

**AZƏRBAYCAN MİLLİ ELMLƏR AKADEMİYASI
RADİASIYA PROBLEMLƏRİ İNSTİTUTU**

Əlyazması hüququnda

FƏRİD İBRAHİM OĞLU ƏHMƏDOV

**SİLİSİUM ƏSASLI MİKRO-PIKSELLİ SELVARI
FOTODİODLARIN RADİASIYA DAVAMLILIĞININ
TƏDQIQI**

2225.01 – Radiasiya materialşünaslığı

Fizika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş
dissertasiyanın

AVTOREFERATI

BAKI-2013

Dissertasiya işi AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunda və Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun İ.M. Frank adına Neytron Fizikası və V.İ. Veksler və A.M. Baldin adına Yüksək Enerjilər Fizikası laboratoriyasında yerinə yetirilmişdir

Elmi rəhbərlər:

F.-r.e.d , prof

R.S.Mədətov

F.-r.e. d

Z.Y.Sadıqov

Rəsmi opponentlər:

F.-r.e.d , prof .

A. Z. Bədəlov

F.-r.e.d , prof.

R.M. Sərdarlı

Aparıcı təşkilat: AMEA-nın **H.M. Abdullayev** adına Fizika İnstitutu ("Nüvə Tədqiqatları" laboratoriyası)

Dissertasiyanın müdafiəsi **«01» noyabr 2013 cü il** saat **«15⁰⁰» -da** Azərbaycan MEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutu nəzdində D.01.221 sayılı Dissertasiya Şurasının iclasında keçiriləcək.

Ünvan: AZ 1143, Bakı şəhəri, B. Vahabzadə küç.9.

Dissertasiya işi ilə Azərbaycan MEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunun kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat **«25» sentyabr 2013 cü ildə** göndərilmişdir.

**Dissertasiya Şurasının
elmi katibi, fizika-riyaziyyat
elmləri doktoru**

O.Ə. Səmədov

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Mövzunun aktuallığı. Son dövrlərdə yüksək enerjilər fizikası, astronomiya, tibb və digər sahələrdə əldə olunmuş nailiyyətlər və inkişaf artıq yeni nəsil radiasiya qeydedicilərinin (detektorların) yaradılmasına təkan vermişdir. Belə detektorlardan ən çox yayılan “ssintilyator+ fotoqeydedici” cütliyündən ibarət olan ssintilyatorlu detektorlardır.

XX əsrin sonlarına qədər zərrəciklərin ssintilyatorada yaratdığı foto signalın oxunması üçün vakuum fotoelektron gücləndiricilərindən (FEG) geniş istifadə edilirdi. Ancaq bir çox təcrübələrdə ssintilyatorlardan alınan signalı oxumaq üçün istifadə edilən fotoqəbuledicilərin kompakt, zərbəyə davamlı, yüksək maqnit sahəsində işləmə qabiliyyətiniə, aşağı işləmə gərginliyinə malik olması həmçinin yüksək radiasiya dozasına davam gətirməsi kimi şərtlər tələb edilir. Sadalanan bu çatışmamazlıqların həlli üçün istifadə edilə biləcək ən əlverişli fotoqeydedicilər silisium əsasında hazırlanmış selvari fotodiodlar (SFD) hesab edilir. Keçən əsrin 90-cı illərindən başlayaraq SFD-ların yeni nəslə olan səthi mikro-pikselli selvari fotodiodlar (MPSF) bu sahədə geniş tətbiq olunmağa başlandı. MPSF tipli fotoqeydedicilər yüksək gücləndirmə əmsalına ($10^4 - 10^6$) malik olduqlarına görə onları bərk cism fotoelektron gücləndiriciləri də adlandırırlar.

