hesab edilir. LT-1355 əməliyyat gücləndiricilərinin buraxma zolağı 12 MHz, siqnalın qalxma sürəti isə 400 V/mksan olmuşdur. Bu əməliyyat gücləndiriciləri vahid gücləndirmə əmsalında impulsunun eni 80 nsan-dən böyük olan siqnalları qeyd etmək üçün əlverişli sayılır. Şəkil 2.6-da LT-1355 əməliyyat gücləndiricisi əsasında yığılmış dövrə göstərilmişdir. Ssintilyatorlu detektordan gələn siqnal LT-1355

Cədvəl. 2.3.1.

LH6657 əsasında hazırlanmış iki kaskadlı gücləndiricinin element hissələrinin siyahısı

U1	Max1144
U2	LMH6657
C ₁	100 mkF
C ₂	1mkF
C ₃ ,C ₈	100pF
C ₄ ,C ₇	10nF
C ₅ ,C ₆	10 mkF
C ₉	100nF
R ₁	1kOm
R ₂ ,R ₃	1kOm
R ₄ ,R ₅	1,5kOm
L ₁ ,L ₂	100mkH



Şəkil 2.3.2 Siqnal gücləndiricisinin çıxış siqnalının giriş siqnalından və impulsun enindən asılılığı .

əməliyyat gücləndiricisinin çevirici olmayan (noninvert) girişinə verilir. Bu halda əməliyyat gücləndiricisinin çıxışında müşahidə edilən gücləndirilmiş siqnalın qütbü giriş siqnalında olduğu kimi olur. Gücləndiricinin çıxışında alınan siqnalın maksimum amplitudu 5 V ətrafında ola bilər. Bundan böyük amplitudlarda gücləndirici doyma rejimində olur və yaranan siqnallar normal gücləndirilmir. Bu əməliyyat gücləndiricisinin gücləndirmə əmsalının idarə edilməsi üçün əlavə potensiometr yığaraq gücləndirmə əmsalını 10 – 100 arasında dəyişmək olar.

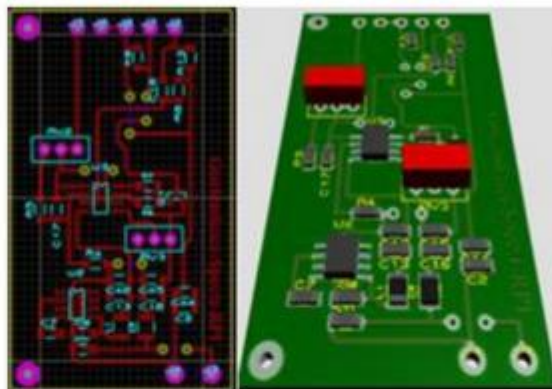
Gücləndiricinin birinci kanalından alınan siqnalın amplituda görə analiz edilməsini təmin etmək üçün LT-1355-in digər kanalı komparator kimi istifadə edilmişdir. Gücləndiricilərin hazırlanması zamanı küyün yaranması detektor modullarında yalan siqnalların əmələ gəlməsinə səbəb olur. Bununla yanaşı, belə küylərin tezliyi o qədər yüksək olur ki, lazımlı siqnalın tezliyi bu küydə itir. Məhz bu səbəbdən də, gücləndiricinin çıxışında alınan siqnalın amplitudu komparatordan verilən siqnalın amplitudu ilə müqayisə edilir və bunların hansının böyük olduğu müəyyən edilir. Komparator siqnalının amplitudunu müəyyən etmək üçün aşağıda verilən ifadədən istifadə edilmişdir:

$$V_{ref} = V_{CC} \times V_{RB} / (V_{RA} + V_{RB}) \quad (2.3.1)$$

Burada, V_{CC} - qidalandırıcı gərginlik, V_{RB} - potensiometrin ikinci hissəsində düşən gərginlik və V_{RA} - potensiometrin birinci hissəsində düşən gərginlikdir. Əgər əməliyyat gücləndiricisinin ikinci kanalının girişlərinə verilən gücləndirilmiş siqnalın amplitudu komparatordan verilən siqnalın amplitudundan böyük olarsa, çıxışda amplitudu +5 V olan siqnal müşahidə edilir və bu işə analoq siqnalların yaranmasına imkan verir. Bu hal rəqəmsal siqnal olaraq 1 vəziyyətinə uyğun gəlir. Əgər gücləndiricinin çıxışındakı siqnal komparatordan verilən siqnalın amplitudundan kiçikdirsə, bu zaman çıxışda siqnal müşahidə edilmir və bu hal 0 vəziyyətinə uyğun gəlir. Komparatorun girişinə verilən gərginliyin amplitudunu dəyişmək üçün əlavə potensioetr yığılmışdır. Təcrübələrdə istifadə zaman komparatorun çıxışına verilən siqnalın amplitud 100 mV-dan yuxarı seçilmişdir, və bu zaman əksər elektronik

küylərin yaratdığı yalançı hadisələr kəskin azaladılmışdır. Dövrədə istifadə edilən elementlər cədvəl 2.3.2-də verilmişdir.

Gücləndirmə əmsalı 100, buraxma zolağı 100 MHz olan gücləndiricilərin yığılması üçün tranzistorlar əsasında yığılmış iki kaskaddan istifadə edilmişdir. Gücləndiricinin girişində tutumlar sabit siqnalların keçməməsi üçün seçilmişdir. Bu tip gücləndiricilər KT640 əsaslı tranzistorlar əsasında yığılmışdır (şək. 2.3.4). Hər kaskadın gücləndirmə əmsalını kollektor və emitter müqavimətlərinin nisbəti təyin edir. Başqa sözlə kollektora və emittərə qoyulan müqavimətlər elə seçilir ki, tranzistorun normal işləməsi üçün lazım olan şərtləri ödəsin: kollektora düşən gərginlik emittərə düşən gərginlikdən çox böyük olsun $U_k \gg U_e$, ikinci şərt isə $U_b > U_e$ olmalıdır. Beləliklə, tranzistorların normal rejimdə işlənməsini təmin etmək üçün $R_k (390 \text{ Om}) > R_e (30 \text{ Om})$ müqavimətləri seçilmişdir. Belə dövrəyə qidalandırıcı gərginlik verildikdə +6 V voltmetrlə kollektora və emittərə düşən gərginliyi ölçsək $U_k = 2,1 \text{ V}$ və $U_e = 0,3 \text{ V}$ olduğunu müəyyən edərik. Bu isə birinci əsas şərtin ödənməsidir. Tranzistorun bazasına düşən gərginlik ikinci şərtə görə $U_b > U_e$ olmalıdır. Buna səbəb isə baza emitter keçidinin açılmasının tam ödənməsidir. Məlumdur ki, silisiumda p-n keçidi açmaq üçün lazım olan gərginlik 0,7 V-dur. Məhz bu səbəbdən, $U_b = 1 \text{ V}$ olmalıdır ki, ən azı emittərə düşən gərginlik $U_e = 0,3 \text{ V}$ olsun. Bizim hazırladığımız dövrədə $U_b > U_e$ şərti tam ödənilmiş və tranzistorun normal işləməsi təmin edilmişdir. Bu gücləndiricinin giriş kaskadını təşkil edən T1–T3 tranzistorları əks əlaqə vasitəsi ilə birləşdirilib. Bu gücləndiricinin küyünün kəskin azalmasını və cəldliyinin artmasını təmin etmişdir. Metal təbəqə ilə ayrılmış ikinci kaskad T4–T6 tranzistorlarından təşkil olunmuşdur. Bu kaskad birinci kaskad kimi qoşulmuşdur, lakin burada əks əlaqə birinci kaskadda olduğu kimi yalnız gücləndirmədən yox zəifləndirməsindəndə istifadə edilmişdir. Məhz bu tip kaskadların sayını artırmaqla gücləndiricinin buraxma zolağını azaltmadan güclənməsini 1000 qədər artırmaq mümkündür. Gücləndiricinin buraxma zolağını 100 MHz-ə qədər artırmaq üçün C1–C3 tutumlarını mütənasib qaydada seçmək gərəkdir. Gücləndiricinin işləmə gərginliyi + 6 V olmuşdur. Hazırlanmış bu gücləndiricinin giriş müqaviməti ~50 Om, buraxma zolağı 50 MHz, cərəyana görə

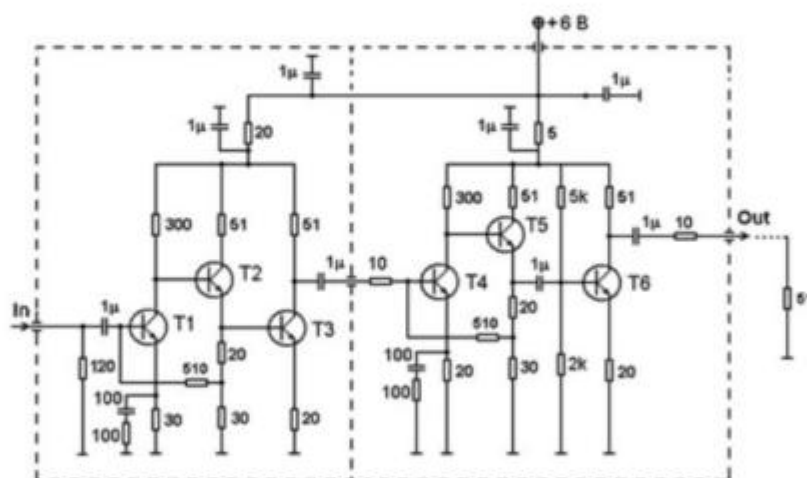


Şəkil 2.3.3 MSFD fotodiodlardan alınan siqnalların işlənməsi üçün istifadə edilən gücləndirici (LT-1355 əsasında) və komparator dövrəsi.

Cədvəl 2.3.2

LT-1355 əsasında hazırlanan dövrədə istifadə edilən element hissələrinin siyahısı

U2	Max1144
U3A	LT1355
U3B	LT1355
C ₇ , C ₁₀ , C ₁₁ , C ₁₃ , C ₁₆	10mkF
C ₁₂ , C ₁₅ , C ₁₈	100nF
C ₁₇	1nF
RV ₂ , RV ₃ , R ₆	10kOm
R ₄	270Om
R ₅	2,7kOm
L ₁ , L ₂	1mkH



Şəkil 2.3.4 KT640 transiztoru əsasında hazırlanmış iki kaskadlı siqnal gücləndiricisinin elektron dövrəsi.

gücləndirməsi 100 olmuşdur. Bu gücləndiricilərin yeganə çatışmamazlığı bunların 250 mV gərginlikdə artıq doyma halına getməsidir. Hazırlanmış bu tip gücləndiricilər istənilən tip fotoqeydedicilərdən alınan və impuls eni 10 nsan – 500 nsan arasında dəyişən siqnalların gücləndirilməsində istifadə oluna bilər. Hazırlanmış gücləndiricilərin ağ (termal) küyünü hesablamaq üçün aşağıdakı ifadədən istifadə edilmişdir [76, s.351; s.182]:

$$i = \sqrt{2 \times q \times \bar{i} \times \Delta f} \quad (2.3.2)$$

Burada q -elektronun yükü, \bar{i} - yaranan cərəyanın orta qiyməti və Δf -gücləndiricinin buraxma zolağıdır. (2.3.2) ifadəsindən göründüyü kimi, ağ küy gücləndiricinin buraxma zolağı artıqca artır. Bu ifadədən istifadə edərək KT640 gücləndiricisi əsasında yığılmış gücləndiricinin ağ küyü hesablanmışdır. Məlum olduğu kimi, gücləndiricinin buraxma zolağının eni $\Delta f \sim 100$ MHz olmuşdur. Yaranan cərəyanın orta qiymətini tapmaq üçün gücləndiricinin çıxışında alınan siqnal ossiloqrafın girişinə verilir. Bu zaman girişə 50 Om yükləmə müqaviməti (R) qoşulur. Ossiloqrafda müşahidə edilən siqnalın orta amplitudu (\bar{A}) və ona uyğun gələn tezlik (ν) seçilmiş və yaranan cərəyanın orta qiyməti $\bar{i} = \frac{\bar{A}}{R \times \nu}$ forması ilə hesablanmışdır. Beləliklə KT640 gücləndiricisi əsasında yığılmış gücləndiricinin ağ küyü hesablanmışdır:

$$i = \sqrt{2 \times q \times \frac{\bar{A}}{R \times \nu} \times \Delta f} = \sqrt{2 \times 1,6 \times 10^{-19} \times \frac{5 \times 10^{-3}}{50 \times 1000} \times 100 \times 10^6} = \sqrt{3,2 \times 10^{-19}} = 1,8 \text{ nA}$$

Beləliklə bu tip gücləndirici üçün ağ küy təqribən 1,8 nA olmuşdur.

Daha sonra KT640 tranzistoru əsasında hazırlanmış gücləndiricinin gücləndirmə əmsalının (+25 °C) – (-5 °C) temperatur intervalında dəyişməsinə baxılmışdır. Bunun üçün generatordan davam etmə müddəti 10 nsan olan, tezliyi 10 kHz olan siqnal gücləndiricinin girişinə verilmişdir. Gücləndirici“LRH-150 Lab

Cooling” inkubator qurğusuna yerləşdirilmiş və temperatur 5 °C addımı ilə dəyişmişdir. Qurğu temperaturu $\pm 0,2$ °C dəqiqliyi ilə təmin etməyə imkan vermişdir. Siqnalın amplitudunu tapmaq üçün CAEN ARÇ-si istifadə edilmişdir. Temperaturun +25°C qiymətində alınan siqnalın hündürlüyünün yarım eni 27-ci kanal və maksimumu isə 124-cü kanala uyğun gəlmişdir. Temperaturun -5 °C qiymətində isə yaranan siqnalın hündürlüyünün yarım eni 26-ci kanala və maksimumu isə 124-cü kanala uyğun gəlmişdir. Alınan nəticələrdən müəyyən edilmişdir ki temperatur fərqi 30 °C olduqda belə gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı və alınan enerji ayırdetməsi dəyişməmişdir.

Əksər fotoqeydedicilərdən siqnalların qeyd edilməsi zamanı ORTEC firmasının FTA820 gücləndirici modelindən istifadə edilmişdir. Bu tip gücləndiricilər FEG, fotodiodlar və silisium zərrəcik detektorlarında geniş tətbiq olunur. FTA820 gücləndiricisində çıxış siqnalının ön frontu 1 ns-ə az olmuşdur.

Bu tip gücləndiricinin cərəyan tələbatı 400 mA, işləmə gərginliyi +12 V, gücləndirmə əmsalı 200, gücləndiricinin küyü təqribən 1 mV kiçik, çıxış siqnalın amplitudu -5 V (50 Om) və buraxma zolağı 300 MHz olmuşdur. Bu tip gücləndiricilərdə kondensatorları dəyişərək gücləndiricinin buraxma zolağının 3 MHz – 300 MHz intervalında dəyişməsinə imkan vermişdir. Bu tip gücləndiricilər MPPC, MSFD və SPAD fotodiodlarının gücləndirmə əmsalının hesablanması və piksel tutumunun hesablanması üçün istifadə edilmişdir.

III FƏSİL

MSFD FOTODİODLARIN STRUKTURU VƏ İŞLƏK PARAMETRLƏRİ

3.1. MSFD fotodiodların işlək parametrlərinin tədqiqi

MSFD fotodiodun bir-başa çıxışında alınan siqnallar əksər hallarda kiçik olduğundan onların parametrləri təyin edilərkən fotodiodun çıxışındakı siqnal gücləndirici vasitəsi ilə gücləndirilir və daha sonra ARÇ-si vasitəsi ilə rəqəmsal siqnala çevrilir. Bundan sonra selvari fotodiodların parametrləri təyin edilir. Selvari fotodiodda siqnalın yaranması düşən fotonların və ya işləyən piksellərin sayından asılı olaraq əsas iki tip paylanma hesabına formalaşır: Puasson və Qauss paylanması. Xüsusi halda əgər hər hansı tək elementli selvari fotodiod (gücləndirməsi $\sim 10^6$) götürsək və qəbul etsək ki onun FQE-si 100 % bu zaman onun üzərinə tezliyi 1Hz (1 saniyədə 1impuls) olan impuls paketində 1 foton və yada 100 foton olan işıq göndərsək, 2 saniyədə CAEN-lə (hər kanalı $2,5 \times 10^5$ e) çəkilmiş spektrdə biz yalnız eyni amplitudlu üst-üstə vəyada yaxın düşmüş iki nöqtə müşahidə edəcəyik. Əgər düşən impuls paketlərinin tezliyi vəya ölçmə müddətini dəfələrlə artırısaq bu zaman alınan spektrdə düşən impuls paketlərinin sayı qədər hadisə qeyd edilir. Bu hadisələr çoxluğu müxtəlif amplitudlara uyğun gəlir və normal paylanmaya tabe olaraq spektrdə yalnız bir pik müşahidə edilir. Siqnalın yaranmasını təşkil edən Normal paylanma belə ifadə edilir [99, s.802; s.75]:

$$G(H) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} * \exp\left(-\frac{(H-H_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3.1.1)$$

burada, A- siqnalın yaratdığı tam yükü və ya pikin sahəsi, H_0 -normal paylanmanın maksimumuna uyğun gələn amplitudun orta qiyməti və σ – standart kənara çıxmadır. Normal paylanmanın standart kənara çıxması belə ifadə edilir:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad \mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.1.2)$$

Burada μ - pikdə müşahidə edilən amplitudların orta qiyməti, N - pikdə mövcud olan hadisələrin sayı və x_i - i-ninci hadisənin amplitududur. Pikin standart kənara çıxmasının kəskin dəyişməsi selvari fotodiodun küy əmsalından, gücləndiricinin gücləndirmə əmsalının fluktasiyasından və ağ küydən asılıdır. Pikin sahəsinin 99 % olaraq $H_0 \pm 3\sigma$ qəbul edilir. Standart kənara çıxmanın böyük alınması qeydedicilər üçün əlverişsiz hesab edilir. Məhz qeydedicilərin dəyişmə əmsalı və siqnal küy nisbəti (SKN) bir başa olaraq standart kənara çıxma ilə tərs mütənasibdir: $SKN = \mu/\sigma$. Burada μ - amplitudun maksimal orta qiyməti və σ -standart kənara çıxmadır. Bu ifadədən görüldüyü kimi standart kənara çıxma böyüdükcə siqnal küy nisbəti pisləşir.

Əgər düşən fotonları qeyd etmək üçün çox elementli MSFD fotodiodlar istifadə edilərsə bu zaman yaranan piklər hər paketdəki fotonun sayından asılı olaraq müxtəlif cür paylanacaqdır. Qəbul etsək ki, paketdə 3 foton var və onlarda piksellərdə selvari prosesləri müəyyən bir ehtimalla başlatdırırlar. Əgər düşən 3 fotondan yalnız biri bir pikseldə selvari prosesi başlatmışdırsa onda çıxışda əsas bir amplitudun orta qiyməti, yox əgər eyni zamanda iki və ya 3 foton müxtəlif iki və üç piksellərdə selvari prosesi başlatmışdırsa onda çıxışda iki və üç amplitudun orta qiyməti müşahidə edilir. Bu zaman spektrdə amplitudlarının orta qiyməti bir birindən eyni gücləndirmə əmsalı qədər fərqlənən 3 pik müşahidə edilir. Bu piklərin yaranması Puasson paylanmasına tabe olur. Puasson paylanması belə ifadə edilir [180, s.789; s.537]:

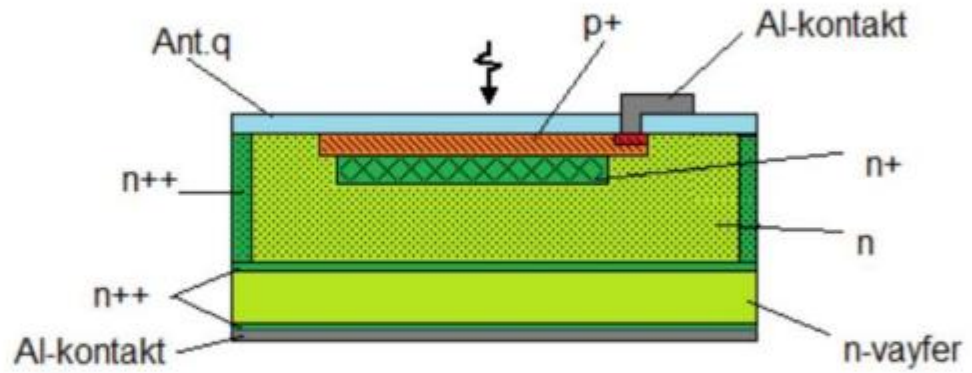
$$P(n : \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \quad (3.1.3)$$

Burada μ - fotoelektronların orta sayı və $P(n:\mu)$ μ - fotoelektronlardan n sayının fotodiodun çıxışında müşahidə edilmə ehtimalıdır. Puasson paylanması MSFD fotodiodların gücləndirmə əmsalının, pikselin tutumunun hesablanmasında, küy

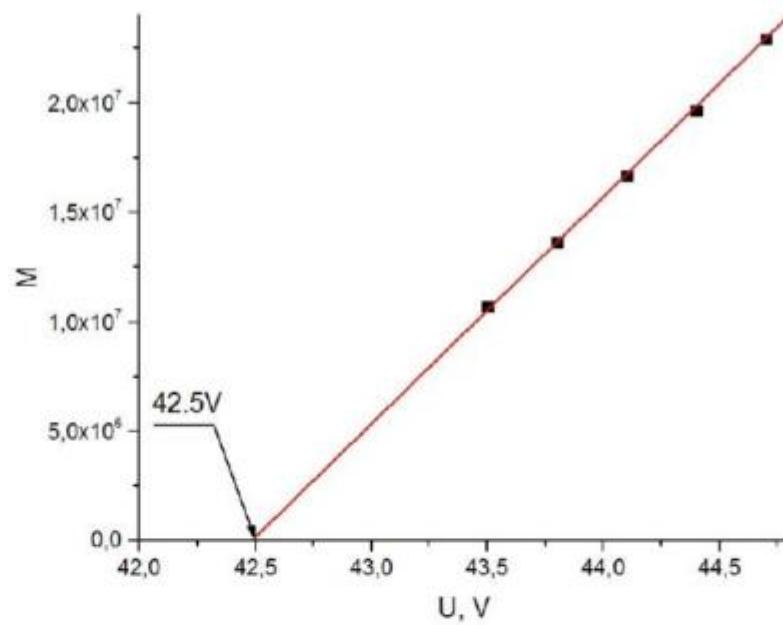
əmsalının və FQE-nin təyin edilməsində istifadə edilir. Düşən foton selinin sayı artdıqca işləyən piksellərin sayı artır və nəticədə çıxışda yaranan siqnalın amplitudunun orta qiyməti Puasson paylanmasından uzaqlaşaraq normal paylanmaya yaxınlaşır. Bu hal MSFD fotodiodların böyük foton seli ilə parametrlərinin və qamma detektorların parametrlərinin təyin edilməsində müşahidə edilir. Normal paylanmadan istifadə edərək amplitudun maksimal qiymətinin tapılmasında, maksimumun tam yarım enində və enerji ayırdetməsində istifadə edilir.

İşdə “Zecotek Photonics”, “Hamamatsu Photonics” və “Laser Components” firmalarından alınan fotodiodlar müqayisəli tədqiq edilmişdir. Selvari fotodiodlarda sel prosesinin analiz edilməsi və fotodioun işləmə mexanizmini düzgün təsvir edən yeni fiziki modelin təcrübi sübutu zamanı Heyger rejimində işləyən təkelemətli selvari fotodiodlarından istifadə edilmişdir. Bu tip tək-elementli selvari fotodiodlar elmi ədəbiyyatda adətən SPAD (ingiscə, Single Photon Avalanche Diode) adlandırılır. “Zecotek Photonics”firmasının istehsalı olan fotodiod n-tip altlıq üzərində epitaksiya üsulu ilə yetişdirilmiş n tip epitaksial lay (aktiv həcmi yüklər oblastı) və onun üzərində ion implantasiya üsulu ilə yaradılmış $n^+ - p^+$ oblastlı tək elementli pikseldən ibarətdir (şək. 3.1.1). Pikselin sahəsi $35 \text{ mkm} \times 35 \text{ mkm}$, aktiv həcmi yüklər oblastının qalınlığı 3 mkm , deşilmə gərginliyi $- 42,5 \text{ V}$, tutumu $- 0,9 \text{ pF}$, işləmə gərginliyi $43 - 45 \text{ V}$ və gücləndirmə əmsalı 10^7 -dən böyük olmuşdur (şək. 3.1.2). Bu tip fotodiodların parametrləri təyin edilərkən şəkil 2.1.1- də göstərilən dövrəyə söndürücü müqavimət olaraq RC filtirdən sonra 100 kOm müqavimət əlavə edilmişdir [26, c.22, s.1190-1201, 27, c. 798, s.1-6, 47, s.167,53, s.357-362].

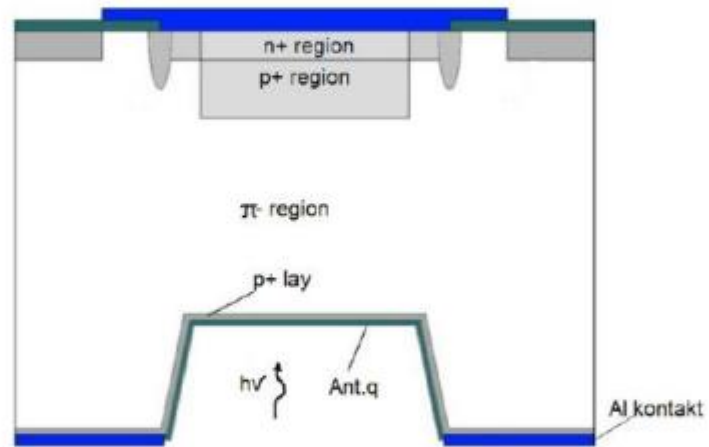
Təcrübədə istifadə edilən Laser Components firmasının R4523 markalı SPAD diodunun quruluşu şəkil 3.1.3-də göstərilmişdir. SPAD fotodiodu qırmızı və infraqırmızı oblastda fotonların qeydedilməsi üçün təkmilləşdirilmişdir [112, c.31, s.3591-3596]. SPAD-R4523 fotodiodu $p^+ - \pi - p^+ - n^+$ regionlarından ibarətdir və selvar proses $p^+ - n^+$ oblastlar arasında baş verir. Həcmi yüklər oblastının qalınlığı 25 mkm (p^+ layı ilə p^+ region arasında) və diametri isə 500 mkm olmuşdur. SPAD-R4523 fotodiodunun deşilmə gərginliyi $134,6 \text{ V}$, işləmə gərginliyi $135 - 136,5 \text{ V}$, tutumu $1,7 \text{ pF}$ və gücləndirmə əmsalı 10^7 böyük olmuşdur (şək. 3.1.4).



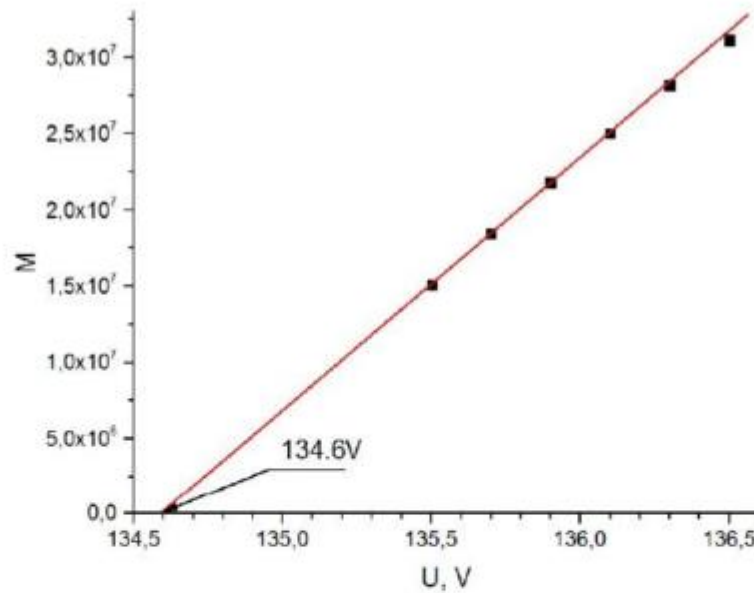
Şəkil 3.1.1 Zecotek Photonics firmasının SPAD diodunun quruluşu [160, c.567, s.70-73].



Şəkil 3.1.2 Zecotek Photonics firmasının SPAD diodunun gücləndirmə əmsalının gərginlikdən asılılığı [45, c.912, s.287-289].



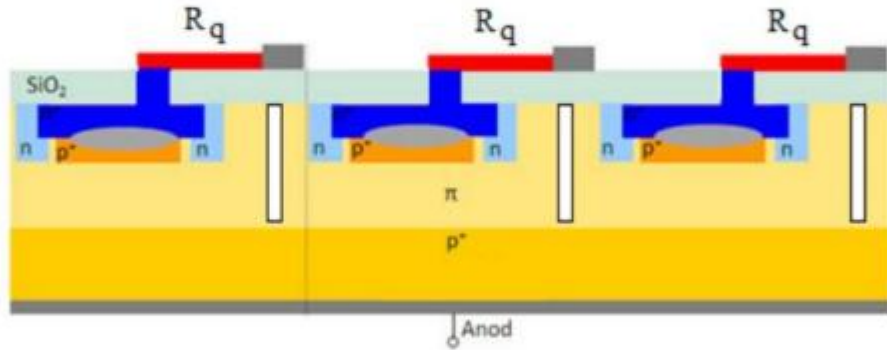
Şəkil 3.1.3 SAP500 Laser Components firmasının SPAD-R4523 fotodiodunun quruluşu [112, c.31, s.3591-3596].



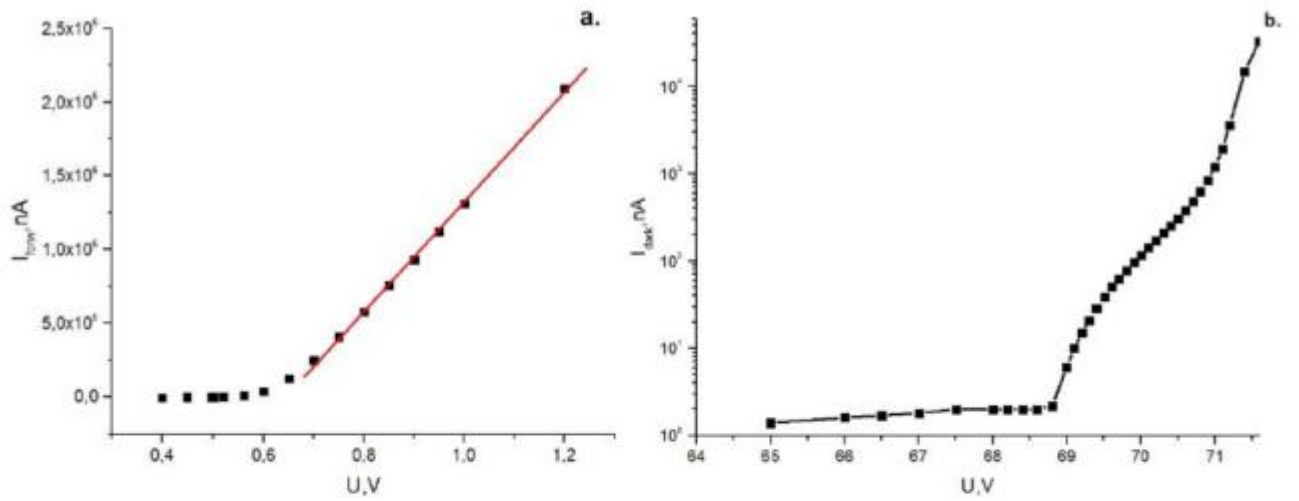
Şəkil 3.1.4 SAP500 SPAD-R4523 fotodiodunun gücləndirmə əmsalının gərginlikdən asılılığı [45, c.912, s.287-289].

Mikropikselli selvari fotodiod olaraq yüksək piksel sıxlığına malik olan Zecotek firmasının MSFD-3NK, MSFD-3N1P, MSFD-3D [8, c.18, s.10-11, 10, c.31, s.81-85, 34, c.10, s.1-7, 35, c. 36, s.14-17, 36, s.252,37, c.10, s.778–779, 38, s. 383-385, 39, c.36, s.20-22, 40, s.13, 41, c.1, s.33-36, 42, c.21, s.17-18, 43, c.12, s.1-7, 44, c.24, s.341-344, 45, c.912, s.287-289, 46, s.1-6, 47, s.167, 48, s.1, 49, s.42, 50, s.1,53, s.357-362, 86, s.523-526] və Hamamatsu Firmasının MPPC-S12572-010P, MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-11-050C [58, c.123, s.940-944, 78, s.1-4, 80, c.8, s.1-24,85, 114, 127, c.7, s.1-15,129, c.57, s.1008-1014, 181, c.60, s.1533-1540, 185, c.768, s.247-251] fotodiodlarından istifadə edərək onların işlək parametrləri öyrənilmişdir. MPPC fotodiodlar p^+ -tip altlıq və onun üzərində zəif aşqarlanmış yüksək təmizlikli π –tip epitaksial laydan ibarətdir (şək. 3.1.5). Epitaksial layın daxilində yüksək aşqarlanmış p^+ layı və onun üzərində yüksək aşqarlanmış n^+ laylarından təşkil olunmuş keçidlər diodun əsas pikselləri hesab olunur. Selvari prosesin sönməsi hər pikselə ardıcıl qoşulmuş polisilikon mikro-rezistorvasitəsi ilə həyata keçirilir. Piksellər xüsusi qoruyucu kəmərlər və çarpaz görüşmənin qarşısını almağa imkan verən yuvalarla əhatə edilmişdir. Yüksək təmizlikli π –tip epitaksial layından istifadə edilmə MPPC fotodiodlarında gecikən impulsların sayının kəskin azalmasına səbəb olur. MPPC fotodioda gərginlik tətbiq edildikdə, ilk növbədə, həcmi yüklər oblastı n^+-p^+ keçidindən başlayır, sonra gərginlik artdıqca bütün epitaksial təbəqə tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə edilir. Gərginliyin sonrakı qiyməti isə n^+-p^+ oblastları arasındakı sahənin artmasına sərf olunur. Bu zaman sahə özünün $3-5 \times 10^5$ V/sm qiymətinə yaxınlaşır və yükdaşıyıcılar belə güclü sahədə sərbəst qaçış yolunda 3,5 eV enerjidən böyük enerji əldə edirlər. Artıq belə enerji əldə etmiş yükdaşıyıcılar zərbə ilə toqquşma nəticəsində yeni elektron-deşik cütləri yaradırlar. Yaranan elektron və deşiklər yenidən güclü sahə hesabına yeni elektron-deşik cütü yaradırlar. Selvari proses bu formada davam edir və fotodiodun sıradan çıxmasına səbəb ola bilər. Diodun sıradan çıxmaması üçün pikseldəki selvari prosesin sönməsi hər pikselə qoşulmuş xüsusi R_s müqaviməti ilə həyata keçirilir. Söndürücü müqavimət olaraq şəffaf TiO kimi birləşmələr istifadə edilir. Daha sonra hər piksel xüsusi müqavimət vasitəsi ilə əsas kontakt xətlərinə

birləşdirilir. Piksellər bir-birinə paralel olaraq qoşulur. Beləliklə hər pikseldə yaranan siqnallar toplanaraq fotodiodun çıxışında yekun siqnalın yaranmasını təşkil edir. MPPC-S12572-010P fotodiodunun hər addımı 10 mkm tərtibində olmuşdur və $3 \times 3 \text{ mm}^2$ sahəli fotodiodda toplam 90000 piksel yerləşmişdir. Bu tip fotodiodların qaranlıq cərəyanı 20 nA, gücləndirmə əmsalı-100000, tutumu- 320 pF, bərpa olunma müddəti 20 nsan, FQE-10 % (470 nm), həndəsi faktoru -33 % və işləmə gərginliyi 69,5 V olmuşdur [53, s.357-362, 85]. İstifadə edilən digər tip MPPC-S12572-015C fotodiodunun addımı 15 mkm tərtibində və $3 \times 3 \text{ mm}^2$ sahəli fotodiodda toplam 40000 piksel yerləşmişdir. Bu tip fotodiodların qaranlıq cərəyanı 20 nA, qaranlıq sayı 1000 hadisə/san, gücləndirmə əmsalı 230000, tutumu 320 pF, bərpa olunma müddəti 20 nsan, FQE-25 % (460 nm), həndəsi faktoru 53 % və işləmə gərginliyi 69 V olmuşdur. MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodları təcrübələrdə MSFD fotodiodlarının xəttiliyinin ölçülməsində, FQE-nin təyin edilməsində və ssintilyatorlardan buraxılan fotonların qeydedilməsində istifadə edilmişdir. Təcrübələrdə istifadə edilən digər tip MPPC-S10362-050CK fotodiodların sahəsi $1 \times 1 \text{ mm}^2$ olmuşdur. Piksellərinin sahəsi $50 \text{ mkm} \times 50 \text{ mkm}$, toplam piksel sıxlığı 400 piksel/ mm^2 olmuşdur [85]. Şəkil 3.1.6-da MPPC-S10362-050CK fotodiodunun VAX, VFX, gücləndirmə əmsalının gərginlikdən asılılığı verilmişdir. Tərs istiqamətdə VAX-dan görüldüyü kimi, işləmə gərginliyində MPPC-S10362-050CK fotodiodun qaranlıq cərəyanı 25 nA olmuşdur. VFX-dan görüldüyü kimi, həmin fotodiodun həcmi yüklər oblastı tam əhatə olunması 40 V-dan başlamış və MPPC-S10362-050CK fotodiodun tam tutumu 38 pF olmuşdur. Orta hesabla, hər pikselin tutumu $38 \text{ pF}/400=95 \text{ fF}$ olmuşdur. Piksellərdəki selvari prosesi söndürmək üçün lazım olan söndürücü müqaviməti təyin etmək üçün MPPC fotodiodun VAX-ı düz istiqamətdə ölçülmüşdür. Gərginlik artdıqca cərəyan artmış və tətbiq edilən gərginliyin 0,6 – 1,2 V intervalında p-n keçid açılmışdır. Gərginliyin sonrakı böyük qiymətlərində cərəyanın qiymətini söndürücü müqavimət təyin etmişdir. Məhz bu səbəbdən də xətti hissədə Om qanundan istifadə edib söndürücü müqaviməti hesablamaq olar. Bu zaman tam müqavimət $R_{\text{tot}} = \Delta U / \Delta I$ alınır. Əgər xətti hissə olaraq biz 0,8 V – 1,2 V intervalını götürsək bu zaman $R_{\text{tot}} = (1.2 - 0.8) / ((2.091 \times 10^{-7} - 5.77 \times 10^{-5}) \times 10^{-9}) = 264 \text{ Om}$ alınır.



Şəkil 3.1.5. Hamamatsu firmasının istehsalı olan MPPC fotodiodlarının strukturu [85].

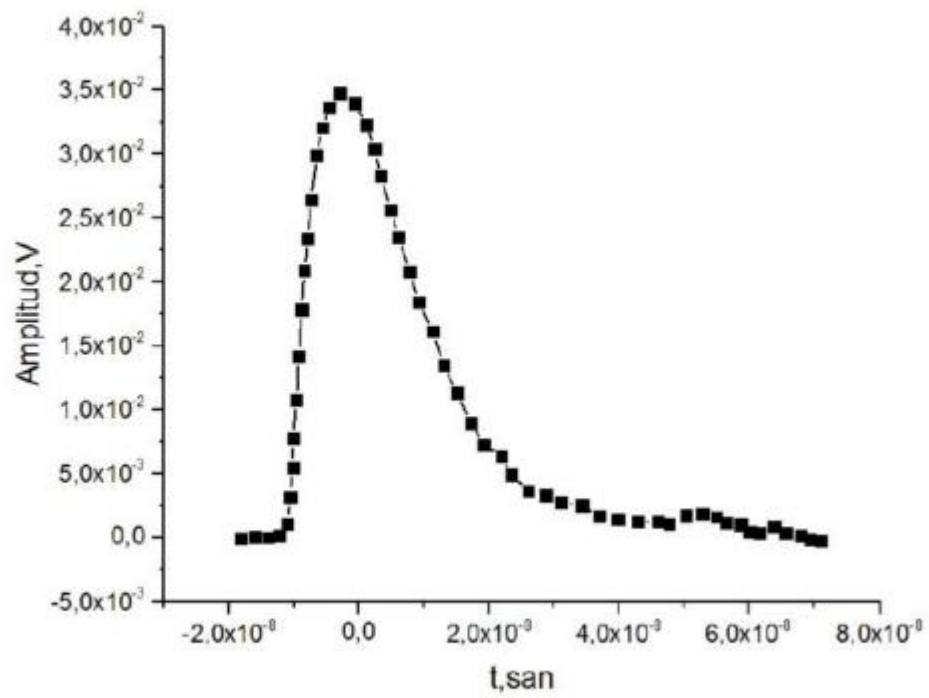


Şəkil 3.1.6 MPPC-050C fotodiodlarının düz və tərs istiqamətdə VAX-sı

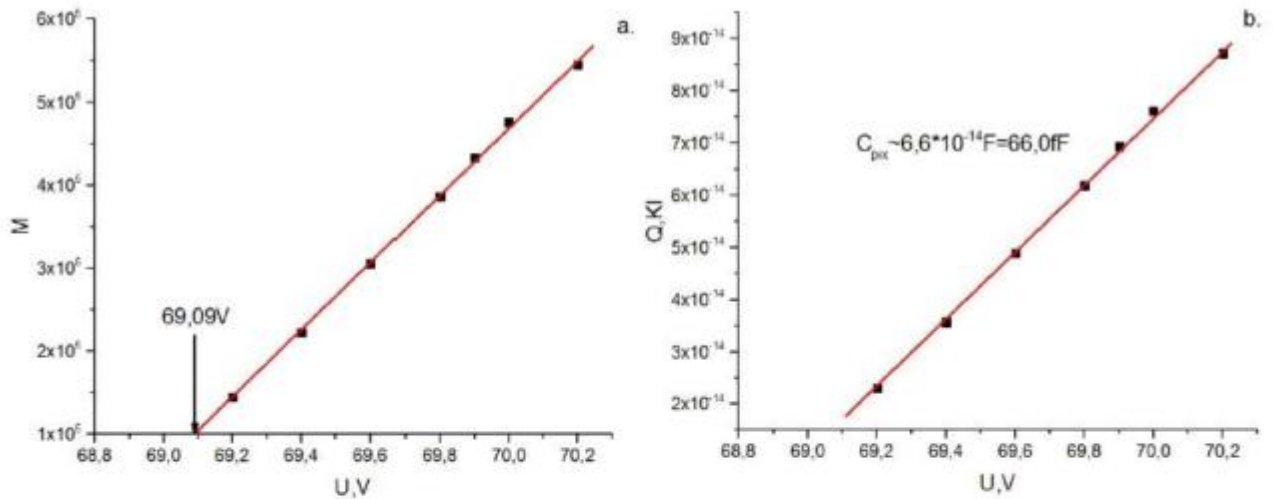
Məlumdur ki, MPPC pikselləri paralel qoşulmuşdur. Eyni müqavimətlər paralel qoşulduqda onların tam müqaviməti $R_{to}=R_q/N_{pix}$ olur. Burada N_{pix} - MPPC fotodiodundakı toplam piksellərin sayı, R_q - söndürücü müqavimətdir. Alınmış tam müqavimətdən bir pikselin söndürücü müqaviməti hesablanır $R_q=R_{tot}\times N_{pik}$. Beləliklə MPPC-S10362-050CK fotodiodu üçün $R_q=R_{tot}\times N_{pix}=264\text{ Om}\times 400=105\text{ kOm}$ alınır. Beləliklə hər piksel üçün xarakteristik müddəti hesablamaq mümkündür $t=R_q C_{pik}=105\text{ kOm}\times 95\text{ fF}=9,975\text{ ns}$ alınır və əksər hallarda bərpa olunma müddəti olaraq $5\times t$ qəbul olunur.

Şəkil 3.1.7-də MPPC-S10362-050CK tip fotodioddan alınan və birinci fotoelektrona uyğun gələn siqnalın forması verilmişdir. Siqnalın formasını qeyd etmək üçün OWON SmartSD-8202 ossiloqrafından istifadə edilmişdir. Bu ossiloqrafın buraxma zolağı 60 – 300 MHz, sayma sürəti 500 MHz – 3,2 GHz və qeydetmə uzunluğu 10 M nöqtə olmuşdur. Bu zaman fotodioda 69,9 V gərginlik tətbiq edilmişdir. Birinci fotoelektrona uyğun gələn siqnalın amplitudu 34,7 mV olmuşdur. Siqnalın ön frontu $4,58\times 10^{-9}$ san olmuşdur. Siqnalın ön frontu birbaşa olaraq selvari oblastın intensivliyindən asılı olmuşdur (sahənin qiymətindən). Sahə böyüdükcə fronta uyğun gələn zamanın azalması müşahidə edilir. Yaranan tək fotoelektronlu siqnalın arxa frontu isə birbaşa olaraq MPPC fotodiodun bir pikselinin tutumundan və selvari prosesi söndürən müqavimətdən asılıdır: $t_f \sim R_q \times C_{pik}$. Bu asılılıqdan istifadə edərək bir pikselin tutumunu hesablamaq mümkündür. Siqnalın formasından müəyyən edilmişdir ki, arxa fronta uyğun gələn zaman müddəti $t_f \sim 9,86\times 10^{-9}$ san təşkil edir. Pikselə uyğun gələn tutumu hesabladıqda $C_{pik}=t_f/R_q=9,86\times 10^{-9}\text{ san}/105\text{ kOm}=92\text{ fF}$ alınır. Bu nəticələri almaq üçün işıqlandırıcıya davam etmə müddəti 10 nsan, tezliyi 3 kHz olan düzbucaqlı impulslar tətbiq edilmişdir. Siqnalın gücləndirilməsi zamanı Ortek firmasının FTA820 gücləndirmə əmsalı 196 olan və buraxma zolağı 300 MHz olan gücləndiricisindən istifadə edilmişdir. Fotodiodun gücləndirmə əmsalı təyin edilərkən 450 nm dalğa uzunluqlu işıqlandırıcı istifadə edilmişdir. İntegrallama sərhədi 68 nsan seçilmişdir. Şəkil 3.1.8-də gücləndirmə əmsalının və bir elektronun yaratdığı yükün gərginlikdən asılılığı verilmişdir. Deşilmə gərginliyi olaraq gücləndirmə əmsalı sıfır olduqda

asılılığın gərginlik oxunu kəsdiyi qiymət seçilir. Bizim halda bu 69,09 V-a uyğun gəlmişdir. İşləmə gərginliyində MPPC fotodiodun gücləndirmə əmsalı $5,5 \times 10^5$ olmuşdur. Tək fotoelektronlu amplitud paylanmasıdan istifadə edərək MPPC fotodiodunda hər pikselə uyğun gələn tutumu hesablamaq üçün selvari fotodiodda yaranan yükün gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur. Əyrinin xətti hissəsi olaraq 69,2–70 V hissəsi seçilmiş və tutumu hesablamaq üçün bu ifadədən istifadə edilmişdir $C_{\text{pik}} = \Delta Q / \Delta U$ və pikselin tutumu üçün 66 fF alınmışdır. Beləliklə tək fotoelektronlu piklə tapılan tutumla terminal tutum arasında fərq müşahidə edilmişdir. Belə fərqin yaranması E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС qurğusu ilə MPPC fotodiodunun tutumu ölçülərkən pikselin tutumu kontakt oblastlarının tutumuna (epitaksial təbəqənin C_h) paralel olur və bunun nəticəsində ölçülən tutum ($C_{\text{pik}} + C_h$) tək elektronlu piksellərin tutumlarının tapılan ifadəsindən böyük alınır. Tək foto elektron metodundan tapılan tutumda yalnız söndürücü müqavimətin ($C_q < C_h$) tutumu daxil olur və bunun nəticəsində pikselin tutumu $(C_{\text{pik}} + C_q) < (C_{\text{pik}} + C_h)$ az alınır. MPPC fotodiodunun aktiv səthi reallıqda 3 mm \times 3 mm olmasına baxmayaraq səthin müəyyən hissəsi məhz kontakt xətləri vasitəsi ilə əhatə edilir. Bu fotodiodun aktiv sahəsinin azalmasına səbəb olur. MPPC fotodiodlarında məhz piksel sıxlığı artdıqca onların həndəsi faktoru kəskin azalır. Məsələn, piksel sıxlığı 4444 piksel/mm² olan fotodiodun həndəsi faktoru 53 %, lakin piksel sıxlığı 10000 piksel/mm² olan MPPC fotodiodun həndəsi faktoru 33 % olmuşdur. Başqa sözlə piksel sıxlığı artdıqca MPPC fotodiodların qeyd etmə həssaslığı kəskin azalır. Fotodiodların fotoqeyd etmə əmsalı ilə həndəsi faktor arasında xətti asılılıq mövcuddur. Həndəsi faktor artdıqca FQE artır. Məhz bu səbəbdəndə səthi MPPC fotodiodlarında həndəsi faktoru azaldıqca (piksel sıxlığı) qeyd etmə effektivliyində kəskin azalır. MPPC-S10362-050CK fotodiodları üçün FQE 52 %, MPPC-S12572-015C fotodiodu üçün 460 nm dalğa uzunluğunda 25 %, MPPC-S12572-010P fotodiod üçün isə 470 nm dalğa uzunluğunda 10 % alınmışdır [78, s.1-4, 114, 127, c.7, s.1-15, 128, s.1-4, 185, c.765, s.247-251]. MPPC fotodiodların əsas üstünlükləri onların hər bir pikselinin qoruyucu yuvada yerləşdirilməsi və sonrakı impulslarının sayının kəskin azaldılmasıdır. Qoruyucu yuva selvari prosesin baş verməsi zamanı buraxıla biləcək fotonların qonşu



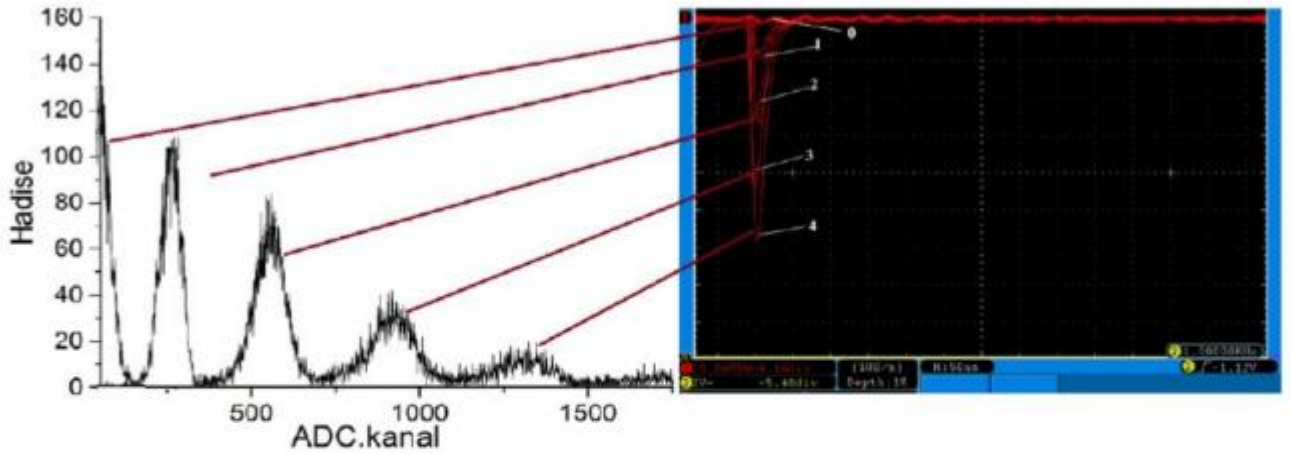
Şəkil 3.1.7 MPPC-S10362-050CK fotodiodunun birinci fotoelektronuna uyğun gələn siqnalın forması.



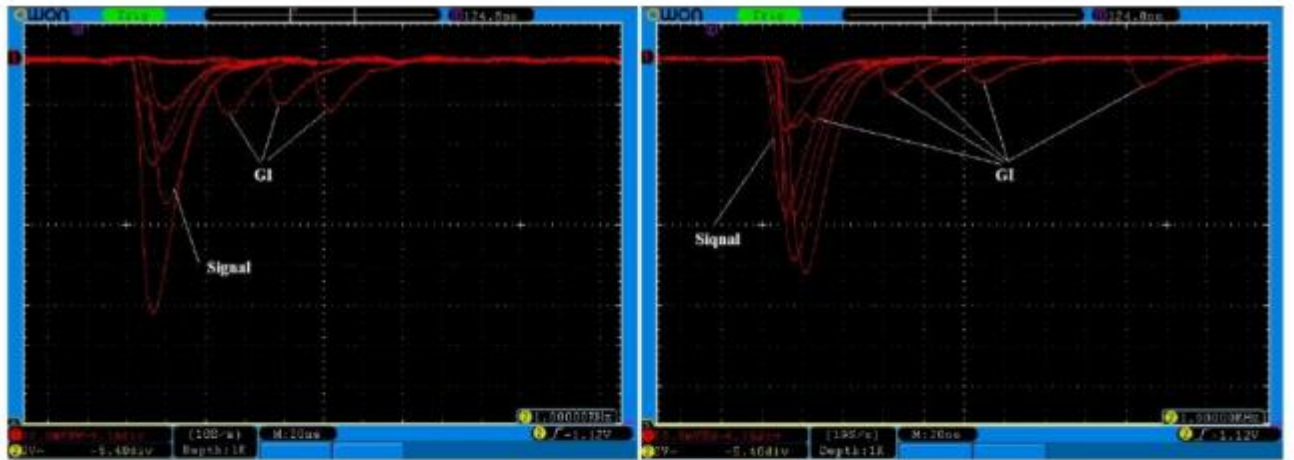
Şəkil 3.1.8 MPPC-S10362-050CK fotodiodunun gücləndirmə əmsalının və selvari prosesdə yaranan yükün gərginlikdən asılılığı

piksəllərdə selvari prosesi başlatma ehtimalını kəskin azaldır. Bu isə qeyd edilən siqnalın amplitudunda mümkün xətanın kəskin azaldılmasına və siqnalın amplitudunun qiymətinin düzgün təyin edilməsinə imkan verir. Bununla yanaşı, siqnalın amplitudunun düzgün təyin edilməsinə MPPC fotodiodlarda mövcud olan impulsdan sonrakı gecikən siqnallar da birbaşa təsir edə bilər. Təsəvvür edə ki, 100 keV enerjili qamma fotonu ssintilyator üzərinə düşür və orada 3000 foton yaradır. Bu fotonlardan yalnız 80 % -zı MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P diodlarında elektron-deşik cütü yaradır. Bu fotoelektronlardan 25 və ya 10 % selvari prosesin yaranmasında iştirak edir. Yaranan bu elektronların 2 – 5 % faizi epitaksial selvari oblastın yaxın ətrafındakı təbəqədə mövcud olan tələlər tərəfindən tutulur. Beləliklə bu azalma siqnalın amplitudunun dəyişməsinə səbəb olur.

MPPC fotodiodların digər bir çatışmazlığı onlarda gecikən impulsun mövcud olmasıdır. Gecikən impulsun mövcud olması aktiv həcmdəki tutma mərkəzlərinin konsentrasiyasından və gücləndirmə əmsalından asılıdır. Şəkil 3.1.9-da OWON SD-8202 giriş yük müqaviməti 50 Om olan iki kanallı analoq ossiloqrafı vasitəsi ilə MPPC-S10362-050CK fotodiodundan qeyd edilən fotosiqnalın formaları verilmişdir. Kanalın tətikləyici həddini elə optimal seçmək lazımdır ki, yalnız lazım olan hadisələr müşahidə edilsin. Analıq ossiloqrafın qeyd etdiyi tək fraqmentdə müxtəlif amplitudlu impulslar müşahidə edilir. Bu impulsların amplitudu bir-birindən tək pikselin gücləndirməsinin yaratdığı yük qədər fərqlənir. Şəkildən görüldüyü kimi qeyd edilən impulslar 0-cı, I-ci, II-ci, III-cü və IV-cü fotoelektronlara uyğun gəlir. Kiçik amplitudlu (0-cı) impulsların tezliyi çox yüksək olur və onlar mövcud dövrənin küyü nəticəsində yaranır. Şəkildə həmçinin analıq siqnalla yanaşı onların ARÇ-i ilə amplituda görə çəkilmiş spektridə verilmişdir. Spektr çox saylı fraqmentlərin nəticəsindən ibarət olur. Burada da analıq ossiloqrafın qeyd etdiyi bir fraqmentdə müşahidə edilən sayda maksimum piklər müşahidə edilir. Bu piklərin maksimumunun yükləri belə hesablanır: $Q_i = M \times N_i \times e$. Bu ifadədəki M- gücləndirmə əmsalı, N_i – neçənci pik olduğunu göstərir və bu say həmçinin selvari proses baş verən piksellərin sayını ifadə edir, və e- elektronun yüküdür. Lakin işləyən piksellərin sayı çoxaldıqca pikin müşahidə edilməsi və yaranmasında Gauss paylanmasına tabe



Şəkil 3.1.9 MPPC-S10362-050CK qeydedicisi ilə qeydedilən siqnalın analog və paylanma spektri.



Şəkil 3.1.10 MPPC-S10362-050CK fotodiodunda müxtəlif gücləndirmə əmsalında gecikən impulsların OVON ossiloqrafı ilə çəkilmiş fraqmenti.

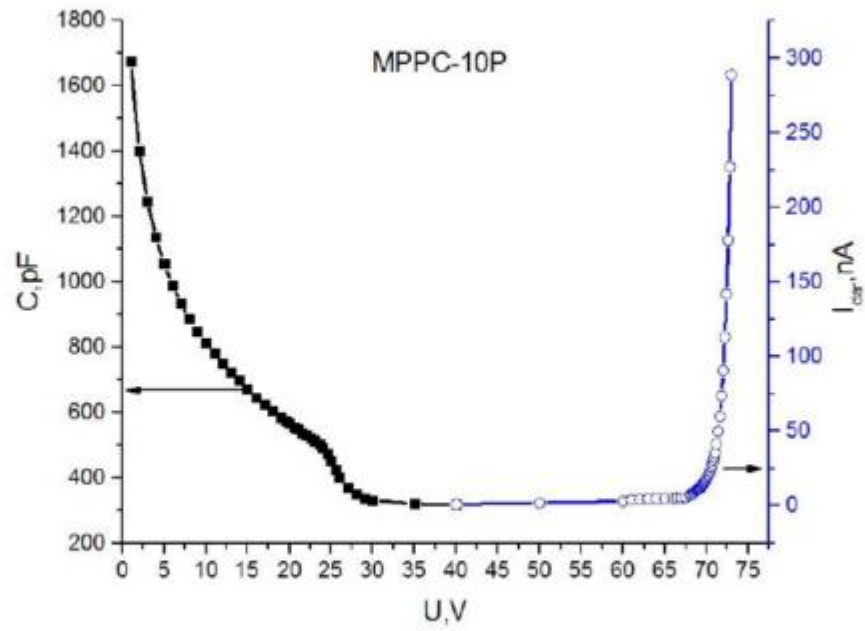
olur. Məhz bu fotopiklər MPPC fotodiodların amplitud paylanması təşkil edir. Müşahidə edilən siqnallarda həmçinin, optik çarpaz əlaqə hesabına yaranan siqnal müşahidə olunur.

MPPC fotodioda tətbiq edilən gərginlik artdıqca gecikən impulsların tutulma ehtimalı kəskin artır. Siqnalın formasından görüldüyü kimi, əsas fotosiqnalın yanında əlavə gecikən impuls (Gİ) müşahidə edilmişdir. Tətbiq edilən gərginlik artdıqca Gİ baş vermə ehtimalı daha kəskin artır (şəkl. 3.1.10). Bu tip MPPC fotodiodlarda gecikən impuls əsas siqnalın amplituduna təsir etmir, onlar yalnız fotodiodun sayma performansına təsir edir. Gecikən impulsların baş vermə ehtimalı pikselin ölçüsündən də asılıdır. MPPC fotodiodlarından fərqli olaraq MSFD fotodiodların bərpa olunma müddətinin dəfələrlə böyük olması bu quruluşlarda Gİ müşahidə edilmə ehtimalını kəskin azaldır.

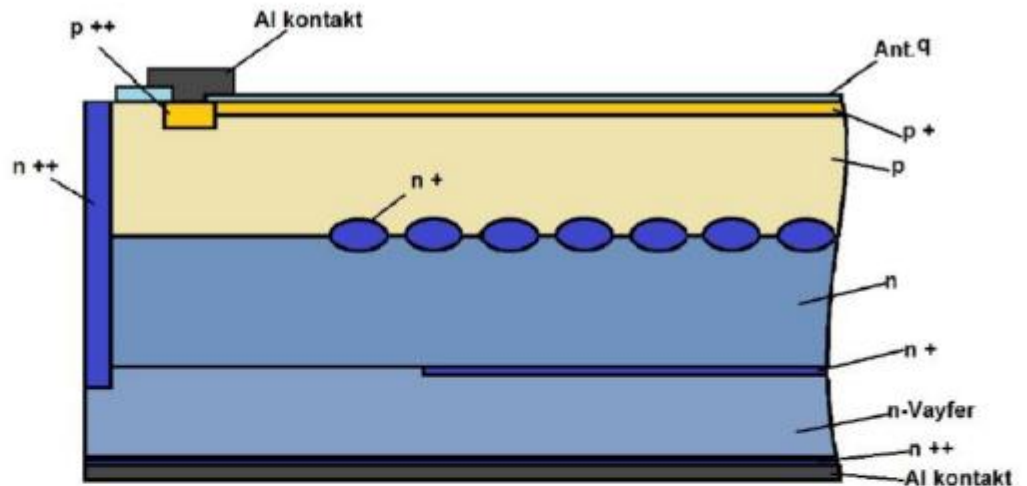
MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodlarının işləmə gərginliyində gücləndirmə əmsalı $2,5 \times 10^5$ və $1,25 \times 10^5$ olmuşdur. Şəkil 3.11-də hər iki MPPC fotodiodların VAX-nın asılılığı qurulmuşdur. VAX-dan görüldüyü kimi hər iki fotodiodda gərginliyin aşağı qiymətlərində cərəyan tədricən artmışdır. Bu hissə birbaşa olaraq deffektlər tərəfindən və ya termal yolla yaranmış yükdaşıyıcıların tətbiq edilən sahənin təsiri ilə katoda və anoda çatırılma ehtimalının artması ilə bağlı olmuşdur. Tətbiq edilən gərginliyin 30 V qiymətində həcmi yüklər oblastı bütün epitaksial təbəqəni əhatə etmişdir. Nəticədə mövcud olan qaranlıq yükdaşıyıcıların əksəriyyəti elektrodla çatmışdır, və bunun nəticəsində tam doyma müşahidə edilmişdir. Gərginliyin sorakı qiymətlərində sahə daha da yüksəlmiş və selvari proses baş vermişdir. MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodların işlək gərginlikdə qaranlıq cərəyanı 45 nA və 34 nA olmuşdur.

Şəkil 3.1.11-də MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodların VFX- göstərilmişdir. MPPC fotodiodun tutumunun ölçülməsi zamanı E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС cihazından istifadə edilmişdir. E7-20 cihazından amplitudu 20 mV olan sinusoidal siqnal tətbiq edilmişdir. Tətbiq edilən siqnalın tezliyi 1 kHz, 10 kHz və 100 kHz seçilmişdir. Gərginliyin aşağı qiymətlərində 0,5 V gərginlikdə fotodiodun tutumu 1500 pF olmuşdur buna səbəb isə həcmi yüklər eninin

çox kiçik olmasıdır. Lakin gərginlik artdıqca həcmi yüklər oblastının eni artır və nəticədə tutum azalır. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində epitaksial təbəqə tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunur və tutum azalır. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində həcmi yüklər oblastının eninin sabit qalmasına baxmayaraq, sahə artır. MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodlarına tətbiq edilən gərginlik 28 V olduqda, artıq fotodiodun tutumu 320 pF olur. Bununla yanaşı tətbiq edilən siqnalın tezliyini dəyişdikdə belə MPPC fotodiodun tezliyinin dəyişməsi müşahidə edilməmişdir. Buna səbəb isə istifadə edilən söndürücü müqavimətin p-n keçidlər əsasında yox məhz polisilisiyum əsasında hazırlanmasıdır. MPPC-S12572-015C fotodiodunda ümumi piksel sıxlığı 40000 piksel olmuşdur. Piksellər paralel qoşulduğundan hər pikselin tutumu ($C_{\text{pik}}=320 \text{ pF}/40000=0.008 \times 10^{-12} \text{ F}$) təqribən 8 fF tərtibində olmuşdur. Piksellərdə baş verən selvari prosesin söndürücü müqaviməti (R_q) 500 kOm olmuşdur. Bu zaman MPPC-S12572-015C fotodiodunun bərpa olunma müddəti $\tau=R_q \times C_{\text{pik}}= 8 \times 10^{-15} \times 5 \times 10^5=40 \times 10^{-10} \text{ san}= 4 \text{ nsan}$ olmuşdur. Bu tip fotodiodlar çox sürətli sayma imkanlarına malikdir. MPPC-S12572-015C fotodiodunun cəldiyini xarakterizə edən digər kəmiyyət isə siqnalın qalxma müddətidir. Reallıqda selvari prosesi başlatdıran yükdaşıyıcılar p-n keçidin müxtəlif dərinliklərində yaranırlar. Yaranan yükdaşıyıcılar həcmi yüklər oblastında sabit doyma sürət ilə 1 mkm məsafəni təqribən 10 psan müddətə gedirlər. Bu isə yaranan siqnalın qalxan hissəsində sürüşmələrin müşahidə edilməsinə səbəb olur. Digər tərəfdən də, aktiv sahənin müxtəlif nöqtələrində baş verən selvari proseslərdə yaranan siqnalın çıxışa çatmasında fərqli olur. Beləliklə siqnalın ön cəbhəsinin qalxma müddəti fotodiodun tutumundan, həcmi yüklər oblastının müqavimətindən, habelə yükdaşıyıcıların yaranma və diffuziya olunma müddətindən asılı olur [85]. MPPC fotodiodlarının gücləndirmə əmsalının $2 - 4 \times 10^5$ olması rekombinasiya hesabına yaranan fotonların sayının da 6 – 12 arasında dəyişməsinə səbəb olur. Bu isə piksellərdə çarpaz əlaqənin yaranmasına imkan verir. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün hər piksel tam ekranlanır. Bu halda yaranan fotonlar qonşu piksellərdə selvari prosesi başlatmır. Nəticədə bu tip fotodiodların optik çarpaz görüşməsi 2 – 5 % tərtibinə qədər azalır.



Şəkil 3.1.11 MPPC-S12572-010P fotodiodunun volt farad və volt-amper xarakteristikaları.



Şəkil 3.1.12 MSFD-3NK və 3N1P fotodiodlarının quruluşu [1, s.158; s.141, 160, c.567, s.70-73].

Tədqiq edilən digər MSFD fotodiodlar MSFD-3NK tip fotodiodlardır (şək.3.1.12). Bu tip fotodiodlarda piksellər səthdən 4 mkm dərinlikdə yerləşmişdir. MSFD-3NK fotodiodların quruluşu qalınlığı 300 mkm və diametri 200 mm olan n-tip altlıq olan n^+ -tip piksellərdən ibarətdir. Epitaksial təbəqələr daxilində sahənin bircins paylanması yüksək aşqaralmış nazik n^+ və p^+ tipli laylar vasitəsi ilə hazırlanmışdır. Əsas quruluşu altlıq üzərində qalınlığı 4 mkm və 7 mkm olan bir n və bir p-tip epitaksial təbəqələrdən və onlar arasında yerləşən diametri 7 mkm keçirilmişdir. Bu quruluşda selvari proses ikinci epitaksial lay ilə piksellər arasında baş verir. Piksellərdəki selvari prosesin sönməsini isə piksellər altında qalan həcmi yüklər oblastının müqaviməti təmin edir. Şəkil 3.1.13-də istifadə edilən MSFD-3NK, 3N1P və yeni hazırlanmış MSFD-3NM fotodiodlarının VAX-nın gərginlikdən asılılığı verilmişdir. Gərginliyin kiçik qiymətlərində qaranlıq cərəyan tədricən artmış və 35 V gərginlikdə isə artıq yaranan bütün yükdaşıyıcıların elektrodlara çatması təmin edilmişdir. Gərginliyin sonrakı qiymətləri p-n keçiddə sahənin artmasına sərf edilmişdir. Gərginliyin $\approx 88,8$ V qiymətində deşilmə hadisəsi müşahidə edilmişdir. Artıq bu gərginlikdən yuxarı olan gərginlik intervalı (89 – 90,5 V) MSFD-3NK fotodiodlar üçün işləmə gərginliyi adlandırılır. İşləmə gərginliyində fotodiodun qaranlıq cərəyanı 500 – 1000 nA intervalında olmuşdur. Analoqundan fərqli olaraq, fotodiodun qaranlıq cərəyanının yüksək olması bir sıra faktorlardan asılı ola bilər. MSFD fotodiodlarda qaranlıq cərəyanın artması həcmi yüklər oblastında termal yol ilə yeni yaradılan yükdaşıyıcılar hesabına formalaşa bilər. Bununla yanaşı, səthdə müsbət yüklənmiş və Si-SiO₂ təbəqələri arasında yaranan defektlərdə fotodiodun səth cərəyanının artmasında xüsusi rol oynayır. Lakin gərginlik artıqca həcmi qaranlıq cərəyan kəskin artır. MSFD-3NK fotodiodlarının qaranlıq cərəyanının belə böyük alınması fotodiodun sahəsindən, aktiv həcmının qalınlığından və epitaksial təbəqənin keyfiyyətindən, gücləndirmə əmsalından, vayferin keyfiyyətindən, fotodiodların istehsalı zamanı rejimin düzgün seçilməməsindən və digər baş verən çirklənmələrdən asılıdır. Yeni hazırlanmış MSFD-3NM fotodiodlarının həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunması 20 V gərginlikdə baş vermişdir. Fotodiodun deşilməsi $\approx 71,4$ V müşahidə edilmişdir. MSFD-3NM fotodiodların işləmə gərginliyi 74 - 74,8 V olmuşdur.

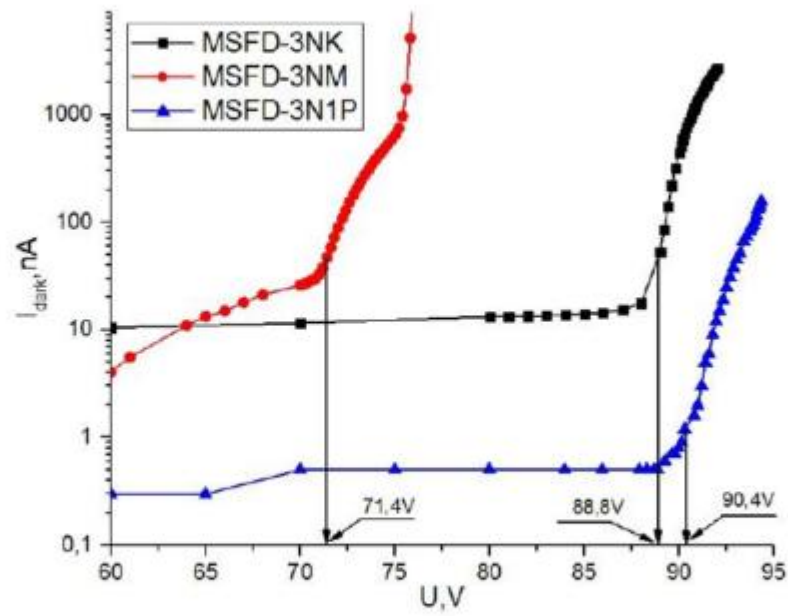
MSFD-3NK fotodiodu ilə müqayisədə MSFD-3NM fotodiodun deşilmə gərginliyi $\approx 19\%$, sabit ifrat gərginlikdə (2,6 V) qaranlıq cərəyanı $\approx 5,2$ dəfə azalmış və ifrat gərginlik oblastı ≈ 2 dəfə artmışdır. MSFD-3NM fotodiodun optimal halda gücləndirmə əmsalı 7×10^4 olmuşdur. Əlbəttə, bu tip fotodiodlarda gücləndirmə əmsalının artması MSFD fotodiodlarda çarpaz görüşmənin müşahidə edilməsinə səbəb olur. Nəzərə alsaq ki, MSFD fotodiodunun gücləndirmə əmsalı $\approx 1 \times 10^5$ tərtibindədir. Məlumdur ki, qaranlıq elektronların selvari proses zamanı 1×10^5 elektronun rekombinasiya nəticəsində enerjisi 1,14 eV böyük olan 3 fotonu buraxması müşahidə edilir [146, c.486, s.164-169, 147, c.527, s.15-20, 148, c.567, s.48-56, 149, c.4, s.1-53]. Buraxılan bu foton qonşu piksellərdə yeni selvari prosesin yaranması ehtimalını yüksəldir və nəticədə fotodiodun qaranlıq cərəyanı artır. MSFD-3NK fotodiodlarının qaranlıq cərəyanının belə yüksək olması bu fotodiodlarda otaq temperaturunda zəif işıq selinə uyğun gələn tək fotoelektronlu paylanmanı müşahidə etməyə imkan vermir. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün ən optimal hal təcrübələrin aşağı temperaturlarda aparılmasıdır. Lakin bu çatışmamazlığa baxmayaraq, bu fotodiodlar böyük foton selini qeyd etmək üçün istifadə ediləcək ən optimal qeydedici hesab edilir.

Şəkil 3.1.14-də MSFD-3NK və 3NIP fotodiodlarının VFX-sı göstərilmişdir [87, c.20, s.3-5, 88, s.1-4]. Fotodiodun tutumunun ölçülməsi zamanı E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИМПИТАНС cihazından istifadə edilmişdir. E7-20 cihazından amplitudu 40 mV olan sinusoidal siqnal tətbiq edilmişdir. Siqnalın amplitudunun belə kiçik seçilməsi ölçmə xətasının kiçildilməsi üçün edilmişdir. Sinusoidal siqnalın amplitudu MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginlikdən çox-çox kiçik olmuşdur. Tətbiq edilən siqnalın tezliyi 1 kHz, 10 kHz və 1000 kHz seçilmişdir. Gərginliyin aşağı qiymətlərində 1 V gərginlikdə MSFD-3NK və PİN fotodiodunun tutumu 950 pF və 69,5 pF olmuşdur. Bunun səbəbi isə aşağı işləmə gərginliyində fəza yüklər oblastının qalınlığının azlığı idi. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində PİN fotodiodlarının tutumunun eyni bir qanuna uyğunluqla azalması müşahidə edilmişdir. Tətbiq edilən gərginliyin 35 V qiymətində PİN fotodiodunun tutumu 17,2 pF olmuşdur. MSFD-3NK və MSFD-3NIP fotodiodlarının tutumu digər fotodiodlardan fərqli olaraq başqa qanuna uyğunluqla

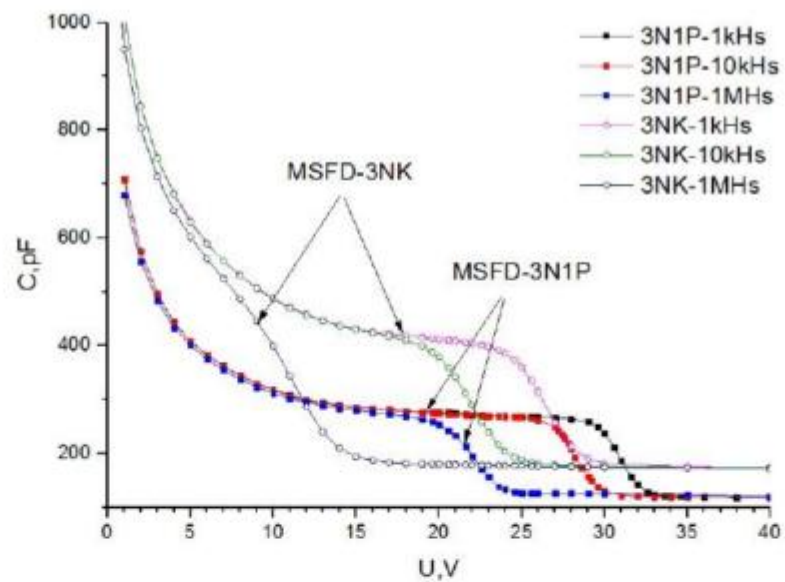
dəyişmişdir. Buna səbəb isə hər iki fotodiodun eyni tip epitaksial təbəqə əsasında olmasıdır. MSFD-3NK fotodiodlarının tutumu 15 V gərginliyə qədər analoqlarında müşahidə edilən azalmaya nisbətən zəif sürətlə azalmışdır. Bu zaman fotodiodun tutumu 424 pF olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodunun birinci epitaksial layının n-tip və ikinci epitaksial layının p-tip olduğundan həcmi yüklər oblastı bir başa olaraq mərkəzdən başlamışdır. Piksellərdə aşqar atomunun konsentrasiyasının yüksək olması və onların arası məsafənin kiçik olması aşağı gərginliklərdə həcmi yüklər oblastının birinci n-tip epitaksial təbəqəyə doğru nüfuz etməsinin qarşısını alır. Məhz ona görə də aşağı gərginlikdə təqribən 0 – 16 V qiymətində ikinci p-tip epitaksial təbəqə həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunmuş və gərginliyin sonrakı 16 V – 18 V (10 kHz) qiymətlərində doymaya oxşar hal müşahidə edilmişdir. Bu zaman həcmi yüklər oblastının eni çox az dəyişir. Başqa sözlə p-tip epitaksial təbəqə həcmi yüklər oblastı ilə tam əhatə olunduğundan gərginliyin sonrakı qiymətləri n-tip epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olmasına sərf edilir. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində (18 V – 24 V) həcmi yüklər oblastı piksellərin arasından başlayaraq həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunmağa başlayır və gərginliyin müəyyən qiymətində isə piksellər arası boşluq birinci epitaksial təbəqənin başlanğıc qalınlığında birləşir və piksellər boşluqda qalır və buna görə də tutum kəskin dəyişir. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində artıq tutum dəyişməz qalır və yalnız sahə artır. Bu halda MSFD-3NK fotodiodunun tutumu 174 pF olmuşdur. Analoji olaraq MSFD-3N1P qeydedicisinin tutum 118 pF alınmışdır. Nəzərə alsaq ki, MSFD-3N1P fotodiodunun sahəsi 9 mm² və MSFD-3NK fotodiodunun sahəsi 13,69 mm² olmuşdur. Başqa sözlə MSFD-3N1P fotodiodunun sahəsi MSFD-3NK fotodiodu ilə müqayisədə 34 % kiçikdir. Məlum olduğu kimi fotodiodun tutumu sahə ilə düzmütənasib olduğundan MSFD-3N1P fotodiodunun tutumunda MSFD-3NK ilə müqayisədə 34 % az alınmalıdır. Təcrübədən alınan nəticədən görmək olar ki, tətbiq edilən gərginliyin 35 V qiymətində MSFD-3NK və MSFD-3N1P fotodiodlarının tutumu 174 pF və 118 pF olmuşdur. Diodların tutumları fərqi də həmçinin 32 % alınmışdır. Əyriyədən göründüyü kimi 1000 Hz tezlikdə birinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunması 22 V başlamış və 32,5 V gərginlikdə isə qurtarmışdır. Epitaksial təbəqənin həcmi yüklərlə

tam əhatə olunması zamanı 10,5 V gərginlik tələb edilmişdir. Tezliyin 10 kHz qiymətində birinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklərlə əhatə olunmağa başlaması gərginliyi azalmış və 16,8 V müşahidə edilmişdir. Tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunma 28 V gərginlikdə müşahidə edilmişdir. Tətbiq edilən tezliyin yüksək qiymətlərində (1 MHz) isə n-tip epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastının daha aşağı gərginlikdə 8,5 V –də baş verməsi müşahidə edilmişdir. Tam həcmi yüklərlə əhatə olunma isə 19 V gərginlikdə müşahidə edilmişdir. Beləliklə MSFD-3NK fotodiodunun birinci epitaksial təbəqəsinin tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunması üçün təqribən 10,5 V gərginlik tələb edilmişdir. MSFD-3N1P və MSFD-3NK fotodiodlarının müqayisəsindən görmək olar ki, 3NK fotodiodlarının birinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklərlə tam təmin edilməsi üçün 10,5 V gərginlik lakin 3N1P fotodiodlarında isə bu gərginlik 7,5 V olmuşdur. Göründüyü kimi 3NK fotodiodunun birinci epitaksial təbəqə ilə əhatə edilmə gərginliyi 3N1P fotodiodu ilə müqayisədə 3 V (1 kHz) aşağı gərginlikdə baş verir.

