

AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASI

Əlyazması hüququnda

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

İxtisas: 2225.01- Radiasiya materialşünaslığı

Elm sahəsi: Fizika

İddiaçı: **Fərid İbrahim oğlu Əhmədov**

Elmlər doktoru dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı-2021

Dissertasiya işi Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Radiasiya Problemləri İnstitutunda yerinə yetirilmişdir.

Elmi məsləhətçi: Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru
Zirəddin Yaqub oğlu Sadıqov

Rəsmi opponentlər: AMEA-nın müxbir üzvü
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Səlimə İbrahim qızı Mehdiyeva
Fizika elmləri doktoru, professor
Adil Polad oğlu Abdullayev
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Rəna Cümşüd qızı Qasımova
Fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Musavər Abdusalam oğlu Musayev

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Ali Attestasiya Komissiyasının AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya şurası

Dissertasiya şurasının sədri:

AMEA-nın müxbir üzvü
fizika-riyaziyyat elmləri doktoru, professor
Oqtay Əbil oğlu Səmədov

Dissertasiya şurasının elmi katibi:

fizika üzrə fəlsəfə doktoru
Müslüm Əhməd oğlu Məmmədov

Elmi seminarın sədri:

fizika elmləri doktoru, dosent
Mətanət Əhməd qızı Mehrabova

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

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, nüvə daxili prosesləri düzgün analiz etməyə imkan verir. Yarımkəçirici əsaslı detektorların qiymətcə baha başa gəlməsi, aşağı temperaturlarda işləməsi və radiasiya davamlığının aşağı olması onların geniş tətbiqi üçün problemlər yaradır. Ona görə də ssintilyator və fotoqəbuledici əsaslı müxtəlif növ detektorlar geniş tətbiq edilir. Bununla yanaşı, ssintilyator əsaslı detektorlarda fotoqəbuledici kimi istifadə olunan vakuum fotoelektron gücləndiriciləri (FEG) bu tip detektorlar üçün də bir sıra problemlər yaradır. Vakuum fotoelektron gücləndiricilərinin (FEG) kompakt olmaması, yüksək gərginlikdə işləməsi, foton qeydetmə effektivliyinin kiçik olması, maqnit sahəsinə həssas olması və zərbəyə davamsız olması yüksək effektivli və portativ ssintilyatorlu radiasiya sayğaclarının və spektrometrlərinin yaradılmasına imkan vermir. Hazırda yeni ssintilyatorlu radiasiya sayğaclarının və spektrometrlərinin yaradılması üçün yarımkəçirici əsaslı fotoelektron gücləndiriciləri – normal rejimli selvari fotodiodlar və Heyger rejimli mikropikselli selvari fotodiodlar (MSFD) geniş tətbiq edilir. Bu selvari fotodiodlardan MSFD tipli fotodiodlar portativ və yüksək effektivli ssintilyator əsaslı sayğaclarının və spektrometrlərinin hazırlanması üçün ən optimal qeydedici hesab edilir. Lakin, müxtəlif şirkətlər tərəfindən istehsal olunan MSFD fotodiodlarda piksel sıxlığının və foton qeydetmə effektivliyinin (FQE-nin) kiçik olması bunların geniş tətbiq olunmasına imkan vermir. Məhz bu məqsədlə yeni ssintilyator detektorlarının yaradılması üçün yeni nəsil MSFD fotodiodların işlənməsi böyük maraq kəsb edir. Bunun üçün MSFD-lərin işləmə mexanizminin dərinədən öyrənilməsi, onun fiziki xassələrinin temperaturdan,

şüalanma dozasından 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 iş impuls formasına görə ayırd etmə metodundan istifadə edilmişdir.

Müdafiəyə çıxarılan əsas elmi müddəalar aşağıdakılardan ibarətdir:

1. Dərin pikselli MSFD fotodiodların qoruyucu stop-kanalını və pikselin ölçüsünü təkmilləşdirərək yeni selvari fotoqəbuledicinin işlənməsi və sınaqdan keçirilməsi.
2. Səthi pikselli 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 pikselli 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 yeniliklər aşağıdakılardan ibarətdir:

- MSFD tipli fotoqəbulediciləri 1,17 MeV– 1,33 MeV enerjili qamma şüaları ilə 250 kQr dozaya qədər şüalandırıldıqdan sonra fotodiodun qaranlıq cərəyanı düz və tərs istiqamətdə xətti olaraq artır;
- MSFD fotodiodların deşilmə 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 artırıdıqda deşilmə 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 fotodiodların deşilmə gərginliyi sabiti 61 mV olmuş, MPPC fotodiodlarına nisbətən deşilmə 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 626 keV olan monoenergetik 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 662 keV enerjili qamma şüaların və 626 keV 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 26,3 keV–1,33 MeV enerji intervalında həssaslığı tədqiq edilmiş və 662 keV enerjili qamma şüası üçün MSFD-3NK fotodiodu əsasında hazırlanmış detektor analoquna nisbətən 34 % daha kiçik enerji ayırd etməsi 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 qeyd etmə 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 qeyd etmə effektivliyini artırmaq və maya dəyərini aşağı salmaq mümkün olmuşdur. MSFD fotodiodların parametrlərinin təkmilləşdirilməsi üçün pikselin radiusunun, fon konsentrasiyasının və antiqaytarıcının 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 kalibrəmə 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 Международная Конференция «Инженерия Сцинтилляционных Материалов и Радиационные Технологии» (2016, Minsk-Belarusiya), International Workshop on Radiation Imaging Detectors, iWoRID-2016 (2016, Barcelona-Spain), Third International Conference on Radiation and Applications in Various Fields of Research, (2015, Montenegro), International Conference on the Advancement of Silicon photomultipliers (2018, Switziqer-Germany), 8-th international conference “New developments in Photodetection” (2017, Tours-France), International Scientific Forum “Nuclear Science and Technologies (2018, Kazakhstan), 12th International «Hiroshima” Symposium on the Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors (2019, Hiroshima-Japan) 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, digərlərinin 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 titul səhifəsi-1 səhifə, mündəricat- 2 səhifə (2801 işarə), giriş- 8 səhifə (14531 işarə), 1-ci fəsil- 65 səhifə (132632 işarə), 2-ci fəsil- 22 səhifə (38622 işarə), 3-cü fəsil- 54 səhifə (87145 işarə),4-cü fəsil- 43səhifə (69979 işarə), 5-ci fəsil- 44səhifə (66589 işarə), 6-cı fəsil- 25 səhifə (40062 işarə), əsas nəticələr-2 səhifə (3162 işarə), dissertasiyanın əsas nəticələri üzrə çap olunmuş işlərin siyahısı-3 səhifə (5187 işarə) və 200 adda istifadə edilən ədəbiyyat siyahısı- 20 səhifə (38515 işarə) və şərti işarələrin siyahısı- 3 səhifə (2028 işarə) olmaqla ümumilikdə 297 səhifədən, o cümlədən 196 kompüter çap səhifəsi (437484 işarə), 119 şəkil və 3 cədvəldən ibarətdir. Dissertasiyada mövcud olan ümumi işarələrin həcmi 501253.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin aktuallığı, məqsədin formalaşdırılması və əsas tapşırıqlar, elmi nəticələrin yenilikləri, işin təcrübi əhəmiyyəti göstərilmişdir. Burada həmçinin müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar, təqdim edilən işlərin siyahısı göstərilməklə yanaşı fəsilərin məzmunu qısa şəkildə şərh olunmuşdur.

Birinci fəsildə ionlaşdırıcı zərrəciklərin və qamma şüaların mühitlə qarşılıqlı təsir mexanizmi radiasiya qeydedici detektorlar və onları xarakterizə edən parametrlər haqqında məlumat verilmişdir. Dissertasiyanın əsas tədqiqat obyektlərindən biri olan fotoelektron gücləndirici və fotodiodlar əsasında hazırlanmış ssintilyator detektorları və onların mövcud olan problemlərinə geniş yer verilmişdir. MSFD fotodiodların mövcud analoqları və onları xarakterizə edən parametrlər haqqında məlumat verilmişdir. Fəsilin sonunda Yaponiyanın, Almaniyanın və İrlandiyanın istehsalı olan MSFD fotodiodlar əsasında hazırlanmış qamma detektorlarının əksəriyyətinin hətta 662 keV enerji intervalında öz xəttliyindən çıxdığı göstərilmişdir. Bu çətinliyin aradan qaldırılması üçün çox elementli matrislərdən istifadə edilmə təklif edilmişdir. Lakin bu təklif, detektorun qiymətinin dəfələrlə artmasına səbəb olur. Bu fotodiodlar əsasında hazırlanmış detektorların digər bir problemi yuxarı enerji ayırdetməsinə malik olmasıdır. Bu isə birbaşa MSFD

fotodiodların FQE-sinin kiçik olması ilə bağlı olmuşdur. Beləliklə, yeni hazırlanacaq qamma spektrometrlərdə istifadə ediləcək MSFD fotodiodlar üçün əsas şərtlər olaraq yüksək piksel sıxlığı, yüksək FQE-ye və radiasiyaya davamlı olması hesab olunur.

İkinci fəsildə təcrübələrdə istifadə edilən müxtəlif tip MSFD fotodiodların parametrlərini: gücləndirmə əmsalını, kvant effektivliyini, xəttilyini, qaranlıq sayı, gecikən impulsları, FQE-sini, küy əmsalını, piksellərin tutumunu, işləmə gərginliyini, qaranlıq cərəyanını, siqnalın formasını və müxtəlif növ ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorların qeydetmə həssaslığını ölçmək üçün istifadə edilən təcrübi dövrə yığılmışdır. Təcrübələrdə qeydedilən siqnalın impuls enindən asılı olaraq iki tip analoq rəqəm çeviricisindən istifadə edilmişdir. İstifadə edilmiş çeviricilərin parametrləri təcrübi olaraq təyin edilmiş və onların minimal həssaslıq oblastları müəyyən edilmişdir. Bununla yanaşı detektorların hazırlanmasında istifadəsi nəzərdə tutulmuş yeni kompakt və cərəyan tələbatı az olan yüksək gərginlik çevirici (GÇ), komparator, müxtəlif buraxma eni olan siqnal gücləndirici elektronik bloklarının topologiyası hazırlanmış və onların simulyasiyası İSİS 7 Professional Proteus proqramında aparılmışdır. Elektronik dövrlərin plataları Protomat S63 qurğusu ilə hazırlanmışdır. Hazırlanan elektron blokların tam cərəyan tələbatı 100mA-dən aşağı olmuşdur. Yeni hazırlanan gərginlik çeviricilərin giriş gərginliyi 3.5–5V olduqda belə çıxış gərginliyini 90–100V intervalında çevirməyə imkan vermişdir. Bu zaman toplam gərginlik fluktasiyası $\pm 0,009$ V ətrafında olmuşdur.

MSFD fotodiodlarından alınan siqnalları gücləndirmək üçün LMH6657, LT-1355 əməliyyat gücləndiriciləri və KT842 tranzistoru əsasında buraxma eni 30-100 MHz olan və gücləndirmə əmsalı 10-100 arasında dəyişən gücləndiricilər hazırlanmışdır. Hazırlanmış gücləndiricilər impuls eni 10 nsan–500 nsan intervalında olan siqnalları qeydetmək üçün optimallaşdırılmışdır. Hazırlanmış siqnal gücləndiricilərin xəttilik oblastları müəyyən edilmişdir. Hazırlanmış gücləndiricilərin küyü 1,8 nA olmuşdur. Gərginlik çevirici və gücləndirici modullar $+50$ °C– -5 °C temperatur intervalında xassələrinin dəyişməsi tədqiq edilmiş və göstərilmişdir ki, bu tip

modullar verilmiş temperatur intervalında öz parametrlərini sabit saxlayırlar. Müəyyən edilmişdir ki, bu tip elektron modullar ssintilyator detektorlarının hazırlanmasında tətbiq oluna bilər.

Üçüncü fəsildə aparılan elmi təcrübələrdə istifadə edilən müxtəlif tip Zekotek Fotonik, Hamamatsu, Laser Components şirkətlərinin MSFD fotodiodlarının parametrləri: volt-ampere xarakteristikası (tərs və düz istiqamətdə), volt-farad xarakteristikası, tutumun tezlikdən asılılığı, tutumun differensial dəyişməsi, gücləndirmə əmsalının gərginlikdən asılılığı, gecikən impulslar, optimal işləmə gərginliyi, tək fotoelektronlu paylanma, küy əmsalı və deşilmə gərginliyi geniş tədqiq edilmişdir. Bununla yanaşı zəif (bir neçə foton) və güclü (çox saylı foton seli) siqnalın yaranma mexanizmi və hansı paylanmaya tabe olması haqqında məlumat verilmişdir. Qauss və Puasson paylanması əsasında siqnalın parametrlərinin hesablanması qanuna uyğunluğu verilmişdir.