Hal hazırda MPSF fotoqeydedicilərin iki növü daha geniş yayılmışdır. Birinci növ MPSF-da ölçüləri 20–50mkm intervalında olan və bir-birilə əlaqəsi olmayan mikro-piksəllər (kiçik $p-n$ – keçidlər) cihazın bilavasitə səthində yerləşdirilir. Hər bir piksel xüsusi mikrorezistor vasitəsi ilə ümumi kontakt xətlərinə birləşir. Mikrorezistorlar və ümumi kontakt xətləri piksəllər arasında yerləşdirilir ki, bu da cihazın effektiv həssas sahəsini azaldır. İkinci növ MPSF-da bu nöqsanlar aradan qaldırılaraq, ölçüləri 2–5mkm intervalında olan mikro-piksəllər cihazın səthindən 4mkm dərinlikdə yerləşdirilmişdir ki, onların nə mikrorezistorları, nə də piksəllər arasında yerləşən ümumi kontakt xətləri var. Bu növ MPSF-lar bir çox elm və texnika sahələrində, o cümlədən kalorimetrlərdə (Cenevrədə Compact Muon Solenoid Detector (CMS), Argonne Tandem Linear Accelerator System (ALICE), Dubnada Nuclotron-based Ion Collider Facility (NICA) proyektləri) və tibbi skannerlərdə (Positron Emission Tomography – PET) istifadə edilmək üçün daha perspektivli namizədlər sayılırlar. Buna baxmayaraq MPSF diodlar radiasiya şəraitində kifayət qədər tədqiq olunmayıblar.

Dissertasiya işinin məqsədi - silisium əsaslı mikro-pikselli selvari fotodiodlarda fotosiqnalların yaranma mexanizminə yüklü zərrəciklərin təsir xüsusiyyətlərinin müəyyən edilməsi və qamma, alfa ssintilyatorlu qeydedicilərin işlənməsi üçün praktiki təkliflərin verilməsindən ibarətdir.

Qarşıya qoyulan məqsədə çatmaq üçün aşağıdakı məsələlərin həlli nəzərdə tutulmuşdur.

- MPSF tipli fotoqəbuledicinin yüklü zərrəciklərə qarşı radiasiya davamlılığının öyrənilməsi;
- 5,5 MeV enerjili alfa zərrəcikləri qeyd etmək üçün MPSF diod və ssintilyator əsaslı detektorun işlənməsi və enerji ayırdetməsinin tədqiqi;
- Müxtəlif enerjili qamma kvantları aşkar edə bilən MPSF diod əsaslı, ssintilyatorlu detektorun işlənməsi, enerjiyə görə ayırdetməsinin və amplituda görə paylanmasının tədqiqi;
- MPSF diodlar əsasında hazırlanmış ssintilyatorlu detektorların qamma şüaları və alfa zərrəcikləri bir-birindən impulsa görə ayırdetməsinin tədqiqi;
- MPSF tipli fotoqəbuledicinin gücləndirmə əmsalının aşağı və yüksək gərginlik intervalında tədqiqi;
- MPSF tipli fotoqəbuledicilərin tam bərpa olunma müddətinin azaldılma mexanizmlərinin araşdırılması;

İşin tədqiqat obyektı silisium əsasında hazırlanmış və mikro-piksəlləri dərinlikdə yerləşmiş selvari fotodiodlardır. Tədqiqat obyektinin xassələrini müxtəlif radiasiya şəraitində öyrənərkən cihazdan alınan siqnalın amplitudunun riyazi modelləşdirilmə metodundan istifadə edilmişdir.

Tədqiqat nəticəsində əldə edilən elmi yeniliklər aşağıdakılardan ibarətdir:

- MPSF tipli fotoqəbulediciləri yüklü zərrəciklərlə şüalandırıqdan sonra diodun qaranlıq cəryanı artır, gücləndirmə əmsalı isə azalır;
- MPSF tipli fotoqəbuledicilərin yüklü zərrəciklərə qarşı davamlılığı, strukturda yerləşdirilmiş piksellərin sıxlığından asılıdır və piksellərin sıxlığı artdıqca diodların radiasiya davamlılığı artır;
- MPSF tipli fotoqəbuledicilərin analoqlarına nisbətən daha yüksək radiasiya davamlılığına səbəb, birinci epitaksiya layında radiasiya defektləri tərəfindən yaranan əlavə yüklərin selvari proses gedən (baş verən) sahəyə düşə bilməməsidir;

- MPSF diodları əsasında hazırlanmış ssintilyatorlu detektorlar qamma şüaları və alfa zərrəcikləri yaratdığı impulsların formasına görə bir-birindən ayırdetməyə imkan verir;
- MPSF-ların gücləndirmə əmsalını deşilmə gərginliyindən aşağı və yüksək gərginlik intervalında təyin etmək üçün yeni metod təklif edilmişdir;
- MPSF tipli fotoqəbuledicilərin piksellərinin tam bərpa olunma müddəti həmin pikselləri əhatə edən potensial çəpərin hündürlüyü ilə təyin edilir;
- MPSF tipli fotoqəbuledicilərdə gücləndirmə əmsalının və qaranlıq cərəyanın artması, piksellərin tam bərpa olunma müddətinin azalmasına səbəb olur;