Şəkil 3.1.15-də differensial tutumun differensial gərginliyə nisbətinin tətbiq edilən gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur. Əyrilərdən göründüyü kimi tutumun kəskin dəyişdiyi oblasta uyğun gələn hissədə pik müşahidə edilir. Pikin ön frontu tutumun kəskin dəyişməyə başladığı hissə yəni birinci n-tip epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunmağa başlamasını və piksellərlə altlıq arasındakı həcmi yüklər oblastının məhdudlaşması (aralanması) ilə bağlıdır. Pikin arxa frontu isə həcmi yüklər oblastının artıq n-tip epitaksial təbəqələri tam əhatə etdiyini göstərmişdir. Pikin maksimumu isə tutumun dəyişmə sürətinin tədricən azaldığını göstərir. MSFD-3N1P fotodiodlarında tətbiq edilən sinisoidal siqnalın tezliyinin 100 Hz qiymətində ikinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı ilə tam əhatə olunmağa başlaması 27 V gərginlikdə müşahidə edilir. Tətbiq edilən gərginliyin 31 V qiymətində isə tutumun kəskin dəyişməsi tədricən azalmış və 34,5 V isə birinci epitaksial təbəqə tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunmuşdur. Tətbiq edilən sinusoidal siqnalın 10 kHz qiymətində isə birinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı əhatə olunmağa başlaması 25 V gərginlikdə müşahidə edilmişdir. Gərginliyin 28,2 V qiymətində isə tutumun dəyişməsinin kəskinliyi azalmışdır. Tətbiq edilən sinusoidal siqnalın yüksək



Şəkil 3.1.13 MSFD-3NK, MSFD-3NM və 3N1P fotodiodlarının VAX-nın gərginlikdən asılılığı.



Şəkil 3.1.14 MSFD-3NK və MSFD-3N1P fotodiodlarının müxtəlif tezliklərdə VFX-ı.

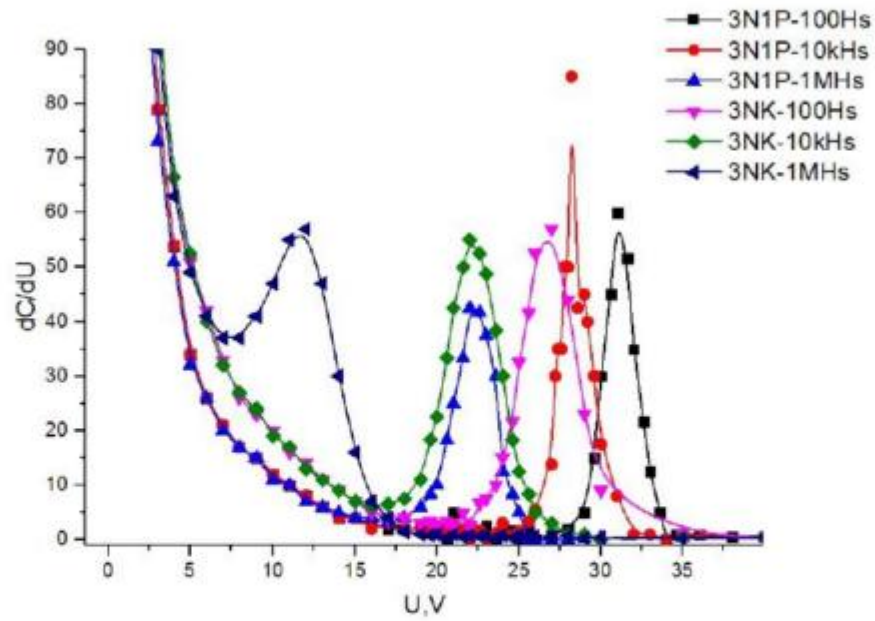
tezliyində (1 MHz) birinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı ilə əhatə edilməyə başlanması daha aşağı gərginliklərdə (~17 V) müşahidə edilmişdir. Tutumun dəyişmə sürətinin azalması isə 22,2 V qiymətindən başlayaraq azalmışdır. Diodun epitaksial təbəqəsinin tam həcmi yüklərlə əhatə olunması isə 25,6 V baş vermişdir. Gərginliyin sonrakı qiymətləri fotodiodun tutumunda ciddi dəyişiklər yaratmamışdır. Hər üç müxtəlif tezliklərdə birinci epitaksial təbəqənin tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunmasına 7,5 V gərginlik lazım olmuşdur.

Şəkil 3.1.16-da MSFD-3NK fotodiodunun tutumunun müxtəlif tezliklərdə gərginlikdən asılılığı verilmişdir. Tutum əyrisinin dəyişməsi analoji olaraq şəkil 3.1.14-də verilmiş əyri ilə eynilik təşkil etmişdir. Sinusoidal siqnalın tezliyinin 100 Hz qiymətində birinci epitaksial təbəqənin həcmi yüklər oblastı ilə tam əhatə olması təqribən 37 V gərginlikdə müşahidə edilmişdir. Tətbiq edilən gərginliyin 0–27 V qiymətlərində MSFD fotodiodun tutumu gərginlikdən asılı olaraq aşağıdakı qanuna uyğunluqla dəyişmişdir:

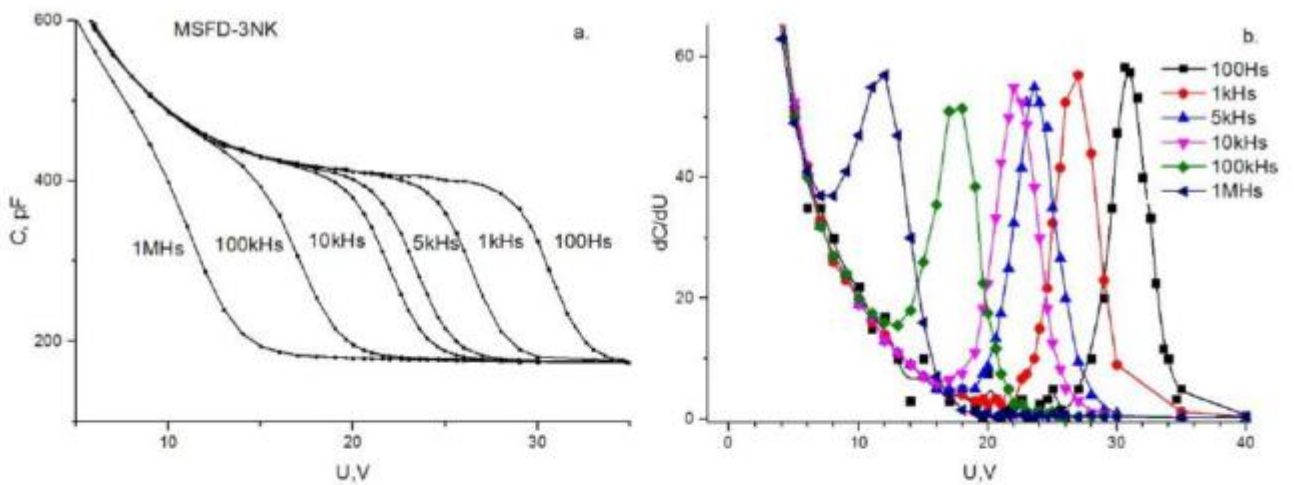
$$C = a + b \times e^{\frac{k \times U - 1}{k}} \quad (3.1.4)$$

Burada $a=1131,1 \pm 11,7$, $b=-166,5 \pm 6$, $k=-0,2$ və U - isə fotodioda tətbiq edilən gərginlik olmuşdur (şək. 3.1.17). Tezliyin bu qiymətində maksimal dəyişmə 30,7V gərginlikdə müşahidə edilmişdir. Tezliyin böyük qiymətlərində isə tutumun differensial sürətinin maksimumu aşağı gərginliklər oblastına doğru sürüşür. Məsələn tezliyin 1 kHz-də 27 V, 5 kHz-də 23,6 V, 10 kHz-də 22V, 100 kHz-də 17,45 V və tezliyin 1 MHz qiymətində isə 12 V gərginlikdə müşahidə edilir.

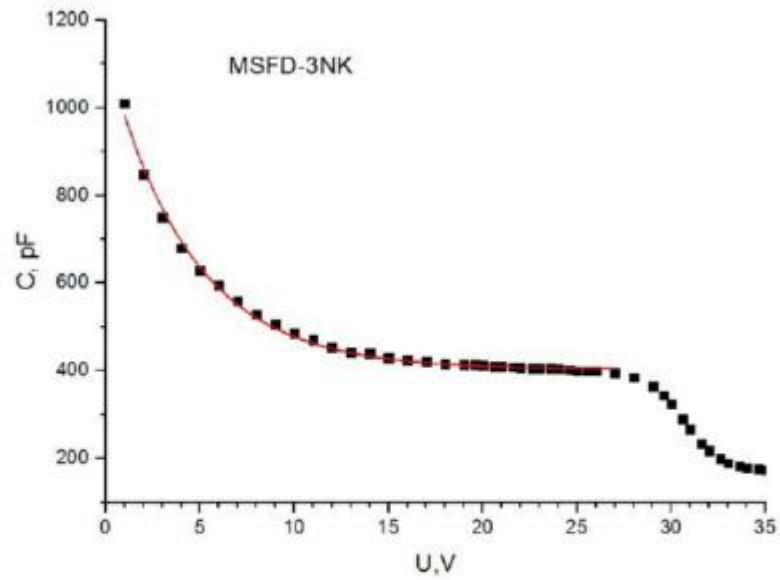
Şəkil 3.1.18-də tutumun differensial dəyişməsinin maksimum qiymətinin tezlikdən asılılığı qurulmuşdur. Göründüyü kimi 100Hz - 10 kHz tezlik intervalında tutumun maksimal dəyişməsi tezlikdən daha kəskin asılıdır. Bu zaman tutumun dəyişməsi təqribən 26 % azalmışdır. Tezliyin 10 kHz qiymətindən böyük qiymətlərdə isə tutumun dəyişməsi kəskin azalmış və doyma halına yaxınlaşmışdır. Bu tezlik intervalında tutumun dəyişməsi 45 % azalmışdır. Başqa sözlə gərginlik 22V-dən 12V



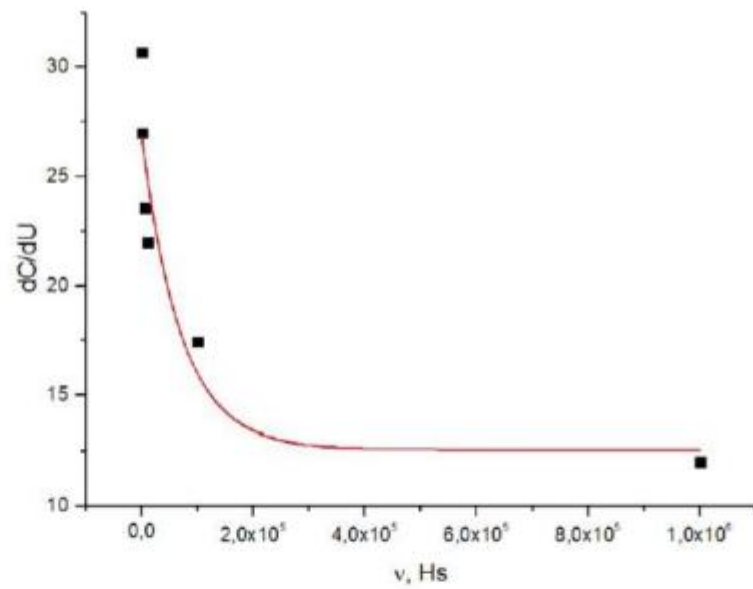
Şəkil 3.1.15 MSFD-3NK və MSFD-3N1P fotodiodlarının differensial tutumun gərginliy nisbətinin müxtəlif tezlikdə gərginlikdə asılılığı .



Şəkil 3.1.16 MSFD-3NK fotodiodunun tutumunun və differensial tutumun gərginliy nisbətinin müxtəlif tezlikdə gərginlikdən asılılığı.



Şəkil 3.1.17 MSFD-3NK fotodiodlarının tutumunun gərginlikdən asılılığı .



Şəkil 3.1.18 Tutumun differensial dəyişməsinin maksimum qiymətinin tezlikdən asılılığı

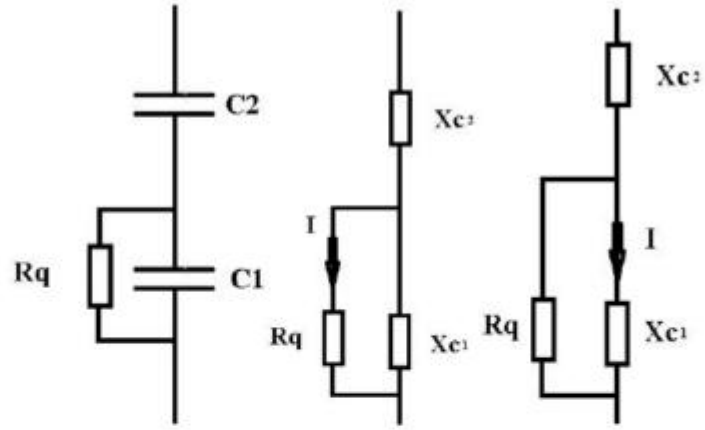
qədər düşmüşdür. Bu dəyişmə əyrisinin tənliyini müəyyən etmək üçün Origin Pro8.5 proqramından istifadə edilmişdir. Əyrinin başlanğıc və son nöqtəsi seçilmiş daha sonra fit edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki differensial tutumun dəyişməsinin maksimumu tezlikdən asılı olaraq bu qanunla dəyişir:

$$\frac{dC}{dU} = a + b \times e^{\frac{k \times v - 1}{k}} \quad (3.1.5)$$

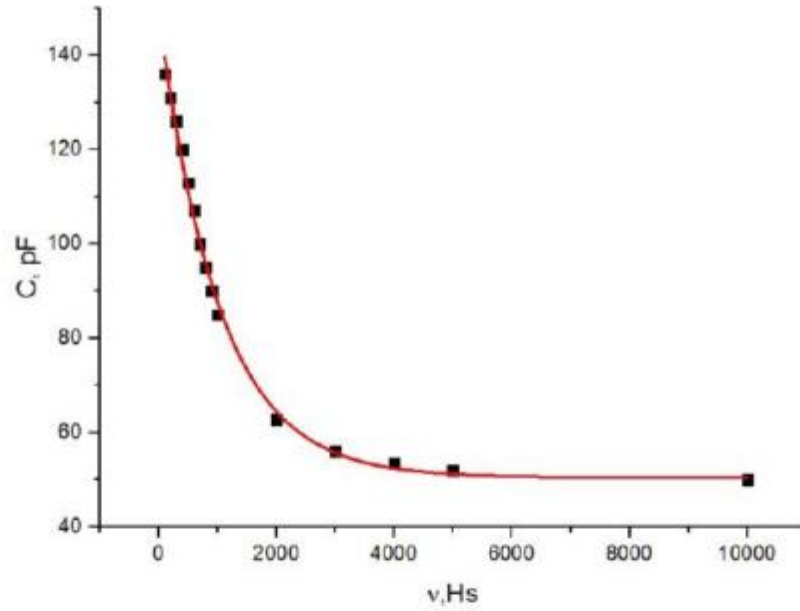
burada, v -tezlik, $a=26,8$, $b= -2 \times 10^{-4}$ və $k=-1.4 \times 10^{-5}$ simulyasiyadan tapılmış sabitdir. MSFD fotodiodların tutumunun tezlikdən asılı olaraq dəyişməsinin düzgün başa düşülməsi üçün ilk növbədə MSFD-3NK fotodiodunun strukturunun p-n keçidlərinin tutumundan və həcmi yüklər oblastının müqavimətindən axan cərəyana baxmaq lazımdır. Nəzərə alsaq strukturdakı əsas p-n keçidlər birinci epitaksiya təbəqəsi ilə piksel arasında və piksel ilə ikinci epitaksial təbəqə arasında baş verir. Bu iki p-n keçidlərə uyğun gələn C_1 və C_2 tutumlar bir-birlərinə ardıcıl qoşulmuşlar. Birinci epitaksial təbəqə ilə piksel arasındakı həcmi yüklər oblastı isə selvari prosesi söndürən R_q müqavimət rolunu oynayır. Məhz ona görə də fotodiodun ümumi tutumunu bu iki p-n keçidə uyğun gələn tutumların cəmi təşkil edir. Nəzərə alsaq ki, piksellərlə birinci epitaksial təbəqə arasındakı qalınlıq MSFD-3NK fotodiodlarında $L_1=7$ mkm və ikinci epitaksial təbəqə arasındakı qalınlıq isə $L_2=4$ mkm –dir. Piksellərinin diametrinin $d_{\text{pik}}= 7$ mkm olduğunu nəzərə alsaq onda asanlıqla bu p-n keçidlərə uyğun gələn tutumları hesablamaq olar. Piksellərin formasının təqribən dairə formasında olduğunu qəbul etsək pikselin sahəsi $S_{\text{pik}}= \pi \times r^2= \pi \times d^2/4$ alınır, burada $\pi=3,14$, r -pikselin radiusu və d -pikselin diametridir.

Piksellə fotodiodun ikinci p-tip epitaksial təbəqəsi arasında mövcud olan tutum C_2 hesablanmışdır. Hər piksellə uyğun gələn tutumun hesablanması zamanı aşağıdakı ifadəsindən istifadə edilmişdir $C_2=\epsilon_0 \times \epsilon \times S_{\text{pik}}/L_2=\epsilon_0 \times \epsilon \times \pi \times d^2/(4 \times L_2)= 8,85 \times 10^{-12} \times 11,68 \times 3,14 \times (7 \times 10^{-6})^2/(4 \times 4 \times 10^{-6})= 9,94 \times 10^{-16} \text{ F}= 0,994 \text{ fF}$. Burada $\epsilon_0= 8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, ϵ (silisium üçün-11,68)- yarımkeçiricinin dielektrik nüfuzluğu, $d(\text{m})$ -pikselin diametri və $L_2(\text{m})$ - ikinci epitaksial təbəqənin qalınlığıdır. Beləliklə piksellərlə ikinci

epitaksial təbəqəsi arasında mövcud olan tam tutum $C_{2T} = 10000 \times 3,7 \times 3,7 \times 9,94 \times 10^{-16} = 1,36 \times 10^{-10}$ F = 136×10^{-12} F = 136 pF alınmışdır. Tutum üçün alınmış bu ifadə təcrübədən tapılmış ifadədən təqribən 18 % fərqlənmişdir. Bununla yanaşı nəzərə alsaq ki, MSFD-3NK fotodiodlarında birinci n-tip epitaksial təbəqə müəyyən bir söndürücü müqavimət rolunu oynayır. Bu müqaviməti təqribən 900 kOm tərtibində olmuşdur. Beləliklə MSFD-3NK fotodiodunu şəkil 3.1.19-da göstərilən dövrə kimi təsəvvür etmək olar. C_1 və C_2 tutumları bir-birinə ardıcıl qoşulmuş, lakin söndürücü müqavimət isə C_1 tutumuna paralel qoşulmuşdur. Tutumların reaktiv müqaviməti bu ifadə ilə hesablanır: $X_c = 1/(2 \times \pi \times \nu \times C)$ burada ν -siqnalın tezliyi və C ($\Delta Q/\Delta U$)-tutumdur. Bu ifadədən göründüyü kimi siqnalın tezliyi artdıqca reaktiv müqavimət azalır. Tezliyin aşağı qiymətində 100 Hz tezliklərdə $X_{C2} = 11,5$ MOm və $X_{C1} = 20$ MOm olmuşdur. Bu zaman göründüyü kimi R_q müqaviməti dövrənin X_{C1} müqavimətinə paralel olduğundan əsas müqavimət olaraq kiçik R_q götürülür. Söndürücü müqavimət və X_{C2} müqavimətinə ardıcıl birləşdiyindən bu zaman əsas müqavimət olaraq X_{C2} olur. Bu müqavimət dövrədən axan cərəyanı tənzimliyin. Belə olduğu halda X_{C2} müqavimətinə düşən gərginlikdə artır və tutumun azalması müşahidə edilir. Tezliyin yuxarı qiymətlərində isə X_{C2} və X_{C1} müqavimətləri azalaraq dövrədən axan cərəyan artır və bu müqavimətlərə düşən gərginlik ($\Delta U = X_{C2} \times \dot{I}$) azalır və bunun nəticəsində tutumun azalması müşahidə edilir. Tezliyin 1000 Hz qiymətində artıq $X_{C2} = 1,15$ MOm və $X_{C1} = 2,0$ MOm olmuşdur. Tezliyin 2000 Hz qiymətində isə $X_{C2} = 576$ kOm və $X_{C1} = 1$ MOm olmuşdur. Bu haldə dövrədən axan cərəyanı X_{C1} ($R_q < X_{C1}$) müqaviməti tənzimliyin. Tətbiq edilən siqnalın daha yuxarı tezliklərində isə göründüyü kimi reaktiv müqavimət $X_{C1} = 680$ kOm olur və bu halda artıq ($R_q > X_{C1}$) dövrədən axan cərəyanın tənzimlənməsi R_q müqaviməti ilə tənzimlənir və bu halda reaktiv müqavimətlərə düşən gərginlik praktiki olaraq çox az dəyişir. Bunun nəticəsində tezliyin 4000 Hz-dən yuxarı qiymətlərində tutumun dəyişməsi müşahidə edilmir. Beləliklə siqnalın tezliyi artdıqca X_{C2} reaktiv müqaviməti azalır və bu oblasta düşən gərginlik azalır. Tezliyin daha kiçik qiymətlərində isə X_{C2} müqaviməti artır və bu oblastın həcmi yüklər oblastı ilə əhatə



Şəkil 3.1.19 MSFD-3NK fotodiodlarının element hissələri ilə təsviri.

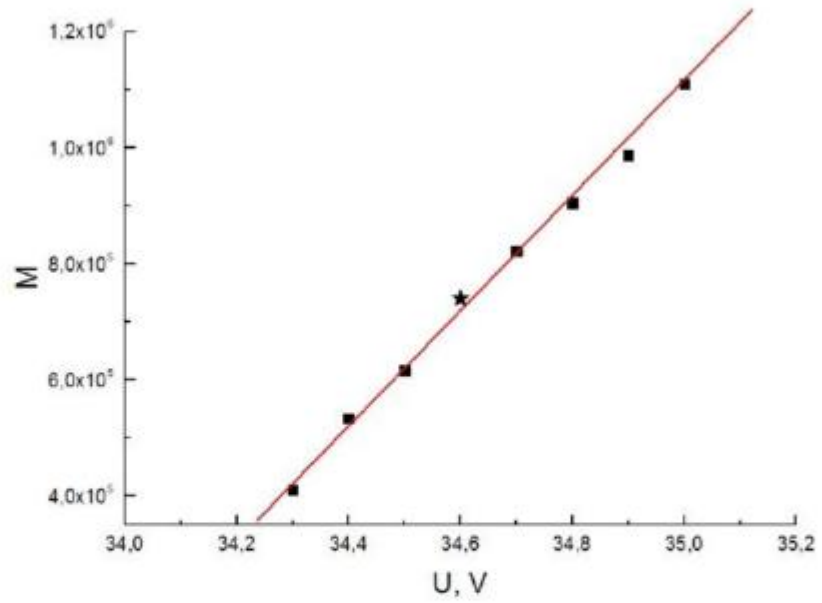


Şəkil 3.1.20 SMD elementlər əsasında MSFD-3NK fotodioduna analoq yığılmış dövrənin tutumunun tezlikdən asılılığı.

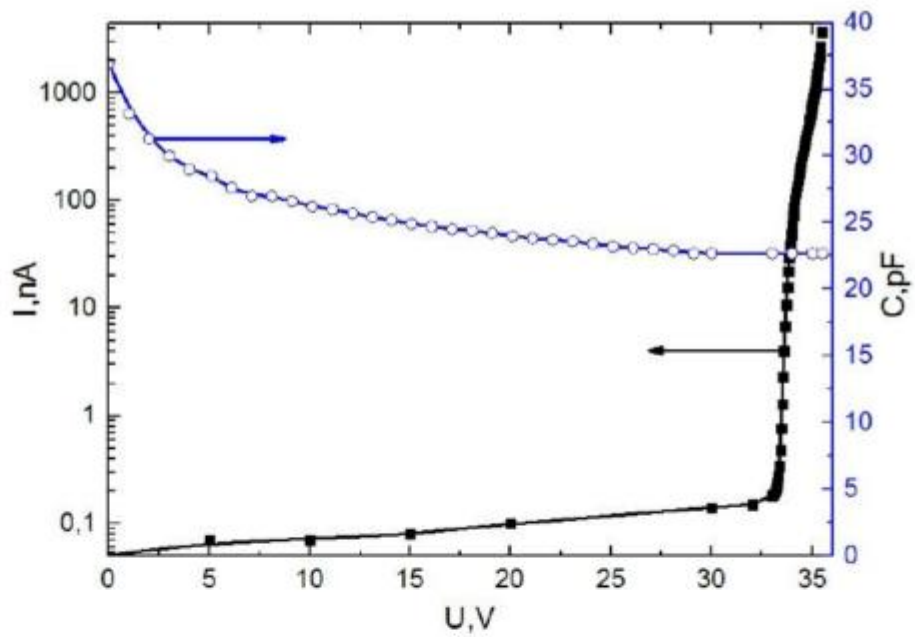
olunma gərginliyi yuxarı gərginlik oblastına sürüşür. Bunun nəticəsində 22 - 30 V gərginlik oblastında fotodiodun tutumu yuxarı və aşağı gərginlik oblastına sürüşür. Şəkil 3.1.20-də SMD işlər üçün nəzərdə tutulmuş tutumlardan və müqavimətdən istifadə edərək MSFD-3NK fotodiodunun analoq quruluşu yığılmışdır. C1 tutumu olaraq 78 pF kondensator və C2 tutumu olaraq isə 138 pF kondensator seçilmişdir. C1 kodensatoruna paralel olaraq müqaviməti 900 kOm olan rezistor qoşulmuşdur. E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС qurğusundan istifadə edərək dövrənin tam tutumunun tezlikdən asılı olaraq dəyişməsi analiz edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, dövrənin tam tutumu tezlikdən asılı olaraq eksponensial qanunlaazalır. Siqnalın tezliyinin 100 Hz-3 kHz intervalında dövrənin tutumunun kəskin dəyişməsi müşahidə edilmişdir. Lakin tezliyin yuxarı qiymətlər 4-8 kHz intervalında bu dəyişmə sürəti kəskin azalmışdır. Tezliyin 10 kHz qiymətindən sonra tezlikdən asılılıq müşahidə edilməmişdir. Dövrənin tam tutumu 138 pF-dan başlayaraq 49 pF-a qədər azalmışdır. Asılılıqdan görüldüyü kimi dövrənin tam tutumu MSFD-3NK fotodiodunun tutumunda müşahidə edilən eksponensial qanuna uyğunluqla dəyişmişdir. Bu dövrədə tutumun əsas dəyişməsinin RC1 dövrəsi hesabına olmasını yoxlamaq üçün RC1 dövrəsi tək analiz edilmişdir. Daha sonra E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС qurğusu ilə RC1 dövrəsinin tutumunun tezlikdən asılılığına baxılmışdır. Məlum olmuşdur ki RC1 dövrəsinin tutumu tezlikdən asılı olaraq 2,7 %-ə qədər azalmışdır. İkinci C2 tutumunun tezlikdən asılı olaraq dəyişməsi isə müşahidə edilməmişdir. Başqa sözlə C2 və RC1 dövrəsindən ibarət dövrənin tutumunun tezlikdən asılı olaraq dəyişməsi yalnız RC1 dövrəsi hesabına yox birbaşa olaraq ümumi tutum hesabına baş vermişdir. Alınmış əyridən görüldüyü kimi ekvivalent dövrənin tezliyi 100 Hz – 1 MHz qiymətində tutumun dəyişməsi 138/49 nisbətində və real MSFD fotodiodlarında isə bu nisbət daha az olmuşdur. Analoji olaraq görmək olar ki tezliyin 4 kHz qiymətindən böyük qiymətlərində dövrənin tutumunun dəyişməsi səngimiş və doymaya yaxınlaşmışdır.

Təcrübələrdə istifadə edilən Zekotek firmasının istehsalı olan MSFD-3D fotodiodlarında parametrləridə tədqiq edilmişdir. Şəkil 3.1.21-də MSFD-3D fotodiodlarının gücləndirmə əmsallarının gərginlikdən asılılıqları göstərilmişdir. Şəkil

3.1.22-də MSFD-3D fotodiodunun volt-farad (VFX) və volt-ampere xarakteristikaları (VAX) verilmişdir. Volt-farad asılılığından görüldüyü kimi, MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginlik artdıqca fotodiodun tutumu azalmağa başlayır. Tətbiq edilən gərginliyin 27 V qiymətində MSFD-3D fotodiodunun p-n keçidi tam fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunmuş və diodun tutumu 22 pF olmuşdur. Gərginliyin sonrakı qiyməti isə fəza yüklər oblastındakı sahənin artmasına səbəb olur və selvari proseslər baş verir. MSFD fotodiodlarının VAX-ı digər PİN və SFD fotodiodlardan fərqli olaraq daha geniş gərginlik oblastını əhatə edir və özündə həmçinin PİN və SFD diodların işləmə oblastını tam əhatə edir. Buna misal olaraq şəkil 3.1.21-də MSFD-3D fotodiodlarının volt-ampere xarakteristikası göstərilmişdir. Asılılıqdan görüldüyü kimi, gərginliyin ilkin başlanğıc qiymətlərində (1 – 16 V) MSFD-3D fotodiodlarının aktiv həcmi fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunmağa başlayır və qaranlıq elektronların bəzi hissələri rekombinasiya olmadan dövrədən axır və nəticədə MSFD-dən axan qaranlıq cərəyan artır. MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginlik artdıqca (20 – 27 V) fotodiodun aktiv həcmi tam fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunmağa başlayır və nəticədə həcmdə yaranan qaranlıq elektronların əksəriyyəti elektroda çata bilir. Bunun nəticəsində MSFD-nin qaranlıq cərəyanı artır. Lakin gərginliyin sonrakı böyük qiymətlərində qaranlıq cərəyan artmır və doyma halı müşahidə edilir. Bu hal həcmi yüklər oblastının artıq fəza yükləri oblastı ilə əhatə olunmasının göstəricisidir. Bu PİN fotodiodların işləmə rejiminə uyğun gəlir və bu halda gücləndirmə baş vermir. MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginliyin sonrakı qiymətləri fəza yüklər oblastındakı elektrik sahəsinin artmasına sərf olunur. Gərginliyin müəyyən qiymətində qaranlıq cərəyanın çox zəif artması müşahidə edilir. Gərginliyin 34 V qiymətində artıq qaranlıq elektronlar sərbəst qaçış yolunda kifayət qədər enerji əldə edərək yeni elektron deşik cütü yarada bilirlər və proses bu ardıcılıqla davam edir. Bu zaman artıq selvari proses başlayır. Bu hal SFD-lərin işlədiyi oblasta uyğun gəlir. Lakin MSFD fotodiodlar SFD-lərdən fərqli olaraq birneçə voltlarla daha yüksək gərginlikdə işləyirlər. Bu zaman əsas p-n keçiddəki elektrik sahəsinin qiyməti $E_m \sim 3 \times 10^5 \text{ V/sm}$ –dan böyük olur və zərbə ilə ionizasiya hadisələri baş verir. Deşilmə gərginliyindən yuxarı gərginlik oblastında işləyən bu fotodiodlar artıq qaz



Şəkil 3.1.21 MSFD-3D fotodiodunun gücləndirmə əmsalının gərginlikdən asılılığı [38, s.383-385]



Şəkil 3.1.22 MSFD-3D fotodiodunun qaranlıq cərəyanının və tutumunun gərginlikdən asılılığı [38, s.383-385].

sayğaclarındaki kimi Heyger oblastında işləyirlər. Heyger oblastında MSFD-3D fotodiodlarının qaranlıq cərəyanı 150 nA olmuşdur. MSFD fotodiodların VAX-sının dəyişməsi bütün fotodiodlar üçün eyni qanuna uyğunluqla dəyişmişdir [38, s.383-385]. İstifadə edilən fotodiodlardan yalnız MSFD-3NK fotodiodların qaranlıq cərəyanı (800 nA) analoqlarına nisbətən dəfələrlə yüksək olmuşdur. Beləliklə təcrübələrdə istifadə edilən MSFD fotodiodların VAX və VFX geniş öyrənilmiş onların tutumları, qaranlıq cərəyanları və digər parametrləri müəyyən edilmişdir.

3.2. MSFD fotodiodların kvant effektivliklərinin və xəttiliyinin təyini

MSFD fotodiodların kvant effektivliyini təyin edərkən MS3504i monoxramatorundan istifadə edilmişdir. MS3504i monoxramatoru vasitəsi ilə 350 nm-1400 nm dalğa uzunluqlu işıq seli istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodan axan fotocərəyanın ölçülməsi Keithley-4867 ampermetr vasitəsi ilə yerinə yetirilmişdir. MSFD fotodiodlarına tətbiq edilən gərginlik 40 V-dan böyük olmamışdır. Gərginliyin bu qiymətinin seçilməsi gücləndirmə əmsalının vahiddən böyük olmamasını təmin etmək üçün edilmişdir. Bu halda yaranan elektron-deşik cütlərinin sayı güclənməyə məruz qalmır. Fotonlar ikili xassələrinə görə silisium daxilində özlərini həm zərrəcik həm də dalğa kimi göstərir. Məhz buna görə fotonların silisium ilə qarşılıqlı təsirini analiz edərkən onların dalğa və zərrəcik xassələrini nəzərə almaq lazımdır. Fotonlara elektromaqnit dalğaları kimi baxıldıqda, onlar enerjilərlə xarakterizə edilir. Fotonun enerjisi belə ifadə edilir [180, s.789; s.32]:

$$E_f = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (3.2.1)$$

Burada h-Plank sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$ Cs), c-ıçıq sürəti ($\sim 3 \times 10^8$ m/san) və λ -fotonun dalğa uzunluğudur. Əgər fotonun enerjisini eV-lə ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$) və dalğa uzunluğunu nm ifadə etsək onda (3.6) ifadəsi belə ifadə edilir:

$$E_f(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \quad (3.2.2)$$

Burada λ (nm)-düşən fotonun nanometrlə dalğa uzunluğudur. Silisium üzərinə düşən fotonun enerjisi 1,14 eV enerjindən kiçik olarsa, bu zaman onlar silisiumda udulurlar və bu material onlar üçün şəffaf hesab edilir. Buna səbəb isə fotonun enerjisinin qadağan olunmuş zonasının enindən kiçik olmasıdır. Beləliklə 1,14 eV enerjiyə uyğun gələn dalğa uzunluğunu (3.2.1) formuluna görə hesablasaq 1087 nm alarıq. Məhz bu dalğa uzunluğundan yuxarı oblasda silisiumun həssaslığı kəskin azalır. Fotodiod üzərinə düşən foton selinin azalması Beer-Lambert qanuna görə dəyişir və eyni sayda elektron deşik yaradır. $I(\lambda, x) = I(\lambda)_{\text{photon}} \times \exp(-\alpha(\lambda) \times x)$ burada I_{photon} - dalğa uzunluğu λ olan işıq seli və α -detektorda verilmiş x dərinliyində udulma əmsalidir. Udulan işıq selindən asılı olaraq fotodiodlarda fotocərəyan dəyişir. Əksər hallarda fotodiodlarda səthdə yerləşən omik kontaktlar üçün istifadə edilən və həcmi yüklər oblastı ilə əhatə edilməyən nazik təbəqələr fotodiodların həssaslıqlarına ciddi təsir göstərir. Fotodiod üzərinə düşən qısa dalğa uzunluqlu fotonlar məhz bu oblastda udulurlar. Bu oblastlar həcmi yüklər oblastı ilə əhatə edilmədiyindən yaranan elektron və deşiklərin rekombinasiya olunma ehtimalları yüksək olurlar və nəticədə, fotosiqnalın amplitudu azalır. Ona görə də fotodiodun səthində yerləşən və omik kontakt üçün istifadə edilən təbəqənin qalınlığını 100 nm tərtibində seçirlər. Lakin uzun dalğaların qeyd edilməsi zamanı bu təbəqə ciddi rol oynamır. Enerjisi 1,14 eV enerjindən böyük olan fotonların silisium daxilində qarşılıqlı təsirə girmə ehtimalı onun enerjisindən asılı olaraq fərqli olur. Fotodiodların həssaslığı kvant effektivliyi ilə xarakterizə edilir. Kvant effektivliyi fotoqeydedicidə əmələ gələn fotoelektronların sayının düşən fotonların sayına nisbəti kimi qəbul edilir. MSFD fotodiodların kvant effektivliyinin hesablanması zamanı aşağıdakı ifadədən istifadə edilmişdir [180, s.789; s. 411]:

$$QE(\lambda) = \frac{1240 \times R}{\lambda(\text{nm})} \quad (3.2.3)$$

Burada $R=F/\dot{I}_{\text{foto}}$ - vahid işıq gücündə (F -düşən işığın gücü) ölçülən foto cərəyan və λ -düşən işığın dalğa uzunluğudur. Qeydedicilərin QE-si müəyyən edilərkən Hamamatsunun etalon S1223-01 PIN fotodiodundan istifadə edilmişdir [85]. Işıq mənbəsindən buraxılan işıq seli (F) bütün ölçmələrdə sabit qalmışdır. Diodların fotocərəyanı isə dalğa uzunluğundan asılı olaraq fərqli qiymətlər almışdır. PIN fotodiodun QE-si 350 nm-1100 nm dalğa uzunluğunda məlum olduğundan aşağıdakı ifadədən istifadə edərək MSFD fotodiodların QE-si hesablanmışdır.

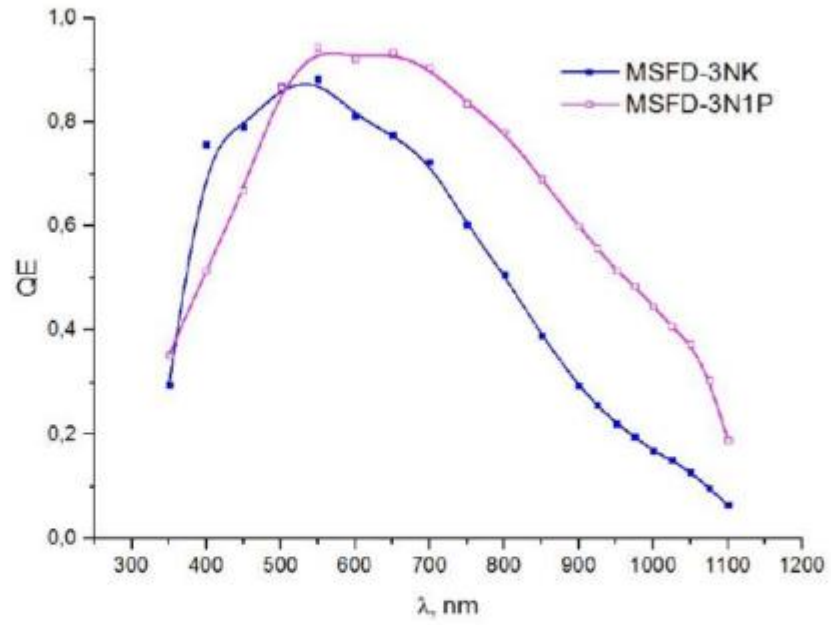
$$QE_{\text{MSFD}} = \frac{\dot{I}_{\text{MSFD}} \times QE_{\text{etalon}}}{\dot{I}_{\text{etalon}}} \quad (3.2.4)$$

Burada QE_{MSFD} - MSFD fotodiodun tapılacaq QE-si, \dot{I}_{MSFD} - fotonla işıqlanma anında MSFD fotodiodun ölçülən foto cərəyanı, QE_{etalon} - etalon fotodiodun QE-si və \dot{I}_{etalon} - fotonla işıqlanma anında etalon fotodioddan axan foto cərəyandır [6, c.5, s. 5-16]. MS3504i tip monoxramatordan MSFD fotodiodların üzərinə düşən fotonların selini tapmaq üçün aşağıdakı formoldan istifadə edilmişdir: $F(\text{V/mm}^2) = \dot{I}_{\text{foto}}(\text{A}) / (S_{\text{diod}}(\text{mm}^2) \times R(\text{A/V}))$ burada $\dot{I}_{\text{foto}}(\text{A})$ - verilmiş dalğa uzunluğunda fotodioddan axan fotocərəyan, S_{diod} -fotodiodun işıqlanan hissəsinin sahəsi və $R(\text{A/V})$ -fotodiodun həssaslığıdır. Monoxramatordan buraxılan 500 nm dalğa uzunluğunda etalon fotodiodun foto cərəyanı 1051×10^{-9} A olmuşdur. Bizim halda fotodiodun işıqlanan hissəsinin sahəsi kalimatora görə $7,065 \text{ mm}^2$ olmuşdur. Etalon fotodiodun 500 nm dalğa uzunluğu üçün, pasport məlumatlarına əsasən, həssaslığının $0,3 \text{ A/Vat}$ olduğunu nəzərə alsaq, düşən işıq selinin $4,96 \times 10^{-7} \text{ Vat/mm}^2$ olduğu müəyyən olar. Düşən fotonların sayını hesablamaq üçün bu ifadədən istifadə edilmişdir: $N_{\text{fot}}(\text{san}^{-1}, \text{mm}^{-2}) = \lambda F(\text{Vat/mm}^2) / (h \times c)$. Etalon fotoqeydedicinin səthinə düşən fotonların sayının $1 \times 10^{12} \text{ san}^{-1} \text{mm}^{-2}$ olduğu müəyyən edilmişdir. Şəkil 3.2.1-də pikselləri dərinlikdə yerləşən MSFD-3N1P və MSFD-3NK fotodiodların foto həssaslığının dalğa uzunluğundan asılılığı verilmişdir. MSFD fotodiodun səthinə düşən fotonlar fotoeffekt nəticəsində udularaq elektron-deşik cütləri yaradırlar. Yaranan elektron-deşik həcmi yüklər oblastında mövcud olan elektrik sahəsinin təsiri ilə elektrodlara

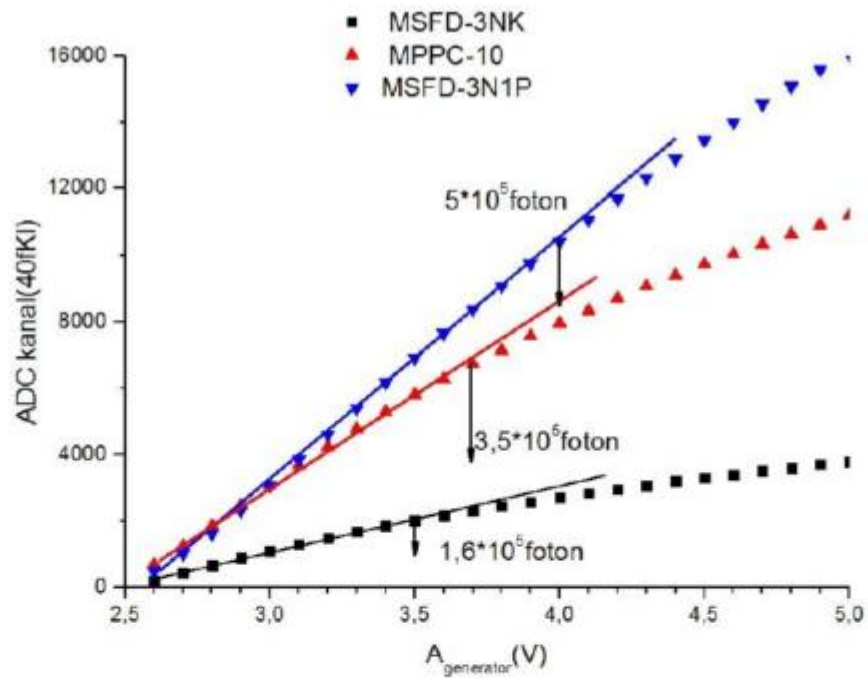
yönəldirilir. Beləliklə fotonlar fotodiodlar vasitəsi ilə elektrik siqnallarına çevrilirlər. Reallıqda MSFD fotodiod üzərinə düşən fotonların hamısı qeyd edilmir. Düşən foton selinin MSFD fotodiodlarda udulma dərinliyi dalğa uzunluğu artdıqca dəyişir. Qısa dalğalar səth yaxınlığında, uzun dalğalar isə daha dərinliklərdə udulur. Düşən foton selinin 370 – 500 nm dalğa uzunluğu intervalında MSFD-3NK fotodiodu MSFD-3N1P fotoqeydedicisi ilə müqayisədə həssaslığı 10 – 47 % yüksəkdir. Belə kəskin fərq MSFD-3NK fotoqeydedicilərin səthində yeni anti-əks etdirən Si_3N_4 layının tətbiqi hesabına olmuşdur. Si_3N_4 layının qalınlığı seçilərkən maksimum udulmanın 450 nm olmasına xüsusi diqqət verilmişdir. MSFD-3N1P fotoqeydedicisi 3NK fotodiodundan fərqli olaraq 650 nm – 1100 nm dalğa uzunluğu oblastında həssaslığı artmışdır. MSFD-3N1P fotodiodlarının 900 nm dalğa uzunluğundakı kvant effektivliyi MSFD-3NK fotodiodu ilə müqayisədə 2 dəfə artmışdır. Foto həssaslığın dalğa uzunluğunun bu oblastında artması birbaşa olaraq MSFD-3N1P fotodiodun ikinci epitaksial təbəqəsinin MSFD-3NK fotodiodunda mövcud olan epitaksial təbəqəsindən təqribən 42 % böyük olması ilə bağlıdır. Dalğa uzunluğunun məhz bu hissəsinin silisium daxilində daha dərinə nüfuz etməsi ilə bağlıdır. Şəkil 3.23-dən görüldüyü kimi, artıq MSFD-3N1P fotodiodunun həssaslığı 750 nm – 1100 nm intervalında kəskin azalır. Lakin etalon hesab edilən PİN fotodiodda isə bu oblasta həssaslıq artır. Buna səbəb isə PİN fotodiodların həcmi yüklər oblastının eninin 300 mkm olmasıdır. Bu halda fotodiod üzərinə düşən bu fotonlar həcmi yüklər oblastının müəyyən dərinliklərində udulur və fotocərəyanın yaranmasını təmin edir.

Selvari fotodiodları xarakterizə edən əsas kəmiyyətlərdən biri də onların xəttiliyidir. MSFD fotodiodların xəttiliyi birbaşa olaraq fotodiodda yerləşən tam pikselərin sayı ilə müəyyən edilir. Piksellərin sayı artdıqca fotodiodun xəttilik oblastı da artır. MSFD-3NK, MSF-3N1P fotodiodlarının xəttiliyini yoxlamaq üçün Hamamatsu firmasının 2016-cı il istehsalı olan, toplam piksel sayı 90000 olan MPPC-S12572-010P fotodiodundan istifadə edilmişdir [53, s.357-362, 85]. Fotodiodların xəttiliyini müəyyən edərkən göy işıq saçan ($\lambda \sim 450$ nm) işıqlandırıcıdan istifadə edilmişdir. İşıqlandırıcını xüsusi optik toplayıcıda yerləşdirərək diametrinin 0,5 mm alınması təmin edilmişdir. Ölçmə işləri aparılarkən

fotodiodla işıqlandırıcı arasında məsafə fiksasiya edilmişdir. LED fotodiodunun xəttiliyinin yoxlanması üçün PİN fotodiodundan istifadə edilmişdir. PİN fotodioda 40 V gərginlik tətbiq edilmişdir. Hər ölçmədə işıq dəstəsinin fotodiodun tam mərkəzinə düşməsi təmin edilmişdir. İşıqlandırıcıyı qidalandırmaq üçün generatordan tezliyi 1 kHz, davam etmə müddəti 30 nsan və amplitudu 2,6 – 8 V intervalında dəyişən düzbucaqlı siqnallar verilmişdir. LED işıqlandırıcının verdiyi foton sayının amplituddan asılılığı müəyyən edilmişdir. LED işıqlandırıcı dioda verilən amplitudun 3 – 4 V intervalındakı qiymətində xəttilik tam müşahidə edilməmişdir. LED-də tətbiq edilən siqnalın 4,5 – 7,5 V qiymətində isə xəttilik müşahidə edilmişdir və hər impulsda qeyd edilən fotonların sayı $1,6 \times 10^3 - 4 \times 10^6$ intervalında dəyişmişdir. Ölçmələr zamanı temperaturun dəyişməsi 18,5 °C – 20,5 °C arasında olmuşdur. Fotodiodlardan siqnalın oxunmasını təmin etmək üçün CAEN-5720 ARÇ-sindən istifadə edilmişdir. Siqnalların analizində CAEN-nin DPP proqram təminatından istifadə edilmişdir. Bu zaman DPP proqram təminatında qeyd edilən uzunluq 1 mksan, inteqrallanma intervalı isə 400 nsan seçilmişdir. Spektrin hər kanalı 40 fKl uyğun gəlmişdir. Astana amplitudu olaraq 5 mV verilmişdir. Foto siqnal inteqrallama edilmişdir. MSFD-3N1P fotodiodlarında xəttilik 2,6 – 3,7 V gərginlik intervalında olmuşdur (Şək.3.2.2). LED-də tətbiq olunan siqnalın amplitudun yüksək qiymətlərində xəttiliyin yavaş-yavaş pozulması müəyyən olunmuşdur [6, c.5, s. 5-16]. MPPC-S12572-010P fotodiodlarında xəttilik 2,6 – 4,2 V intervalında müşahidə edilir. Amplitudun sonrakı daha böyük qiymətlərində isə fotodiodda doyma müşahidə edilir. Hər üç fotodiodun xətti hissəsi selvari prosesi başlatdıran fotoelektronların sayının işıqlandırılan hissədəki piksellərin sayından kiçik olduğu hala uyğun gəlir. Bu halda selvari prosesi başlatdıran hər fotoelektron tam gücləndirilir. İşıqlandırıcıya tətbiq edilən impulsun amplitudu artdıqca fotoelektronların sayı artır və bir pikseldəki selvari prosesdə artıq iki, və ya çox sayda fotoelektron iştirak edir. Nəticədə fotoelektronların sayı tam qeyd edilmir. Bu isə öz növbəsində, fotosiqnalın amplitudunun azalmasına səbəb olur. Alınan nəticələrdən görmək olar ki, MPPC-S12572-010P fotodiodlarının xəttiliyi 4,2 V amplituda qədər davam edir. Lakin realıqda MPPC-S12572-010P fotodiodlarının qeyd etdiyi fotonların sayı MSFD



Şəkil 3.2.1 MSFD tipli fotodiodların kvant effektivliyinin dalğa uzunluğundan asılılığı.



Şəkil 3.2.2 MSFD-3NK, MSFD-3N1P, MPPC-S12572-010, MPPC-S12572-0115C fotodiodları ilə qeyd edilən siqnalın amplitudunun foton selindən asılılığı.

fotodiodlarla müqayisədə 55 % azdır. Buna səbəb isə MPPC-S12572-010P fotodiodlarının həndəsi faktorunun 44 % və FQE-sinin isə maksimal olaraq 10 % olmasıdır. Başqa sözlə, düşən fotonların 56 %-i birləşdirici kontaktlar tərəfindən tutulur, və təticiədə, aktiv səth vasitəsi ilə yekun fotonların yalnız 44 %-i qeyd edilir. Reallıqda MSFD-3NK və MSFD-3N1P həndəsi faktoru 100 % və FQE-si isə 30 – 40 % [53, s.357-362, 85] dəyişir. Bu səbəbdən də MSFD fotodiodlarının qeyd etdiyi fotoelektronların sayıda 55 % MPPC-S12572-010P fotodiodundan daha çoxdur. Bu fərqi nəzərə alsaq MSFD fotodiodların xəttilyi MPPC-S12572-010P ilə müqayisədə 5 V-a qədər davam etməlidir. Qeyd etmək lazımdır ki, aparılan təcrübə zamanı gecikən impulsar və çarpaz görüşmə nəzərə alınmamışdır.

3.3. MSFD-3NK və MPPC-S12572-010 fotodiodlarının aşağı temperaturlarda tətqiqi

Aşağı temperatur təcrübələri yüksək enerjilər fizikasında qaranlıq kütlənin birbaşa qeyd edilməsində xüsusi əhəmiyyətə malikdir. Buna misal olaraq təsirsiz məsələn maye qazlardan (arqon, ksenon) təşkil olunmuş mühitdə zəif qarşılıqlı təsirə malik massiv zərrəciklərin nüvələrlə elastik toqquşduqda ssintilyasiya fotonları buraxılır [51, c.35, s.15-19]. Belə aşağı temperaturda bu ssintilyasiya fotonlarını FEG-lər vasitəsi ilə qeyd etmək praktiki olaraq mümkün olmur. Bununla yanaşı FEG-lərin ölçüsünün böyük olması və onun materialının təbii radioaktiv çirklənmiş olmasına səbəb olur. Məhz bu səbəbdəndə FEG-nin qara kütlənin aşkar edilməsində tətbiqi arzu olunmazdır. Belə aşağı temperaturlarda işləyən foto qeydedicilərin təbii radioaktiv çirklənmiş olmaması, yüksək foton qeydetmə effektivliyinə malik olması və aşağı temeperaturlarda işləməsi tələb edilir. Bu şərtləri ödəyə biləcək ən optimal fotoqeydedicilər olaraq Heyger rejimli selvari fotodiodlar hesab edilir [51, c.35, s.15-19]. İşdə MAPD kolaborasiyası çərçivəsində hazırlanmış MSFD-3NK və Yaponiyanın Hamamatsu firmasının istehsalı olan MPPC-S12572-010P fotodiodları aşağı temperaturlarda tətqiq edilmişdir. Aparılan təcrübələr Rusiyanın Birləşmiş Nüvə Tətqiqatları İnstitutunda həyata keçirilmişdir. İstifadə edilən fotodiodların

piksel sıxlıqları 10000 - 15000 piksel/mm² olmuşdur. Aşağı temperaturların tədqiqi zamanı maye azotdan istifadə edilmişdir. Təcrübi dövrə gücləndiricilərdən və temperaturu təyin etməyə imkan verən rezistordan ibarət olmuşdur. Gücləndiricilərdən gücləndirməsi 50 olan aşağı temperaturda fotodiodla bir yerləşdirilmişdir. MSFD fotodiodların xassələri tədqiq edilərkən fotodiodun üzərinə işığın ötürülməsi üçün 1 mm diametrlı optik kabeldən istifadə edilmişdir. Bu yolla LED diodunun xassələrinə temperaturun təsiri aradan qaldırılmışdır. Bununla yanaşı aşağı temperaturlarda diodun səthində maye qabarcıqlarının yaranmaması üçün silkogeldən istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodların aşağıdakı parametrləri tədqiq edilmişdir: deşilmə gərginliyinin, QRS-nin və birinci fotoelektronun pikinə uyğun gələn amplitud ayırdetməsinin temperaturdan asılılığı. Deşilmə gərginliyi və zəif foton selinin qeydedilməsi təyin edilərkən şəkil 2.1.1-də təsvir edilmiş dövrdən istifadə edilmişdir. Bu ölçmələr zamanı impuls generatorundan, CAEN RSC-dən və gücləndiricilərdən istifadə edilmişdir. İstifadə edilən gücləndiricilərin gücləndirmə əmsalı G1-50 və G2-38 olmuşdur. Sıqnalın ümumi gücləndirməsi 1900 olmuşdur. Spektrlər çəkilən zaman CAEN-ni generatorun sinxron çıxışına birləşdirilmişdir [51, c.35, s.15-19]. Spektir çəkilən zaman inteqrallanma sərhəddi mümkün qədər minimum seçilmiş və bu şərt hər temperaturda yoxlanılmışdır. İlk olaraq aşağı temperaturda istifadə edilən gücləndiricinin parametrlərinin temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, istifadə edilən gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı təqribən $G = 504 + 1,28 \times T$ qanunu ilə dəyişmişdir. Temperatur -100 °C olduqda gücləndirmə əmsalının azalması 23 %-dən çox olmuşdur. Məhz bu dəyişmələr ölçmələr zamanı nəzərə alınmışdır. Selvari fotodiodların gücləndirmə əmsalının temperaturdan asılılığını təyin edərkən 450 nm dalğa uzunluqlu işıqlandırıcı istifadə edilmiş və ona generatordan tezliyi 1 kHz, davam etmə müddəti 30 nsan və amplitudu 3,34 V olan –qütüblü impulslar tətbiq edilmişdir. Bu zaman MSFD fotodiodların səthinə düşən fotonların sayı birneçə foton olmuşdur. Bu zaman MSFD-3NK fotodiodunun FQE-si analoqundan 5 dəfə yüksək olmuşdur.

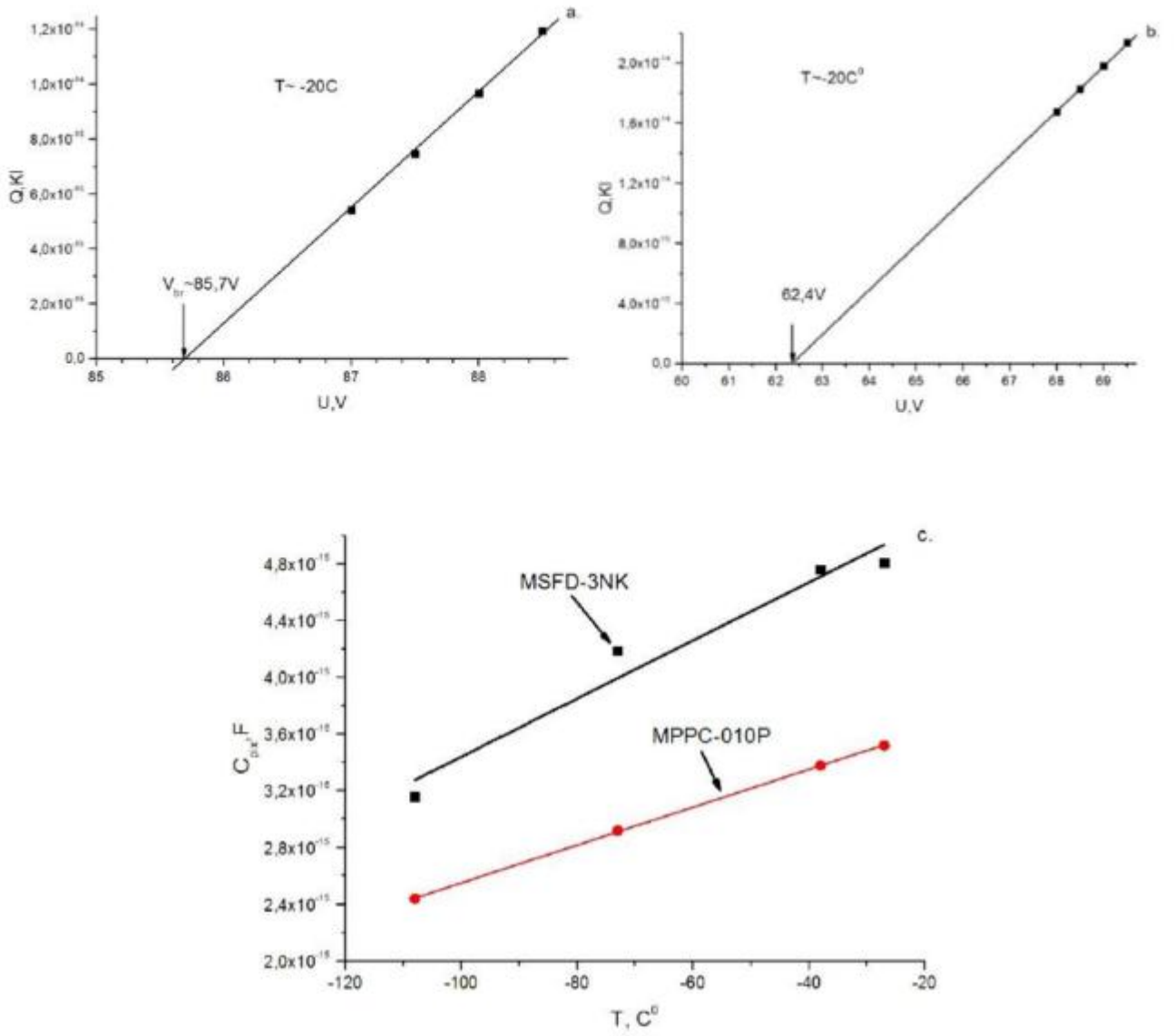
Şəkil 3.3.1 (a) -da MSFD-3NK fotodiodunun -20 °C temperaturda birinci fotoelektrona uyğun gələn yükün gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur [51,c.35,s.15-19].

Təqribən hər temperaturda deşilmə gərginliyindən 2 V yuxarı gərginliyə qədər gərginlik tətbiq edilmişdir. Deşilmə gərginliyi olaraq Q-V asılılığına uyğun gələn xəttin Q=0 olduqda gərginlik xəttini kəsdiyi nöqtə seçilir. Şəkil 3.3.1-dən görüldüyü kimi -20 °C -də MSFD-3NK fotodiodlarının deşilmə gərginliyi 85,7 V olmuşdur. Tətbiq edilən gərginlik intervalında MSFD-3NK fotodiodunun gücləndirmə əmsalı $3,3-7,4 \times 10^4$ arasında dəyişmişdir. Hər pikselin tutumunu hesablamaq üçün dQ/dU nisbəti hesablanmış və hər pikselin tutumu üçün $C_{\text{pik}} \sim 4,8 \times 10^{-15} \text{ F} = 4,8 \text{ fF}$ alınmışdır (şəkil 3.3.1(b)). MPPC-S12572-010P nümunəsinin E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС qurğusu ilə təyin edilmiş tutum 296 pF olmuşdur. Tək fotoelektronlu piklərin paylanmasıdan tapılan tutum toplam piksellərin sayına vursaq fotodiodun tutumu üçün $C_d \sim 90000 \times 3,07 \text{ fF} \sim 276 \text{ pF}$ alınır. Bu qiymət E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС qurğusu ilə tapılan qiymətdən təqribən 6,7 % fərqlənir [51, c.35, s.15-19, 134, c.912, s.320-322]. Daha sonra hər -38 °C, -73 °C və -108 °C piksellərə uyğun gələn tutumun orta qiymətinin dəyişməsinə baxılmışdır. Məlum olmuşdur ki MSFD-3NK fotodiodunun piksellərinin tutumunun orta qiyməti temperatur azaldıqca xətti azalır (şəkil 3.3.1(c)):

$$C_{\text{pik}} = 5,489 \times 10^{-15} + 2,048 \times 10^{-17} \times T \quad (3.3.1)$$

Burada T-mühitin temperaturudur (°C). Ümumi temperatur dəyişməsi -80 °C olduqda belə tutumun dəyişməsi 34 %-dan çox olmamışdır. MPPC-S12572-010P fotodiodu üçün isə deşilmə gərginliyi 62,4 V müşahidə olunmuşdur. MPPC-S12572-010P fotoqeydedicisinin gücləndirmə əmsalı $1 - 1,3 \times 10^5$ ətrafında dəyişmişdir. Pikselin tutumu isə $C_{\text{pik}} \sim 3,07 \text{ fF}$ olmuşdur. Eyni ilədə müxtəlif temperaturlarda MPPC-S12572-010P fotoqeydedicisinin piksellərinin tutumunun temperaturdan asılılığı tədqiq edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, MPPC-S12572-010P fotodiodlarında tutum xətti qanunla azalır və azalma belə ifadə edilir:

$$C_{\text{pik}} = 3,885 \times 10^{-15} + 1,333 \times 10^{-17} \times T \quad (3.3.2)$$



Şəkil 3.3.1 MSFD-3NK (a) və MPPC-S12572-010P (b) fotodiodlarının tək fotoelektronuna uyğun gələn yükün gərginlikdən və piksellərinin tutumunun temperaturdan asılılığı (c).

Burada T-mühitin temperaturudur (C). MPPC fotodiodlarında temperatur fərqi -80°C olduqda tutumun dəyişməsi 31 % olmuşdur.

Şəkil 3.3.2-də hər iki MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodlarının U_{br} deşilmə gərginliyinin temperaturdan asılılığı verilmişdir [51, c.35, s.15-19]. Məlum olmuşdur ki, MSFD-3NK fotodiodunun deşilmə gərginliyi temperaturdan asılı olaraq bu qanunla dəyişir :

$$U_{br} = 86,64 + 0,0616 \times T \quad (3.3.3)$$

Burada T-xarici mühitin temperaturudur və selsi ilə ifadə edilir. Analoji olaraq MPPC-S12572-010P fotodiodu üçün deşilmə gərginliyinin temperaturdan asılılıq tənliyi müəyyən edilmişdir:

$$U_{br} = 64,11 + 0,0654 \times T \quad (3.3.4)$$

Burada T-xarici mühitin temperaturudur və selsi ilə ifadə edilir. Alınan nəticələrdən məlum olmuşdur ki, MSFD-3NK fotodiodun deşilmə gərginliyi MPPC-S12572-010P fotodiodu ilə müqayisədə temperaturdan 7 % daha zəif asılıdır. Başqa sözlə MSFD fotodiodlara eyni bir ifrat gərginlik tətbiq etdikdə onların gücləndirmə əmsali temperatur artdıqca azalır və ya əksi olduqda isə gücləndirmə əmsali artır. Belə yüksək sahədə temperatur azaldıqca MSFD fotodiodun gücləndirmə əmsalının artması yükdaşıyıcıların optik fanonları buraxdığı müddətə qədər getdiyi yolun orta uzunluğunun artması hesabına baş verir (Fəsil 1-də bu barədə daha geniş məlumat verilmişdir). Bu zaman yükdaşıyıcıların iki toqquşma arasında daha çox enerji əldə edərək qısa müddətdə astana enerjisini (3,6 eV) əldə edir və zərbə ilə ionizasiya baş verir və deşilmə gərginliyinin aşağı gərginliklər oblastına sürüşməsinə imkan verir. Lakin temperatur artdıqca qeydedilmiş ifrat gərginlikdə güclənmə əmsalının azalması və deşilmə gərginliyinin artması məhz yükdaşıyıcıların optik fanonlara enerji vermə ehtimalının (qaçış yolunun azalması) artması ilə bağlıdır. Gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün selvari proses baş verən oblastda elektrik sahəsini artırmaq lazımdır bu

isə yalnız gərginliyin artırılması yolu ilə mümkündür (və ya deşilmə gərginliyin sürüşməsi hesabına mümkün olur). Məhz bu səbəbdəndə yuxarı temperaturlarda MSFD fotodiodda deşilmə gərginliyi artır [51, c.35, s.15-19]. Bununla yanaşı ionizasiyanı xarakterizə edən digər bir kəmiyyət qadağan olunmuş zonanın enidir və bu kəmiyyət temperaturdan asılı olaraq dəyişir. Bizim halda temperatur intervalının -120 °C olmasına baxmayaraq qadağan olunmuş zonanın eninin dəyişməsi təqribən 2 % yaxın olmuşdur.

MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P tipli fotoqeydedicilərin küy əmsalını müəyyən edərkən zəif işıq selinin amplitud paylanmasından istifadə edilmişdir. Küy əmsalının hesablanması 1-ci fotoelektrona görə aparılmışdır. Pikin maksimumuna uyğun gələn amplitud Gauss paylanması hesabına tapılmış və daha sonra piki təşkil edən hadisələrin standart kənara çıxması müəyyən olunmuşdur. Selvari qeydedicilərin küy əmsalı belə ifadə edilir [6, c.5, s. 5-16, 126, c.567, s.57-61]:

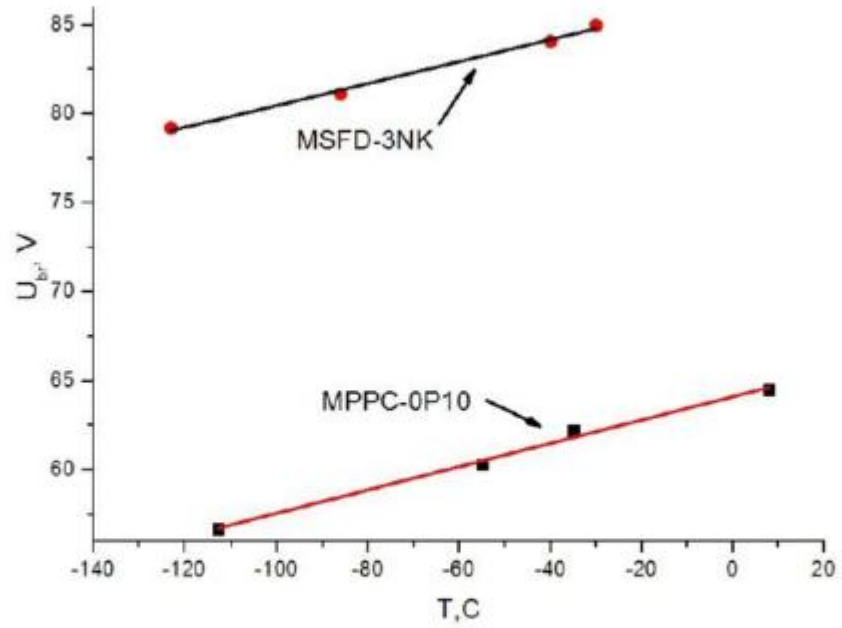
$$F = 1 + \frac{\sigma_m^2}{X_c^2} \quad (3.3.5)$$

Burada σ_m - piki təşkil edən hadisələrin dispersiyası və X_c - pikin maksimumuna uyğun gələn amplitud. Selvari qeydedicilərin küy əmsalı ölçülərkən fotodiodların yerləşdiyi mühitin temperaturu -86 °C olmuşdur. MSFD -3NK fotodiodları üçün küy əmsalı işləmə gərginliyində (82,7 V–83,6 V) ~1,04 olmuşdur. Digər MPPC-S12572-010P fotodiodları üçün işləmə gərginliyin 66,5 V – 67,5 V qiymətlərində küy əmsalı $F \sim 1,0035$. Küy əmsalının belə kiçik alınması MPPC-S12572-010P fotodiodlarında tək fotolektronlara uyğun gələn piklərin daha yaxşı ayrılmasına imkan vermişdir. MSFD selvari fotoqeydedicilərin qaranlıq sayı öyrənilərkən işıqlandırıcı sönmə rejimində olmuşdur. Selvari fotoqeydedicilərdən alınan siqnalların gücləndirilməsi üçün 2 gücləndiricidən və analoq siqnalın rəqəmsalaşdırılması CAEN ilə həyata keçirilmişdir. CAEN vasitəsi ilə qaranlıq siqnallar qeyd edilərkən çeviricinin işə düşməsi bir-başa olaraq analoq siqnal hesabına baş vermişdir. Qaranlıq say fotoqeydedicilərin aktiv həcmində selvari proses baş verən hissələrdə yaranan termal

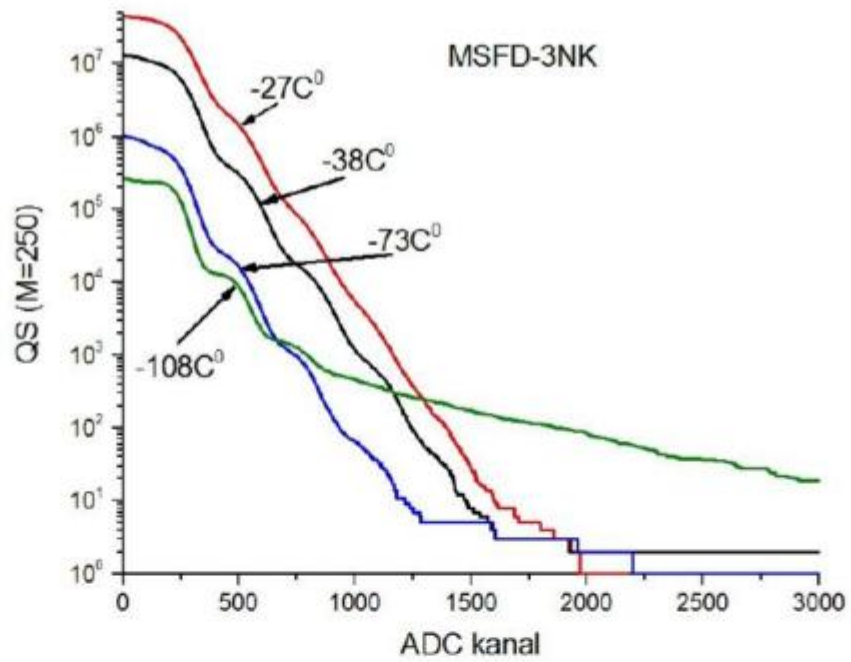
və gecikən yükdaşıyıcıların zərbə ilə ionizasiya güclənməsini tətikləməsi nəticəsində yaranır [6, c.5, s. 5-16]. Termal yükdaşıyıcıların konsentrasiyası generasiya mərkəzlərinin sayından və temperaturdan asılıdır. Bununla yanaşı MSFD fotodioda tətbiq edilən ifrat gərginlik artdıqca sahə hesabına yükdaşıyıcıların generasiya mərkəzindən keçirici zonaya keçmə sürəti artır və bu isə öz növbəsində QS dəyişməsinə səbəb olur. Məhz ona görə də ölçmələr fərqli temperaturlarda və fərqli gücləndirmə əmsallarında aparılmışdır. Şəkil 3.3.3-də qaranlıq elektronlara uyğun gələn amplitud paylanması göstərilmişdir. Ölçmələrin yuxarı temperaturu $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmuşdur. Buna səbəb isə yuxarı temperaturlarda QS çox yüksək olması nəticəsində tək elektronlu ampiltud paylanması müşahidə edilə bilməməsidir. Qaranlıq elektronlara uyğun gələn amplitudlar millivoltlar tərtibində olmuşdur. Daha sonra isə 5 mV astana qiymətinə uyğun gələn qaranlıq sayın eyni bir gücləndirmə əmsalında temperaturdan asılı olaraq dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Gücləndirmə əmsalını eyni seçməklə yalnız temperaturun QS-ın dəyişməsinə təsiri öyrənilmişdir. Şəkil 3.3.4-dən görünürdü ki QS temperaturdan asılı olaraq eksponensial qanunla dəyişir

$$\text{DCR} = 9,44 \times 10^8 \times e^{\frac{T}{8,77}} + 6,045 \times 10^5 \quad (3.3.5)$$

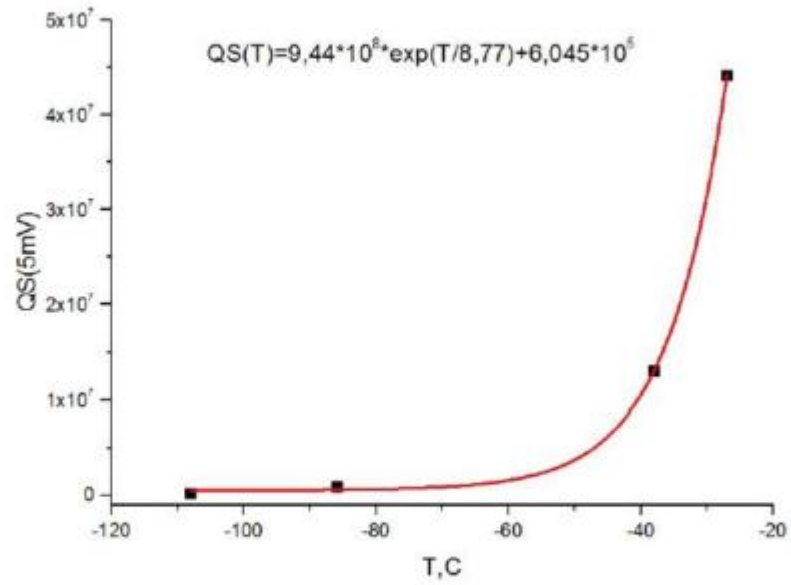
Temperatur fərqi $-81\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduqda QS təqribən 169 dəfə azalmışdır [51, c.35, s.15-19]. Həmçinin eyni bir temperaturda birinci qaranlıq elektrona uyğun gələn qaranlıq sayın gücləndirmə əmsalından asılılığına da baxılmışdır (şəkil 3.3.5, a və b). Buzaman yalnız gücləndirmə əmsalının QS-yə təsiri öyrənilmişdir. Ölçmə temperaturu $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçildikdə gücləndirmə əmsalı 36% artdıqda QS artması bu zaman 28% -ə yaxın olmuşdur. QS-nin gücləndirmə əmsalı artdıqca artması MSFD fotodiodlarında qaranlıq elektronların sayının artması və bu yükdaşıyıcıların selvari prosesi başlatma ehtimalının yüksək olması ilə bağlı olmuşdur. Lakin ölçmə temperaturu $-108\text{ }^{\circ}\text{C}$ seçildikdə gücləndirmə əmsalı 36% artdıqda tək elektrona uyğun QS-nin azalması 75% yaxın olmuşdur. Belə dəyişmələr isə yalnız $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ -dən aşağı temperaturlarda müşahidə edilməyə başlanmışdır. Belə dəyişmələrin müşahidə



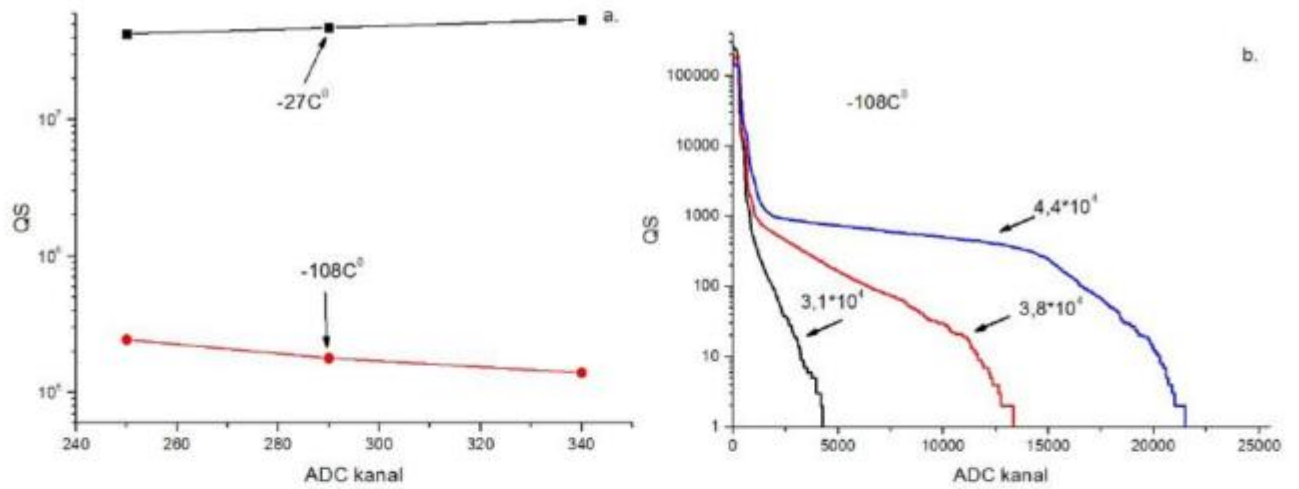
Şəkil 3.3.2 MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodlarınındeşilmə gərginliyinin temperaturdan asılılığı .