Bu fəsildə selvari fotodiodlarda sel prosesinin analiz edilməsi və fotodiodun işləmə mexanizmini düzgün təsvir edən yeni fiziki modelin təcrübə sübutu zamanı Heyger rejimində işləyən tək elementli selvari fotodiodlarından istifadə edilmişdir. “Zecotek Photonics” şirkətinin 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 pikseləndən ibarətdir. 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 $43\text{--}45 \text{ V}$ və gücləndirmə əmsalı 10^7 -dən böyük olmuşdur.

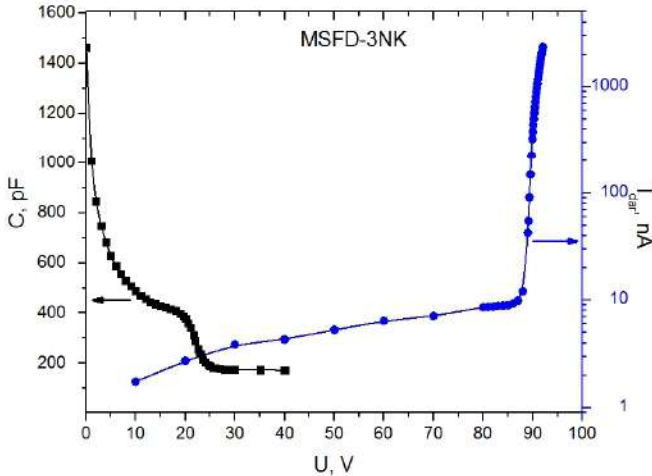
Təcrübədə istifadə edilən “Laser Components” şirkətinin R4523 markalı SPAD fotodiodu qırmızı oblastda fotonların qeydedilməsi üçün təkmilləşdirilmişdir. SPAD-R4523 fotodiodu $p^+ - \pi - p^+ - n^+$ regionlardan ibarətdir və selvari proses $p^+ - n^+$ oblastlar arasında baş verir. Həcmi yüklər oblastının 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 $135\text{--}136,5 \text{ V}$, tutumu $1,7 \text{ pF}$ və gücləndirmə əmsalı 10^7 böyük olmuşdur.

Mikropikselli selvari fotodiod olaraq yüksək piksel sıxlığına malik olan Zecotek şirkətinin MSFD-3NK, MSFD-3N1P, MSFD-3D və Hamamatsu şirkətinin MPPC-S12572-010P, MPPC-S12572-015C və MPPC-S12572-11-050C fotodiodlarından istifadə edərək onların işləmə parametrləri öyrənilmişdir. MPPC fotodiodlar p^+ -tip altlıq və onun üzərində zəif aşqarlanmış yüksək təmizlikli π –tip epitaksial laydan ibarət olmuşdur. Epitaksial layın daxilində yüksək aşqarlanmış p^+ layı və onun üzərində yüksək aşqarlanmış n^+ laylarından təşkil olunmuş keçidlər fotodiodun əsas pikselləri hesab olunur. Selvari prosesin sönməsi hər pikselə ardıcıl qoşulmuş polisilikon mikro-rezistor vasitəsi 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 p^+ - n^+ 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 enerjiden 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. Fotodiodun sıradan çıxması üçün pikseldəki selvari prosesin sönməsi hər pikselə qoşulmuş xüsusi R_Q 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 3×3 mm² 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. 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. İşləmə gərginliyində MPPC-S10362-050CK fotodiodun qaranlıq cərəyanı 25 nA olmuşdur. 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-1 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. Bu tip fotodiodlarda piksellər paralel qoşulmuşdur. Bu zaman hər pikselin söndürücü müqaviməti belə hesablanır $R_q = R_{\text{tot}} \times N_{\text{pik}}$. Beləliklə, MPPC-S10362-050CK fotodiodu üçün $R_q = R_{\text{tot}} \times N_{\text{pix}} = 264 \text{ Om} \times 400 = 105 \text{ kOm}$ alınır. Nəticədə, hər piksel üçün xarakteristik müddəti hesablamaq mümkündür $t = R_q C_{\text{pik}} = 105 \text{ kOm} \times 95 \text{ fF} = 9,975 \text{ nsan}$ alınmışdır.

Ssintilyatorlu detektorların hazırlanmasında istifadə ediləcək

yeni MSFD-3NK fotodiodların qaranalığ cərəyanları 400 nA və işləmə gərginlikləri 90,5 V olmuşdur(şəkil 1).



Şəkil 1. MSFD-3NK fotodiodlarının volt-farad və volt-ampere xarakteristikaları.

MSFD-3NK və 3N1P fotodiodlarının tutumunun ölçülməsi zamanı “E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС” 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. MSFD-3NK fotodiodları qalınlıqları fərqli olan eyni tip epitaksial təbəqəyə malik olmuşdur. Təcrübədən alınan nəticədən görmək olar ki, tətbiq edilən gərginliyin 35 V qiymətində MSFD-3NK fotodiodlarının tutumu 174 pF olmuşdur (şəkil 1).

Yeni hazırlanmış MSFD-3NK fotodiodun parametrləri Yaponiyanın Hamamatsu şirkətinin istehsalı olan MPPC-S12572-010P fotodiodları ilə müqayisə edilmişdir (cədvəl.1)

Bu fəsilə, həmçinin, MSFD-3NK və 3N1P fotodiodlarının kvant effektivliyi tədqiq edilmişdir (şəkil 2). MSFD fotodiodların

Cədvəl 1. MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodlarının parametrlərinin müqayisəsi

Parametrlər	MSFD-3NK	MPPC-S12572-010P
Həndəsi faktor (%)	100	33
Foton qeydetmə effektivliyi (450 nm)	35-40	8
Piksel sıxlığı(pik/mm ²)	10000	10000
Sahə(mm ²)	13.69	9
Toplam piksel sayı	136900	90000

kvant effektivliyini təyin edərkən MS3504i monoxromatorundan istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodun 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. QE-nin tapılması zamanı Hamamatsu firmasının etalon S1223-01 PİN fotodiodundan istifadə edilmişdir. Işıq mənbəsindən buraxılan işıq seli bütün ölçmələrdə sabit qalmışdır. Fotodiodların fotocərəyanları isə dalğa uzunluğundan asılı olaraq fərqli alınmışdır. PİN fotodiodun QE-si 350 nm–1100 nm dalğa uzunluğunda məlum olduğundan aşağıdakı ifadədən istifadə edərək MSFD fotodiodların QE-si hesablanmışdır.

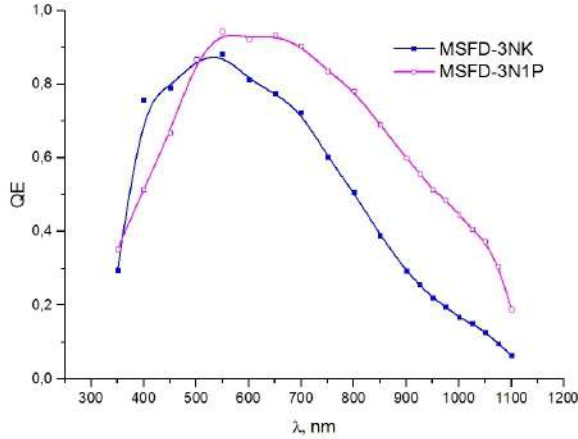
$$QE_{MSFD} = \frac{I_{MSFD} \times QE_{PIN}}{I_{PIN}} \quad (1)$$

Burada QE_{MSFD} - MSFD fotodiodun tapılacaq QE-si, I_{MSFD} - işıqla şüalanma zamanı MSFD fotodiodun ölçülən foto cərəyan, QE_{PIN} -etalon PİN fotodiodun QE-si və I_{PIN} - işıqla şüalanma zamanı PİN fotodiodun axan fotocərəyan. MS3504i tip monoxromatordan MSFD

fotodiodların üzərinə düşən fotonların selini tapmaq üçün aşağıdakı düsturdan istifadə edilmişdir: $F(V/mm^2) = \dot{I}_{fotod}(A) / (S_{diod}(mm^2) \times R(A/V))$ burada $\dot{I}_{fotod}(A)$ - verilmiş dalğa uzunluğunda fotodioddan axan fotocərəyan, S_{diod} - fotodiodun işıqlanan hissəsinin sahəsi və $R(A/V)$ - fotodiodun həssaslığıdır. Monoxromatordan buraxılan 500 nm dalğa uzunluğunda PİN fotodiodun fotocərəyanı 1051×10^{-9} A olmuşdur. Bizim halda fotodiodun işıqlanan hissəsinin sahəsi kalimatora görə $7,065 \text{ mm}^2$ olmuşdur. PİN 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 olmuşdur. Düşən foton selinin $370 - 500 \text{ nm}$ dalğa uzunluğu intervalında MSFD-3NK fotodiodu MSFD-3N1P fotodiodu ilə müqayisədə həssaslığı $10-47 \%$ yüksəkdir. Bu fərqlənmə birbaşa olaraq MSFD-3NK fotodiodlarında antiqaytarıcı silisium nitrid təbəqəsindən istifadə olunması ilə bağlıdır. İstifadə edilmiş bu təbəqənin qalınlığı elə seçilmişdir ki, minimal qaytarma 450 nm dalğa uzunluğu ətrafında olsun. MSFD-3N1P fotodiodu 3NK fotodiodundan fərqli olaraq $650 \text{ nm} - 1100 \text{ nm}$ 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.

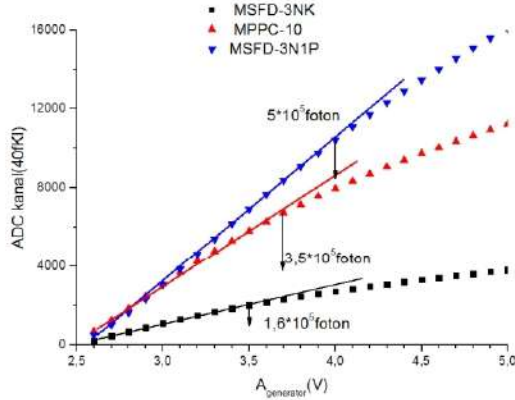
Bununla yanaşı təcrübələrdə istifadə edilən MPPC-S12572-010P və MSFD-3NK, 3N1P fotodiodların xəttilik oblastı tədqiq edilmiş və göstərilmişdir ki, MPPC-S12572-010P fotodiodlarının xəttilik oblastı $1,5 \times 10^5 - 3,5 \times 10^5$ foton və MSFD-3NK və MSFD-3N1P fotodiodlarının xəttilik oblastı $1,3 \times 10^5 - 5 \times 10^5$ foton intervalına qədər davam etmişdir (şəkil 3). Bu isə MSFD-3NK və MSFD-3N1P fotodiodları əsasında hazırlanacaq detektorların daha geniş enerjili ionlaşdırıcı şüaları qeyd etməyə imkan verəcəyini göstərmişdir.

Bu fəsilə MPPC-S12572-010P və MSFD-3NK fotodiodlarının dəşilmə gərginliyinin, piksellərin effektiv tutumunun və qaranlıq sayının aşağı temperaturalarda dəyişməsi tədqiq edilmişdir.

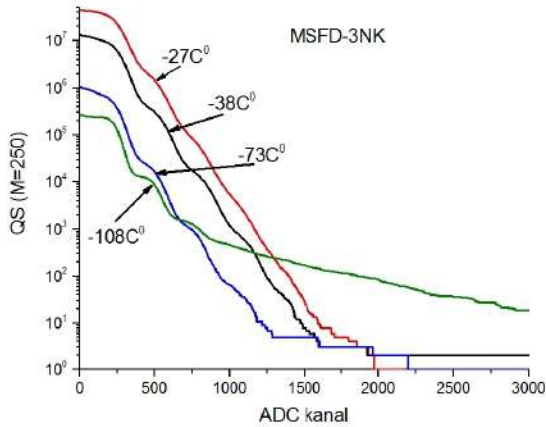


Şəkil 2. MSFD tipli fotodiodların kvant effektivliyinin dalğa uzunluğundan asılılığı.