İşin praktik əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, ilk dəfə olaraq MPSF tipli fotoqəbuledicilərin işlək parametrlərinin yüksək radiasiya seli şəraitində dəyişməsinin fiziki modeli işlənmişdir. Bu modelə əsaslanaraq MPSF diodun həm radiasiya davamlılığını, həm də bərpa olunma müddətini yaxşılaşdırmaq üçün təkliflər hazırlanmışdır. İşdə alınan elmi nəticələr əsasında hazırlanmış yeni tipli MPSF diodun piksellərinin bərpa olunma müddəti $2,6 \times 10^4$ dəfə azaldılmışdır. Yeni hazırlanmış diodlar yüksək enerjilər fizikasında, astronomiyada, tibbdə, qamma spektroskopiyada və sənayedə geniş istifadə olunma imkanlarına malikdirlər.

Müdafiyyə çıxarılan elmi müddəalar aşağıdakılardan ibarətdir:

1. MPSF tipli fotoqəbuledicilərin fiziki xassələrinə 4,8MeV enerjili alfa zərrəciklərin $\sim 6,3 \times 10^8$ alfa/sm² və 150MeV enerjili protonların 1×10^{11} proton/sm² dozasının təsirinin öyrənilməsi;
2. MPSF diodları və LFS ssintilyatoru əsasında 59,6keV–1,33MeV enerjili qamma şüaları aşkaretmə qabiliyyətinə malik detektorların hazırlanması;
3. MPSF tipli fotoqəbuledicilərin gücləndirmə əmsalını deşilmə gərginliyindən aşağı və yüksək gərginlik intervalında tədqiq etməyə imkan verən yeni metodun işlənməsi;
4. MPSF tipli fotoqəbuledicilərdə piksellərlə birinci epitaksia layı arasında yaranan potensial çəpərin hündürlüyünün aşqar atomlarının səthi sıxlığı ilə idarə edilməsi;
5. MPSF tipli fotoqəbuledicilərin piksellərinin tam bərpa olunma müddətini azalda biləcək konstruktiv və fiziki faktorların araşdırılması;

6. Kiçik bərpaolunma müddəti olan yeni MPSF diodun fiziki iş prinsipi.

Dissertasiya işinin sınağı: Dissertasiya işinin əsas nəticələri International Conference on Perspectives of Peaceful use of Nuclear Energy (november, 2010, 2012 Baku-Azerbaijan), Международная Конференция «Инженерия Сцинтилляционных Материалов и Радиационные Технологии» (ноября, 2010, Харьков, Украина, 2012, Дубна, Россия), 19-20 th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, ISINN-19 (May, 2011, Dubna, Russia, 2012, Alushta, Ukraine), XV JINR Annual Young Scientists and Specialists AYSS-11 (February, 2011, Dubna, Russia), XIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто и наноэлектронике (ноября, 2011, Санкт-Петербург, Россия), International Workshop PhotoDet-2012 (june, 2012, Paris, France), kimi beynəlxalq konfrans və seminarlarda müzakirə edilmişdir.

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

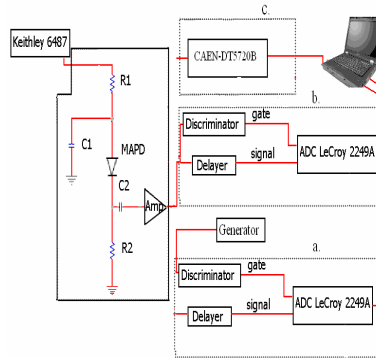
Dissertasiyanın quruluşu və həcmi. Dissertasiya işi mündəricat, şərti işarələrin siyahısı, giriş, 4 fəsil, əsas nəticələr, əsas nəticələr üzrə çap olunmuş işlərin siyahısı və 133 adda istifadə edilən ədəbiyyat siyahısı olmaqla ümumilikdə 163 səhifədən, o cümlədən 102 kompyuter çap səhifəsi, 64 şəkil və 5 cədvəldən ibarətdir.