Şəkil 3.3.3 MSFD-3NK fotodiodlarının qaranlıq sayının temperaturdan asılılığı



Şəkil 3.3.4 MSFD-3NK fotodiodlarının 5 mV astana qiymətində qaranlıq sayının temperaturdan asılılığı .



Şəkil 3.3.5 MSFD-3NK fotodiodlarında qaranlıq sayın gücləndirmə əmsalından asılılığı

edilməsi yalnız gecikən impulsların müşahidə olunma ehtimalının artması ilə bağlı ola bilər. Məlum olduğu kimi yuxarı temperaturlardada selvari prosesdə yaranan yükdaşıyıcılar müəyyən kiçik bir ehtimalla tutma mərkəzləri tərəfindən tutulur və bu mərkəzlər yükdaşıyıcıları qısa bir zaman müddətində buraxır. Lakin aşağı temperaturlarda tutma mərkəzlərinin yükdaşıyıcıları buraxma müddəti $\tau_i = \tau_0 \times \exp(E_i/(k \times T))$ qanun ilə dəyişir [51, c.35, s.15-19, 59, c.62, s.1151-1157, 68, c.62, s.3727-3733]. Burada τ_0 - yükdaşıyıcının növündən və zona quruluşundan asılıdır, E_i -tutma mərkəzinin aktivasiya enerjisi, k - Bolsman sabiti və T -temperaturdur. Aşağı temperaturda tutma mərkəzlərinin selvari prosesdən yaranan yükdaşıyıcıları tutma ehtimalı kəskin artır və demək olar ki, hər selvari prosesdə yaranan yükdaşıyıcıların müəyyən hissəsi tutma mərkəzləri tərəfindən tutulur. Bu mərkəzlərdə yükdaşıyıcılar uzun müddət qala bilir və müxtəlif zaman müddətində buraxılırlar. Belə olduğu halda aşağı temperaturlarda dayaz səviyyəli müxtəlif tutma mərkəzləri fərqli zaman müddətində yükdaşıyıcıları buraxırlar və bunlar çox saylı piksellərdə selvari prosesi başlatdırırlar. Bunun nəticəsində Gİ kimi buraxılan yükdaşıyıcılar qeydedilən siqnalın amplitudunun yuxarı enerji oblastına sürüşməsinə imkan verir. Gücləndirmə əmsalı artdıqca bu hadisələrin amplitudu və sayıda kəskin artır. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, aşağı temperaturda QS yaranmasında əsasən Gİ əsas rol oynayır və bunun nəticəsində amplitudun artması müşahidə edilir. Həmçinin müəyyən edilmişdir ki amplituda uyğun gələn ayırdetmə gücləndirmə əmsalı artdıqca xətti olaraq artır. Gücləndirmənin artması eyni ilədə FQE-nin artmasına səbəb olur. Məhz ona görədə amplituda görə ayırdetmənin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə tədqiq etmək üçün eyni gücləndirməni seçmək olduqca əhəmiyyətlidir. Bunun üçündə spektrdən birinci qaranlıq elektrona uyğun gələn pikin standart kənara çıxmasının amplituda nisbəti qurulmuşdur. Eyni bir gücləndirmə əmsalında birinci qaranlıq elektrona uyğun gələn pikin ampilituda görə ayırd etməsi - 20 °C-də 51 %,-67 °C-də 41 % və -90 °C-də amplituda görə ayırdetmə 35 % olmuşdur. Başqa sözlə temperatur azaldıqca amplituda görə ayırdetmə yaxşılaşır və - 70 °C temperatur fərqi olduqda ayırdetmə 31 %-ə kimi yaxşılaşmışdır [51, c.35, s.15-19].

3.4. MSFD fotodiodlarının kənar işıq fonu şəraitində tədqiqi

MSFD fotodiodlar xarici təsirlərə həssas olduqlarından onların xassələrinin temperaturdan, təbii və süni işıq fonundan və radiasiya fonundan asılı olaraq necə dəyişməsinə öyrənmək olduqca əhəmiyyətlidir. Artıq bundan əvvəlki hissədə MSFD fotodiodların xassələrinə aşağı temperaturun təsirini geniş tədqiq etmişik. Lakin bu fotodiodların enerji ayırdetməsinin və amplitudunun $0\text{ }^{\circ}\text{C} - +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatur intervalında dəyişməsi tədqiq edilməmişdir. Nəzərə alsaq ki, tədqiq edilən cihazlar fotoqeydedicidir onda onların xarici işıq fonundan asılı olaraq özünü necə aparmasını tədqiq etmək maraq kəsb edir. Bu məqsədlə MSFD fotodiodun yerləşdiyi qaranlıq qutuda sabit işıq mənbəyi yerləşdirilmişdir. Işıq mənbəyindən qeyd edilən foton selinin intensivliyini dəyişmək üçün mənbə ilə MSFD fotodiod arasındakı məsafə dəyişilmişdir. Fotosiqnalı yaratmaq üçün generatordan LED tipli işıqlandırıcı dioda mənfə qütüblü, tezliyi 1 kHz, amplitudu 2,7 V olan və impuls eni 25 nsan olan düzbucaqlı impulslar verilmişdir. MSFD-3NK fotodiodda yaranan siqnalı gücləndirmək üçün bizim tərəfimizdən yığılmış LMH-357 gücləndiricilərindən istifadə edilmişdir. Fotosiqnalın amplitudunu təyin edərkən Hantek DSO5202BM tipli iki kanallı ossiloqraf istifadə edilmişdir. Ossiloqrafın girişinə 50 Om yükləmə müqaviməti qoşulmuşdur. Fotosiqnalın amplitudunu daha dəqiq təyin etmək üçün generatorun sinxronlaşdırıcı çıxışı ossiloqrafın sinxronlaşdırıcı girişinə qoşulmuşdur. Fotosiqnalın amplitudu təyin edilərkən fotodioda optimal gərginlik tətbiq edilmişdir.

Şəkil 3.4.1-də LED işıqlandırıcısı tərəfindən yaradılan siqnalın amplitudunun sabit işıq fonu cərəyanından asılılığı göstərilmişdir. Ölçmələr zamanı mühitin temperaturu $22\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmuşdur. LED işıqlandırıcısı tərəfindən yaradılan fotosiqnalın amplitudu xarici işıq fonu hesabına yaranan cərəyan artdıqca azalır. Xarici işıq fonu hesabına yaranan cərəyanının kiçik qiymətlərində (150 nA – 700 nA) LED işıqlandırıcısı tərəfindən yaradılan fotosiqnalın amplitudu sürətlə azalmışdır. Xarici işıq fonu hesabına yaranan cərəyanın qiymətləri 700 nA böyük olduğu halda amplitudunun dəyişmə sürəti yavaşlamışdır. MSFD-lərə xarici işıq fonu

tətbiq edilmədikdə onun özünün qaranlıq cərəyanı 139 nA tərtibində olur və bu zaman LED işıqlandırıcısı hesabına yaranan siqnalın amplitudu 960 mV olmuşdur. Bu zaman tam selvari cərəyanın yaranması belə ifadə olunur [6, c.5, s. 5-16]:

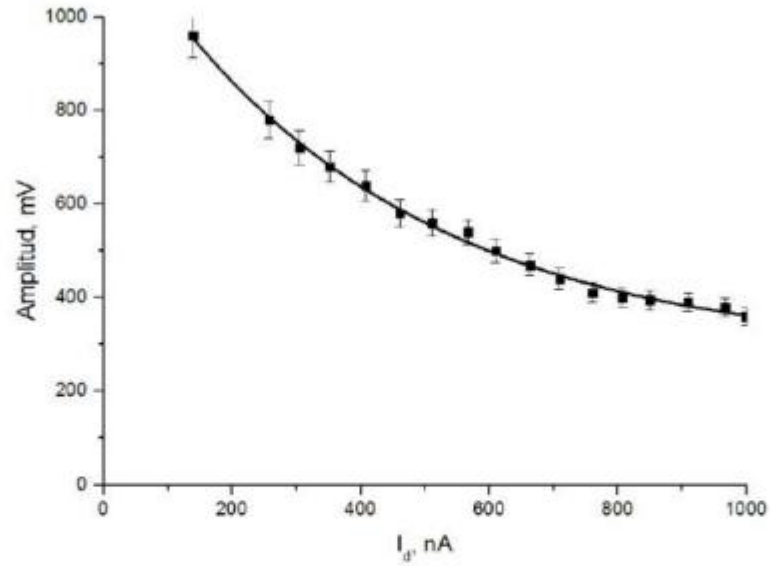
$$\dot{I}_M = (\dot{I}_q + \dot{I}_f) \times M \quad (3.4.1)$$

Burada \dot{I}_q -qaranlıq cərəyan (generasiya+səthi sızma +xarici işıq mənbəsi hesabına yaranan cərəyan), \dot{I}_f - LED işıqlandırıcısı hesabına yaranan fotocərəyandır və M- fotodiodun gücləndirmə əmsəlidir.

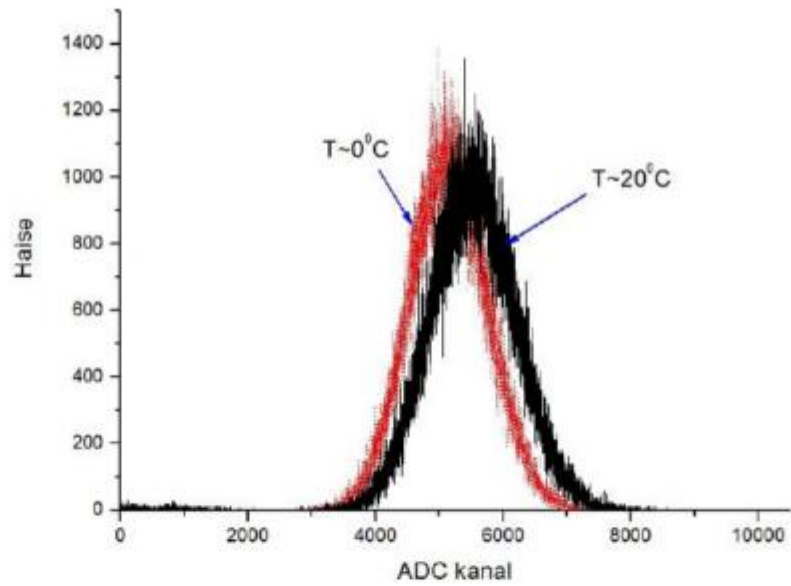
LED işıqlandırıcısı hesabına yaranan fotosiqnalın amplitudu xarici işıq fonunun cərəyanından asılı olaraq azalır və asılılıq eksponensial qanunla dəyişir:

$$A = \exp(7,11 + (-0,0019) \times \dot{I}_g + 7,05 \times 10^{-7} \times \dot{I}_g^2) \quad (3.4.2)$$

Burada A-fotosiqnalın amplitudu və \dot{I}_g -isə xarici işıq mənbəsi hesabına yaranan cərəyandır. Alınan təcrübə nəticələri göstərmişdir ki, xarici işıq fonu cərəyanı 7 dəfə artdıqda fotosiqnalın amplitudunun azalması 2,7 dəfə olmuşdur. Məlumdur ki, MSFD fotodiodlarda yaranan fotosiqnalın amplitudu birbaşa olaraq selvari prosesdə iştirak edən piksellərin sayından asılıdır və belə ifadə edilir: $A = \sum_{i=1}^N A_{fi} - \sum_{j=1}^N A_{qj}$ burada A_{fi} -hər pikselin yaratdığı fotosiqnalın amplitudunun orta qiyməti (bu qiymət hər piksel üçün eynidir), A_{qj} - qaranlıq elektronların yaratdığı siqnalın amplitudu, i və j isə fotoelektron və qaranlıq elektronları qeyd edən piksellərin sayıdır. İfadədən görüldüyü kimi qaranlıq elektronların sayı artdıqca onlar daha çox piksellərdə selvari prosesi başlatdırır və fotoelektronların piksellərdəki selvari prosesi başlatma ehtimalını azaldır. Nəticədə qaranlıq elektronlara uyğun gələn amplitud artır və çıxışda müşahidə edilən ümumi amplitud azalır. Daha sonra MSFD fotodiodla qeyd edilən fotosiqnalın enerji ayırdetməsinin temperaturun 0 °C – +20 °C intervalında dəyişməsi tədqiq edilmişdir. MSFD fotodiodundan alınan siqnal bizim tərəfimizdən hazırlanmış gücləndirici vasitəsi ilə gücləndirilmişdir. Qızdırıcı cihaz temperaturun 1 °C-i dəyişməsini 2 dəqiqə müddətində həyata keçirir. Hər verilmiş temperaturda



Şəkil 3.4.1 MSFD fotodiodu ilə qeyd edilən foto siqnalın amplitudununun qaranlıq cərəyandan asılılığı.



Şəkil 3.4.2 Fotosiqnalın amplitud paylanma spektrinin 0°C və 20°C çəkilmiş spektri

MSFD fotodiodlar 10 dəqiqə müddətində saxlanılır və daha sonra parametrləri təyin edilir. İşıqlandırıcı diod olaraq 450 nm-lik göy işıq istifadə edilmişdir. Generatorun dioda davam etmə müddəti 50 nsan, tezliyi 2 kHz və amplitudu 3,45 V olan mənfi qütüblü siqnal tətbiq edilmişdir. Dioddan alınan fotosiqnalın amplitudu CAEN-5720 vasitəsi ilə təyin edilmişdir. İntegrallanma sərhədi olaraq 90 nsan seçilmişdir. Ölçmə müddəti olaraq 1 dəqiqə seçilmişdir. Lazım olan temperaturları almaq üçün LRH - 150 Lab Cooling İnkubator qurğusundan istifadə edilmişdir. Temperaturun +20 °C qiymətində MSFD fotodioda 88V gərginlik tətbiq edilmişdir. MSFD fotodiodun tam cərəyanı (I_t) qaranlıq cərəyanla (I_{qar}) fotocərəyanın cəminə bərabər olmuşdur: $I_t = (I_{qar} + I_{fot}) \times M$. Tətbiq edilən gərginliyin 88 V qiymətində tam cərəyan 49 nA olmuşdur. Qauss paylanması istifadə edərək foto siqnalın maksimumu 5139-cu kanala düşmüş və pikin standart kənara çıxması 1230-cu kanal olmuşdur. Buna uyğun gələn enerji ayırdetməsi $R \sim 56,24$ % olmuşdur (şəkil 3.4.2). Temperaturun +10 °C -i qiymətində deşilmə gərginliyi azaldığından eyni amplitudlu siqnal almaq üçün MSFD fotodioda 87,5 V gərginlik tətbiq edilmişdir. Gərginliyin bu qiymətində fotodiodun tam cərəyanı 23 nA olmuşdur. Yaranan fotosiqnalın amplitudu 5167-ci kanalda, standart kənara çıxması 1290-cı kanala uyğun olmuş və ayırdetməsi $\sim 58,6$ % olmuşdur. Temperaturun 0 °C qiymətində fotodioda tətbiq edilən gərginlik 86,98 V olmuşdur. Fotodiodun tam cərəyanı 16 nA-ə düşmüşdür. Yaranan foto siqnalın maksimum qiyməti 5514-cü kanalda və kənərə çıxması 1339-cu kanala uyğun gəlmişdir. Bu zaman enerji ayırdetməsi 57 % alınmışdır. Temperaturun bu intervalda dəyişməsi zamanı fotosiqnala uyğun gələn enerji ayırdetməsinin dəyişməsi təqribən 4,2 % olmuşdur. Temperatur dəyişməsi zamanı fotodioda tətbiq edilən gərginlik hesabına amplitud dəyişməsi 7 %-dan yuxarı olmamışdır. Temperatur azaldıqca tam cərəyanın belə kəskin azalması əsasən qaranlıq cərəyanın (I_{qar}) təqribən 3 dəfə azalması hesabına olmuşdur. Bu isə birbaşa olaraq həcmi yüklər oblastında termal yolla yaranan yükdaşıyıcıların sayının temperaturdan asılı olaraq eksponensial qanunla azalması ilə bağlıdır. Xüsusi ilə qeyd etmək lazımdır ki, qaranlıq cərəyanın belə azalması bu tip fotodiodların xəttilik və sayma tezliyini dəyişə bilər.

Alınan nəticələr göstərmişdir ki, MSFD fotodiodlardan istifadə edilərkən onlar xarici işıq fonundan və temperatur dəyişməsindən qorunmalı və əks halda yaranan siqnalın parametrlərinin düzgün müəyyən edilməsində ciddi problemlər yarana bilər.

3.5. Ardıcıl və paralel qoşulmuş MSFD fotodiodların tədqiqi

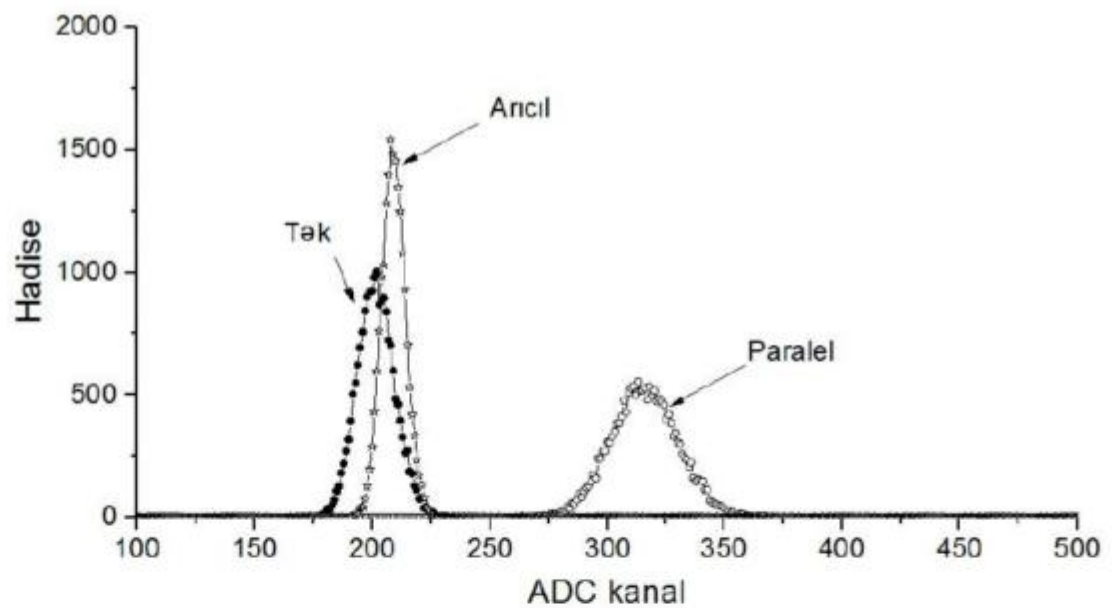
MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış çox elementli matrislərdən alınan siqnalların düzgün qeyd edilməsi olduqca vacibdir. Matrislərdən alınan yekun siqnalın qeyd edilməsi üçün matris elementləri ardıcıl və paralel qoşulur. Bu zaman detektor modulunun xassələrində bu birləşmənin növündən asılı olaraq dəyişə bilər. Məlumdur ki, matrisin hər bir elementi özünün müəyyən bir tutumu mövcuddur. Məsələn MSFD-3N1P fotodiodlarının tutumu 170 pF olmuşdur. Fotosiqnalın yaranma mexanizmində (ön və arxa frontun formalaşmasında) fotodiodların tutumu xüsusi rol oynayır. Əgər işləmə gərginliyi eyni olan çox saylı fotodiodlar paralel qoşulursa fotodioda tətbiq edilən gərginlik $U=1 \times U$ olur. Bu zaman matrisin tutumu kəskin artaraq yekun tutum $C=C = C_1 + C_2 + C_3 \dots \dots + C_N$ olur. Burada N- matris elementlərinin sayıdır. Belə olduğu halda siqnalın amplitudunda (M~C) artma müşahidə edilir lakin siqnalın tam formalaşması artır və frontları pisləşir. Məhz belə birləşmə fotosiqnalın enerjisi haqında məlumat üçün optimal bir birləşmə hesab edilir. Lakin bununla yanaşı nəzərə almaq lazımdır ki, dövrənin tutumu N dəfə artdıqca küydə həmçinin bir o qədər təqribən artır.

Əgər matrisin elementləri ardıcıl birləşərsə matrisə tətbiq edilən yekun gərginlik $U=N \times U$ olur. Bu matrisin tam tutumu belə hesablanır $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \dots \dots + \frac{1}{C_N}$ və göründüyü kimi matrisin tam tutumu kəskin azalmağa başlayır. Bunun nəticəsində matrisdə yaranan fotosiqnalın amplitudu azalır, lakin buna baxmayaraq fotosiqnalın yaranma müddəti kəskin qısalır, ön və arxa front kəskinləşərək yaxınlaşır. Belə birləşmələr uçma müddətinin təyin edilməsi və yüksək intensivlikli siqnalların qeyd edilməsi üçün optimal hesab edilir. Eyni zamanda belə birləşmələrdə siqnal küy nisbətində kəskin yaxınlaşır.

Matrislərin hazırlanmasında istifadə edilən selvari fotodiodların hər iki birləşməsi tədqiq edilərkən parametrlərin maksimal dəyişməsi 13 % tərtibində olmuşdur. Matrislərin hazırlanmasında istifadə edilən MSFD-3N1P fotodiodların qaranlıq cərəyanları 110 nA – 125 nA intervalında dəyişmişdir. Matrisin elementlərinin gücləndirmə əmsalını yoxlamaq üçün MSFD-3N1P fotodiodları LED450L işıqlandırıcı diodu ilə işıqlandırılmışdır. Elementlərin üzərinə düşən işıq selinin tam bircinsliyi təmin edilmişdir. LED450L işıqlandırıcı dioda Tektronix generatorundan parametrləri tezliyi 1 kHz, amplitudu – 1,9 V və davamətmə müddəti $\Delta t \sim 50$ ns olan düzbucaqlı impuls verilmişdir. MSFD fotodiodların üzərinə düşən foton selinin bircinsliyi təmin edilmişdir. Daha sonra hər elementin gücləndirmə əmsalının eyni olmasını yoxlamaq üçün siqnal gücləndirilmiş və ARÇ-nin girişinə verilmişdir. MSFD fotodiodlarında eyni foton selində eyni gücləndirmə alması üçün lazım olan gərginlikləri müəyyən edilmişdir. Gauss paylanmasından istifadə edərək tək fotodiodlardan alınan siqnalın amplitud paylanmasından enerjiyə görə ayırdetməsinin ~ 67 % olduğu tapılmışdır. Bu zaman hər MSFD fotodiodlara təqribən 93,7 V gərginlik tətbiq edilmişdir. Fotosiqnalın amplitudu tapılarkən fotosiqnalın pedestal çıxılmışdır. Fotosiqnalın maksimumuna uyğun gələn amplitud 55-ci kanala düşmüşdür. Matris elementlərinin ardıcıl qoşulması zamanı fotodiodların qidalandırıcı gərginliklə təmin etmək üçün Keithley-4867 gərginlik mənbəsindən $U = U_1 + U_2 + U_3 = 281$ V gərginlik tətbiq edilmişdir. MSFD fotodiodlara gərginlik verilərkən RC filtirlər vasitəsi ilə tətbiq edilmişdir. MSFD-3N1P fotodiodların ardıcıl qoşulması zamanı matrisin ümumi tutumu 3 dəfə azalmışdır. Fotosiqnalın maksimumuna uyğun gələn amplitud ARÇ-nin 60 kanalına uyğun gəlmişdir. Matrisin çıxışında alınan yekun fotosiqnalın amplitudu tək elementli MSFD fotodiodlarına nəzərən 9 % artmışdır. Qeyd edilən fotosiqnalın amplitud paylanmasından görüldüyü kimi enerji ayırdetməsi 20 % alınmışdır. Bu işə tək elementli MSFD fotodiodlarla müqayisədə təqribən 37 % daha az alınmış və başqa sözlə enerji ayırdetməsi yaxşılaşmışdır (şəkil 3.5.1).

Eyni ilədə matrisdə MSFD elementləri paralel qoşularaq onların xassələrinin dəyişilməsində tədqiq edilmişdir. MSFD-3N1P fotodiodları paralel qoşulduqda

məlumdur ki, onların tutumları cəmlənərək təqribən elementlərin sayı qədər artır. Məhz yekun tutumun artması nəticəsində fotosiqnalın amplitudunun artması gözlənilir. MSFD fotodiodlarını gərginliklə təmin etmək üçün 3 ayrıca gərginlik mənbəyindən istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodlardan alınan siqnallar toplanaraq çıxışda yekun bir siqnal müşahidə edilmişdir. Daha sonra alınmış siqnal eyni gücləndiricidən istifadə edərək gücləndirilmiş və ARÇ-nin girişinə verilmişdir. Paralel birləşmiş fotodiodlardan alınan siqnalın amplitud paylanması şəkil 3.5.1 –də göstərilmişdir. Amplitud paylanmasından görüldüyü kimi qeyd edilən siqnalın maksimumu 315-ci kanalda müşahidə edilir. Siqnala uyğun gələn tam yük 165 kanal olmuşdur. Alınan bu qiyməti tək elementli MSFD fotodiodla müqayisə etsək $165/55=3$ dəfə yüksək olduğunu görürük. Beləliklə göstərilmişdir ki MSFD fotodiodlar paralel qoşulduqda alınan yekun fotosiqnalın amplitudu 3 dəfə artır. Eyni



Şəkil 3.5.1 Ardıcıl və paralel birləşmiş MSFD fotodiodlarından qeyd edilən zəif işıq selinin spektri.

ilə də paralel birləşmədən alınan fotosiqnalın amplituda görə enerji ayırdetməsi ~18 % alınmışdır. Enerji ayırdetməsinə görə alınan bu qiymət ardıcıl birləşmə ilə müqayisədə təqribən 10 % az alınmışdır. MSFD fotodiodların ardıcıl və paralel birləşməsindən alınan nəticələr göstərmişdir ki, sayğac və uçuş müddətinin təyin

edilməsində MSFD fotodiodların ardıcıl birləşməsi və spektrometrik cihazların hazırlanmasında isə paralel birləşməsindən istifadə daha effektivdir.

3.6. Nəticələr

Tədqiq edilən MSFD və SPAD fotodiodlarının parametrləri geniş araşdırılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, MSFD-3N1P, MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodları xəttliliyini 5×10^5 foton selinə kimi saxlamışdırlar. Bu isə əksər ssintilyatorlarda buraxılan təqribən 14 MeV enerjili qamma şüalarına uyğun gəlir. Başqa sözlə, piksel sıxlığına görə bu tip qeydedicilər detektorların hazırlanması üçün daha əlverişlidirlər. MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodların deşilmə gərginliyinin, piksellərin effektiv tutumunun və QS aşağı temperaturlarda dəyişməsi tədqiq edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, MSFD-3NK fotodiodlarının deşilmə gərginliyi MPPC-S12572-010P fotodiodu ilə müqayisədə temperaturdan 7 % daha zəif asılıdır. MSFD-3NK fotodiodunda 5mV astana qiymətinə uyğun gələn qaranlıq sayın eyni bir gücləndirmə əmsalında temperaturdan asılılığı müəyyən edilmişdir: $DCR(T) = 9,44 \times 10^8 \times \exp(T/8,77) + 6,045 \times 10^5$. Həmçinin QS-nin aşağı temperaturda (-108 °C) gücləndirmə əmsalından asılılığında tədqiq edilmiş və göstərilmişdir ki, gücləndirmə əmsalı 36 % artdıqda tək elektrona uyğun QS azalması 75 % yaxın olmuşdur. Belə dəyişmələr isə yalnız -70 °C-dən aşağı temperaturlarda müşahidə edilməyə başlanmışdır. Aşağı temperaturlarda dayaz səviyyəli müxtəlif tutma mərkəzləri fərqli zaman müddətində tutulan yükdaşıyıcıları buraxırlar və bunlar çox saylı piksellərdə selvari prosesi başlatdırırlar. Bunun nəticəsində Gİ kimi buraxılan yükdaşıyıcılar qeydedilən siqnalın amplitudunun yuxarı enerji oblastının sürüşməsinə imkan verir. Gücləndirmə əmsalı artdıqca bu hadisələrin amplitudu və sayıda kəskin artır. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, aşağı temperaturda QS yaranmasında əsasən Gİ əsas rol oynayır və bunun nəticəsində amplitudun artması müşahidə edilir. Müəyyən edilmişdir ki, pikselləri effektiv tutumları temperatur artdıqca azalır və bu azalma xətti qanunla baş verir. Həmçinin müəyyən

edilmişdir ki, birinci elektrona uyğun gələn ayırdetmə temperaturdan asılı olaraq azalır. Temperatur fərqi $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ olduqda ayırdetmə 31 %-ə kimi yaxşılaşmışdır.

Həmçinində MSFD fotodiodların ardıcıl və paralel birləşməsindən alınan nəticələr göstərmişdir ki, sayğac və uçuş müddətinin təyin edilməsində MSFD fotodiodların ardıcıl birləşməsi və spektrometrik cihazların hazırlanmasında isə paralel birləşmə daha effektivdir.

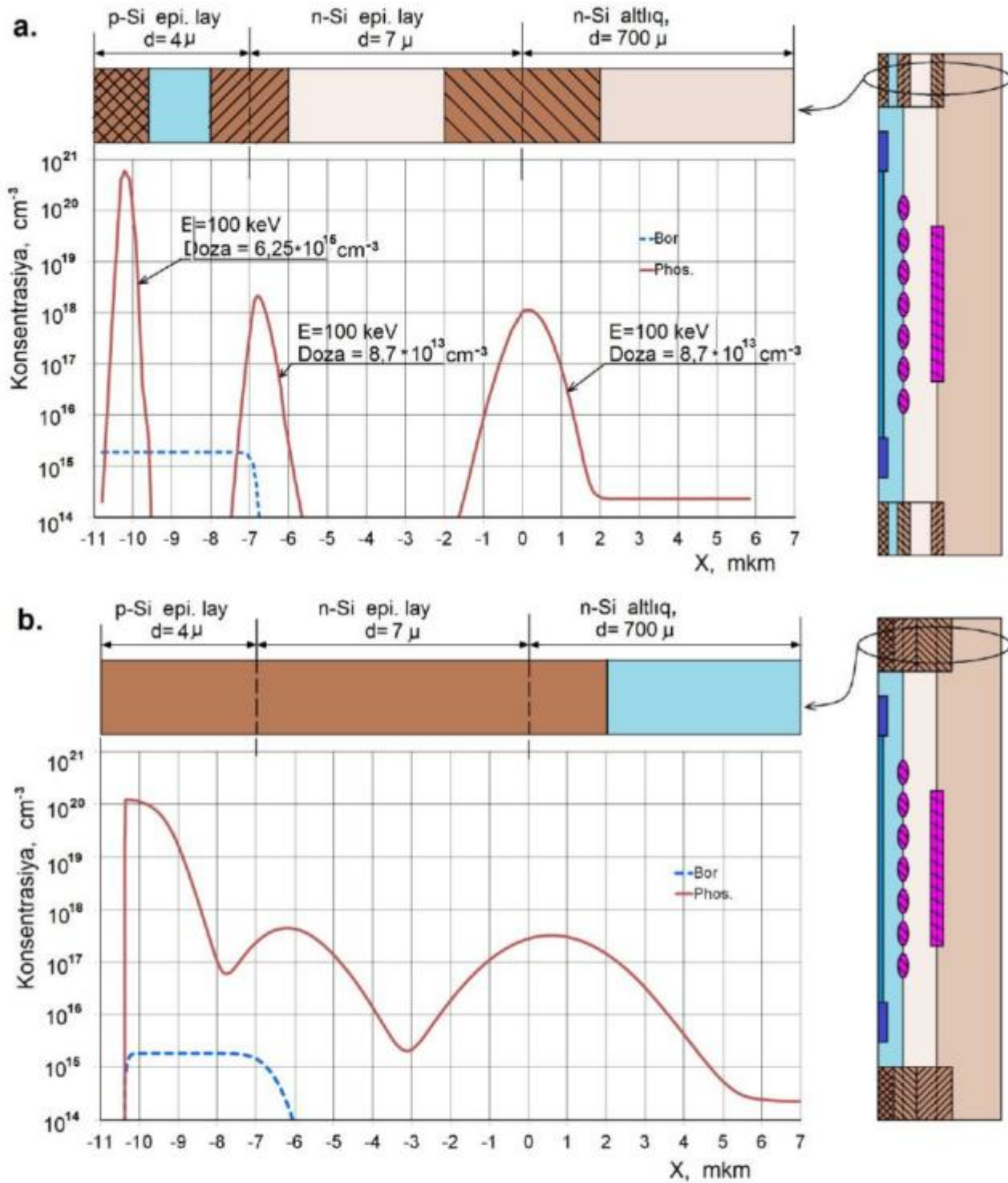
IV FƏSİL

MSFD FOTODİODLARININ YENİ QURULUŞUNUN İŞLƏNMƏSİ

4.1. Dərin piksellə yeni MSFD fotodiodlarının işlənməsi

Səthi piksellə MSFD fotodiodlardan fərqli olaraq, dərin piksellə MSFD fotodiodlarda iki epitaksial lay istifadə olunur. Bu fotodiodlarda piksellər cihazın səthindən 3 - 4 mkm dərinlikdə, iki epitaksial layın arasında yerləşdirilir. Ona görə də bu tip fotodiodların istehsalında müəyyən problemlər yaranır [160, c.567, s.70-73]. Bu problemlərdən biri də dərin piksellə MSFD fotodiodları kənar qoruyucu stop-kanalla bağlıdır. Belə ki, epitaksiya layları altlığın səthini tamamilə tutduğuna görə MSFD diodlar bir-birindən qoruyucu stop-kanalla (xüsusi p-n keçidlə) ayrılmalıdır, əks halda altlıqla qısa-qapanma baş verir. Adətən, lazım olan qoruyucu stop-kanalı almaq üçün yüksək enerjili (≈ 1 MeV) ion-implant qurğularından və yüksək temperaturlu qaynaq qurğularından istifadə edirlər. Amma, dərin piksellə MSFD diodlarda epitaksiya laylarının toplam qalınlığı kifayət qədər çox (≈ 10 mkm) olduğuna görə, yuxarıda adı çəkilən metodların istifadəsi həm çox vaxt və vəsait itkisinə, həm də epitaksiya laylarında əlavə defektlər yaranmasına gətirib çıxarır. Bu problemləri aradan qaldırmaq üçün dissertasiya işi çərçivəsində yeni metod və texnoloji proses təklif olunmuşdur.

Təklif olunan metodda MSFD diodunun perimetri boyunca qoruyucu stop-kanal üç etapla yerinə yetirilir. Birinci qoruyucu stop-kanal altlığın üzərində yaradılır. İkinci qoruyucu stop-kanal birinci epitaksiya layının üzərində, üçüncü qoruyucu stop-kanal isə ikinci epitaksiya layının üzərində yaradılır (şəkl.4.1.1 (a)). Bundan sonra, termik dəmləmə prosesində temperaturu və dəmləmə vaxtını elə seçilir ki, üç qoruyucu stop-kanalda olan aşqarların cəbhəsi diffuziya yolu ilə bir-biri ilə görüşsün (şəkl.4.1.1 (b)). Bu zaman, birinci və ikinci qoruyucu stop-kanalları yaradarkən fosforla aşqarlama dozası 10^{14} ion/sm²-dən az seçilir ki, termik dəmləmə prosesi zamanı avto-aşqarlama effekti baş verməsin, yəni fosfor ionları buxarlanaraq yüksək



Şəkil 4.1.1 Yeni MSFD fotodiolda qoruyucu stop-kanalın strukturu və aşqarın (fosfor ionlarının) paylanması: a – termik dəmləmədən əvvəl, b – termik dəmləmədən sonra.

müqavimətli epitaksiya laylarını aşqarlamasın. Hesablamalar TIDE proqram paketinin köməyilə yerinə yetirilmişdir.

Yeni MSFD fotodiodunun hazırlanması üçün n -tipli xüsusi müqaviməti $18 \text{ Om} \times \text{sm}$ və diametri 200 mm olan vayferlərdən istifadə edilmişdir (şəkil 4.1.2). İlk olaraq vayferdə mask-1-dən istifadə edərək kənar qoruyucu stop-kanalın (və ya həlqənin) birincisi implantasiya edilmişdir. Bu zaman 100 keV enerjili dozası $8,7 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$ olan fosfor atomundan istifadə edilmişdir. İmplantasiya edilmiş fosfor atomlarının maksimum konsentrasiyası 87 nm dərinlikdə $3,3 \times 10^{18} \text{ ion/sm}^3$ olmuşdur. Ümumi fosfor atomları altlıq daxilinə 600 nm dərinliyə qədər diffuziya etmişdir. Daha sonra həcmi yüklər oblastını ekranlamaq üçün mask-2-dən istifadə edərək As (arsenium) ionları ilə implantasiya edilmişdir. As ionunun enerjisi 100 keV və şüalanma dozası $2,3 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$ seçilmişdir. Maksimal aşqar atomlarının konsentrasiyası təqribən 60 nm-də müşahidə edilmiş və $2,3 \times 10^{18} \text{ ion/sm}^3$ olmuşdur. Daha sonra fosforla aşqarlanmış xüsusi müqaviməti $350 \text{ Om} \times \text{sm}$ olan və qalınlığı 7 mkm olan n -tip epitaksial təbəqə vayfer üzərində yetişdirilmişdir. Birinci epitaksial təbəqədəki n tip yükdaşıyıcıların konsentrasiyası $1,4 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^3$ olmuşdur. Sonrakı mərhələdə mask-1-dən istifadə edərək ikinci qoruyucu həlqəni almaq üçün 100 keV enerjili fosfor atomu ilə $8,7 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$ dozaya qədər implantasiya edilmişdir. Daha sonra mask-3-dən istifadə edərək piksellərin yerləri 100 keV enerjili arsenium ionu ilə $2,3 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$ dozaya qədər şüalandırılmışdır. Maksimal As ionunun konsentrasiyası $3,2 \times 10^{18} \text{ ion/sm}^3$ alınmışdır. Beləliklə, diametri 7 mkm, aralarındakı interval 3 mkm olan piksel matrisi hazırlanmışdır. Daha sonra xüsusi müqaviməti $7 \text{ Om} \times \text{sm}$ olan bor atomu ilə aşqarlanmış p-tip ikinci epitaksial təbəqə yetişdirilmişdir. İkinci epitaksial təbəqənin qalınlığı 4 mkm seçilmişdir. Yenidən mask-1-dən istifadə edərək ikinci epitaksial təbəqədə qoruyucu həlqənin alınması üçün 50 keV enerjili fosfor ionundan istifadə edərək $6,25 \times 10^{15} \text{ ion/sm}^2$ dozaya qədər şüalandırılmışdır. Qoruyucu həlqənin hər hissəsi implantasiya edildikdən sonra termik dəmləmə temperaturu elə seçilmişdirki, prosesin sonunda hər 3 həlqə tam birləşmişdir. Daha sonra fotodiodun bütün səthi boyunca qalınlığı 7 nm və 60 nm olan quru oksidləşmə yolu ilə SiO_2 və Si_3N_4

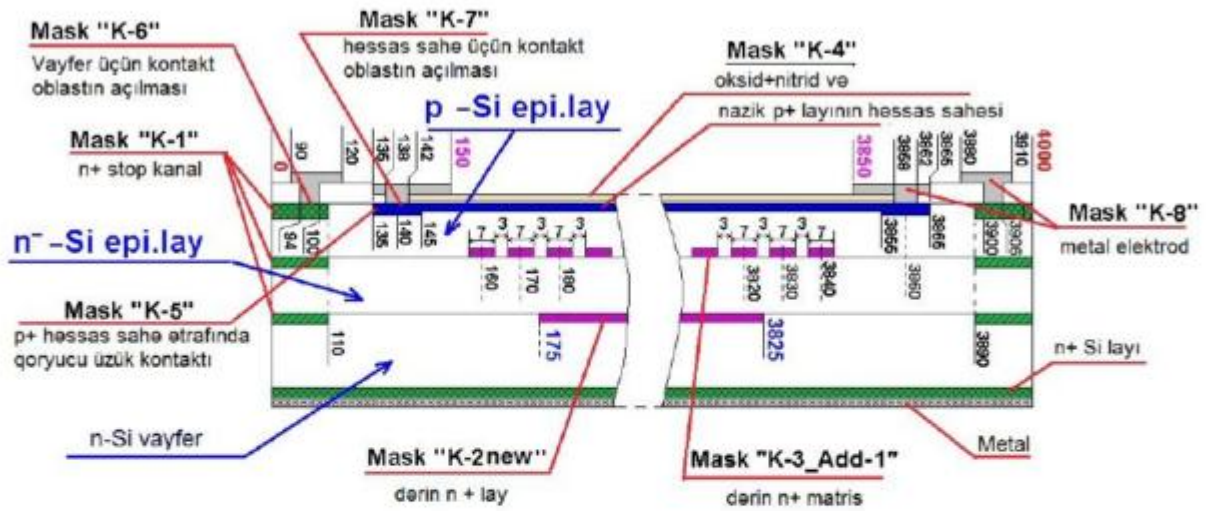
təbəqələri yetişdirilmişdir. Sonra isə elektrik sahəsini ekranlaşdırmağa və kontakt oblastı üçün istifadə edilən nazik p təbəqəsi mask-4 vasitəsi ilə yerinə yetirilmişdir. Bu məqsədlə enerjisi 40 keV olan bor ionundan istifadə edərək $3,125 \times 10^{14}$ ion/sm² dozaya qədər şüalandırılmışdır. Daha sonra mask-5-dən istifadə edərək aktiv sahənin qoruyucu həlqəsi və kontakt oblastı yerinə yetirilmişdir. Bunun üçün enerjisi 50 keV olan bor atomlarından istifadə edilərək $6,25 \times 10^{15}$ ion/sm² dozaya qədər implantasiya edilmişdir. Sonra mask 5 və 6-dan istifadə edilərək anod və katodun kontakt oblastlarına alüminium hopdurulmuşdur. Alüminium təbəqəsinin qalınlığı 1 mkm seçilmişdir. Birinci ekranlaşdırıcı ilə vayfer arasında yaranan çəpərin hündürlüyü $V_{br} \sim 0,236$ V olmuşdur. Eyni ildə bu ekranlayıcı təbəqə ilə birinci epitaksiya təbəqəsi arasındakı çəpərin hündürlüyü isə $V_{br} \sim 0,31$ V olmuşdur. Məhz bu çəpərin mövcud olması dəşiklərin vayferdən aktiv oblasta diffuziya etməsinin qarşısını almağa imkan verir. Fotodiodun quruluşunda istifadə edilən qoruyucu həlqələrin əsas məqsədi fotodiodun həssas oblastına yanlardan diffuziya edəcək yükdaşıyıcıların qarşısını almaqdır. Başqa sözlə selvari oblastın yalnız foto siqnallar vasitəsi ilə başlanmasını təmin etməkdir.

MSFD fotodiodların əsas parametrlərindən biridə onların dəşilmə gərginliyinin düzgün simulyasiya edilməsidir. Kəskin p-n müstəvi keçidlərdə dəşilmə gərginliyini hesablamaq üçün $V_{br} = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}}$ ifadəsindən istifadə edilmişdir. Harada ki, E_g -yarımkeçiricinin qadağan olunmuş zonasının eni və N_B - zəif aşqarlanmış hissədəki aşqarların konsentrasiyasıdır [182, s.815; s.110]. Lakin keçidin forması dəyişdikcə dəşilmə gərginliyi yalnız konsentrasiyadan deyil, həmçinin də həcmi yüklər oblastının enindən və keçidin radiusundanda asılı olur. MSFD fotodiodlarda piksellərin sferik (yəni p-n keçidin formasının) olduğunu qəbul etsək onda dəşilmə gərginliyini hesablamaq üçün aşağıda göstərilən empirik ifadədən istifadə edilmişdir [182, s.815; s.112]:

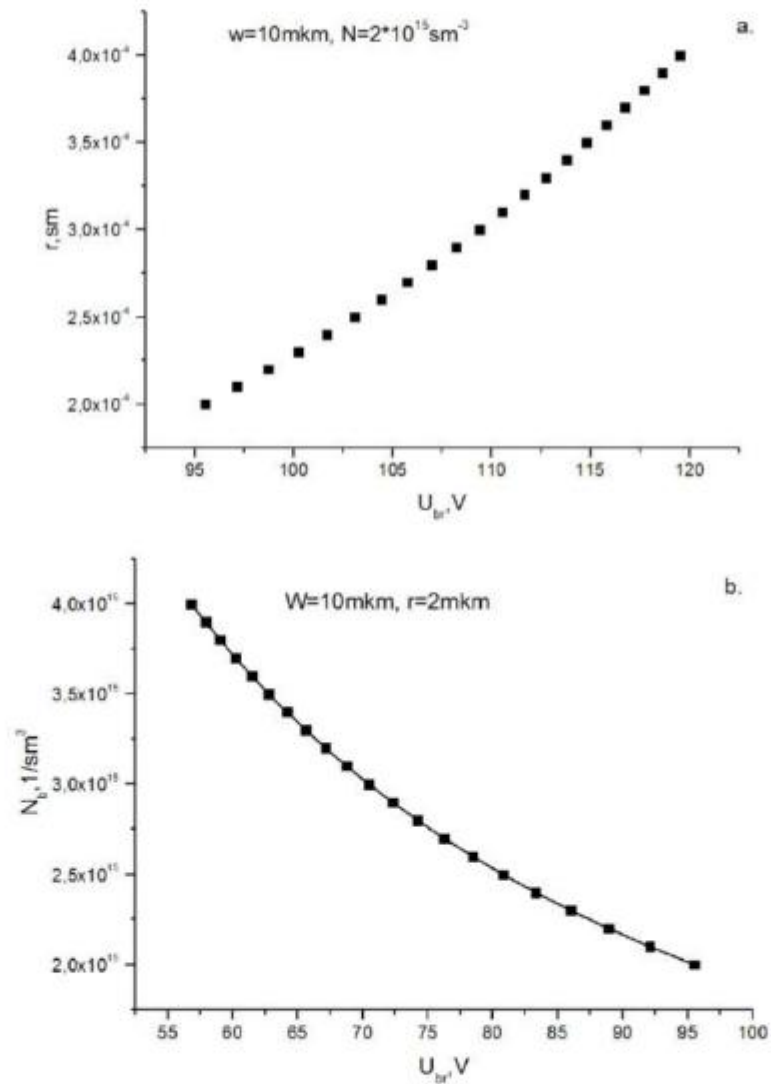
$$V_{br} = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)^{-\frac{3}{4}} \times \{ [(2 + \gamma) \times \gamma]^{1/2} - \gamma \} \quad (4.1.1)$$

Burada $\gamma = \frac{r}{W}$, r - p-n keçidin radiusu (sferik keçidin), W - həcmi yüklər oblastının eni, E_g - yarımkəçiricinin qadağan olunmuş zonasının eni və N_a - zəif aşqarlanmış hissədəki aşqarların konsentrasiyasıdır. Aşqar atomların konsentrasiyasının eyni bir qiymətində müstəvi keçidlərə uyğun gələndeşilmə gərginliyi sferik keçiddən daha yüksək olur. MSFD fotodiodlarında toplam həcmi yüklər oblastının eninin 10 mkm və ikinci p-tip epitaksial təbəqədəki aşqar atomların konsentrasiyasının $2 \times 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ ($7 \text{ Om} \times \text{sm}$) olduğunu götürsəkdeşilmə gərginliyinin (4.1.1) ifadəsindən istifadə edərəkdeşilmə gərginliyinin piksellərin radiusundan asılı olaraq dəyişməsinə analiz etmək olar. Bizim halda piksellərin radiusu 2-4 mkm arasında dəyişmişdir. Şəkil 4.1.3 (a)-dan görüldüyü kimi pikselin diametri 4 mkm olduqda buna uyğun gələndeşilmə gərginliyi $\sim 95 \text{ V}$ tərtibində olmuşdur. Bu gərginlik bizim istifadə etdiyimiz MSFD-3N, 3K və 3N1P fotodiodlarının işləmə gərginliyi tərtibindədir (90 V, 91 V, 94,5 V). Lakin pikselin diametri artdıqca məsələn 8 mkmdeşilmə gərginliyi 120 V yaxınlaşmışdır. Deşilmə gərginliyini azaltmaq üçün istifadə ediləcək digər yaxınlaşma fon konsentrasiasının artırılmasıdır. Şəkil 4.1.3 (b)- dədeşilmə gərginliyinin konsentrasiyasından asılı olaraq dəyişməsi verilmişdir. Bu hesablama toplam həcmi yüklər oblastının eninin 10 mkm və pikselin radiusu 2 mkm olan keçidlər üçün hesablanmışdır. Görüldüyü kimi fon konsentrasiyası artdıqcadeşilmə gərginliyi 95,5 V-dan 71 V-a qədər azalmışdır. Bu gərginlik isə hazırda təcrübələrdə istifadə edilən əksər fotodiodlarındeşilmə gərginliyi tərtibindədir. Beləliklə MSFD fotodiodlarında piksellərinin ölçülərini və aşqar konsentrasiyasını dəyişməklə onların işləmə gərginliklərinin idarə edilməsinin mümkünlüyü nəzəri və təcrübi yolla mövcud olan MSFD fotodiodlar üçün təsdiq edilmişdir.

P-n keçidlərə tətbiq edilən gərginlik ifrat qiymətə yaxınlaşdıqca elektrik sahəsi özünün maksimal qiymətini keçiddə alır. Bu zaman xarici təsirlə (ışığı və ya temperatur hesabına) yaranan elektron və deşiklər belə güclü sahədə iki toqquşma arasındakı müddətdə getdiyi məsafədə əldə etdiyi enerji $1,5 \times E_g$ – dən böyük olarsa zərbə ionizasiya baş verir. Zərbə ilə ionizasiyanın baş verdiyi hissədə (müstəvi p-n keçidin sərhədində) maksimal sahəni hesablamaq tapılması üçün aşağıdakı ifadədən



Şəkil 4.1.2 Yeni işlənmiş MSFD fotodiodun strukturu.



Şəkil 4.1.3 MSFD fotodiodlarının deşilmə gərginliyinin piksellərin radiusundan və fon aşqar atomlarının konsentrasiyasından asılılığı.

istifadə edilir [182, s.815; s.107]:

$$E_{\max} = \frac{2 \times (V + V_{bi})}{W} E_{\max} = \frac{4 \times 10^5}{1 - \frac{1}{3} \lg \left(\frac{N_B}{10^{16}} \right)} \quad (4.1.2)$$

Burada V- MSFD fotodioda tətbiq edilən gərginlik, V_{bi} - potensial çəpərin hündürlüyü (n^+ -tipli piksellə ikinci epitaksial təbəqə arasında olan), N_B - zəif oblastdakı aşqar konsentrasiyası və W- tam həcmi yüklər oblastının (birinci və ikinci epitaksial təbəqələrin qalınlığı) tam eni. Potensial çəpərin hündürlüyünü hesablamaq üçün kəskin p-n keçidlər üçün tətbiq edilən $V_{bi} = 0,0259 \times \ln \left(\frac{N_d \times N_a}{n_i^2} \right)$ ifadəsindən istifadə edilir. Burada N_a - ikinci epitaksial təbəqədəki akseptor aşqarların konsentrasiyası (bizim halda $N_a \sim 2 \times 10^{15} \text{ sm}^{-3}$), N_d - piksellərdəki donor aşqarlarının konsentrasiyası (bizim halda $N_d \sim 3 \times 10^{18} \text{ sm}^{-3}$) və n_i -məxsusi keçiricilikdir (silisium üçün $\sim 1 \times 10^{10} \text{ sm}^{-3}$ götürülür). MSFD fotodiodlarda ikinci epitaksial təbəqə ilə piksel arasındakı çəpərin hündürlüyü $V_{bi} = 0,0259 \times \ln \left(\frac{2 \times 10^{15} \times 3 \times 10^{18}}{1 \times 10^{20}} \right) = 0,82 \text{ V}$ alınmışdır. Keçidin növündən (tərs və düz) asılı olaraq tərs istiqamətdə qoşduqda potensial çəpərin hündürlüyü bu qanuna uyğunluqla artırır: $V_{bi}(V_{ap}) = V_{bi}(0) \pm V_{ap}$. Burada $V_{bi}(0)$ -p-n keçiddə gərginlik tətbiq etmədikdə yaranan potensial çəpərin hündürlüyü və V_{ap} -p-n keçidə tətbiq edilən gərginlikdir. Keçidin növündən asılı olaraq düz istiqamətdə olduqda (-) olur çəpərin hündürlüyü azalır və tərs istiqamətdə olduqda (+) olur çəpərin hündürlüyü artır. Tətbiq edilən gərginlikdə birinci n-tip epitaksial təbəqə ilə n^+ -tipli piksel arasında k_1 , potensial çəpərin hündürlüyünü hesablamaq üçün isə $V_{bi} = 0,0259 \times \ln \left(\frac{N_d^+}{N_d} \right)$ formulundan istifadə edilmişdir. Burada k- Bolsman sabiti, q- elektronun yükü, T- temperatur, N_d^+ - yüksək aşqarlı hissədəki donor aşqar konsentrasiyası və N_d isə zəif aşqarlanmış hissədəki donor aşqarların konsentrasiyasıdır. MSFD-3NK fotodiodlarında piksellərdəki aşqar atomunun konsentrasiyası $N_d^+ - 3 \times 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ və birinci epitaksial təbəqədəki konsentrasiya isə $N_d \sim 1,4 \times 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ olmuşdur. Bu zaman birinci n-tip epitaksial

təbəqə ilə piksel arasında yaranan potensial çəpərin hündürlüyü $U_{br} \sim 0,32$ V alınmışdır. Məhz bu çəpərin hündürlüyü əksər MSFD-3N, 3A, 3B fotodiodlarında selvari prosesin sönməsinə təşkil edir. Bu çuxura toplanmış yüklərin yaratdığı sahə p-n keçiddəki sahəni deşilmə sahəsindən kiçik olmasını təşkil edir. Bu potensial çuxura toplanmış elektronların tam boşalması bir-neçə mikro saniyələrə qədər davam edir. MSFD fotodiodlarda həcmi yüklərlə əhatə olunmuş epitaksial təbəqənin qalınlığı 11 mkm seçilmişdir. Alınmış bu qiymətləri (4.1.2) ifadəsində yerinə qoysaq piksellə ikinci epitaksial təbəqənin sərhədində elektrik sahəsinin maksimal qiymətinin $1,92 - 3 \times 10^5$ V/sm tərtibində olması üçün fotodioda 96 – 150 V gərginlik tətbiq edilməlidir. Göründüyü kimi tətbiq edilən gərginliyin 96 V qiymətindəki sahə artıq zərbə ilə ionizasiyanın başlamasının göstəricisidir. Bu gərginlik həmçinin MSFD fotodiodlarının işləmə gərginliyi tərtibindədir. Lakin sahənin 3×10^5 V/sm qiymətlərini almaq üçün fotodiodun gərginliyini 150 V qiymətinə qədər artırmaqla mümkündür. Aparılan bu hesablamalar yalnız müstəvi p-n keidlər üçün olduğundan tətbiq edilən gərginlik real MSFD fotodiodların gərginliyindən böyük alınır. Lakin reallıqda MSFD fotodiodlarda müstəvi deyil əksinə sferik kecidlər mövcuddur. Bu isə imkan verirki, MSFD fotodiodlara 90 – 95 V gərginlik tətbiq etdikdə belə sahənin maksimum qiyməti 3×10^5 V/sm tərtibində olsun. Bu qiymət isə ədəbiyyatda zərbə ilə ionizasiyanın baş verməsi üçün qəbul edilmiş sahənin qiyməti ilə tam uyğunluq təşkil edir. Sahənin bu qiymətində elektronlar üçün ionizasiya əmsalı $\alpha(E_m) =$

$$9,2 \times 10^5 \times e^{\frac{-1,45 \times 10^6}{E_m}} = 7323 \text{ sm}^{-1} \text{ və deşikləri üçün isə ionizasiya əmsalı } \beta(E_m) =$$

$$2,4 \times 10^5 \times e^{\frac{-1,54 \times 10^6}{E_m}} = 1420 \text{ sm}^{-1} \text{ olmuşdur. MSFD fotodiodların işləmə gərginlikləri həmçinin onları epitaksial təbəqələrinin qalınlığı ilə müəyyən edilir. Piksellərdəki aşqar atomunun verilmiş konsentrasiyasında fotodioda gərginlik tətbiq edilmədikdə ikinci epitaksial təbəqədə yaranan həcmi yüklər oblastının enini hesablamak üçün } w = \sqrt{\frac{2 \times \varepsilon \times V_{bi} \times (N_a + V_d)}{q \times N_a \times V_d}}$$

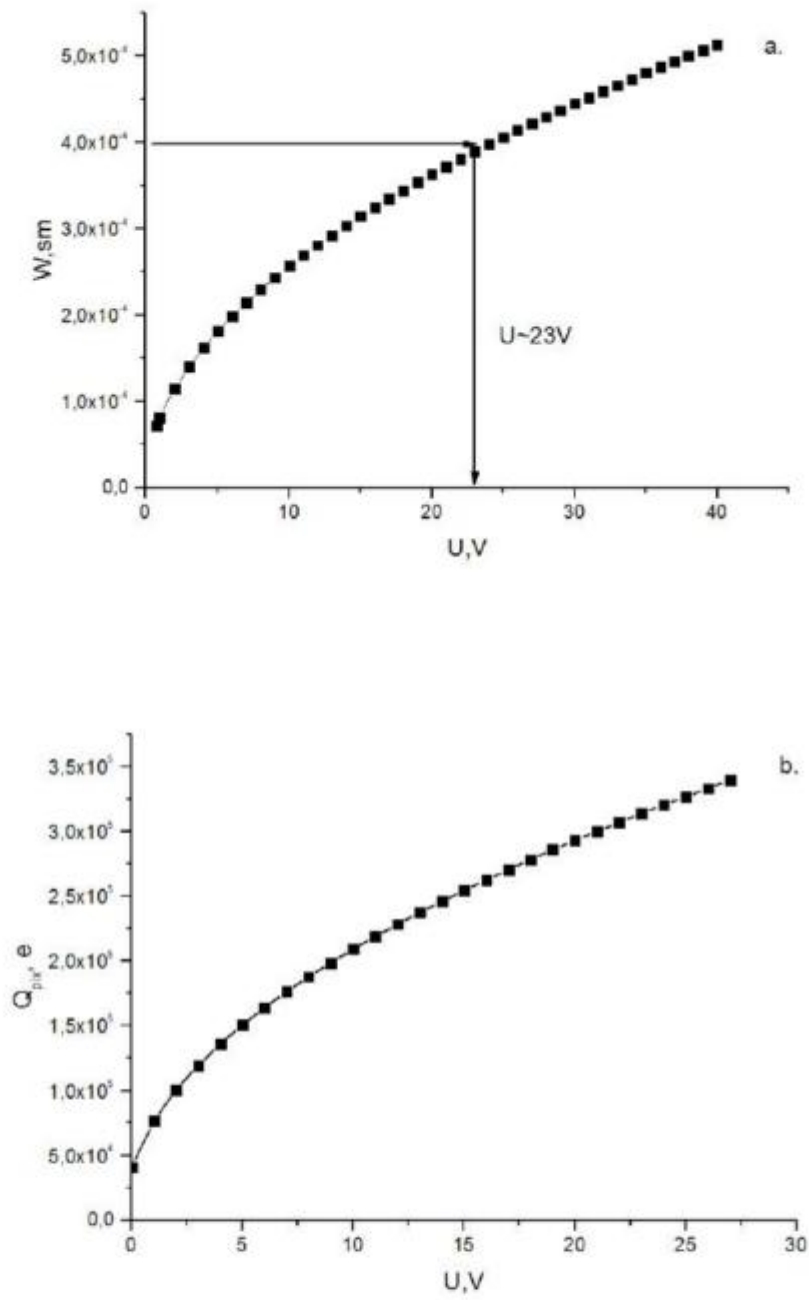
- silisium üçün dielektirik nüfuzluğu ($\sim 11,9 \times 8,85 \times 10^{-14}$ F/sm), N_d - donor mərkəzlərin konsentrasiyası (piksellərdə $N_d \sim 3 \times 10^{18}$ /sm³), N_a - akseptor mərkəzlərin

konsentrasiyası (ikinci epitaksial təbəqədə $N_a \sim 2 \times 10^{15} / \text{sm}^3$), V_{bi} - potensial çəpər (ikinci epitaksial təbəqə ilə piksel arasında $\sim 0,79$ V) və q-elektronun yüküdür. Bu ifadələri yuxarıdakı formulada yerinə qoysaq 0 V gərginlikdə həcmi yüklər oblastının eni üçün $W = 7,24 \times 10^{-5}$ sm alınır ($N_d \gg N_a$). Gərginlik sonrakı tərs böyük qiymətlərində isə həcmi yüklər oblastının eni artır (şəkil 4.1.4 (a)). Nəzərə alsaq ki, ikinci epitaksial təbəqənin qalınlığı 4 mkm-dir bu zaman onun tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunması üçün 12 V gərginlik tələb edilir. Gərginliyin sonrakı böyük qiymətləri bu oblasdakı elektrik sahəsinin artmasına sərf olunur. Gərginliyin hər qiyməti artdıqca ikinci epitaksiya təbəqəsi ilə piksel arasında həcmi yüklər oblastının eni maksimum 4 mkm kimi artır və həmçinin də buna uyğun gələn yük artır. Həcmi yüklər oblastına uyğun gələn yükü tapmaq üçün $Q = q \times N_a \times W$ ifadəsindən istifadə edilmişdir. Gərginliyin 0 V qiymətində bu yükün miqdarı 23,2 nKl olmuşdur və gərginliyin 12 V qiymətində isə bu yükün qiyməti 129 nKl-a uyğun gəlmişdir. Bu yükə uyğun gələn elektronların sayı isə $1,45 \times 10^{11} e$ (0 V) və $8,08 \times 10^{11} e$ (12 V) olmuşdur. Reallıqda pikselin sahəsi $S_{pix} = \pi \times r^2 = 3,14 \times (3,5 \times 10^{-4})^2 = 3,84 \times 10^{-7} \text{ sm}^2$ olduğundan onların sahəsinə uyğun gələn həcmi yüklər oblastının yükü $Q_{pixw}(0V) = 3,84 \times 10^{-7} \times 1,45 \times 10^{11} e = 5,56 \times 10^4 e$ olur, lakin gərginliyin 12 V qiymətində yükün miqdarı $Q_{pixw}(12 \text{ V}) = 3,84 \times 10^{-7} \times 8,08 \times 10^{11} e = 3,1 \times 10^5 e$ qiymətinə kimi artır. Şəkil 4.1.4 (b)-də ikinci epitaksial təbəqə ilə piksellər arası oblastın həcmi yüklərlə əhatə olunması zamanı yaranan yükün gərginlikdən asılılığı göstərilmişdir. Epitaksial təbəqələrin qalınlığı artdıqca bu tip fotodiodların işləmə gərgiliyidə artır. P-n keçiddə uyğun tutumu hesablamaq üçün $C_{pn} = dQ_w/dV_a = q \times N_a \times dW / dV_a$ həcmi yüklər oblastının ifadəsindən V_a görə differensiallasaq ondu p-n keçidin hər 1 sm^2 sahəsinin tutumu üçün belə bir ifadə alarıq [182, s.815; s.85]:

$$C_{pn} = \sqrt{\frac{q \times \epsilon \times N_A}{2 * (V_{Bi} + V_a)}} = \sqrt{\frac{1,6 \times 10^{-19} \times 11,9 \times 8,85 \times 10^{-14} \times 2 \times 10^{15}}{2 \times (0,79 + 12)}} =$$

$$= 3,63 \times 10^{-9} \frac{F}{\text{sm}^{-2}}$$

Bu zaman ikinci epitaksial təbəqənin qalınlığı 4 mkm və pikselin diametri 7 mkm



Şəkil 4.1.4 MSFD fotodiodlarında fəza yüklər oblastının eninin və ona uyğun gələn yükün gərginlikdən asılılığı.

olduğundan hər bir pikselin tutumunu belə hesablamaq olar $C_{\text{pik}}=C_{\text{pn}}\times S_{\text{pik}} =3,63\times 10^{-9}\times 3,84\times 10^{-7} \text{ sm}^2 =1,39 \times 10^{-15} \text{ F}=1,39 \text{ fF}$ və beləliklə bir pikselin tutumunun 1,39 fF olduğu tapılmışdır. Nəzərə alsaq ki, MSFD fotodiodunda 135000 paralel birləşmiş piksel var onda fotodiodun tam tutumu yekun piksellərin tutumlarının cəminə bərabər olacaqdır: $C_{\text{diod}} = 136900\times 1,39 \times 10^{-15} \text{ F} =190\times 10^{-12} \text{ F} =190 \text{ pF}$. MSFD fotodiodunun tutumu üçün təcrübədən ölçülən qiyməti $\sim 180 \text{ pF}\pm 5 \%$ olmuşdur. Başqa sözlə nəzəri hesablanmış qiymət ilə təcrübi ölçülən qiymətlə tam uyğunluq təşkil etmişdir.

Qalınlığı 7 mkm və aşqar konsentrasiyası $1,4\times 10^{13} \text{ sm}^{-3}$ olan birinci epitaksial təbəqənin tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə edilməsi üçün lazım olan gərginliyin 25 V olduğu hesablanmışdır. Beləliklə, hər iki epitaksial təbəqələrin tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunması üçün fotodioda $V=25 \text{ V}+12 \text{ V}=37 \text{ V}$ gərginlik tətbiq edilməlidir. MSFD fotodiodlardakı selvari prosesi söndürülməsi potensial çəpərlə yanaşı ikinci epitaksial təbəqənin həcmi yükləri hesabına baş verir. Həcmi yüklər oblastına uyğun gələn müqaviməti hesablamaq üçün birinci epitaksial təbəqənin xüsusi müqavimətini ($350 \text{ Om}\times\text{sm}$) və pikselin radiusunu (3,5 mkm) aşağıdakı ifadədə yerinə qoymaqla hesablamaq olar:

$$R_q = \rho \times \frac{l}{S} = \rho \times \frac{l}{\pi \times r^2} = 350 \times \frac{7 \times 10^{-4}}{3.14 \times (3.5 \times 10^{-4})^2} = 637 \text{ kOm}$$

Burada S- p-n keçidin sahəsi, l- pikselin altında yerləşən birinci epitaksial təbəqənin qalınlığı r- pikselin diametri və ρ - yarımkəçiricinin xüsusi müqavimətidir. Beləliklə, hər pikselin altındakı həcmi yüklər oblastının müqavimətinin 637 kOm olduğu müəyyən edilmişdir.

Alınan nəticələrdən istifadə edərək birinci epitaksial təbəqənin konsentrasiyasını artırmaqla və ikinci epitaksial təbəqənin qalınlığını azaltmaqla yeni hazırlanmış MSFD-3NM fotodiodların deşilmə gərginliyi 71 V-a qədər azaldılmışdır.

4.2. MSFD fotodiodlarının kvant effektivliyinin artırılması üsulları.

Qamma şüaları, beta, alfa zərrəcikləri və neytronları qeyd etmək üçün işdə Zekotek firması ilə birgə istehsal edilmiş MSFD-3N1P, MSFD-3D, MSFD-3NK, fotodiodlarından istifadə edilmişdir [8, c.18, s.10-11, 10, c.31, s.81-85, 34, c.10, s.1-7, 35, c.31, s.14-17, 36, s.252,37, c.10, s.778–779, 38, s.383-385, 39, c.36, s.20-22, 40, s.13, 41, c.1, s.33-36, 42, c.21, s.17-18, 43, c.12, s.1-7, 44, c.24, s.341-344, 45, c.912, s.287-289, 46, s.1-6, 47, s.167, 48, s.1, 49, s.42, 50, s.1]. Təcrübələrdə istifadə edilən Zekotek firmasının MSFD-3N1P və MSFD-3NK fotodiodlarında piksellər dərinlikdə yerləşmiş və eyni quruluşa malik olmuşdular [11, s.145, 12, s.189-191, 154, c.2, s.16-20, 155, s.49-50, 156, c.845, s.621-622, 157, c.3, s.9-19, 158, c.824, s.135–136, 159, s.1, 160, c.567, s.70-73, 161, c.158, s.1-6, 162, 163, c.19, s.17-19, 164, c.10, s.780–782, 165, c.504, s.301-303, 166, c.824, s.137–138, 167]. MSFD-3N1P qeydediciləri elektron keçiriciliyi üstünlük təşkil edən 700 mkm qalınlıqlı vayferin səthində yetişdirilmiş qalınlığı 4 mkm n-tip və 8 mkm olan p-tip keçiriciliyə malik iki epitaksia laylardan ibarətdir [6, c.5, s. 5-16]. Epitaksial təbəqələrin kəşiməsində piksellər arası addımı 3 mkm olan n-tip aşqarlarla yüksək aşqarlanmış diametri 5 mkm olan piksellər yerləşmişdir. MSFD-3N1P fotodiodların piksel sıxlığı 15000 piksel/mm² və sahəsi isə 3×3 mm² olmuşdur. Bu fotodiodların işləmə gərginliyi 93 – 94 V arasında və FQE-si 30 % ətrafında olmuşdur. MSFD-3N1P fotodiodlarının gücləndirmə əmsalı 60000 olmuşdur. Lakin bundan fərqli olaraq digər tip MSFD-3NK adlı fotodiodlarında piksellərin diametri 7 mkm (FQE-ni artırmaq üçün) və piksel sıxlığı isə 10000 piksel/mm² olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodlarının aktiv həcmi yüklər oblastının qalınlığı 11 mkm olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodlarının işləmə gərginliyi (90 V) ətrafında və FQE-si 40 %-dən yüksək olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodunun aktiv sahəsi 3,7×3,7 mm² olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodlarının gücləndirmə əmsalı ~100000 ətrafında müşahidə edilmişdir. MSFD-3NK fotodiodlarında gücləndirmə əmsalının və FQE-nin böyük alınması pikselin sahəsinin və kvant effektivliyinin artması hesabına baş vermişdir. MSFD fotodiodların kvant effektivliyinin artması isə birbaşa olaraq səthə düşən foton selinin əksəriyyətinin səpilərək əks olunmadan silisium daxilində udulmasının təmin

edilməsindən asılıdır (şək. 4.2.1). Əgər işıq fotonları havadan keçərək silisium üzərinə bir başa düşərsə bu zaman foton selinin əksəriyyəti səpilərək silisiuma nüfuz etmədən kristalı tərk edir. Əksər hallarda Si təbəqəsi ilə hava arasında SiO₂ təbəqəsi geniş istifadə edilir. Məsələn 400 nm dalğa uzunluqlu fotonlar üçün hava və silisium təbəqəsi üçün optimal anti qaytarıcının sındırma əmsalı 2,36 olmalıdır və onun qalınlığı isə 42 nm olmalıdır. Sındırma əmsalı bu optimal qiymətə yaxın olan maddə olaraq Si₃N₄ hesab edilir. Bu zaman hava ilə Si₃N₄ təbəqəsi arasında isə sındırma əmsalı 1,45 olan təbəqənin yaradılması vacibdir. Göründüyü kimi SiO₂ təbəqəsinin 400 nm dalğa uzunluğuda sındırma əmsalı 1,47-dir və optimal qiymətinə yaxındır. Bu halda təbəqənin qalınlığı 65 nm olmalıdır. Bu halda foton selinin əksər hissəsi kristal daxilinə nüfuz edir. Bunun nəticəsində fotodiodların kvant effektivliyi artır. Əlbəttə nəzəri olaraq çox qatlı anti-reflektor təbəqələrindən istifadə etməklə fotodiodların kvant effektivliyinin ideal olaraq 100 %-ə qədər artırmaq mümkün olsada praktik olaraq bunu həyata keçirmək mümkün deyil.

MSFD fotodiodların əvvəlki verisələrində silisiumun səthi yalnız SiO₂ təbəqəsi ilə örtülmüşdür. Bu halda MSFD fotodiodun üzərinə düşən fotonların hansı bucaq altında səpilməsini müəyyən etmək üçün Snel qanunundan istifadə edilir və belə ifadə edilir [182, s.815; s.616]:

$$\frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\theta_r)} = \frac{n_r}{n_i} \quad (4.2.1)$$

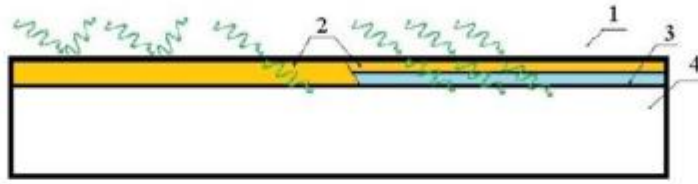
Burada θ_i - düşmə bucağı, θ_r -sınma bucağı, n_r -ikinci mühitin sındırma əmsalı və n_i - birinci mühitin sındırma əmsalıdır. Əgər sınma bucağı artarsa və 90⁰-yə yaxınlaşarsa bu zaman artıq işıq fotonları silisium təbəqənin sərhədindən əks olunaraq qayıdır. Əks olunan işıq selinin payını hesablamaq üçün aşağıdakı ifadədən istifadə edilir $R = \left(\frac{n_1-n_2}{n_1+n_2}\right)^2$. Burada, n_1 - birinci mühitin və n_2 - isə ikinci mühitin sındırma əmsalıdır. Qəbul etsək ki, silisiumun səthi yalnız SiO₂ təbəqəsi ilə örtülübdür və düşən fotonların dalğa uzunluğu 400 nm-dir. Dalğa uzunluğunun bu qiyməti üçün

sındırma əmsalları $n_{Si}(400 \text{ nm})= 5,567$ və $n_{SiO_2}(400 \text{ nm})= 1,47$ olur [61, səh.459]. Yuxarıda göstərilən hər iki ifadədən istifadə etməklə müəyyən edilmişdir ki, düşən işıq selinin düşmə bucağı $1 - 14^\circ$ arasında dəyişdikdə əks olunma bucağı $3,8 - 66^\circ$ kimidəyişir və əks olunan işıq selinin payı isə $33,4 \%$ təşkil edir (şəkil 4.2.2). Diodun səthinə (Si daxil olan) çatan foton selinin payı isə $66,6 \%$ təşkil edir. Səthə düşən foton selinin düşmə bucağı $\theta_1 > 14^\circ$ böyük olarsa səpilmə bucağı kəskin artır. Bu zaman foton selinin səpilmə payı artır və silisiuma çatan foton selinin payı isə azalar. Düşmə bucağı $\theta_1 \geq 15,2^\circ$ böyük olarsa səpilmə bucağı 90° -yə yaxınlaşır, foton selinin əks olunma payı $87,8 \%$ qədər artır və keçən foton selinin payı isə $24,2 \%$ qədər azalır. Başqa sözlə düşən foton selinin tamamı silisium təbəqəsinin sərhədindən əks olunaraq quruluşu tərk edir. Məhz bu səbəbdəndə MSFD-3A, 3B, 3N, 3N1P fotodiodlarında kvant effektivliyi təqribən $\sim 65 \%$ alınır.