Aparılan bu təcrübələr Rusiyanın Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunda həyata keçirilmişdir. İstifadə edilən fotodiodların piksel sıxlıqları 10000-15000 piksel/mm² olmuşdur. Aşağı temperaturların tədqiqi zamanı maye azotdan istifadə edilmişdir. Deşilmə gərginliyi və zəif foton selinin qeydedilməsi təyin edilən zamanı impuls generatorundan, CAEN RŞÇ-dən və gücləndiricilərdən istifadə edilmişdir. İstifadə edilən gücləndiricilərin gücləndirmə əmsalı G1-50 və G2-38 olmuşdur. Sinyalın ümumi gücləndirməsi 1900 olmuşdur. Spektrlər çəkilən zaman CAEN generatorun sinxron çıxışına birləşdirilmişdir. İlkin 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 generatordan tezliyi 1 kHz, davamətme müddəti 30 nsan və amplitudu 3,34 V olan – qütblü impulsar tətbiq



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



Şəkil 4. MSFD-3NK fotodiodlarının qaranlıq sayının temperaturdan asılılığı .

edilmişdir. 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 seçilmişdir. 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 $C_{\text{pik}} \sim 4,8 \times 10^{-15}$ F=4,8 fF alınmışdır. 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 temperaturdan aslı olaraq azalır: $C_{\text{pik}} = 5,489 \times 10^{-15} + 2,048 \times 10^{-17} \times T$. 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 edilmişdir. MPPC-S12572-010P fotodiodunun gücləndirmə əmsalı $1-1,3 \times 10^5$ ətrafında dəyişmişdir. Pikselin tutumu isə $C_{\text{pik}} \sim 3,07$ fF olmuşdur. Məlum olmuşdur ki, MPPC-S12572-010P fotodiodlarında tutum xətti qanunla azalır və azalma belə ifadə edilir: $C_{\text{pik}} = 3,885 \times 10^{-15} + 1,333 \times 10^{-17} \times T$. MPPC fotodiodlarında temperatur fərqi -80 °C olduqda tutumun dəyişməsi 31 % olmuşdur.

MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodlarının U_{br} deşilmə gərginliyinin temperaturdan asılılığında tədqiq edilmişdir. MSFD-3NK və MPPC-S12572-010P fotodiodları üçün deşilmə gərginliyinin temperaturdan asılılıq tənliyi müəyyən edilmişdir: $U_{\text{br}} = 86,64 + 0,0616 \times T$ və $U_{\text{br}} = 64,11 + 0,0654 \times T$. Burada T- xarici mühitin temperaturudur. 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 əmsalı temperatur artdıqca azalır və ya əksi olduqda isə gücləndirmə əmsalı artır. Belə yüksək sahədə temperatur azaldıqca MSFD fotodiodun gücləndirmə əmsalının artması yükdaşıyıcıların optik fononları buraxdığı müddətə qədər getdiyi yolun orta uzunluğunun artması hesabına baş verir. 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 qeyd edilmiş ifrat gərginlikdə güclənmə əmsalının azalması və deşilmə gərginliyinin artması məhz yükdaşıyıcıların optik fononlara 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. Bununla yanaşı ionizasiyanı xarakterizə edən digər bir kəmiyyət qadağan olunmuş zonanın enidir və bu kəmiyyət temperaturdan asılı olaraq dəyişir. Bizim halda temperatur intervalının $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmasına baxmayaraq qadağan olunmuş zonanın eninin dəyişməsi təqribən 2 % yaxın olmuşdur.

Fotopikin amplitudu və kənara çıxmasının tapılması zamanı normal paylanmadan istifadə edilmişdir. MSFD fotodiodları küy əmsalı ölçülərkən fotodiodların yerləşdiyi mühitin temperaturu $-86\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmuşdur. MSFD -3NK fotodiodları üçün küy əmsalı gərginliyin 82,7 V – 83,6 V qiymətində $F\sim 1,04$ olmuşdur. Digər MPPC-S12572-010P fotodiodları üçün 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.

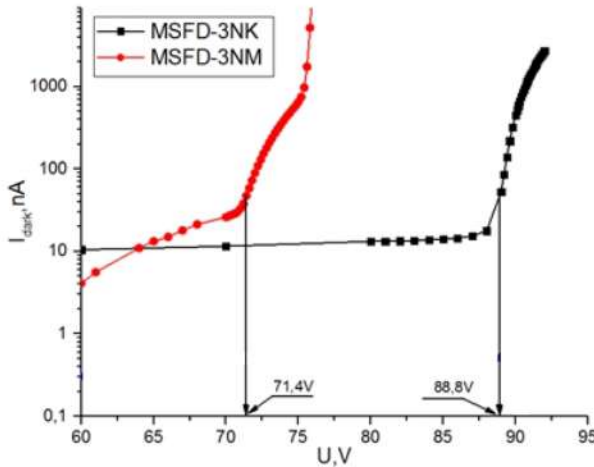
MSFD fotodiodların qaranlıq sayını tədqiq edərkən işıqlandırıcı fotodiodlardan istifadə edilməmişdir. Analoji olaraq iki gücləndiricidən və siqnalın çevrilməsi üçün isə CAEN ARÇ-sindən istifadə edilmişdir. Siqnalın qeyd edilməsi zamanı triqer olaraq siqnalın özündən istifadə edilmişdir. Məlumdur ki, qaranlıq say (QS) sürəti əsasən iki növ hadisələr hesabına formalaşır: selvari oblastın p-n keçidində yaranan termal yükdaşıyıcılar hesabına və birdə ki gecikən impulsar hesabına. Termal yükdaşıyıcıların konsentrasiyası generasiya mərkəzlərinin sayından və temperaturdan asılıdır. Bununla yanaşı MSFD fotodiodda 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. 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-in dəyişməsinə təsiri öyrənilmişdir. MSFD-3NK fotodiodunda 5 mV astana qiymətinə uyğun gələn qaranlıq sayın (QS) eyni bir gücləndirmə əmsalında temperaturdan asılılığı müəyyən edilmişdir: $DCR(T)=9,44 \times 10^8 \times \exp(T/8,77)+6,045 \times 10^5$ (şəkil 4). Temperatur fərqi -81 °C olduqda QS təqribən 169 dəfə azalmışdır. Həmçinin eyni bir temperaturda birinci qaranlıq elektrona uyğun gələn qaranlıq sayın gücləndirmə əmsalından asılılığına da baxılmışdır. Bu zaman yalnız gücləndirmə əmsalının QS-yə təsiri öyrənilmişdir. Ölçmə temperaturu -27 °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 °C seçildikdə gücləndirmə əmsalı 36 % artdıqda tək elektrona uyğun QS-nin azalması 75 % yaxın olmuşdur. Belə dəyişmələr isə yalnız -70 °C-dən aşağı temperaturlarda müşahidə edilməyə başlanmışdır. Belə dəyişmələrin müşahidə edilməsi yalnız gecikən impulsların müşahidə olunma ehtimalının artması ilə bağlı ola bilər. 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 görə də amplituda görə ayırdetmənin temperaturdan asılı olaraq dəyişməsinə tədqiq etmək üçün eyni gücləndirməni seçmək olduqca əhəmiyyətlidir. Eyni bir gücləndirmə əmsalında birinci qaranlıq elektrona uyğun gələn pikin amplituda 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 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatur fərqi olduqda ayırdetmə 31 %-ə kimi yaxşılaşmışdır.

Bu fəsilə, həmçinin, MSFD fotodiodlar əsasında matrislərin hazırlanması zamanı elementlərin ardıcıl və paralel birləşməsi öyrənilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, elementlər ardıcıl qoşulduqda matrisin tutumu elementlərin sayı qədər azalmış və enerji ayırdetməsi 20 % alınmışdır. MSFD fotodiodları paralel qoşulduqda matrisin tutumu elementlərin sayı qədər artmış və enerji ayırdetməsi $\sim 18\%$ alınmışdır. MSFD fotodiodların ardıcıl və paralel birləşməsindən alınan nəticələr göstərmişdir ki, sayğac və uçuş müddətinin təyin edilməsində MSFD fotodiodlarının ardıcıl birləşmə və spektrometrik cihazların hazırlanmasında isə paralel birləşmə daha effektivdir.

Şəkil 5-də yeni hazırlanmış MSFD-3NM və MSFD-3NK fotodiodlarının VAX-1 müəyyən edilmişdir. Əvvəlki analoqlarından

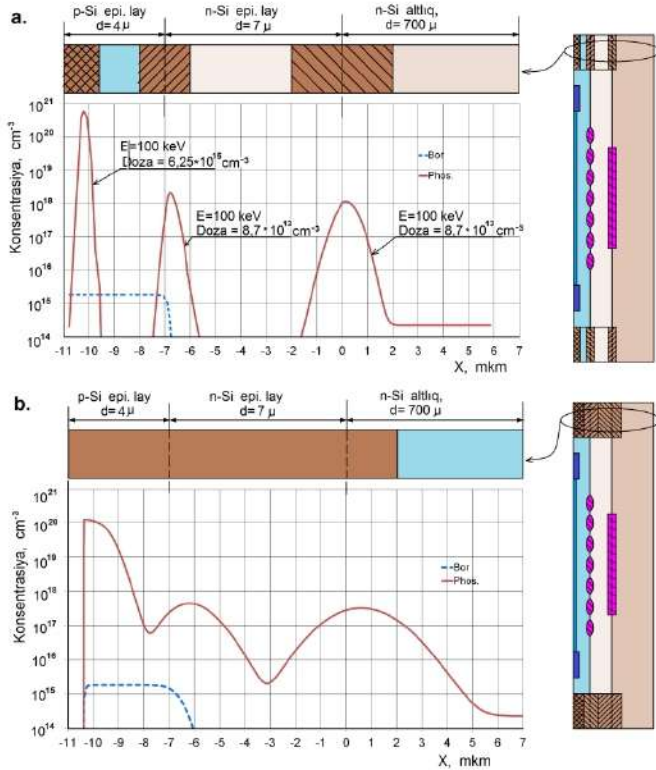


Şəkil 5. MSFD-3NM və MSFD-3NK fotodiodlarının VAX-nın gərginlikdən asılılığı.

fərqli olaraq MSFD-3NM fotodiodlarının həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunması 20 V gərginlikdə baş vermişdir. Fotodiodun deşilməsi $\approx 71,4\text{ V}$ müşahidə edilmişdir. MSFD-3NM fotodiodların işləmə gərginliyi gərginliyin 74–74,8 V intervalını əhatə etmişdir. MSFD-

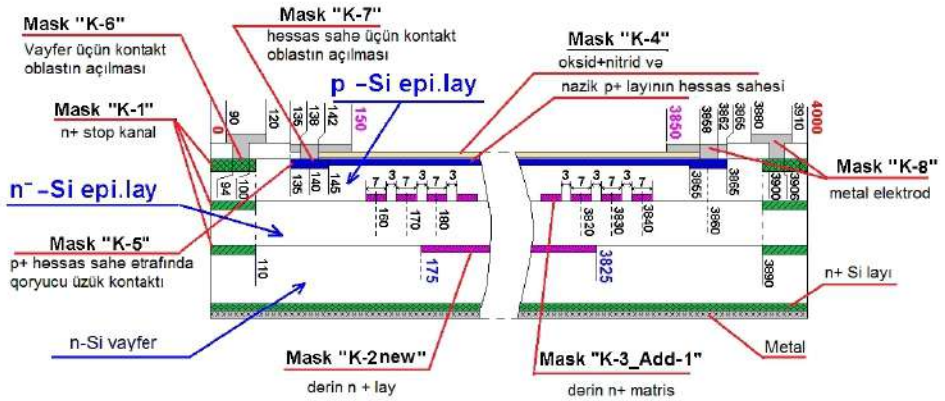
3NK fotodiodu ilə müqayisədə MSFD-3NM fotodiodun deşilmə gərginliyi $\approx 19\%$, sabit ifrat gərginlikdə (2,6 V) qaranlıq cərəyanı $\approx 5,2$ dəfə azalmış və ifrat gərginlik oblastı ≈ 2 dəfə artmışdır. MSFD-3NM fotodiodun optimal halda gücləndirmə əmsalı 1×10^5 olmuşdur.

Dördüncü fəsildə dərin piksellə MSFD fotodiodlarda stop-kanalın hazırlanması üçün yeni metod və texnoloji proses təklif olunmuşdur (şəkil 6). Təklif olunan metodda MSFD fotodiodunun perimetri boyunca qoruyucu stop-kanal üç mərhələdə yerinə yetirilir.



Şəkil 6. Yeni MSFD fotodiodda qoruyucu stop-kanalın strukturu və aşqarın (fosfor ionlarının) paylanması: a – termik dəmləmədən qabaq, b – termik dəmləmədən sonra.