DISSERTASIYA İŞİNİN ƏSAS MƏZMUNU

Girişdə dissertasiya işinin aktuallığı, məqsədin formalaşdırılması, əsas tapşırıqlar, elmi nəticələrin yeniliyi, işin təcrübi əhəmiyyəti göstərilmiş, həmçinin müdafiəyə çıxarılan əsas müddəalar, işin aprobeasiyası və işin əsas məzmunu qısa şəkildə şərh edilmişdir.

Birinci fəsildə yüksək enerjili ionlaşdırıcı zərrəciklərin (proton, alfa, elektron) və qamma şüalarının maddə ilə qarşılıqlı təsiri zamanı baş verən hadisələrə baxılmışdır. Eləcə də bu fəsildə ionlaşdırıcı radiasiyanı qeyd etmək üçün istifadə edilən yarımkeçirici detektorlar və onların çatışmamazlıqları haqqında ədəbiyyat məlumatları verilib. Göstərilmişdir ki, digər fotoqəbuledicilərə nisbətən selvari fotodiodlar mövcud olan çatışmamzlıqların aradan qaldırılması üçün ən əlverişli qeydedicilərdir.

İkinci fəsildə selvari fotodiodları xarakterizə edən kəmiyyətləri və ssintilyatorlu detektorlardan oxunan siqnalları ölçmək üçün yığılan dövrə verilmişdir (şək.1). Selvari fotodiodların gücləndirmə əmsalını və FQE-ni dəşilmə gərginliklərindən yuxarı gərginliklərdə ölçmək üçün məlum zəif işıq seli üsulundan istifadə edilmişdir. Selvari MPSF diodların gücləndirmə əmsallarının $\sim 10^5$ tərtibdə, FQE-nin isə 30% (450–550nm) və küy əmsalının $F \sim 1,032$ tərtibdə olduğu müəyyən edilmişdir.

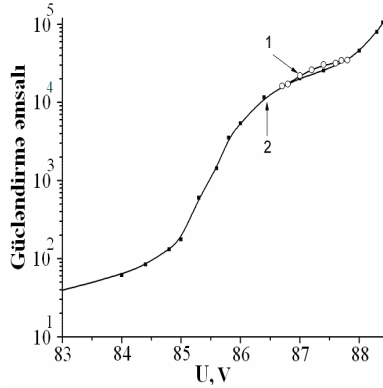


Şək. 1. MPSF diodlarından siqnalın oxunması üçün istifadə edilən tam dövrə: a- gücləndirmə əmsalını və küy əmsalını təyin etmək üçün istifadə edilən dövrə hissəsi; b, c- qamma fotonları və alfa zərrəcikləri təyin etmək üçün istifadə edilən dövrə hissəsi.

Bu fəsildə selvari fotodiodların gücləndirmə əmsalını aşağı və yüksək gərginliklər intervalında dəyişməsinə təyin etməyə imkan verən yeni metod hazırlanmışdır. MPSF diodun gücləndirmə əmsalının kiçik qiymətlərində dioddan axan fotocərəyanı daha dəqiq ölçmək üçün işıqlandırıcı dioda tətbiq edilən eyni amplitudlu mənfi düzbucaqlı impulsun tezliyi 200kHz–5kHz, gücləndirmə əmsalının böyük qiymətlərində isə 4kHz–1kHz arasında dəyişdirilmişdir. Başqa sözlə gücləndirmə əmsalı təyin edilərkən fotodiodun normal rejimdə işləməsi tam təmin olunmuşdur. Gücləndirmə əmsalını tapmaq üçün gücləndirmə əmsalının vahiddən böyük olduğu haldakı ($M \gg 1$) fotocavabın orta qiymətini, gücləndirmə əmsalı vahid olduğu haldakı ($M \rightarrow 1$) fotocavabın orta qiymətinə nisbəti təyin edilir və

həmin qiymət tezliklərin nisbətinə vurulur:
$$M = \frac{A(M)}{A(M \sim 1)} \times \frac{\nu_M}{\nu_1}.$$

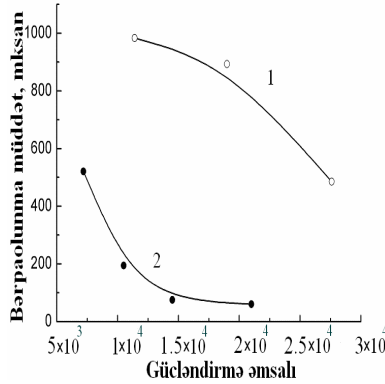
Burada, $A(M)$, v_M , $A(M \rightarrow 1)$ və v_1 gücləndirmə əmsalı M olduğu haldakı fotocavabın orta qiymətləri və onlara uyğun gələn impulsun tezliyidir. Yeni metodla tapılan qiymətlərin zəif işıq seli metodu ilə tapılan qiymətlərlə üst-üstə düşdüyü müəyyən edilmişdir (şək.2). Təklif edilən yeni üsul mövcud zəif işıq seli metodundan fərqli olaraq MPSF diodların gücləndirmə əmsalını geniş gərginliklər intervalında dəyişməsinə və radiasiyanın gücləndirmə əmsalına təsirini müəyyən etməyə imkan verir.