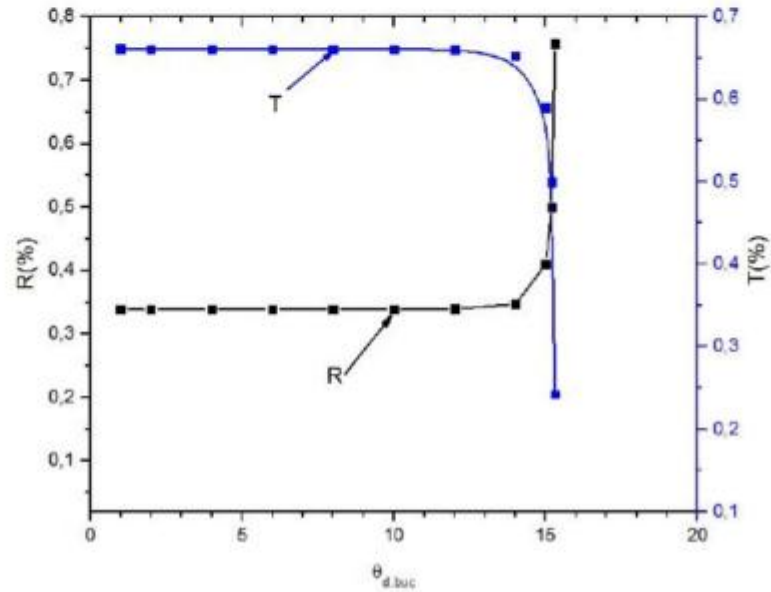
MSFD fotodiodların səthinə düşən foton selinin əksəriyyətinin qeyd edilməsi üçün əlavə optimal anti-əksetdirici təbəqənin qalınlığı və sındırma əmsalı hesablanması olduqca vacibdir. Anti-əksetdirici təbəqənin hesablanması zamanı foton selinin dalğa uzunluğu nəzərə alınmalıdır. Optimal anti-əksetdirici təbəqənin sındırma əmsalının hesablanması üçün aşağıdakı ifadədən istifadə edilmişdir [191, s.1237-1240]:

$$n_{a,r} = \sqrt{n_{Si} \times n_{SiO_2}} \quad (4.2.2)$$

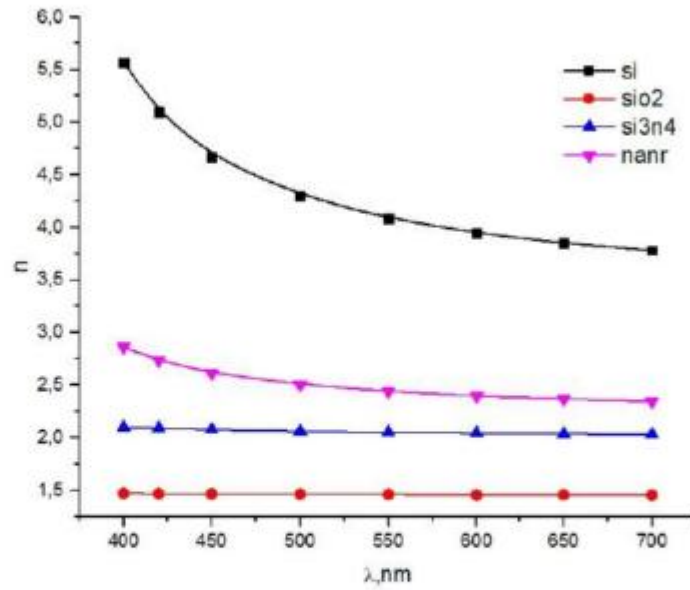
Optimal anti-əksetdirici təbəqənin sındırma əmsalı $400 \text{ nm} - 700 \text{ nm}$ dalğa uzunluqlu foton seli üçün hesablanmışdır (şək.4.2.3). Düşən foton selinin dalğa uzunluğu artdıqca optimal $n_{a,r}$ -nin qiyməti $2,86 - 2,34$ arasında dəyişmişdir. Xüsusi hal üçün düşən 400 nm -lik dalğa uzunluqlu foton seli üçün sındırma əmsalları $n_{Si}(400 \text{ nm})=5,567$ və $n_{SiO_2}(400 \text{ nm})=1,47$ alınır [66, s.1251; s.459]: Belə olduğu halda optimal anti-reflektor üçün sındırma əmsalı $n_{a,r}(400 \text{ nm}) \sim 2,86$ alınır. Sındırma əmsalı $n_{a,r}(400 \text{ nm}) \sim 2,86$ olan təbəqə əgər silisium və SiO_2 təbəqəsi arasında yerləşərsə bu zaman düşən fotonların 95% yaxını fotodiodla qeyd edilməlidir.



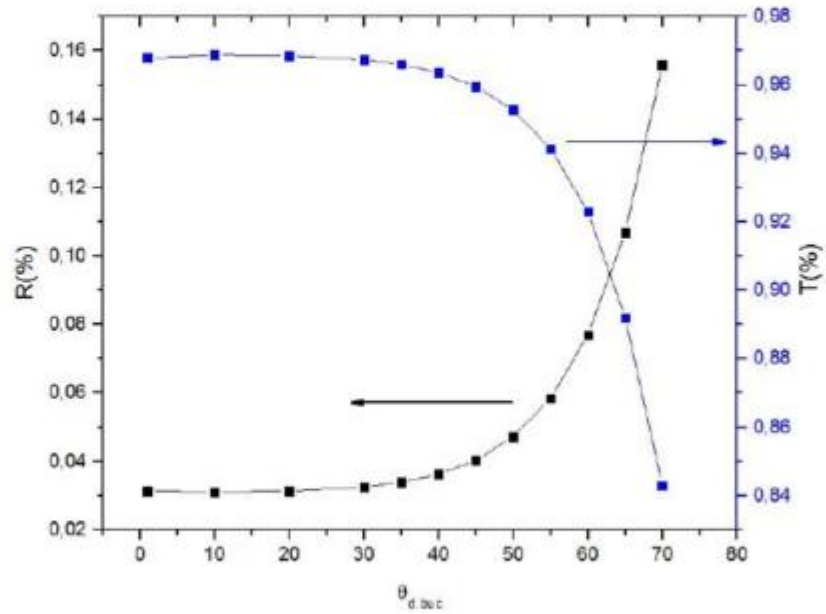
Şəkil 4.2.1 Müxtəlif qaytarıcı örtüklü silisium əsaslı mühitlərdə işığın səpilməsi.1-hava, 2-SiO₂,3-Si₃N₄ və 4-Si



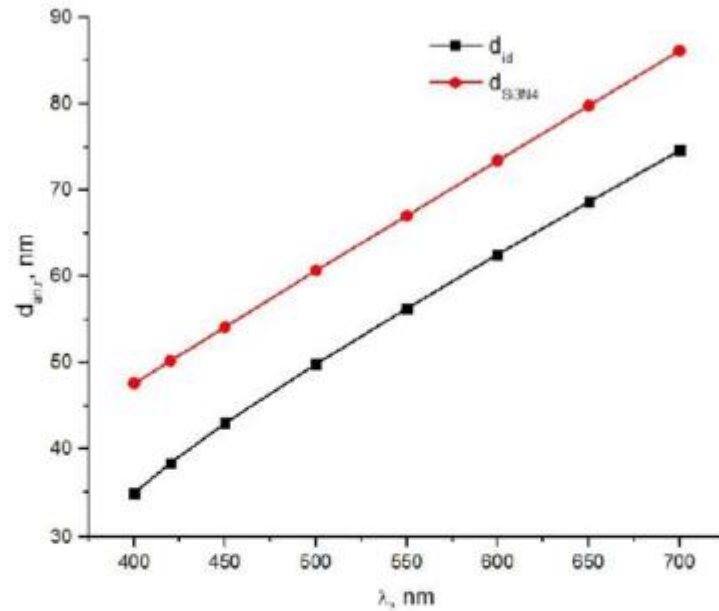
Şəkil 4.2.2 Dalğa uzunluğu 400 nm olan işıq selinin SiO₂-Si quruluşun səthindən səpilməsi və keçməsi.



Şəkil 4.2.3 Si , SiO₂ ,Si₃N₄ və optimal əks etdirici materiallar üçün müxtəlif dalğa uzunluqlarında sındırma əmsalalarının qiyməti.



Şəkil 4.2.4 Dalğa uzunluğu 400nm olan işıq selinin $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ quruluşun səthindən səpilməsi və keçməsi.



Şəkil 4.2.5 Si_3N_4 və optimal əks etdirici materialın qalınlığının dalğa uzunluqlarından asılılığı.

Reallıqda sındırma əmsalı belə olan maddə tapmaq mümkün olmur və sındırma əmsalının bu qiymətin yaxın olan maddə olaraq Si_3N_4 təbəqəsindən istifadə edilmişdir. Foton selinin 400 nm dalğa uzunluğunda sındırma əmsalı $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}(400 \text{ nm}) = 2,1$. Bu zaman foton selinin silisium daxilinə keçən payı kəskin artır. Düşən foton selinin bucağı $1-70^\circ$ arasında olduqda belə əks olunma bucağı maksimum 41° olur. Əks olunma payı isə $3 - 15 \%$ arasında dəyişə bilər. Silisiumun daxilinə nüfuz edən foton selinin payı isə $84 - 97 \%$ intervalında dəyişir və maksimum 97% yaxın olur (şək. 4.2.4). Bu halda düşən foton selinin əksəriyyəti silisium daxilinə nüfuz etdiyindən onları qeyd etmək mümkün olur. Si_3N_4 təbəqəsinin sındırma əmsalının qiymətinin optimal anti-əksetdiricinin sındırma əmsalına yaxın olması, MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunun səthinə düşən fotonların əksəriyyətinin səpilmədən birbaşa qeyd edilməsinə imkan verir.

Anti-əksetdirici olaraq Si_3N_4 seçildikdən sonra onun düzgün qalınlığının seçilməsi olduqca əhəmiyyətlidir. Anti-əksetdiricinin qalınlığını hesablamaq üçün aşağıdakı ifadədən istifadə edilmişdir [191, s.1237-1240]:

$$d_{a,r} = \frac{\lambda}{4 \times n_{a,r}} \quad (4.2.3)$$

Burada $d_{a,r}$ anti-əksetdiricinin qalınlığı, λ -düşən işığın dalğa uzunluğu və $n_{a,r}$ sındırma əmsalıdır. Şəkil 4.2.5-də 400 nm–700 nm dalğa uzunluqlu fotonların optimal qeyd edilməsini təmin edən anti-əksetdiricinin qalınlığı hesablanmışdır. Göründüyü kimi anti-əksetdiricinin qalınlığı dalğa uzunluğundan asılı olaraq 47 nm–85 nm arasında dəyişir. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodlarında maksimal kvant effektivliyinin 450 nm dalğa uzunluqda müşahidə edilməsi üçün silisiumla SiO_2 arasında yerləşən Si_3N_4 təbəqəsinin qalınlığı 53 nm tərtibində olmalıdır. Məhz MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodlarında belə anti-əksetdiricinin istifadə edilməsi MSFD-3NK fotodiodlarının FQE-sinin əvvəlki analoqlarına nisbətən 35% yüksək alınmasına imkan vermişdir [53, s.357-362].

4.3. MSFD tip fotodiodlarda selvari prosesi xarakterizə edən yeni iterativ model.

Tək elementli Heyger rejimli fotodiodlarda selvari prosesin düzgün başa düşülməsi hazırki MSFD fotodiodların parametrlərinin düzgün təyin edilməsi üçün olduqca vacibdir. Bir sıra tədqiqatçılar tərəfindən aparılan təcrübələrdə pikselin tutumu üçün alınan nəticələrlə nəzəri hesablanmış qiymət arasında kəskin fərq müşahidə edilmişdir. Yaranan bu fərq Haitizin və Covanın təklif etdiyi nəzəri yaxınlaşmalar vasitəsi ilə ifadə edilməsi mümkün deyildir. Buna səbəb isə həmin modellərdə həcmi yüklər oblastının müqavimətinin çox kiçik olduğunun qəbul edilməsi və onun selvari prosesə təsirinin nəzərə alınmaması idi. Lakin reallıqda həcmi yüklər oblastının müqavimətinin qiymətindən asılı olaraq Heyger rejimli selvari fotodiodların performansında ciddi dəyişmələr müşahidə olunur [45, c.962, s.287-289]. Məhz bu səbəbdəndə selvari fotodiodlarda baş verən bu dəyişməni düzgün izah edən yeni modelin işlənməsinə ehtiyac duyulurdu və ilk belə model bizim tərəfimizdən işlənmişdir. Modeldə həcmi yüklər oblastının müqavimətinin selvari prosesin daxili cərəyanına, xarici cərəyanına, gücləndirmə əmsalına və tək elementdəki gərginliyin zamandan asılı olaraq dəyişməsinə təsirinə baxılmışdır. Bununla yanaşı tək elementli Heyger rejimli fotodiodu xarakterizə edən yeni ekvivalent dövrə təklif edilmişdir. Təklif edilən ekvivalent dövrə şəkil 4.3.1- də göstərilmişdir. Bu dövrdə həcmi yüklər oblastının müqavimətində nəzərə alınmışdır. Dövrə tutumu sıfır olan boşalma kamerasından, R_s - həcmi yüklər oblastının müqavimətindən, R_q -söndürücü müqavimətdən, C_q -parazit tutumdan və C_{pik} - pikselin tutumundan ibarətdir. Pikselin tutumu U_d gərginliyi vasitəsi ilə yüklənməsi yalnız R_q müqaviməti vasitəsi ilə baş verir. Yaxınlaşma olaraq parazit tutumun pikselinin tutumundan çox kiçik olduğu qəbul edilmişdir. Bu dövrə üçün Om qanunu yazılmış və fotodiodu xarakterizə edən kəmiyyətlər hesablanmışdır. Xarici cərəyan

üçün: $J = J_{q1} + J_{q2} = \frac{U_d - U_p}{R_q} + \frac{\int_0^t J_{q2} \times dt}{R_q \times C_q}$, daxili cərəyan üçün: $I = qN_i / (\Delta t)$, elektrik

sahəsinin dəyişməsi üçün: $E_i = U_{si} / W$ və gücləndirmə əmsalının dəyişməsi üçün

bu: $M = \frac{C_p(U_d - U_{si.min})}{q}$ ifadələr alınmışdır [45, c.962, s.287-289, 157, c.3, s.9-19].

Təqdim edilən model sadə PİN quruluşlu fotodiodlar üçün hesablanmışdır. Belə bir

quruluşda elektronlar və deşiklər üçün gücləndirmə əmsalı bu forma ilə hesablanır $M_e = \exp(\alpha \times W)$ və $M_h = \exp(\beta \times W)$. Burada α və β elektron və deşiklər üçün ionizasiya əmsalı və W – selvari proses baş verən oblastın qalınlığıdır. Yükdaşıyıcıların ionizasiya əmsalı tətbiq edilən elektrik sahəsindən asılı olaraq dəyişir. Tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyindən böyük və ya ona bərabər olduqda selvari proses baş verir. Anod yaxınlığında ilkin $t=0$ anında yaranan fotoelektronlar $N_{01} = 1$ güclü sahənin təsiri ilə i -təbəqəsində katoda doğru nüfuz edir. Bu zaman elektronun diffuziya müddəti belə hesablanır $\tau = \frac{W}{v}$, burada v - dreyf sürəti və W isə i layının enidir. Katodla i -kecidin sərhədində mövcud olan maksimal elektrik sahəsinin təsiri ilə maksimal yaranan elektronların sayı $N_1 = \exp(\alpha_1 \times W)$ olur. Bu zaman anoda doğru hərəkət edən deşiklərin sayı $P_{02} = [\exp(\alpha_1 \times W) - 1]$, $E_1 = (U_1/W)$ olur, hansı ki $\alpha_1 = \alpha(E = E_1)$ və $U_1 = U_d$ olur. Anoda doğru hərəkət edən deşiklər anodla i layın sərhədində $2 \times \tau$ müddətindən sonra yeni N_{02} sayda elektron yaradır və yenidən selvari prosesin ikinci mərhələsi baş verir. Bu zaman selvari prosesi başladan elektronların sayı $N_{02} = [\exp(\alpha_1 \times W) - 1] \times [\exp(\beta_1 \times W) - 1]$ olur. Burada β_1 – E_1 elektrik sahəsində deşiklər üçün ionizasiya əmsalıdır $\beta_1 = \beta(E = E_1)$. Elektrik sahəsinin azalması selvari proses zamanı yaranan yük hesabına baş verir və elektrik sahəsi belə ifadə olunur $E = E_2 = (U_{s2}/W)$ və ionizasiya əmsalı isə belə ifadə olunur $\alpha_2 = \alpha(E = E_2)$, $\beta_2 = \beta(E = E_2)$. Katod yaxınlığında yaranan elektronların sayı isə $N_2 = N_{02} \times \exp(\alpha_2 \times W) = [\exp(\alpha_1 \times W) - 1] \times [\exp(\beta_1 \times W) - 1] \times \exp(\alpha_2 \times W)$ olur. Əgər selvari proses i sayda baş verərsə bu zaman yaranan elektronların tam sayı $N_i = \prod_{j=2}^i \{[\exp(\alpha_{j-1} \times W) - 1] \times [\exp(\beta_{j-1} \times W) - 1] \times \exp(\alpha_j \times W)\}$ $i \geq 2$; elektrik sahəsinin dəyişməsi isə $E_i = U_{si}/W$ olur. Bu zaman spark gəpə düşən gərginlik selvari prosesin i toqquşmasından asılı olaraq bu qanuna uyğunluqla dəyişir [45, c.962, s.287-289, 52, c.15, s.1-8, 157, c.3, s.9-19]:

$$U_{si} = U_{s(i-1)} + \frac{U_d - U_{s(i-1)}}{(C_p + C_q) \times R_q} \times 2\tau - \frac{q \times N_{(i-1)} \times R_s}{(C_p + C_q) \times R_q} - \frac{q N_{(i-1)}}{(C_p + C_q)} - R_s \times \frac{q(N_i - N_{i-1})}{2\tau} \quad (4.3.1)$$

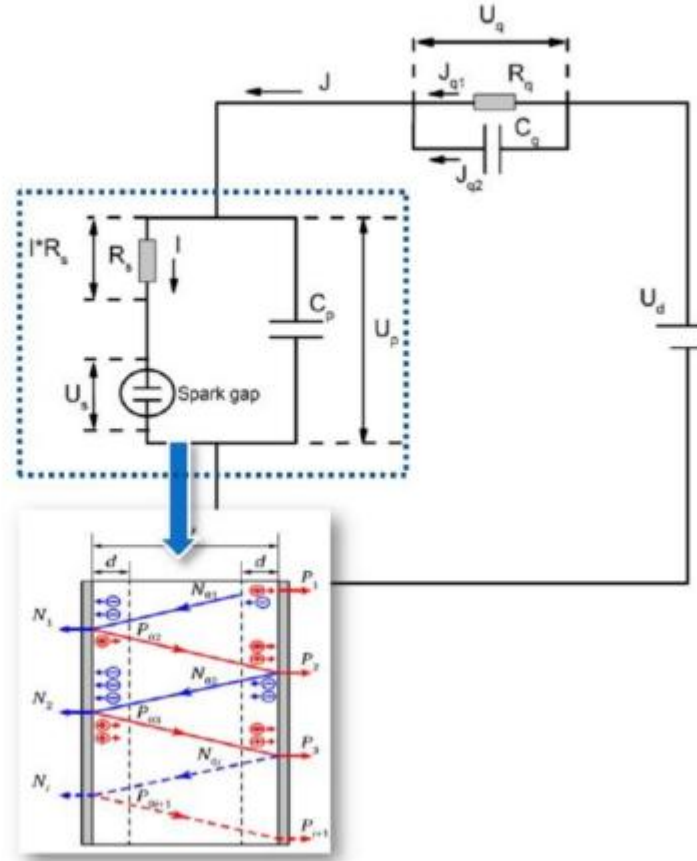
Bu zaman söndürücü müqavimətdən axan xarici cərəyanaşağıda göstərilən qanunauyğunluqla dəyişir:

$$J_i = \frac{C_p(U_d - U_{s(i-1)})}{(C_p + C_q) \times R_q} - \frac{C_p R_s q N_{(i-1)}}{R_q (C_p + C_q) \Delta t} + \frac{q \times N_{i-1}}{\Delta t} \left(\frac{C_q}{(C_p + C_q)} \right) \quad (4.3.2)$$

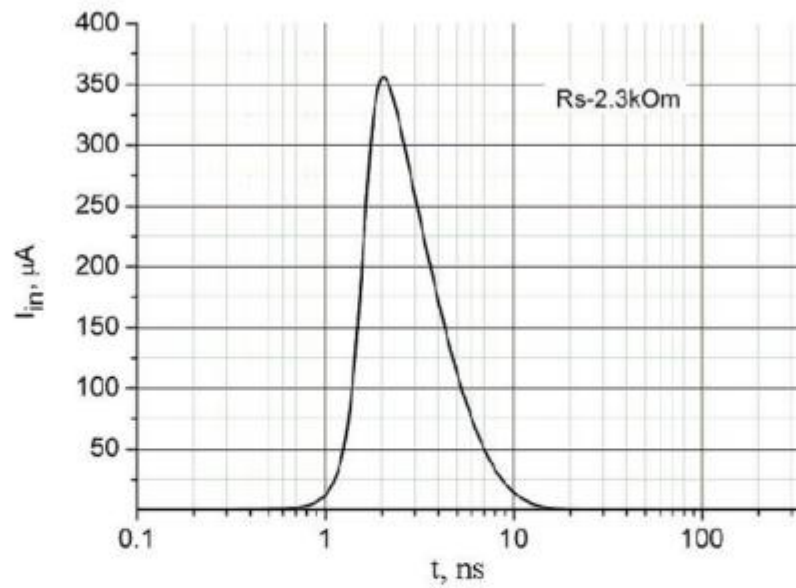
Selvari oblastın daxili cərəyanı belə ifadə edilir $I = qN_i / (\Delta t)$. Burada N_i – i sayda toqquşmada yaranan elektronların sayı, τ - yükdaşıyıcıların i oblastını uçma müddəti, U_d - fotodiod tətbiq edilən gərginlik, U_{br} - deşilmə gərginliyi, R_q - söndürücü müqavimət və R_s - həcmi yüklər oblastının müqavimətidir. Beləliklə, yaranan elektronların sayı artdıqca analogi olaraq sahədə azalır. Yüksək gərginlikdə elektronların yaranma sürəti maksimum həddə çatır və tədricən sahə azalır. Fotodioda düşən gərginlik deşilmə gərginliyinə bərabər olduqda maksimal sayda elektronlar yaranır. Yaranan bu elektronlar sahənin deşilmə gərginliyindən aşağı gərginliyə düşməsinə gətirir. Bu zaman yaranan yüklərin miqdarı təqribən elə ön frontda yaranan elektronlar qədər olur. Nəticədə fotodioda tətbiq edilən gərginlik ifrat gərginlik qədər yenidən aşağı düşür. Bu dəyişməni daxili cərəyanın və gərginliyin zamandan asılı olaraq dəyişməsindən görmək olar. İfrat gərginlik 1 V olduqda daxili cərəyanın dəyişməsindən görünür ki, maksimal cərəyan məhz deşilmə gərginliyində müşahidə edilir $I = 0,35$ mA (şəkil 4.3.2). Əgər həcmi yüklər oblastının müəyyən bir müqavimətə (R_s) malik olduğunu desək bu zaman asanlıqla bu müqavimətə düşən gərginliyi hesablamaq olar $U_s = I \times R_s = 0,35$ mA \times 2,3 kOm = 0,8 V. Beləliklə, göründüyü kimi fotodiodun gücləndirmə əmsalı bu gərginlikdən asılı olaraq azalır. Bu zaman ifrat gərginlik 1 V və həcmi yüklər oblastına düşən gərginlik isə 0,8 V olur.

Təqdim edilən modelin doğruluğunu yoxlamaq üçün Zekotek Fotniks və Laser Components firmasının iki fərqli tək elementli fotodiodundan istifadə edilmişdir. Zekotek Fotniks firmasının istehsalı olan fotodiodun sahəsi 35 mkm \times 35 mkm və Laser Components firmasının istehsalı olan fotodiodun diametri 500 mkm olmuşdur. Laser Components firmasının həcmi yüklər oblastının eni 25 mkm olmuşdur. Zekotek

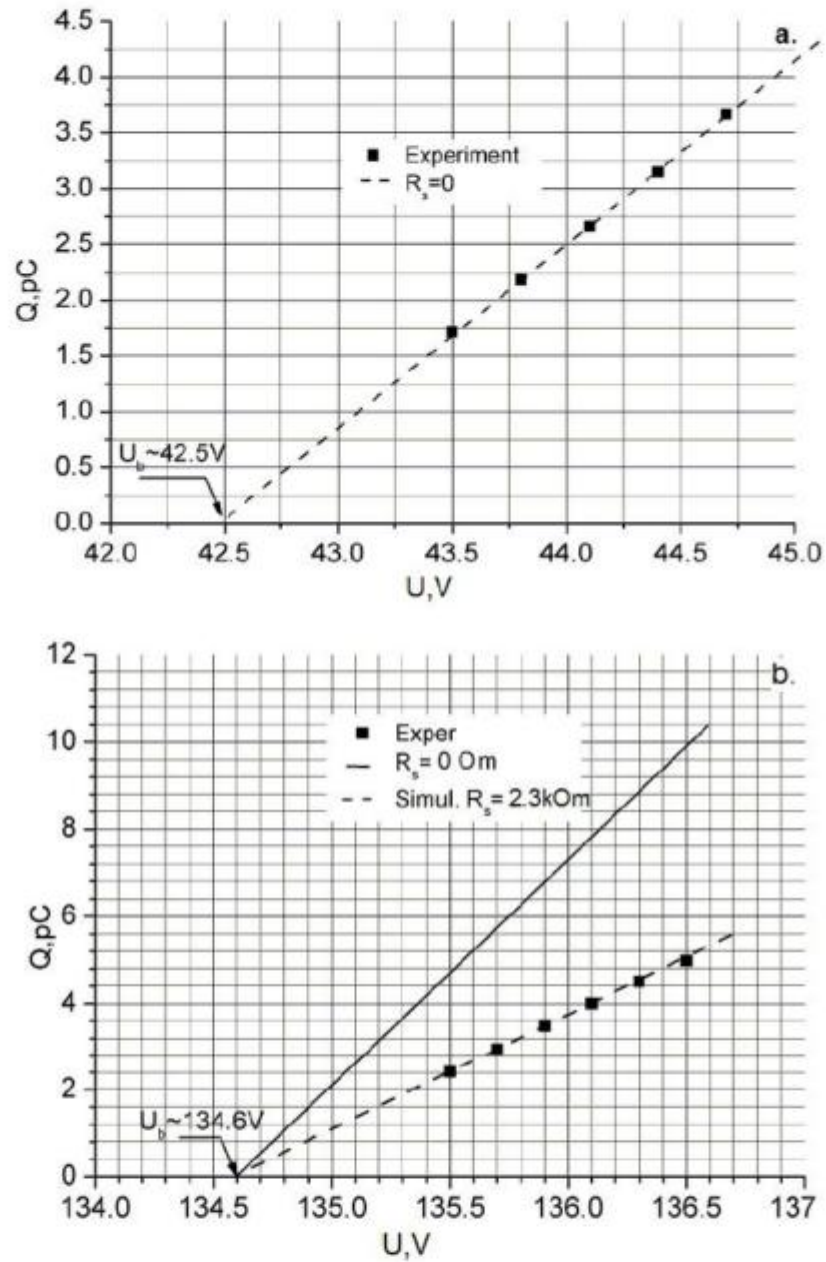
Fotoniks firmasının istehsalı olan fotodiodun terminal tutumu 0,9 pF olmuşdur. Şəkil 4.3.3-də müxtəlif gərginlikdə hər iki tip fotodiod üçün yükün gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur. Zekotek Fotoniks firmasının fotodiodu üçün təcrübi $Q \sim U$ asılılığından tapılmış effektiv tutumun qiyməti görüldüyü kimi terminal tutumun $C_{\text{eff}} = \partial Q / \partial U_d = 1,7 \text{ pF}$ qiymətinin təqribən 2 mislinə bərabər olmuşdur (şəkil 4.3.3 (a)). Alınan nəticənin yeni verilmiş modellə izah etmək üçün R_s çox kiçik olduğu qəbul edilmiş və bu zaman təcrübi ilənəzəri nəticələr tam uyğunluq təşkil etmişdir. Bu fotodiodun deşilmə gərginliyi 42,5 V olmuşdur. Lakin alınmış bu nəticələr Laser Components firmasının tək elementli fotodiodu üçün ödənməmişdir (şəkil 4.3.3 (b)). Görüldüyü kimi tutumun yükün gərginlikdən asılılığından tapılmış qiyməti fotodiodun terminal tutumun ölçülən qiyməti ilə üst-üstə düşür [45, c.962, s.287-289]. Təqribən 2,7 pF olur və selvari proses zamanı fotodiodda düşən gərginliyin deşilmə gərginliyindən ifrat gərginlik qədər aşağı düşməsinə imkan vermir və dəyişmə çox kiçik olur. Bu nəticə fotodiodda baş verən tək elektronlu selvari prosesin təbiəti ilə bağlı ola bilər. Selvari proses baş verən hissənin en kəsiyi fotodiodun ümumi en kəsiyədən çox kiçik olur. Bu halda selvari proses zamanı pikselin tutumunun müəyyən hissəsi pikselin səthi müqavimətinin böyük olması hesabına boşala bilmir. Bundan başqa selvari proses zamanı həcmi yüklər oblastında boşalma prosesinə təsir edir. Həcmi yüklər oblastının müqavimətini hesablamaq üçün p-n-n quruluşlu kəskin keçidlərdə tətbiq edilən gərginlik deşilmə gərginliyinə bərabər olduqda elektrik sahəsi p-n keçiddə maksimum olur. Bu zaman yaranan yükdaşıyıcıların həcmi yüklər oblastında doyma sürəti (v_s) ilə hərəkət etdiyini qəbul etsək onda axan cərəyanı belə ifadə etmək olar: $\dot{I} = v_s \times \rho \times A$, burada ρ – yükdaşıyıcıların sıxlığı və A -isə p-n keçidinin sahəsidir. Elektrik sahəsinin gücünün həcmi yüklər oblastının yükündən asılı olaraq dəyişməsinə baxmaq üçün Puasson bərabərliyindən istifadə etmək olar: $dU^2/d^2x = dE/dx = \rho / \epsilon_s$ və buradan da bu ifadəni almaq olar $\Delta E(x) = \dot{I} \times x / (v_s \times \epsilon_s \times A)$. Daha sonra yuxarıda göstərilən Puasson ifadəsindən istifadə edərək həcmi yüklər oblastına düşən gərginliyin dəyişməsinə müəyyən etmək olar və bu dəyişmə belə ifadə olunur $\Delta U_b = \dot{I} \times x / (v_s \times \epsilon_s \times A) dx = \dot{I} \times W^2 / (2v_s \times \epsilon_s \times A)$. Beləliklə, həcmi yüklər ifadədən istifadə



Şəkil 4.3.1 Təklif edilən modelə uyğun gələn ekvivalent dövrə [45, c.962, s.287-289, 52, c.15, s.1-8].



Şəkil 4.3.2 Laser Component şirkətinin fotodiodu üçün simulyasiya edilmiş daxili cərəyanın zamandan asılılığı.



Şəkil 4.3.3 Bir piksellə qeyd edilən tək fotoelektronlu impulsa uyğun gələn yükün gərginlikdən asılılığı: a- Zecotek Photonic şirkətinin fotodiodu, b- Laser Components şirkətinin fotodiodu.

edərək Laser Components şirkətinin diodunun həcmi yüklər oblastının müqaviməti hesablanmışdır [45, c.962, s.287-289]:

$$R_s = \frac{W^2}{2\varepsilon \times \varepsilon_0 \times S_p \times v_s} = \frac{W^2}{2\varepsilon \times \varepsilon_0 \times \frac{\pi \times L^2}{4} \times v_s} = \frac{2}{\varepsilon \times \varepsilon_0 \times \pi \times v_s} \times \left(\frac{W}{L}\right)^2$$

$$= 61 \text{ kOhm} \times \left(\frac{W}{L}\right)^2$$

Burada, W- həcmi yüklər oblastının eni, L- tək fotoelektronun baş verdiyi selvari kanalın diametri, ε_s -dielektrik nüfuzluğu və v_s -yükdaşıyıcının doyma sürətidir.

Beləliklə, həcmi yüklər oblastının müqavimətinin hesablanması üçün alınmış bu ifadədən istifadə edərək Laser Components firmasının fotodiodu üçün modelin ödənməsi üçün həcmi yüklər oblastının müqavimətinin $R_s=2,3 \text{ kOm}$ olduğu müəyyən edilmişdir. Bu zaman selvari kanalın diametri $L \approx 129 \text{ mkm}$ (R4523 fotodiodu üçün $W=25 \text{ mkm}$) olmuşdur. İfrat gərginlik artdıqca fotodiodun gücləndirmə əmsalı düz mütənasib olaraq artır. Lakin həcmi yüklər oblastının müqavimətinə düşən gərginlik isə gücləndirmə əmsalının azalmasına səbəb olur. Gücləndirmə əmsalının həcmi yüklər oblastının müqavimətindən asılılığı şəkil 4.3.4-də verilmişdir. Göründüyü bu müqavimət artdıqca gücləndirmə əmsalı azalır və reallıqda isə gərginliyin müəyyən hissəsi həmişə R_s müqavimətinə düşür.

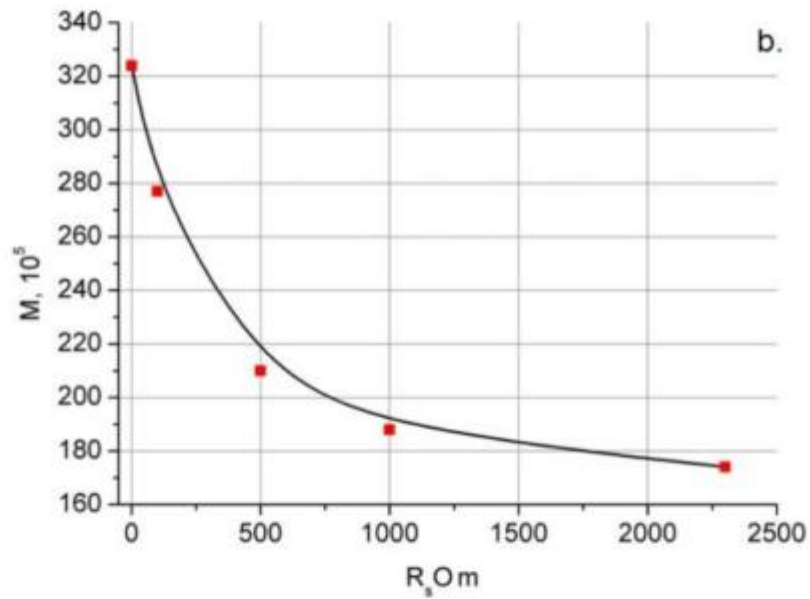
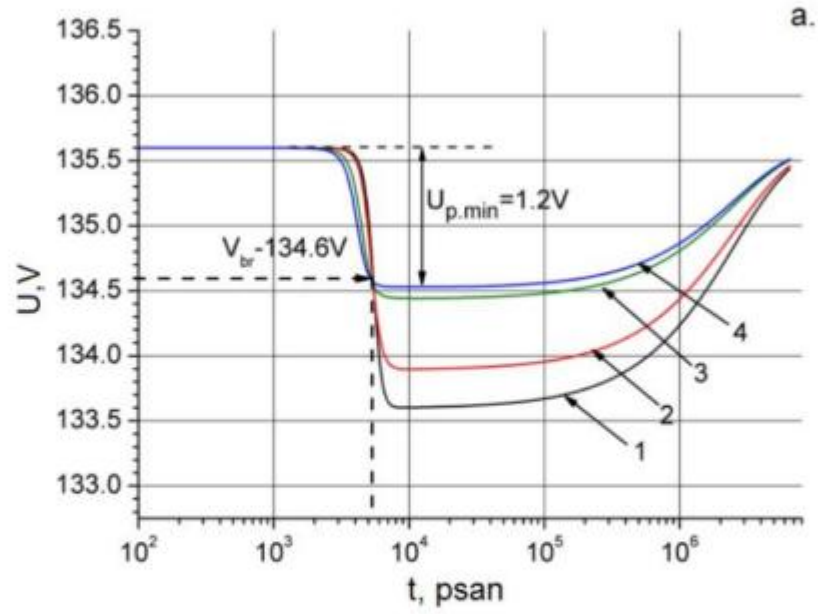
Şəkil 4.3.4-də selvari proses zamanı pikselə düşən potensialın dəyişməsi və tək elektronun gücləndirmə əmsalının R_s -in müxtəlif qiymətlərindən asılılığı göstərilmişdir. Pikselin maksimum boşalma gərginliyi $\Delta U_{dis.} = U_d - U_{p,min}$ və gücləndirmə əmsalı R_s həcmi yüklər oblastının müqaviməti artdıqca azalır. Göründüyü kimi eyni bir ifrat gərginlikdə R_s müqavimətini 0–2,3 kOm intervalında [40] dəyişdikdə gücləndirmə əmsalı təqribən iki dəfə artır. Beləliklə, eyni bir ifrat gərginlikdə maksimal gücləndirmə əmsalı almaq üçün (W/L) nisbəti gərək 0,01 ($R_s < 50 \text{ m}$) kiçik olsun. Başqa sözlə kiçik ölçülü MSFD fotodiodlar əsasında aşağı deşilmə gərginlikli və yüksək gücləndirmə əmsallı fotodiodlar hazırlamaq daha əlverişli hesab edilir. Beləliklə yeni verilmiş modelə əsasən selvari fotodiodların

gücləndirmə əmsalı üçün analogi $C_{\text{pik}} \times \Delta U_p$ ifadəsindən fərqli olaraq aşağıdakı ifadə alınmışdır [52, c.15, s.1-8]:

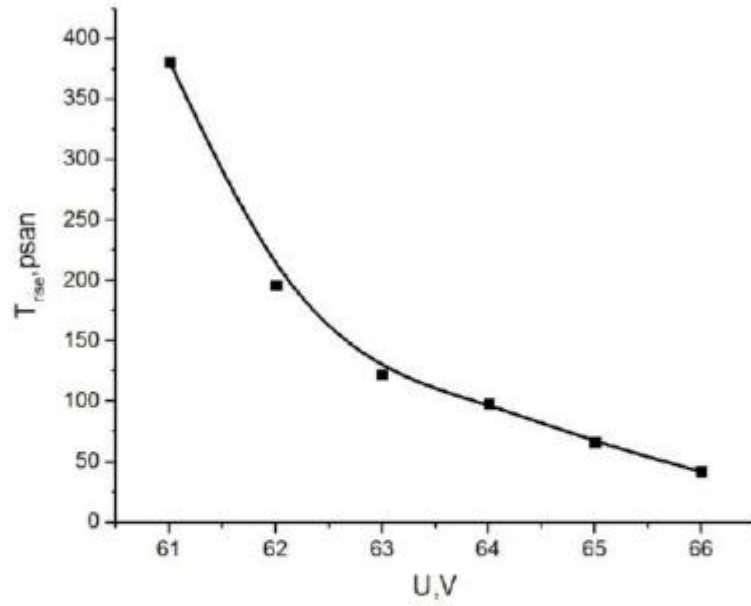
$$M = m \times C_{\text{pik}} \times \Delta U_p = C_{\text{ef}} \times \Delta U_p \quad (4.3.3)$$

Burada C_{pik} -pikselin tutumu, C_{ef} – pikselin effektiv tutumu, ΔU_p -pikselə düşən ifrat gərginlik və m -sabitdir. Bu ifadəyə daxil m sabiti R_s həcmi yüklər oblastının müqavimətindən asılı olaraq 1–2 arasında dəyişir. Sabit həcmi yüklər oblastının müqavimətində m sabitinin tapılması pikselin tutumunun (C_{pik}) tapılması ilə mümkün olur və böyük tutumlarda kiçik m sabiti alınır. Həmçinin də müəyyən edilmişdir ki, eyni bir ifrat gərginlikdə R_s həcmi yüklər oblastının müqaviməti artdıqca gücləndirmə əmsalı azalır.

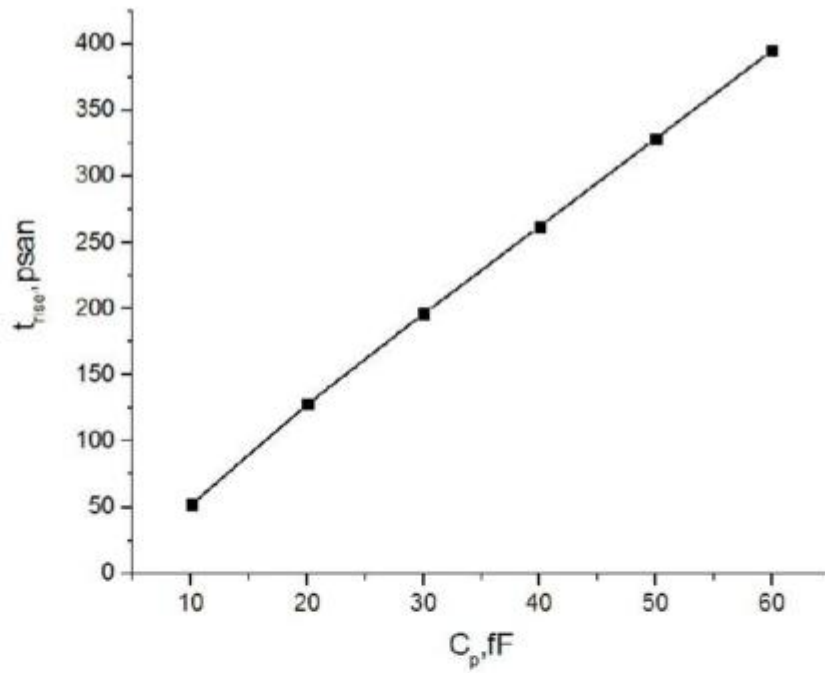
Yeni təklif edilən modelin SPAD fotodiodların cəldliyinə ifrat gərginliyin (şəkil 4.3.5), pikselin tutumunun (şəkil 4.3.6), parazit tutumun (şəkil 4.3.7) və gücləndirmə əmsalının (şəkil 4.3.8) təsirində müəyyən etməyə imkan vermişdir. SPAD fotodiodların cəldliyinə ifrat gərginliyintəsirini müəyyən etmək üçün tutumu $C_{\text{pik}}=20$ fF olan deşilmə gərginliyi $V_{\text{br}}=60$ V olan fotodiod seçilmişdir. İlk olaraq tək fotoelektronlu siqnalın ön frontunun ifrat gərginlikdən asılılığına baxılmışdır (şəkil 4.3.5). Gərginlik artdıqca görüldüyü kimi fotosiqnalın ön frontu kəskin azalır və bu azalma selvari oblastda yükün yaranması prosesinin daha qısa müddət ərzində baş verməsi ilə bağlı olmuşdur. Bu zaman ön frontun azalması 360 psan-dan 45 psan-yə qədər azalamışdır. Daha sonra pikselin tutumunun siqnalın ön frontuna təsiri öyrənilmişdir. Bu zaman fotodiodun tutumu 10 fF – 60 fF intervalında dəyişdirilmişdir (şəkil 4.3.6). Məlum olmuşdur ki, eyni bir gücləndirmə əmsalında ön frontun qalxma müddəti tutum artdıqca xətti olaraq artır və 50 psan-dan 400 psan-yə qədər dəyişir. Lakin bütün tutumlar üçün ifrat gərginliyi eyni seçdikdə isə ön frontun qalxma müddəti demək olar bütün hallarda 131 psan tərtibində olmuşdur. Parazit tutumun təsirini tədqiq etmək üçün parazit tutumun $C_x=4 \times 10^{-17} - 4 \times 10^{-15}$ F intervalında dəyişdiyini qəbul edərək ön frontun tutumundan asılı olaraq dəyişməsinə baxılmışdır (şəkil 4.3.7-a). Məlum olmuşdur ki, ön frontun azalması 1×10^{-16} F qədər



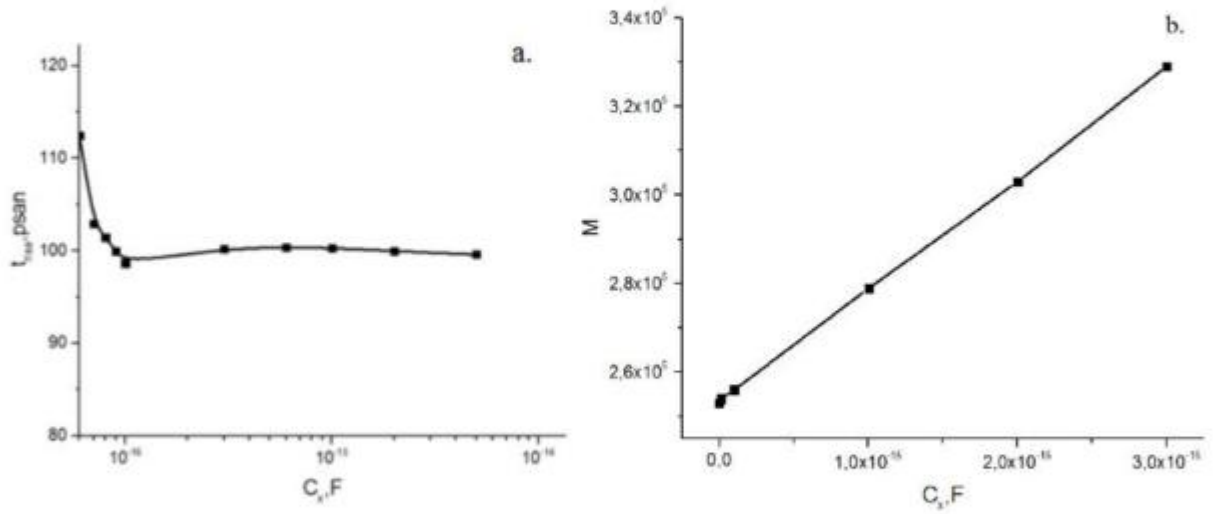
Şəkil 4.3.4 Laser Component şirkətinin piksellinə düşən gərginliyin zamandan (a.) və gücləndirmə əmsalının həcmiyyəklər oblastının müqavimətindən asılılığı (b.): 1- $R_s=1$ Om; 2- $R_s=100$ Om; 3- $R_s=1$ kOm; 4- $R_s=2,3$ kOm.



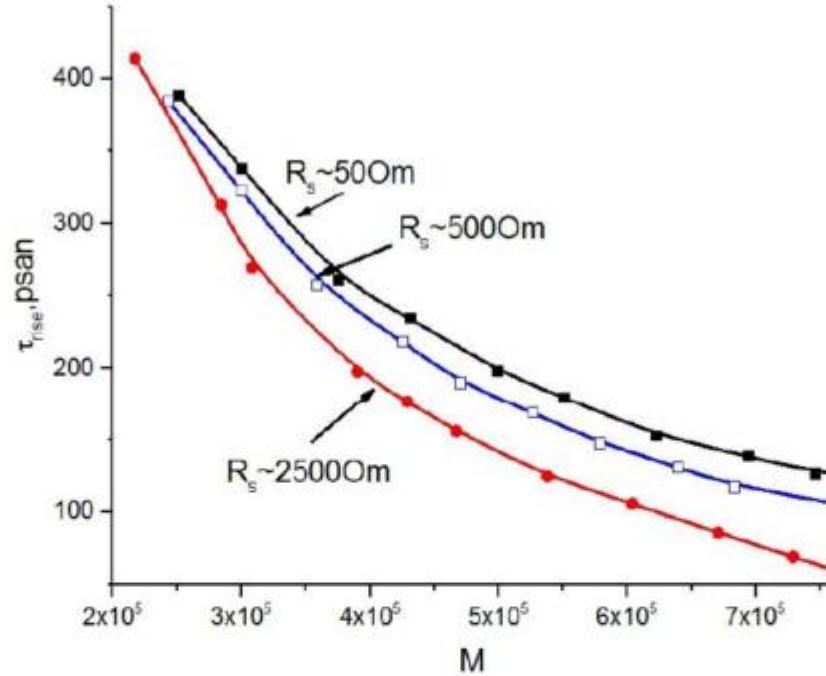
Şəkil 4.3.5 Selfari fotodiodun ön frontunun tətbiq edilən gərginlikdən asılılığı.



Şəkil 4.3.6 Selfari fotodiodun ön frontunun sabit ifrat gərginlikdə pikselin tutumundan asılılığı.



Şəkil 4.3.7 Selvari fotodiodun ön frontunun və gücləndirmə əmsalının sabit ifrat gərginlikdə parazit tutumdan asılılığı.



Şəkil 4.3.8 Selvari fotodiodun ön frontunun həcmi yüklər oblastının müxtəlif müqavimətlərində gücləndirmə əmsalından asılılığı.

davam etmiş və tutumun sonrakı artımlarında ($1 \times 10^{-16} - 4 \times 10^{-15}$ F) isə dəyişmə müşahidə edilməyərək doyma halına yaxınlaşmışdır və 100 psan olmuşdur. Bununla yanaşı gücləndirmə əmsalında parazit tutum artdıqca kəskin artmışdır (şəkil 4.3.7-b) [166, c.824, s.137-138]. Beləliklə, MSFD fotodiodların ön frontunun davam etmə müddətini yaxşılaşdırmaq üçün parazit tutum pikselin tutumunun 1 %-dan yüksək olmalıdır. Sıqnalın ön frontuna həcmi yüklər oblastının müqavimətinin təsirini müəyyən etmək üçün 3 müxtəlif 50 Om, 500 Om və 2500 Om müqavimətli həcmi yüklər oblastı seçilmişdir. Şəkil 4.3.8-dan görüldüyü kimi eyni bir gücləndirmə əmsalında müqavimət artdıqca sıqnalın ön frontunun davam etmə müddəti azalaraq yaxşılaşır. Yuxarıda göstəriləyi kimi, həcmi yüklər oblastının müqaviməti böyüdükcə gücləndirmə əmsalı azalır və spark gapa düşən gərginliyin müəyyən hissəsi həcmi yüklər oblastının müqavimətinə düşür və nəticədə sıqnalın frontu pisləşir [50, s.1]. Həcmi yüklər oblastının müxtəlif qiymətlərində fotodiodların eyni bir gücləndirmə əmsalı alması üçün fərqli gərginliklər tətbiq edilmişdir. Məhz sıqnalın frontunu tətbiq edilən ifrat gərginlik müəyyən etdiyindən yuxarı R_s -lərdə daha yüksək ifrat gərginlik tətbiq edilir və nəticədə frontun yaxşılaşması müşahidə edilir. Bu əyri şəkil 4.3.5- də göstərilən əyri ilə analogi qanunla dəyişir.

4.4. MSFD fotodiodlar əsasında 16 elementli matrislərin hazırlanması

Tək elementli MSFD fotodiodlar birçox sahələrdə geniş tətbiq olunma imkanlarına malikdirlər. Radiasiya detektorlarının hazırlanması zamanı onlarda istifadə edilən ssintilyatorların materiallarının və ölçüsünün düzgün seçilməsi olduqca mühümdür. Bu parametrlər qeydediciyə şüalanmanın tipinin, enerjisinin və sayının dəqiq təyin edilməsinə imkan verir. Belə olduğu halda yaranan ssintilyasiya fotonlarının tam qeyd edilməsi olduqca vacibdir. Bu məqsədlə tək elementli fotoqeydedicinin istifadə edilməsi əlverişsiz hesab edilir. MSFD fotodiodların sahəsinin artırılmasının texnoloji olaraq bir sıra çətinlikləri mövcuddur: silisiumda mövcud olan sadə və mürəkkəb defektlər, quruluşun hazırlanması zamanı kənar hissəciklərin daxil olması, aşqarlanma prosesi zamanı konsentrasiyada kəskin kənara

çıxmaların olması və digər hadisələr. Yuxarda sadalanan hadisələr selvari fotoqeydedicilərin eyni bir p-n keçidinin müxtəlif yerlərində zərbə ilə ionizasiya hesabına baş verən güclənmənin müxtəlif gərginlikdə baş verməsinə və qaranlıq sayın artmasına gətirib çıxarır. Fotoqeydedicilərin həssas sahəsini artırmaqla bağlı olan bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün hazırda çox elementli qeydedicilərin tətbiq olunması daha effektiv metod sayılır. Belə çox elementli fotoqeydedicilərin qoşulma formasından asılı olaraq onlar kordinatı və enerjini təyin etməyə imkan verir.

Selvari fotoqeydedicilər əsasında 4×4 elementli böyük sahəli qeydedicinin korpusu hər bir üzü 0,04 mm qalınlıqlı metallik qatla əhatə edilmiş toplam qalınlığı 2 mm-lik tekstalit əsasında hazırlanmışdır. Selvari fotoqeydedicilər üçün nəzərdə tutulan 4×4 elementli korpus aşağıdakı mərhələ ilə hazırlanmışdır:

- Çox elementli korpusda olan hər MSFD fotoqeydedici üçün fərdi çıxış və gərginlik kanalının hazırlanması.
- Parametrləri yaxın olan MSFD fotoqeydedicilərin seçilməsi
- Çox elementli korpusda olan hər selvari fotoqeydedicinin nizamlı düzülməsi
- MSFD fotoqeydedicilərin anodlarının və katodlarının mikro qaynaq qurğusu ilə nizamlı birləşdirilməsi
- Qaynaq edilmiş MSFD fotoqeydedicilərin test edilməsi və səthin qoruyucu şəffaf epoksid layı qapanması.

İlk olaraq altlığın fotoqeydedicilər yerləşən yuvası bütün səth boyunca 0,5 mm dərinlikdə təmizlənir (şəkil 4.4.1). Daha sonra hər fotoqeydedicinin yerləşməsi nəzərdə tutulan yuvaların 4 tərəfində tərəflərinin uzunluğu-1 mm olan və eni- 0,5 mm olan L şəkilli metallik hissələr hazırlanmış və onlar arası boşluq 2 mm olmuşdur. Metallik hissələrin qalınlığı 0,04 mm olmuşdur. L şəkilli metallik hissələr çox elementli korpusda hər fotoqeydedicinin öz yerinə nizamlı formada yerləşməsini təmin edir. Hər yuvanın mərkəzində fotoqeydedicinin katodundan məlumatın götürülməsini həyata keçirmək üçün eni və uzunluğu eyni olan (2 mm) metallik hissələr yaradılmışdır. Belə böyük metallik hissələr ilə L şəkilli metallik hissələr arası məsafə hər tərəfdən 0,5 mm seçilmişdir. Bu metallik hissələrin mərkəzləri arasındakı

məsafə 4,2 mm olmuşdur. Hər fotoqeydedici arasındakı boşluq 0,2 mm seçilmişdir. Fotoqeydedicinin katodundan alınan siqnalın dövrüyə ötürülməsini təmin etmək üçün altlığın digər üzündə də analogi ölçüdə metallik hissələr yaradılmış və bu hissələr bir-biri ilə birləşdirilmişdir. Beləliklə siqnalın hər 16 fotoqeydedicinin katodundan ayrıca götürülməsi tam təmin edilmişdir. Korpusda yerləşən selvari fotoqeydedicilərin anodunu qidalandırmaq üçün korpusun qıraqlarından 0,2 mm intervalda qalınlığı 0,04 mm olan düzbucaq şəkilli (0,6 mm × 16,8 mm) iki metallik hissələr hazırlanmışdır. Bu hissələr korpusun həssas səthində bir-birinə paralel olmaqla 17,4 mm uzaqlıqda yerləşmişdir. Eyni ilədə bu hissələrdən iki ədədi korpusun həssas səthindəkinə analogi olaraq onun alt hissəsində və bununla yanaşı onun alt hissəsində bir ədəd T formalı metallik hissə hazırlanmışdır. Bütün bu metallik hissələr bir-birinə birləşdirilmişdir. Başqa sözlə fotoqeydedicilərin korpusda fərdi işləməsi tam təmin edilmişdir. Korpusa yerləşdiriləcək fotoqeydedicilərin xarici təsirlərdən qorumaq üçün onun səthi eboksit layı ilə örtülməlidir. Nəzərə alsaq ki fotoqeydedicinin tam qalınlığı 0,7 mm-dir və bu zaman onu altlıqda açılan yuvaya yerləşdirsək (yuvanın dərinliyi 0,5 mm olmuşdur) fotoqeydedicinin qalınlığının 0,2 mm hissəsi korpusdan çöldə qalır. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün korpusun 4 tərəfinə kvadrat şəkilli ölçüləri: $19 \times 19 \text{ mm}^2$, eni– 1 mm və qalınlığı- 0,8 mm olan hissələr yapışdırılmışdır. Bu hissələrin üzərində selvari fotoqeydedicilərin anodunu qidalandırmaq nəzərdə tutulmuş analogi metallik hissələr yaradılmışdır. Növbəti mərhələdə bütün metallik hissələrin zaman keçdikcə oksidləşməsini aradan qaldırmaq və qayanğın keyfiyyətini yaxşılaşdırmaq üçün səthləri nazik qızıl təbəqəsi ilə bağlanmışdır. Beləliklə fotoqeydedicilər korpusa yerləşdirərkən onun səthində 0,1 mm qalınlıqlı (0,8 mm – 0,7 mm = 0,1 mm) boşluq qalır. Bu boşluq isə sonuncu mərhələdə edilməsi planlaşdırılan şəffaf olan eboksit üçün nəzərdə tutulmuşdur. Beləliklə ionlaşdırıcı radiasiya detektorlarının hazırlanmasında nəzərdə tutulan yeni 16 elementli qeydedicinin tam eni -19 mm və uzunluğu 19 mm olmuşdur. Yeni 16 elementli matrisin fotoqeydediciləri üçün nəzərdə tutulan tam sahəsini hesablamaq üçün bir qeydedici üçün nəzərdə tutulmuş sahəni onların sayına vurmaq lazımdır. Bizim halda korpusda bir fotoqeydedici üçün nəzərdə tutulan sahə $4,2 \text{ mm} \times 4,2 \text{ mm} = 17,64 \text{ mm}^2$

olmuş və 16 qeydedici üçün isə bu sahə $S_{yuva} = 16 \times 17,64 \text{ mm}^2 = 282,24 \text{ mm}^2$ olmuşdur. Nəzərə alsaq ki hər qeydedicinin kənarı ilə korpusun hər yan tərəfləri arasında 0,1 mm məsafə qalır və bu boşluğun sahəsi $S_{boş.} = 0,1 \text{ mm} \times 17 \text{ mm} \times 4 = 6,8 \text{ mm}^2$ olur. Beləliklə 16 elementdən ibarət matrisin qeydedici pəncərəsinin sahəsi $S_{q.pəncərə} = S_{yuva} + S_{boş} = 282,24 \text{ mm}^2 + 6,8 \text{ mm}^2 = 289,04 \text{ mm}^2$ olmuşdur. Yeni hazırlanmış korpusda tam ölçüsü 4 mm \times 4 mm olan dərin pikselli 3NK fotoqeydediciləri istifadə ediləcəkdir. Fotoqeydedicinin özünün həssas sahəsi isə 3,7 mm \times 3,7 mm olmuşdur. Beləliklə yuxarda aparılan hesablamaları analoji olaraq fotoqeydedicilərin tam həssas sahəsi üçün aparsaq onda $S_{t.həssas} = 3,7 \text{ mm} \times 3,7 \text{ mm} \times 16 = 219 \text{ mm}^2$ alarıq. Artıq yeni hazırlanmış 16 elementli qeydedicinin qeydedici pəncərəsinin sahəsi və tam həssas sahəsi müəyyən edildikdən sonra onun həndəsi faktoru hesablanılır (GF):

$$GF = \frac{S_{t.həssas}}{S_{q.pəncərə}} = \frac{219 \text{ mm}^2}{289,04 \text{ mm}^2} = 76 \%$$

Burada $S_{q.pəncərə}$ - qeydedici pəncərəsinin sahəsi və $S_{t.həssas}$ - fotoqeydedicilərin tam həssas sahəsidir (fotoqeydedicinin ölçüsündən asılı olaraq dəyişir). Bununla yanaşı belə çox elementli qeydedicilərdə fotodiodların sayı yüksəldikcə onların GF-si kəskin azalır. Aparılan hesablamalar göstərmişdir ki bir çox parametrlərə görə 4 \times 4 elementli qeydedicilərin yığılması daha məqsədə uyğundur. Artıq çox elementli qeydedici üçün korpus hazırlandıqdan sonra növbəti mərhələdə selvari fotoqeydedicilərin seçilməsi həyata keçirilir. Bunun üçün zavoddan alınan silisium altlığın yaxın ətrafından fotoqeydedicilər seçilir. Fotoqeydediciləri silisium altlıqdan seçərkən MP-200 zond qurğusu istifadə edilmişdir. Bu qurğunun zond iynələri vasitəsi ilə fotoqeydedicilərin anod və katoduna gərginlik verməklə yanaşı həmçinin də siqnalı götürmək mümkündür. Qurğunun zondları mikroskop altında 1 mkm dəqiqliklə hərəkət etdiyindən silisium altlığın istənilən nöqtəsindəki fotoqeydedicini yoxlamaq olur. Daha sonra zondlardan birinə Keithley-4867 qurğusu qoşulur. Bu qurğu zond vasitəsi ilə qeydedicilərə gərginlik tətbiq etməklə yanaşı

ondan axan cərəyanı (qaranlıq və ya foto) təyin edir. Seçiləcək fotoqeydedicilərin foto həssaslıqlarını yoxlamaq üçün generatordan amplitudu -4 V, davam etmə müddəti 300 mksan və tezliyi 5 kHs olan impulslar verilmişdir. Işıqlandırıcı olaraq 450 nm dalğa uzunluqlu mənbə istifadə edilmişdir. Seçilmiş bu parametrlər bütün ölçmələr üçün sabit saxlanılmışdır. Fotoqeydedicinin həssaslığını görmək üçün PM-200 qurğusunun ikinci zəndu ossiloqrafa qoşulmuşdur. Ossiloqraf vasitəsi ilə qeydə alınan analog fotosiqnalların amplitudunu və onların sayını müəyyən etmək mümkündür. Silisium altlıqdan fotoqeydedicilər seçilməzdən öncə ilk olaraq etalon nümunə seçilir və onda qeydə alınan amplitud küy nisbəti fiksə edilir. Aparılan bütün ölçmələr eyni (25 °C) temperaturda həyata keçirilmişdir. Daha sonra silisium altlıqda yoxlanılan fotoqeydediciyə gərginlik tətbiq edilir və bu gərginliyi fotosiqnalın amplitudu fiksə edilən amplituda (etalon amplitud) çatan qədər artırılır. Bu zaman fiksə edilən amplitudu almaq üçün lazım olan gərginliyi işləmə gərginliyi kimi seçirik. Daha sonra generator söndürülərək fotoqeydedicinin qaranlıq cərəyanı tapılır. Bu proses 40 fotoqeydedici üçün edilir və daha sonra işləmə gərginlikləri və qaranlıq cərəyanları yaxın (5 % fərqlənən) olan 16 ədəd fotoqeydedici seçilərək matrisin hazırlanmasında istifadə edilir. Sonrakı mərhələdə fotoqeydedicilər keçirici yapışqan ilə korpusda mövcud olan yuvaların metallik katod (4 mm²) hissələrinə yapışdırılır. Bu zaman yuvalara qoyulan fotoqeydedicilərin qonşu elementlərin sahəsinə daxil olmaması üçün L şəkilli nizamlayıcıdan kənara çıxılmamışdır. Daha sonra hər 16 element yuvalarına qoyulduqdan sonra peçdə (65 °C-də) 180 dəqiqə tutulmuşdur. Fotoqeydedicilər tam yapışdıqdan sonra onların səthində olan anodları HB-05 markalı ultrasəs mikroqaynaq avadanlığının köməyi ilə hər elementin anodları (2 anod) qızıl tellə (radiusu 10 mkm) qonşu elementə və sonunda isə hamsı matrisin yanlarında olan iki hissəyə ($0,6$ mm \times $16,8$ mm) kontakt edilmişdir (şəkil 4.18.). Bu yaxınlaşma hər hansı əməliyyat müddətində sirkələnmə və ya temperatur hesabına genişlənmə nəticəsində qaynaqlardan hər hansı biri ayrılarsa, digəri anodun tam gərginliklə təmin olunmasına imkan verir. Anodlar bir-birinə və çöl hissəyə qaynaq edilərkən telin hündürlüyü 0,1 mm-dən az seçilmişdir.

Şəkil 4.4.2-də fotoqeydedicilərin həssas səthində olan anodların (2 ədəd kvadrat

formalı- $0,05 \text{ mm} \times 0,05 \text{ mm}$), katodun (L formalı), xəttlərinin (anod- 35 mkm, katod- 30 mkm və boşluq-15 mkm) və elementlərin qaynaq edilmə nizamlılığı verilmişdir. Qaynaqlama əməliyyatı tamamlandıqdan sonra hər fotodiodun kontaktlarına düz və əks istiqamətdə gərginlik verməklə test edilmişdir. Bu yoxlama mərhələsindən sonra 16 elementli korpus 0,8 mm dərinlikdə tam görünən işıq seli üçün şəffaf olan epoksid ilə doldurulur. Epoksidin inqrediyentləri 0,25 olmuşdur. Onun qatılması və saxlanma müddəti elə seçilir ki epoksiddə hava qabarcıqlarının sayı kəskin azalsın. Bu zaman islanma olmadığına görə korpusun qıraqlarına yaxın yerlərdə qalxmalar yaranır və nəticədə həssas səthin hamarlığı itir. Bu işə ssintilyatordan buraxılan fotonların əksər hissəsinin qeyd edilmədən itməsinə gətirib çıxara bilər. Səthin düzlüyünü təmin etmək üçün $19 \text{ mm} \times 19 \text{ mm}$ ölçülü korpusun xaricində dərinliyi 0,8 mm olan əlavə şablon ($25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$ ölçülü) düzəldilmişdir. Yeni hazırlanmış böyük ölçülü şablon çox elementli korpusun həssas səthinin hamarlığını təmin etmişdir. Görülən tədbirlərə baxmayaraq fotodiodun aktiv səthi hava qabarcıqlarından tam azad olmur bununla yanaşı mikrometrik hava qabarcıqları fotodiodun səthində və dərinliklərdə müşahidə edilir. Epoksidin daxilindəki qabarcıqları çıxarmaq üçün $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -lik hava axınından istifadə edilmişdir. Sonuncu mərhələdə epoksiddə doldurulmuş korpus $60 - 65 \text{ }^\circ\text{C}$ - də maksimum 180 dəqiqə qızdırılır. Əksər hallarda matrisin qəlibdən ayrılması qalınlığı 200 mkm olan kəsici disk ilə kəsilərək ayrılır. Sonunda hazırlanmış matrislərin parametrləri daha dəqiq ölçülərək təyin edilir.

4.5. Səthi piksellə yeni MSFD fotodiodların işlənməsi

Zəif optik siqnalların qeyd edilməsi və işlənməsi üçün yaradılan cihazlar bir çox elmi və məişət avadanlıqlarında geniş istifadə olunur [24, 25, 32, 146, c. 486, s.164-169,147, c.527, s.15–20, 148, c.567, s.48–56, 167]. Belə cihazların əsas elementi optik informasiyanı elektrik siqnallarına çevirməyə imkan verən fotoqəbuledicilər hesab edilir [146]. Fotoqəbuledicilərin əsas parametrləri: həssaslığı, cəldliyi və maya dəyəri, onların tətbiq olunma imkanlarını müəyyən edir. Ənənəvi

olaraq belə optik qurğularda vakuum foto elektron gücləndiricilərindən istifadə edilir. Lakin son illərdə hazırlanmış yarımkeçirici fotoelektron gücləndiriciləri vakuum fotoelektron gücləndiricilərinin adekvat analoqu hesab edilir [167]. Belə yarımkeçirici fotoelektron gücləndiricilər kommersiya baxımından əlverişlidir və optik spektrin görünən və infraqırmızı oblastındakı tək işıq kvantlarının qeyd edilməsi üçün istifadə oluna bilər. Yarımkeçirici fotoelektron gücləndirici bir-birinə paralel birləşdirilmiş çoxsaylı kiçik p-n keçidlərdən (mikropiksəllərdən) ibarətdir, harada ki, fotoelektronların selvari güclənməsi dəşilmə gərginliyindən yüksək gərginlikdə (və ya ifrat gərginlikdə) yəni, Heyger sayğacı rejimində baş verir. Bunun nəticəsində cəld fotocavab (fotocavabın davam etmə müddəti ~ 5 ns) və yüksək gücləndirmə əmsalı ($\sim 10^6$) əldə edilir. Buna baxmayaraq mövcud olan yarımkeçirici fotoelektron gücləndiricilərin iki əsas çatışmazlığı mövcuddur. Birinci çatışmazlıq cihazın aşağı həndəsi faktoruna F_{gm} malik olmasıdır. Həndəsi faktor belə müəyyən edilir: $F_{gm} = \frac{S_{av}}{S_{av}+S_d} = \frac{S_{av}}{S_0}$, harada ki, S_0 – fotoqəbuledicinin tam sahəsi, S_{av} – piksellərin sahələrinin cəmi, S_d – piksellər arasında yerləşən həssas olmayan sahədir. Piksellər arasında yerləşən həssas olmayan (və ya “ölü”) sahə cihazın fotonları qeyd etmə effektivliyini kifayət qədər azaldır. Həssas olmayan sahələr piksellərin arasındakı boşluq hesabına yaranır. Həssas olmayan sahələrdə cihazın Heyger rejimində işləməsini təmin edən mikrorezistorlar və ümumi metalektrod yerləşdirilir. Adətən, həssas olmayan sahələr eni ≈ 5 mkm olan zolaq forması da olur. Misal üçün, piksel sıxlığı 2500 piksel/mm² olan halda həndəsi faktor ≈ 60 % olur. İkinci çatışmazlıq isə mikrorezistor təbəqələrinin hazırlanma texnologiyasının CMOS (ingiliscə: complementary metal-oxide-semiconductor) texnologiya standartına uyğun olmaması ilə əlaqədardır ki, bu da cihazın dəyərinin artmasına gətirib çıxarır.

Məlum qurğu [20], yarımkeçirici altlıqdan və onun səthində yarımkeçirici altlıqla p-n keçid yaradan çox saylı yarımkeçirici təbəqələrdən ibarətdir. Amorf material əsasında hazırlanan fərdi mikrorezistorlar yarımkeçirici təbəqələri ümumi metal elektrodla birləşdirir. Ümumi metal elektrod altlıqdan dielektrik təbəqə ilə ayrılır. Qurğuda hər yarımkeçirici təbəqə (piksel) başqalarından asılı olmayaraq

deşilmə gərginliyindən yüksək gərginlikdə, başqa sözlə Heyger sayğac rejimində işləyə bilər. Buna görə də qurğuda fotocərəyanın güclənmə əmsalı 10^6 -dan çox ola bilər. Lakin, mikrorezistorların amorf materiallar əsasında hazırlanması yuxarıda qeyd olunan qurğunun aşağı həndəsi faktora və mürəkkəb hazırlanma texnologiyasına malik olması ilə nəticələnir.

Başqa bir məlum qurğuya [32] n-tip keçiriciliyi olan yarımkeçirici altlıq və altlıqdan dielektrik təbəqə ilə ayrılmış p-tip keçiriciliyi olan epitaksial təbəqə daxildir. Dielektrik təbəqənin daxilində bir çıxışı rezistiv təbəqəyə və əks çıxışı epitaksial təbəqəyə birləşən və n-tip keçiriciliyi olan yarımkeçirici regionlar yaradılmışdır. Bir-birindən dielektrik təbəqə ilə ayrılmış yarımkeçirici n-tip regionlar p-n keçidlərdə baş verən selvari prosesin lokallaşdırılmasını təmin edir. Rezistiv və dielektrik təbəqənin üzərində yetişdirilmiş epitaksial təbəqə foto həssas təbəqə hesab edilir. Bu cihazın əsas çatışmamazlığı rezistiv amorf təbəqənin səthində yüksək keyfiyyətli epitaksial təbəqənin yetişdirilmə texnologiyasının çətinliyidir. Bunun nəticəsində cihaz yüksək qaranlıq cərəyana malik olur və bu da cihazda foto həssaslığın və siqnal/küy nisbətinin pisləşməsinə səbəb olur.

Başqa bir məlum qurğuda [167] yarımkeçirici altlıq (məsələn, silisium) və onun səthində yerləşən, ümumi sərhədləri və eyni tip keçiriciliyi olan iki yarımkeçirici təbəqə mövcuddur. Yarımkeçirici təbəqələr yarımkeçirici altlığa nisbətən əks keçiriciliyə malikdir. Yarımkeçirici təbəqələrin ümumi sərhədi boyunca yarımkeçirici altlıqla eyni tip keçiriciliyə malik olan yarımkeçirici regionlar formalaşdırılıb. Bunun nəticəsi olaraq qurğuda yarımkeçirici təbəqələrin sərhəddinə perpendikulyar istiqamətdə p-n-p-n-keçidlər yaranır. Fotoelektronların selvari gücləndirilməsi özünü müstəqil gücləndirmə kanalları kimi göstərən bu p-n-p-n-keçidlərdə baş verir. İş rejimində, səthdəki yarımkeçirici təbəqəyə yarımkeçirici altlığın əsas yükdaşıyıcılardan kasıblaşmasına müvafiq qütbü (polyarnostu) olan gərginlik tətbiq edilir. Belə halda üçqat p-n-p-n-keçidlərdə orta (2-ci) keçid düz istiqamətdə, 1-ci və 3-cü keçidlər isə əks istiqamətdə qoşulur. Bu p-n-p-n-keçidlərin arasında yerləşən p-n keçidlər də əks istiqamətdə qoşulur. Nəticədə elə bir potensial paylanması yaranır ki, bu paylanma p-n-p-n regionların səth təbəqəsində yaranmış fotoelektronların selvari

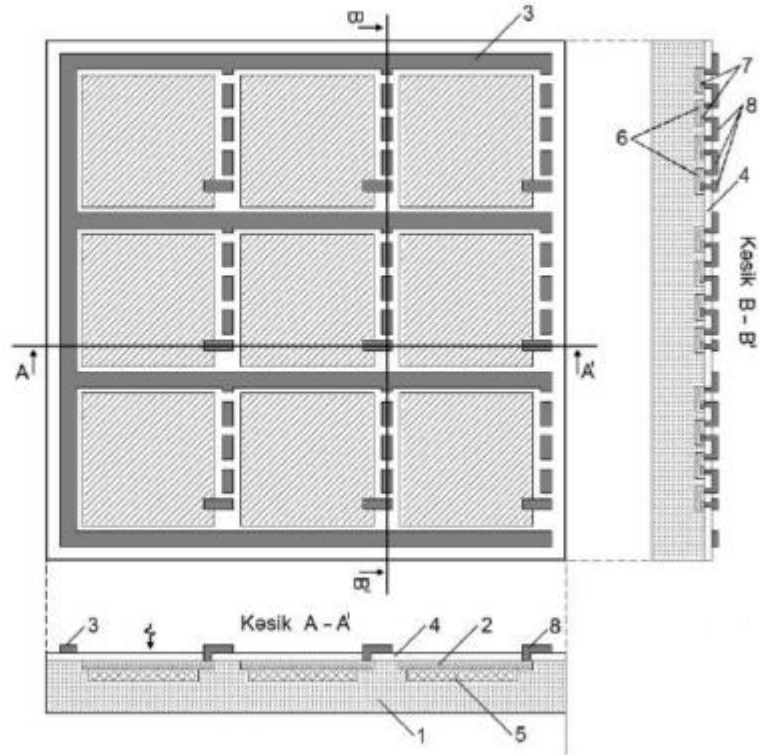
regiona toplanmasını təmin edir. Fotoelektronların gücləndirilməsi yuxarıdan birinci p-n-keçiddə baş verir, ikinci p-n keçid isə düz istiqamətdə qoşularaq özünü mikrorezistor kimi aparır. Yəni, düz istiqamətdə qoşulmuş p-n keçid mikrorezistor rolunu oynayır. Selvari proses nəticəsində mikrorezistora 2-ci p-n keçidin daxili potensialı qədər ($\sim 0,7$ V) gərginlik düşür, bu isə selvari regionda potensialın azalmasına səbəb olur. Ona görə də selvari proses sönür. Lakin bununla yanaşı qurğunun iki çatışmamazlığı mövcuddur. Birinci çatışmamazlıq dərinlikdə yerləşən üçqatp-n-p-n keçidlərin hazırlanması texnologiyasının mürəkkəb olmasıdır. Bu isə analoqlarına nisbətən cihazın maya dəyərinin yüksək olmasına gətirir. İkinci çatışmamazlıq isə gücləndirmə əmsalının aşağı olmasıdır. Məlumdur ki, gücləndirmə əmsalı ifrat gərginliyin qiymətindən asılıdır və ifrat gərginliyin maksimal qiymətiniyalnız düz istiqamətdə qoşulmuş p-n keçidin daxili potensialını ($\sim 0,7$ V) müəyyən edir.