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 (şəkil 6(a)). Bundan sonra, termik dəmləmə prosesində temperatur və dəmləmə vaxtı elə seçilir ki, üç qoruyucu stop-kanalda olan aşqarların cəbhəsi diffuziya yolu ilə bir-biri ilə görüşsün (şəkil 6(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 müqavimətli epitaksiya laylarını aşqarlamasın. Hesablamalar TIDE proqram paketinin köməyiylə yerinə yetirilmişdir. Yeni MSFD fotodiodunun hazırlanması üçün n -tipli müqaviməti 8 Om×sm və diametri 200 mm olan vayferlərdən istifadə edilmişdir (şəkil 7). İlk olaraq vayferdə mask-1-dən istifadə



Şəkil 7. Yeni işlənmiş MSFD fotodiodun strukturu.

edərək kənar qoruyucu stop-kanalın (və ya həlqənin) birincisi implantasiya edilmişdir. Bu zaman 100 keV enerjili dozası $8,7 \times 10^{13}$ ion/sm² olan fosfor atomundan istifadə edilmişdir. 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 $2,3 \times 10^{13}$ ion/sm² seçilmişdir. Daha sonra fosforla aşqarlanmış 350 Om×sm olan xüsusi müqaviməti

və qalınlığı 7 mkm olan n –tip epitaksial təbəqə vayfer üzərində yetişdirilmişdir. Birinci epitaksial təbəqədəki n tip yükdaşıyıcıların konsentrasiyası $1,4 \times 10^{13}$ ion/sm³ olmuşdur. Sonrakı mərhələdə mask 1-dən istifadə edərək ikinci qoruyucu həlqəni almaq üçün 100 keV enerjili fosfor atomu ilə $8,7 \times 10^{13}$ ion/sm² dozaya qədər implantasiya edilmişdir. Daha sonra mask-3-dən istifadə edərək piksellərin yerləri 100 keV enerjili arsenium ionu ilə $2,3 \times 10^{13}$ ion/sm² dozaya qədər şüalandırılmışdır. Maksimal As ionunun konsentrasiyası $3,2 \times 10^{18}$ ion/sm³ alınmışdır. Beləliklə, diametri 7 mkm, aralarındakı interval 3 mkm olan piksel matrisi hazırlanmışdır. Daha sonra xüsusi müqaviməti 7 Om×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 $6,25 \times 10^{15}$ ion/sm² 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 SiO₂ və Si₃N₄ təbəqələri yetişdirilmişdir. Quru oksidləşmə metodunun seçilməsi oksidləşmə prosesinin baş vermə müddətini artırsada lakin yüksək keyfiyyətli SiO almaq üçün istifadə ediləcək ən optimal variant hesab edilir. 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 ilə bu ekranlayıcı təbəqə ilə birinci epitaksial təbəqəsi arasındakı çəpərin hündürlüyü isə

$V_{bi} \sim 0,31$ V olmuşdur. Məhz bu çəpərin mövcud olması dəşiklərin yayferdən 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. Bu fəsildə MSFD fotodiodlarında pikselin radiusunu və zəif aşqar oblastının konsentrasiyasını dəyişməklə dəşilmə gərginliyinin idarə edilməsi tədqiq edilmişdir. Pikselin diametri 4 mkm olduqda zəif aşqar oblastının konsentrasiyası $2 \times 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ olduqda dəşilmə gərginliyi ~ 95 V tərtibində alınmışdır. Dəşilmə gərginliyini azaltmaq üçün fon konsentrasiyası $4 \times 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ artırıldıqda dəşilmə gərginliyi 95,5 V-dan 60 V-a qədər azalmışdır. Bu gərginlik isə gələcəkdə daha aşağı işləmə gərginlikli MSFD fotodiodlarının hazırlanmasına imkan verəcəkdir. MSFD-3NK, 3NM fotodiodunun hər pikselinin tutumu, selvari prosesin baş verməsi üçün lazım olan maksimal sahə ($3 \times 10^5 \text{ V/sm}$), selvari prosesin sönməsini təşkil edən müqavimətin 640 kOm, çəpərin hündürlüyü (0,32 V), birinci (27 V) və ikinci epitaksial (12 V) təbəqələrinin fəza yüklər oblastı ilə əhatə olması üçün lazım olan gərginliklər hesablanmışdır. Alınan nəticələr təcrübi nəticələrlə uyğunluq təşkil etmişdir.

Bununla yanaşı MSFD fotodiodların kvant effektivliyini artırmaq üçün antiqaytarıcı təbəqənin sındırma əmsalı və onun qalınlığı təyin edilmişdir. Göstərilmişdir ki, Si təbəqəsi üzərində SiO_2 təbəqəsi qoyulduqda düşən foton selinin 33,4 % əks olunaraq quruluşu tərk edir və silisiumun aktiv həcminə daxil olan foton selinin payı 66,6 % olur. Məhz bu səbəbdən bizim istifadə etdiyimiz MSFD-3A, 3B, 3N, 3N1P fotodiodlarında $QE \sim 65$ % alınır. Həm optimal antiqaytarıcı həm də kvant effektivliyinin artırılması üçün sındırma əmsalı $n_{a,r}$ (450 nm) $\sim 2,86$ hesablanmışdır. Sındırma əmsalı $n_{a,r}$ (450 nm) $\sim 2,86$ olan təbəqə əgər silisium və SiO_2 təbəqəsi arasında yerləşərsə bu zaman düşən fotonların 95 %-ə yaxını fotodiod vasitəsi ilə qeyd edilməlidir. Reallıqda sındırma əmsalı belə olan maddə tapmaq mümkün olmur ona görə sındırma əmsalı buna yaxın olan maddə olaraq Si_3N_4 təbəqəsindən istifadə edilmişdir. Foton selinin

450 nm dalğa uzunluğunda sındırma əmsalın Si_3N_4 (450 nm)=2,1 olar. Bu zaman foton selinin silisium daxilinə keçən payı kəskin artır. Silisiumun daxilinə nüfuz edən foton selinin payı isə 84–97 % intervalında dəyişir və maksimum 97 %-ə yaxın olur. Si_3N_4 təbəqəsinin qalınlığı dalğa uzunluğundan asılı olaraq 47–85 nm arasında dəyişir. Məhz belə antiqaytarıcı MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodlarında istifadə edilmiş maksimal effektivliyini 450 nm dalğa uzunluqda müşahidə edilməsi üçün silisiumla SiO_2 arasında yerləşən Si_3N_4 təbəqəsinin qalınlığı 55 nm olmuşdur.

Bu fəsilə həmçinin tək elementli selvari fotodiodlarda selvari prosesi düzgün izah edən yeni model təklif edilmişdir (şəkil 8). Tək elementli selvari fotodiodlarda xarici və daxili cərəyanın zamandan asılı olaraq dəyişməsi və selvari proses baş verən kanalın həcmi yüklər oblastının müqavimətinin təsiri tədqiq edilmişdir. Təklif edilən 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 pikselin 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 $M = \frac{C_p (U_d - U_{si, \min})}{q}$ üçün bu ifadələr

alınmışdır. Təqdim edilən model sadə PİN quruluşlu fotodiodlar üçün hesablanmışdır. Belə bir quruluşda elektronlar və deşiklər üçün gücləndirmə əmsalı bu forma ilə hesablanır $M_e = \exp(\alpha W)$ və $M_h = \exp(\beta W)$. Burada α və β elektron və deşiklər üçün ionizasiya əmsalı və W – selvari proses baş verən oblastın qalınlığıdır. Yükdəşıyıcıların 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

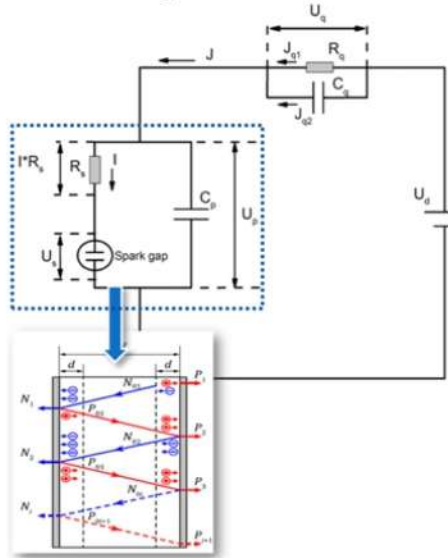
yaxınlığında ilkin $t=0$ anında yaranan fotoelektronlar $N_{01}=1$ güclü sahənin təsiri ilə i -təbəqəsində katoda doğru nüfuz edir. Bu zaman elektronun diffuziya müddəti belə hesablanır $\tau=W/v$, burada v -dreyf sürəti və W isə i layının enidir. Katodla i -kecidin sərhədində mövcud olan maksimal elektrik sahəsinin təsiri ilə maksimal yaranan elektronların sayı $N_1=\exp(\alpha_1 W)$ olur. Bu zaman anoda doğru hərəkət edən deşiklərin sayı $P_{02}=[\exp(\alpha_1 W)-1]$, $E_1=(U_1/W)$ olur, hansı ki $\alpha_1=\alpha(E=E_1)$ və $U_1=U_d$ olur. Anoda doğru hərəkət edən deşiklər anodla i layın sərhədində 2τ müddətindən sonra yeni N_{02} sayda elektron yaradır və yenidən selvari prosesin ikinci mərhələsi baş verir. Bu zaman selvari prosesi başlanan elektronların sayı $N_{02}=[\exp(\alpha_1 W)-1]\times[\exp(\beta_1 W)-1]$ 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 $N_2=N_{02}\times\exp(\alpha_2 W)=[\exp(\alpha_1 W)-1]\times[\exp(\beta_1 W)-1]\times\exp(\alpha_2 W)$ olur. Əgər selvari proses i sayda baş verərsə bu zaman yaranan elektronların tam sayı $N_i=\prod_{j=2}^i \{[\exp(\alpha_{j-1} W)-1]\times[\exp(\beta_{j-1} W)-1]\}\times\exp(\alpha_j W)$ $i\geq 2$; elektrik sahəsinin dəyişməsi isə $E_i=U_{si}/W$ olur. Bu zaman spark gəpə düşən gərginlik selvari prosesin i toqquşmasından asılı olaraq bu qanuna uyğun olaraq dəyişir:

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

Bu zaman söndürücü müqavimətdən axan xarici cərəyan aşağıda göstərilən qanuna- uyğun olaraq dəyişir:

$$J_i = \frac{C_p(U_d - U_{s(i-1)})}{(C_p + C_q) \times R_q} - \frac{C_p R_s q N_{(i-1)}}{R_q (C_p + C_q) \Delta t} + \frac{q \times N_{i-1}}{\Delta t} \left(\frac{C_q}{(C_p + C_q)} \right) \quad (3)$$

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_p -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.



Şəkil 8. Təklif edilən modelə uyğun gələn ekvivalent dövrə.

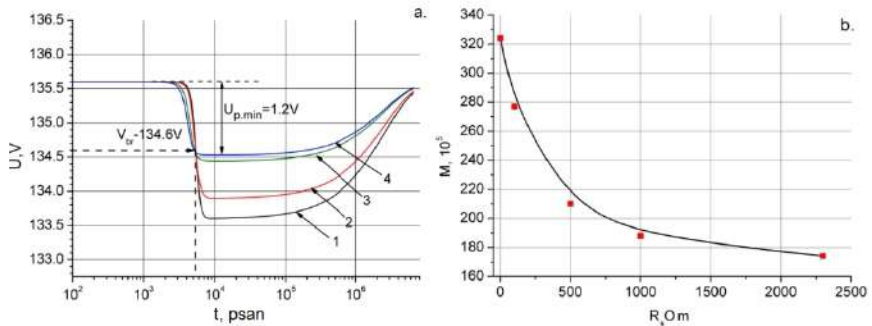
Fotodioda düşən gərginlik deşilmə gərginliyinə bərabər olduqda maksimal sayda elektronlar yaranır. Yaranan bu elektronlar sahənin deşilmə gərginliyindən aşağı gərginliyə düşməsinə gətirir. Bu zaman yaranan yüklərin miqdarı təqribən elə ön frontda yaranan elektronlar qədər olur. Nəticədə fotodioda tətbiq edilən gərginlik ifrat gərginlik qədər yenidən aşağı düşür (şəkil 9a). Bu dəyişməni daxili cərəyanın və gərginliyin zamandan asılı olaraq dəyişməsindən görmək olar. İfrat gərginlik 1V olduqda daxili cərəyanın dəyişməsindən görünür ki, maksimal cərəyan məhz deşilmə gərginliyində müşahidə edilir $I \sim 0,35$ mA. Əgər həcmi yüklər oblastının müəyyən bir müqavimətə (R_s)

malik olduğunu desək bu zaman asanlıqla bu müqavimətə düşən gərginliyi hesablamaq olar $U_s = I \times R_s = 0,35 \text{ mA} \times 2,3 \text{ k}\Omega = 0,8 \text{ V}$. Beləliklə, göründüyü kimi fotodiodun gücləndirmə əmsalı bu gərginlikdən asılı olaraq azalır (şəkil 9b). Bu zaman ifrat gərginlik 1 V və həcmi yüklər oblastına düşən gərginlik isə 0,8 V olur. Həcmi yüklər oblastının müqavimətini hesablamaq üçün $p^+ - n - n$ quruluşdan istifadə edilmişdir. Kəskin keçidlərə də tətbiq edilən gərginlik dəşilmə gərginliyinə bərabər olduqda elektrik sahəsi $p^+ - n$ keçiddə maksimum olur. Bu zaman yaranan yükdaşıyıcıların həcmi yüklər oblastında doyma sürəti (termal- v_s) ilə hərəkət etdiyini qəbul etsək onda axan cərəyanı belə ifadə etmək olar: $I = v_s \times \rho \times A$, 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 edərək belə ifadə etmək olar $\Delta E(x) = I \times x / (v_s \times \epsilon_s \times A)$. Daha sonra həcmi yüklər oblastına düşən gərginliyin dəyişməsi müəyyən edilmişdir $\Delta U_b = I \times x / (v_s \times \epsilon_s \times A) dx = I \times W^2 / (2v_s \times \epsilon_s \times A)$. Beləliklə, həcmi yüklər oblastının müqaviməti üçün belə ifadə alınır: $R_s = \Delta U_b / I = W^2 / (2v_s \times \epsilon_s \times A)$. Alınmış bu ifadədən istifadə edərək Laser Components şirkətinin fotodiodunun həcmi yüklər oblastının müqaviməti hesablanmışdır:

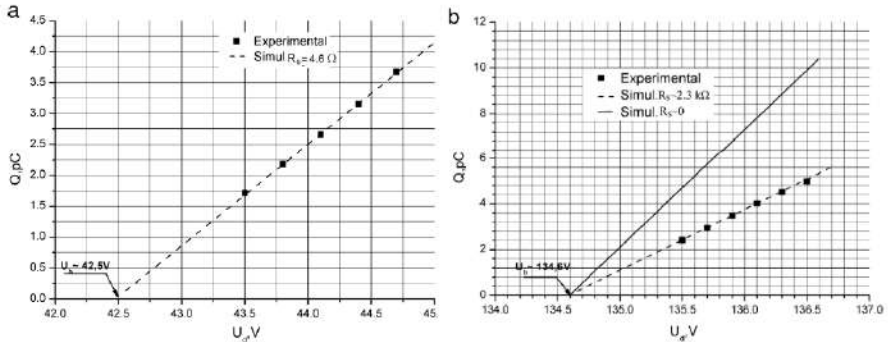
$$R_s = \frac{W^2}{2\epsilon \times \epsilon_0 \times S_p \times v_s} = \frac{W^2}{2\epsilon \times \epsilon_0 \times \frac{\pi \times L^2}{4} \times v_s} = \frac{2}{\epsilon \times \epsilon_0 \times \pi \times v_s} \times \left(\frac{W}{L}\right)^2 = 61 \text{ k}\Omega \times \left(\frac{W}{L}\right)^2 \quad (4)$$

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

Tək elementli selvari fotodiodlar üçün yeni ekvivalent dövrə təklif edilmiş və təklif edilən modellə təcrübi nəticələr tam uyğunluq təşkil etmişdir (şəkil 10 a və b). Göstərilmişdir ki, eyni bir ifrat gərginlikdə maksimal gücləndirmə əmsalı almaq üçün (W/L) nisbəti gərək 0,01 ($R_s < 5 \Omega$) kiçik olsun. Başqa sözlə aşağı dəşilmə gərginlikli və kiçik ölçülü MSFD fotodiodlar yüksək gücləndirmə əmsallı



Şəkil 9. Laser Component şirkətinin pikselinə düşən gərginliyin zamandan (a.) və gücləndirmə əmsalının həcmi yüklər 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.

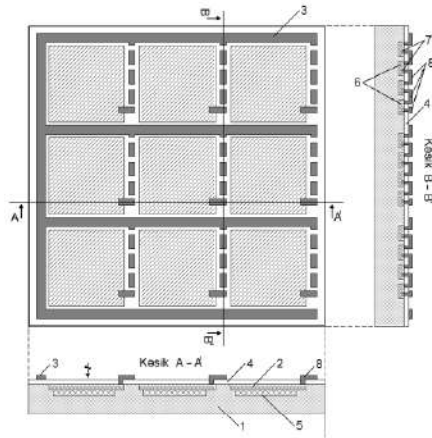


Şəkil 10. Bir piksellə qeyd edilən tək fotoelektronlu impulsa uyğun gələn yükün gərginlikdən asılılığı: a- Zecotek Photonic şirkətinin fotodiodu, b- Laser Components şirkətinin fotodiodu.

fotodiodlar hazırlamaq üçün daha əlverişli hesab edilir. Selvari fotodiodların gücləndirmə əmsalı üçün analoji $C_{\text{pik}} \times \Delta U_p$ ifadəsindən fərqli olaraq aşağıdakı ifadə alınmışdır: $M = m \times C_{\text{pik}} \times \Delta U_p = C_{\text{ef}} \times \Delta U_p$, 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 C_{pik} kiçik m sabiti alınır. Həmçinin müəyyən edilmişdir ki, eyni bir ifrat gərginlikdə R_s həcmi yüklər oblastının müqaviməti artdıqca gücləndirmə əmsalı azalır. MSFD fotodiodların cəldliyinin parazit tutumdan asılılığı tədqiq edilmiş və müəyyən edilmişdir ki, fotodiodun parazit tutumu pikselin tutumunun 1 % -dən yüksək olduqda ön frontun davam etmə müddəti 20 % -ə qədər yaxşılaşır.

Bu fəsilin sonunda yeni tipli MSFD fotodiodu təklif edilmişdir. Yeni qurğuda səthi piksellə analoqlarından fərqli olaraq standart söndürücü polisilicon tərkibli müqavimətin əvəzinə kiçik ölçülü p-n keçidlərdən istifadə olunması irəli sürülmüşdür (şəkil 11). Belə kiçik ölçülü p-n keçidlərdən istifadə edilməsi fotodiodun həndəsi faktorunun artmasına səbəb olmuş, nəticədə qurğunun fotonları qeydetmə effektivliyi artmışdır. Qurğunun ifrat gərginliyini və gücləndirmə əmsalını artırmaq üçün p-n keçidlərin sayını artırmaq təklif edilmişdir. Ardıcıl birləşmiş 5 ədəd mikro p-n keçiddən ibarət mikrorezistoru olan cihaz $\Delta V_{ov} = 5 \times 0,7 \text{ V} = 3,5 \text{ V}$ ifrat gərginliyə kimi işləyə bilər. Bu da təklif olunan qurğunun gücləndirmə əmsalının prototipə nisbətən 5 dəfə artırılmasını təmin edir. Belə ki, gücləndirmə əmsalı $M = (2 \times C_{\text{pik}} \times \Delta V_{ov}) / q \approx 10^6$ qiymətinə çatır, burada ki, $C_{\text{pik}} \sim 25 \text{ fF}$ – pikselin tutumu (yarımkeçirici təbəqənin yarımkeçirici altlığa 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



Şəkil 11. Selvari fotodiodun üst, yan və en kəsiyindən görüntüsü.

verəcəkdir. Bu isə cihazın maya dəyərinin aşağı olmasına imkan verəcəkdir.

Bəşinci fəsildə pikselləri səthdə yerləşən MPPC-S12572-010P, MSFD-3D və pikselləri dərinlikdə yerləşən MSFD (3NK və 3N1P) tipli fotodiodlardan və üzvi (p-terfenil, fiber sintilyator və stilben) və qeyri-üzvi (LFS və NaI) ssintilyatorlarından istifadə edərək qamma şüaları, beta zərrəcikləri, alfa zərrəcikləri və neytronları qeydetmə həssaslığı tədqiq edilmişdir.

İstifadə edilən radioizotop mənbələri Radiasiya Problemləri

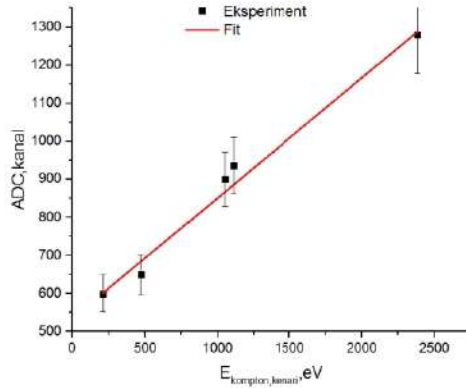
İnstitutunda mövcud olan nöqtəvi mənbələr olmuş və onların enerjiləri 0,032 – 3 MeV intervalında dəyişmişdir. Bu tip elektromaqnit dalğalarının qeyd edilməsi zamanı fotopikin müşahidə edilmə ehtimal çox kiçik olur və yalnız Kompton səpilməsinin effektiv kəsiyi yüksək olur. Belə detektorlarda qamma şüalarının enerjilərini yalnız Kompton kənarına görə hesablanır. ^{137}Cs və ^{228}Th radiozotoplarının buraxdığı qamma şüaların Kompton kənarı 600–850 kanallar oblastında müşahidə edilmişdir. 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.

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 birbaşa qeyd edilməsinə imkan vermişdir. Həmçinin də detektora neytronların təsirini yoxlamaq üçün ^{252}Cf radioizotopundan istifadə edilmişdir. Kaliforniya 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 vermişdir. Hər toqquşmadan kifayət qədər enerji almış protonlar (ionlaşmış hidrogenlər) asanlıqla ssintilyasiya fotonları yaradırlar və yaranmış bu fotonlar siqnalın əmələ gəlməsini təşkil edir. ^{252}Cf izotopunun spektrdən göründüyü kimi neytronlara uyğun gələn hadisələr daha geniş enerji oblastını əhatə etmiş və bunlara uyğun gələn hadisələr spektrin 1000-ci kanalında da müşahidə edilmişdir. P-terfenil və fiber əsasında hazırlanmış bu tip detektorlar yalnız enerjisi 511 keV böyük olan ionlaşdırıcı şüalanmaları qeyd etmək üçün əlverişlidir.

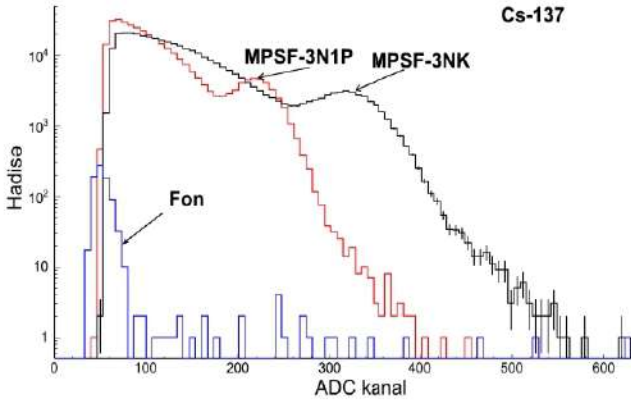
İonlaşdırıcı şüalanmanın yaratdığı ssintilyasiya fotonlarını birbaşa olaraq qeyd etmək üçün pikselləri dərinlikdə yerləşən MSFD-3N1P və MSFD-3NK fotodiodlarından istifadə edilmişdir. İstifadə edilən fotodiodlardan MSFD-3N1P fotodiodlarının piksel sıxlığı

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. İstifadə edilən p-terfenil ssintilyatorunun ölçüləri 3×3×35 mm³ olmuşdur. Müxtəlif enerjili qamma şüaların qeyd edilməsi zamanı müəyyən edilmişdir ki, MSFD və p-terfenil ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar qamma şüaları Kompton kənarına görə fərqləndirir (şəkil 12) və detektorla qeyd edilən siqnalın amplitudu enerjiden asılı olaraq xətti dəyişir: $ADC=535.22+E_{\text{Kompton kənarı}} \times 0.31$. Burada ADC Kompton kənarına uyğun gələn siqnalın amplitudur və $E_{\text{Kompton kənarı}}$ - Kompton kənarına uyğun gələn enerjidir və keV-lə ifadə edilmişdir.

MSFD (3N1P və 3NK) fotodiodları ilə qeyd edilən ¹³⁷Cs radioizotopunun amplituda görə paylanma spektrdən göründüyü kimi MSFD-3N1P fotodiodu ilə qeyd edilən hadisələrin maksimumu ADC-in 240-cı kanalında və MSFD-3NK fotodiodlarında isə bu 340-cı kanalda müşahidə edilmişdir (şəkil 13). 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 monoenergetik 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 spektrdə qamma şüalarının yaratdığı hadisələrlə yanaşı beta zərrəciklərinin yaratdığı hadisələrdə müşahidə edilmişdir. Amplitud paylanma spektrinin 186–300-cü kanallarındakı hadisələrin beta zərrəciklərə məxsus olmasını yoxlamaq üçün qalınlıqları 100 – 2000 mkm arasında dəyişən mis lövhələr detektorla ¹³⁷Cs mənbəsi arasında yerləşdirilmişdir (şəkil 14). Spektrdən göründüyü kimi 100 mkm qalınlıqlı mis lövhə detektorla radioizotop arasında yerləşdirdikdə beta zərrəciklərə uyğun gələn hadisələrin sayı azalmışdır. Mis təbəqələrin qalınlığı 2 mm olduqda

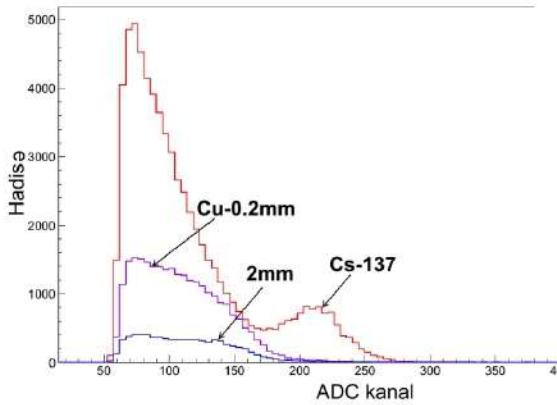


Şəkil 12. MSFD fotodiodu və plastik ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorun kalibrənmə əyrisi.