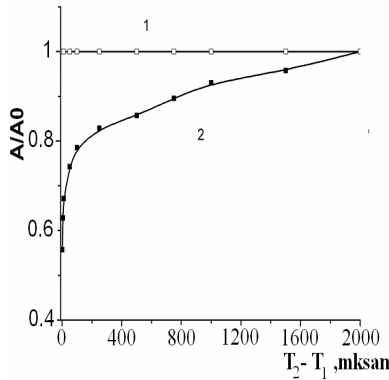
Şək. 2. MPSF- 3N tipli fotodiodun gücləndirmə əmsalının gərginlikdən asılılığı: 1- gücləndirmə əmsalının zəif işıq seli metodu ilə təyin edilmiş qiymətləri; 2- gücləndirmə əmsalının fotosiqnalın impuls metodu ilə təyin edilmiş qiymətləri.

İkinci fəsildə həmçinin MPSF diodların bərpaolunma müddətləri və onların gücləndirmə əmsalından asılılığı tədqiq edilmişdir (şək.3). Göstərilmişdir ki, gücləndirmə əmsalı artdıqca bərpaolunma müddəti azalır. Gücləndirmə əmsalının aşağı qiymətlərində piksellərə toplanan elektronlar başlanğıcda potensial çəpərin hündürlüyünü azaldır və elektronların əksər hissəsi (90%) sürətlə boşalır və piksellərə toplanan yükün yenidən azalması potensial çəpərin hündürlüyünü artırır. Bu isə piksellərdə qalan elektronların (10%) axınıni ləngidir ($>1000\text{mksan}$). Gücləndirmə əmsalının böyük qiymətlərində selvari oblastda yaranan elektronların çox kiçik hissəsinin potensial çuxuru tam doldurması və yaranan elektronların əksəriyyətinin ani olaraq katoda axmasına imkan verir. Yaranan fotosiqnal potensial çuxurlara toplanan yükədən zəif asılı olur. Bu səbəbdən də gücləndirmə əmsalı artdıqca bərpaolunma müddəti azalır.

Həmçinin, MPSF tipli fotoqəbuledicilərdə potensial çəpərin hündürlüyünün piksellərdəki aşqar atomlarının səthi sıxlığının $1,6 \times 10^{12}$ atom/sm² qiymətindən başlayaraq kəskin azalması müşahidə edilmişdir. Piksellərdəki n-tip aşqar mərkəzlərinin səthi sıxlığını $1,3 \times 10^{12}$ atom/sm² seçməklə piksellər həcmi yüklər oblastı ilə tam əhatə olunmuşdur (şək.4).



Şək. 3. MPSF-3A (2-ci əyri) və MPSF-3N (1-ci əyri) tipli diodların bərpaolunma müddətlərinin gücləndirmə əmsalından asılılığı.

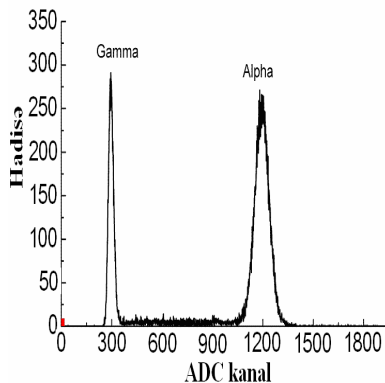


Şək. 4. Yeni tez bərpaolunma müddətli MPSF (1-ci əyri) və MPSF-3B (2-ci əyri) tipli selvari diodların eyni bir gücləndirmə əmsalında fotosiqnalın amplitudlar (A/A_0) nisbətinin impulsların sürüşmə müddətindən asılılığı.