Məlum qurğu [25] (prototip), yarımkeçirici altlıq (məsələn, silisium) və onun üzərində altlığın keçiriciliyinə əks tip keçiriciliyə malik olan yarımkeçirici təbəqə çoxluğundan ibarətdir. Yarımkeçirici təbəqələrin səthində p-n keçidləryaradan yarımkeçirici regionlar formalaşdırılmışdır. Yarımkeçirici regionlar bütün cihazın səthini əhatə edən yarımşəffaf metal elektrodlar vasitəsi ilə bir-birinə birləşdirilir. Yarımşəffaf metal elektrod yarımkeçirici təbəqələrdən və yarımkeçirici altlıqdan dielektrik təbəqəsi ilə ayrılır. Yarımşəffaf metal elektrod qurğunun işığa həssas sahəsini bütövlüklə örtür. İş rejimində yarımşəffaf metal elektroda yarımkeçirici altlığa nisbətən elə qütblü potensial qoşulur ki, yarımkeçirici təbəqələrlə yarımkeçirici altlıq arasındakı p-n keçidlər əks istiqamətə, yarımkeçirici təbəqələrlə yarımkeçirici regionlar arasındakı p-n keçidlər isə düz istiqamətə sürüşsün. Gərginliyin müəyyən qiymətində yarımkeçirici təbəqələrlə yarımkeçirici altlıq arasındakı p-n keçidlərdə yükdaşıyıcıların selvari gücləndirilməsi hesabına fotoelektronların güclənməsi reallaşır. Qeydedilən işıq cihaza yarımşəffaf metal elektrodan keçərək yönəldilir. Qurğunun işığa həssaslığı (və ya fotonları qeydetmə effektivliyi) yarımkeçirici təbəqələrlə yarımkeçirici altlıq arasındakı p-n keçidlərin kvant effektivliyi və orada baş verən selvari prosesin gücləndirmə əmsalı ilə təyin

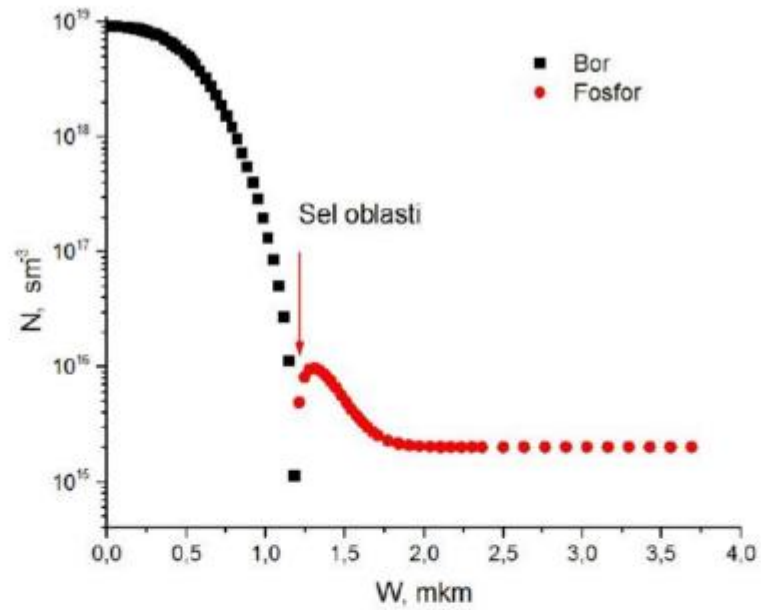
edilir. Burada yarımkeçirici regionlar və yarımkeçirici təbəqələr arasında yerləşən və düz istiqamətdə qoşulan p-n keçid mikrorezistor rolunu oynayır. Selvari proses nəticəsində mikrorezistora düz istiqamətdə qoşulan p-n keçidin daxili potensialı qədər ($\sim 0,7$ V) gərginlik düşür və bu selvari regionda potensialın azalmasına səbəb olur. Bunun nəticəsində selvari proses sönür. Lakin bu cihazın iki çatışmamazlığı var. Birinci çatışmamazlıq fotonları qeydetmə effektivliyinin aşağı olmasıdır. Bu işığın yarımşəffaf metal elektrodda udulması ilə bağlıdır. Cihazın ikinci çatışmamazlığı aşağı gücləndirmə əmsalına malik olmasıdır. Məlumdur ki, cihazın gücləndirmə əmsalı ifrat gərginliklə düz mütənasibdir [45, c.962, s.287-289, 156, c.845, s.621-622, 158, c.824, s.135-136]. Bu qurğuda ifrat gərginliyin maksimal qiyməti düz istiqamətdə qoşulmuş yalnız bir p-n keçidin daxili potensialı ($\sim 0,7$ V) ilə məhdudlaşır. İfrat gərginlik 0,7 V-dən çox olduqda qurğuda idarə olunmaz elektrik deşilməsi baş verir və bu da cihazın sıradan çıxmasına səbəb olur.

İxtiranın əsas məqsədi yarımkeçirici fotoelektron gücləndiricisinin fotonları qeydetmə effektivliyinin artırılması, gücləndirmə əmsalının yüksəldilməsi, maya dəyərinin aşağı salınması və həndəsi faktorunun artırılmasıdır. Təklif edilən qurğu təqdim olunan şəkil 4.5.1-də göstərilmişdir [9]. Bununla yanaşı qurğunun parametrləridə hesablanmışdır (şəkil 4.5.2). Yarımkeçirici fotoelektron gücləndiriciyə sadalanan elementlər: yarımkeçirici altlıq (1) və onun səthində ona əks tip keçiriciliyə malik olan çoxsaylı yarımkeçirici təbəqələr (2), yarımkeçirici təbəqələr arasında yerləşən ümumi metal elektrod (3) və onu yarımkeçirici altlıqdan ayıran dielektrik təbəqə (4) daxildir. Təklif edilən yarımkeçirici fotoelektron gücləndiricinin yuxarıda sadalanan texniki nəticələrə malik olması üçün onda əlavə yeni elementlər formalaşdırılmışdır. Bu elementlər yarımkeçirici altlıq ilə yarımkeçirici təbəqələr arasında yerləşən yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqələr (5), yarımkeçirici zolaqlar (6) və yarımkeçirici regionlardan (7) ibarət ardıcıl qoşulmuş çoxsaylı mikro p-n keçidlərdir. Çoxsaylı yarımkeçirici zolaqlar (6) yarımkeçirici altlığa (1) nisbətən əks tip keçiriciliyə malikdir. Yarımkeçirici altlığa (1) nisbətən yuxarı konsentrasiyası olan yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqələr (5), yarımkeçirici təbəqələrlə (2) p-n keçidlər yaradır. Yarımkeçirici zolaqların (6) bir hissəsində onlara nisbətən əks tip

keçiriciliyi olan yarımkeçirici regionlar (7) yaradılmışdır. Mikro p-n keçidlərin ardıcıl birləşməsi yarımkeçirici altlıqdan (1) dielektrik təbəqəsi(4) ilə ayrılan metal zolaqlar (8) vasitəsi ilə həyata keçirilmişdir. Beləliklə, işığa həssas yarımkeçirici təbəqələr (2) ardıcıl birləşmiş çoxsaylı mikro p-n keçidlərin köməyi ilə ümumi metal elektroda birləşdirilir. Burada ardıcıl birləşmiş və düz istiqamətdə qoşulan çoxsaylı mikro p-n keçidlər sel prosesini söndürən mikrorezistor rolunu oynayır. Yarımkeçirici təbəqənin (2) sahəsinin xarakterik ölçüləri yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqənin (5) müvafiq ölçülərindən böyükdür. Yarımkeçirici təbəqənin (2) bütün perimetr boyunca yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqədən (5) kənara çıxan hissəsi yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqədə (5) baş verə biləcək künc deşilməsinin qarşısını alan qoruyucu halqa rolunu oynayır. İş rejimində cihazın metal elektroduna yarımkeçirici altlığa nisbətən gərginlik tətbiq edilir. Gərginliyin metal elektroda qoşulan qütbü elə seçilir ki, ardıcıl birləşmiş çoxsaylı mikro p-n keçidlər düz istiqamətə, yüksək aşqarlanmış təbəqə ilə yarımkeçirici təbəqənin arasında mövcud olan p-n keçid isə əks istiqamətə sürüşsün. Tətbiq edilən gərginliyin qiyməti deşilmə gərginliyinin qiymətindən yuxarı olduqda, yəni ifrat gərginlik rejimində, cihazda fotoelektronların Heyger rejimli selvari güclənməsi baş verir. Qeyd ediləcək işıq qurğuya yarımkeçirici təbəqələrtərəfindən yönəldirilir. Prototipdən fərqli olaraq, təklif edilən qurğuda ümumi metal elektrod işığa həssas yarımkeçirici təbəqələrin üstünü örtmür, yəni qəbul edilən işıq seli ümumi metal elektrodda udulmayaraq bilavasitə yarımkeçirici təbəqələrin üstünə düşür. Bunun nəticəsində qurğunun fotonları qeydetmə effektivliyi (və ya kvant çıxışı) artır. Yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqə ilə yarımkeçirici təbəqənin sərhədində olan p-n keçiddə yaranan fotoelektron selvari prosesi başladır. Selvari proses p-n keçiddəki gərginliyin xarakterik deşilmə gərginliyinin qiymətindən xeyli aşağı düşənə qədər davam edir. Selvari proses zamanı p-n keçiddəki gərginliyin azalması cihaza tətbiq edilən ümumi gərginliyin p-n keçid və onun mikrorezistoru arasında paylanması hesabına baş verir. Qurğunun gücləndirmə əmsalı (və ya həssaslığı) ifrat gərginliyin qiyməti ilə müəyyən edilir. Mikro p-n keçidlərin sayı ifrat gərginliyin maksimal qiymətinə müəyyən edir. Məsələn, ardıcıl birləşmiş 5 ədəd mikro p-n keçiddən ibarət mikrorezistoru olan cihaz



Şəkil 4.5.1 Selvari fotodiodun üst, yan və en kəsiyindən görüntüsü [9].



Şəkil 4.5.2 Selvari fotodiodun piksel hissəsində yükdaşıyıcıların konsentrasiyasının paylanması.

$\Delta V_{ov}=5 \times 0,7 \text{ V}=3,5 \text{ V}$ ifrat gərginliyə kimi işləyə bilər. Bu da təklif olunan qurğunun gücləndirmə əmsalının prototipə nisbətən 5 dəfə artırılmasını təmin edir. Belə ki, gücləndirmə əmsalı $M = (2 \times C_{pik} \times \Delta V_{ov}) / q \approx 10^6$ qiymətinə çatır [45, c.962, s.287-289], harada ki, $C_{pik}=25 \text{ fF}$ – pikselin tutumu (yarımkeçirici təbəqənin yarımkeçirici altlığı nisbətən tutumu), q – elektronun yüküdür. Bundan başqa, təklif olunan qurğuda ardıcıl qoşulmuş p-n keçidlərin selvari prosesi söndürə biləcək mikrorezistor kimi istifadə olunması, qurğunun dəyərinin analoqlara nisbətən ucuz olmasını təmin edir, çünki mikro p-n keçidlərin hazırlanma texnologiyası CMOS texnologiyasının standartlarına tamamilə uyğundur. Müasir CMOS texnologiyası ölçüsü bir mikrometrdən az olan p-n keçidlərin hazırlanmasına imkan verir. Bu isə təklif olunan qurğuda piksellərin ara intervalının 1 mkm-ə qədər azadılmasına imkan verir. Bu isə həndəsi faktorun artırılmasını təmin edir. Lakin, məlum olan yarımkeçirici fotoelektron gücləndiricilərdə amorf materialdan olan təbəqə mikrorezistorların enini 3 mkm-ə qədər azaltmaq mümkün deyil, çünki, nazik rezistor təbəqəsinin qırılması ehtimalı yüksəkdir. Bununla yanaşı söndürücü müqavimət olaraq p-n keçidlərin istifadə edilməsi bu quruluşun parametrlərinin temperaturdan daha zəif asılı olmasına imkan verəcəkdir.

Təklif olunan qurğu aşağıda göstəriləyi kimi hazırlanır. Yarımkeçirici altlıq kimi keçiriciliyi n-tip, aşqar konsentrasiyası $2 \times 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ və diametri 200 mm olan standart silisium lövhəsi istifadə olunur [9]. Silisium lövhəsinin səthində termik oksidləşmə (1000 °C) yolu ilə qalınlığı 100nm olan dielektrik təbəqə (SiO_2) yetişdirilir. Ölçüləri $23 \text{ mkm} \times 23 \text{ mkm}$ və aralarındakı interval 5 mkm olan yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqələrin hazırlanması fosfor ionlarını silisium lövhəsinə implantasiya etməklə əldə edilir (ionun enerjisi $E=500 \text{ keV}$ və səthi dozası $D=2 \times 10^{13} \text{ ion/sm}^2$). Sonra isə, yüksək aşqarlanmış yarımkeçirici təbəqələrin səthində ölçüləri $25 \times 25 \text{ mkm}^2$ və aralarındakı interval 3 mkm olan yarımkeçirici təbəqələr hazırlanır. Bu məqsədlə bor ionlarını silisium lövhəsinə implantasiya edirlər ($E=80 \text{ keV}$ və doza $D=5 \times 10^{14} \text{ ion/sm}^2$). Yarımkeçirici təbəqələrin arasında yerləşən, ölçüsü $1 \text{ mkm} \times 2 \text{ mkm}$ və aralarındakı interval 1 mkm olan yarımkeçirici zolaqlar bor ionlarını silisium lövhəsinə implantasiya etmək yolu ilə hazırlanır (əvvəl $E=150 \text{ keV}$

və doza $D=2 \times 10^{14}$ ion/sm²; sonra $E=80$ keV və doza $D=2 \times 10^{14}$ ion/sm²). Ölçüsü $0,5 \text{ mkm} \times 0,5 \text{ mkm}$ olan yarımkeçirici regionları əldə etmək üçün yarımkeçirici zolaqların səthinin müəyyən hissəsini fosfor ionları ilə aşqarlayırlar ($E=100$ keV və doza $D=8 \times 10^{14}$ ion/sm²). Defektlərin termik təpməsi azot atmosferində 850 °C dərəcədə aparılır. Termik təpmə müddəti 2 saat qəbul edilir. Bundan sonra, yarımkeçirici altlığa, yarımkeçirici təbəqəyə, yarımkeçirici zolaqlara və yarımkeçirici regionlara kontakt məqsədi ilə dielektrik təbəqənin uyğun yerləri ion aşılama yolu ilə açılır. Sonra, alüminiumun termik buxarlanması yolu ilə 1 mkm qalınlıqlı metal təbəqə silisium lövhəsinin üzərinə çökdürülür. Ümumi metal elektrod və metal zolaqlar şəkil 4.5.1-də verilmiş sxemə uyğun olaraq formalaşdırılır [9].

Təklif edilən MSFD fotodiodun parametrlərini hesablamaq üçün TIDE simulyasiya proqramından istifadə edilmişdir. İmplantasiya edilən fosfor və bor atomlarının maksimal konsentrasiyası $1,03 \times 10^{16} \text{ sm}^{-3}$ və $9,9 \times 10^{18} \text{ sm}^{-3}$ olmuşdur (şəkil 4.5.2). Şəkil 4.5.2 –də x –oxunda yayferin daxilinə nüfuz etmə və y –oxunda isə aşqar atomlarının konsentrasiyası verilmişdir. Belə müstəvi p-n keçidlərindeşilmə gərginliyinin 60 V olduğu müəyyən edilmişdir. Maksimal elektrik sahəsi $4,05 \times 10^5 \text{ V/sm}$ olmuşdur. Elektrik sahəsinin maksimal qiyməti (selvari proses baş verən oblast) səthdən təqribən $1,1 \text{ mkm}$ dərinlikdə yerləşmişdir. Bu dərinlik silisiumda $400 \text{ nm} - 550 \text{ nm}$ dalğa uzunluğu intervalındakı fotonların tam udulma qalınlığına uyğun gəlir. Başqa sözlə bu tip fotodiodların maksimal həssaslıq oblastı məhz $400 \text{ nm} - 550 \text{ nm}$ dalğa uzunluğu intervalı üçün nəzərdə tutulmuşdur [9].

4.6. Nəticələr

MSFD fotodiodlarda selvari prosesi düzgün izah edən yeni model təklif edilmişdir. MSFD pikselində (və ya SPAD tipli fotodiodlarda) xarici və daxili cərəyanın zamandan asılı olaraq dəyişməsi və selvari proses baş verən kanalın həcmi yüklər oblastının müqavimətinin təsiri tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, tək elementli selvari fotodiodlara düşən gərginlikdeşilmə gərginliyinə bərabər olduqda bu zaman maksimal sayda elektronlar yaranır. Yaranan bu elektronlar sahənin

deşilmə gərginliyindən aşağı gərginliyə düşməsinə gətirir. Bu zaman yaranan yüklərin miqdarı təqribən elə ön frontda yaranan elektronlar qədər olur. Nəticədə fotodioda tətbiq edilən gərginlik ifrat gərginlik qədər yenidən aşağı düşür. SPAD-ların gücləndirmə əmsalı həcmi yüklər oblastının müqavimətindən asılı olaraq $(1-2) \times M$ qanuna uyğunluğu ilə dəyişir. Göstərilmişdir ki, eyni bir ifrat gərginlikdə maksimal gücləndirmə əmsalı almaq üçün (W/L) nisbəti gərək 0,01 ($R_s < 5 \text{ Om}$) kiçik olsun. Başqa sözlə yüksək gücləndirmə əmsalı fotodiodlar hazırlamaq üçün aşağıdeşilmə gərginlikli və kiçik ölçülü MSFD fotodiodlar daha əlverişli hesab edilir.

Səthi piksellə MSFD fotodiodların yeni strukturu təklif edilmişdir. Təklif edilən yeni qurğu səthi piksellə analoqlarından fərqli olaraq, bu qurğuda söndürücü müqavimət olaraq p-n keçidlərdən istifadə edilmiş və nəticədə qurğunun fotonları qeydetmə effektivliyi (və ya kvant çıxışı) artmışdır. Qurğunun gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün p-n keçidlərin sayını artırmaq təklif edilmişdir. Təklif edilən qurğu standart CMOS texnologiyası əsasında hazırlanması nəzərdə tutulmuşdur. Bununla yanaşı bu fəsildə MSFD-3NK fotodiodları üçün 16 elementli matris hazırlanmışdır. Hazırlanmış matrisin ümumi sahəsi 289 mm^2 ($17 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$) və aktiv sahəsi isə 219 mm^2 olmuşdur. Yeni 16 elementli matrisin həndəsi faktoru 76 % olmuşdur. Bu matrislər yüksək enerjilər fizikası və PET üçün optimal bir qeydedici hesab edilmişdir.

V FƏSİL

MSFD FOTODİOD VƏ SSİNTİLYATOR ƏSASLI YENİ DETEKTOR MODULLARININ TƏDQIQI

5.1. Ssintilyatorlu detektorlarda istifadə edilən MSFD fotodiodlarının parametrləri

Ssintilyator detektorlarının hazırlanmasında istifadə edilən MSFD fotodiodların fiziki xassələrini (qaranlıq cərəyan, işləmə gərginliyi, FQE, gücləndirmə əmsalı) ölçmək üçün şəkil 2.1.1-də verilmiş dövrədən istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodların gücləndirmə əmsalını təyin edərkən Tektronix generatorundan işıqlandırıcı diodlara impulslar tətbiq edilmişdir. Tektronix generatorundan tezliyi 3 kHz, amplitudu 3 V olan və davam etmə müddəti 20 nsan olan mənfi qütüblü düzbucaqlı impulslar verilmişdir. Işıqlandırıcı fotodiod olaraq Thorlabs firmasının LED-450L diodlarından istifadə edilmişdir. LED-450L işıqlandırıcı diodların buraxdığı foton selinin maksimal dalğa uzunluğu $\lambda=450\pm 20$ nm, optik çıxış gücü 7 Vatt və işləmə cərəyanı 20 mA olmuşdur [131]. MSFD fotodiodların üzərinə düşən işıq selinin ötürülməsinin təmin etmək üçün diametri 1 mm olan optik fiber kabledən istifadə edilmişdir. MSFD fotodioddan götürülən siqnal bizim tərəfimizdən hazırlanmış xətti gücləndiricilər ($G\sim 100$ və 35) vasitəsi ilə gücləndirilmişdir. Gücləndirilmiş fotosiqnalların amplitudunun analiz edilməsi üçün siqnallar 4 kanallı CAEN-DT5720 və ya DRS-4 analoq rəqəmçeviricisinə verilmişdir. MSFD fotodiodun tək fotoelektronuna uyğun gələn qaranlıq küylərin yaratdığı say 100 kHz tərtiblərində olduğundan foto siqnalın qeyd edilməsi mümkün olmur və siqnal küy nisbəti pisləşir. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün CAEN-DT5720 çeviricisinə fotosiqnalın qeyd edilməsini sinxronlaşdırmaq üçün Tektronix generatorun xarici sinxronlaşdırıcı çıxışından istifadə edilmişdir. Beləliklə analoq rəqəm çeviricisinin siqnalı qeyd etməsi yalnız işıqlandırıcı dioda impuls verildikdə başlayacaq və impuls qurtardıqdan sonra qeydetmə dayanacaq. Bu yaxınlaşma siqnal küy nisbətini kəskin

artırır və tək fotoelektronlu piklərin paylanmasını müşahidə etməyə imkan verir. ARÇ-si generatordan növbəti impuls gələnə qədər gözləmə rejimində gözləyir. Lakin buna baxmayaraq hər dəfə siqnal qeydedilərkən dövrənin küyü bu fotosiqnala əlavə olunur. Məhz bu küyü əsas fotosiqnalından ayırmaq üçün LED-450L işıqlandırıcı dioduna gələn impuls söndürülür və generatorun sinxronlaşdırıcı kanalından ARÇ-nin işləməsi təmin edilir. Bu zaman inteqrallanma pəncərəsinə düşən dövrənin küyünə uyğun gələn yük müəyyən edilir. Bu yük pedestala uyğun gələn yük olaraq qəbul edilir. İnteqrallanma pəncərəsi olaraq 60 nsan seçilmişdir. Fotosiqnalın amplitud paylanmasından pedestala və digər fotopiklərə uyğun gələn siqnalların maksimumları ROOT-5.32 proqram paketi vasitəsi ilə müəyyən edilir. Bu yolla təcrübələrdə istifadə edilən MSFD-3D, MSFD (3N1P,3NK) və MPPC (S12572-010P və S12572-015C) fotodiodlarının gücləndirmə əmsalları tapılmışdır [134, c.912, s.320-322]. MSFD-3D fotodiodunun optimal gərginlikdə gücləndirmə əmsalı 7×10^5 , MSFD-3N1P fotodiodunun 6×10^4 , MSFD-3NK fotodiodunun gücləndirmə əmsalı $\sim 1 \times 10^5$, MPPC (S12572-010P, S12572-015C) fotodiodlarının gücləndirmə əmsalları isə $1,25 \times 10^5$ – 3×10^5 arasında olmuşdur. Gücləndirmə əmsalları ölçülərkən temperatur dəyişməsi təqribən 2 % olmuşdur. İstifadə edilən MPPC-S12572-010P və MPPC-S12572-015C fotodiodlarının FQE-si (420 nm) 10 – 20 % arasında dəyişmişdir. MPPC fotodiodlarının tutumları 276 pF olmuşdur. Təcrübələrdə istifadə edilən müxtəlif tipli MSFD fotodiodların qaranlıq cərəyanları 30 nA – 800 nA intervalında dəyişmişdir. MPPC-S12572-010P və MPPC-S12572-015C fotodiodlarının işləmə gərginlikləri 70 V və MSFD-3NK, 3D, 3N1P fotodiodlarının işləmə gərginliyi 90 V, 35,6 V və 94 V olmuşdur. İstifadə edilən MSFD-3D fotodiodlarının FQE-si 10 %, MSFD (3NK, 3N1P) fotodiodlarının FQE-si 25 – 40 % arasında və MPPC (S12572-010P, S12572-015C) fotodiodlarının FQE-si 10 – 20 % arasında dəyişmişdir. MSFD-3D fotodiodlarının tutumu 22 pF, MSFD-3NK və 3N1P fotodiodlarının tutumları 176 pF olmuşdur. Təcrübələrin aparılması zamanı temperaturun dəyişməsi 5 %-dən çox olmamış və əlavə qoruyucu qurğusunun təbəqədən istifadə edilməmişdir.

5.2. Üzvü və maye ssintilyatorlar əsasında hazırlanmış detektor modullarının radiasiyaya həssashlığının tədqiqi

Hazırda yüksək enerjilər fizikasında böyük ölçülü ssintilyatorlar əsasında hazırlanan detektorlar əksər təcrübələr üçün optimal bir qeydedici hesab edilir. Lakin ssintilyator detektorlarının hazırlanmasında istifadə edilən MSFD fotodiodların sahəsinin kiçik olması bunların belə təcrübələrdə tətbiqində çətinliklər yaradır. Bu çətinliklərin aradan qaldırılması üçün matrislərdən istifadə təklif edilir. Lakin bu yaxınlaşmada detektorun enerji ayırdetməsinin azalmasına və qiymətinin dəfələrlə artmasına səbəb olur. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün əksər hallarda Viniston konusundan və fiber optik kabel çeviricilərindən istifadə edilir. Böyük ölçülü ssintilyatorlarda yaranan işıq seliniyaxın məsafədə MSFD fotodioda ötürmək üçün Viniston konusundan istifadə daha əlverişli hesab edilir. Viniston konuları səth normalına 15° -ə bucaq altında düşən ssintilyasiya fotonlarının 90 %-dan çoxunun MSFD fotodiodlara ötürülməsini təmin edir. Lakin əksər hallarda istifadə edilən ssintilyatorların ölçüsünün MSFD fotodiodların ölçüsündən 10 dəfələrlə böyük olduğundan bu zaman fiber optik kabellərdən istifadə daha əlverişli sayılır. Həmcinində belə optik fiberlər ssintilyasiya işıqlarının daha uzaq məsafədə yerləşən MSFD fotodiodlara ötürülməsini təmin edir. Fiber kabellərin bəzi növləri əlavə olaraq ssintilyatorun buraxdığı fotonların dalğa uzunluğunu daha uzun dalğa oblastına sürüşdürmək imkanlarına malikdirlər. Ssintilyatorlu detektorların hazırlanmasında plastik ssintilyatorlardan geniş istifadə edilir. Bu işə bir başa olaraq üzvi ssintilyatorların qiymətlərinin ucuz olması və onların istənilən formaya salınması ilə bağlıdır. İonlaşdırıcı radiasiyanı qeyd etmək üçün işdə ölçüləri $5 \times 5 \times 70 \text{ mm}^3$ olan p-terfenil ($\text{C}_{18}\text{H}_{14}$) ssintilyatoru istifadə edilmişdir. P-terfenil ssintilyatorunda fiber dalğa uzunluğu sürüşdürücüsünün yerləşdirilməsi üçün onun yan tərəfinin birində diametri -1,5 mm, dərinliyi -3 mm və uzunluğu 70 mm olan yuva açılmışdır. İstifadə edilən ssintilyatorlarda hər MeV enerjili qamma şüası üçün işıq çıxışı 27000 foton və yaranan paketin sönməməüddəti 3,7 nsan olmuşdur. P-terfenil ssintilyatorunun molekullarının həyacanlaşması zamanı yaranan fotonların dalğa

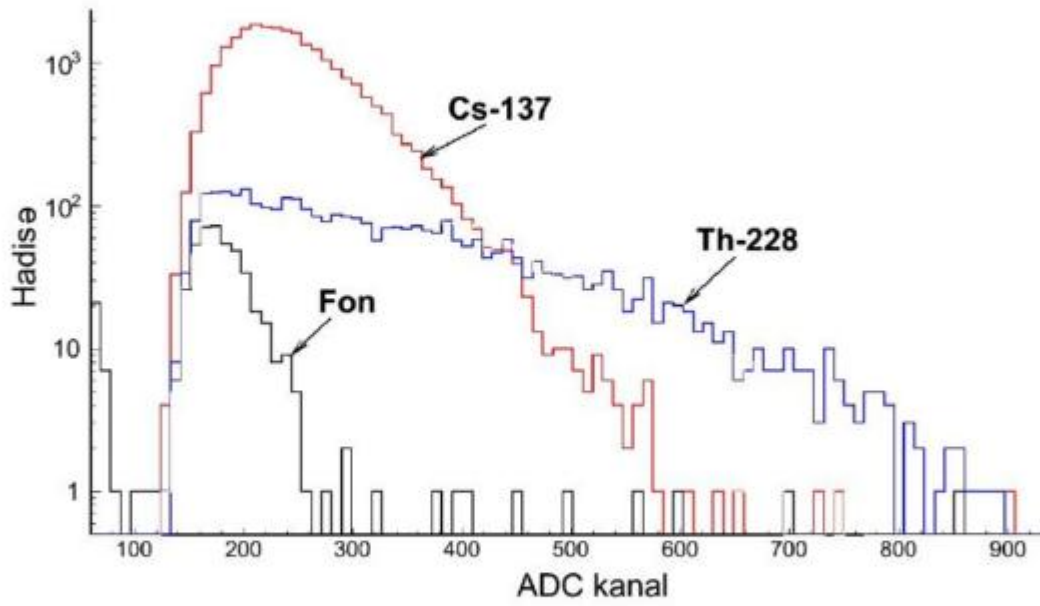
uzunluğunun maksimum qiyməti 420 nm-də müşahidə edilmişdir [4, c.21, s.37-43]. Lakin təcrübədə istifadə edilən MSFD-3D qeydedicilərinin 420 nm dalğa uzunluğu oblastında FQE-si təqribən 8 % olmuşdur. Bu isə qeydedilən siqnalın amplitudunun azalmasına və enerji ayırdetməsinin pisləşməsinə səbəb olur. Başqa sözlə MSFD-3D fotodiodu üzərinə düşən 420 nm dalğa uzunluqlu hər 100 fotondan yalnız 8 foton selvari prosesin başlatdırır. Məhz buna görə də şüalanmanın enerjisini və minimum qeydedilə bilən enerjini müəyyən etmək üçün p-terfenil ssintilyatorunun buraxdığı 420 nm-lik foton paketlərini MSFD-3D fotodiodlarının həssas olduğu daha yuxarıdalğa uzunluqlarına (450-525 nm) çevirmək lazımdır [4, c.21, s.37-43]. Ssintilyatorada yaranan fotonların MSFD-3D fotodiodlarına ötürülməsini təmin etmək üçün diametri 1 mm olan Y-11 (200)M markalı fiber dalğa uzunluğu sürüşdürücüsündən istifadə edilmişdir. Fiber dalğa uzunluğu sürüşdürücüsünün dataşitindən götürülən məlumatlara görə bu çeviricilər 420 nm-i 476 nm-li dalğa uzunluğuna çevirmək üçün istifadə edilməsi daha əlverişli hesab edilir. Bu dalğa uzunluğu üçün MSFD-3D fotodiodlarının FQE-si 20 %-ə yaxın olmuşdur. Fiber ssintilyatorlar çox saylı qoruyucu təbəqələrdən ibarət olduğundan onun en kəsiyinə kiçik bucaqlar altında düşən fotonların 95 %-ni foto qeydediciyə çatmasını təmin edir. İstifadə edilən Y-11(200)M markalı fiber dalğa uzunluğu sürüşdürücüsünün sönmə müddəti 12,5 nsan olmuşdur. Y-11(200)M markalı fiberin parçalanma müddətinin p-terfenil ssintilyatorlarının parçalanma müddətindən 3,4 dəfə böyük olması qeydedilən fotosiqnalın sayma sürətinə təsir etməmişdir. Buna səbəb MSFD-3D fotodiodlarının bərpa olunma müddətinin 1000 nsan böyük olmasıdır. Fiberin ssintilyatorada açılmış yuvada sürtünərək qoruyucu təbəqələrinin zədələnməməsi üçün hər tərəfi divara optik şəffaf epoksidlə yapışdırılmışdır. İonlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı foton selinin itkisini azaltmaq üçün ssintilyator cütlüyünün tərəfləri qalınlığı 100 mkm olan ağ rəngli teflonla iki qat sarınmışdır. Ölçmələr zamanı radioaktiv çirklənmənin baş verməməsi üçün ionlaşdırıcı mənbə ilə detektor arası məsafə 1 sm seçilmişdir. MSFD fotodiodların xassələrinə ətraf mühitin temperaturundan kəskin asılı olduğundan ölçmələr +20 °C temperaturda yerinə yetirilmiş və temperaturun dəyişməsi 2 %-dan çox olmamışdır. Detektordan alınan siqnalların amplitudunu artırmaq üçün siqnallar

30 dəfə gücləndirilmişdir. Çıxışda alınan siqnal daha sonra DRS-4 ARÇ verilmişdir [194, c.39, s1-7]. DRS-4 ARÇ-si qeyd edilən siqnalları rəqəmsal siqnallara çevirərək binar formatda saxlanılmasını təmin etmişdir. Saxlanılmış məlumatlar C++ proqramlaşdırma dilində yazılmış alqoritimlərdən istifadə edərək "Root 5.32" proqram paketi vasitəsi ilə siqnalların parametrləri: ön, arxa frontları, siqnalın forması, enerji ayırdetməsi və amplitud paylanması əldə edilmişdir. Ölçmələr zamanı əsas spektrdən təbii fonun yaratdığı hadisələr çıxılmamışdır. Radioaktiv izotopların aktivliyini az olması və təbii fonun təsirini azaltmaq üçün amplitud paylanma spektrin çəkilməsinə 5 dəqiqə vaxt sərf edilmişdir. İstifadə edilən radioizotop mənbələri Radiasiya Problemləri İnstitutunda mövcud olan nöqtəvi mənbələr olmuş və onların enerjiləri 0,032 – 3 MeV intervalında dəyişmişdir. Nöqtəvi radioizotoplardan ^{137}Cs və ^{228}Th –nin buraxdığı qamma şüaların qeyd edilən amplituda görə paylanma spektri şəkil 5.2.1- də verilmişdir [4, c.21, s.37-43, 38, s.383-385]. Bu tip elektromaqnit dalğalarının qeyd edilməsi zamanı foto pikin müşahidə edilmə ehtimal çox kiçik olur və yalnız Kompton səpilməsinin effektiv kəsiyi yüksək olur. Bu tip detektorlarda qamma şüaların enerjilərini yalnız Kompton kənarına görə hesablamaq olar. Şəkil 5.2.1.-dən amplitud paylanma spektrindən görüldüyü kimi ^{137}Cs və ^{228}Th radioizotoplarının buraxdığı qamma şüaların Kompton kənarı 600 – 850 kanallar oblastında müşahidə edilir. Bu kanallara uyğun gələn Kompton kənarının enerjisi 473 keV – 2381 keV enerji intervalını əhatə etmişdir. Bu tip detektorla minimum qeydedilən qamma şüasının enerjisi 511 keV olmuşdur [4, c.21, s.37-43].

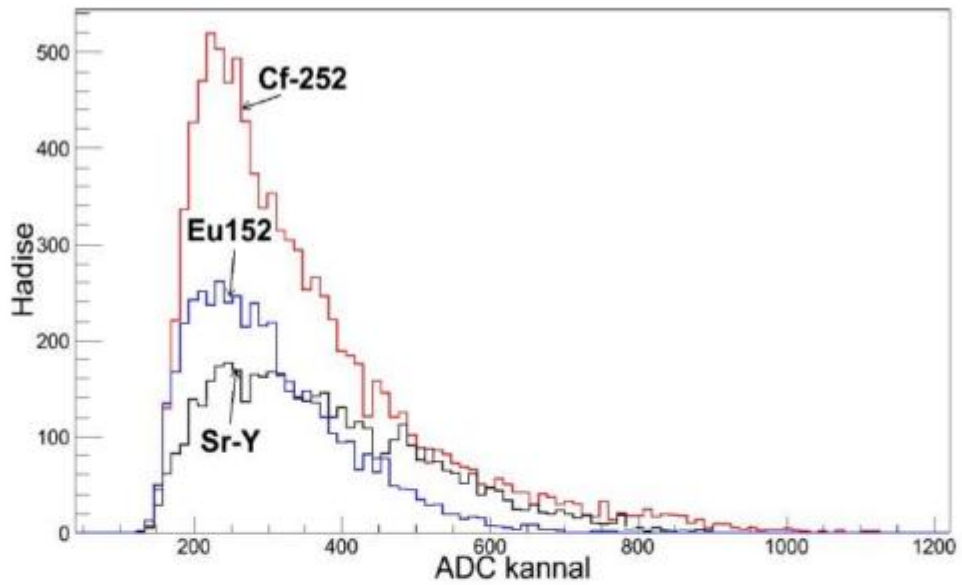
Daha sonra bu detektorun digər tip ionlaşdırıcı şüalara qarşı həssaslığı tədqiq edilmişdir. Bunun üçün beta zərrəcik mənbəsi olaraq nöqtəvi mənbə hesab edilən Sr/Y-90 radioizotopundan istifadə edilmişdir. Sr/Y-90 radioizotop enerjiləri 546 keV və 2,284 MeV olan müxtəlif enerjili beta zərrəcikləri ilə şüalandırır. Beta zərrəciklərinin yükə və kütləyə malik olması bu tip şüalanmanın bir başa qeyd edilməsinə imkan vermişdir. Məhz bu səbəbdəndə spektrdə çox geniş oblastı əhatə edən hadisələr müşahidə edilmişdir. Həmçinin də detektora neytronların təsirini yoxlamaq üçün ^{252}Cf radioizotopundan istifadə edilmişdir. Californiya radioizotopu

1–5 MeV enerji intervalında sürətli neytronlar şüalandırır. Bu tip neytronların qeydedilməsi neytronların p-terfenil ssintilyatorlarının hidrogen birləşmələri ilə çox saylı elastiki toqquşmaları nəticəsində baş verir. Hər toqquşmadan kifayət qədər enerji almış protonlar (ionlaşmış hidrogenlər) kütləyə və yükə malik olduqlarından asanlıqla ssintilyasiya fotonları yaradırlar və yaranmış bu fotonlar siqnalın əmələ gəlməsini təşkil edir. Şəkil 5.2.2 –də $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$, ^{152}Eu (Kompton kənarı- 2381 keV) və ^{252}Cf radioizotoplarının amplituda görə paylanma spektri göstərilmişdir. Spekrtdən görüldüyü kimi neytronlara uyğun gələn hadisələr daha geniş enerji oblastını əhatə etmiş və bunlara uyğun gələn hadisələr spektrin 1000-ci kanalında da müşahidə edilmişdir. Şəkil 5.2.3-də ssintilyator detektoru ilə ^{252}Cf izotopununun buraxdığı şüalanma qeyd edilərkən gücləndiricinin çıxışında müşahidə edilən siqnalın forması verilmişdir. Siqnalın formasından görüldüyü kimi ionlaşdırıcı şüalanmaya uyğun gələn piklə yanaşı birinci fotoelektronlarda müşahidə edilir [38, s.383-385]. P-terfenil və fiber əsasında hazırlanmış bu tip detektorlar yalnız enerjisi 511 keV böyük olan ionlaşdırıcı şüalanmaları qeyd etmək üçün əlverişlidir. Aşağı enerjili ionlaşdırıcı şüalanmanı qeydedə bilməməsinə səbəb detektorun hazırlanmasında istifadə edilən çox saylı əməliyyatlar və materiallardan istifadə edilməsidir. Bu yaxınlaşma ssintilyasiya fotonların itkisi üçün əsas amillərdən hesab edilir. Başqa sözlə bu tip detektorlar yüksək enerjilər fizikasında istifadə üçün daha əlverişli hesab edilir [4, c.21, s.37-43].

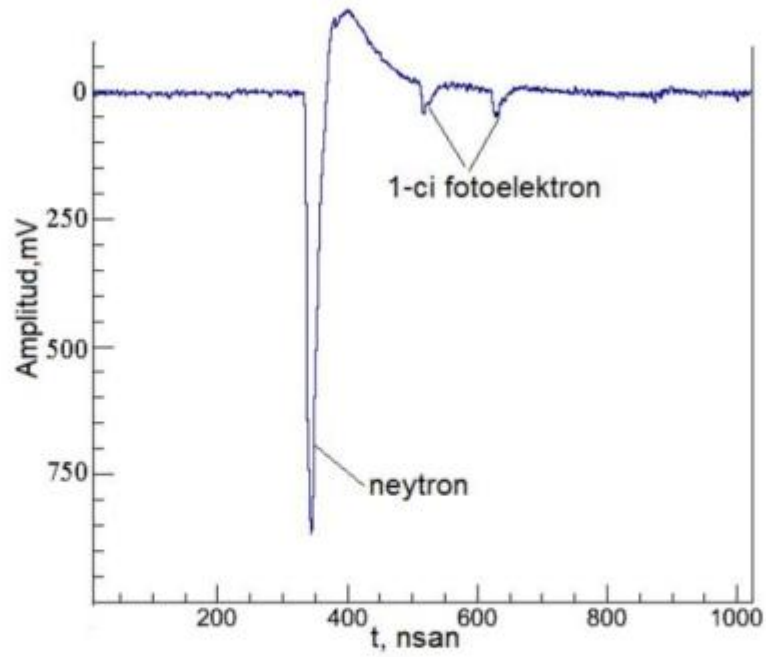
P-terfenil ssintilyatoru ilə aşağı enerjili ionlaşdırıcı şüalanmanı qeyd etmək üçün MSFD fotodiodların ölçüləri tərtibində ssintilyatorlar götürülməsi daha əlverişli hesab edilir. İonlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı ssintilyasiya fotonlarını bir başa olaraq qeyd etmək üçün pikselləri dərinlikdə yerləşən MSFD-3N1P və MSFD-3NK fotodiodlarından istifadə edilmişdir. İstifadə edilən fotodiodlardan MSFD-3N1P fotodiodlarının piksel sıxlığı 15000 piksel/mm², işləmə gərginliyi ~ 95 V, foton qeydetmə effektivliyi 30 – 35 %, sahəsi 9 mm² və toplam piksel sayı isə $N=9 \times 15000=135000$ piksel olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodlarının piksel sıxlığı 10000 piksel/mm², işləmə gərginliyi 90 V, foto qeydetmə əmsalı 40 – 45 %, sahəsi ~13,7 mm² və toplam piksel sayı isə $N=13,7 \times 10000=137000$ piksel olmuşdur.



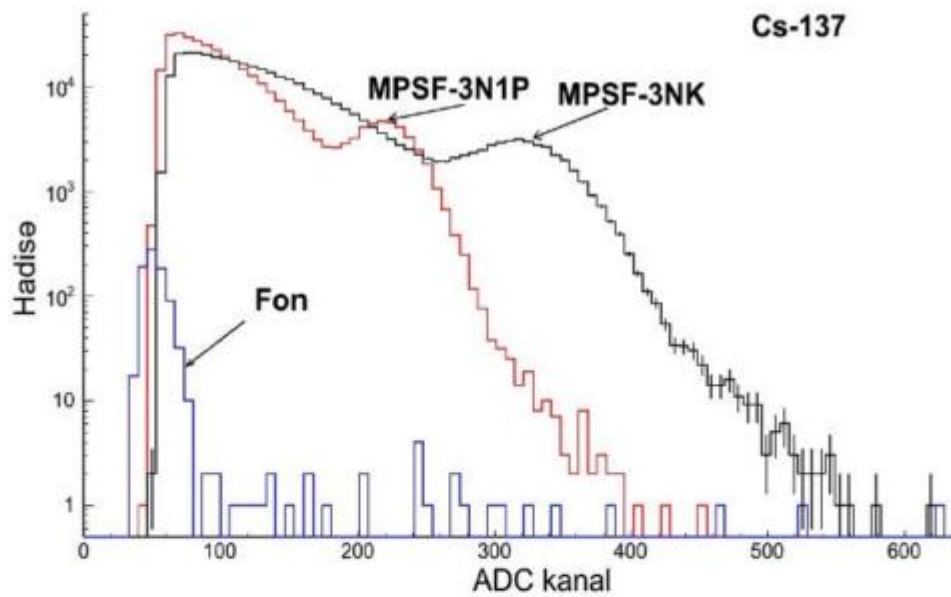
Şəkil 5.2.1 Fon, Cs-137 və Th-228 radioizotoplarının buraxdığı qamma şüaların amplituda görə paylanma spektrləri [38, s.383-385].



Şəkil 5.2.2 ¹⁵²Eu, ⁹⁰Sr/Y və ²⁵²Cf radioizotoplarının buraxdığı qamma beta və neytron şüaların amplituda görə paylanma spektrləri [11, s.145; s.79,38, s.383-385].



Şəkil 5.2.3 ^{252}Cf izotopununun buraxdığı sürətli neytronların gücləndiricinin çıxışında yaratdığı siqnalın forması.



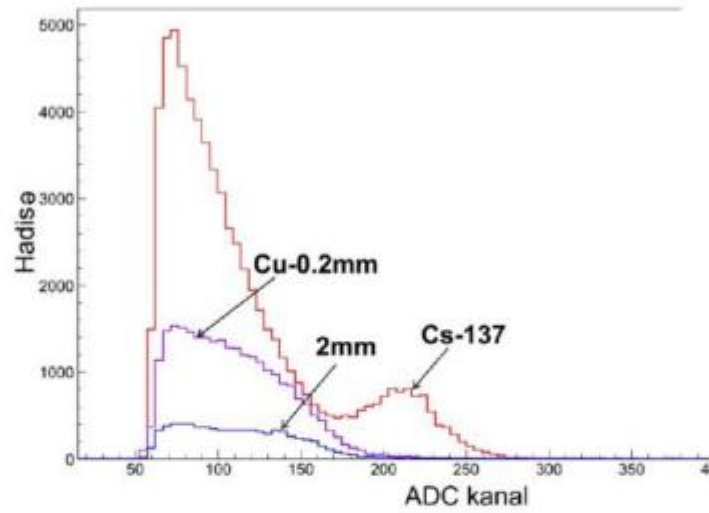
Şəkil 5.2.4 MSFD (3N1P və 3NK) fotodiod və plastik ssintilyator əsaslı qeydedicinin ^{137}Cs izotopunun buraxdığı ionlaşdırıcı şüalanmanın amplitud spektri .

İstifadə edilən p-terphenil ssintilyatorunun ölçüləri $3 \times 3 \times 35$ mm³ olmuşdur. P-terfenil ssintilyatorlar fotodiodlara şəffaf epoksid kleyi ilə yapışdırılmışdır. Detektorun ölçüləri kiçik olduğundan qeyd etmə effektivliyini artırmaq üçün ssintilyatorla radioizotop arasındakı məsafə 5 mm seçilmişdir. Spektrlərin çəkilməsi zamanı təbii radiasiya fonu da nəzərə alınmışdır. İlkin olaraq ¹³⁷Cs radioizotopunun spektri çəkilmişdir. Şəkil 5.2.4-də MSFD (3N1P və 3NK) fotodiodları ilə qeyd edilən ¹³⁷Cs radioizotopunun amplituda görə paylanma spektrivərilmişdir [4, c.21, s.37-43]. Spektrdən görüldüyü kimi MSFD-3N1P fotodiodu ilə qeyd edilən hadisələrin maksimumu ADC-in 400-cü kanalında və MSFD-3NK fotodiodlarında isə bu 550-ci kanalda müşahidə edilmişdir. Məlumdur ki, ¹³⁷Cs radioizotopunun parçalanması zamanı parçalanmanın 93,5 % hissəsi enerjisi 661,7 keV olan səviyyəyə keçir. Lakin bu keçiddən 661,7 keV enerjili qamma şüalarının buraxılması 85,1 % təşkil edir. Yerdə qalan hissəsi 8,4 %-i daxili keçidlə müşahidə edilir. Belə daxili keçid zamanı 661,7 keV enerjili qamma şüası udulur və enerjisi təqribən 626 keV olan mono energetik elektronun buraxılması ilə nəticələnir. Bununla yanaşı ¹³⁷Cs mənbəsi maksimal enerjiləri 0,84 MeV və 0,5 MeV olan iki beta zərrəciklərini buraxır. Məhz bu səbəbdəndə spektrodə qamma şüalarının yaratdığı hadisələrlə yanaşı beta zərrəciklərinin yaratdığı hadisələrdə müşahidə edilmişdir. Spektrodə müşahidə edilən hadisələrdən hansı hissəsinin beta zərrəciklərə məxsus olmasını müəyyən etmək olduqca vacibdir. Bu məqsədlə şəkil 5.2.5 -də MSFD-3N1P fotodiodu ilə ¹³⁷Cs radioizotopunun amplituda görə çəkilən spektri göstərilmişdir. Amplitud paylanma spektrinin 186–400-cü kanallarındakı hadisələrin beta zərrəciklərə məxsus olmasını yoxlamaq üçün qalınlıqları 100–2000 mkm arasında dəyişən mis lövhələr detektorla ¹³⁷Cs mənbəsi arasında yerləşdirilmişdir. Spektrdən görüldüyü kimi 100 mkm qalınlıqlı mis lövhə detektorla radioizotop arasında yerləşdirdikdə beta zərrəciklərə uyğun gələn hadisələrin sayı azalmışdır. Mis təbəqələrin qalınlığı 2 mm olduqda 626 keV enerjili beta zərrəciklər tam udulmuş və bu zaman spektrodə yalnız 662 keV enerjili qamma şüaların Kompton kənarı müşahidə edilmişdir. Xüsusi ilə 50–150 kanallara düşən hadisələrə baxsaq görürük ki bu oblastdakı hadisələrin sayı daha kəskin azalır. Bu hissədəki hadisələr mis təbəqənin qalınlığı artdıqca isə spektrodə hadisələrin

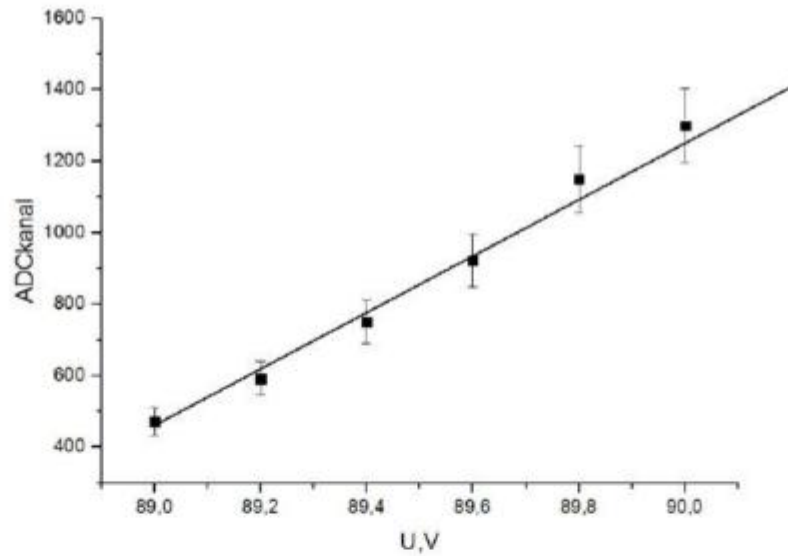
sayının ümumi azalması müşahidə edilmişdir. Bu intervaldakı hadisələrin azalması məhz maksimal enerjiləri 0,5 MeV və 0,84 MeV olan beta zərrəciklərin aşağı enerji oblastının udulması nəticəsində baş vermişdir. Spektrdən görüldüyü bu tip detektorun qeyd etdiyi beta zərrəciklərinin orta sayı təqribən 10500 hadisə olmuşdur.

Şəkil 5.2.6-da MSFD-3NK fotodiodu və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorun ^{137}Cs mənbəsindən buraxılan mono energetik beta zərrəciklərinin amplitudunun gərginlikdən asılılığı göstərilmişdir [4, c.21, s.37-43]. MSFD-3NK fotodioduna tətbiq edilən gərginliyi dəyişərək siqnalın amplitudunun və enerji ayırdetməsinin dəyişməsi müşahidə edilmişdir. MSFD-3NK fotodiodlara tətbiq edilən gərginlik 89 – 90 V intervalında dəyişməsi 0,2 V addımla edilmişdir. Hər ölçmə müddəti 7 dəqiqə seçilmişdir. MSFD-3NK fotodioduna tətbiq edilən gərginliyin 89 V qiymətində mono energetik beta zərrəciyinə uyğun gələn amplitud 472-ci kanalda müşahidə edilmişdir. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində beta zərrəciyinə uyğun gələn amplitud 1,25 dəfədən başlayaraq 3 dəfə qədər artmışdır. Amplitudun kəskin dəyişməsi 89,8 V (1340 kanal) gərginliyindən başlayaraq 90 V (1450 kanal) gərginliyə kimi müşahidə edilmişdir. Amplitudun bu oblastda belə kəskin dəyişməsi selvari oblastda gücləndirmə əmsalının və fotodiodun foto qeydetmə effektivliyinin artması hesabına baş vermişdir. Gərginliyin sonrakı böyük qiymətlərində MSFD-3NK fotodiodların xarakteristikalarının idarə edilməsi çətinləşmişdir. MSFD-3NK fotodiodlarına tətbiq edilən gərginliyin müxtəlif qiymətlərində mono energetik beta zərrəciyinə uyğun gələn enerji ayırdetməsi 22 – 24 % arasında dəyişmişdir. Maksimum amplitudun yarım eni tətbiq edilən gərginlikdən asılı olaraq 122 – 364 kanal arasında dəyişmişdir. Spektrlər çəkilən zaman tam qeyd edilən hadisələrin sayı 26808 hadisə olmuşdur. Mono energetik beta zərrəciklərinə uyğun gələn hadisə tam hadisələrin 26 %-nı təşkil etmişdir [4, c.21, s.37-43].

Bununla yanaşı p-terfenil ssintilyatoru və MSFD fotodiodundan ibarət detektorun enerjiləri 0,060 MeV – 3 MeV intervalında olan ionlaşdırıcı qamma şüalarını qeyd etməsini yoxlamaq üçün ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs , ^{60}Co və ^{228}Th



Şəkil 5.2.5 Müxtəlif qalınlıqlı mis təbəqə ilə ^{137}Cs radioizotopunun amplituda görə çəkilmiş spektri.



Şəkil 5.2.6 MSFD-3NK fotodiodu və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektor ilə qeydedilən mono energetik beta zərrəciklərin amplitudunun gərginlikdən asılılığı.

nöqtəvi radioizotopundan istifadə edilmişdir. Bu zaman plastik ssintilyatorla qeyd edilən qamma şüalarının Kompton kənarına uyğun gələn enerjilər 0,060 MeV – 2,381 MeV arasında dəyişmişdir (şəkil 5.2.7) [4, c.21, s.37-43].

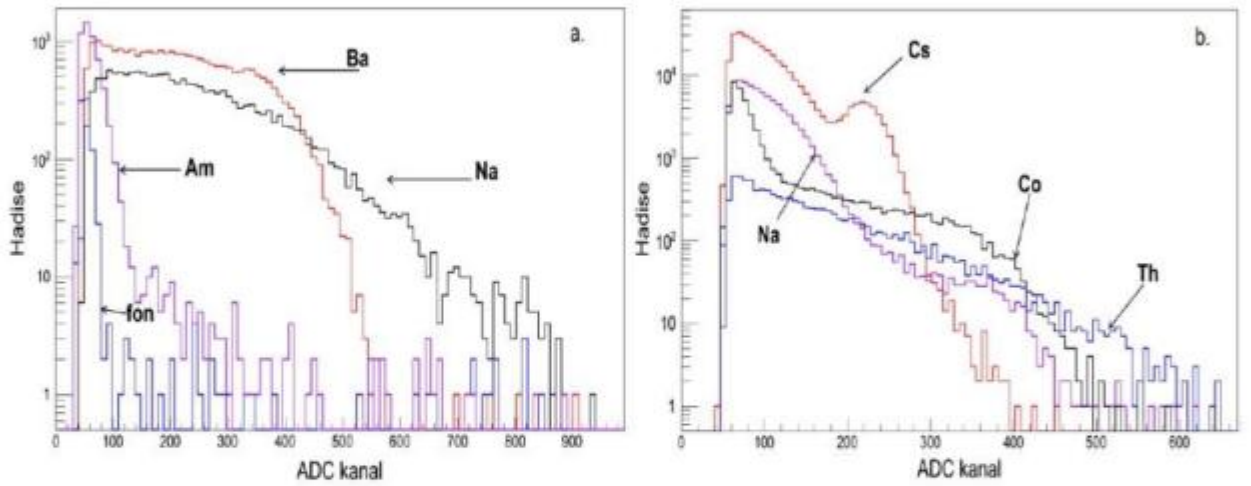
Şəkil 5.2.8-də p-terfenil əsasında hazırlanmış detektorun Kompton kənarına görə kalibrlənmə əyrisi verilmişdir. Əyridən görüldüyü kimi bu asılılıq xəttidir və belə ifadə edilir:

$$ADC=535.22+E_{\text{Kompton kənarı}}\times 0.31 \quad (5.2.1)$$

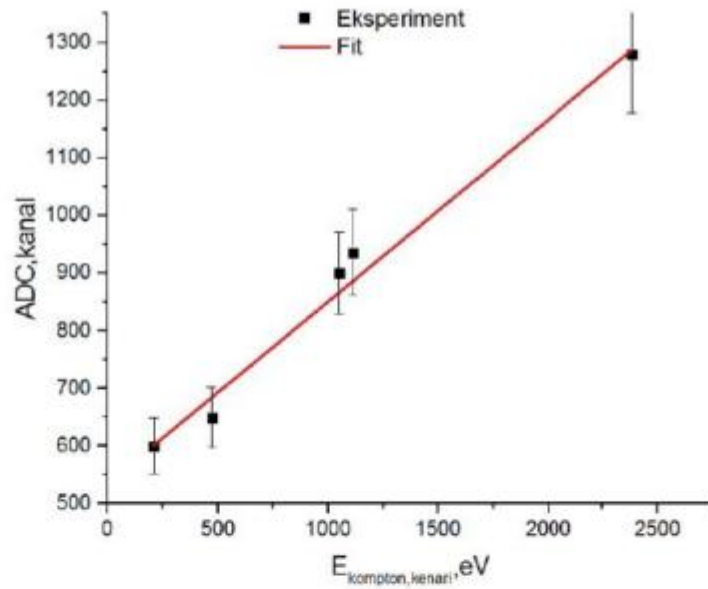
Burada ADC kompton kənarına uyğun gələn siqnalın amplitudur və $E_{\text{Kompton kənarı}}$ Kompton kənarına uyğun gələn enerjidir və keV ifadə edilmişdir [4, c.21, s.37-43].

MSFD-3NIP və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorların qeyd etdiyi enerji spektrindən görüldüyü kimi bu tip detektorların minimum qeydetdiyi enerji amerisium radioaktiv maddəsinin şüalandırdığı 0,0596 MeV enerjili elektromaqnit şüaları olmuşdur [7, c.5, s.33-43].

Əksər hallarda bir radioizotop eyni zamanda həm qamma-beta və yada alfa-qamma şüaları şüalandırır. Belə qarışıq şüalanma olduğu halda qeyri-üzvi ssintilyatorlar əsasında hazırlanmış detektorların enerji ayırdetməsi və sayma sürəti pisləşir. Şəkil 5.2.9-da LFS qeyri-üzvü ssintilyatoru və MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektor ilə çəkilmiş ^{137}Cs radioizotopun spektri verilmişdir. Spekrtdən görüldüyü kimi, ümumi qeyd edilən spektrdə mürəkkəb şüalanmanın yaratdığı hadisələr fotopikin enerji ayırdetməsini və Kompton kənarını kəskin pisləşdirir. Bu spektdə 662 keV enerjili fotoelektron uyğun gələn enerji ayırdetməsi 19 % olmuşdur. Bu tip detektorlarda əsas məqsəd qamma şüaların qeydedilməsi olduğundan digər ionlaşdırıcı zərrəciklərin (alfa və beta) təsirini aradan qaldırmaq üçün detektorla mənbə arasında qalınlığı 5000 mkm olan mis lövhə yerləşdirilir. Mis lövhə yerləşdirdikdən sonra spektrdən görüldüyü kimi spektrdə yalnız qamma şüalarının yaratdığı effektlər müşahidə edilmişdir. 662 keV enerjili qamma şüasına uyğun gələn fotopikin enerji ayırdetməsi yaxşılaşmış və 12,2 % alınmışdır. Ümumilikdə enerji

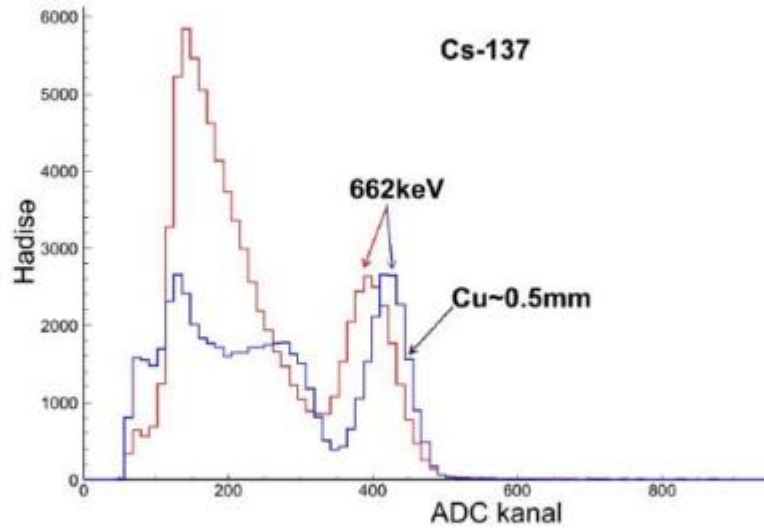


Şəkil 5.2.7 MSFD-3N1P fotodiodu və plastik ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorun müxtəlif enerjili qamma şüaları amplituda görə paylanması spektri.

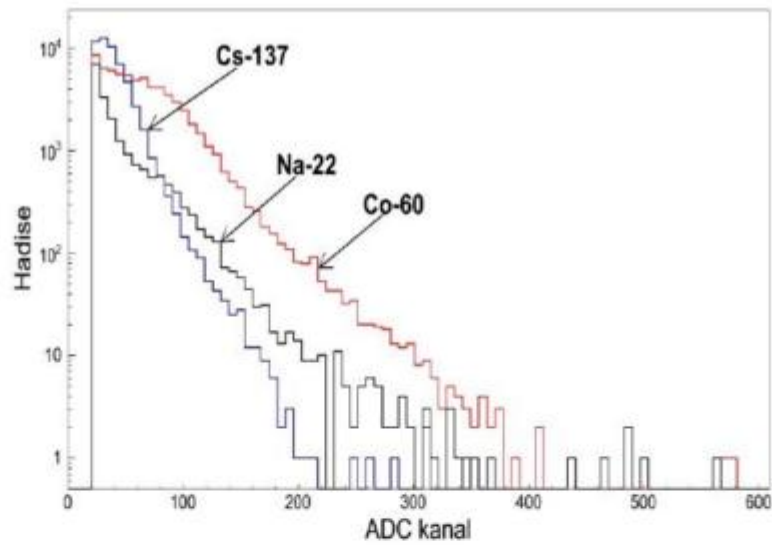


Şəkil 5.2.8 MSFD-3N1P fotodiodu və plastik ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorun kalibrlənmə əyrisi.

ayırdetməsi təqribən 36 % yaxşılaşmışdır. Spekrdən görüldüyü kimi qamma şüasının Kompton kənarını foto pikdən tam ayrılmışdır. Daha sonra maye ssintilyatordan istifadə edərək MSFD fotodiodun qamma şüaları qeyd etmə həssaslığı tədqiq edilmişdir. Maye ssintilyatorların ucuz olması onlar əsasında böyük həcmli detektorların hazırlanmasına imkan verir. Maye ssintilyatorların yeganə çatışmazlığı onların foton çıxışının kiçik olması və buraxdığı ssintilyasiya fotonlarına uyğun gələn dalğa uzunluğunun 400 nm-dən kiçik oblastda yerləşməsidir. Qamma şüaları qeyd etmək üçün biz PPO– 2,5-diphenyloxazol ssintilyatorundan istifadə edilmişdir. Ssintilyatorun həcmi 10 ml olmuşdur. Ssintilyator şəffaf şüşə boruda yerləşdirilmişdir. Şüşə borunun diametri 2,5 sm olmuşdur. Ssintilyatorda yaranan qamma şüaları qeydetmək üçün xarici diametri 7 mm olan Viniston konusu istifadə edilmişdir. Şüşə borunun hərtərəfi ağ teflonla tam bağlanmışdır. MSFD fotodiod olaraq 3N1P fotodiodu istifadə edilmişdir. Siqnalı gücləndirmək üçün gücləndirməsi 30 olan gücləndirici istifadə edilmişdir. Bu tip detektorla minimum qeyd edilən qamma şüasının enerjisi 511 keV olmuşdur. Şəkil 5.2.10-da MSFD-3N1P fotodiodu ilə çəkilmiş qamma şüaların amplitud paylanması spektri göstərilmişdir. Bu spektrlərdə foto pikin müşahidə edilmə ehtimalı çox kiçik olduğundan qamma şüasının fotopikinə uyğun gələn enerjisi haqqında məlumat əldə etmək mümkün olmamışdır. Lakin ^{22}Na və ^{137}Cs radioizotoplarının buraxdığı qamma şüalara uyğun gələn Kompton kənarları tam müşahidə edilmişdir. Kompton səpilməsinə görə kompton kənarı qamma şüaların enerjisi artdıqca yuxarı enerji oblastına sürüşmüşdür. ^{137}Cs mənbəsinin buraxdığı 662 keV enerjili qamma şüasının Kompton kənarı 188-ci kanalda müşahidə edilmişdir. ^{60}Co mənbəsinin buraxdığı 1332 keV enerjili qamma şüalarına uyğun gələn kənar isə 387-ci kanalda müşahidə edilmişdir. Görüldüyü kimi bu detektorların xətiliyi özünü tam saxlamışdır (1332/662~387/188). Spekrdə ^{137}Cs mənbəsinin buraxdığı mono energetik beta zərrəcikləri müşahidə edilməmişdir. Buna səbəb isə maye ssintilyatorun xüsusi şəffaf şüşə daxilində yerləşməsi olmuşdur. Ölçmələr zamanı radioaktiv izotoplar şüşənin çölündə yerləşdirildiyindən onların buraxdığı beta zərrəciklər şüşədə tamamı ilə udulmuşdur. Nəticədə yalnız qamma şüalarının spektrləri müşahidə edilmişdir.



Şəkil 5.2.9 ^{137}Cs radioizotopundan buraxılan şüalanmanın LFS ssintilyator ilə qeyd edilən siqnalın amplituda görə paylanma spektri.



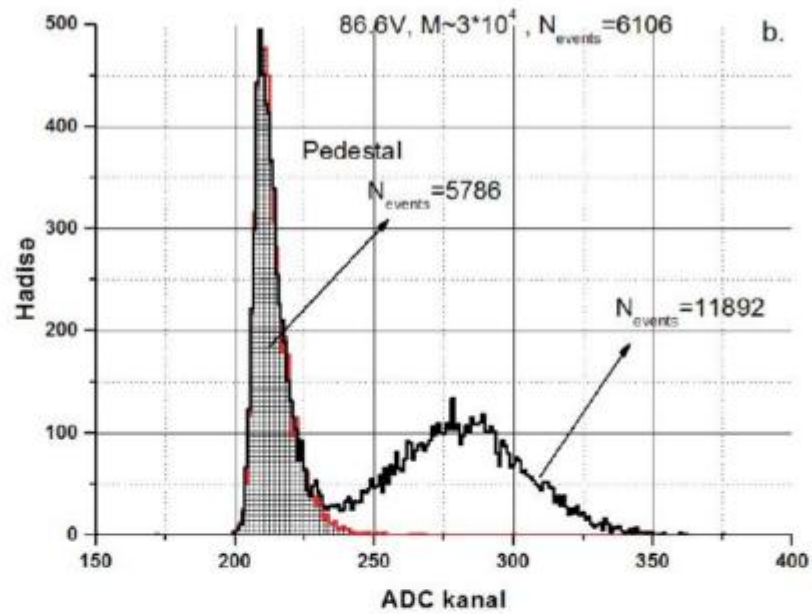
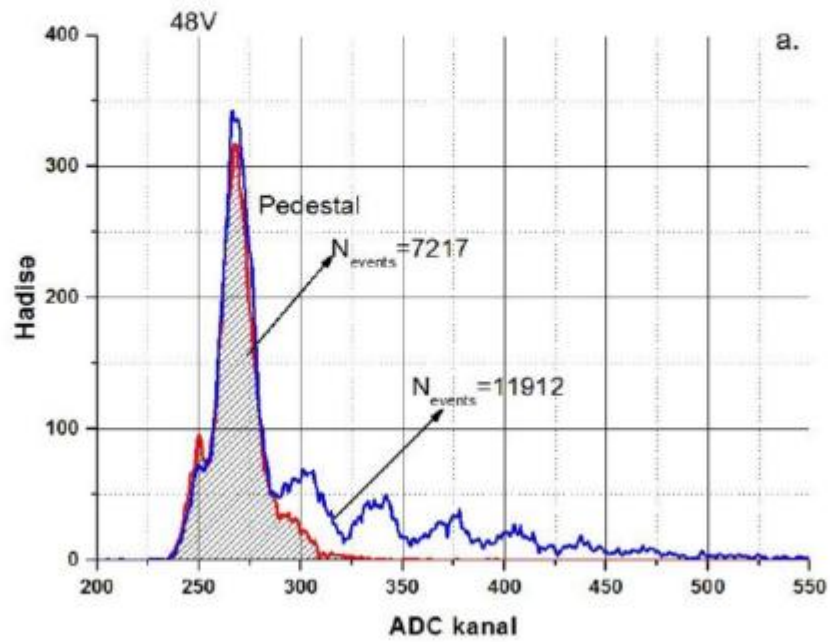
Şəkil 5.2.10 MSFD-3N1P fotodiodu ilə maye ssintilyatorlardan çəkilmiş qamma şüalarının amplitud paylanması .

Daha sonra MSFD və BCF-10 tipli plastik ssintilyatordan istifadə edərək alfa zərrəcikləri qeydetmə həssaslığı tədqiq edilmişdir (şəkil 5.2.11 a, b). Ssintilyator olaraq fransanın Saint-Gobain Crystals firmasının istehsalı olan BCF-10 tipli ssintilyatorlardan və MSFD-3N/CPTA-143-30 fotodiodundan istifadə edilmişdir. BCF-10 fiber ssintilyatorların ölçülərinin kiçik olması, elastik olması və ucuz olması bunların əksər təcrübələrdə geniş tətbiq edilməsinə imkan verir. Alfa zərrəcik mənbəsi olaraq ^{241}Am radioizotopundan istifadə edilmişdir. ^{241}Am radioizotopu $\sim 5,5$ MeV enerjili alfa zərrəcikləri ilə yanaşı aşağı enerjili (~ 60 keV) qamma şüalarında şüalandırır. Fiber ssintilyatorun buraxdığı şüalanmanı qeydetmək üçün istifadə edilən fotodiodların sahələri 1 mm^2 olmuşdur. Ölçmələr zamanı BCF-10 fiber ssintilyatoru ilə ^{241}Am radioizotopu arasındakı məsafə 1 mm seçilmişdir. BCF-10 fiber ssintilyatoru və ^{241}Am radioizotopunun vəziyyətləri fiksasiya edilmişdir. Fiber ssintilyatordan alınan foton sellini qeyd etmək üçün MSFD fotodiodlarının yerləşdirilməsi zamanı fotosiqnalın maksimum halı götürülmüşdür. Fiber ssintilyatorun MSFD fotodiodla birləşən hissəsi tam hamarlanmışdır ki, səthləri birbirinə maneəsiz toxunsun. Fiberlə MSFD fotodiodlar arasında yaranan foton selinin tam ötürülməsini təmin etmək üçün ötürücü şəffaf mayedən istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodların xassələri temperaturdan asılı olduğundan ölçmələr zamanı temperatur dəyişməsi $22 \pm 0,5$ °C olmuşdur. Alfa zərrəcikləri fiber ssintilyatorların səthinə perpendikulyar istiqamətdə düşdükdə onlar fiberin ssintilyator özəyinə yaxınlaşa bilmirlər və fiberin 100 mkm qalınlıqlı qoruyucu təbəqəsində udulurlar. Bu zaman ssintilyasiya fotonları yaranmır. SRİM simulyasiya proqramından istifadə edərək məlum olmuşdur ki $5,5$ MeV enerjili alfa zərrəciyi fiberin daxilində təqribən 25 mkm məsafə qət edə bilər. Alfa zərrəciklərinin qeyd edilməsi zamanı onların fiber ssintilyatorun en kəsiyinə perpendikulyar istiqamətdə düşməsi təmin edilmişdir. Bu zaman fiber ssintilyatorun bir tərəfi MSFD fotodiodlara qoşulmuş və digər tərəfi isə ^{241}Am radioizotop mənbəsinə yönəldilmişdir. MSFD fotodiodlardan alınan siqnalları gücləndirmək üçün gücləndirmə əmsalı 36 olan gücləndiricilərdən istifadə edilmişdir. Şəkil 5.2.11 –də MSFDD-3N və CPTA-143-30 tipli selvari fotodioddan oxunan siqnalın spektri verilmişdir. Spekrdən görüldüyü kimi CPTA-143-30

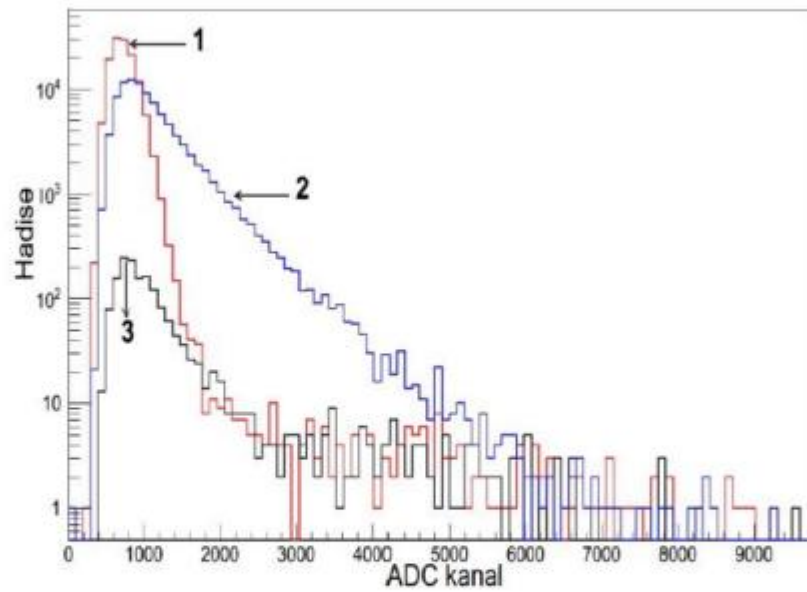
fotodiodlarının FQE-sinin çox kiçik olması qeyd edilən fotoelektronların orta sayının 2,5 fotoelektron olduğunu göstərmişdir [2, s.25-28]. Sıqnalın amplitudunun kiçik olması əksər halda qeydedilən sıqnalın qaranlıq elektronlarla qarışmasına səbəb olur. Lakin MSFD-3N fotodiodlarında isə qeyd edilən alfa zərrəciyinə uyğun gələn sıqnalın amplitudu dəfələrlə yüksək olmuşdur və bu halda sıqnalın qaranlıq elektronlar tərəfindən yaradılan sıqnalla səhv salınma ehtimalı kəskin azalır. Nəticədə MSFD-3N fotodiodu CPTA-143-30 ilə müqayisədə 30 % daha çox alfa zərrəciyi qeyd etmişdir.

İşdə həmçinin də sürətli neytronların qeyd edilməsində baxılmışdır. Neytronları qeyd etmək üçün p-terfenil (C_6H_{18}) və stilbeni ($C_{14}H_{12}$) qeyri üzvi ssintilyatorlarından istifadə edilmişdir (şəkil 5.2.12 və şəkil 5.2.13). Radioizotopdan buraxılan sürətli neytronların qeyd edilməsi yüklü zərrəciklərdə olduğu kimi bir başa deyil ssintilyatorun hidrogen atomu ilə toqquşması zamanı yaranan yuxarı enerjili protonlar vasitəsi ilə qeyd edilir. Yaranan yuxarı enerjili protonlar ssintilyasiya mərkəzlərini və molekulları həyacanlandıraraq ssintilyasiya fotonlarının yaranması ehtimalını artırır. Artıq bir-neçə toqquşmada iştirak edən sürətli neytronlar enerjilərini itirir və neytron proton çevrilməsi baş verir. Təcrübələrdə istifadə edilən neytronun enerjisi 0,02 eV – 15 MeV oblastı əhatə etmişdir. Maksimum müşahidə edilən neytron çıxışı 2,5 MeV enerjide müşahidə edilir. İstifadə edilən stilben ssintilyatorunun diametri $d=3$ sm və hündürlüyü $l=2$ sm olmuşdur. Stilben ssintilyatorunun buraxdığı fotonların maksimal dalğa uzunluğu 400 nm, 1 MeV enerji üçün işıq çıxışı 14000 foton və sönmə müddəti təqribən 3,5 nsan olmuşdur [34, c.10, s.1-7]. Ssintilyatorun ölçüsü istifadə edilən MSFD-3N1P fotodiodunun ölçülərindən dəfələrlə böyük olduğundan işıq itkisini azaltmaq üçün foto qeydedici ilə ssintilyator arasına giriş diametri 0,72 sm, çıxış diametri 0,33 sm və uzunluğu 1,01 sm olan işıq yönəldicisindən istifadə edilmişdir.