Şəkil 13. MSFD (3N1P və 3NK) fotodiod və plastik ssintilyator əsasında hazırlanmış detektorun ¹³⁷Cs izotopunun buraxdığı ionlaşdırıcı şüalanmanın amplitud spektri

626 keV enerjili beta zərrəciklər tam udulmuş və bu zaman spektrdə yalnız 662 keV enerjili qamma şüaların Kompton kənarı müşahidə edilmişdir. Bu hissədəki hadisələr mis təbəqənin qalınlığı artdıqca isə spektrdə 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. Müəyyən edilmişdir ki, bu tip detektorların enerjisi 626 keV olan monoenergetik elektrona uyğun gələn enerji ayırdetməsi 22 % olmuşdur (şəkil 15-a). Həmçinin stilben əsaslı

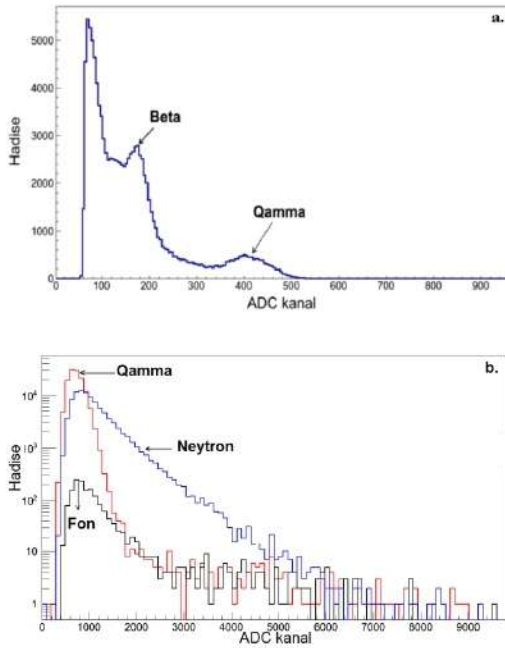


Şəkil 14 Müxtəlif qalınlıqlı mis təbəqə ilə ¹³⁷ Cs radioizotopunun amplituda görə çəkilmiş spektri.

detektorların sürətli neytronları qeyd etmə performansını tədqiq edilmişdir (şəkil 15-b). Göstərilmişdir ki, MSFD və p-terfenil və stilben ssintilyator əsasında hazırlanmış bu tip detektorlardan qamma və neytron sayğaclarının hazırlanmasında istifadə oluna bilər. Lakin bu tip detektorlar spektrometrlərin hazırlanması üçün əlverişsizdir.

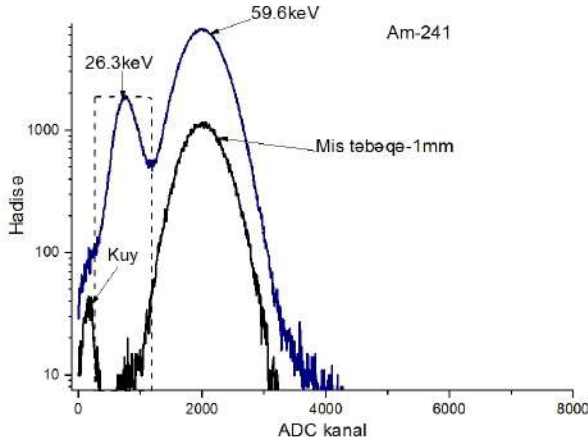
Daha sonra qeyri üzvü LFS-3 ssintilyatoru istifadə edərək qamma şüaları qeyd edilmişdir. İstifadə edilən LFS-3 ssintilyatorlarının sıxlığı 7,35 q/sm³, maksimal şüalandırma intensivliyinin dalğa uzunluğu 416 nm, parçalanma müddəti 36 nsan və foton çıxışı isə 80–85 % (NaI) bərabər olmuşdur. İstifadə edilən

LFS-3 kristalının ölçüləri $3 \times 3 \text{ mm}^3$ seçilmişdir. Təcrübədə istifadə edilən MSFD-3N1P fotodioldlarının parametrləri belə seçilmişdir: işləmə gərginliyi $-94,5 \text{ V}$, qaranlıq cərəyanı -120 nA , gücləndirmə əmsalı 6×10^4 və FQE-si 30% olmuşdur. MSFD fotodioldan alınan siqnalı gücləndirmək üçün gücləndirməsi 36 olan gücləndirici istifadə edilmişdir. İonlaşdırıcı qamma şüa mənbələri olaraq enerjiləri $26,3 \text{ keV} - 1,33 \text{ MeV}$ enerji intervalında dəyişən kalibrlənmə üçün nəzərdə tutulmuş radioizotoplar istifadə edilmişdir. Şəkil 16-da MSFD-3N1P və LFS-3 ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorun $59,6 \text{ keV}$ enerjili qamma şüaların qeyd edilən spektri verilmişdir.



Şəkil 15. P-terfenil və stilben ssintilyatoru və MSFD-3N1P fotodioldu ilə qeyd edilən beta zərrəciklərin, sürətli neytronların və qamma şüaların amplituda görə paylanma spektri.

Ssintilyatorun səthi çox saylı nazik təbəqələrlə örtüldüyündən alfa tipli yüklü zərrəciklərin ssintilyatora daxil olma ehtimalı kəskin azaldılmışdır. Amplitud paylanmasından görüldüyü kimi maksimumları 740-cı və 2012-ci kanalda müşahidə edilən iki fotopik müşahidə edilir. Aşağı enerji oblastına düşən (740-cı kanal) fotopikin 26,3 keV enerjili qamma şüası olmasını yoxlamaq üçün simulyasiya proqramından istifadə edərək 26,3 keV enerjili qamma şüasının tam udulması üçün lazım olan mis təbəqənin qalınlığının 1 mm olması müəyyən edilmişdir. ^{241}Am radioizotopu ilə detektor arasına 1 mm qalınlıqlı mis təbəqə yerləşdirdikdə amplitud paylanma spektrində maksimumu 740 –cı kanal düşən fotopikin tam udulduğu müəyyən edilmişdir. Maksimumu 2012-ci kanalda müşahidə edilən fotopik isə birbaşa olaraq 59,6 keV enerjili qamma şüasına məxsus olmuş və enerji ayırdetməsi ~35 % alınmışdır.

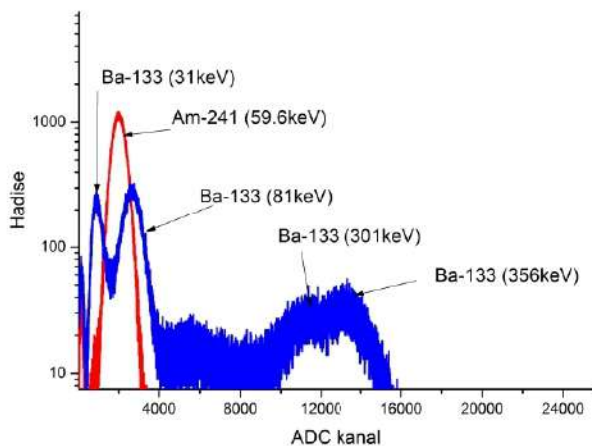


Şəkil 16. LFS-3 ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektorun ^{241}Am radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların amplitud paylanması.

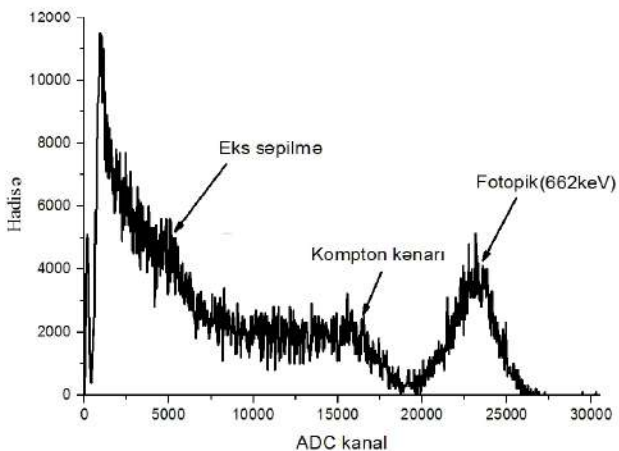
Daha sonra LFS və MSFD-3N1P fotodiodu əsasında hazırlanmış detektorun ^{133}Ba (şəkil 17) radioizotopunun qamma şüaları hesabına yaranan siqnalın amplituda görə paylanma spektri

qurulmuşdur. Amplitud paylanma spektrində 5 fotopikə uyğun gələn maksimumlar müşahidə etmək mümkündür: 921-ci kanal, 2644-cü, 5692-ci, 10552-ci, 12557-ci kanallarda müşahidə edilir. Spekrdə müşahidə edilən piklərdən birinci 921-ci kanala düşən fotopik 31 keV enerjili xarakteristik x-ray şüalanmasına, 2644-cü kanaldakı hadisə 81 keV enerjili qamma şüasının fotopikinə, 5692-ci kanaldakı hadisə isə çox saylı səpilmə hesabına yaranan pikə, 10552-ci kanaldakı hadisə 303 keV enerjili qamma şüasının fotopikinə və 12557-ci kanaldakı hadisə 356 keV enerjili qamma şüasının fotopikinə uyğun gəlmişdir. ¹³³Ba radioizotopu üçün alınmış bu qiymətlər ədəbiyyatdakı qiymətlərlə tam üst-üstə düşmüşdür. Təcrübələrdə ən çox istifadə edilən ¹³⁷Cs radioizotopunun 662 keV enerjili qamma şüasının spektri şəkil 18-də verilmişdir. Spekrdə 662 keV enerjili qamma şüasının fotopiki, Kompton kənarı, əks səpilməsi və ¹³³Ba izotopunun K-səviyyəsinə uyğun xarakteristik 32 keV enerjili x-ray şüaları müşahidə edilir. Spekrdən görüldüyü kimi ARÇ-nin kanalının 17000-ci Kompton kənarına və 23265-cı kanalı isə 662 keV enerjili fotopikə uyğun gəlir. Spekrdən alınan fotopikin parametrlərini tapmaq üçün Gauss paylanmasından istifadə edilmişdir. Fotopikin standart kənara çıxması $\sigma \sim 1074,8$ kanala uyğun gəlmişdir. Fotopikə uyğun gələn enerji ayırdetməsi isə $R=2,35 \times \sigma / X_c$ forması ilə hesablanmışdır. Burada σ –fotopikin standart kənara çıxması və X_c -fotopikin maksimumudur. LFS-3 və MSFD-3NIP fotodiodu əsasında hazırlanmış detektorun 662 keV enerjili qamma şüasının fotopiki üçün enerji ayırdetməsi $R \sim 10,8$ % alınmışdır.

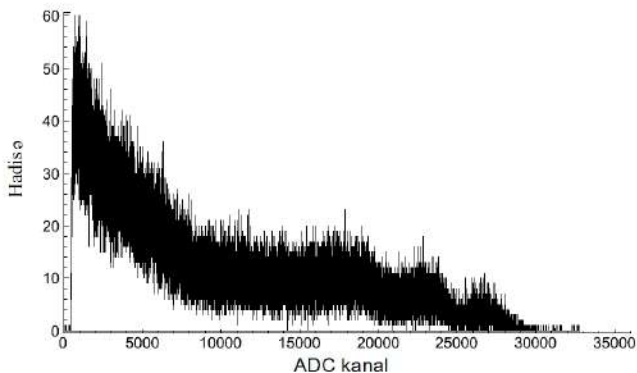
Şəkil 19-da daha yuxarı enerjili qamma şüalarının paylanma spektri verilmişdir. Spekrdən görüldüyü kimi 1,17 MeV və 1.33MeVenerjili qamma şüalara uyğun gələn fotopiklərin maksimumlarının yerlərini müşahidə etmək mümkündür və bu piklər spektrin 23181-ci -ci və 26710- cu kanalda müşahidə edilmişdir. Alınmış spekrdən fotopikin amplitudu təyin edilsədə digər parametrlərini təyin etmək mümkün deyildir. Bu çatışmazlıq ssintilyatorun ölçüsünün kiçik olması ilə bağlı olmuşdur. Beləliklə, LFS və MSFD fotodiodlarından ibarət ssintilyasiya detektoru ilə 26,3 keV–1,33 MeV enerji intervalındakı qamma şüalara uyğun gələn



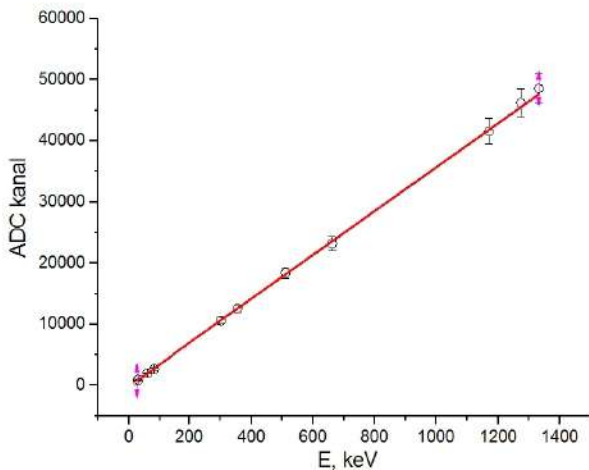
Şəkil 17. LFS-3 ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektorun ^{133}Ba , ^{241}Am və ^{22}Na radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların amplitud paylanması.