Bu isə piksellərlə birinci epitaksia layı arasında potensial çəpərin hündürlüyünün kəskin azalmasına imkan vermişdir. Bu tip yeni hazırlanmış MPSF diodların bərpaolunma müddətləri 50nsan-dən kiçik alınmışdır (şək.4). Bərpaolunma müddətinin belə kiçik alınması MPSF diodların fotonları sayma sürətini 1kHs-dən 20MHs-ə qədər yüksəltməyə imkan verir.

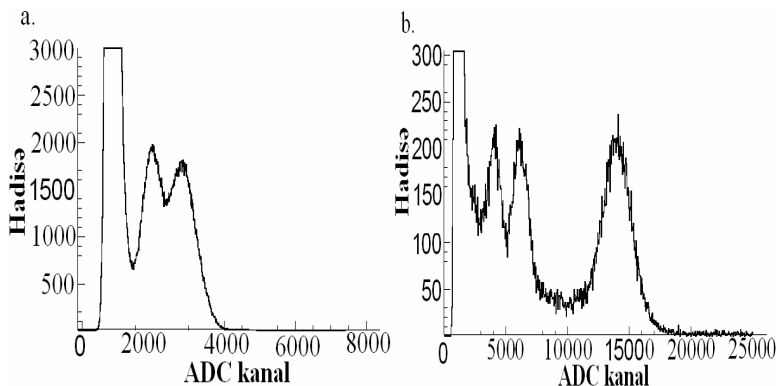
Üçüncü fəsildə 5,5MeV enerjili alfa zərrəcikləri birbaşa və LFS-8 qeyri-üzvi ssintilyatoru ilə ($3 \times 3 \times 0,5 \text{ mm}^3$) qeyd etmək üçün normal rejimli MPSF və Heyger rejimli selvari fotodiodlardan istifadə edilmişdir. Alfa şüalanma mənbəyi olaraq 5,5MeV enerjili ^{241}Am izotopundan istifadə edilmişdir. Şüalanma mənbəyindən buraxılan alfa zərrəciyi öz enerjisinin təqribən $\sim 1 \text{ MeV}$ -nu havada, qalan hissəsini isə (4,5MeV) ssintilyatorun daxilində itirir. MPSF diodunun işləmə gərəginliyində 4,5 MeV enerjili alfa zərrəcikləri üçün 8,6% enerji ayırdetməsi alınmışdır (şək.5).

Bu fəsildə həmçinin qamma şüalarını qeyd etmək üçün istifadə edilən qeyri-üzvi ssintilyator və onu xarakterizə edən parametirlər haqqında qısa məlumat verilib. LFS-8 qeyri-üzvi ssintilyatoru ($3 \times 3 \times 0,5 \text{ mm}^3$, $2 \times 2 \times 10 \text{ mm}^3$, $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$) və MPSF diodları əsasında hazırlanmış qeydedicilərlə 59,6keV–1,33MeV enerji intervalındakı qamma şüaları tədqiq edilib. Qamma şüa mənbələri olaraq ^{241}Am , ^{109}Cd , ^{57}Co , ^{139}Ce , ^{113}Sn , ^{137}Cs və ^{60}Co nöqtəvi mənbələr istifadə olunubdur. ^{241}Am radioizotopundan buraxılan 59,6keV enerjili qamma şüaları üçün enerji



Şək. 5. LFS-8 ssintilyatoru və MPSF-1P diodu əsasında hazırlanmış qeydedici ilə ^{241}Am radioizotopundan buraxılan alfa zərrəciyinin və qamma şüasının amplituda görə çəkilmiş spektri.

ayır etməsi 30% alınmışdır. Daha sonra isə LFS-8 ssintilyatoru və MPSF diodu əsasında hazırlanmış qeydedici ilə digər izotoplardan buraxılan qamma şüaları qeyd olunmuşdur. Bu qeydedicilərin iki yaxın enerjili qamma şüalarını ayır etməsini yoxlamaq üçün ^{241}Am – ^{109}Cd və ^{139}Ce – ^{113}Sn radioizotoplarının buraxdığı qamma şüaları eyni vaxtda qeyd edilmişdir (şək.6 a. və b.). Məlum olmuşdur ki, bu tip qamma qeydediciləri enerjiləri bir-birindən 47% fərqlənən aşağı enerjili qamma şüaları aydın şəkildə ayıra bilir.