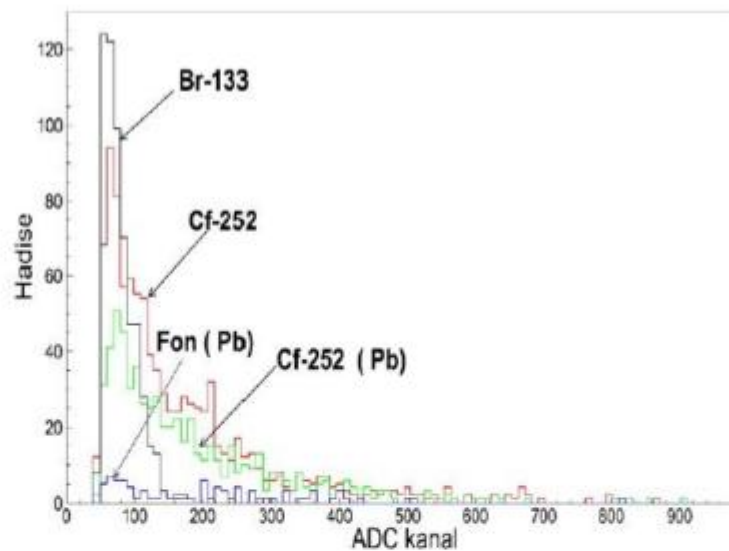
Şəkil 5.2.12-də amplitud paylanma spektrdən görüldüyü kimi stilben ssintilyatoruda digər plastik ssintilyatorlar kimi qamma şüaları qeyd etmə həssaslığına malikdirlər və yalnız qamma şüasının Kompton kənarı haqqında məlumat almaq mümkündür. Qamma şüa mənbəsi olaraq 662 keV enerjili ^{137}Cs



Şəkil 5.2.11 ^{241}Am izotopundan buraxılan 4,5 MeV enerjili alfa zərrəciklərinin MSFD-3N /CPTA-143-30 fotodiodları və Birkony fiber ssintilyatorları ilə çəkilmiş spektri [2, s.25-28].



Şəkil 5.2.12 Stilben ssintilyatoru və MSFD-3N1P fotodiodu ilə qeyd edilən sürətli neytronların və qamma şüaları amplituda görə paylanması [34, c.10, s.1-7].



Şəkil 5.2.13 MSFD-3N1P fotodiodu və plastik ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorun ^{252}Cf , ^{133}Ba və təbii radioizotopların buraxdığı ionlaşdırıcı radiasiyanın amplituda görə çəkilmiş spektri.

radioizotopundan istifadə edilmişdir. Spekrtdən göründüyü kimi 662 keV enerjili qamma şüasının Kompton kənarı 200-cü kanalda müşahidə edilir (480 keV). Lakin ^{252}Cf radioizotopunun amplitud paylanma spektri çəkilərkən ARÇ-nin 100–600 kanallarında əlavə hadisələr müşahidə edilir. Məhz qeyd edilən bu hadisələr neytronlar hesabına formalaşmışdır. Eyni ilə də digər tip plastik p-terfenil ssintilyatoru ilə də neytronları qeydetmə həssaslığı tədqiq edilmişdir. P-terfenil ssintilyatorunun eni- 3 mm, uzunluğu- 3 mm və qalınlığı isə 35 mm olmuşdur. İstifadə edilən ^{252}Cf radioizotopunun yarım parçalanma müddətinin 2,64 il olması və uzun müddət istifadə olunması radioizotop daxilində digər qız nüvələrin müşahidə edilməsinə səbəb olur. Bu qız nüvələrinin buraxdığı qamma şüalarının maksimum enerjisi təqribən 300 keV olmuşdur və spektrin çəkilməsi üçün germanium detektorundan istifadə edilmişdir. P-terfenil ssintilyatoru ilə qeydedilmə zamanı qamma şüasının kompton kənarının yerini müəyyən etmək üçün əlavə ^{133}Ba (356 keV enerjili qamma mənbəsi) mənbəsindən istifadə edilmişdir. Amplitud paylanma spektrindən (şəkil 5.2.13) göründüyü kimi 356 keV enerjili qamma şüalarının yaratdığı hadisələr ARÇ-nin 40–140 kanallarını əhatə edir. Ba-133 radioizotopunun buraxdığı qamma şüasının udularaq detektora düşməməsini təmin etmək üçün qalınlığı 2,5 sm olan təmiz qurğuşun təbəqədən istifadə edilmişdir. Bu zaman istifadə edilən bu təbəqə ^{252}Cf radioizotopundan buraxılan qamma şüaları tam ekranlaşdırmağa imkan verir. Belə olduğu halda qeyd edilən spektrdə yalnız neytronların yaratdığı hadisələr müşahidə edilir. Amplitud paylanma spektrindən göründüyü kimi ARÇ-nin 40–140 kanallarında yenə hadisələr müşahidə edilir. Spekrtdən göründüyü kimi qurğuşun təbəqə qoyulduqda hadisələrin maksimal azalması məhz 40–140-cı kanalda müşahidə edilmişdir və azalma isə bir başa olaraq qamma şüalarının ekranlaşması hesabına baş vermişdir. Lakin amplitud paylanma spektrində ARÇ-nin 140 böyük oblastındakı hadisələrdə kəskin dəyişmələr müşahidə edilmir. Hər iki ssintilyatorla alınan nəticələr bir daha təsdiq etmişdir ki, yuxarı enerji oblastına düşən hadisələr məhz sürətli neytronlar tərəfindən yaradılmışdır. Bu tip plastik ssintilyator tərkibli detektorlar əksər təcrübələrdə qamma, beta, alfa və neytron sayğaclarının hazırlanmasında və dozimetrlərin hazırlanmasında istifadə oluna bilər.

5.3. Qeyri üzvü ssintilyator əsasında hazırlanmış detektor modullarının radiasiyaya həssaslığının tədqiqi

Detektorların hazırlanmasında istifadə edilən qeyri-üzvü ssintilyatorların sıxlıqlarının, atomsıra nömrəsinin və foton çıxışlarının yüksək olması bunların tətbiq sahələrinin genişlənməsinə imkan verir. Dozimetrlərin və spektrometrlərin hazırlanmasında son zamanlar NaI, CsI, LFS və LaBr ssintilyatorlarından geniş istifadə edirlər. Bu məqsədlə biz işdə qamma dozimetr və spektrometr hazırlamaq üçün nəzərdə tutulmuş iki tip qeyri üzvü LFS-3 və NaI ssintilyatoru istifadə etmişik. İstifadə edilən LFS-3 ssintilyatorlarının sıxlığı $7,35 \text{ q/sm}^3$, maksimal şüalandırma intensivliyinin dalğa uzunluğu 416 nm, parçalanma müddəti 36 nsan və foton çıxışı isə 80–85 % (NaI) bərabər olmuşdur. İstifadə edilən LFS-3 kristalının ölçüləri $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$ seçilmişdir. Digər tip istifadə edilən NaI qeyri-üzvi ssintilyatorunun parametrləri belə olmuşdur: sönmə müddəti 350 nsan, hər MeV üçünişiq çıxışı 40000 foton, işıq çıxışının maksimumuna uyğun gələn dalğauzunluğu 400 nm və sıxlığı $3,67 \text{ q/sm}^3$ olmuşdur. İstifadə edilən qeyri-üzvü NaI ssintilyatorunun ölçüləri - uzunluğu 35 mm və diametri 16 mm olmuşdur. NaI ssintilyatoru hidroskopik olduğundan aluminium korpusda yerləşdirilmişdir. Qeyri-üzvü NaI ssintilyatorunda yaranan foton selini MSFD fotodiodlara çatırılmasını təmin etmək üçün Viniston işıq yönəldici istifadə edilmişdir.

Təcrübədə istifadə edilən MSFD-3N1P fotodiodlarının parametrləri belə seçilmişdir: işləmə gərginliyi -94,5 V, qaranlıq cərəyanı -120 nA, gücləndirmə əmsalı 6×10^4 və FQE-si 30 % olmuşdur. MSFD fotodioddan alınan siqnalı gücləndirmək üçün gücləndirməsi 36 olan gücləndirici istifadə edilmişdir. İonlaşdırıcı qamma şüa mənbələri olaraq enerjiləri 0,0263 MeV – 1,33 MeV enerji intervalında dəyişən kalibirlənmə üçün nəzərdə tutulmuş radioizotoplar istifadə edilmişdir [43, c.12, s.1-7].

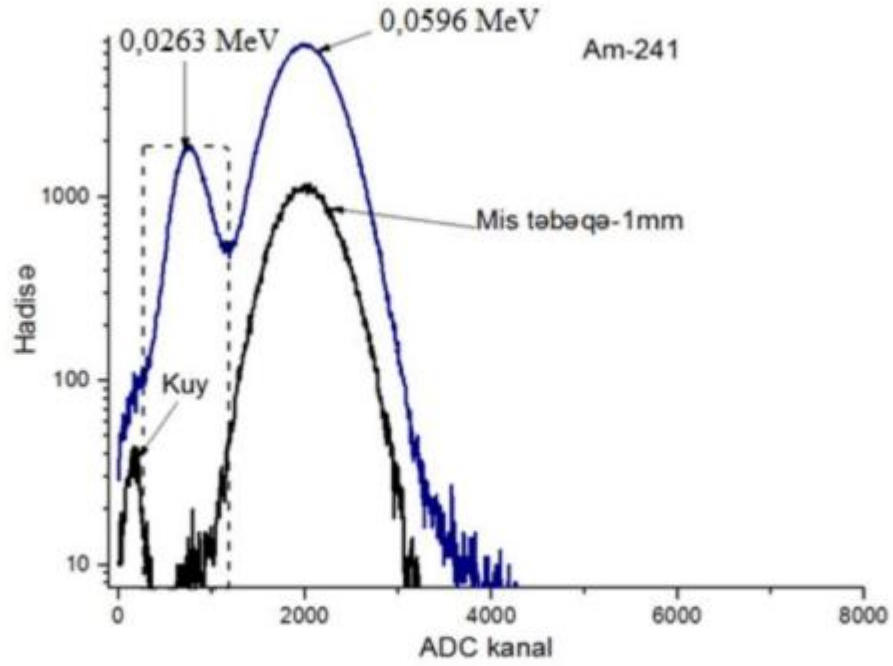
Şəkil 5.3.1-də dərin piksellə 3N1P fotoqeydedicisi və LFS-3 qeyri-üzvi ssintilyatoru ilə çəkilmiş spektr göstərilmişdir. Çəkilən spektr amerisium mənbəsinin buraxdığı əsas 0,0596 MeV enerjili elektromaqnit şüasına uyğundur. Amerisium

mənbəsinin buraxdığı alfa zərrəcikləri ssintilyatorun üzünə sarılmış qalınlığı 50 mkm olan 2 qatlı teflon və aluminium layları keçə bilmədiyindən spektrdə ona məxsus hadisələr müşahidə edilməmişdir. Amerisiumun çəkilmiş spektrindən fotoeffekt hadisəsinin baş verməsi hesabına yaranan hadisələrin maksimumları CAEN ARÇ-in müxtəlif kanallarında formalaşmışdır [7, c.5, s.33-43]. Məlumdur ki, amerisium radioaktiv mənbəsi əsasən enerjiləri 0,0263 MeV və 0,0596 MeV enerjili ionizasiya şüası şüalandırır. ARÇ-in kiçik nömrəli kanallarında müşahidə edilən fotopikin məhz 0,0263 MeV enerjili ionizasiya şüasına məxsus olduğunu müəyyən etmək olduqca vacibdir. Bu qiymət hazırlanan qeydedici sistemin qeydedə biləcəyi minimum enerjini göstərir. Bunun üçün LFS kristalı ilə amerisiumun radioaktiv mənbəsi arasına müxtəlif qalınlıqlı (0,3 mm - 1 mm) mis layı qoyulmuşdur [7, c.5, s.33-43]. Amerisiumun radioaktiv mənbəsinin spektri yenidən çəkilmişdir. Alınan spektrdən görüldüyü kimi ARÇ-in kiçik nömrəli kanallarında müşahidə edilən pik artıq formalaşmışdır. Bu hadisə misin qalınlığı bir millimetr olduqda baş vermişdir. Beləliklə maksimumu ARÇ-in kiçik nömrəli kanallarında müşahidə (740-cı kanal) edilən hadisələr məhz 0,0263 MeV enerjili ionizasiya şüasına məxsusdur. Xüsusi ilə ARÇ-in 100-cü və 200-cü kanallarında formalaşan hadisələrdə ciddi dəyişmələr müşahidə edilməmişdir. Məhz bu kanalda formalaşan hadisələr elektron dövrənin yaratdığı küydür. Amerisiumun çəkilmiş spektrində ARÇ-in böyük nömrəli kanallarında müşahidə edilən pik məhz buraxma payı yüksək olan 0,0596 MeV enerjili ionizasiya şüası hesabına yaranmışdır. Beləliklə ARÇ-in 740-cı və 2012-ci kanalında formalaşan hadisələr 0,0263 MeV və 0,0596 MeV enerjili ionizasiya şüasına məxsusdur. Fotopiklərin maksimum hündürlüyünün yarım eninin maksimumuna nisbəti ~ 50 % və 35 % olmuşdur [7, c.5, s.33-43, 43, c.12, s.1-7].

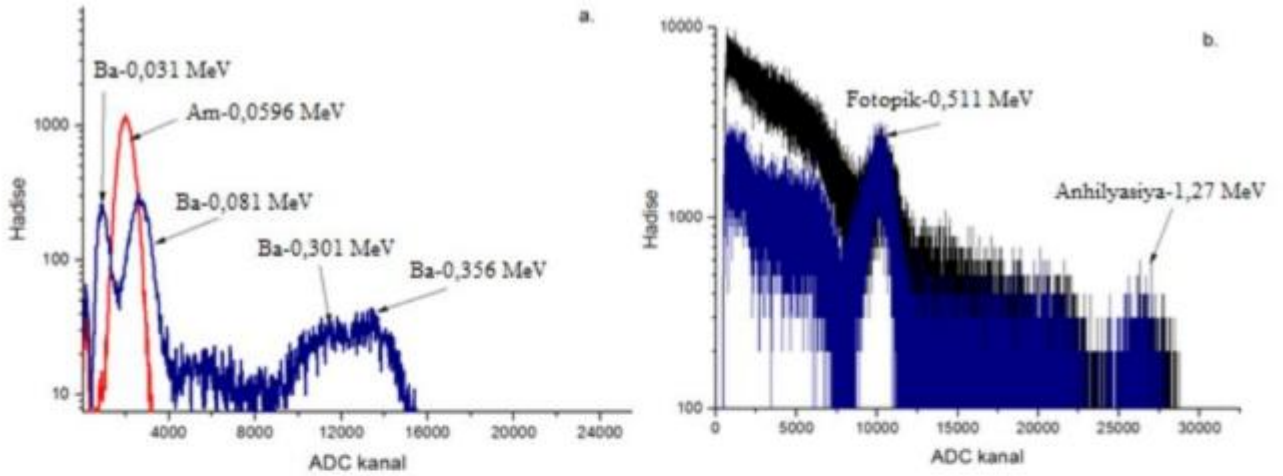
Hazırlanmış qeydedici sistemin 0,031 MeV - 0,356 MeV enerjili ionizasiya şüasına qeydetmək üçün ¹³³Ba radioaktiv nöqtəvi mənbəsindən istifadə olunmuşdur. Şəkil 5.3.2 (a)- da 0,031 MeV - 0,356 MeV enerjili ionizasiya şüalarını ARÇ ilə çəkilmiş enerji spektri verilmişdir. İonizasiya şüalarının çəkilmiş spektrində müxtəlif enerjili fotoeffekt udulması hesabına yaranan piklər formalaşmışdır. Yaranan piklərdən ARÇ-in 921-ci kanalında formalaşan hissəsi barium radioaktiv mənbəsinin

buraxdığı 0,031 MeV enerjili rentgen şüalarına məxsusdur [7, c.5, s.33-43]. Barium radioaktiv mənbəsinin çəkilən spektrinin 2644-cü hissəsində formalaşan hadisələr 0,081 MeV enerjili ionizasiya şüasına məxsusdur. Spektrin 5692-ci hissəsində formalaşan hadisələrdən görünürki bu hadisələr çox saylı Kompton səpilməsində iştirak edən yuxarı enerjili ionizasiya şüası hesabına formalaşmışdır. Yaranan piklərdən ARÇ-in 10552 və 12557-ci hissələrində müşahidə edilən piklər barium radioaktiv mənbəsinin buraxdığı enerjisi 0,301 MeV və 0,356 MeV olan ionizasiya şüası hesabına formalaşmışdır. Hazırlanmış detektor sisteminin 0,511 MeV və 1,27 MeV enerjili ionizasiya şüasına həssaslığını yoxlamaq üçün ^{22}Na radioaktiv nöqtəvi mənbəsindən istifadə olunmuşdur (şəkil 5.3.2 (b)) [7, c.5, s.33-43]. Bu ölçmədə radioaktiv nöqtəvi mənbənin buraxdığı beta zərrəciklərin qarşısını almaq üçün əlavə mis lövhə istifadə edilmişdir. Ssintilyatorada yaranan fotonların sayı çox olduğundan 1 MeV enerjiden böyük şüalanmada CAEN-nin normal diapazonda işləməsi pozulur. Qeyd edilən çətinliyi aradan qaldırmaq üçün signal gücləndiricidən sonra əlavə zəiflədici (1,8 dəfə) qoşulmuşdur. Yaranan piklərdən ARÇ-nin 10211-ci kanalında formalaşan hissəsi ^{22}Na radioaktiv nöqtəvi mənbənin buraxdığı 0,511 MeV enerjili ionizasiya şüasına məxsusdur. ARÇ-nin 25685-ci hissəsi məhz 0,511 MeV enerjili elektron-pozitron annihilyasiyası hesabına formalaşır. Bu hadisə enerjisi 1,27 MeV olan ionizasiya şüasının fotoeffekt udulması hesabına yaranır. Alınan spektrdən görmək olar ki qamma şüasının enerjisi ARÇ-nin qeydetdiyi hadisənin yükü ilə xətti asılıdır. Bu şəkildə həmçinin mis lövhə ilə çəkilmiş spektrdə verilmişdir. Aşağı enerji kanallarında müşahidə edilən sayların azalması natrium radioaktiv nöqtəvi mənbəsin buraxdığı yüklü zərrəciklərin ($E_{\text{or.}} \sim 0,215 \text{ MeV}$ və $E_{\text{mak.}} \sim 0,546 \text{ MeV}$) udulması ilə bağlı olmuşdur. Bu tip yeni radiasiya detektorları vasitəsi ilə ^{22}Na radioaktiv nöqtəvi mənbəsinin buraxdığı 0,511 MeV enerjili ionizasiya şüası üçün fotopikin maksimum hündürlüyünün yarım eninin maksimumuna nisbəti $\sim 12 \%$ tapılmışdır [7, c.5, s.33-43]. Bu tip qeydedicilərin qamma şüasını qeydetmə effektivliyi həmçinin ssintilyatorunun həcmindən də asılıdır. Məhz bu səbəbdəndə spektrlərdə enerjisi böyük olan ionizasiya şüasına uyğun gələn hadisələrin sayı az alınır.

Şəkil 5.3.3-da sənayedə geniş istifadə edilən ^{137}Cs radioaktiv nöqtəvi



Şəkil 5.3.1 LFS kristalı və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət qeydedici ilə ^{241}Am mənbəsinin çəkilmiş spektri [7, c.5, s.33-43, 43, c.12, s.1-7].



Şəkil 5.3.2 LFS kristalı və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət qeydedici ilə ^{133}Ba , ^{241}Am və ^{22}Na mənbələrinin çəkilmiş spektri [7, c.5, s.33-43, 43, c.12, s.1-7].

mənbəsinin buraxdığı 0,662 MeV enerjili ionizasiya şüasının amplitud paylanması göstərilmişdir. Alınan paylanmada 0,662 MeV enerjili qamma şüasının ssintilyatorla qarşılıqlı təsiri zamanı baş verən fotoeffekt və çox saylı səpilmənin yaratdığı hadisələr görünür. ^{137}Cs radioaktiv nöqtəvi mənbəsinin çəkilmiş spektrinin 500-cü kanalından başlayaraq kəsilməz Kompton səpilmələri üstünlük təşkil edir. Səpilmənin maksimumu spektrin 17000-ci hissəsində formalaşmışdır. Fotoeffekt hesabına yaranan hadisələr spektrin 23265-ci hissəsində müşahidə edilmişdir. Bu hissə məhz 0,662 MeV enerjili ionizasiya şüasına məxsusdur. Spekrdə qeydedilən fotopikin maksimum hündürlüyünün yarım eninin maksimuma nisbəti $\sim 10,8\%$ olduğu tapılmışdır [7, c.5, s.33-43, 28, c.14, s.1-5].

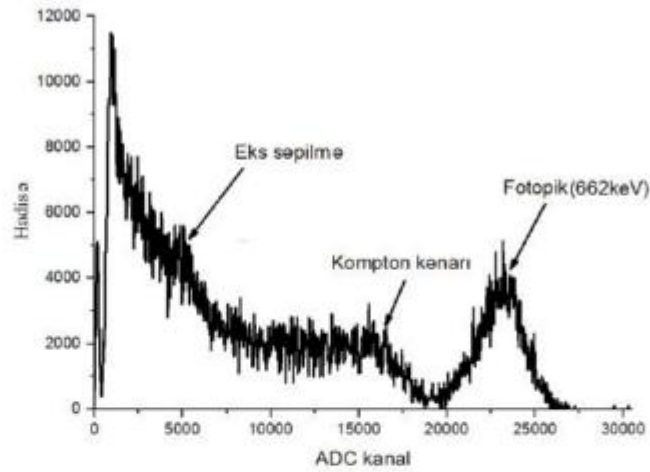
Bu tip detektorla maksimum qeyd ediləbilən ionizasiya şüasını müəyyən etmək üçün ^{60}Co radioaktiv nöqtəvi mənbəsi istifadə edilmişdir (Şəkil 5.3.4). Məlumdur ki bu tip radioaktiv nöqtəvi mənbələr buraxma payı yüksək olan iki yaxın enerjili ionizasiya şüası buraxır: 1,17 MeV və 1,33 MeV. Çəkilmiş spekrdən görüldüyü kimi ARÇ-nin 23181 və 26710-ci hissəsinə uyğun gələn hadisələr, qamma şüalarının itirdiyi enerjinin tam qeydedildiyinə və onların enerjiləri analogi olaraq 1,17 MeV və 1,33 MeV uyğundur [7, c.5, s.33-43]. İstifadə edilən edilən LFS kristalının həcmnin çox kiçik olması səpilmədə iştirak edən fotonların və elektronların əksər hissəsini qeydetməyə imkan vermir. Nəticədə enerjinin müəyyən hissəsi itir və geniş zolaqda hadisələr müşahidə edilir. Bu isə qeydedilən fotopikin maksimum hündürlüyünün yarım enini düzgün təyin etməyə imkan vermir [7, c.5, s.33-43].

Beləliklə yeni hazırlanmış ionlaşdırıcı radiasiya qeydedicilərini ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{22}Na , ^{137}Cs və ^{60}Co radioaktiv nöqtəvi mənbələrindən istifadə edərək qeydetmə həssaslığı tədqiq edilmişdir. Yeni hazırlanmış ionlaşdırıcı radiasiya detektorları qeyd etdiyi ionizasiya şüalanmasını amplituda görə ayırd edə bilir (şəkil 5.3.5). Detektorun üzərinə düşən ionizasiya şüalanmasının enerjisi böyüdükcə qeydedilən siqnalın amplitudu da dəyişir və bu dəyişmə aşağıdakı kimi ifadə edilir [7, c.5, s.33-43, 43, c.12, s.1-7]:

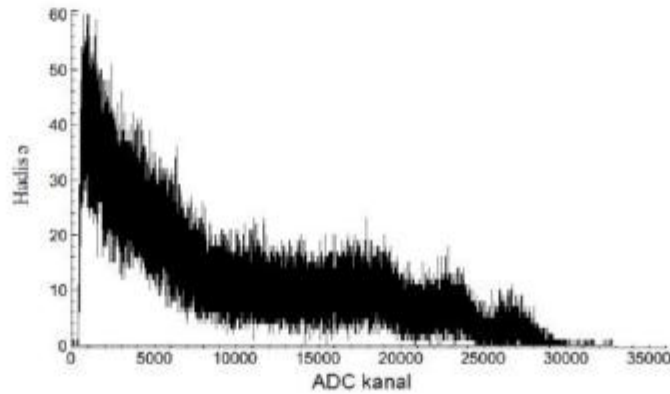
$$\text{ADC}(\text{kanal}) = -180 + 35,9 \times E(\text{keV}) \quad (5.3.1)$$

Kalibrlənmə əyrisi üçün alınmış bu ifadə tərəfimizdən müəyyən edilmiş ifadə ilə üst-üstə düşmüşdür [34, c.10, s.1-7]. Bu halda istifadə edilən fotodiodun optimal işləmə gərginliyində FQE-sinin 22 % (422 nm) tərtibində olduğunu qəbul etsək bu zaman 1,33 MeV enerjili qamma fotonu təqribən LFS ssintilyatorunda 46550 foton yaradır. Yaranan bu fotonlardan selvari prosesi başlananların sayı isə 10241 olmuşdur başqa sözlə mövcud olan piksellərdən yalnız 7,5 % məşğul olmuşdur. Şəkil 5.3.6-də MSFD-3N1P fotodiodunun xəttilik oblastı müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdirki, MSFD-3N1P fotodiodları öz xəttiliyini 500000. fotona kimi saxlaya bilir (fəsil 3-də səh. 143-də daha geniş məlumat verilmişdir). Göstərilən bu üstünlüklər dərin pikselli slevari fotoqeydedicilərin yüksək enerjili ionizasiya şüalanmasını qeydetmək üçün hazırlanan detektorlarda uğurla istifadəsinə imkan verir. Dərin pikselli slevari fotoqeydedicilərin piksel sıxlığı və foton qeydetmə effektivlikləri onların hazırda daha yüksək işıq çıxışlı LaBr, CeBr, NaI və CsI kristalları ilə birlikdə ionlaşdırıcı radiasiya qeydedicilərində istifadə oluna bilər [7, c.5, s.33-43].

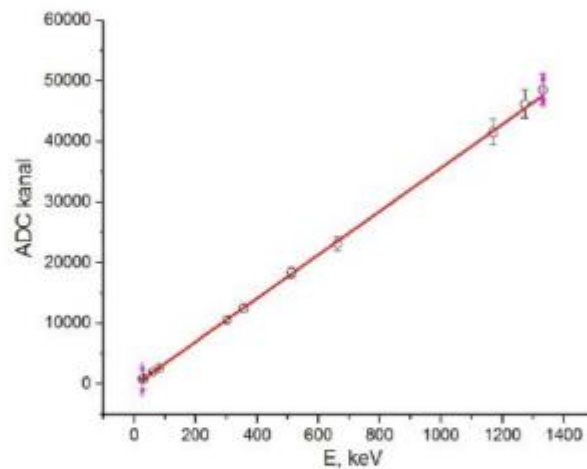
Bu fəsildə həmçinin dərin pikselli MSFD-3NK tipli slevari fotoqeydedici və NaI kristalına əsaslanan ionlaşdırıcı radiasiya qeydedicisinin ionizasiya şüasını qeydetmə performansıda öyrənilmişdir. Bu qeydedicidə istifadə edilən ssintilyatorlarda radioaktiv çirklənmə mövcud deyil [7, c.5, s.33-43]. LFS və MSFD-3N1P ssintilyator detektorundan fərqli olaraq NaI əsasında hazırlanmış detektorda əlavə olaraq işıq yönəldici istifadə edilmişdir (şəkil. 5.3.7) [15, s.523-526, 43, c.12, s.1-7]. MSFD-3NK və NaI əsaslı detektordan alınan siqnalı gücləndirmək üçün iki kaskadlı LH-6657 əsaslı ($G \sim 36$) gücləndiricilərindən istifadə edilmişdir. İstifadə edilən gücləndirici bizim tərəfimizdən təkmilləşdirilmişdir (fəsil 2-də səh.97-də daha geniş məlumat verilmişdir). NaI kristalı və selvari fotoqeydedici əsasında yığılmış qeydedicinin ionizasiya şüasına həssaslığı şəkil 5.3.7 (a.)-da göstərilmişdir. İonlaşdırıcı radiasiya mənbələri kimi nöqtəvi ^{133}Ba , ^{22}Na və ^{137}Cs radioaktiv elementləri tətbiq olunmuşdur. ^{133}Ba izotopu üçün NaI kristalı ilə alınmış spektri LFS ssintilyatoru ilə çəkilən spektrlə müqayisə etsək görərik ki, NaI-nin spektrində 0,031 MeV, 0,081 MeV, 0,301 MeV və 0,356 MeV enerjili ionizasiya şüalarının yaratdığı hadisələrin maksimumları ayırdedilmir. İonlaşdırıcı nöqtəvi ^{137}Cs mənbəsinin spektri



Şəkil 5.3.3 LFS kristalı və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət qeydedici sisteminin ^{137}Cs mənbəsindən qeyd etdiyi siqnalların amplitud paylanması [7, c.5, s.33-43].



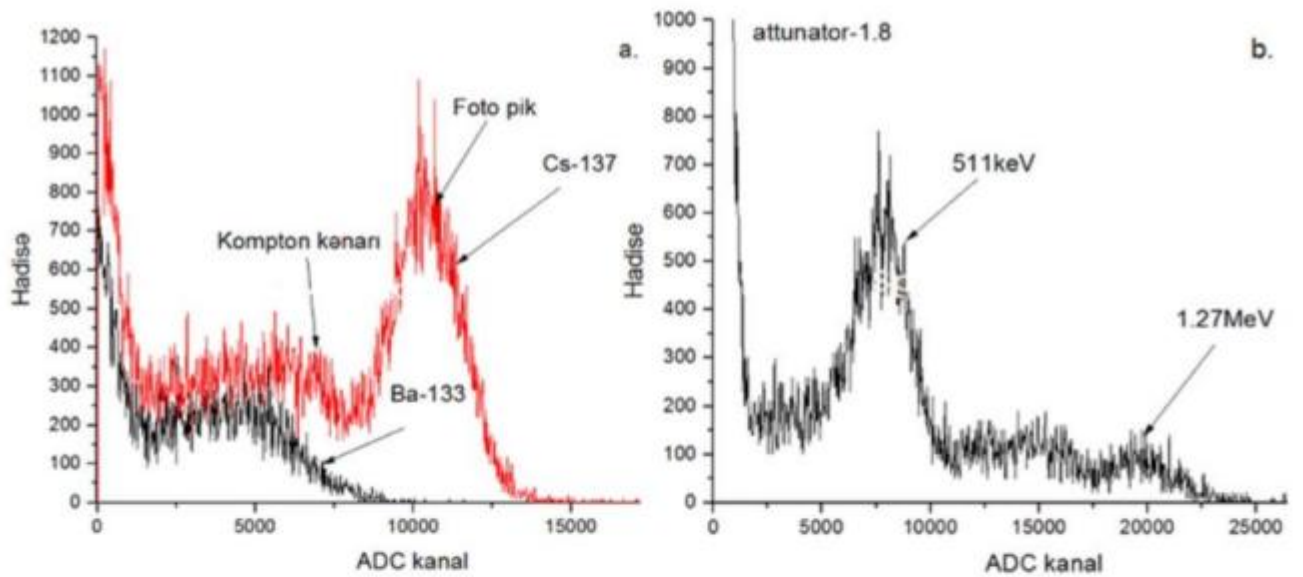
Şəkil 5.3.4 LFS kristalı və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət qeydedici sisteminin ^{60}Co mənbəsi üçün çəkilmiş spektri (zəiflətmə-1.8) [7, c.5, s.33-43].



Şəkil 5.3.5 LFS kristalı və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət qeydedici sisteminin kalibrlənmə əyrisi [43, c.12, s.1-7].



Şəkil 5.3.6 NaI kristal, MSFD fotoqeydedici və ötürücü Viniston konusu [7, c.5, s.33-43, 15, s.523-526, 43, c.12, s.1-7, 179, s.54-55].



Şəkil 5.3.7 NaI kristal və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət qeydedici sisteminin ^{133}Ba , ^{137}Cs (a.) və ^{22}Na (b.) mənbələri üçün çəkilmiş spektri [7, c.5, s.33-43, 38, c.12, s.1-7].

çəkilərkən 0,662 MeV enerjili ionizasiya şüasının yaratdığı fotoeffekt hadisələr görünür (maksimum enerjiyə uyğun) (şəkil 5.3.7 (a.)). Bununla yanaşı spektrin kiçik kanallarında (əsas pikin sol tərəfi) Kompton səpilməsinin yaratdığı hadisələrdə mövcuddur [7, c.5, s.33-43]. Hazırlanmış detektorla qeydedilən 0,662 MeV enerjili fotopikin maksimum hündürlüyünün yarım eninin maksimumuna nisbətinin ~23 % olduğu tapılmışdır. Daha sonra bu detektorların ionlaşdırıcı ^{122}Na nöqtəvi mənbəsinin şüalandırdığı 0,511 MeV və 1,275 MeV enerjili ionizasiya şüasının yaratdığı spektr çəkilmişdir (şəkil 5.3.7 (b.)). Çəkilmiş spektrdə ^{22}Na radioaktiv nöqtəvi mənbənin buraxdığı 0,511 MeV enerjili qamma, 1,27 MeV enerjili elektron-pozitron annihilyasiya şüalanması və çox saylı səpilmə hesabına formalaşan hadisələr görünmüşdür. Alınan spektrlərdən görmək olar ki, NaI kristalı və selvari fotoqeydedici əsasında yığılmış detektor ^{133}Ba , ^{22}Na və ^{137}Cs radioaktiv elementləri ilə çəkilən spektrlərdə amplituda görə xəttliliyini qoruyur [7, c.5, s.33-43]. Hazırlanmış detektorun əsas problemi kiçik enerjili ionizasiya şüaları aşkar etməməsi və onları amplituda görə ayırmamasıdır. Əlbəttə bu problem bir-başına olaraq NaI kristalının və selvari fotoqeydedicinin xassəsindən asılı deyildir. Əsas məsələ ionizasiya şüalarının NaI kristalında yaratdığı ssintilyasiya işıq selinin tamamının fotoqeydediciyə çatdırılmasıdır. Bizim halda isə fotoqeydedici Vinston konusu vasitəsi ilə NaI kristalına birləşmişdir [7, c.5, s.33-43]. Görünür ki, ionizasiya şüalarının NaI kristalında yaratdığı ssintilyasiya işıq selinin böyük hissəsi ya kristaldan tam çıxmır və ya istifadə edilən konusun qəbuletmə bucağı kiçik olduğundan foton selinin müəyyən hissəsi fotoqeydediciyə gəlib çatmır. Bununla yanaşı dərin piksellə MSFD-3NK fotoqeydedicilərinin sızma cərəyanında böyük olması çox kiçik ehtimalla nəticəyə təsir edə bilər. Beləliklə NaI kristalı və selvari fotoqeydedici əsasında yığılmış qeydedicilər kiçik enerjili ionizasiya şüaları aşkar etmək üçün əlverişli olmasalarda, yüksək enerjili şüalanmanın sayının tapılmasında uğurla tətbiq oluna bilər [7, c.5, s.33-43].

5.4. MSFD fotodiodlar əsasında fosfiç detektorlarının hazırlanma imkanlarının tədqiqi

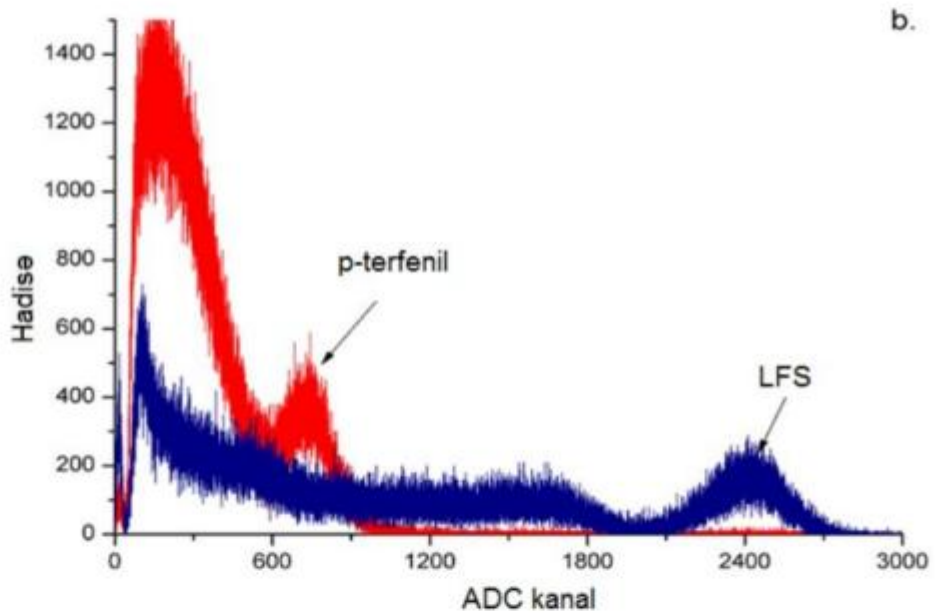
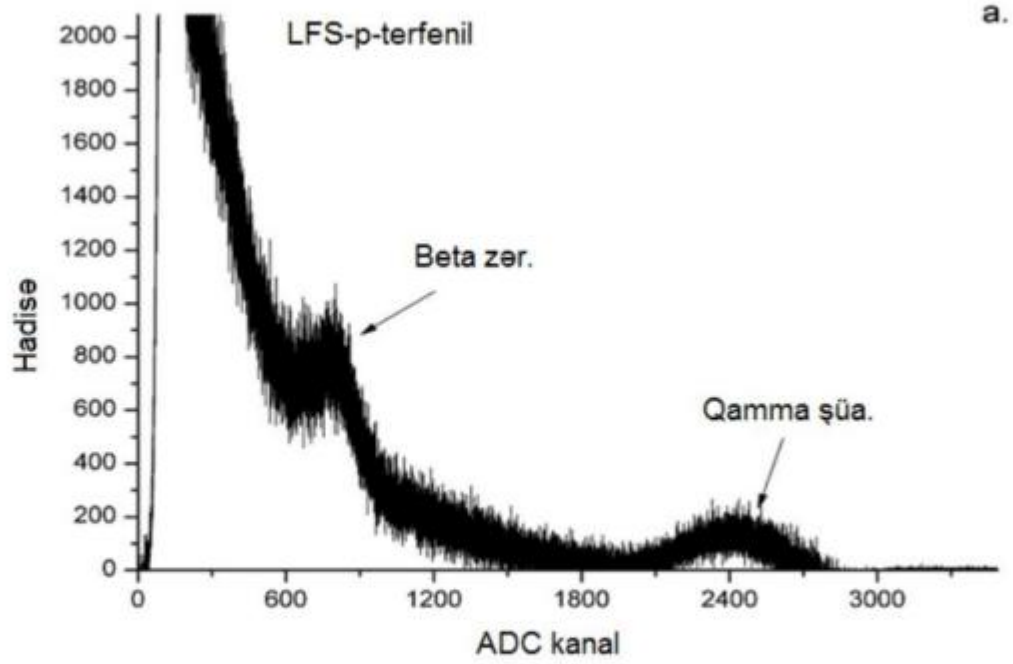
Yüksək enerjilər fizikasında əksər təcrübələrdə tək elementli ssintilyatordan ibarət olan radiasiya detektorları qarışıq radiasiya fonunda tətbiq edilir [100, c.178, s.201-204]. Məsələn qamma şüaların neytron fonunda qeydedilməsi, beta zərrəciklərin qamma fonunda qeyd edilməsi və digər mürəkkəb qamma şüaların beta–neytron fonunda qeyd edilməsini göstərmək olar. Belə olduğu halda bir ssintilyatordan istifadə edərək mürəkkəb radiasiya şüalanma növlərinin hamısını qeydetmək mümkün olmur. Əgər qamma şüaları qeydetmək üçün istifadə edilən qeyri üzvi LFS-NaI ssintilyatorunun üzərinə neytronlar düşərsə bu zaman onların qeydedilməsi mümkün olmur. Çünki neytronların qeydedilməsi üçün hidrogen birləşməli ssintilyatorlardan istifadə etmək daha əlverişlidir. İonlaşdırıcı zərrəciklər ssintilyator üzərinə düşdükdə qamma şüaları, beta zərrəcikləri və ya neytronlar müxtəlif effektlər yaradırlar. Plastik ssintilyatorların əksər ionlaşdırıcı şüalanmaya həssaslığa malik olması bunlar vasitəsi ilə qeyd edilən spektri mürəkkəbləşdirir. Məhz ona görə də plastik ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorun qeydetdiyi şüalanmanın növünü müəyyən etmək olduqca aktualdır [44, c.24, s.201-204, 161, c.158, s.1-6]. Xüsusi olaraq qeyd etmək lazımdır ki, yalnız maye ssintilyatorlardan və stilben (məhdud sayda üzvi ssintilyatorlardan) ssintilyatorlarından istifadə edərək yaranan impulsların formasına görə qeyd edilən signalın qamma şüası və ya neytron olmasını deməyə imkan verir. Məhz bu səbəbdəndə düşən ionlaşdırıcı şüalanmanın növünü müəyyən etmək üçün çox qatlı müxtəlif ssintilyatorlardan istifadə etmək ən optimal hal hesab edilir. Hazırlanacaq fosfiç detektorunun əsas məqsədi radioizotopların buraxdığı qamma şüaları beta zərrəciklərindən ayırmaqdır. Bu məqsədlə üzvi və qeyri üzvi p-terfenil + LFS-3 ssintilyatorlarından istifadə edilmişdir. Burada istifadə edilən qeyri-üzvi LFS-3 ssintilyatoru yalnız qamma və x-ray şüalanmaları qeyd edilməsi üçün nəzərdə tutulmuşdur. LFS-3 ssintilyatoru bizə qamma şüasının enerjisi (foto pikə görə) və sayı haqqında məlumat əldə etməyə imkan verəcəkdir. İstifadə edilən LFS ssintilyatorunun sönmə müddəti 35 nsan olmuş və bu parametrdən istifadə edərək qeyd edilən hadisənin hansı ssintilyator vasitəsi ilə

qeyd edilməsini müəyyən etməyə imkan vermişdir. Detektorun hazırlanmasında MSFD-3N1P fotodiodundan istifadə edilmişdir. İstifadə edilən MSFD-3N1P fotodiodlarının parametrləri ilə fəsil 2-də tanış olmaq olar. Fotodiodun səthinə qalınlığı 3 mm, eni və uzunluğu 3 mm olan LFS-3 ssintilyatoru yapışdırılmışdır. LFS-3 ssintilyatorlarının tərkibində Lu-176 radioizotopu olduğundan daxili qamma fona malikdir. Lakin ssintilyatorun ölçüsünün çox kiçik olması fon hesabına qeydedilən hadisələrin sayının 1Hz-dən az olmasına imkan vermişdir. LFS-3 ($3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$) ssintilyatorunun daxili qamma fonunu çəkmək üçün yüksək təmizlikli germanium spektrometrindən istifadə edərək LFS-3 ssintilyatorundakı Lu-176 radioizotopunun aktivliyinin $23,5 \pm 3 \text{ Bk}$ və kütləsinin 12,5 mq olduğu müəyyən edilmişdir. Beləliklə bizim istifadə etdiyimiz LFS-3 ($3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$) ssintilyatorunda aktivlik təqribən 7 Bk və 3,73 mq olmuşdur. Amplitud paylanma spektrdə 5 qamma şüasına uyğun gələn fotopiklər müşahidə edilmiş və enerjiləri 54,4 keV–507,9 keV intervalında olmuşdur [44, c.24, s.201-204].

LFS ssintilyatorlarının qarışıq şüalanma fonunda istifadə edilməsi zamanı digər növ şüalanmaya qarşı həssaslıqlarıda bizim tərəfimizdən tədqiq edilmişdir. Təcrübələrdə sürətli neytron mənbəsi olaraq ^{252}Cf və beta zərrəcik mənbəsi olaraq $^{90}\text{Sr}/\text{Y}$ radioizotoplarından istifadə edilmişdir. Alınan spektrlər bir daha göstərmişdir ki bu tip ssintilyatorlar neytronlar üçün həssas deyillər. Beta zərrəciklərdə isə həssaslıqı qamma şüalara nisbətən dəfələrlə az olmuşdur. Daha sonra LFS ssintilyatorun üzərinə ölçüləri $3 \times 3 \times 30 \text{ mm}^3$ olan p-terfenil (sönmə müddəti 5 nсан) ssintilyatoru epoksidlə yapışdırılmışdır. Həmçinin LFS ssintilyatoru plastik ssintilyatorun altında yerləşdiyindən bəzi yüklü zərrəciklərin LFS ssintilyatora çatması mümkün olmur. Detektorda istifadə edilən üzvi p-terfenil ssintilyatoru yüngül atom birləşmələrindən ibarət olduğundan sürətli neytronları və əksər yüklü zərrəcikləri yüksək, lakin qamma şüaları isə zəif qeyd etmə effektivliyinə malikdirlər.

Detektorun səthi bir qat nazik (qalınlığı ~0,075 mm) teflon təbəqəsi ilə örtülmüşdür. Hazırlanmış LFS+p-terfenil və MSF-3N1P əsaslı qeydedicinin həssaslığını tədqiq etmək üçün ^{137}Cs radioizotopundan istifadə edilmişdir. Məqsəd

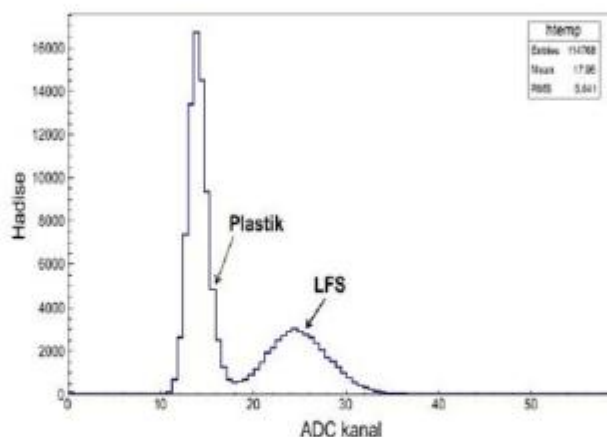
detektor modulunun qamma və beta zərrəcikləri impuls formasına görə ayırmasını tədqiq etmək olmuşdur. Təcrübədə ^{137}Cs mənbəsindən ona görə istifadə edilmişdir ki, onlar 662 keV enerjili qamma şüaları ilə yanaşı enerjisi 626 keV olan mono energetik beta zərrəcikləridəşüalandırır. Paylanma spektrindən görüldüyü kimi hazırlanmış detektor həm monoenergetik beta zərrəciklərə, 662 keV enerjili qamma şüasının yaratdığı Kompton kəsilməzliyinə və həm də foto pikə uyğun gələn hadisələri qeyd etmişdir (şəkil 5.4.1-a). LFS ssintilyatoru ilə qeydedilən 662 keV enerjili fotopikə uyğun gələn enerji ayırdetməsi $\sim 15\%$ alınmışdır. Amplitud paylanmasından görüldüyü kimi, qamma şüasının foto pikinə və mono energetik beta zərrəciklərinə uyğun gələn amplitudlar 2,1 dəfə fərqlənmişdir. Lakin realıqda həm qamma şüasının enerjisi və mono energetik elektronların enerjisi təqribən 6% tərtibində fərqlənir. İonlaşdırıcı şüalanmanın enerjiləri yaxın olsada belə kəskin fərqi yaranması LFS-3 ssintilyatorunun işıq çıxışının p-terfenil ssintilyatorunun işıq çıxışından böyük olması və onların şüalandırdığı işığın dalğa uzunluğuna görə MSFD-3N1P fotodiodunun FQE-sinin fərqli olması hesabına baş verə bilər. Hazırlanmış detektorda qeyd edilən hadisələrdən hansının qamma və beta zərrəciyə məxsus olmasını müəyyən etmək üçün xüsusi alqoritmdən istifadə edilmişdir. Əsas məqsəd ssintilyatorlarda yaranan hadisələri sönmə müddətinə görə ayırmaqdır. İlkin olaraq rəqəmsal siqnallar normallaşdırılır, maksimumu tapılır, sol və sağ tərəfində ümumi inteqrallanma sərhədi 120 addım zolağında inteqralın sərhədi verilir. İmpuls siqnalının eni kiçik olan siqnallar bir spektrdə və impuls siqnalının eni böyük olan siqnallar digər spektrdə qurulur (şəkil 5.4.1-b). Spektrlərdən görüldüyü kimi yeni yazılmış alqoritm hər ssintilyatorun qeydetdiyi hadisələri ümumi qeyd edilən spektrdən tam ayırmağa imkan verir. Həmçinin də hər iki ssintilyatorla qeyd edilən hadisələrin sayının amplituddan asılılığı tədqiq edilmişdir (şəkil 5.4.2). Təcrübə müddətində ümumi qeydedilən toplam hadisələrin sayı $1,151 \times 10^5$ olmuş və bunlardan $7,42 \times 10^4$ hadisə perterfenil və $4,094 \times 10^4$ hadisə isə LFS ssintilyatoru vasitəsi ilə qeyd edilmişdir. Qeyd edilmə nisbətində baxsaq görürük ki, plastik ssintilyator LFS –sə nisbətən təqribən 81% daha çox hadisə qeyd etmişdir. Qeyd edilən hadisələr arasında belə



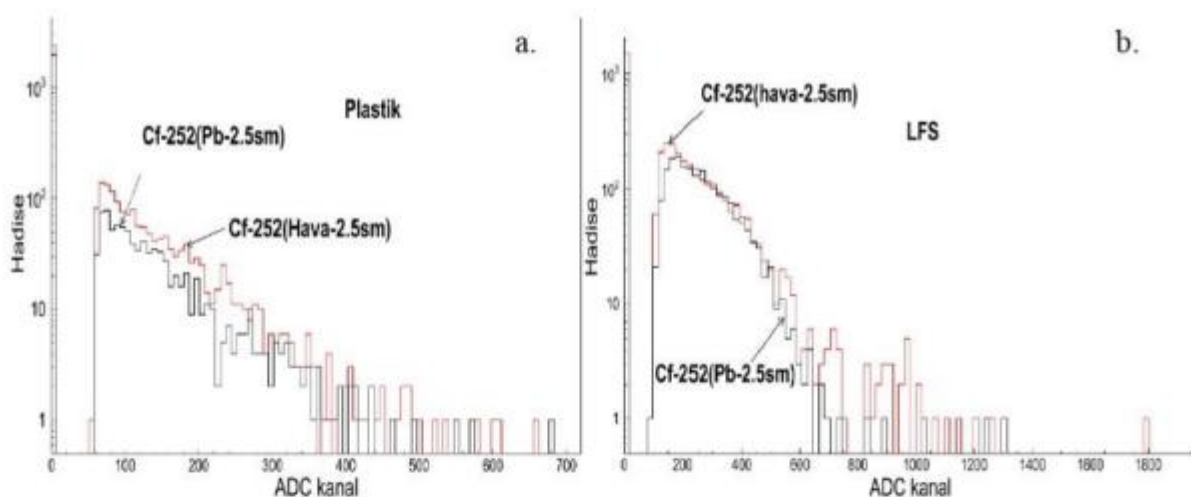
Şəkil 5.4.1 LFS-3 və Perterfenil ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış fosfiç detektorunun ^{137}Cs radioizotopundan qeyd etdiyi spektrin amplituda görə paylanması [44, c.24, s.201-204].

fərqin yaranması fərqli cisim bucağının olması, plastik ssintilyatorun həcmnin dəfələrlə böyük olması (~11 dəfə) və plastik ssintilyatorun hər iki tip şüalanmanı qeyd etməsi (lakin LFS ssintilyator qamma şüaları qeyd etmişdir) səbəb ola bilər [44, c.24, s.201-204].

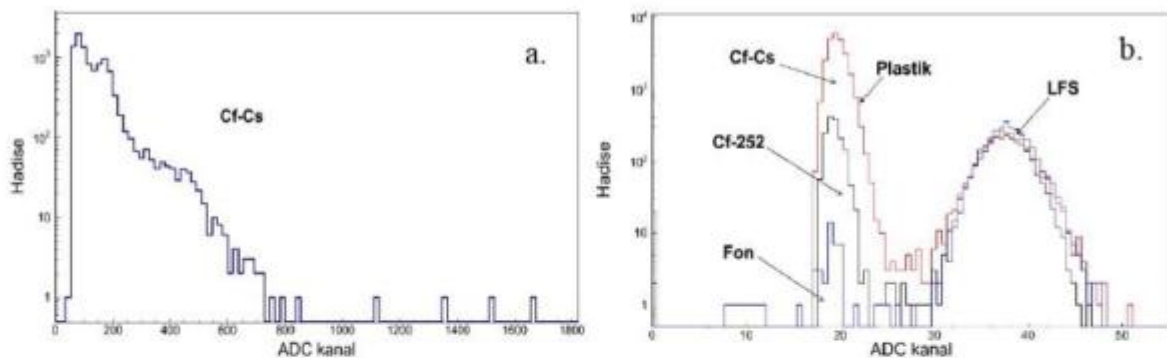
LFS+p-terfenil ssintilyatorları və MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış fosfiç detektorunun sürətli neytronları qeyd etmə həssaslığında tədqiq edilmişdir (şəkil 5.4.3). Sürətli neytron mənbəsi olaraq ^{252}Cf izotopundan istifadə edilmiş və detektordan 2,5 sm uzaqlıqda yerləşdirilmişdir. Qeyd edilən bu hadisələr neytronların və həm də qamma şüaların hesabına formalaşmışdır. Toplam olaraq ölçmə müddətində 1563 hadisə qeyd edilmişdir. Qeyd edilən hadisələrdən hansı hissəsinin təbii fon hesabına formalaşmasını təyin etmək üçün radioaktiv izotoplar olmadığı halda təbii fonun spektri çəkilmiş və qeyd edilən hadisələrdən 1,4 %-i təbii qamma fonu hesabına yaranmışdır [44, c.24, s.201-204]. Daha sonra qalınlığı 2,5 sm olan qurğusunun təbəqədən istifadə edərək ^{252}Cf izotopunun qamma və təbii fonun (350 keV qədər) təsiri aradan qaldırılmışdır (şəkil 5.4.3 (a), (b)). Bu zaman qeydedilən hadisələrin əksəriyyətinin neytronlar hesabına yarandığı qəbul edilir və qeyd edilən hadisələrin sayı 865 olmuşdur (55 % azalmışdır). ^{252}Cf izotopunun buraxdığı neytronların və qamma şüalarının LFS ssintilyatorlarında təsirinə də baxılmışdır. LFS ssintilyatoru ilə qeyd edilən hadisələrin sayı 530 (fon çıxıldıqdan sonra) hadisə olmuşdur. Lakin 2,5 sm qurğusunun təbəqə qoyulduqda isə qeyd edilən hadisələrin sayı LFS ssintilyatorunun daxili fonu tərtibində olmuşdur. Başqa sözlə qamma şüaları qurğusunun təbəqədə tam udulmuş və neytronlar LFS ssintilyatoruna daxil olsalarda ssintilyasiya fotonları yarada bilməmişdir. Məhz buna görə də LFS ssintilyatorlarının neytronlara həssas olmadığı qəbul edilir. Həmçinin beta zərrəcik (557 keV, 660 keV), qamma (332 keV, 662 keV) və neytron (0,025 eV–5 MeV), plastik ssintilyatorların qamma, beta və neytrona həssaslıq olduğundan onlarla qeyd edilən hadisələrin sayı LFS ssintilyatoru ilə müqayisədə daha kəskin dəyişmişdir (şəkil 5.4.4 (a) və (b)). Yeni yazılmış alqoritmindən istifadə edərək hər iki ssintilyatorla qeyd edilmiş hadisələrin spektri qurulmuşdur (şəkil 5.4.5 (a) və (b)). Əyriyədən görüldüyü kimi plastik ssintilyator beta zərrəcikləri, sürətli neytronları və qamma şüalarının kompton



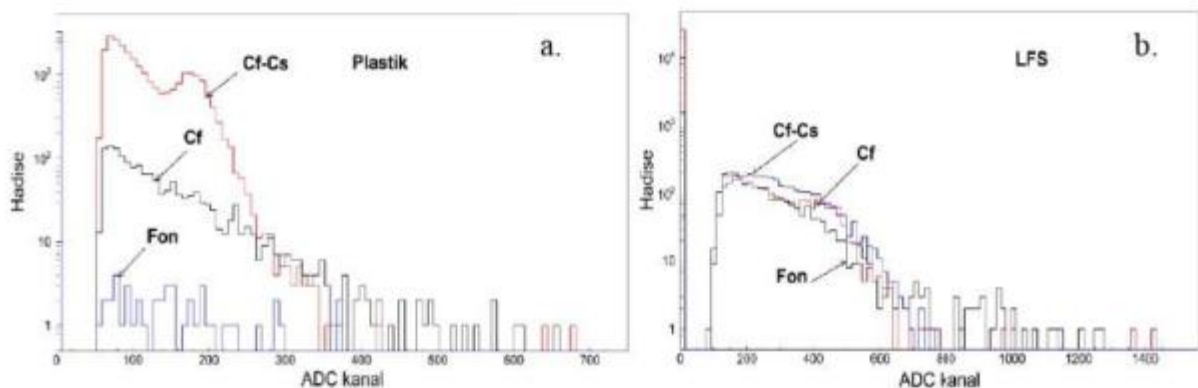
Şəkil 5.4.2 LFS-3 və Perterfenil ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış fosfiç detektorun ^{137}Cs mənbəsindən tutduğu impulsların sürətli hissəsinə uyğun gələn hadisələrin amplituddan asılılığı.



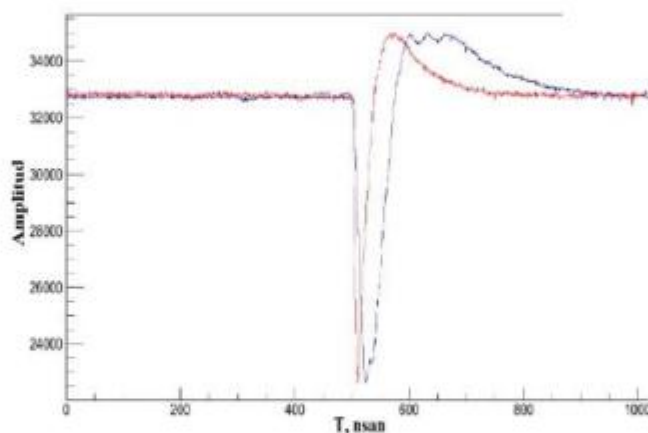
Şəkil 5.4.3 LFS-3 və Perterfenil kristal və MSFD fotoqeydedici cütündən ibarət fosfiç qeydedici sisteminin ^{252}Cf mənbəsi üçün çəkilmiş spektri .



Şəkil 5.4.4 LFS-3 və Perterfenil ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış fosfiç detektorun ^{252}Cf - ^{137}Cs radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların amplituda görə (a.) və qeyd edilən hadisələrin (b.) ssintilyatorlara görə paylanması.



Şəkil 5.4.5 Perterfenil (a.) və LFS-3 (b.) ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış fosfiç detektorun ^{252}Cf - ^{137}Cs radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların formasına görə amplitud paylanması.



Şəkil 5.4.6 Perterfenil (1.) və LFS-3 (2.) ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış fosfiç detektorun ^{252}Cf - ^{137}Cs radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların forması.

səpilməsində iştirak edən hissəsini qeyd etmişdir. Bundan fərqli olaraq LFS ssintilyatoru isə yalnız qamma şüaları qeyd etmişdir. Perterfenil və LFS ssintilyatorlarından qeyd edilən və fərqli davamətmə müddəti olan impulsların forması şəkil 5.4.6-da göstərilmişdir. Ssintilyatordan qeyd edilən siqnalın forması CAEN ARÇ-nin çevirdiyi siqnallardan müəyyən edilmiş, plastik ssintilyatorda siqnalın eni 34 nsan və LFS ssintilyatorda isə 76 nsan olmuşdur.

5.5. MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış ssintilyator detektorunun qamma şüalara həssaslığının müqayisəli tədqiqi

Artıq üçüncü fəsilə MSFD və MPPC fotodiodların parametrləri müqayisə edildikdən sonra onlar əsasında qamma detektorlarının hazırlanmasının daha optimal olduğu göstərilmişdir. Məhz ona görə də bu işdə MSFD və MPPC fotodiodları əsasında hazırlanmış detektorların qamma şüalara həssaslığını tədqiq edilmişdir. Ssintilyator olaraq PET və kompakt detektorların hazırlanması üçün aktual sayılan LFS kristalından istifadə edilmişdir. İstifadə edilən ssintilyatorun ölçüləri $2 \times 2 \times 15 \text{ mm}^3$ seçilmişdir. Ssintilyatorun səthi iki qat teflon və bir qat aluminium təbəqə ilə örtülmüşdür. Ssintilyator MSFD fotodiodlara optik maz ilə yapışdırılmışdır. İstifadə edilən fotodiodların sahələri MSFD-3NK fotodiodda $3,7 \text{ mm} \times 3,7 \text{ mm}$, MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodlarında isə $3 \times 3 \text{ mm}^2$ olmuşdur. Qamma şüa mənbəsi olaraq nöqtəvi ^{241}Am , ^{22}Na , ^{137}Cs və ^{60}Co radioizotop mənbələri istifadə olunmuşdur [53, s.357-362]. Qamma şüaların spektrləri çəkilərkən mənbə ilə ssintilyator arası məsafə 5 mm seçilmişdir. Mənbənin radioizotop yerləşdiyi nöqtə ssintilyatorun mərkəzinə salınmışdır. Mənbə ilə ssintilyator arasına qalınlığı 100 mkm olan mis lövhə yerləşdirilmişdir. Ölçmələr zamanı təbii fonun təsirini azaltmaq üçün əlavə qurğusunun təbəqələrdən istifadə edilməmişdir. Qamma şüalarının spektral paylanması çəkilən zaman təcrübə qutusunun daxilində temperatur dəyişməsi $20,5 \text{ }^\circ\text{C} - 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ dərəcə olmuşdur. MSFD fotodiodlardan 3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodlarında gücləndirmə əmsalı 36 olan gücləndirici lakin MPPC-S12572-015C fotodiodunda isə

zəifləndirməsi 2,8 olan əlavə zəifləndirici istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodlarından alınan siqnallar CAEN-5720 rəqəmsal analoq çeviricisinə verilmişdir. CAEN-5720 rəqəmsal çeviricinin əsas proqramında qeyd edilən siqnal pəncərəsinin uzunluğu 512 nöqtədən ibarət olmuşdur. Ümumilikdə pəncərənin uzunluğu 2048 nsan (512×4 nsan) olmuşdur. Yaranan siqnalda kənara çıxmalar olduqda belə inteqrallanma pəncərəsinin belə böyük götürülməsi siqnalın tam götürülməsinə imkan verir. ARÇ-yə verilən astana amplitudu 20 mV olmuşdur. İlkin olaraq MSFD-3NK (10000 pixel/mm^2) fotodiodunun qamma şüaları qeydetmə həssaslığı yoxlanılmışdır. İlk olaraq 59,6 keV enerjili qamma şüası buraxan ^{241}Am radioizotopunun spektri çəkilmişdir (şəkil 5.5.1). Enerjisi 59,6 keV olan qamma şüasının fotopiki ARÇ-nin 62-ci kanalda müşahidə edilmişdir. Fotopik üçün enerji ayırdetməsi 26,5 % alınmışdır. Enerjisi 26,3 keV olan qamma şüasına uyğun gələn pikin amplitudu isə ARÇ-nin 24-cü kanalda müşahidə edilmişdir. Bu foto pikə uyğun gələn siqnalın enerji ayırdetməsini təyin etmək mümkün olmamışdır. Buna səbəb MSFD-3NK fotodiodun və gücləndirici blokun küyünün qeyd edilən fotosiqnalın amplitudu tərtibində olmasıdır. ARÇ-nin 200-1200-cü kanalında müşahidə edilən hadisələr LFS ssintilyatorunun daxili fonu və təbii fon hesabına formalaşmışdır [53, s.357-362].

Daha sonra ^{137}Cs və ^{22}Na radioizotopunun buraxdığı qamma şüaları qeyd edilmişdir (şəkil 5.5.2). ^{137}Cs radioizotopunun buraxdığı 32 keV və 662 keV enerjili qamma şüaları ARÇ-nin 33-cü və 687-ci kanalında müşahidə edilmişdir. Göründüyü kimi foto pik Kompton kənarından ayrılmış və 662 keV üçün enerji ayırdetməsi 13 % alınmışdır. ^{22}Na radioizotopunun spektrindən göründüyü kimi spektrdə 511 keV və 1274 keV enerjili qamma şüalara uyğun gələn fotopiklər müşahidə edilir. Hər iki enerjiyə uyğun gələn pikin amplitudu 524-cü və 1274-cü kanalda müşahidə edilir. Enerjisi böyük olan (1274 keV) qamma şüasına uyğun gələn hadisələrin sayı çox az olmuşdur. Buna səbəb onun qeydedilmə effektivliyinin kiçik olmasıdır. Bu isə ssintilyatorun həcmnin kiçik olması və onun buraxılma ehtimalının aşağı olması ilə bağlıdır. Beləliklə enerjisi 511 keV və 1274 keV olan qamma şüaları üçün enerji ayırdetməsi 19 % və 13 % olmuşdur [53, s.357-362]. Enerjisi 1274 keV olan qamma şüasının piki tam ayrılmadığından bütün fotodiodlar üçün enerji ayırdetməsində

20 %-kim xəta mövcuddur. Daha sonra MPPC-S12572-015C fotodiodunun eyni bir LFS ssintilyatoru ilə qamma şüaları qeydetmə performansını yoxlanılmışdır. İlk olaraq ^{241}Am radioizotopunun spektri çəkilmişdir (şəkil 5.5.3). MPPC-S12572-15C (4444 pixel/mm²) fotodiodunun gücləndirmə əmsalı MSFD-3NK fotodiodunun gücləndirmə əmsalından təqribən 4 dəfə yüksək olmuşdur. Ona görə də bu fotodiodla ölçmələrdə CAEN-5720 ARÇ-sinin xətti rejimdən çıxması üçün zəifləndirməsi 2,8 olan zəifləndirici istifadə edilmişdir. Şəkil 5.29-dən görüldüyü kimi 26,3 keV və 59,6 keV enerjili qamma şüalarına uyğun gələn fotopiklər ARÇ-cin 20-ci və 63,5-ci kanalında müşahidə edilir. Əsas fotopikə uyğun gələn enerji ayırdetməsi 28 % olmuşdur. ARÇ-nin 120-ci kanalından böyük kanallarda müşahidə edilən hadisələr isə daxili və təbii fon hesabına formalaşmışdır [53, s.357-362].

Şəkil 5.5.4-də ^{137}Cs və ^{22}Na radioizotoplarının buraxdığı qamma şüalarının amplitud paylanması göstərilmişdir. ^{137}Cs və ^{22}Na mənbəsinin buraxdığı qamma şüalarına uyğun gələn fotopiklərin amplitudu 32-ci, 544-cü, 573-cü və 1293-cü kanallarda müşahidə edilmişdir. ^{22}Na izotopunun spektrinin çəkilməsi müddəti 10 dəqiqə seçilmişdir. Tam müşahidə edilən fotopiklərə uyğun gələn qamma şüaları üçün enerji ayırdetməsi 511 keV-23 %, 662 keV -15 % və 1274 keV- 13 % olmuşdur [53, s.357-362].

Şəkil 5.5.5-də Hamamatsu firmasının yüksək piksel sıxlıqlı MPPC-S12572-010P (10000 pixel/mm²) fotodiodu ilə ^{241}Am radioizotopunun qamma şüaların amplitud paylanması spektri göstərilmişdir. MPPC-S12572-010P fotodiodlarının gücləndirməsi MPPC-S12752-015C fotodiodunun gücləndirməsindən təqribən iki dəfə az olduğundan bu ölçmələrdə zəifləndirici istifadə edilməmişdir. Şəkil 5.5.5-dən görüldüyü kimi 59,6 keV enerjili qamma şüasının maksimal amplitudu ADC-nin 45-ci kanallarda müşahidə edilmişdir. Bu enerjiyə uyğun gələn enerji ayırdetməsi 38 % olmuşdur.

Şəkil 5.5.6-da MPPC-S12572-010P fotodiodunun yuxarı enerjili ^{137}Cs və ^{22}Na radioizotopunun buraxdığı qamma şüalara həssaslığı göstərilmişdir. Spektrdən görüldüyü kimi 511 keV, 662 keV və 1274 keV enerjilərə uyğun gələn siqnalların amplitudları ARÇ-nin 409, 518 və 1042-ci kanallarda müşahidə edilmişdir. ^{22}Na

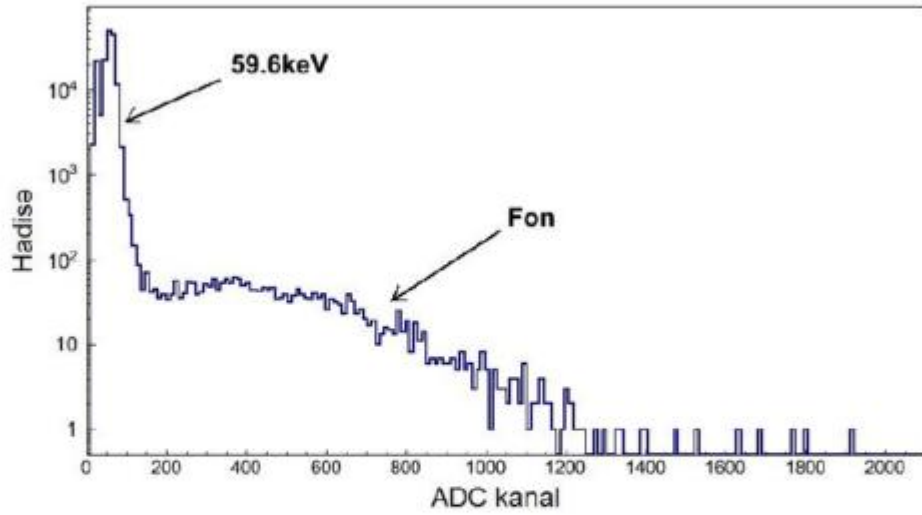
mənbəsinin buraxdığı 511 keV enerji üçün enerji ayırdetməsi 26,8 % olmuşdur. ^{22}Na mənbəsinin yuxarı enerjili qamma şüasının enerji ayırd etməsinin hesablanması mümkün olmamışdır. Lakin 662 keV enerjili qamma şüası üçün enerji ayırdetməsi 17,5 % alınmışdır. Şəkil 5.5.7-də MSFD-3NK, MPPC-S12752-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodunun 59,6 keV–1274 keV enerji intervalındakı kalibrləmə əyriləri qurulmuşdur. MPPC-S12752-015C fotodiodun kalibrlənmə əyrisi qurularkən siqnalın amplitudu zəifləndiricinin əmsalına vurulmuşdur. Məlumdur ki kalibrlənmə əyrisinin tam xətti alınması üçün $\text{tg}(\alpha)=\text{ADC chan} / E$ bərabərliyindən $\text{tg}(\alpha)=1$ olmalıdır. Bu hal isə kalibr bucağının $\alpha=45^\circ$ olduğu halda ödənilir. Ölçmələrdən amplitudu ARC-nin kanalı ilə müəyyən edilmiş siqnalın qamma şüalarının enerjisindən asılılıq nöqtələri qurulmuşdur. Daha sonra Orgine 8.5 proqramının köməyi ilə MSFD-3NK (5.5.1), MPPC-S12752-015C (5.5.2) və MPPC-S12572-010P (5.5.3) üçün kalibrəyrisinin tənliyi tapılmışdır [53, s.357-362]:

$$\text{ADC kannal}=10,5+1 \times E \quad (5.5.1)$$

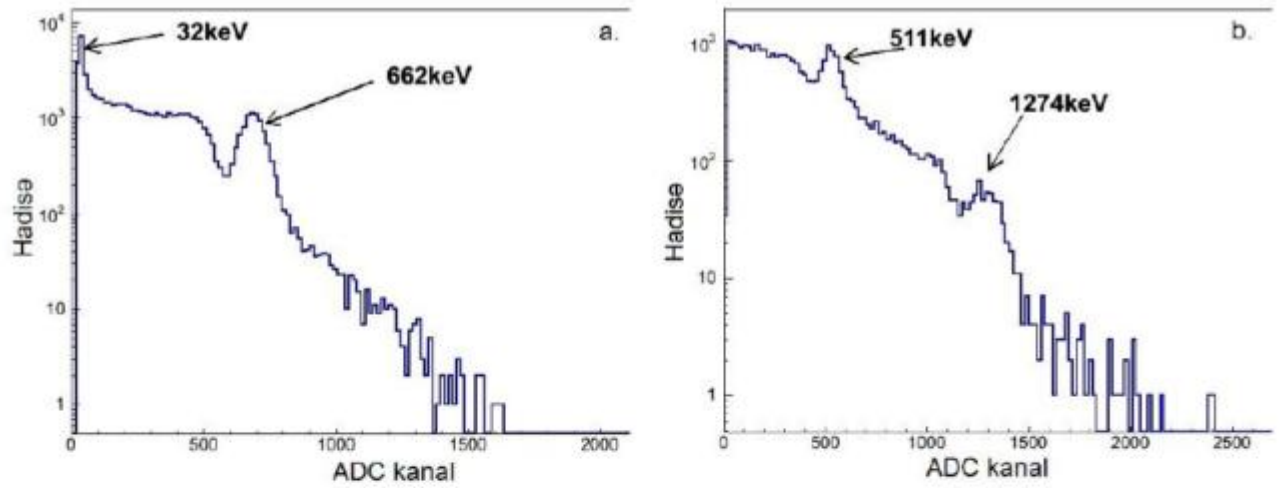
$$\text{ADCkannal}=53+2,8 \times E \quad (5.5.2)$$

$$\text{ADCkannal}=0,9+0,8 \times E \quad (5.5.3)$$

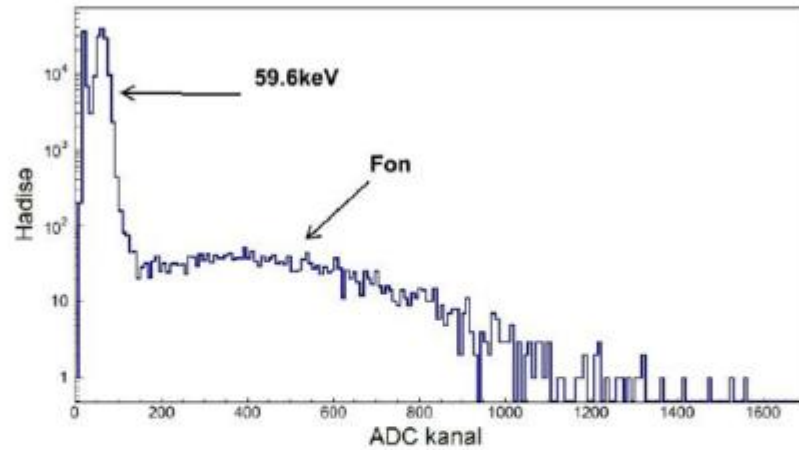
Burada qamma şüasının amplituduna uyğun gələn ARC-nin kanalının sayı və E isə qamma şüasının məlum olan enerjisidir (keV). Qurulan kalibr əyrilərindən görüldüyü kimi MSFD-3NK fotodioduna uyğun gələn kalibrləmə əyrisiən optimalı hesab edilir. MSFD fotodiodlar üçün alınan enerji ayırdetməsi özünün ən kiçik (13 % – 662 keV üçün) qiymətini MSFD-3NK fotodiodunda almışdır. MPPC-S12752-015C fotodiodlarında 662 keV enerjiyə uyğun gələn enerji ayırdetməsi 21 % pisləşərək 15,8 % olmuşdur. Ən pis enerji ayırdetməsi MPPC-S12572-010P fotodiodlarında müşahidə edilmişdir. MSFD-3NK fotodiodu ilə müqayisədə 662 keV enerjili qamma şüası üçün enerji ayırdetməsi 34 % pisləşmiş və 17,5 % olmuşdur. Enerji ayırdetməsinin belə pisləşməsi bir başa olaraq fotoqeydetmə effektivliyindən asılı



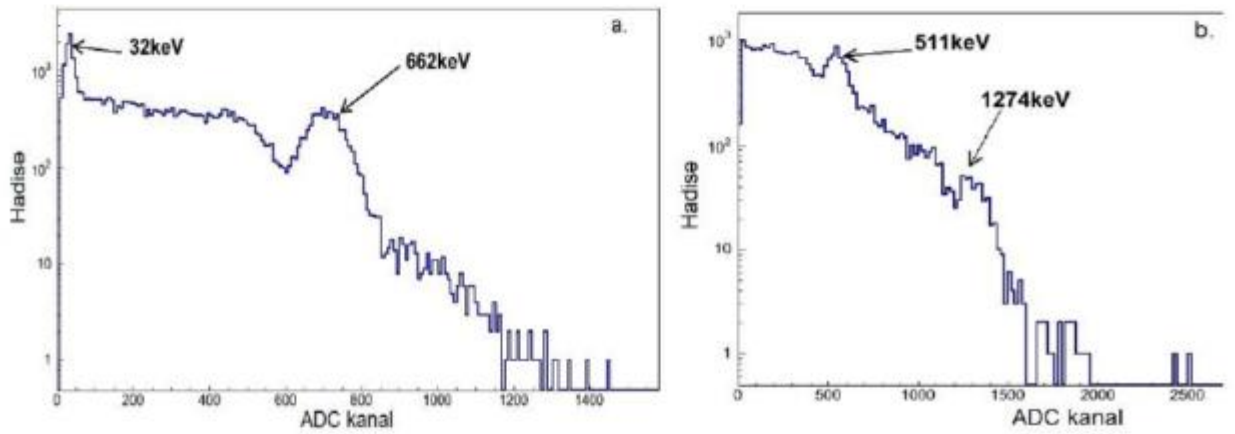
Şəkil 5.5.1 ^{241}Am izotopunun buraxdığı qamma şüalarının MSFD-3NK fotodiodu ilə qeydedilmiş spektri.