Şəkil 18. LFS-3 ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektorun ^{137}Cs radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların amplitud paylanması.

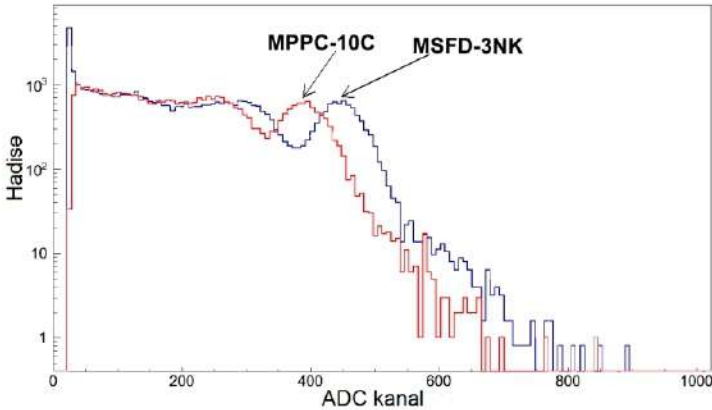


Şəkil 19. LFS-3 ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektorun ^{60}Co radioizotopundan qeyd etdiyi siqnalların amplitud paylanması (atunyor-1.8) .



Şəkil 20. LFS-3 ssintilyator + MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektorun 26,3 keV–1,33 MeV enerji intervalındakı xətti asılılığı

fotopiklərin amplitudunun enerjiden asılılıq əyrisi müəyyən edilmişdir (şəkil 20). Bu zaman yol verilən xəta 5 % olmuşdur. Fotopikin amplituduna uyğun gələn ARC-nin kanalı detektorun üzərinə düşən qamma şüasının enerjisi artdıqca xətti olaraq artır və bu xəttilik yuxarı enerji oblastına qədər davam edir: $ADC(\text{kanal}) = -180 + 35,9 \times E(\text{keV})$. Daha sonra yeni hazırlanmış MSFD-3NK fotodiodları Yaponiyanın Hamamatsu firmasının istehsalı olan MPPC-S12572-010P fotodiodları ilə qamma şüaları qeydetmə performansını tədqiq edilmişdir. Hər iki fotodiodun kalibrənmə əyrisi 0,060–1,27 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. MSFD-3NK fotodiodlarında analoqu ilə müqayisədə 34 % daha kiçik enerji ayırdetməsi alınmışdır (şəkil 21). Bununla yanaşı MSFD-3NK fotodiodu ilə qeyd edilən minimum enerji 26,3 keV olduğu halda MPPC-S12572-010P fotodiodlarında 59,6 keV olmuşdur. Alınmış nəticələrdən MSFD-3NK fotodiodlarının analoqlarına nisbətən spektroskopik təcrübələr üçün daha optimal



Şəkil 21. MSFD-3N1P və MPPC-S12572-010P fotodiodları ilə çəkilmiş ^{137}Cs radioizotopunun spektri

olduğu müəyyən edilmişdir. Bu fəsilin sonunda hazırlanmış fosfiç detektorlarının qamma şüaları beta zərrəciklərdən impulsun formasına

görə ayırması öyrənilmişdir. Bu məqsəd üçün ^{137}Cs radioizotopundan istifadə edilmişdir. Təcrübədə ^{137}Cs mənbəsindən ona görə istifadə edilmişdir ki, onlar 662 keV enerjili qamma şüaları ilə yanaşı enerjisi 626 keV olan monoenergetik beta zərrəciklərində şüalandırır. LFS ssintilyatoru ilə qeydedilən 662 keV enerjili fotopikə uyğun gələn enerji ayırdetməsi ~15 % alınmışdır. Amplitud paylanması müəyyən edilmişdir ki, qamma şüasının fotopikinə və monoenergetik beta zərrəciklərinə uyğun gələn amplitudlar 2,1 dəfə fərqlənmişdir. Lakin reallıqda həm qamma şüasının enerjisi və monoenergetik elektronların enerjisi təqribən 6 % tərtibində fərqlənir. İonlaşdırıcı şüalanmanın enerjiləri yaxın olsada belə kəskin fərqin 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 vermişdir.

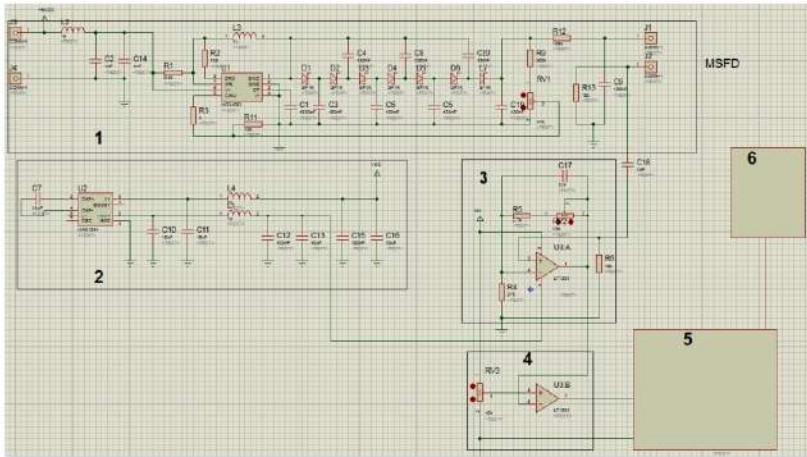
Hazırlanmış detektorda qeyd edilən hadisələrdən hansının qamma və beta zərrəciyə məxsus olmasını müəyyən etmək üçün xüsusi alqoritmdən istifadə edilmişdir. Əsas məqsəd ssintilyatorlarda yaranan hadisələri sönmə müddətinə görə ayırmaqdır. İlkin olaraq rəqəmsal siqnallar normallaşdırılır, maksimumu tapılır, 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 qurulmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, yeni hazırlanmış fosfiç detektoru beta zərrəcikləri və qamma şüaları impulsun formasına görə ayırd edə bilər.

Altıncı fəsilə MSFD fotodiodlar əsasında həssas qamma spektrometrlərin hazırlanması və onların radiasiya davamlılığının öyrənilməsindən bəhs edilmişdir. Hazırlanmış spektrometrik modulun element hissələri, onların işləmə prinsipi və parametrləri haqqında geniş məlumat verilmişdir. Şəkil 22-də hazırlanan qamma spektrometrin elektron dövrəsi verilmişdir.

Dövrədə: 1- DC-DC gərginlik çevrici MSFD fotodiodları yüksək gərginliklə təmin etmək üçün, 2- gərginlik invertoru –gücləndiricini (-) qütblü gərginliklə təmin etmək üçün, 3- siqnal gücləndiricisi -

MSFD fotodioddan alınan siqnalın gücləndirilməsini, 4- komparator-gücləndiricinin çıxışında alınan siqnalın işlənməsinə icazə verməsini, 5- ARÇ- komparatorun çıxışında alınan analog siqnalın rəqəmsal siqnala çevrilməsinə və 6- personal kompyuter- çevrilmiş rəqəmsal siqnalların işlənməsini və saxlanmasını həyata keçirir.

Spektrometrin hər kanalına uyğun gələn hadisələr digərindən 0,12 mV qədər fərqlənir. Bu qiymət minimum qeydedilə bilən amplitud hesab edilir. ARÇ-nin hər kanalına uyğun gələn yük $I=1,2 \times 10^{-4} \text{ mV}/50 \text{ Om}=0,024 \times 10^{-4}=2,4 \times 10^{-6} \text{ A}$, buradanda hər kanalın yükü hesablanmışdır $q=I \times t=2,4 \times 10^{-6} \text{ A} / 5 \times 10^9=0,48 \times 10^{-15} \text{ Kl}$ olmuşdur. Spektrometrin hazırlanması zamanı MSFD-3NK



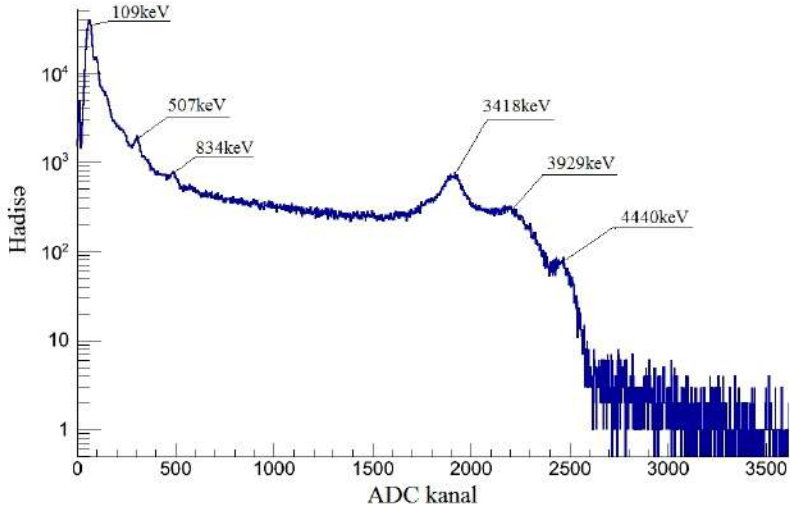
Şəkil 22. Qamma-spektrometrin elektron dövrəsi, 1-DC-DC gərginlik çevirici, 2-gərginlik invertoru(- gərginlik mənbəsi),3-siqnal gücləndirici, 4- komparator, 5-ARÇ MKA analizator və 6- personal kompyuter.

fotodiodundan və LFS ssintilyatorundan istifadə edilmişdir. Spekttrin çəkilməsi zamanı ARÇ-dən istifadə edilmiş və spektrlər C++ programında yazılmış alqoritmlərlə kompüterdə analiz edilmişdir.

Şəkil.23-də PuBe radioizotopundan buraxılan qamma şüalarının yeni SPECTRİG MAPD modulu ilə çəkilmiş amplitud

paylanma spektri verilmişdir. Spektrdən göründüyü kimi yeni hazırlanmış spektrometr öz xətiliyini 4.44 MeV enerji intervalına kimi saxlamışdır.

Bu fəsildə həmçinin MSFD-3NK fotodiodlarının 250 kQr dozada və gücləndiricinin isə 610 kQr dozada radiasiya davamlılığı tədqiq edilmişdir. Şüalanmadan sonra MSFD-3NK fotodiodlarının qaranlıq cərəyanı təqribən 15 dəfə artmışdır. MSFD fotodiodların işləmə gərginliyində (90,5 V) qaranlıq cərəyanının qamma şüalanma dozasından asılılığı şəkil 24-də verilmişdir. Asılılıqdan göründüyü kimi şüalanma dozası artdıqca MSFD fotodiodların qaranlıq cərəyanı artır və bu artım xəttidir: $I_{d_0} = 938,7 + 51,6 \times D$. Burada I_{d_0} - fotodiodun işləmə gərginliyindəki qaranlıq cərəyanı (nA) və D- şüalanma dozası.

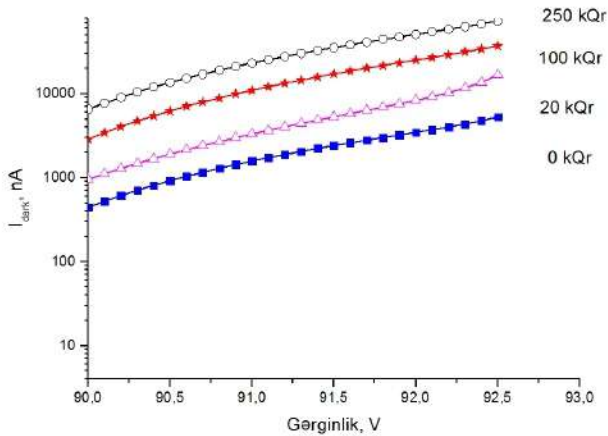


Şəkil 23. SPECTRIG MAPD və NaI ssintilyatoru ilə PuBe radioizotopunun amplitud paylanma spektri .