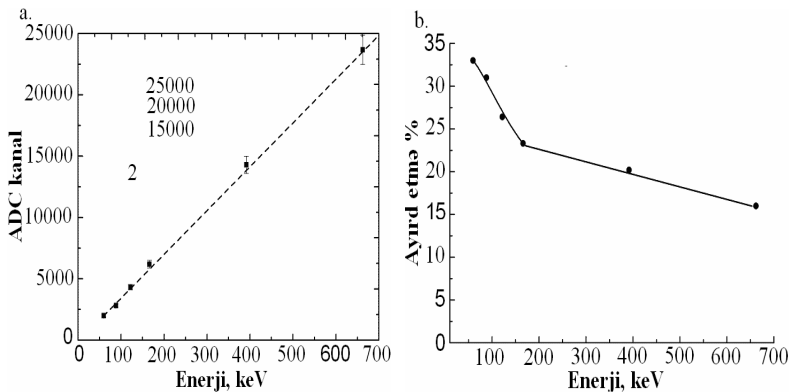


Şək. 6. LFS-8 ssintilyatoru və MPSF-IP diodu əsasında hazırlanmış qeydedici ilə qamma şüalarının eyni vaxtda amplituda görə çəkilmiş spektri: a- ^{241}Am və ^{109}Cd radioizotopundan buraxılan 59,6keV və 88keV enerjili qamma şüalarının eyni anda çəkilmiş spektri; b- ^{139}Ce və ^{113}Sn radioizotopundan buraxılan 165,9keV və 391,7keV enerjili qamma şüalarının eyni anda çəkilmiş spektri.

Həmçinin, MPSF diod və LFS ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar üçün enerji ayır etməsinin və fotopikə uyğun gələn amplitudun qamma şüasının enerjisindən asılılığı öyrənilmişdir (şək. 7 a. və b.). Qamma şüasının fotopikinin amplitudu ilə enerjisi arasındakı asılılığın xətti olduğu müəyyən edilmişdir $\text{ADC channel} = 35 \times E(\text{keV})$.

Bu fəsilə ^{137}Cs və ^{60}Co radioizotoplarından buraxılan 662keV, 1,17MeV və 1,33MeV enerjili qamma şüalarını qeyd etmək üçün ölçüləri müxtəlif olan LFS ssintilyatorlarından istifadə edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, 662keV və 1,33MeV enerjili qamma şüaları üçün ölçüləri

$2 \times 2 \times 10 \text{ mm}^3$ və $2 \times 2 \times 20 \text{ mm}^3$ olan LFS-3 ssintilyatorlar ilə ən yaxşı halda 11% və 6,35 % enerji ayırdetməsi alınır (şək. 8 a. və b.).

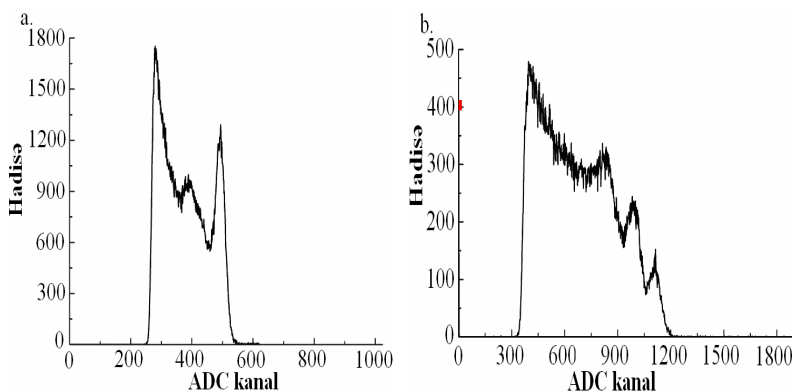


Şək. 7. MPSF və LFS əsasında hazırlanmış detektorlar üçün qamma şüalarına uyğun gələn fotopikin amplitudunun və enerji ayırdetməsinin qamma şüalarının enerjisindən asılılığı:

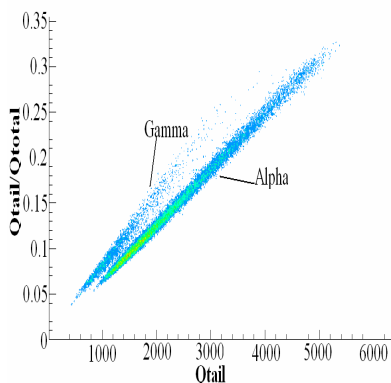
- a- fotopikin amplitudunun qamma şüalarının enerjisindən asılılığı;
- b- fotopikin enerji ayırdetməsinin qamma şüalarının enerjisindən asılılığı.