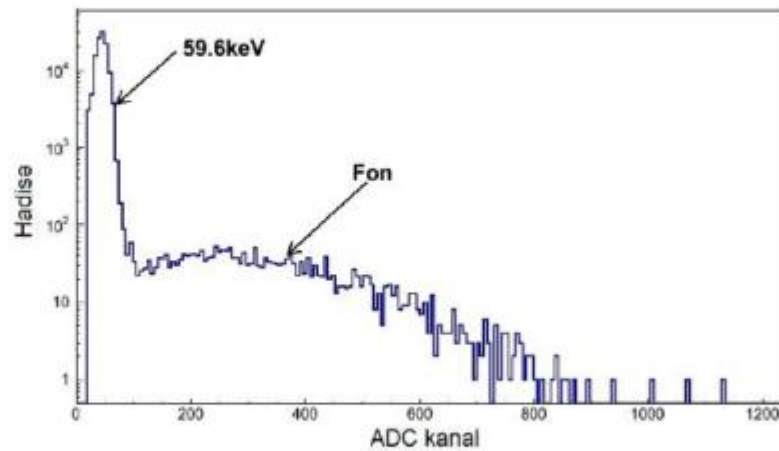
Şəkil 5.5.2 ^{137}Cs və ^{22}Na izotopunun buraxdığı qamma şüalarının MSFD-3NK fotodiodu ilə qeydedilmiş spektri.



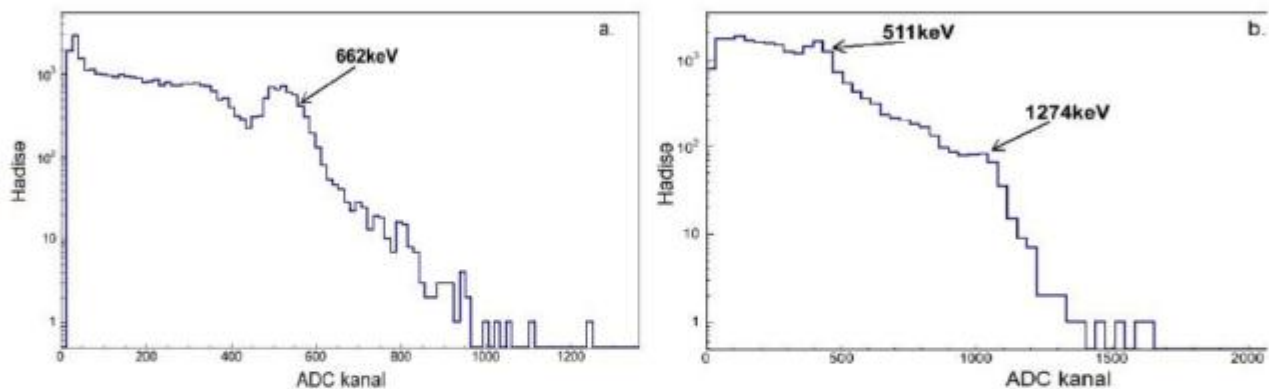
Şəkil 5.5.3 ^{241}Am radioizotopunun buraxdığı qamma şüalarının MPPC-S12572-015C fotodiodu ilə çəkilmiş amplitud paylanması.



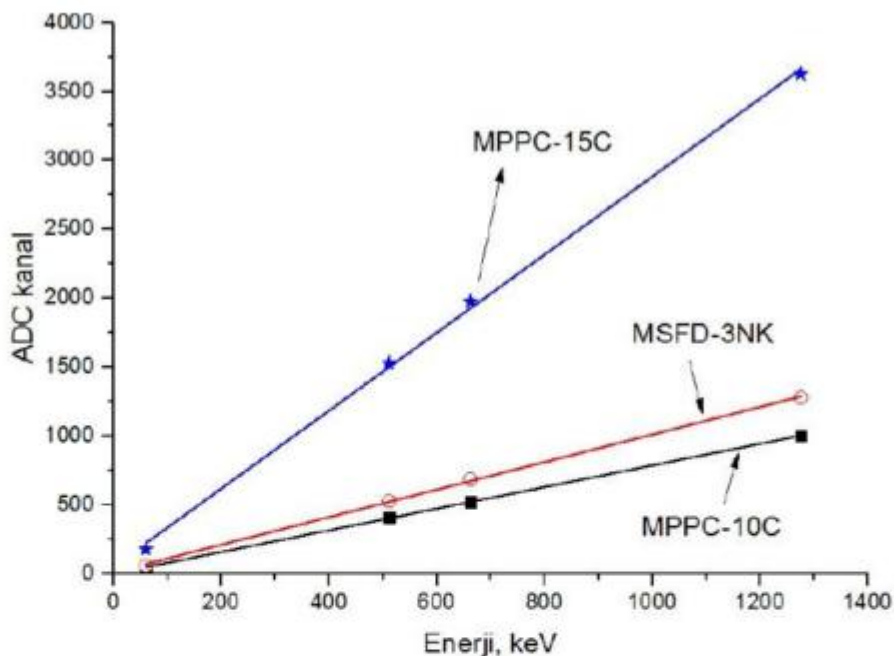
Şəkil 5.5.4 ^{137}Cs və ^{22}Na radioizotoplarının buraxdığı qamma şüalarının MPPC-S12752-015C fotodiodu ilə çəkilmiş amplitud paylanması.



Şəkil 5.5.5 ^{241}Am radioizotopunun buraxdığı qamma şüalarının MPPC-S12572-010P fotodiodu ilə çəkilmiş amplitud paylanması.



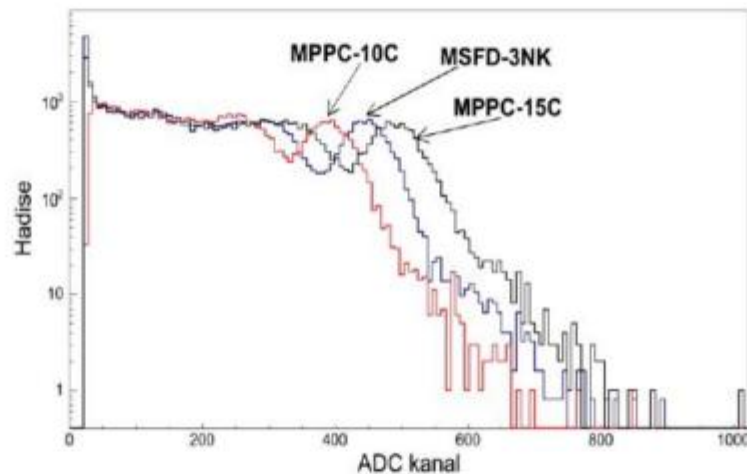
Şəkil 5.5.6 ^{137}Cs və ^{22}Na radioizotoplarının buraxdığı qamma şüalarının MPPC-S12572-010P fotodiodu ilə çəkilmiş amplitud paylanması.



Şəkil 5.5.7 MSFD-3NK, MPPC-S12752-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodları əsasında hazırlanmış detektorların kalibrləmə əyrisi.

olmuşdur. Nəzərə alsaq ki MSFD-3NK fotodiodunun 430 nm dalğa uzunluğunda fotoqeydetmə effektivliyi $\sim 35\%$, MPPC-S12752-015C fotodiodunda 24% və MPPC-S12572-010P fotodiodunda isə 11% olmuşdur. Məhz fotoqeydetmə effektivliyinin böyük olması alınan siqnalın amplitudunun böyük alınmasına imkan vermişdir. Bu isə öz növbəsində enerji ayırdetməsinin yaxşılaşmasına imkan vermişdir.

Şəkil 5.5.8-də ölçüləri $3 \times 3 \times 10 \text{ mm}^3$ olan LFS ssintilyatoru və MSFD-3NK, PPC-S12752-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodları ilə çəkilmiş ^{137}Cs izotopunun spektri verilmişdir. Bu halda ssintilyatorun ölçüsü artırılmışdır. MSFD-3NK fotodiodu ilə çəkilmiş spektrdə foto pikə uyğun gələn enerji ayırdetməsi $17,5\%$



Şəkil 5.5.8 MSFD-3NK, MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodları ilə çəkilmiş ^{137}Cs radioizotopunun spektri

alınmışdır. MPPC-S12752-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodları ilə çəkilmiş amplitudpaylanmasıdan 662 keV enerjili qamma şüası üçün enerjiayırdetməsi 20% və 23% olmuşdur. Bu halda MSFD-3NK fotodiodu üçün alınan enerji ayırdetməsi analoqlarına nisbətən $14,2\%$ və $31,4\%$ yüksək olmuşdur.

5.6 Nəticələr

Müəyyən edilmişdir ki MSFD və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar qamma şüaları Kompton kənarına görə fərqləndirir və detektorla qeyd edilən siqnalın amplitudu enerjiden asılı olaraq xətti dəyişir.

MSFD və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorun 0,626 MeV enerjili mono energetik elektrona uyğun gələn enerji ayırdetməsi 22 % olmuşdur. Bu tip detektorlar həmçinin də sürətli neytronları da qeyd etmə performansına malik olmuşdur. Eyni ilidə MSFD və maye ssintilyator əsaslı detektorlar həmçinin qamma şüalara həssaslığı tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, MSFD və perterfenil və ya maye ssintilyator əsaslı hazırlanmış bu tip detektorlardan qamma və neytron sayğacların hazırlanmasında tətbiq oluna bilər.

MSFD-3NK, MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-010P fotodiodları və LFS ssintilyatoru əsasında hazırlanmış qamma detektorların kalibrlənmə əyrisi 60 keV–1,27 MeV enerji intervalında özünü tam xətti aparmışdır. Xüsusi ilə qeydetmək lazımdır ki, 662 keV enerjili qamma şüası üçün yalnız MSFD-3NK fotodiodları əsasında hazırlanmış detektorda minimum enerji ayırdetməsi 13 % alınmışdır. Analoqları ilə müqayisədə 21 % və 34 % daha kiçik enerji ayırdetməsi alınmışdır. Alınmış nəticə MSFD-3NK tip fotodiodların analoqlarına nisbətən spektroskopik təcrübələr üçün daha optimal olduğu göstərilmişdir.

VI FƏSİL

MSFD FOTODİOD ƏSASLI QAMMA SPEKTROMETR VƏ ONUN RADİASİYAYA DAVAMLILIĞININ TƏDQIQI

6.1. MSFD fotodiodlar əsasında qamma-spektrometrlərin işlənməsi

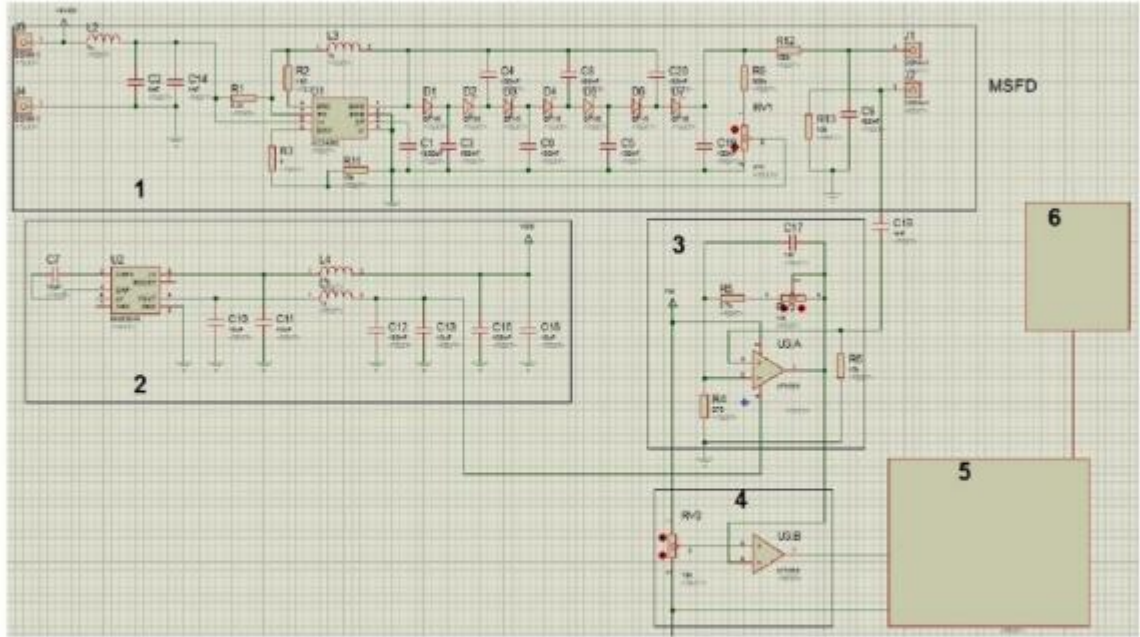
Qamma spektrometrin hazırlanması zamanı fəsil 2 və fəsil 5-də alınmış nəticələrə əsaslanaraq spektrometrin hazırlanmasında MSFD-3NK fotodiodundan və NaI ssintilyatorundan istifadə edilmişdir. İstifadə edilən MSFD-3NK fotodiodun və NaI ssintilyatorunun parametrləri Cədvəl 6.1.1-də verilmişdir. Hazırlanmış detektor modulu enerjiləri 100 keV – 3 MeV enerji intervalındakı qamma şüalarını qeyd etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur [53, s.357-362].

Hazırlanmış qamma spektrometr aşağıdakı hissələrdən ibarət olmuşdur DC-DC gərginlik çevirici, siqnal gücləndirici, USB qidalandırıcı giriş, gərginlik tənzimləyici modul və mini DRS əsaslı ARÇ moduldan ibarət olmuşdur. Spektrometrin hazırlanmasında istifadə edilən elektrik bloklar Proteus proqramında simulyasiya edilərək topologiyaları hazırlanmış və daha sonra element hissələri yığılaraq dövrələr yoxlanılmışdır. Bu tip spektrometrlərdən alınan siqnallar həm analoq və həmçinin də rəqəmsal çıxışa malikdir. Analoq çıxışın mövcud olması siqnalın ossiloqraf müşahidə edilməsinə imkan verir. Rəqəmsal çıxış isə siqnal üzərində digər əməliyyatların həyata keçirilməsi üçün nəzərdə tutulmuşdur. Alınan məlumatlar DRS vasitəsi ilə kompyutera ötürülür. Spektrometrin qidalanması USB ilə həyata keçirilmişdir və işləmə gərginliyi +6 V və cərəyan sərfiyyatı 300 mA az olmuşdur (şəkil 6.1.1). İlk olaraq MSFD fotodiodu gərginliklə təmin etmək üçün lazım olan gərginlik DC-DC çevirici hissəsi yığılmışdır. Hazırlanmış gərginlik çeviricisi gərginliyi 0 V–200 V gərginlik intervalını dəyişməyə imkan vermişdir. DC-DC gərginlik çeviricisi MC34063A monolit idarəedicisi dövrədən və çox saylı BAV.102 diodundan və 10 nF kondensatordan ibarət kaskadlardan təşkil olmuşdur. Hazırlanmış gərginlik çeviricisinin cərəyan tələbatı 40 mA tərtibində və çıxışdakı gərginlik fluktasiyası

$\pm 0,009$ V ətrafında olmuşdur. DC-DC gərginlik çevirici haqqında daha geniş məlumatı 2-ci fəsildə verilmişdir.

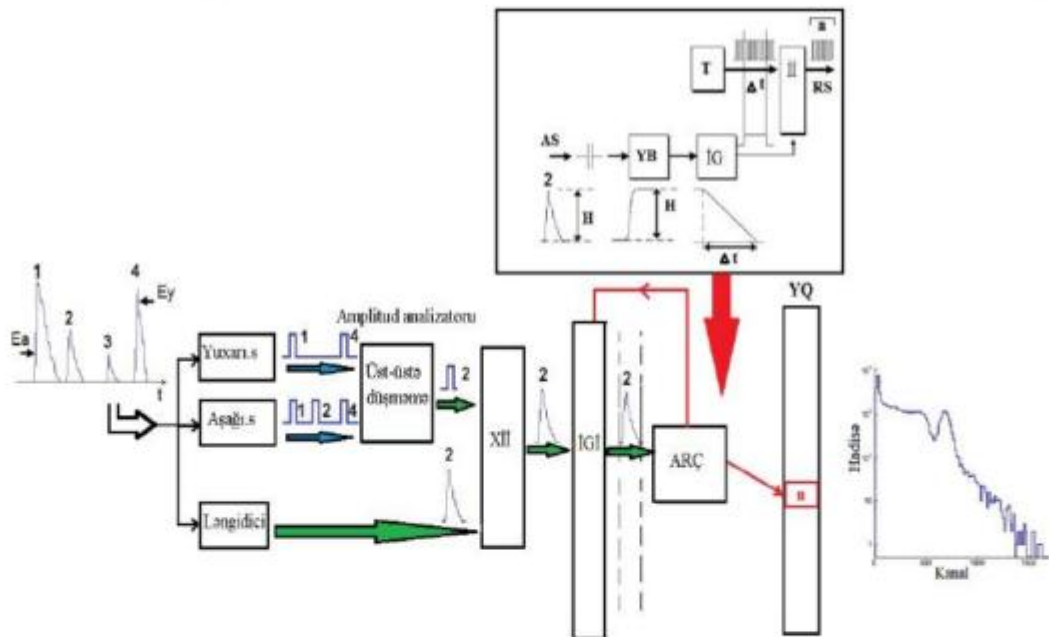
Spektrometrin siqnal gücləndirici dövrəsi tranzistorlar əsasında yığılmışdır və gücləndirməsi 35 və buraxma zolağı 100 MHz olmuşdur. Bu tip gücləndiricilərin xəttilik oblastı 1 V qədər davam etmişdir. Spektrometrin digər bir hissəsi gərginlik tənzimləyici modul olmuşdur. Bu modulun əsas işi giriş gərginliyində hər hansı dəyişmə baş verdikdə belə DC-DC çeviricini, gücləndirici və digər modulları sabit bir gərginliklə təmin etməsidir. Spektrometrin digər bir hissəsi isə mini DRS əsaslı multikanallı analizatorudur (şəkil 6.1.2). Multikanallı analizatorların əsas məqsədi gücləndiricinin çıxışında alınan siqnalın verilmiş amplitud intervalında (gərginlik intervalında) müşahidə edilən impulsların amplitudunu və onların sayını müəyyən etməkdir. Multikanallı analizator bununla yanaşı verilmiş amplitud intervalından böyük və ya kiçik olan impulsları bloklayır və məlumatların saxlama qurğusuna yazılmasına imkan verir. Bu quruluşda istifadə edilən ARÇ-nin ayırdetməsi 13 bit (8192), maksimal amplitudu 1 V, ayırma tezliyi 5Gsampl/san və maksimal inteqrallayıcı pəncərəsi 500 nsan olmuşdur. Bizim halda analoq girişləri 8192 fərqli səviyyədən biri kimi kodlaşdırmaq olar. Ayırdetmə çox vaxt voltlarla ifadə edilir. ARÇ-nin kod səviyyələrini bir-birindən fərqləndirməsi üçün onların minimal miqdarı (ingiliscə-least significant bit) $E=1V/8192=0,00012=0,12$ mV olmuşdur. Başqa sözlə amplitud analizatoru siqnalların amplitudları bir-birindən 0,12 mV qədər fərqlənərsə bu zaman onları ayrı-ayrı kanala düşən hadisələr kimi qeyd edə bilər, əks halda eyni kanala düşən hadisələr kimi qəbul edilir. Gücləndiricinin çıxışında alınan fərqli amplitudlu siqnal iki yerə bölünərək biri DRS tərkibində ki analizatora və digəri isə ləngidiciyə ötürülür (şəkil 6.1.1). Ləngidinin əsas məqsədi siqnalın amplitudu yoxlanan zaman müəyyən bir zaman itkisi baş verir və məhz ləngidici vasitəsi siqnalın gecikməsi sinxronlaşdırılır. Əgər gücləndiricinin çıxışında alınan siqnalların (1–4 impulslar) amplitudu analizatorun yuxarı (1 V-dan böyük) və aşağı astana intervalına (0,12 mV) düşərsə siqnalın növbəti mərhələdə işlənilməsi mümkün olur. Növbəti mərhələdə siqnalları amplitudu yuxarı astana qiymətindən böyük olan siqnallar (1-ci və 4-cü impuls) bloklanır və yalnız 2-ci impuls növbəti mərhələdə

İştirak edir. Daha sonra siqnal xətti inteqrallayıcı interval (XII) daxilinə salınır. Xətti inteqrallayıcı interval sistemin inteqrallanma intervalını (II) dəyişməklə yanaşı (maksimal 500 nsan) həmçinin də astana qiymətində dəyişməyə imkan verir. XII-in astana amplitudunu dəyişməklə spektrin istənilən kanalındakı hadisələri ləğv etmək mümkündür. Növbəti mərhələdə siqnal inteqrallayıcı giriş intervalına (İGI) verilir. İGI-nin əsas işi siqnal ARÇ verildikdə əvvəlki siqnal işləndiyindən ARÇ artıq məşğul olur və siqnalın tam MKA-da qeyd edilmə prosesi qurtarana qədər növbəti siqnalın ARÇ-nin girişinə verilməsinin qarşısını alır. Əgər qeyd etmə əməliyyatı tamamlanarsa giriş intervalı növbəti siqnalın qeyd edilməsinə icazə verir. Daha sonra siqnal ARÇ vasitəsi ilə inteqrallanır və bu hadisə yaddaşda siqnalın amplituduna uyğun gələn n-ci kanala yazılır. Burada hər kanal digərindən 0,12 mV qədər fərqlənir və siqnalın amplituduna uyğun gəlir. ARÇ-nin hər kanalına uyğun gələn yük $\dot{I}=1,2 \times 10^{-4} \text{mV}/500 \text{m}=0,024 \times 10^{-4}=2,4 \times 10^{-6}$, buradanda hər kanalın yükü hesablanmışdır $q=\dot{I} \times t=2,4 \times 10^{-6} \text{A} / 5 \times 10^9=0,48 \times 10^{-15} \text{Kl}$ olmuşdur. ARÇ-in girişinə verilən siqnal astana qiymətindən böyük olarsa impuls kondesatora dolur. Mövcud olan komparatorun vasitəsi ilə kondesatorun dolması impulsun ampilitudun maksimum hündürlüyünə (H) qədər davam edir. Siqnalın hündürlüyünə H uyğun gələn bu maksimal gərginlik kondensatorda saxlanılır. Nə vaxt ki kondesatordakı gərginlik stabilləşir bu zaman xətti boşalma başlayır və eyni bir zamandada zaman sayğacı işə düşür. Kondesatordakı gərginlik sıfıra yaxınlaşdıqda pəncərə bağlanır. Bu boşalma xətti olaraq baş verir və zamanın sıfıra qədər azalmasına lazım olan vaxt siqnalın amplitudu ilə mütənasib olur. Başqa sözlə siqnalın amplitudu zamana çevrilir. Bu vaxt müddəti sinxronlaşdırıcı kristal tərəfindən yaradılan zaman pəncərəsindən keçən yüksək tezlikli impulslar vasitəsi ilə ölçülür. İmpuls dəstəsi pəncərə açılana qədər bloklanır və qeydedici impulsları saymağa başlayır. Pəncərə bağlandıqda isə sayma yenidən dayanır. Pəncərədən keçən impulsların sayı bir başa olaraq giriş siqnalının amplitudu ilə mütənasibdir. Beləliklə analoq siqnal rəqəmsal siqnala çevrilir və saxlanılır. Saxlanılmış məlumatlar binar formatda olur. Məlumatlar C++ yazılmış xüsusi alqoritmlərdən istifadə edilərək qeydedilmiş siqnalın amplituda görə paylanma spektri çəkilir və yekun nəticə dat formatda



Şəkil 6.1.1 Qamma-spektrometrin elektron dövrəsi

1-DC-DC gərginlik çevirici, 2-gərginlik invertoru(- gərginlik mənbəsi),3-gücləndirici, 4- komparator, 5-DRS MKA analizator və 6-personal kompyuter.

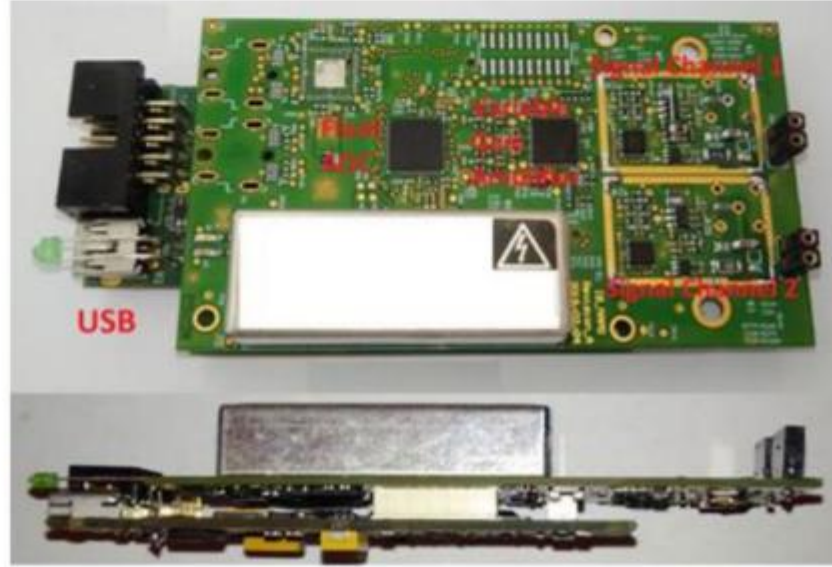
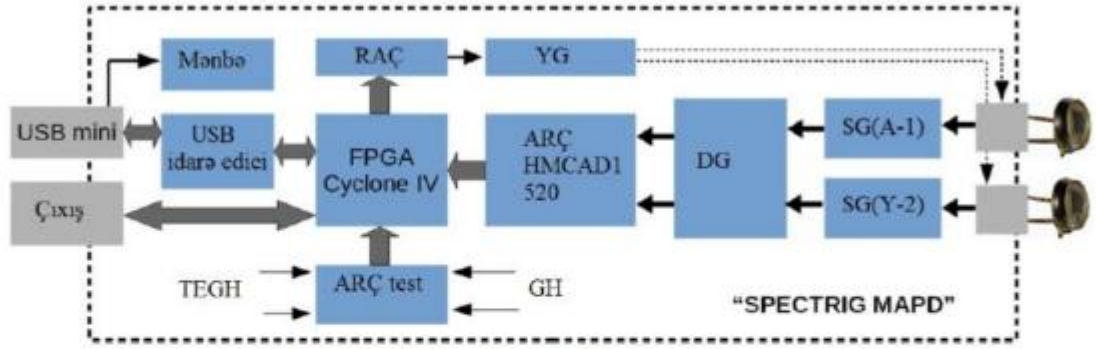


Şəkil 6.1.2 DRS əsaslı multikanallı analizatorun blok sxemi və işləmə prinsipi

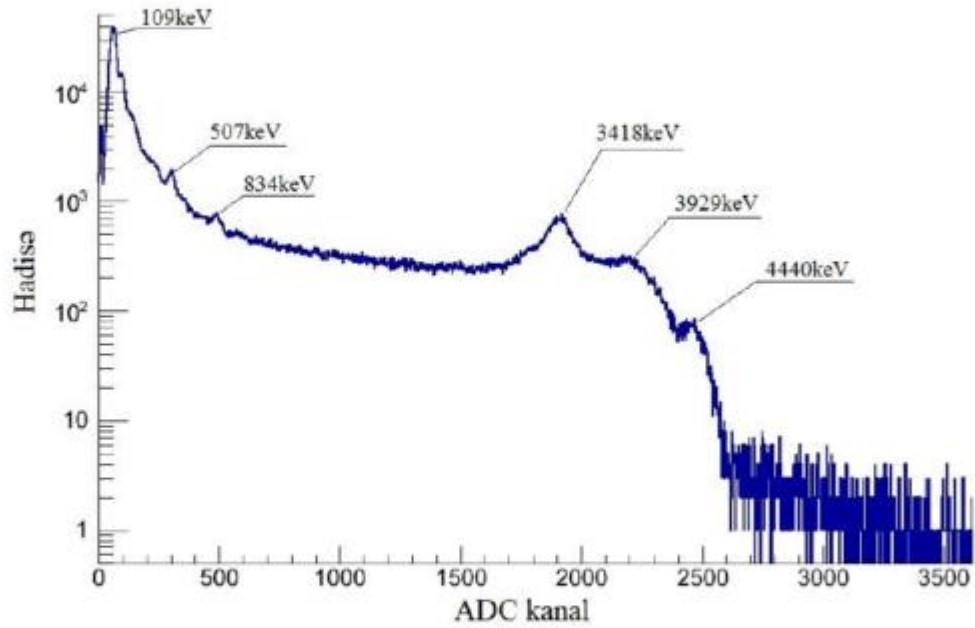
Xətti inteqrallayıcı interval (XII), İneqrallayıcı giriş intervalı (İGI), Analog rəqəm çeviricisi, Yükün boşalması (YB), İnteqrallayıcı generator (İG), İnteqrallayıcı intervalı(İİ), Taymer (T), Rəqəmsal siqnal (RS) və yaddaş qurğusu (YQ).

saxlanılır. XII-in astana amplitudunu dəyişməklə spektrin istənilən kanalındakı hadisələri ləğv etmək mümkün olur. Düşən siqnalların sayı və amplitudu dəyişdikcə kanallardakı hadisələrdə ona uyğun dəşir. Təklif edilən bu qurğunun əsas çatışmayan cəhəti dövrdə istifadə edilən gücləndiricinin güclənməsinin, DC-DC çıxış gərginliyinin programla idarə edilə bilməməsi və idarəedicici tətikləyici (ingiliscə-trigger) funksiyası mövcüd olmamasıdır.

Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün yeni MAPD SPECTROMETRİG modulu hazırlanmışdı (şəkil 6.1.3). Təklif edilən spektrometrdə iki kanal mövcüddür. Kanallardan biri tək fotonu qeyd etmə performansına (yüksək gücləndirməli) və ikinci kanal (aşağı gücləndirməli) isə bir aşağı olaraq enerjisi MeV-lərlə olan ionlaşdırıcı şüalanmanı qeyd etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur. Hər kanalda sabit gücləndirici ilə yanaşı əlavə dəyişən gücləndiricidə istifadə edilmişdir. Dəyişən gücləndiricinin gücləndirməsi hər iki kanalda -9 dB-dən 26 dB-ə qədər 1 dB addımla tənzimlənməsi təchiz olunmuşdur. Ölçmə zamanı yalnız bir siqnal kanalı istifadə oluna bilər. Dövrdə istifadə edilən məlumat çevricisi hadisələri 12 bit ayırd etmə ilə 400 MSam / san sürətlə və ya da 8 bit ayırd etmə ilə 600 MSam / san sürətlə çevirərək ADC (HMCAD1520) yönləndirir. Məlumatların əldə edilməsi və siqnalın formasının alınması FPGA dövrə (Cyclone IV EP4CE30) tərəfindən idarə olunur. Bundan əlavə, FPGA dövrəsi əldə edilmiş məlumatların USB 2.0 yüksək sürət idarəedicisi (FT2232H) vasitəsilə ötürülməsini idarə edir. FPGA əsaslı dizayn eyni zamanda mürəkkəb təcrübələr vəziyyətində oxunan interfeys imkanlarını daha da genişləndirmək üçün məlumat idarəedicici tətikləyici (ingi-trigger) və xarici tətikləyici funksiyaları həyata keçirilməsinə imkan verir. Cihazın gərginlik tələbatı əlavə elektrik xətti bağlantısına ehtiyac olmadan birbaşa olaraq USB ilə təchiz edilmişdir. Dövrdəki elektron komponentlərin zəruri güc tələbatı DC / DC çeviriciləri vasitəsilə təmin edilmişdir. Diodları gərginliklə təmin etmək üçün DC-DC (ISEG AP002255p05 modulu) modulu gərginliy 0 V ilə + 200 V aralığında 12 bit dəqiqliyi ilə tənzimlənməsinə imkan verir və modul rəqəm anloq çevricisi (RAÇ, ingiliscə-digital analog converter) vasitəsilə idarə olunur. Diodları gərginliklə təmin etmək üçün DC-DC (ISEG AP002255p05 modulu) modulundanda istifadə edilmişdir. Bu



Şəkil 6.1.3 SPECTRİG MAPD qurğusunun elektron bloku və hazırlanmış qurğunun (yuxardan və yandan) görünüşü.



Şəkil 6.1.4 SPECTRİG MAPD və NaI ssintilyatoru ilə PuBe radioizotopunun amplitud paylanma spektri .

modul gərginliyi 0 ilə + 200 V aralığında 12 bit dəqiqliyi ilə tənzimlənməsinə imkan verir və modul RAÇ vasitəsilə idarə olunur. Dövrədə əlavə olaraq ARÇ –sinin xəttiliyinə və ofsetin nəzarəti üçün Diagnostics ADC modulu istifadə edilmişdir. Hazırlanmış SPECTRİG MAPD qurğusunun blok dövrəsi və hazırlanmış hazır forması şəkil.6.1.3-də verilmişdir. Şəkil 6.1.4-də PuBe radioizotopundan buraxılan gamma şüalarının yeni modulla çəkilmiş amplitud paylanma spektri verilmişdir.

Cədvəl 6.1.1

Spektrometrin parametrləri

Spektrometrin parametrləri	
Eni	11sm
Uzunluğu	18sm
Material	Plastik
$U_{\text{giriş}}$	+5V
$U_{\text{çıxış}}$	+200V
Cərəyan tələbatı	200mA
MSFDfotodiod	
$U_{\text{işləmə}}$	+94.3V
$I_{\text{qaranlı}}$	500nA
Gücləndirmə əmsalı	~100000
Küy əmsalı	1,02
Tutumu	180pF
Ölçüsü	3,7×3,7mm
Ssintilyator	
Növü	NaI
İşıq çıxışı	40000 foton/ MeV
Maksimal dalğa uzunluğu	415nm
Parçalanma müddəti	250ns
Ölçüsü	h~13mm,w-3mm,l-3mm
Qeyd etmə performansı	
Minimum qeydedilə bilən aktivlik	7Bk
Təbii fon	2 hadisə/san
Enerjiyə görə işləmə diapazonu	26.3 keV-4.4MeV
Maksimal sayma sürəti	20000 hadisə/san

Spektrdən göründüyü kimi detektor modulu öz xətiliyini 4.44 MeV enerji intervalına kimi tam saxlamışdır.

Spektrometrin korpusunda bir qidalandırıcı giriş, bir analoq çıxış və bir USB çıxış mövcuddur. Hazırlanmış spektrometrin parametrləri Cədvəl. 6.1.1-də verilmişdir.

Hazırlanmış spektrometrlər tibbdə, hərbi sahədə, kosmik fəza tədqiqatlarında, neft-qaz çıxarma sənayesində və nüvə reaktorlarında radioaktiv maddələrlə işləyən personalın radiasiya təhlükəsizliyini təmin etmək üçün nəzərdə tutulmuşdur.

6.2. MSFD fotodiodlarının radiasiyaya davamlılığının öyrənilməsi

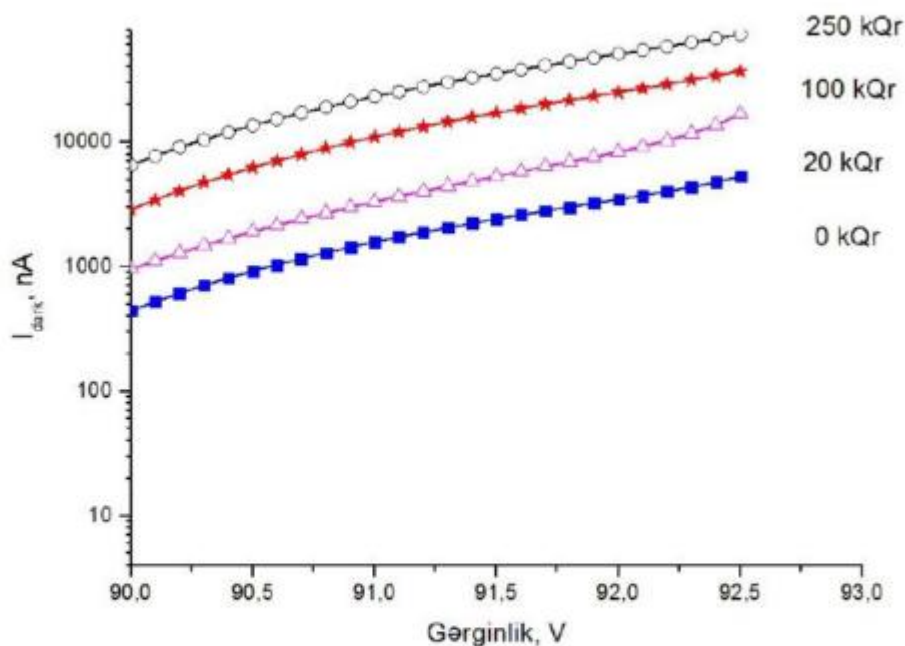
MSFD fotodiodların müxtəlif növlərinin ssintilyatorlarla qamma şüaları qeydetmə həssaslığı, amplituda görə enerji ayırd etməsi və xətiliyi tədqiq edildikdən sonra bu tip detektorların spektroskopiya və dozimetriya sahəsində tətbiqinin mümkünlüyü göstərilmişdir. Belə olduğu halda MSFD fotodiodların uzun müddət yüksək qamma fonunda istifadə olunacağından onların xassələrinə yuxarı enerjili elektromaqnit dalğalarının təsirinin öyrənilməsi vacibdir. Təqdim edilən fəsilə enerjiləri 1,17 MeV və 1,33 MeV olan qamma şüalarının MSFD fotodiodların parametrlərinə (qaranlıq cərəyan, işləmə gərginliyi, tutumu və dig.) təsirinə baxılmışdır. MSFD fotodiodların şüalanması yüksək aktivlikli ($\sim 17394,07$ GBk) ^{60}Co mənbəsi vasitəsi ilə həyata keçirilmişdir. Fotodiodlar ^{60}Co mənbəsindən 20 sm məsafədə suyun içində şüalandırılmışdır. Təcrübələrdə istifadə edilən hər dörd MSFD-3NK fotodiodların parametrləri oxşar seçilmişdir. Şüalanmış fotodiodların səthi qoruyucu epoksid təbəqəsi ilə tam örtülmüşdür. Hər şüalanma mərhələsindən sonra bir fotodiod nümunə olaraq saxlanılmışdır. Bu işə aparılan ölçmələrin təkrarlanmasına və fotodiodun xassələrinin zamandan asılı olaraq dəyişməsinədə nəzarət etməyə imkan verir. Qamma şüaları ilə şüalanma toplam 250 kQr dozaya qədər 3 mərhələdə davam etmişdir: 20 kQr, 100 kQr və 250 kQr. Şüalanmanın birinci mərhələsində 3 ədəd MSFD fotodiodlar 20 kQr dozaya qədər şüalandırılmış və onları xarakterizə edən parametrlər: qaranlıq cərəyanı, işləmə gərginliyi və tutumları

ölçülmüşdür [5, c.35, s.7-12]. Növbəti mərhələdə yalnız iki fotodiod 100 kQr dozaya qədər şüalandırılmışdır. Şüalanmış hər iki fotodiodların daha sonra parametrləri tədqiq edilmişdir. Qamma şüalanmanın üçüncü mərhələsində yalnız bir MSFD fotodiod 250 kQr dozaya qədər şüalandırılmış və onun parametrləri təyin edilmişdir. Şüalanmanın hər mərhələsində şüalanmış fotodiodların parametrləri etalon fotodiodun parametrləri ilə müqayisə edilmişdir. Şüalanmış fotodiodların qaranlıq cərəyanı kəskin artdığından təcrübədəki müqavimətlərə əlavə gərginlik düşməsi üçün dövrdəki böyük müqavimətlər kiçiklərlə əvəz edilmişdir.

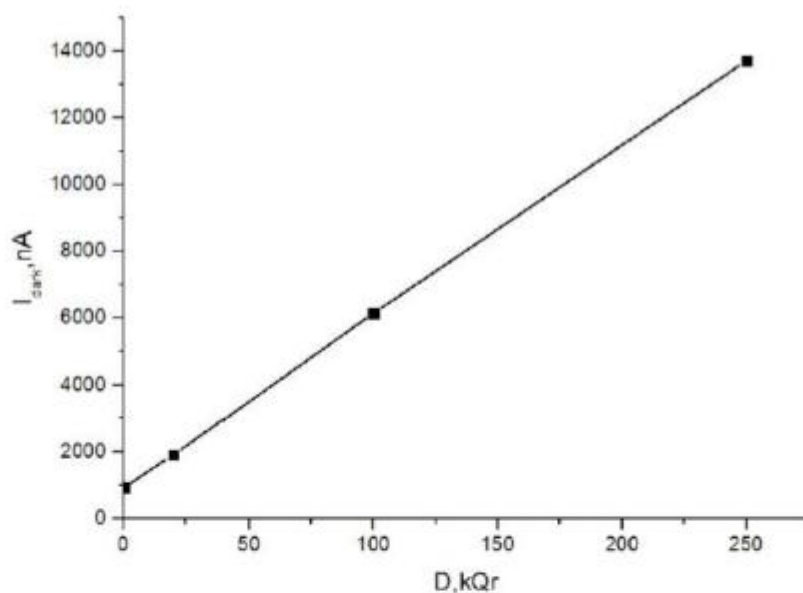
Şəkil 6.2.1.-də 1,17 MeV və 1,33 MeV enerjili qamma şüaları ilə üç fərqli 20 kQr, 100 kQr və 250 kQr doza ilə şüalandırılmış MSFD-3NK fotodiodlarının qaranlıq cərəyanının gərginlikdən asılı olaraq dəyişməsi qurulmuşdur [5, c.35, s.7-12]. Şüalanmadan öncə fotodiodun qaranlıq cərəyanı eyni bir gücləndirmə əmsalında təqribən 920 nA olmuşdur. İlk şüalanma dozasının 20 kQr-də hər üç MSFD-3NK fotodiodun qaranlıq cərəyanı işləmə gərginliyində artaraq təqribən 1912 nA olmuş və etalon fotodioda nisbətən qaranlıq cərəyan 2 dəfədən çox yüksəlmişdir. Bununla yanaşı qoruyucu təbəqənin rəngində dəyişmə müşahidə edilmişdir. Şüalanma dozasının ikinci mərhələsində 100 kQr dozada hər iki MSFD fotodiodun qaranlıq cərəyanı işləmə gərginliyində 6152 nA olmuş və qoruyucu epoksid təbəqəsi tündləşmişdir. Qaranlıq cərəyanın artması 6,7 dəfə olmuşdur. Şüalanma dozasının sonuncu mərhələsində 250 kQr dozada MSFD fotodiodun qaranlıq cərəyanı işləmə gərginliyində 13712 nA olmuşdur. Etalon fotodiodla müqayisədə qaranlıq cərəyan təqribən 15 dəfə artmışdır. Qaranlıq cərəyanın qiyməti gündə bir dəfə ölçmə etməklə 7 gün müddətində zamandan asılı olaraq dəyişməsidə tədqiq edilmiş və müəyyən edilmişdir ki, şüalanmış diodların qaranlıq cərəyanı zamandan asılı olaraq dəyişmir. MSFD fotodiodların işləmə gərginliyində (90,5 V) qaranlıq cərəyanın qamma şüalanma dozasından asılılığı şəkil 6.2.2-də verilmişdir. Asılılıqdan görüldüyü kimi şüalanma dozası artdıqca MSFD fotodiodların qaranlıq cərəyanı artır və bu artım xəttidir [5, c.35, s.7-12]:

$$I_{da}=938,7+51,6 \times D \quad (6.2.1)$$

Burada, I_d - fotodiodun işləmə gərginliyindəki qaranlıq cərəyanı (nA) və D-şüalanma dozasıdır (kQr). Qaranlıq cərəyanın belə dəyişməsi məhz yeni yaranan radiasiya defektləri ilə bağlıdır. Yaranan radiasiya defektlər məhz birinci və ikinci epitaksial təbəqənin həcmi boyunca bircins paylanırlar. Bu defektlər MPSF-3NK fotodiodların deşilmə gərginliyindən aşağı gərginlik oblastında qaranlıq cərəyanın dəyişməsinə təsir edirlər. Deşilmə gərginliyindən aşağı gərginlikdə 60 V və 80 V gərginlikdə qaranlıq cərəyanın dəyişməsi xətti olmuşdu. Şüalanma dozasının 250 kQr dozasında gərginliyin 60 V və 80 V qiymətində qaranlıq cərəyan 11,1 dəfə və 12,4 dəfə artmışdır. Lakin işləmə oblastında qaranlıq cərəyanın artması 15 dəfə olmuşdur [5, c.35, s.7-12]. Qaranlıq cərəyanın müxtəlif şüalanma dozalarında gərginlik artdıqca artması bir başa olaraq sahənin artması ilə bağlıdır. Həcmi yüklər oblastında mövcud olan sahənin (60 V) qiymətində radiasiya defektlərinin yaratdığı yükdaşıyıcıların müəyyən hissəsi tutma mərkəzləri və rekombinasiya mərkəzləri tərəfindən tutulur, nəticədə qaranlıq cərəyan 11,1 dəfə artır. Gərginliyin 80 V qiymətində isə həcmi yüklər oblastındakı sahənin böyük olması generasiya mərkəzlərinin yaratdığı yükdaşıyıcıların əksər hissəsinin rekombinasiya və tutma mərkəzləri tərəfindən tutulma ehtimalı kəskin azalır və nəticədə qaranlıq cərəyan 12,4 dəfə artmışdır. Gərginliyin 90, 5 V qiymətinə isə həcmi yüklər oblastındakı sahə özünün maksimum qiymətinə yaxınlaşmış və generasiya mərkəzlərinin yaratdığı yük daşıyıcıların demək olar ki,tamamı defektlər tərəfindən tutulmadan selvari prosesdə iştirak etmişdir. Bunun nəticəsində qaranlıq cərəyan 15 dəfə artmışdır. Şüalanmış fotodiodun tam qaranlıq cərəyanının artması fəza yüklər oblastındakı generasiya cərəyanının artmasından asılı olmuşdur [5, c.35, s.7-12]. Generasiya mərkəzlərinin yaranmasını isə 1,17 MeV və 1,33 MeV enerjili qamma şüalarının fotoeffekt nəticəsində yaratdığı yuxarı enerjili elektronlar təşkil edir. Yuxarı enerjili yeni yaranmış elektronlar qəfəsin Si atomlarına kifayət qədər enerji (15 eV böyük) verərək onların qəfəsin düyünlərini tərk etməsinə səbəb olur. Məhz bu defektlər yeni generasiya və digər tip (tutma və rekombinasiya) mərkəzləri yaradır. Qamma şüası MSFD fotodidun daxilinə tam nüfuz edə bildiyindən onun yaratdığı defektlər bütün həcm boyunca bərabər paylanmasını təşkil edir. Bu generasiya mərkəzləri MSFD fotodiodun aktiv həcmi



Şəkil 6.2.1 Selvari fotoqeydedicilərin verilmiş gərginlik intervalında VAX-ın dozadan asılılığı: 1-Şüalanmadan əvvəl; 2-20 kQr; 3-100 kQr; 4-250 kQr [5, c.35, s.7-12]



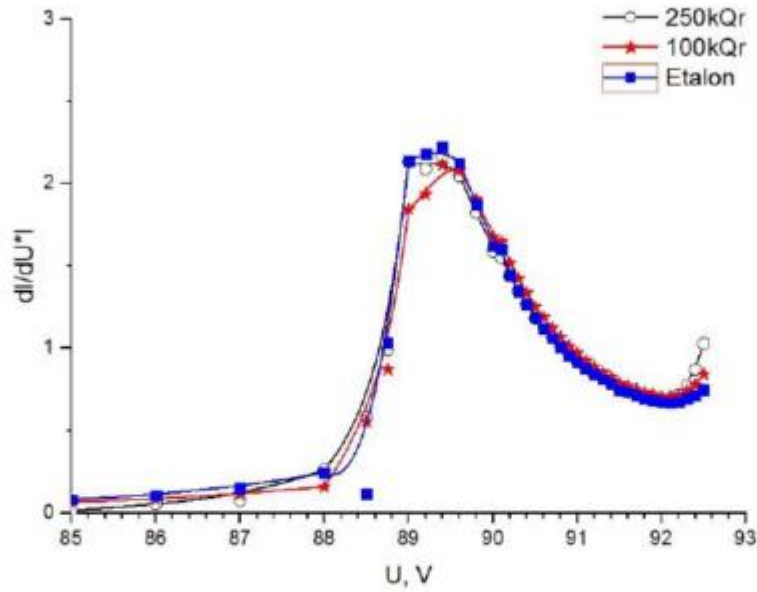
Şəkil 6.2.2 Selvari fotoqeydedicilərin işləmə gərginliyində qaranlıq cərəyanının dozadan asılılığı [5, c.35, s.7-12].

hesab olunan epitaksial təbəqələrdə yaranır. Belə mərkəzlərin sayı ionizasiya şüasının dozası böyüdükcə mütənasib olaraq böyüyür. Keithley-4867 cihazı ilə ölçülən MSFD fotodiodların tam cərəyan reallıqda səth cərəyanı (hansı ki, güclənmədə iştirak etmir) ilə gücləndirilmiş generasiya cərəyanının cəminə bərabər olur və belə belə ifadə olunur: $I = I_{s\ th} + M \times \dot{I}_{gen}$, burada $J_{s\ th}$ – səthi cərəyan, J_{gen} – generasiya cərəyanı (güclənmədə iştirak edən), M – selvari fotodiodun gücləndirmə əmsalıdır. İfadədən görüldüyü kimi şüalanma dozası nəticəsində əmələ gələn generasiya cərəyanı böyüdükcə fotoqeydedicilərin tam cərəyanı analogi qanuna uyğunluqla dəyişir [5, c.35, s.7-12].

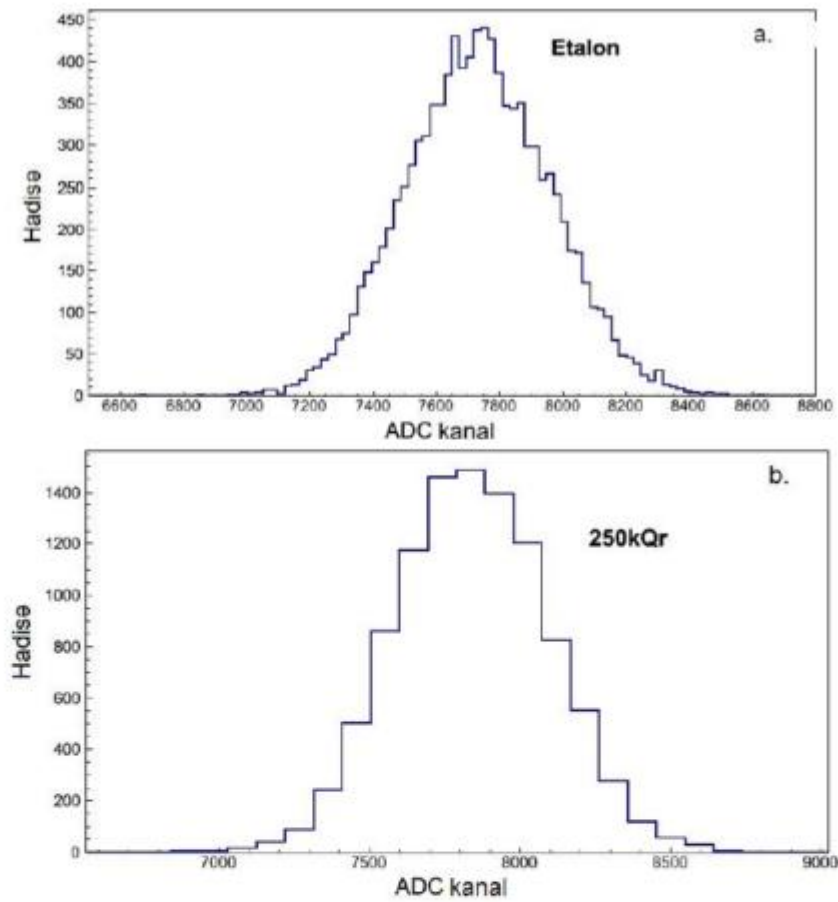
Şəkil 6.2.3-də qamma şüaları ilə şüalandırılmış fotodiodların differensial cərəyanının $\Delta I = (I_n - I_{n-1})$ differensial gərginliyə $\Delta U = (U_n - U_{n-1})$ nisbətininin gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur [5, c.35, s.7-12]. Təcrübədə təyin edilən parametrlər Keithley-6487 qurğusunun köməyi ilə yerinə yetirilmişdir. Tədqiq olunacaq oblast olaraq daxili güclənmənin vahiddən bir neçə dəfə böyük olduğu gərginlik oblastı seçilmişdir. Tədqiq ediləcək fotoqeydedicilərdə bu gərginlik əks istiqamətdə VAX-dan müəyyən edilmişdir. MSFD-3NK fotoqeydedicilərində bu gərginlik intervalını 88 V – 92,3 V əhatə etmişdir [5, c.35, s.7-12]. Gərginliyin bu qiymətlərinin seçilməsi p-n keçidlərə tətbiq edilən gərginliyi kiçik addımla belə dəyişməklə orada yaranan sahənin necə kəskin dəyişməsini göstərməkdir. Belə kəskin dəyişmə deşilmə gərginliyi ətrafında müşahidə edilir. Əgər p-n keçidə yaranan sahə 3×10^5 V/sm böyük olarsa bu zaman bu zolağa daxil olan yükdaşıyıcılar elektrik sahəsi hesabına enerji əldə edirlər və onlar zərbə ilə ionizasiyanı başlatdırırlar. Nəticədə qaranlıq cərəyanın kəskin dəyişməsi müşahidə edilir. MSFD-3NK qeydedicilərində belə kəskin dəyişmə sürəti məhz tətbiq edilən gərginliyin 89 V - 89,6 V oblastında müşahidə edilmişdir [5, c.35, s.7-12]. Şüalandırılacaq MSFD-3NK fotoqeydedicilər üçün bu gərginlik 89,3 V olmuşdur. Bu hal əyrinin maksimumuna uyğun gəlmişdir. Tətbiq edilən gərginlik artdıqca maksimumdan aşağı düşmə müşahidə edilmişdir (89,7 – 91,4V). Bu hal fotoqeydedicinin daxilindəki söndürücü müqavimətin təsiri ilə p-n keçidə sahənin azalmasının göstəricisidir. Tətbiq edilən gərginlik artdıqca dəyişmə sürətində doyma qiymətinə yaxınlaşır (91,6 V – 92,3 V).

Fotoqeydedicinin bu gərginliyi işləmə gərginliyi hesab edilir. Tətbiq edilən gərginliyin 92,5 V-dən böyük olduqda p-n keçidlərdə ikinci zərbə ilə ionizasiya hadisəsinin başlaması müşahidə edilmişdir. İkinci zərbə ilə ionizasiya hadisəsi fotoqeydedicilərin ifrat gərginlik oblastını məhdudlaşdırır. Aparılan ölçmələrdən məlum olmuşdur ki qamma şüası ilə şüalanma dozası 250 kQr olduqda belə MSFD-3NK fotoqeydedicisi öz işlək gərginliyini saxlamışdır [5, c.35, s.7-12].

MSFD-3NK fotodiodlarının səthində qoruyucu kimi istifadə edilən eboksit təbəqəsi öz rəngini şüalanma dozasından asılı olaraq dəyişdiyindən (qaraldığından) bu fotodiodların optik xassələrinin tam dəyişməsinə qısa dalğa uzunluqlu oblastda analiz etmək mümkün deyildir. Qısa dalğa uzunluqlu fotonlar səth yaxınlığında udulduğundan bunlar epoksid təbəqənin şəffaflığından daha kəskin asılı olur. Lakin uzun dalğa uzunluqlu fotonların nüfuz etmə dərinliyi yüksək olduğundan epoksid təbəqədə dozadan asılı olaraq baş verən dəyişmələr qeyd edilən fotosiqnalın amplituduna çox ciddi təsir etmir. Bu səbəbdəndə MSFD-3NK fotodiodlarının həssaslığının dəyişməsinə müəyyən etmək dalğa uzunluğu 850 nm olan infraqırmızı işıqlandırıcı diodlardan istifadə edilmişdir [5, c.35, s.7-12]. Bu məqsədlə şüalanmış və etalon fotodiodların eyni bir amplitudda enerji ayırdetməsi tədqiq edilmişdir. Şəkil 6.2.4-də etalon və şüalanmış MSFD-3NK fotodiodlarının 850 nm dalğa uzunluqlu işığa həssaslığı göstərilmişdir. Bunun üçün Tektroniks generatordan davam etmə müddəti 100 nsan, tezliyi 1 kHz və amplitudu 1,1 V olan mənfi siqnallar işıqlandırıcı fotodioda verilmişdir. MSFD fotodiodlardan alınan siqnallar CAEN ARÇ-ci vasitəsi ilə analiz edilmişdir. İlkin olaraq etalon fotodioda - 90,1 V gərginlik verərək spektral asılılıq qurulmuşdur. MSFD fotodiodun qaranlıq cərəyanı 515 nA olmuşdur. Foto siqnallar inteqrallanarkən Qauss paylanmasından istifadə edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, şüalanmamış fotodiodda foto siqnalın amplitudu 7730-cu kanala düşmüşdür. Foto siqnalauyğun gələn standart kənara çıxma isə 228-ci kanalı əhatə etmişdir. Bu zaman pikin maksimum hündürlüyünün yarım eni (MHYE) 538,5 kanal olmuşdur. Bu fotopikə uyğun gələn amplituda görə ayırdetmə 6,9 % alınmışdır. Şüalanma dozasının 20 kQr qiyməti ilə şüalanmış fotodiodda etalon fotodiodakı



Şəkil 6.2.3 MSFD-3NK qeydedicisinin differensial qarantlıq cərəyanının gərginliyə nisbətinin gərginlikdən asılılığı: 1-şüalanmadan əvvəl; 2-100 kQr; 3-250 kQr [5, c.35, s.7-12]



Şəkil 6.2.4 Etalon (a) və şüalanmış (b) fotodiodla qeyd edilən İQ fotosiqnalın amplitud paylanması

yaranan fotosiqnal qədər amplitud alınması üçün fotodioda 90,12 V gərginlik tətbiq edilmişdir. Şüalanmış fotodiodun qaranlıq cərəyanı 3780 nA olmuşdur. Qeyd edilən fotosiqnalın amplitudu 7754-cü və standart kənara çıxması isə 237,7-ci kanala uyğun gəlmişdir. Fotosiqnal üçün amplitud ayırdetməsi 7,2 % alınmışdır. Bu zaman amplituda görə ayırdetmə 4,3 % artaraq pisləşmişdir. Şüalanma dozasının yüksək qiymətlərində fotodioda tətbiq edilən gərginlik 90,43 V-a qədər qaldırılmış və bu zaman qaranlıq cərəyan 10360 nA ətrafında olmuşdur. Foto siqnala uyğun gələn amplitud ARÇ-nin 7844-cü kanalında və standart kənara çıxma isə 251,84 kanal uyğun gəlmişdir. Fotosiqnalın amplitud ayırdetməsi 7,5 % alınmışdır. Məlum olmuşdur ki etalon fotodiodla müqayisədə şüalanmış fotodiodla qeydedilən siqnalın amplituda görə ayırdetməsi 8,7 % artaraq pisləşmişdir [5, c.35, s.7-12]. Lakin bu dəyişməyə baxmayaraq MSFD-3NK fotodiodları öz işlək parametrlərini saxlamışdır. Ampiltuda görə enerji ayırdetməsinin pisləşməsinə quruluşda yarana biləcək nizamsızlıqla bağlı olmasını yoxlamaq üçündaha sonra şüalanmamış etalon MSFD-3NK fotodiodunun qaranlıq cərəyanı özfonundan başlayaraq 950 nA-dən 15000 nA-ə qədər artırılmışdır. Qaranlıq cərəyanın belə artırılması məhz 250 kQr şüalanma dozasına uyğun seçilmişdir [5, c.35, s.7-12]. Qaranlıq cərəyan mənbəyi olaraq təbii işıq seçilmişdir. Tektroniks generatorundan davamətmə müddəti 100 nsan, tezliyi 3 kHz və amplitudu 1,15 V və 2,5 V olan düzbucaqlı siqnallar işıqlandırıcı fotodiodlara tətbiq edilmişdir. İşıqlandırıcı olaraq dalğa uzunluğu 450 nm (göy) və 850 nm (infra qırmızı) dalğalar buraxan fotodiodlar istifadə edilmişdir. Ölçmələr zamanı temperatur 21,7 °C – 22,5 °C intervalında dəyişmişdir. Hər qaranlıq cərəyanın qiymətində edilən ölçmə müddəti 10 saniyə olmuşdur. MSFD-3NK fotodiodundan götürülən siqnallar bizim tərəfimizdən hazırlanmış LMH-6657 əsaslı gücləndirici ilə gücləndirilmiş və CAEN-5720 analoq rəqəm çeviricisi vasitəsi ilə çevrilmişdir. Alınan hər siqnal dat formatda saxlanılmışdır. Qauss paylanması istifadə edərək fotosiqnala uyğun gələn amplitudun standart kənara çıxması və maksimumu təyin edilmişdir [5, c.35, s.7-12]. Şəkil 6.2.5-də fotosiqnalın amplitudunun maksimum qiymətinin qaranlıq cərəyandan asılılığı qurulmuşdur. MSFD-3NK fotodiodları göy işıqlandırıcı diodla işıqlandırdıqda əmələ gələn foto

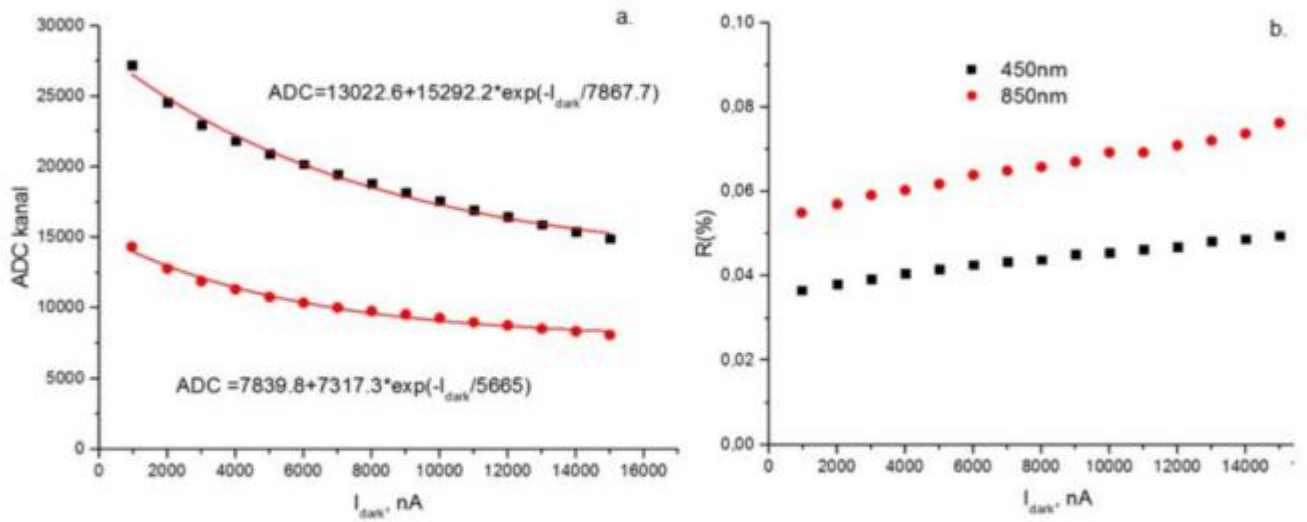
siqnalın qiyməti kifayət qədər yüksək alınmışdır. Bu isə bir başa olaraq fotodiodun kvant effektivliyi ilə bağlıdır və bu dalğa uzunluqları səth boyunca 1mk dərinlikdə udulur. Lakin fotodiodun qaranlıq cərəyanı artdıqca fotosiqnalın amplitudu tədricən azalmışdır. Qaranlıq cərəyandan asılı olaraq fotosiqnalın amplitudu 27206-cı kanaldan 14914-cü kanala qədər azalmışdır. Bu zaman fotosiqnalın ümumi azalması 45,18 % olmuşdur. Fotosiqnala uyğun gələn standart kənara çıxma isə 424 kanaldan 315 kanala kimi azalmış və dəyişmə 25,7 % olmuşdur. Fotosiqnalın amplitudunun qaranlıq cərəyandan asılı olaraq azalması eksponensial qanuna tabe olmuşdur. Eyni bir dəyişmə həmçinin də infra qırmızı işıqlandırıcı diodlar üçündə doğru olmuşdur. Fotosiqnalın amplitudu və standart kənara çıxması qaranlıq cərəyanın maksimum qiymətində 14338,4 kanaldan 8102,5 kanala və 335,5 kanaldan 263 kanala kimi azalmışdır. Ümumi amplitudun və standart kənara çıxmanın dəyişməsi 43,5 % və 21,6 % olmuşdur. Hər iki işıqlandırıcı diodlar işıqlandırma zamanı foto siqnalın amplitudu qaranlıq cərəyandan asılı olaraq eksponensial qanunla azalmışdır. Bununla yanaşı foto pikə uyğun gələn enerji ayırdetməsində qaranlıq cərəyan artdıqca pisləşmişdir (artmışdır). Beləliklə göy işıqlarla şüalanma zamanı enerji ayırdetməsi 35,2 % və infraqırmızı işıqla şüalanma zamanı isə enerji ayırdetməsi 38,2 % pisləşmişdir. Şüalanmış fotodiodla müqayisədə enerji ayırd etməsinin belə kəskin dəyişməsi göstərir ki, radiasiya deffektlərinin yaratdığı yükdaşıyıcıların əksər hissəsi selvari prosesdə iştirak edəbilmir. Məhz buna görə də şüalanmış fotodiodun enerji ayırd etməsi daha az dəyişmişdir.

Bu fəsildə həmçinin qamma şüaların MSFD-3NK fotoqeydedicilərin tutumuna təsiridə tədqiq edilmişdir [5, c.35, s.7-12]. MSFD-3NK fotoqeydedicilərin tutumunu ölçmək üçün E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС cihazı fotoqeydedicinin elektrodlarına bir başa birləşdirilmişdir. İstifadə edilən cihazdan fotoqeydediciyə amplitudu sabit olan (0,04 V) və tezliyi $10^2 - 10^6$ Hz oblastında seçilə bilən sinusoidal siqnallar tətbiq edilmişdir. Tətbiq edilən qurğu fotoqeydediciyə maksimum + 40 V gərginlik verməyə imkan vermişdir. Tətbiq edilən bu gərginlik MSFD-3NK fotoqeydedicilərin volt- farad xarakteristikasını tədqiq etmək üçün kifayətdir. Şəkil 6.2.6-da orta enerjisi 1,25 MeV olan ionlaşdırıcı şüaların MSFD-3NK qeydedicilərin

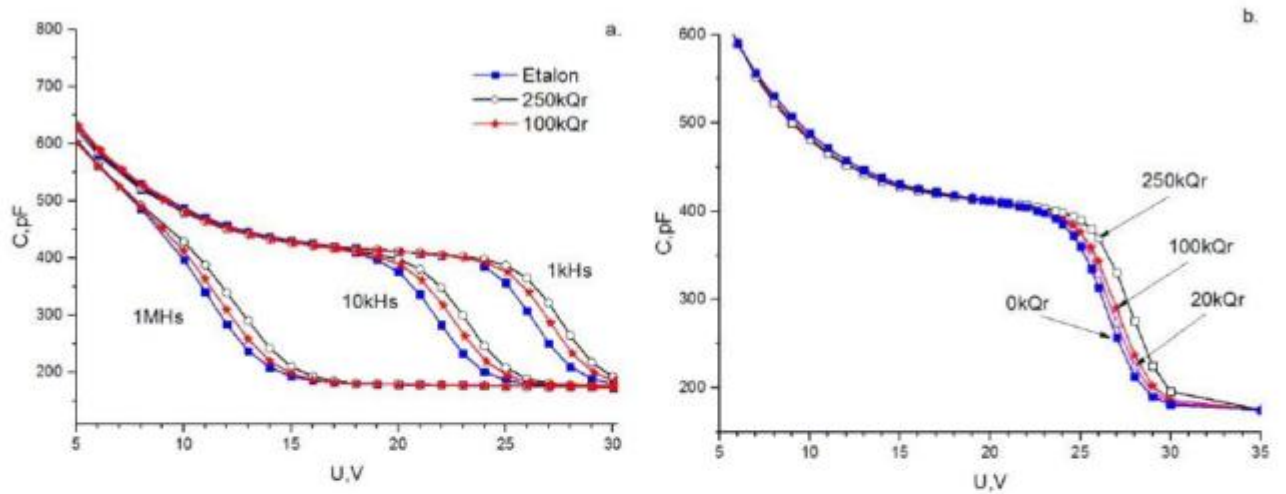
tutumuna təsiri verilmişdir [5, c.35, s.7-12]. Asılıqdan göründüyü kimi tətbiq edilən gərginliyin kiçik qiymətlərində qeydedicinin tutumu kifayət qədər yüksək olmuşdur. Tətbiq edilən gərginlik artdıqca qeydedicinin tutumu azalmış və gərginliyin müəyyən qiymətindən sonra artıq tutumun dəyişməsi müşahidə edilməmişdir (30–35 V). Gərginliyin bu qiyməti fotoqeydedicini PİN diod həssaslığına (daxili güclənmə ~ 1) gətirmə, yəni aktiv həcmi tam fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunma qiymətidir. Bu gərginliyə uyğun gələn tutum isə MSFD-3NK fotoqeydedicisinin tutumudur (180 pF) [5, c.35, s.7-12]. Əyrilərdən göründüyü kimi üç müxtəlif dozada (20 kQr, 100 kQr və 250 kQr) şüalanmış MSFD-3NK fotoqeydedicilərinin əsas tutumu dəyişməmişdir. Fotoqeydedicilərin aktiv həcmi tam fəza yüklər oblastı ilə əhatə olunma gərginliyində kiçik dəyişmə baş vermişdir. Bu dəyişmə gərginliyin 24 V–30 V qiymətində daha aydın görünür [5, c.35, s.7-12]. Fotoqeydedicinin tutumunun bu gərginlik intervalında dəyişməsi məhz silisium althığın üzərində yetişdirilmiş n-tip (fosforla aşqarlanmış) birinci epitaksial təbəqə daxilində radiasiya şüalanmasının yaratdığı defektlər hesabına ola bilər. Gərginliyin bu qiymətində tutum şüalanma dozəsindən asılı olaraq 6–30 % qədər dəyişir. Şəkil 6.2.7-də etalon və üç müxtəlif dozada şüalandırılmış MSFD-3NK fotoqeydedicisinin 27 V-ə uyğun gələn tutumun dozadan asılılığı təyin edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, fotoqeydedicilərin tutumu (27 V) şüalanma dozası artdıqca xətti artır [5, c.35, s.7-12]:

$$C(\text{pF})=262,1+0,3 \times D(\text{kQr}) \quad (6.2.1)$$

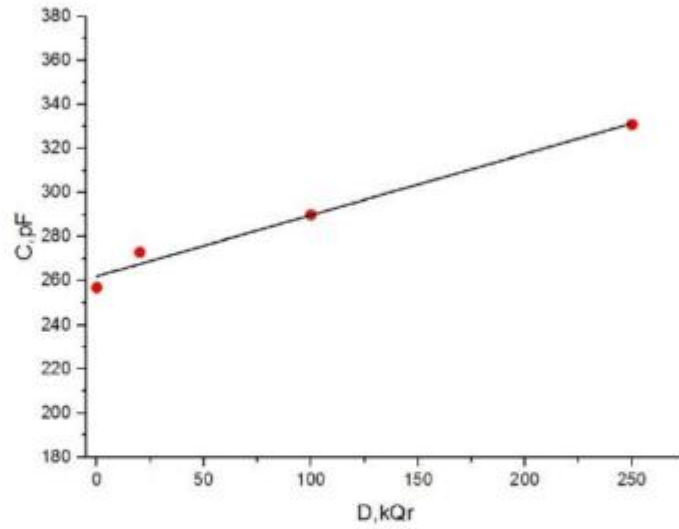
Burada D-şüalanma dozasıdır və vahidi kQr ifadə edilmişdir. Bu ifadə MSFD-3NK fotodiodlarının daha yüksək şüalanma dozalarında tutumunun öncədən necə dəyişməsinə müəyyən etməyə imkan verəcəkdir. Şəkil 6.2.6-da verilmiş asılıqdan göründüyü kimi tutumun aşağı gərginlik oblastında ikinci epitaksial təbəqə (borla aşqarlanmış) ilə bağlı olan hissəsində dəyişmə müşahidə edilmir. Bu isə 2-ci epitaksial təbəqənin 1-ciyə nəzərən radiasiya şüalanmasına davamlılığının yüksək olması ilə bağlı ola bilər. Görünür ki, bor atomları bu təbəqədə asanlıqla hərəkət edərək daha mürəkkəb defektlərin yaranmasının qarşısını ala bilər. Əlbəttə ki,



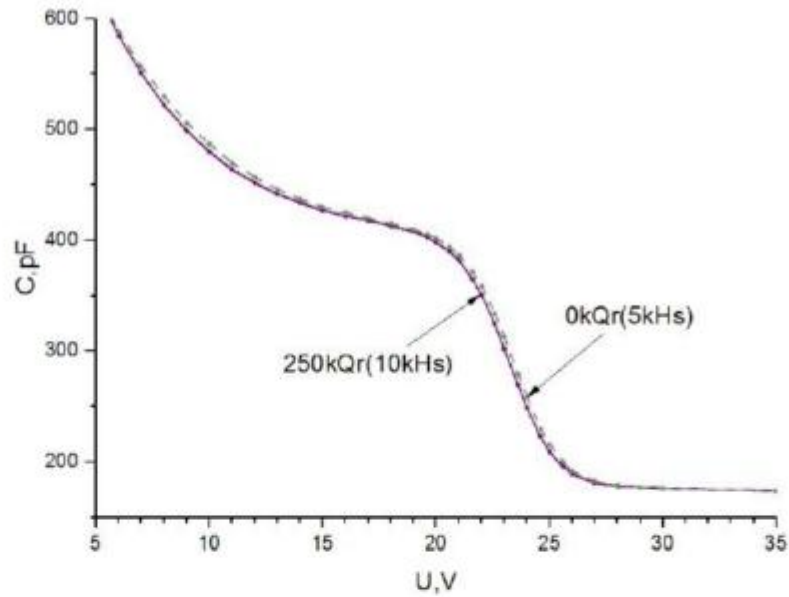
Şəkil 6.2.5 Etalon fotodiodlarda qeyd edilən foto siqnalın amplitudunun və ayırdetməsinin süni qaranlıq cərəyandan asılılığı



Şəkil 6.2.6 Qamma şüaları ilə şüalanmış MSFD-3NK fotodiodların tərs istiqamətdə volt farad xarakteristikası (VFX)



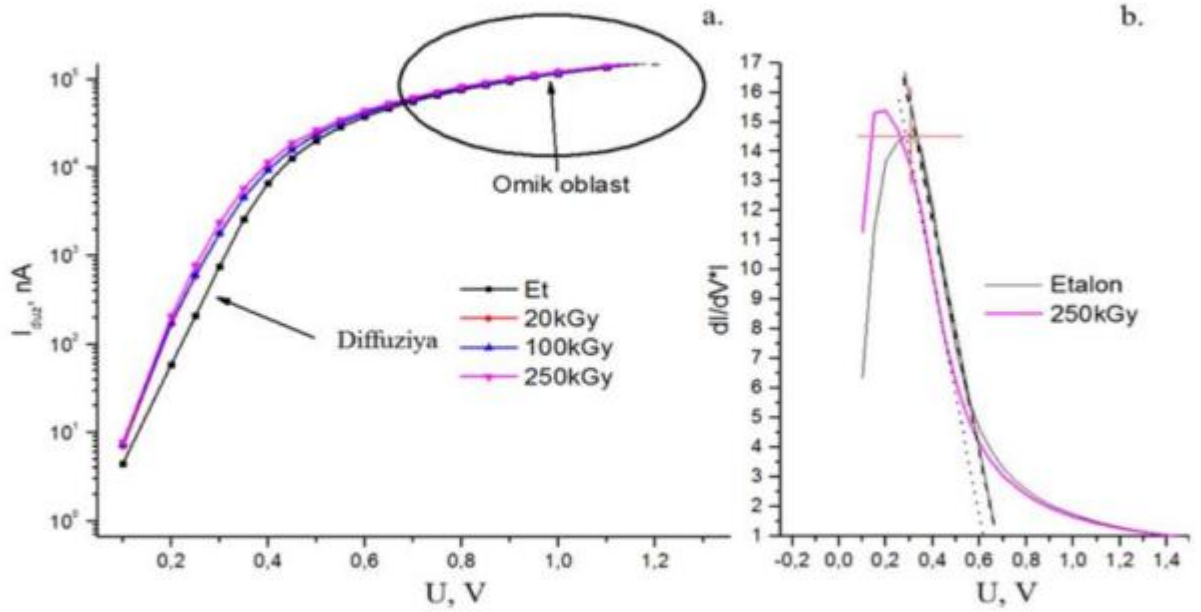
Şəkil 6.2.7 27V gərginlikdə MSFD-3NK fotodiodunun tutumunun şüalanma dozasından asılılığı.



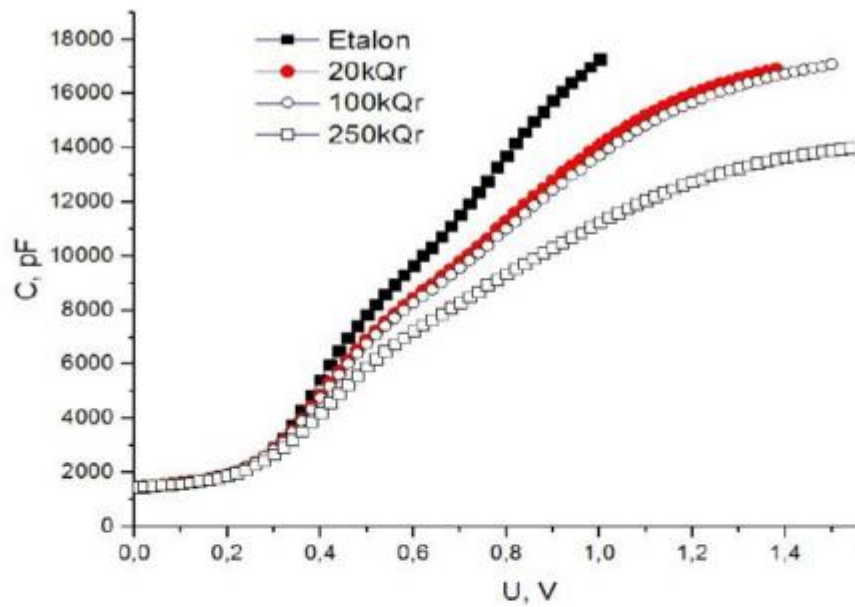
Şəkil 6.2.8 Şüalanmış və etalon MSFD-3NK fotodiodunun tutumunun iki müxtəlif tezlikdə gərginlikdən asılılığı.