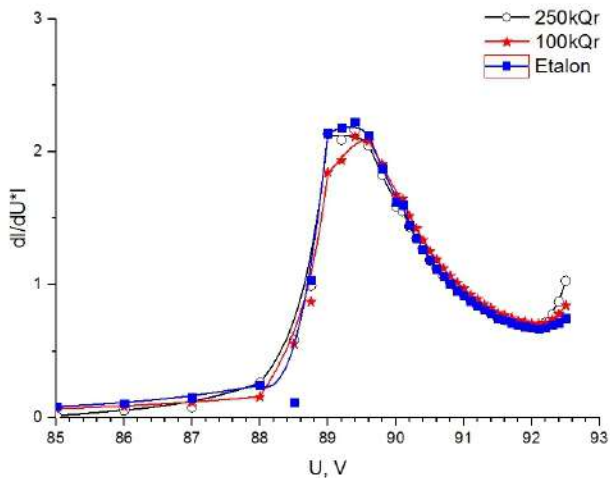
Şüalanmış fotodiodun tam qaranlıq cərəyanının artması fəza yüklər oblastındakı generasiya cərəyanının artmasından asılı olmuşdur. Generasiya mərkəzlərinin yaranmasını isə 1,17 MeV və 1,33 MeV enerjili qamma şüalarının fotoeffekt nəticəsində yaratdığı yuxarı

enerjili elektronlar təşkil edir. Yuxarı enerjili yeni yaranmış elektronlar qəfəsin Si atomlarına kifayət qədər enerji (15 eV böyük) verərək onların qəfəsin düyünlərindən tərək etməsinə səbəb olur. Məhz bu deffektlər yeni generasiya və digər tip (tutma və rekombinasiya) mərkəzləri yaradır. Qamma şüası MSFD fotodidun daxilinə tam nüfuz edə bildiyindən onun yaratdığı deffektlər bütün həcm boyunca bərabər paylanmasını təşkil edir. Bu generasiya mərkəzləri MSFD fotodiodun aktiv həcmi hesab olunan epitaksial təbəqələrdə yaranır. Bu generasiya mərkəzlərinin konsentrasiyası şüalanma dozası artdıqca xətti olaraq artır. 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 ifadə olunur: $I = I_{s\ th} + M \times \dot{I}_{gen}$, burada $J_{s\ eth}$ – səthi cərəyan, J_{gen} – generasiya cərəyanı (güclənmədə iştirak edən), M – selvari fotodiodun gücləndirmə əmsalıdır. İfadədən göründüyü kimi şüalanma dozası hesabına yaranan generasiya cərəyanı artdıqca MSFD fotodiodların tam cərəyanı xətti olaraq artır.

Şəkil 25-də qamma şüaları ilə şüalandırılmış fotodiodların differensial cərəyanının $\Delta \dot{I} = (\dot{I}_n - \dot{I}_{n-1})$ differensial gərginliyə $\Delta U = (U_n - U_{n-1})$ nisbətininin gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur. Ölçülən kəmiyyətlərin hər ikisində Keithley-6487 pikoampermetrlə təyin edilmişdir. Differensial asılılıqda qaranlıq cərəyanın tədricən kəskin dəyişdiyi gərginlik oblastına baxılmışdır. MSFD-3NK fotodiodlarında bu gərginlik oblastı 88 V gərginlikdən başlayaraq daha yuxarı gərginliyə kimi davam edir. Gərginliyin 88-89 V intervalında qaranlıq cərəyanın artma sürəti kəskinləşir və artır. Bu hadisə artıq p-n keçiddə selvari prosesin baş verməsi ilə bağlı olmuşdur. Gərginliyin sonrakı 89-89,6 V intervalındakı qiyməti əksər hallarda deşilmə gərginliyinə uyğun gəlir və deşilmə gərginliyi hər üç fotodiod üçün 89,3 V qiymətinə uyğun gəlmişdir. Artıq gərginliyin sonrakı qiymətlərində selvari proses söndürücü müqavimət vasitəsi ilə söndürülür və qaranlıq cərəyanın dəyişmə sürəti yavaşır. Gərginliyin 91,6–92,3 V intervalında differensial cərəyanın dəyişməsi sürətlə azalmış və doyma halına yaxınlaşmışdır. Bu hal ən optimal hal hesab edilir. Bu



Şəkil 24. Mikro-pikselli selvari fotodiodun qaranlıq cərəyanının müxtəlif dozalarda gərginlikdən asılılığı.



Şəkil 25. Mikro pikselli selvari fotodiodun differensial qaranlıq cərəyanının gərginliyə nisbətinin müxtəlif dozalarda gərginlikdən asılılığı.

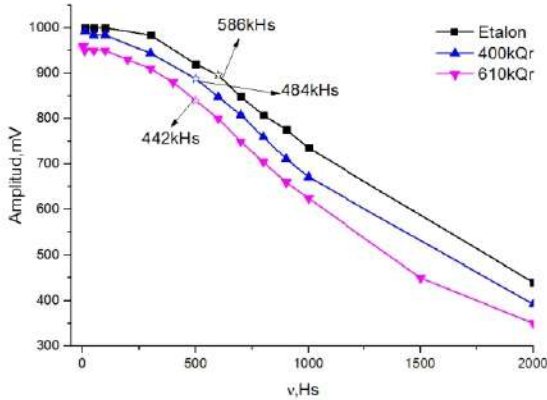
halda fotodiodun gücləndirmə əmsalı, FQE-si və enerjiyə görə ayırdetməsi optimal qiymət alır. Bu səbəbdəndə bu oblast işləmə gərginliyi adlandırılır. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində differensial cərəyanın artması kəskinləşir. Belə dəyişmə isə fotodiodun strukturunda idarə olunmaz dəşilmələrin əmələ gəlməsi ilə bağlıdır. Beləliklə şüalanma dozasının 250 kQr qiymətindən sonra fotodiodun dəşilmə və işləmə gərginliyində ciddi dəyişmələr müşahidə edilməmişdir. Həmçinində şüalanmış MSFD-3NK fotodiodlarının əsas tutumunun dəyişməsində ciddi dəyişiklik müşahidə edilməmişdir.

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.

Bu fəsilə LT-1357 əməliyyat gücləndiricisi əsasında hazırlanmış siqnal gücləndiricisinin xassələrinin şüalanma dozasından asılılığı tədqiq edilmişdir. LT-1357 əsasında hazırlanmış gücləndiricinin gücləndirmə əmsalı 10 və onun buraxma zolağı 2,5 MHz olmuşdur. Gücləndiricini gərginliklə qidalandımaq üçün ± 6 V gərginlik mənbəsi istifadə edilmişdir. LT-1357 əməliyyat gücləndiricisi əsasında hazırlanmış siqnal gücləndiricisinin çıxışından alınan gücləndirilmiş siqnalın parametrləri Hantek DSO-5202 ossiloskopu 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. 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.

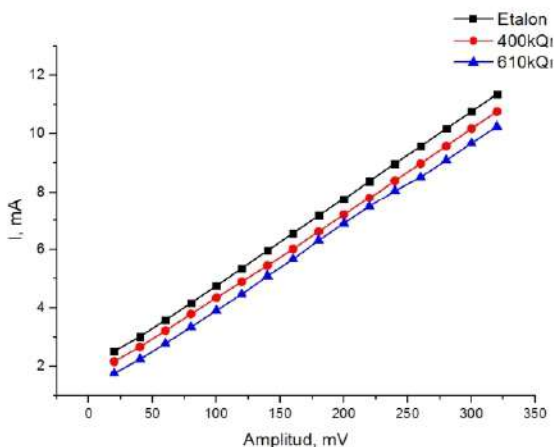
Gücləndiricinin buraxma zolağının eni 0–586 kHz intervalını əhatə etmişdir (şəkil 26). Şüalanma dozasının 400 kQr qiymətlərində isə gücləndiricinin buraxma zolağının eni 0–484 kHz əhatə etmişdir. Bu zaman gücləndiricinin buraxma zolağının eni 17 % azalmışdır. Şüalanma dozasının 610 kQr qiymətində isə 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.



Şəkil 26 Gücləndiricinin buraxma zolağının dozadan asılılığı.

Bununla yanaşı gücləndiricilərin cərəyan tələbatında şüalanma dozasından asılı olaraq dəyişməsidə tədqiq edilmişdir (şəkil 27). Generatordan 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.



Şəkil 27. Şüalanmış gücləndiricidə amplitudun cərəyan tələbatından asılılığı.

Beləliklə siqnal gücləndiricilərinin belə yüksək dozada xassələrinin dəyişməsinə baxmayaraq bunlar NaI və CsI əsasında hazırlanmış spektrometrlərdə uğurla istifadə oluna bilər.

NƏTİCƏ

Dissertasiya işində əldə edilən elmi yeniliklər və əsas nəticələr ümumiləşdirilərək 9 bənddə öz əksini tapmışdır:

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 üstəliyə.
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 şüaların enerjisini Kompton kənarına görə fərqləndirə bilir və bu detektorla qeyd edilən signalın amplitudu enerjidən asılı olaraq xətti dəyişir, yəni $ADC = 535.22 + 0.31 \times E_{Kk}$.
7. MSFD-3NK və qeyri üzvi ssintilyator əsasında yeni qamma spektrometr hazırlanmışdır. Məlum olmuşdur ki, 26,3 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

Dissertasiyanın əsas nəticələri üzrə çap olunmuş işlərin siyahısı

1. Əhmədov F., Mikro piksellli selvari fotodiolar və p-terfenil əsaslı radiasiya detektorları // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, Cild 21(3) , 2019. s,37-43.
2. Sadıqov Z.Y., Yarımqeçirici fotoelektron gücləndirici/ Əhmədov F.İ, Əhmədov Q.S., Sadıqov A.Z., Süleymanov .S.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, -2019, vol. XXV, Number 03, -p.15-19.
4. Əhmədov F., Selvari fotodiodların radiasiya davamlılığının öyrənilməsi// Azerbaijan Journal of Physics, -2019 vol. XXV, Number 03, , -s.7-12.
5. Əhmədov F., Silisium əsaslı fotoelektron gücləndiricilər // Gənc tədqiqatçı, -2019, Cild 5, №2, -s.5-16.
6. Əhmədov F., Mikro piksellli selvari fotodiodlar əsasında radiasiya detektorlarının hazırlanması // Gənc tədqiqatçı, -2019, Cild 5, №2,- s.33-43.
7. Ahmadov F., Development of compact radiation detectors based on MAPD photodiodes with Lutetium Fine Silicate and Stilbene scintillators/ Ahmadov G., Garibov A., Guliyev E., Khorev S., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S.,// Journal of Instrumentation,- 2015, Vol.10,- p.1-7.
8. Sadygov Z., A new method to improve multiplication factor in micro-pixel avalanche photodiodes with high pixel density/ Ahmadov F., Ahmadov G., Sadigov A., Suleymanov S., Madatov R. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section, -2016, Vol. 824, -p.137–138.
9. Ahmadov F., Investigation of disadvantages of LFS scintillator/ Sadygov Z., Jafarova E., Madatov R., Ahmadov G., Sadigov A., Suleymanov S.,// ANAS. Journal of Physics, -2016, Vol. XXXVI, Number 5, -p. 20-22.
10. Ahmadov F., New gamma detector modules based on

micropixel avalanche photodiode/ Ahmadov G., Sadigov A., Suleymanov S., Zerrouk F. //Journal of Instrumentation, -2017, Vol. 12, №2, -p.1-7.

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

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

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

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

15. Holik M, Miniaturized read-out interface "Spectrig MAPD" dedicated for silicon photomultipliers/ Ahmadov F, Ahmadov G, Akbarov R, Berikov D, Mora Y, Nuruyev S, Pridal P, Sadygov A, Sadygov Z, Zich J // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment,-2020, A978, -p. 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" , -Minsk, Belarus:-26 - 30 September, -2016,- 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), -Montonegro: -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 //TWORID-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, -Tours, France: -2-8 July, -2017, -p.167.
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// International Conference on the Advancement of Silicon Photomultipliers, -Schwetzingen, Germany:-11-15 June, -2018,-p.1
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, -Астана, Казахстан: -12-15 Сентябрь, -2017, -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), -Hiroshima, Japan: -Dec 15-18,-2019, -p.1.

Dissertasiyanın müdafiəsi « _____ » 2021-ci il tarixdə, saat _____-da AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində fəaliyyət göstərən BED 1.21 Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1143, Bakı, B.Vahabzadə küçəsi, 9.
e-mail: radiasiya@irp.science.az

Dissertasiya ilə AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunun elmi kitabxanasında tanış olmaq mümkündür

Dissertasiya və avtoreferatın elektron versiyaları AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunun rəsmi internet saytında yerləşdirilmişdir

Avtoreferat « _____ » 2021-cı il tarixində zəruri ünvanlara göndərilmişdir.

Çapa imzalanıb: 22.05.2021

Kagızın formatı: A5

Həcm: 78860 işarə

Tiraj: 100 ədəd