şüalanma nəticəsində birinci epitaksial təbəqədə baş verən tutmun artmasını şüalanmamış fotodiodun tezliyini dəyişməklə ayrılərin üst-üstə düşdüyü oblastı müəyyən etmək olar. Beləliklə göstərilmişdir ki, 250 kQr doza ilə şüalanmış fotodiodun tutumunun 10 kHz qiymətində ki nəticələr şüalanmamış etalon fotodiodun 5 kHz tezlikli sinusoidal siqnaldan alınan nəticələrlə üst-üstə düşür (şəkil 6.2.8).

MSFD-3NK fotodiodlarının düz istiqamətdə VAX-nın dəyişməsinə baxılmışdır (şəkil 6.2.9. (a)). Məlumdur ki, fotodioda 0 V gərginlik tətbiq edildikdə p-n keçid tarazlıq halında olur və potensial çəpər özünün maksimum qiymətini alır ($\sim 0,7$ V). Bu zaman dövrədən axan cərəyan minimum qiymətini alır. Bu oblastda radiasiya defektlərinin yaratdığı effektləridə müşahidə etmək mümkündür. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində isə p-n keçidin potensial çəpərinin hündürlüyü tədricən azalır və p-n keçiddən axan cərəyan artır. Düz istiqamətdə fotodioda tətbiq edilən gərginliyin 0,1 V – 0,3 V qiymətində cərəyan 1,7–3,7 dəfə artmışdır lakin gərginliyin sonrakı böyük qiymətlərində bu nisbət azalmış və 0,6 V gərginlikdən sonra şüalanmış və ilkin hal arasında fərq müşahidə edilməmişdir. Buna səbəb isə p-n keçidin artıq 0,6 V gərginlikdə açılması olmuşdur. Radiasiya defektlərinin yaratdığı cərəyanın p-n keçiddin açılması zamanı axan cərəyandan çox-çox kiçik olduğundan gərginliyin bu intervalında şüalanmış fotodiodla şüalanmamış fotodiod arasında fərq müşahidə edilməsi mümkün olmamışdır. Şəkil 6.2.9 (b).-də MSFD-3NK fotodiodunun düz istiqamətdə differensial $\frac{dI}{(I \times dU)}$ nisbətinin düz istiqamətdə tətbiq edilən gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur. Göründüy kimi 250 kQr doza ilə şüalanmış fotodiodun differensial dəyişməsinə çəkilən toxunan kəsişmə nöqtəsi 0,62 V olmuşdur. Şüalanmamış fotodiodda isə differensial dəyişməsinə çəkilən toxunan kəsişmə nöqtəsi 0,68 V müşahidə edilmişdir. P-n keçidin açılması yalnız birinci və ikinci epitaksiya təbəqəsi arasında baş vermişdir. Qaranlıq cərəyanın düz istiqamətdə belə dəyişməsi MSFD-3NK fotodiodlarının tutumunda düz istiqamətdə dəyişməsinə tədqiq etmək marağını artırır. Şüalanmadan sonra tərs istiqamətdə MSFD-3NK fotodiodlarının tutumunda heç bir dəyişiklik müşahidə edilməmişdir [5, c.35, s.7-12]. Fotodiodun düz istiqamətdə VFX-ının dəyişməsidə tədqiq edilmişdir (şəkil 6.2.10).



Şəkil 6.2.9 Şüalanmış və etalon MSFD-3NK fotodiodunun VAX-nın və differensial $dI/(I \times dU)$ nisbətində düz istiqamətdə dəyişməsi.



Şəkil 6.2.10 Şüalanmış və etalon MSFD-3NK fotodiodunun tutumunun düz istiqamətdə gərginlikdən asılılığı.

Bu zaman fotodiodun tutumunun gərginliyin 0 – 2 V intervalında dəyişməsinə baxılmışdır. Gərginliyin 0 V qiymətində p-n keçidlər tarazlıq halında olmuşlar və bu zaman birinci epitaksiya layı ilə n^+ layı arasındakı həcmi yüklər oblastının eni maksimum olmuşdur. Lakin gərginliyin sonrakı qiymətlərində həcmi yüklər oblastının eni azalır və nəticədə fotodiodun tutumu artmışdır. Fotodiodun tutumun kəskin artması 0,3 – 0,46 V intervalında müşahidə edilmişdir. Daha yuxarı gərginlikdə həcmi yüklər oblastının eni kəskin azalmış və p-n keçid açılmışdır. Nəticədə fotodiodun tutumu artmışdır. Qamma şüaları ilə 100 kQr dozada şüalanmış fotodiodun tutumu etalon fotodioda nisbətən azalmışdır. MSFD-3NK fotodiodunun tutumun kəskin artması 0,3 – 0,49 V müşahidə edilmiş və etalon fotodiodla müqayisədə dəyişmə sürəti azalmışdır. Eyni ilədə 250 kQr dozada fotodiodunun tutumun kəskin artması 0,3 – 0,55 V müşahidə edilmiş 100 kQr doza ilə müqayisədə dəyişmə sürəti azalmışdır. Dəyişmə sürətinin azalması həmçinin 1 V gərginlik oblastındada müşahidə edilmişdir. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində tutum doyma halına yaxınlaşmışdır ki, bu da həcmi yüklər oblastının kəskin azalması və tətbiq edilən gərginlik böyük qiymətlərinin həcmi yüklər oblastının bu qiymətindən aşağı sala bilməməsi ilə bağlı olmuşdur. Beləliklə şüalanma dozası artdıqca tutumun düz istiqamətdə azalması epitaksial təbəqələrdəki aşqar konsentrasiyasının neytrallaşması hesabına ola bilər [5, c.35, s.7-12].

Həmçinin də fotodiodun tutumunun düz keçid istiqamətində tezlikdən asılılığında tədqiq edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, yüksək tezliklərdə 1 MHz –də şüalanmış fotodiodla etalon fotodiod arasında kəskin fərq müşahidə edilməmişdir. Buna səbəb tutma mərkəzləri tərəfindən tutulmuş yükdaşıyıcılar boşalmağa imkan tapmırlar və bu səbəbdəndə fotodiodun tutumunda ciddi fərq müşahidə edilməsi mümkün olmur. Lakin sinusoidal siqnalın aşağı tezliklərində 100 kHz bu fərq artmış və kəskin fərqlənmə isə məhz tezliyin 10 kHz qiymətində müşahidə edilmişdir. Tezliyin aşağı qiymətlərində tutumlar arasında ciddi fərqi müşahidə edilməsi radiasiya deffektlərinin yaratdığı tutma mərkəzlərinin işləmə prinsipi ilə əlaqəlidir. P-n keçiddə tətbiq edilən gərginliyin 0,5 V qiymətində şüalanmış fotodiodların tutumları müqayisə edilmişdir. Sinusoidal siqnalın 1 MHz tezliyində düz istiqamətdə

fotodiodun tutumu təqribən 8 %, 100 kHz tezliyində 16,5 % və 10 kHz tezliyində isə maksimum olaraq 21 % olmuşdur. Bu fərq p-n keçidin açılması üçün lazım olan gərginlikdən yuxarı gərginliklərdə daha kəskin fərqlənmişdir [5, c.35, s.7-12].

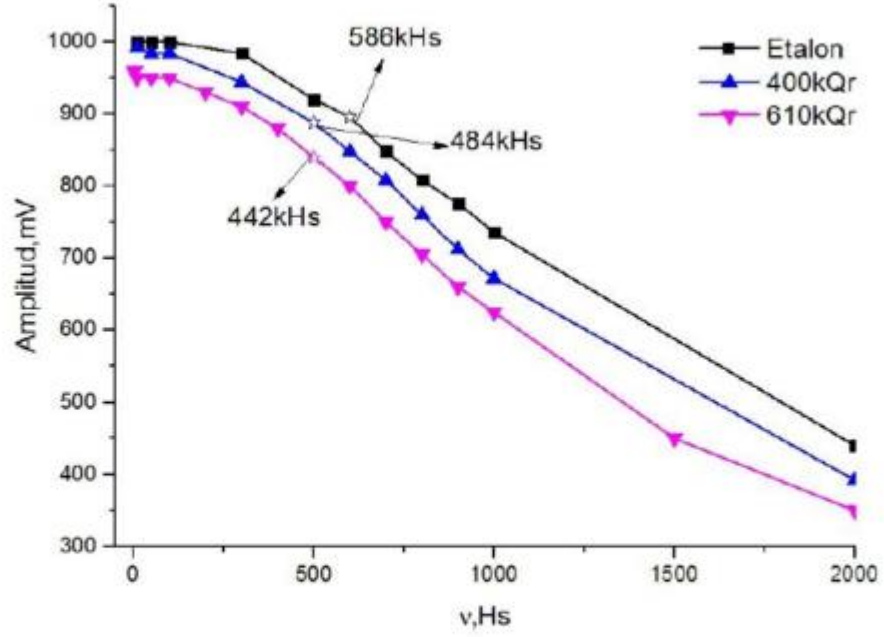
6.3. MSFD əsaslı qamma-spektrometrdə istifadə edilən gücləndiricilərin radiasiya davamlılığının öyrənilməsi

Əksər ssintilyasiya detektorlarında siqnalın gücləndirilməsi üçün LT-1357 əməliyyat gücləndiriciləri əsasında hazırlanmış siqnal gücləndiriciləri ən optimal gücləndirici hesab edilir. Belə detektor modulları çox vaxt yüksək dozalarda işləyirlər. Məhz bu məqsədlədə işdə LT-1357 əməliyyat gücləndirici əsaslı bir kaskadlı siqnal gücləndiricinin yüksək dozalı qamma şüalara qarşı radiasiya davamlılığı öyrənilmişdir. LT-1357 əsasında hazırlanmış gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı 10 və onun buraxma zolağı 2,5 MHz olmuşdur. Şəkil 2.3.3-də istifadə edilən gücləndiricinin elektronik dövrəsi verilmişdir. Gücləndiricini gərginliklə qidalandırmaq üçün ± 6 V gərginlik mənbəsi istifadə edilmişdir. LT-1357 əməliyyat gücləndiricisi əsasında hazırlanmış siqnal gücləndiricisinin parametrlərini təyin edərkən gücləndiricinin girişinə parametrləri: eni 100 nsan, tezliyi 3.5 kHz və amplitudu -20 mV olan düzbucaqlı impulslar verilmişdir. LT-1357 əməliyyat gücləndiricisi əsasında hazırlanmış siqnal gücləndiricisinin çıxışından alınan gücləndirilmiş siqnalın parametrləri Hantek DSO-5202 ossiloqrafı vasitəsi ilə ölçülmüşdür. LT-1357 əməliyyat gücləndiricisi əsasında hazırlanmış siqnal gücləndiricisinin radiasiya davamlılığının tədqiqi zamanı gücləndirmə əmsalı $G \sim 10$ olan 4 gücləndiricidən istifadə edilmişdir. Gücləndiricilər 4 mərhələdə: 20 kQr, 250 kQr, 400 kQr, 610 kQr dozalarda ^{60}Co radioizotopunun buraxdığı enerjisi $E > 1$ MeV böyük olan qamma şüaları ilə şüalandırılmışdır (şək. 6.3.1). Hər şüalanma mərhələsindən sonra gücləndiriciləri xarakterizə edən parametrlərin: gücləndirmə əmsalının, cərəyan tələbatının və buraxma zolağının dozadan asılılığı öyrənilmişdir. Şüalanma dozasının 20 kQr – 250 kQr qiymətində gücləndiricilərin gücləndirmə və buraxma zolaqlarının eninin dəyişməsində ciddi dəyişiklik müşahidə

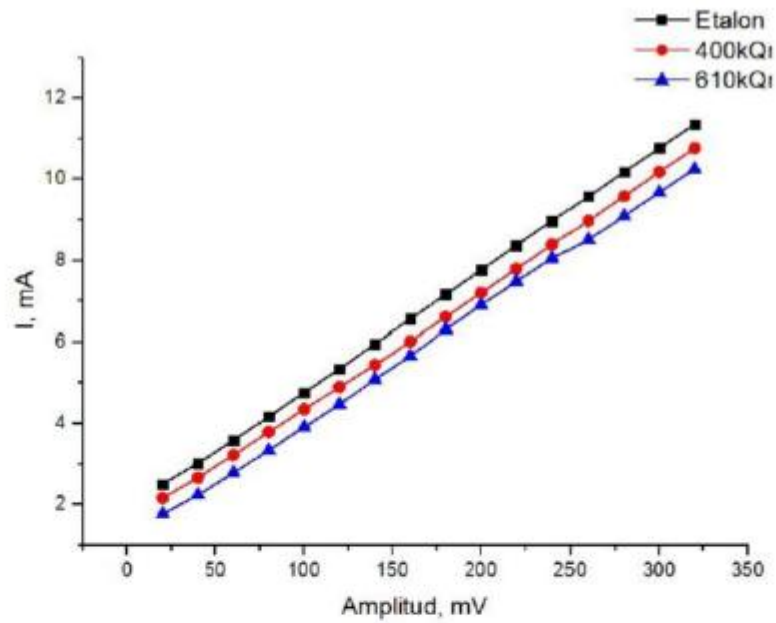
edilməmişdir. Gücləndiricinin buraxma zolağının eni 0–586 kHz intervalını əhatə etmişdir. Şüalanma dozasının 400 kQr qiymətlərində isə gücləndiricinin buraxma zolağının eni 0–484 kHz əhatə etmişdir. Bu zaman gücləndiricinin buraxma zolağının eni 17 % azalmışdır. Şüalanma dozasının 610 kQr qiymətində isə gücləndiricinin buraxma zolağının sərhədi 442 kHz-də müşahidə edilmişdir. Gücləndiricinin buraxma zolağının eni ilkin halla müqayisədə 24,5 % azalmışdır. Gücləndiricinin gücləndirmə əmsalının dozadan asılı olaraq dəyişməsidə yoxlanılmışdır. Məlum olmuşdur ki, 400 kQr şüalanma zamanı 100 mV amplitudlu tezliyi 10 kHz olan sinusoidal siqnala uyğun gələn çıxış amplitudu 0,8 %, lakin dozanın 610 kQr qiymətində isə bu azalma 4 %-ə qədər olmuşdur.

Bununla yanaşı gücləndiricilərin cərəyan tələbatında şüalanma dozasından asılı olaraq dəyişməsidə tədqiq edilmişdir. Şəkil 6.3.2-da gücləndiricinin cərəyan tələbatının siqnalın amplitudundan asılılığı qurulmuşdur. Generatorndan verilən siqnalın amplitudu 20 mV–320 mV intervalında dəyişdirilmişdir. Bu zaman etalon gücləndiricinin cərəyan tələbatı 2,51 mA-dən başlayaraq 11,36 mA qədər artmışdır. Şüalanma dozasının 400 kQr qiymətində cərəyan tələbatı 2,16 mA–10,77 mA intervalında dəyişmişdir. Şüalanma dozasının 610 kQr qiymətində isə cərəyan tələbatı 1,76 mA–10,25 mA qədər azalmışdır. Göründüyü kimi, şüalanma dozası artdıqca gücləndiricilərin cərəyan tələbatı azalır. Etalon gücləndiricilərdə şüalanmadan əvvəl 100 mV amplitudlu tezliyi 70 kHz olan sinusoidal siqnalın gücləndirilməsi zamanı cərəyan tələbatı 4,76 mA olmuşdur. Şüalanma dozasının yüksək qiymətlərində 400 kQr dozada gücləndiricinin 100 mV amplitudlu tezliyi 70 kHz olan sinusoidal siqnalın gücləndirilməsi zamanı cərəyan tələbatı 4,35 mA olmuşdur. Başqa sözlə gücləndiricinin cərəyan tələbatı ~8,6 % azalmışdır. Şüalanma dozasının 610 kQr qiymətində isə gücləndiricinin cərəyan tələbatı 3,91 mA olmuşdur və beləliklə gücləndiricinin cərəyan tələbatı ~17 %ə yaxın azalmışdır.

Beləliklə 610 kQr şüalanmadan sonra gücləndiricinin öz işlək parametrlərində dəyişmələr müəyyən edilmişdir. Şüalanma zamanı gücləndiricinin əsas buraxma zolağının eni kəskin 24,5 % azalmışdır. Bu dəyişmə gücləndiricinin tətbiq sahəsini



Şəkil 6.3.1 Gücləndiricinin buraxma zolağının dozadan asılılığı.



Şəkil 6.3.2 Şüalanmış gücləndiricidə amplitudun cərəyan tələbatından asılılığı.

məhdudlaşdıraraq eni 100 nsan-dən böyük impulsar üçün istifadəsini mümkün etmişdir. Gücləndirmə əmsalında baş verən 4 % dəyişmə əksər təcrübələr üçün qəbul olunandır və bu dəyişmə amplitud paylanmasına ciddi təsir etməyəcəkdir. Lakin digərmüsbət irəliləyiş gücləndiricinin cərəyan tələbatının azalmasında müşahidə edilmişdir. Bu da gələcəkdə hazırlanacaq mobil cihazların enerji sərfiyyatının azalmasına gətirib çıxara bilər.

6.4. Nəticələr

Bu fəsildə MSFD-3NK fotodiodları və NaI əsasında hazırlanmış qamma spektrometrin işləmə prinsipi və onun parametrləri müəyyən edilmişdir. Hazırlanmış qamma spektrometr qurğusunun 100 keV– 4.44 MeV enerji intervalında işləməsi nəzərdə tutulmuşdur. Hazırlanmış prototipin cərəyan tələbatı 200 mA olmuşdur.

Spektrometrlərin hazırlanmasında istifadə edilməsi nəzərdə tutulan MSFD-3NK fotodiodların qamma şüalarına qarşı radiasiya davamlılığı öyrənilmişdir. Məlum olmuşdur ki, MPSH-3NK fotodiodları 1,17 MeV və 1,33 MeV enerjili qamma şüaları ilə 250 kQr dozaya qədər şüalandırıldıqda işləmə gərginliyində fotodiodun qaranlıq cərəyanı 15dəfə artmışdır. Fotodiodun qaranlıq cərəyanının dozadan asılı olaraq xətti artdığı müəyyən edilmişdir. MSFD-3NK fotodiodlarının VFX-sının düz və tərs istiqamətindədəyişmələr müşahidə edilmişdir. Şüalanmış fotodiodların işləmə gərginliyində dəyişmə müşahidə edilməmişdir.Şüalanma dozasının bu qiymətindən sonra MSFD-3NK fotodiodları öz işlək parametrlərini saxlamışdır. Alınan nəticələrdən məlum olmuşdur ki, MSFD-3NK fotodiodları əsasında hazırlanmış qeydedici qurğular uzun müddət yüksək qamma fonunda uğurla istifadə oluna bilər. Bu isə qamma spektrometrlərin və dozimetrlərin istismar müddətinin artmasına imkan verir. Bununla yanaşı bu fəsildə bizim tərəfimizdən hazırlanmış siqnal gücləndiricilərinin radiasiyaya davamlılığı tədqiq edilmişdir. Şüalanma dozasının 610 kQr qiymətindən sonra gücləndiricinin buraxma zolağı 24,5 % azalmış və cərəyan tələbatı yaxşılaşaraq 3,91 mA olmuşdur. Belə gücləndiricilər NaI və CsI əsaslı spektrometrlərin hazırlanmasında uğurla tətbiq oluna bilər.

DİSSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ

1. Dərin piksellə MSFD fotoqəbuledicilərin qoruyucu stop-kanalını və pikselinin ölçüsünü təkmilləşdirərək yeni selvari fotoqəbuledici işlənmiş və sınaqdan keçirilmişdir. Yeni MAPD-3NM tipli fotoqəbuledicilərin parametrləri 3NK ilə müqayisədə işləmə gərginliyi $\approx 19\%$, qaranlıq cərəyanı $\approx 5,2$ dəfə azalmış və gücləndirmə əmsalı $\approx 80\%$ artmışdır. MAPD-3NM tipli fotoqəbuledicilər foton qeydetmə effektivliyinə görə öz analoqlarını 5 dəfədən çox üstəliyin.
2. Səthi piksellə MSFD fotodiodların gücləndirmə əmsalını, qeydetmə effektivliyini artırmağa və maya dəyərini aşağı salmağa imkan verən yeni strukturu işlənmişdir. Təklif edilən qurğuda söndürücü müqavimət olaraq ardıcıl birləşmiş çox saylı mikro p-n keçidlərdən istifadə edilir. Müəyyən edilmişdir ki, yeni MSFD fotodiod işlək parametrlərinə görə öz analoqlarını 50% üstəliyə bilər.
3. MSFD tip fotodiodların işləmə mexanizmini düzgün ifadə etmək üçün həcmi yüklər oblastının müqavimətini nəzərə alan yeni iterativ model işlənmişdir. Məlum olmuşdur ki, MSFD tip fotodiodların gücləndirmə əmsalı həcmi yüklər oblastının müqavimətindən asılı olaraq iki dəfəyə qədər dəyişə bilər.
4. İlk dəfə olaraq müəyyən edilmişdir ki, səthi piksellə MSFD fotodiodların cəldliyini nəzəri sərhəddə çatdırmaq üçün ifrat gərginliyi 4 V-a qədər, parazit tutumu isə piksel tutumunun 1% -nə qədər artırmaq lazımdır.
5. MSFD tipli fotodiodlar əsasında hazırlanacaq radiasiya detektorları üçün 9 mV stabilliyi olan gərginlik çeviricisi və 45 MHz buraxma zolağı olan siqnal gücləndiricisi işlənmiş və sınaqdan keçirilmişdir. Məlum olmuşdur ki, hazırlanmış elektronik hissələr $+50\text{ }^{\circ}\text{C} - -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatur intervalında öz parametrlərini sabit saxlayırlar.
6. MSFD-3NK və MSFD-3N1P tip fotodiodlar və müxtəlif tip üzvi ssintilyator əsaslı ionlaşdırıcı şüa detektorları işlənmiş və geniş öyrənilmişdir. Göstərilmişdir ki, MSFD fotodiodları əsasında hazırlanmış detektorlar qamma şüalarının enerjisini Kompton kənarına görə fərqləndirə bilər və bu detektorla qeyd edilən siqnalın amplitudu enerjiden asılı olaraq xətti dəyişir, yəni $ADC = 535.22 + 0.31 \times E_{K.k.}$.

7. MSFD-3NK və qeyri üzvi ssintilyator əsasında yeni qamma spektrometr hazırlanmışdır. Məlum olmuşdur ki, 0,0263 keV–1.33 MeV enerjili qamma şüalarını qeyd edərkən bu detektor enerji ayırdetməsinə görə analoqlarını 34 % üstələyir və bu tip detektorlar 4.44 MeV enerji oblastına kimi xətti işləyir.
8. MSFD-3NK tipli fotoqəbuledicilərin qaranlıq cərəyanına, deşilmə gərginliyinə, xüsusi tutumuna və enerji ayırdetməsinə ≈ 1.25 MeV enerjili qamma şüaların təsiri geniş öyrənilmişdir. Məlum olmuşdur ki, şüalanmanın təsirindən MSFD-lərin qaranlıq cərəyanı 15 dəfə , enerji ayırdetməsi 8.7 % artmış, xüsusi tutumu və deşilmə gərginliyi 5 % dəqiqliklə sabit qalmışdır.
9. MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış detektor modullarında istifadə edilən LT-1357 tipli mikro-çip gücləndiricilərin fiziki xassələrinə ≈ 1.25 MeV enerjili qamma şüaların təsiri öyrənilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, 610 kQr şüalanmadan sonra gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı və buraxma zolağının eni 4 % və 24,5 % azalmış lakin cərəyan sərfiyyatı isə 17 % yaxşılaşmışdır.

DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. Əhmədov F., Mikro pikselli selvari fotodiolar və p-terfenil əsaslı radiasiya detektorları// Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, Cild 21(3) , 2019. s,37-43
2. Sadıqov Z.Y., Əhmədov F.İ, Əhmədov Q.S., Sadıqov A.Z.,Süleymanov .S., (patent) Sənədin nömrəsi a 2016 0057, Bakı – 2019,№ 5 , s.15
3. Ahmadov. F, Investigation of silicon photomultiplier at low temperature// Azerbaijan Journal of Physics, vol. XXV, Number 03, 2019, s.15-19
4. Əhmədov F., Selvari fotodiodların radiasiya davamlığının öyrənilməsi// Azerbaijan Journal of Physics, vol. XXV, Number 03, 2019, s.7-12
5. Əhmədov F., Silisium əsaslı fotoelektron gücləndiricilər //Gənc tədqiqatçı, Cild V(2), 2019, s.5-16
6. Əhmədov F., Mikro pikselli selvari fotodiodlar əsasında radiasiya detektorlarının hazırlanması //Gənc tədqiqatçı, Cild V(2), 2019, s.33-43
7. Ahmadov F., Ahmadov G., Garibov A., Guliyev E., Khorev S., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S., Development of compact radiation detectors based on MAPD photodiodes with Lutetium Fine Silicate and Stilbene scintillators // Journal of Instrumentation, 2015, vol.10, p.1-7
8. Sadygov Z., Ahmadov F., Ahmadov G., Sadigov A., Suleymanov S., Madatov R., A new method to improve multiplication factor in micro-pixel avalanche photodiodes with high pixel density// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section 2016, V824, p.137–138.
9. Ahmadov F., Sadygov Z., Jafarova E., Madatov R., Ahmadov G, Sadigov A., Suleymanov S., Investigation of disadvantages of LFS scintillator// ANAS. Journal of Physics, 2016, Volume XXXVI, Number 5, 2016, p. 20-22
10. Ahmadov F., Ahmadov G., Sadigov A., Suleymanov S., Zerrouk F., New gamma detector modules based on micropixel avalanche photodiode//Journal of

Instrumentation, 2017, Volume 12, 2, p.1-7

11. Ahmadov F., Abdullayev F, Ahmadov G, Sadigov .A, Sadygov Z, Suleymanov S, New phoswich detector based on LFS and p-terphenyl scintillators coupled to Micro Pixel Avalanche Photodiode //Functional Materials, 2017, Vol.24, No.2, p.341-344

12. Ahmadov F, Abdullayev F, Akberov R, Ahmadov G, Sadygov Z Sadigov, A., Suleymanov S, On iterative model of performance of micropixel avalanche photodiodes, // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, A912, pp.287-289

13. Akbarov R, Ahmadov F, Ahmadov G, Sadygov Z, Sadigov A, Suleymanov S, Scintillation light detection with MAPD-3NK and MPPC-S12572-010P readout// KnE Energy & Physics DOI: 10.18502/ken.v3i1.1767

14. Ahmadov F., Abdullayev F, Ahmadov G, Sadigov .A, Sadygov Z, Suleymanov S, A new physical model of Geiger-mode avalanche photodiodes// [Journal of Instrumentation](#), 2020, Vol. 15, pp 1-8

15. Holik M, Ahmadov F, Ahmadov G, Akbarov R, Berikov D, Mora Y, Nuruyev S, Pridal P, Sadygov A, Sadygov Z, Zich J, Miniaturized read-out interface "Spectrig MAPD" dedicated for silicon photomultipliers// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, A978, pp 1-9

16. Ahmadov F., Ahmadov G., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S., R.Madatov, New phoswich detector based on MAPD and LFS & P-terphenyl scintillator /Fifth International Conference "Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies" (26 - 30 September, 2016, Minsk, Belarus), p 13.

17. Ahmadov F., Ahmadov G., Garibov A., Madatov R., Naghiyev J., Olshevski A., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S., Zerrouk F., Study on possibilities of establishing radiation dosimeters based on silicon micro-pixel avalanche photodiode/The Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2015), Montenegro, 2015, p. 383-385

18. Ahmadov F., Ahmadov G., Guliyev E., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S., Zerrouk F., New gamma detector module based on new model micro-pixel avalanche photodiode /IWORID-2016, Spain, 2016, p.78
19. S. Nuriyev, Ahmadov F., Ahmadov G., Sadygov Z., Sadigov A., Suleymanov S., Performance of the New Generation of Micropixel Avalanche Photodiodes with High Pixel Density and Photon Detection Efficiency/8th International Conference on New Developments in Photodetection, 2-8 July 2017, Tours, France, p.168
20. Ahmadov F, Sadigov A., Ahmadov G., Sadygov Z., Abdullayev F., A new physical model of the performance of avalanche photodiodes with single photoelectron detection-<https://indico.gsi.de/event/6990/session/15/contribution/6/> International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers, 11-15 June, 2018, Schwetzingen, Germany
21. Ахмедов Ф.И., Ахмедов Г.С., Садыгов А.З, Аббасов .И.И, Квантовая Эффективность двух структур лавинных фотодиодов/11-я Международная конференция ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ ФИЗИКА. 12-15 Сентябрь 2017, Астана, Казахстан, с. 179
22. M. Holik, F. Ahmadov, G. Ahmadov, R. Akbarov, D. Berikov, Y. Mora, S. Nuruyev, P. Pridal, A. Sadygov, Z. Sadygov, J. Zich, The miniaturized read-out interface "SPECTRIG MAPD" dedicated for silicon photomultipliers/12th International "Hiroshima" Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (HSTD12). Dec 15-18 2019, Hiroshima, Japan

ƏDƏBİYYAT

1. Əhmədov F.İ. Silisium əsaslı mikro-pikselli selvari fotodiodların radiasiya davamlılığının tədqiqi/ (fizika üzrə fəlsəfə doktoru dissertasiyası)/ -Bakı, 2013, -158 s.
2. Əhmədov F. Alfa zərrəciklərinin BCF-12 fiber ssintilyatoru və selvari fotodiodlar vasitəsi ilə qeyd edilməsi/ F Əhmədov, S.Süleymanov, Q Əhmədov. [və b.] //Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika– riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya, -2016, №5., -s. 25-28.
3. Əhmədov F., Sadıqov Z., Mədətov R., R. Mechtiyeva. Scintillation detectors based on avalanche micro-channel photodiodes for gamma ray and alpha particle//Nüvə enerjisinin gələcəyin enerji təminatında rolu. Beynəlxalq konfransın materialları, - Bakı, -2011,-s. 80.
4. Əhmədov F.I, Mikro piksellli selvari fotodiolar və p-terfenil əsaslı radiasiya detektorları// -Bakı: Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, -2019, cil.21, № 3, -s.37-43.
5. Əhmədov F.I. , Selvari fotodiodların radiasiya davamlılığının öyrənilməsi, //-Bakı: Azerbaijan Journal of Physics, -2019, Vol. 35, №3,- s.7-12
6. Əhmədov F.I, Silisium əsaslı fotoelektron gücləndiricilər// -Bakı: Gənc tədqiqatçı, cil. 5, №2, -2019, -s.5-16
7. Əhmədov F.I, Mikro piksellli selvari fotodiodlar əsasında radiasiya detektorlarının hazırlanması// -Bakı: Gənc tədqiqatçı, cil. 5, №2, -2019, -s.33-43
8. Sadıqov Z .Y. Mikropikselli selvari fotodiodların bərpa olunma müddətinin öyrənilməsi/ Z .Y. Sadıqov, A.A. Dövlətov, N.A. Səfərov [və b.]//Fizika Jurnalı,- Bakı:- 2012, CİLD 18, №1,-s.10-11
9. Sadıqov Z.Y, Yarımkeçirici fotoelektron gücləndirici, İxtira a 2016 0057, Azərbaycan Respublikası / Əhmədov F.İ., Əhmədov Q.S, Sadıqov A.Z [və b.], – 2019.
10. Süleymanov S. Ssintilyatorlu radiasiya detektor modulları üçün yeni gücləndiricilərin işlənməsi/ S.Süleymanov, F.Əhmədov, A.Sadıqov [və b.] // Azərbaycan Milli Elmlər

- Akademiyasının Xəbərləri, Fizika– riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya, - Bakı: -2016, Cild 31, №5, -s.81-85.
- 11.Süleymanov S. Mikropikselli selvari fotodiodlar əsasında yüksək həssaslığı olan qamma-detektor modullarının inşə və onların radiasiya davamlılığı: / (fizika üzrə fəlsəfə doktoru dissertasiyası) / -Bakı, 2016, -145 s.
 - 12.Vəliyev R.V., Vəliyev R.V., Əhmədov F.İ., Sadıqov A.Z., Heydərov N.N., Əhmədov Q. S , Mikropikselli selvari fotodiodların işçi parametrlərinin tədqiqi// Gənclərin Yaradıcı Potensialı Aviakosmik məsələlərin həllində Beynəlxalq elmi-praktiki konfransının “Aviasiya nəqliyyatında təhlükəsizliyi, -Bakı:, -20.., - s. 189-191
 - 13.Абдуллаев Х. И. Кремниевый детектор альфа частиц с низким темновым током/ Х. И. Абдуллаев, Ф. И.Ахмедов, Ахмедов Г.С. [и др] // Azərbaycan hava yolları QSC Milli Aviasiya Akademiyası Elmi məcmuələr, – Bakı: – 2015, cild. 17, № 1, -s. 44-47
 - 14.Акимов Ю.К., Полупроводниковые детекторы ядерных излучений.- Дубна: ОИЯИ, - 2009, -400 с.
 - 15.Акберов Р., Ахмадов Ф., Ахмадов Г., Мадатов Р., Садыгов А., Сулейманов С., Назаров М., Гейдаров Н., Валиев Р., Нуриев И. Разработка зонда для плотностного гамма-гамма картожа// BDU-nin Fizika Problemləri İnstitutunun yaradılmasının 10 illiyinə həsr olunmuş, Opto, nanoelektronika , kondensə olunmuş mühit və yüksək enerjilər fizikası, Beynəlxalq Konfrans, -Baku, -2015, -s. 523-526,
 - 16.Ахмедов Ф.И, Садыгов З.Я, Мадатов Р.С, Кремниевые мульти-пиксельные лавинные фотодиоды и возможные области их применения// XIII Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто и наноэлектронике, - Санкт-Петербург, Россия, -21-25 ноября, -2011, -с. 21
 - 17.Мадатов Р., Акберов Р., Ахмадов Ф., Ахмадов Г., Садыгов А., Сулейманов С., Назаров М., Гейдаров Н., Валиев Р., Нуриев И. Разработка Детектора гамма излучения на основе микропиксельного лавинного фотодиода// Fövqəladə Hallar Nazirliyinin yaradılmasının 10 –liyinə həsr edilmiş “Fövqəladə hallar və

- təhlükəsiz həyat” mövzusunda beynəlxalq elmi-praktik konfrans,- Bakı, -2015, -s. 355-358
- 18.Мачехин Ю.П. Сцинтилляционные Датчики На Основе Трап-Детекторов/ Ю.П. Мачехин , К.А. Лукин, Д.Н. Татьянко //Метрологія, - 2012, -с. 323-326
- 19.Садыгов З. Микроканальный лавинный фотодиод с быстрым временем восстановления параметров/ З. Садыгов, Х. Абдуллаев, Н. Анфимов, Ф.Ахмедов, И.Железных, Р.Мадатов, А. Ольшевский, // Письма в Журнал Технической Физики, -2013, Том,39.вып 11, -с. 7-12
- 20.Садыгов А.З. Исследование Метода Улучшения Быстродействия Микропиксельных Лавинных Фотодиодов/ А.З.Садыгов, Ф.И. Ахмедов, С.С. Сулейманов, Г.С Ахмедов// Azərbaycan hava yolları QSC Milli Aviasiya Akademiyası Elmi məcmuələri, -2018, №1,- s. 27-34
- 21.Садыгов А.З. Процесс изготовления лавинных фотодиодов с поверхностными микропикселями/ А.З. Садыгов, Ф.И. Ахмедов, С.С. Сулейманов, Р.М Мухтаров//Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, -2018. Cıl 10, №3, - s.103-107
- 22.Садыгов А., Ахмедов Ф,Ахмедов Г.,Садыгов З., Сулейманов С., Концепция дозиметра на базе кремниевых фотоумножителей//10-ая Международная конференция Ядерная И Радиационная Физика,- Астана: -2015, -с. 168-169
- 23.Садыгов А., Сулейманов С., Акберов Р., Ахмадов Ф., Ахмадов Г., Изготовление кремниевых фото умножителей и их применение//Fövqəladə Hallar Nazirliyinin yaradılmasının 10 –liyinə həsr edilmiş “Fövqəladə hallar və təhlükəsiz həyat” mövzusunda beynəlxalq elmi-praktik konfrans, - Bakı, -2015, -s. 352-354
- 24.Садыгов З. Я. Полупроводниковый микроканальный детектор с внутренним усилением сигнала, Патент России №,2212733,кл. H01L31/10, Россия/ Железных И, Бокова .Т, Стойков А,-2003.
25. Садыгов З.Я. Лавинный Фотоприемник, №SU (11) 1702831 (13) A1,СССР/ Гасанов А, Головин В, Юсипов Н.-1997
- 26.Abbene L. and Gerardi G., High-rate dead-time corrections in a general purpose digital pulse processing system//J. Synchrotron Rad. , -2015, Vol22, -p. 1190-1201

27. Akimov D Yu, Kozlova E S, Computer modelling of the Hamamatsu R11410-20 PMT//IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. , -2017, Vol 798, -p.1-6
28. Akkurt I., Gunoglu K. and Arda S, Detection Efficiency of NaI(Tl) Detector in 511–1332keV energy range// Science and Technology of Nuclear Installation, - 2014 ,Vol. 14 , - p. 1-5.
29. Akyurek T. GM counter dead time dependence on applied voltage, operating temperature and fatigue/ T.Akyurek, M.Yousaf, X.Liu, Usman S.//Radiation Measurements, -2015,Vol. 73, -p. 26–35
30. Alekhin M.Improvement of gamma-ray energy resolution of LaBr₃:Ce³⁺ scintillation detectors by Sr²⁺ and Ca²⁺ co-doping/ M. Alekhin, I. Khodyuk, K. Kraemer [et.al]// Appl. Phys. Lett., -2013,Vol. 102,- p. 161915-1-4
31. Amol Patil. Dead time and count loss determination for radiation detection systems in high count rate applications:/ Doctoral Dissertations in Nuclear Engineering, - Missouri, 2010.- 279 p.
32. Antich P.P. and Tsyganov E. N. Wide wavelength range high efficiency avalanche light detector with negative feedback, Class:H 01 L 31/06, Patent 5844291 A, US, - 1998.
33. Anwar Kamal, Particle Physics. - Berlin Heidelberg: Springer,- 2014.- 529 p.
34. Ahmadov F. Development of compact radiation detectors based on MAPD photodiodes with lutetium fine silicate and stilbene scintillators/ F.Ahmadov, G.Ahmadov, A.Garibov [et al.] //Journal of Instrumentation, -2015, Vol.10,-p.1-7
35. Ahmadov F. Investigation of radiation effect to micro-channel avalanche photo diode/ F.Ahmadov, Z. Sadygov, R. Madatov [et al.] // Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika– riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya,- Bakı-2011, Vol.31, №5, -s.14-17
36. Ahmadov F., Ahmadov G., Guliyev E., Sadigov A.,Sadygov Z., Suleymanov S., Zerrouk F., New gamma detector module based on new model micro-pixel avalanche photodiode //IWORID-2016,- Spain, -2016,- p.252

37. Ahmadov F. Alpha particle detectors based on micro pixel avalanche photodiodes/ F.Ahmadov, O. Abdinov, G. Ahmadov [et al.]// Physics of Particles and Nuclei Letters, -2013, Vol. 10, №. 7, - p. 778–779
38. Ahmadov F., Ahmadov G., Garibov A., Madatov R., Naghiyev J., Olshevski A., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S., Zerrouk F., Study On possibilities of establishing radiation dosimeters based on silicon micro-pixel avalanche photodiode//The Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research (RAD 2015), -Montenegro, -2015, -p. 383-385
39. Ahmadov F. Investigation of disadvantages of LFS scintillator/ F. Ahmadov, Z.Sadygov, E. Jafarova [et al.]// Journal of Physics, Baku: -2016, Vol 36, №. 5, -p. 20-22
40. Ahmadov F., Ahmadov G., Guliyev E., Madatov R., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S., Zerrouk F. New phoswich detector based on MAPD and LFS& p-terphenyl scintillator//Международная Конференция «Инженерия Сцинтилляционных Материалов и Радиационные Технологии»,– Минск, Беларусь :-29-30 сентября, - 2016,- p. 13
41. Ahmadov F. New alpha particle counter based on micro-pixel avalanche photodiode/ F. Ahmadov, G. Ahmadov, E. Guliyev [et al.] // Journal of Radiation Researches, - 2014, Vol. 1, №1,- p. 33-36.
42. Ahmadov G. Investigation of the performance of alpha particle counting and alpha-gamma discrimination by pulse shape with micro-pixel avalanche photodiode/ G. Ahmadov, Z. Sadygov, E. Jafarova, F.Ahmadov [et al.]// Journal of Physics, Baku: - 2015, Vol.21, №1, -p. 17-18.
43. Ahmadov F. New gamma detector modules based on micropixel avalanche photodiode/ F. Ahmadov, G. Ahmadov, A. Sadigov [et al.]//Journal of Instrumentation, -2017, Vol. 12, №2, -p.1-7
44. Ahmadov F. New phoswich detector based on LFS and p-terphenyl scintillators coupled to micro pixel avalanche photodiode/ F.Ahmadov, F.Abdullayev, G.Ahmadov //Functional Materials, -2017, Vol24(2), -p.341-344

45. Ahmadov F. On iterative model of performance of micropixel avalanche photodiodes/ F. Ahmadov, F. Abdullayev, R. Akberov// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,-2018, Vol.912, -p.287-289.
46. Ahmadov G, Ahmadov F, Nuriyev S., Sadigov A, Sadygov Z, Suleymanov S., A position sensitive alpha particle detector based on a lyso crystal and a micro-pixel avalanche photodiode// 24th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei(ISINN), -Dubna:May 25-28, -2016,- p. 1-6.
47. Ahmadov F., Ahmadov G., Sadygov Z., Sadigov A., Suleymanov S., On iterative model of performance of micropixel avalanche photodiodes//8th International Conference on New Developments in Photodetection, -Tours:- 2-8 July -2017,-p.167
48. Ahmadov G., Akbarov R. , Ahmadov F. , Sadygov A. , Sadygov Z. , Fast Neutron detectors with silicon photomultiplier readouts//PM2018- 14th Pisa Meeting on Advanced Detectors from , -Pisa:- 27 May - 02 June , - 2018, -p.1
49. Ahmadov G, Ahmadov F, Akbarov R, Holik M, Mammadov R, Sadygov Z, Pulse Shape Discrimination Of Gamma-Rays And Fast Neutrons With Silicon Photomultipliers//Academician G Abdullayev Centenary International Conference and School Modern Trends in Condensed Matter, -Baku: -September 24-26,- 2018, - p. 42
50. Ahmadov F, Sadigov A., Ahmadov G., Sadygov Z., Abdullayev F., A new physical model of the performance of avalanche photodiodes with single photoelectron detection//indico.gsi.de/event/6990/session/15/contribution/6/ International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers, -Schwetzingen: -11-15 June, -2018, -p.1
51. Ahmadov F.I. Investigation of silicon photomultiplier at low temperature// -Baku:Azerbaijan Journal of Physics, -2019, Vol. 35, №3, -s.15-19.
52. Ahmadov F., A new physical model of Geiger-mode avalanche photodiodes, F Abdullayev, G. Ahmadov, A. Sadigov, Z.Sadygov, S. Suleymanov//[Journal of Instrumentation](#), -2020, Vol. 15, -p. 1-8

53. Akbarov R. Scintillation light detection with MAPD-3NK and MPPC-S12572-010P readout/R Akbarov, F Ahmadov, G Ahmadov// *KnE Energy & Physics* DOI: 10.18502/ken.v3i1.1767, -s.357-362
54. Baptiste Joly, Gerard Montarou, Pierre-Etienne Vert. Sampling rate and adc resolution requirements in digital front-end electronics for TOF PET//*IEEE Transactions On Nuclear Sciences*, -2017, Vol. 64 , № 9 , -p. 2543 – 2550
55. Beien Wang, Rob Kreuger , Freek J. Beekman. Novel light-guide-PMT geometries to reduce dead edges of a scintillation camera//*Physica Medica*, -2018, Vol.48, -p. 84–90
56. Benato G. , Andrea V., Cattadori C. , Riboldi S. Improvement of the GERDA Ge Detectors Energy Resolution by an Optimized Digital Signal Processing//*Physics Procedia*, -2015, Vol. 61, -p. 673-682
57. Berdnikova A. K. Miniature gamma detector based on inorganic scintillator and SiPM/ A. K. Berdnikova, F. A. Dubinin, V. A. Kantserov // *Journal of Physics: Conference Series*, -2016, Ser 675, -p.1-5
58. Boltruczyk G. Development of MPPC-based detectors for high count rate DT campaigns at JET/ G. Boltruczyk, A. Broslawski, M. Gosk [et al.] // *Fusion Eng. Des.*, -2017, Vol.123,- p. 940-944.
59. Boris Korzh, Tommaso Lunghi, Kateryna Kuzmenko, Afterpulsing studies of low-noise InGaAs/InP singlephoton negative-feedback avalanche diodes//*Journal of Modern Optics*, - 2015, Vol. 62, № 14, -p. 1151–1157
60. Butler A. Measurement of the energy resolution and calibration of hybrid pixel detectors with GaAs:Cr sensor and Timepix readout chip/ A. Butler, P. Butler , S. Bell [et al.] // *Physics of Particles and Nuclei Letters*, -2015, Vol.12, №1, -p. 59–73
61. Campbell M , Havranek V , Heijne E. et. al, Charge collection from proton and alpha particle tracks in silicon pixel detector devices//*Nuclear Science Symposium Conference Record- IEEE . Honolulu, Hawaii:USA*, -2007, C07-10-28 , -p.1047-1050
62. Chen Xu. Influence of X-ray irradiation on the properties of the Hamamatsu silicon photomultiplier S10362-11-050C/ Xu Chen , Klanner Robert , Garutti Erika [et

- al.]/Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, -2014, Vol. 762, - p. 149–161
- 63.Christian Jendrysik.Characterization of the first prototypes of Silicon Photomultipliers with bulk-integrated quench resistor fabricated at MPI/ Jendrysik Christian, Andricek Ladislav, Liemann Gerhard //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,-2013, Vol 718, -p. 262–265
- 64.Claudio Furetta, Pao-Shan Weng, Operational Thermoluminescence Dosimetry: - Singapore: World Scientific Publisher, -1998, -260 p.
- 65.Clarisse Tur, Vladimir Solovyev, Jeremy Flamanc. Temperature characterization of scintillation detectors using solid-state photomultipliers for radiation monitoring applications// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, -2010, Vol. 620, -p. 351–358
- 66.Claus Grupen and Irene Buvat, Handbook of Particle Detection and Imaging, -Berlin: Springer, -2012, -1251 p.
- 67.Crouthamel C., Adams F, Dams R., Applied Gamma-Ray Spectrometry: -New York: Pergamon press, -1970, -749 p.
68. Darek P. Palubiak, Zhiyun Li and M. Jamal Deen, Afterpulsing Characteristics of Free-Running and Time-Gated Single-Photon Avalanche Diodes in 130-nm CMOS //IEEE Transactions On Electron Devices, -2015, Vol. 62, №.11, -p. 3727-3733
- 69.Dinu N., Instrumentation on silicon detectors: from properties characterization to applications, Paris: HAL Université, -2013, -186 p.
- 70.Elif Ebru Ermis,Cuneyt Celiktas, A Method to Reveal ^{137}Cs Gamma Spectrum by a Multi-Pixel Photon Counter// World Journal of Applied Physics , -2017, -p.92-96
- 71.Fabio Acerbi, Giovanni Paternoster, Alberto Gola, Silicon photomultipliers and single-photon avalanche diodes with enhanced NIR detection efficiency at FBK// Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, -2017, Vol.912, -p. 309-314
- 72.Fabio Sauli, Gaseous Radiation Detectors: Fundamentals and Applications. - Cambridge:Cambridge University Press, -2014,-497 p.
- 73.Flyckt S and Marmonier C, Photomultiplier Tube Principle to Application: Photon is our Business First Edition, Published by Hamamatsu Photonics K. , -2002.- 311 p.

74. Gad Shani, Radiation Dosimetry Instrumentation and Methods ,2 Edition, -Florida: CRC Press, -2011, -477 p.
75. George Mitev Mitev, Mityo Georgiev Mitev and Ludmil Todorov Tsankov, An Advanced Method and Circuit for RLC Shaping of NaI(Tl) Scintillation Detector Signals//Annual Journal Of Electronics, -2009, -p. 97-100
76. Gerhard Lutz, Semiconductor Radiation Detectors, -Berlin: Springer, -1999, -351 p.
77. Go Kawata, Keita Sasaki and Ray Hasegawa. Avalanche-area dependence of gain in passive-quenched single-photon avalanche diodes by multiple-photon injection//IEEE Transactions On Electron Devices, -2018, Vol. 65, №.6, -p. 2525-2530
78. Golubeva M, Hadron calorimeter (PSD) with new photo-detectors (MPPC) in NA61 experiment at CERN / M. Golubeva, F. Guber, A. Ivashkin //Journal of Physics: Conf.,-2017, Series 798, -p.1-4
79. Gordon R. Gilmore, Practical Gamma-ray Spectrometry – 2nd Edition,- USA: John Wiley & Sons, Ltd, - 2008, -389 p.
80. Grodzicka M. Characterization of 4x 4 ch MPPC array in scintillation spectrometry/M.Grodzicka, M.Moszyński,S.Korolczuk// Journal of Instrumentation, - 2013, Vol .8 , -p. 1-24
81. Grieve J. A. Correcting for accidental correlations in saturated avalanche photodiodes/ J. A. Grieve, R. Chandrasekara, Z.Tang //Optics Express, -2016, Vol. 24, Issue 4, -p. 3592-3600
82. Gultekin A., Kaynak G., and Gurler O., “Determination of full ” energy peak efficiency of HpGe detector from 59.5 to 1332.5 keV// Indian Journal of Pure and Applied Physics, -2006, Vol. 44, №.4, - p. 281–286
83. Guo Qiang ZENG, Chen Li, Cheng Jun Tan, Digital Logarithmic Airborne Gamma Ray Spectrometer//Chinese Physics C,-2014,Vol. 38, №. 7, -p.1-11
84. Ivan R. Optical crosstalk in single photon avalanche diode arrays: a new complete model / R. Ivan, I. Antonino, S. Roberto //Optics Express,- 2008 ,Vol. 16, №. 12, - p.8381-8394
85. Hamamatsu Photonics <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/type/C12137->

01/index.html

86. Heydarov N, Sadygov Z, Sadigov A, Ahmadov F, Suleymanov S, New silicon photomultiplier with fast output//International Conference “Modern Trends in Physics”, Baku: 20 – 22 April,- 2017, -p.523-526
87. Jafarova E.A. The frequency dependence of micropixel avalanche photodiode capacitance/ E.A Jafarova, Z.Y Sadigov, F.I Akhmedov // ANSA. Journal of Physics, -2014, Vol.20, №.2, -p. 3-5
88. Jafarova E.A. Features of barrier capacitance of micropixel avalanche photodiodes at different frequencies/ E.A Jafarova, Z.Y Sadigov, F.I Ahmedov //Universal Journal of Physics and Application 10(1),- 2016, -p.1-4
89. James E. Turner, Interaction of ionizing radiation with matter// Health Physics , - 2004, Vol. 86, №.3, -p.228-252
90. Jarek Glodo, Urmila Shirwadkar, Rastgo Hawrami, Fast Neutron Detection With CsLiYCl// IEEE Transactions On Nuclear Science,- 2013, Vol. 60, №.2, - p.864-870
91. Jennifer Prekeges, Scintillation Detectors. -Washington: Jones and Bartlett Publishers, -2013, -376 p.
92. Jiali Jiang. Recovery Time of Silicon Photomultiplier with Epitaxial Quenching Resistors/ Jiang Jiali, Jia Jianquan, Zhao Tianqi // Instruments, -2017, Voll, -p.2-8
93. Kapoor .S, Ramamurthy V, Nuclear Radiation Detectors.-New Delhi: New Age International Press,-1993, -237 p.
94. Kebbati Y., Ndaw A., Improvement of The ADC Resolution Based on FPGA Implementation of Interpolating Algorithm//International Journal of New Technology and Research (IJNTR), -2016, Vol.2, Issue-1, -p. 100-103
95. Kenneth J., Richard E. Faw, Fundamentals of Nuclear Science and Engineering Second Edition.-New York: CRC Press, -2007,- 506 p.
96. Kenneth Krane, Introductory Nuclear Physics.-New York: John Wiley & Sons, Ltd , - 1988, -858 p.
97. Olive K.A. Review of Particle Physics/ K Olive, K Agashe, C. Amsler//Chinese Physics C, -2014, Vol. 38, №. 9 , -p. 1-1676

- 98.Knappe C.Investigation and compensation of the nonlinear response in photomultiplier tubes for quantitative single-shot measurements/ C. Knappe, J.Lindén, Nada F Abou [et al.] //Review Of Scientific Instruments, -2012,Vol. 83, -p. 034901-1-8
- 99.Knoll G. F. Radiation Detection and Measurement 3rd edition. -USA: Wiley Publishers., -2000, -802 p.
- 100.Kitahara T.Rise-time discrimination between heavy ions and alpha particles with semiconductor detectors/ T.Kitahara, H. Geissel, S. Hofmann//Nuclear Instruments and Methods, -1980, Vol. 178, №.1, -p. 201-204
- 101.Ki Young Kim , Advances in Optical and Photonic Devices.- London: INTECH, - 2010, -352 p.
- 102.Krzysztof Iniewski, Electronics for Radiation Detection.-New York:CRC Press, - 2010, -361 p
- 103.Kushpil V.Radiation hardness of semiconductor avalanche detectors for calorimeters in future HEP experiments/ V. Kushpil, V. Mikhaylov, A. Kugler // Journal of Physics: Conference Series 675 012039, -2016, -p 1-6
- 104.Lamoureux M., Charles P., General deconvolution of thin-target and thick target Bremsstrahlung spectra to determine electron energy distributions// Rad. Phys. Chem. Vol.75 , -2006, -p 1220–1231
- 105.Lecoq Paul. Inorganic Scintillators for Detector Systems Physical Principles and Crystal Engineering/ Paul Lecoq, Alexander Annenkov, Alexander Gektin [et al.].- Berlin: Springer,- 2006, -251 p
- 106.Leroy C. and Rancoita P.-G., Silicon Solid State Devices and Radiation Detection.- Singapore: World Scientific Publishing Co.,-2012, -430p.
- 107.Levinshtein M. Breakdown Phenomen in Semiconductors and semiconductor devices.- Singapore :World Scientific Publishing, -2005, -223 p
- 108.Lin Chen .Simulation of the electron collection efficiency of a PMT based on the MCP coated with high secondary yield material/ Chen Lin , Tian Jinshou, Zhao

- Tianchi [et al] //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, - 2016, Vol. 835, -p 94–98
- 109.Lubsandorzhiev B.K., On the history of photomultiplier tube invention// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, -2006, Vol. 567, -p. 236–238
- 110.Marc Diepold. Improved x-ray detection and particle identification with avalanche photodiodes / Diepold Marc, M. P. Luis Fernandes, Machado Jorge [et al.] // Review Of Scientific Instruments, -2015, Vol. 86, Issue 5, -p. 053102 -1-6
- 111.Marcia Dutra R. Silva. Ionizing Radiation Detectors //Evolution of Ionizing Radiation Research, -2015, C-8, -p. 189-209
- 112.Mario Stipcevic, Daqing Wang and Rupert Ursin. Characterization of a Commercially Available Large Area, High Detection Efficiency Single-Photon Avalanche Diode//Journal of Light wave Technology, -2013, Vol. 31, №. 23, -p. 3591-3596
- 113.Mark Abbott Foster. Silicon Photomultipliers in Radiation Sensing Applications: /(Thesis for the degree of Doctor of Philosophy)/, -SOUTHAMPTON , 2010, -173 p.
- 114.Matsubara T. Radiation damage of MPPC by γ -ray irradiation with Co-60/ T. Matsubara, H. Tanaka, K. Nitta // Proceedings of Science (PD07)032, 2007.
- 115.Max Ghelman. Sub-milliwatt spectroscopic personal radiation device based on a silicon photomultiplier/Ghelman Max, Paperno Eugene, Ginsburg Dimitry // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, -2011, Vol.652, -p. 866–869
- 116.Max Ludwig Knoetig, Jürgen Hose, SiPM Avalanche size and crosstalk measurements with light emission microscopy//IEEE Transactions On Nuclear Science, -2014, Vol. 61, №. 3, -p. 1488-1492
- 117.Charles Baily. Early Atomic Models – From Mechanical to Quantum (1904-1913// The European Physical Journal H, -2012, Vol. 38, №.1, -p 1-38.
- 118.McKeever S. W. S. Thermoluminescence of solids. -Cambridge: Cambridge University Press, -1985, -376 p.

119. Meier Hektor Josef. Design, characterization and simulation of avalanche photodiodes: / (Doctor of Sciences Thesis) / -Germany, 2011, -203 p.
120. Milbrath B.D. Radiation detector materials: An overview/ B.D Milbrath, A. JPeurrung, M. Bliss // Journal of Materials Research, -2008, Vol. 23, Issue 10, - p. 2561-2581
121. Miyamoto H., Calibration and characterization of photomultiplier tubes of the IceCube neutrino detector// Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conferenc,- Pune: -2005, -p.63-66
122. Mohd Azlishah Othman, Siti Nabilah Taib, Mohd Nor Husain. Reviews on avalanche photodiode for optical communication technology// ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, -2014, Vol. 9, №. 1, -p.34-45
123. Mohd Zain Rasif . CdTe/CdZnTe pixellated radiation detector: / (Degree of Doctor of Philosophy Thesis) /, - Glasgow ,2015, -188 p.
124. Moriah Tobin, Simulating Fast Timing Cherenkov Detectors, Fermi National Accelerator Laboratory, -2010, -p.1-15
125. Murugesan R . Apllied Physics Paper I & II.- New Delhi: S. Chand Publishing, - 2005, -340 p.
126. Musienko Y., Reucroft S., Swain J. The gain, photon detection efficiency and excess noise factor of multi-pixel Geiger-mode avalanche photodiodes// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, -2006, -Vol. 567, -p. 57-61,
127. Nakamori T. Development of a gamma-ray imager using a large area monolithic 4×4 MPPC array for a future PETscanner/ T. Nakamori, T. Kato, J. Kataoka [et al.] // JINST. -2012. Vol. 7 .C01083. -p. 1-15.
128. Nakamori T., Kurei Y., Takeuchi K, Saito T., Kawabata N and Kokubun M., Development of radiation-hardened multi pixel photon counters// 33RD International Cosmic Ray Conference, The Astroparticle Physics Conference, -Rio De Janeiro, - 2013, -p.1-4

129. Nassalski A. Multi Pixel Photon Counters (MPPC) as an Alternative to APD in PET Applications / A. Nassalski, M. Moszyn'ski, Ka'zuch Syntfeld [et al] // IEEE Transactions On Nuclear Science, -2010, Vol. 57, №. 3, -p.1008-1014
130. Nicola D'Ascenzo, Garutti E., Goettlich M., Schultz-Coulon H., Tadday A., The direct read-out of organic and inorganic scintillators with the Multi Pixel Photon Counter, // DESY 08-047, 2008, arxiv.org/abs/0805.0525
131. Nicholas E. Destefano. Design, Construction, and Optimization of the Energy Resolution of a Xenon TPC Detector: /(Doctrol Dissertation)/-Mansfield, 2015,- p 187
132. Nicholas Tsoulfanidis, Sheldon Landsberger. Measurement and Detection of Radiation, Fourth Edition-New York: CRC Press, -2015, -606 p.
133. Nicholas Tsoulfanidis and Sheldon Landsberger, Measurement and Detection of Radiation, Third Edition-New York: CRC Press, -2010, -452 p.
134. Nuriyev S. Performance of a new generation of micropixel avalanche photodiodes with high pixel density and high photon detection efficiency/ S. Nuriyev, F. Ahmadov, R. Akberov [et al] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, -2018, Vol. 912, -p.320-322.
135. Oberhofer M., Scharmman A., Techniques and Management of Personnel Thermoluminescence Dosimetry Services. -Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, -1993, -441 p.
136. Omanwar S.K., Koparkar K.A. , Hardev S. Recent Advances and Opportunities in TLD Materials//Defect and Diffusion Forum , -2013, Vol. 347, -p.75-110
137. Pagano R. Radiation hardness of silicon photomultipliers under ^{60}Co γ -ray irradiation/ R. Pagano, S. Lombardo, F Palumbo [et al.]//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, -2014, Vol. 767, -p.347-352

138. Paul A. Jursinic. Characterization of optically stimulated luminescent dosimeters, OSLDs, for clinical dosimetric measurements // *Medical Physics*, -2007, Vol. 34, №.12, -p. 4594-4604
139. Payne S. Nonproportionality of scintillator detectors: Theory and experiment/ S. Payne, W. Moses, S. Sheets [et al]// *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, -2011, Vol. 58, №. 6, -p. 3392–3402.
140. Peter F. Bloser. Scintillator gamma-ray detectors with silicon photomultiplier readouts for high-energy astronomy/ F. Peter Bloser, L. Jason, B. Christopher // *Proceedings of SPIE*, -2013, Vol. 8859, -p. 1-8
141. Petriska. M, Sojak S and Slugen V. Positron lifetime setup based on DRS4 evaluation board // *Journal of Physics*, -2014, Series 505, -p. 1-4
142. Pickering J., Analogue to Digital and Digital to Analogue Converters (ADCs and DACs): A Review Update, Published by CERN in the Proceedings of the CAS-CERN Accelerator School: Power Converters, Baden, Switzerland, CERN-2015-003 (CERN, Geneva, 2015, p. 363-377
143. Pleli, I. Nuclear Fusion Programme: Annual Report of the Association Karlsruhe Institute of Technology. -Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, -2013, -560 p
144. Poggiani Rosa. High Energy Astrophysical Techniques. –Berlin: Springer International Publishing, -2017, -166 p.
145. Prasanna. G and Jayapandian. J. An embedded read-out for GM counter // *Int. J. Instrumentation Technology*, -2014, Vol. 1, №. 3, -p. 229-240
146. Renker D. Properties of avalanche photodiodes for applications in high energy physics, astrophysics and medical imaging // *Nucl. Instrum. Meth. A*, -2002, Vol. 486, -p. 164-169.
147. Renker D. Photosensors// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* . - 2004, Vol. 527, -p. 15–20
148. Renker D. Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems// *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* , -2006, Vol. 567 , -p. 48–56
149. Renker D and Lorenz E. Advances in solid state photon detectors// *Journal of Instrumentation*, -2009, Vol. 4, -p. 1-53

150. Richard A. Myers. APD imaging probe for tritium surface contamination/ Myers Richard A., Farrell Richard, Robertson Frank [et al] // SPIE Proceedings, -2008, Vol. 7080, -p.1-11
151. Rizzi M., Aloia D` and Castagnolo B. Semiconductor Detectors and Principles of Radiation-matter Interaction// Journal of Applied Sciences, -2010, Vol.10, -p.3141-3155
152. Robert G. W. Brown, Kevin D. Ridley, and John G. Rarity. Characterization of silicon avalanche photodiodes for photon correlation measurements: Passive quenching//Applied Optics,-1986, Vol. 25, Issue 22, -p. 4122-4126
153. Ru Yang. Effects of isolation trench depth on bulk integrated quenching resistors and breakdown voltage of the silicon photomultiplier with bulk integrated quenching resistors/ Yang Ru, Tan Hesheng, Liu Rongdan [et al] // Proc. of SPIE, -2016, Vol. 10255, -p. 102554B-1-6
154. Sadigov A. Performance of a new photodetector for ionizing radiation/ A. Sadigov, S. Suleymanov, F.Ahmadov [et al] // Journal of Radiation Researches, -2015, Vol 2, №. 2, -p. 16-20.
155. Sadigov A., Ahmadov F., Suleymanov S., Ahmadov G., Preparation of a new generation of radiation dosimetr based on micro-pixel avalanche photodiodes// Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının 70 illiyinə həsr olunmuş multidissiplinar forum, - Bakı: -02-04 Noyabr, -2015, -s. 49-50.
156. Sadigov A. Micropixel avalanche phototransistor for time of flight measurements/ A. Sadigov, F. Ahmadov, G. Ahmadov [et al]// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, -2017, Vol 845, -p. 621-622
157. Sadigov A. An Iterative Model of Performance of Micropixel Avalanche Photodiodes/ A. Sadigov, F. Ahmadov, S. Suleymanov [et al]//International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS), -2016, Vol.3, № 2, - p.9-19,
158. Sadigov A. A new detector concept for silicon photomultipliers/ A. Sadigov, F. Ahmadov, G. Ahmadov [et al]// Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, -2016, Vol. 824, -p.135–136

159. Sadygov A., Ahmadov F., Ahmadov G, Sadygov Z, New Micropixel Avalanche Photon Detector with Fast Response - <https://indico.gsi.de/event/6990/session/15/contribution/8> // International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers, -Schwetzingen:- 11-15 June, -2018, p.1
160. Sadygov Z. Three advanced designs of micro-pixel avalanche photodiodes: Their present status, maximum possibilities and limitations / Z. Sadygov, O. Olshevski, I. Chirikov [et al]// Nucl. Instrum. Meth. A,-2006,Vol. 567,-p. 70-73
161. Sadygov Z. Development of scintillation detectors based on micro-pixels avalanche photodiodes/ Z. Sadygov, F. Ahmadov, R. Madatov [et al] //Proceedings of Science, - 2012, Vol.158, -p. 1-6. (doi.org/10.22323/1.158.0037)
162. Sadygov Z. Multi-Pixel Avalanche Photodiode, Patent No. WO2015022580A3, USA/ Sadygov A,- 2015.
163. Sadygov Z. On features of potential distribution in avalanche photodiodes with deeply buried pixels/ Z. Sadygov, E. Jafarova, A. Dovlatov [et al] //Journal of Physicst, -2013, Vol.19, №.2, -p.17-19
164. Sadygov Z. Technology of Manufacturing Micropixel Avalanche Photodiodes and a Compact Matrix on Their Basis/ Z.Sadygov, F.Ahmadov , A. Sadygov [et al.]//Physics of Particles and Nuclei Letters, -2013,Vol. 10, №. 7, -p. 780–782.
165. Sadygov Z. Ya. Super-sensitive avalanche silicon photodiode with surface transfer of charge carriers / Z. Ya. Sadygov, V.N. Jejer, Yu.V. Musienko [et al.] // Nucl. Instr. and Meth. A, -2003, Vol. 504, -p. 301-303
166. Sadygov Z. A new method to improve multiplication factor in micro-pixel avalanche photodiodes with high pixel density/Z.Sadygov, F. Ahmadov, G. Ahmadov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section,- 2016, Vol.824,- p.137–138.
167. Sadygov Z. Y., Microchannel Avalanche Photodiode, Patent No. US 8742543 B2, USA/Zerrouk Fauzi,-2014

168. Samat S. , Priharti W. Determination of Fano Factor and Pre-amplifier noise from the measurement of energy resolution of a HPGe detector// *Sains Malaysiana* , -2015, Vol.44, №5, -p.761-764.
- 169.Sergei Dolinsky, Geng Fu, and Adrian Ivan. Timing Resolution Performance Comparison for Fast and Standard Outputs of SensLSiPM// *IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging*. Seoul, South Korea, -2013, -p.1-5
- 170.Seitz B., Campos N. and Stewart A., Energy. Resolution and Temperature Dependence of Ce:GAGG Coupled to 3mm _ 3mm Silicon Photomultipliers// *IEEE Transactions on Nuclear Science*, -2016, Vol.63 , Issue. 2 ,-p. 503-508
- 171.Shadi Salem. Measurement and simulation of the segmented Germanium-Detector's Efficiency// *Results in Physics*, -2017, Vol.7, -p.1040–1043
- 172.Smith D. Terrestrial Gamma-Ray Flashes Observed up to 20 MeV/ D. Smith, L. Lopez, R. Lin // *Science*, -2005, Vol. 307, Issue 5712,- pp. 1085-1088 -p. 1085–1088.
- 173.Stefaan Tavernier. *Radiation Detectors for Medical Applications.*/ Tavernier Stefaan , Gektin Alexander , Grinyov Boris- Netherlands:Springer,-2006, -315 p
174. Stefano Del Sordo.Progress in the Development of CdTe and CdZnTe Semiconductor Radiation Detectors for Astrophysical and Medical Applications/ Sordo Stefano Del, Abbene Leonardo, Caroli Ezio [et al]// *Sensors*,- 2009, Vol.9, -p. 3491-3526
- 175.Streetman B. G. and Banerjee S. *Solid State Electronic Devices*, 5-th edition,-USA: Prentice Hall, -2000, -558 p.
- 176.Steven A. Milinković, Asim E. Sadibašić and Olga S. Milanko. An ionization chamber as a gas sensor: theory of operation // *AnalyticaChimicaActa*, -1994, Vol. 294, Issue 3,-p. 283-289
- 177.Stewart A .Study of the Properties of New SPM Detectors/ A. Stewart , O'Sullivan Greene- E, D. Herbert [et al.] // *Proc. of SPIE*, -2006, Vol. 6119,- p.1-10

178. Sucbei Moon and Dug Young Kim. Analog single-photon counter for high-speed scanning microscopy //Methods of single-molecule fluorescence spectroscopy and microscopy Rev. Sci. Instrum, -2003, Vol. 74, -p. 12-25
179. Suleymanov S., Sadygov A., Ahmadov F., Ahmadov G., Sadigov A., et. al. Preparation of detector for gamma-gamma logging facility//The 70th anniversary of Azerbaijan National Academy of Sciences, -Baku, -2015, -p.54-55
180. Syed Naeem Ahmed. Physics and Engineering of Radiation Detection, Second Edition-London: ELSEVIER, -2015, -789 p.
181. Szczeńniak T., Kapusta M., Moszyński M. MPPC Arrays in PET Detectors With LSO and BGO Scintillators//EEE Transactions On Nuclear Science, -2013, Vol. 60, №.3, -p. 1533-1540
182. Sze S.M. and Kwok K. Ng. Physics of Semiconductor Devices. -New Jersey :John Wiley & Sons, Inc, - 2006, -815 p
183. Tapan K. Gupta. Radiation, Ionization, and Detection in Nuclear Medicine. - Netherlands: Springer, -2013, -501 p.
184. Timmers H, Ophel T., Elliman R.G. Improved designs of gas ionization detectors used for elastic recoil detection//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, -1999, Vol. 156, Issues 1–4, -p. 236–243
185. Tsujikawa T. Performance of the latest MPPCs with reduced dark counts and improved photon detection efficiency/ T.Tsujikaw, H Funamoto, T.Fujita //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, -2014, Vol. 765, -p. 247–251
186. Valentina Lozza. Low Energy Low Background Photon Counter for WISP Search Experiments :(PhD in Physics Thesis)/ -Trieste, 2009, -154 p.
187. Walt Jung, Op Amp applications handbook, – Amsterdam: Elsevier, - 2004, -895 p.
188. Waqas Ahmada. Simulation and Characterization of PIN Photodiode for Photonic Applications/ Ahmada Waqas, Umair Muhammad Ali, Laxmi Vijay [et al]//Asian Journal of Nanoscience and Materials, -2018, Vol.1, Issue 3, -p. 122-134.
189. Wêgrzecka I. Design and properties of silicon avalanche photodiode/ I. Wêgrzecka, M.Wêgrzecki, M.Grynblas [et al] //Opto-Electronics Review, -2004, Vol.12(1), -p.95–104.

190. Weijers T.A systematic study of the pulse height deficit in propane-filled gas ionization detectors /T.Weijers, R.Ophel, H.Timmers [et al]//Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, -2002, Vol. 483, Issue 3, - p. 676–688.
191. Wright D. N., Marstein E. S. and Arve Holt. Double Layer Anti-Reflective Coatings For Silicon Solar Cells// Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Thirty-first IEEE, Lake Buena Vista, FL, USA, -2005, -p.1237-1240
192. Xiaowei Ma, Jing Wang and Zhen Cheng. Cerenkov radiation: a multi-functional approach for biological sciences// Frontiers in Physics Biomedical Physics, -2014, Vol. 2, Article 4,-p.1-14
193. Yafeng Guan. Photomultiplier Tubes in Biosensors//Biosensors and Biodetection,-2009, Vol. 503, -p. 375-387
194. Yang Hai-Bo. Application of the DRS4 Chip for GHz Waveform Digitizing Circuit / Yang Hai-Bo, Su Hong, Kong Jie [et.al], Chen Jin-Da, Du Cheng-Ming and Zhang Jing-Zhe//Chinese Physics C,-Chine, -2015, Vol.39, №5, -p.1-7
195. Younghak Kim , Taewoong Lee, Wonho Lee. Radiation measurement and imaging using 3D position sensitive pixelated CZT detector// Nuclear Engineering and Technology, -2019, Vol. 51, -p.1417-1427
196. Zane W. Bell and Lynn A. Boatner. Neutron Detection via the Cherenkov Effect// IEEE Transactions On Nuclear Science, -2010, Vol. 57, №. 6, -p.3800-3806
197. Ivanov A.A , Knurenko S P and Sleptsov I. Ye, Measuring extensive air showers with Cherenkov light detectors of the Yakutsk array: the energy spectrum of cosmic rays//New Journal of Physics, -2009, Vol. 11, -p. 1-31
198. Zeng Weihua. The Design of Digital Multi-channel Analyzer Based on FPGA// Energy Procedia, -2013 ,Vol.39, -p. 428 – 433
199. Zheng Ji-Yuan. A GaN p-i-p-i-n Ultraviolet Avalanche Photodiode/ Yuan Zheng Ji-, Lai Wang, Zhi-Biao Hao //CHIN. PHYS. LETT,-2012, Vol.29, №. 9, -p. 097804-1-3.
200. Zychor I. High performance detectors for upgraded gamma ray diagnostics for JET DT campaigns/ I Zychor, G Boltruczyk, A Burakowska [et al] // Royal Swedish Academy of Sciences, Phys. Scr., -2016, Vol.91, -p.1-10

ŞƏRTİ İŞARƏLƏRİN SİYAHISI

V_{br} -deşilmə gərginliyi

V_{app} – tətbiq edilən gərginlik

ΔU_p -piksəllə düşən ifrat gərginlik

V_{in} -giriş gərginliyi

V_{out} -çıxışgərginliyi

σ_z - effektiv kəsik

σ -standart kənara çıxma

Z -mühitin atom sıra nömrəsi

r_e -klasik elektron radiusu

E_i -düşən zərrəciyin enerjisi

E_m - elektrik sahəsinin maksimum qiyməti

E_g -qadağan olunmuş zonanın eni

ε - elektron-deşik cütü yaratmaq üçün lazım olan enerji

N_S -buraxılan ssintilyasiya fotonlarının sayı

N_D –donor mərkəzlərin konsentrasiyası

N_A - akseptor mərkəzlərinin konsentrasiyası

N_B -zəif oblastın konsentrasiyası

n_i - məxsusi keçiriciliyin konsentrasiyası

N -ümumi hadisələrin sayı

N_{ped} -pedestaldakı hadisələrin sayı

k -Bolsman sabiti

h -Plank sabiti

$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

c -ışıq sürəti ($\sim 3 \times 10^8 \text{ m/san}$)

T -temperatur

I_{dreyf} -dreyf cərəyanı

I_{diff} -diffuziya cərəyanı

I_{gener} -generasiya cərəyanı
 $I_{\text{av p. cur}}$ - gücləndirilmiş fotocərəyanın qiyməti
 $I_{\text{p. cur}}$ – fotocərəyan
 W -fəza yüklər oblastının eni
 μ_n -elektronların yürüklüyü
 μ_p –deşiklərin yürüklüyü
 μ -fotoelektronların orta sayı
 ν -fotonun tezliyi
 λ -düşən fotonun dalğa uzunluğu
 R_q - selvari prosesi söndürən müqavimət
 R_s - həcmi yüklər oblastının müqaviməti
 ρ - xüsusi müqavimət
 C_d - diodun tutumu
 C_{pik} -pikselin tutumu
 C_{ef} -pikselin effektiv tutumu
 FEG-foto elektron gücləndirici
 MSFD- mikro-pikselli selvari fotodiod
 MPPC- Multi Pixel Photo Counter
 HRSF- Heyger Rejimli Selvari Fotodiodlar
 SPAD-Single Photon Avalanche Photodiode
 TES-tək elementli selvari fotodiod
 VAX-volt amper xarakteristikası
 VFX-volt farad xarakteristikası
 FQE- fotonqeydetmə effektivliyi
 QE-kvant effektivliyi
 Gİ-gecikən impuls
 ÇG-çarpaz görüş
 QS- qaranlıq say
 ƏG-əməliyyat gücləndiricisi
 G-gücləndiricilərin gücləndirmə əmsalı

- ARÇ- analoq rəqəm çevirici
XII -xətti inteqrallayıcı interval
İGİ-inteqrallayıcı giriş intervalı
YB-yükün boşalması
İG- inteqrallayıcı generator
II -inteqrallayıcı intervalı
RS- rəqəmsal siqnal
YQ -yaddaş qurğusu
TKA-tək kanallı analizator
MKA-çox kanallı analizator
İY-İşıq yönəldici
LFS- Lutetium Fine Silicate
Naİ-Natrium yod ssintilyatoru
MHYE- siqnalın maksimum hündürlüyünün yarım eni