Üçüncü fəsilin sonunda LFS və MPSF diodlar əsasında hazırlanmış detektorların İFA-sı (impuls formasına görə ayırdetmə) tədqiq edilmişdir. Enerjiləri bir-birindən 20 – 25±3% fərqlənən alfa zərrəcikləri və qamma şüaları eyni zamanda qeyd edilmişdir. Qamma şüalarının yaratdığı siqnallarla alfa zərrəciklərinin yaratdığı siqnallar müqayisə edilmiş və qamma şüalarına uyğun gələn siqnalların yavaş hissəsi alfa zərrəciyinə uyğun gələn siqnalların yavaş hissəsindən daha uzun davam etdiyi müəyyən edilmişdir. Alınan nəticələrin siqnalın amplitudundan asılı olmadığını yoxlamaq üçün iki müxtəlif enerjili qamma şüalarından istifadə olunmuşdur. Bu fərq əsasında alfa zərrəciklərinin və qamma şüalarının iki ölçülü səpilmə əyriləri qurulmuşdur (şək.9). Məlum olmuşdur ki, LFS və MPSF diodları əsasında hazırlanmış qeyd edicilər bir-birinə yaxın enerjili alfa zərrəcikləri və qamma şüaları çox aydın şəkildə ayırd edə bilər.

Alınan nəticələr MPSF və LFS əsasında hazırlanmış detektorların spektroskopiya və neytron detektorları üçün də yararlı olduğunu göstərir.



Şək. 8. LFS-8 ssintilyatoru və MPSF-1P diodu əsasında hazırlanmış qeydedici ilə qamma şüalarının amplituda görə çəkilmiş spektri: a- ^{137}Cs izotopunun 662 keV enerjili qamma şüasının amplituda görə çəkilmiş spektri; b- ^{60}Co izotopunun 1,17 MeV və 1,33 MeV enerjili qamma şüalarının amplituda görə çəkilmiş spektri.

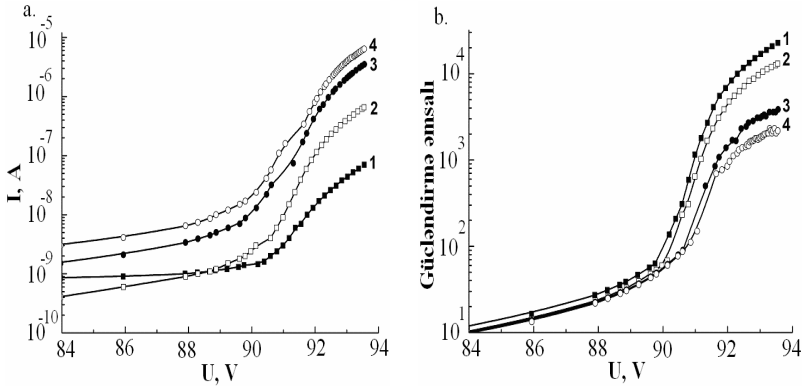


Şək. 9. ^{113}Sn və ^{238}Pu izotopuna uyğun gələn siqnalların ikiölçülü səpilmə əyrisi.

Dördüncü fəsildə radiasiya şüalanmasının MPSF diodlara təsiri öyrənilmişdir. MPSF diodlar 4,8 MeV enerjili alfa zərrəciklərlə $\sim 6,3 \times 10^8$ alfa/sm² dozaya qədər şüalandırılaraq otaq temperaturunda qaranlıq cərəyanının və gücləndirmə əmsalının şüalanma dozasından asılılığı tədqiq

olunmuşdur. Şüalanmadan sonra MPSF diodun qaranlıq cərəyanının ~ 90 dəfə artdığı, gücləndirmə əmsalının isə $\sim 88\%$ azaldığı müəyyən edilmişdir (şək. 10 a və b). Şüalanma dozası artdıqca diodun qaranlıq cərəyanı artır, gücləndirmə əmsalı isə azalır.

Müxtəlif tip MPSF diodlara 150MeV enerjili protonların təsiri araşdırılmışdır. MPSF-3B və MPSF-1P diodları protonla 5×10^{10} proton/sm² dozaya qədər şüalandırıldıqdan sonra qaranlıq cərəyanın, RMS küyün və amplitudların dozadan asılılığı tədqiq edilmişdir. MPSF-3B və MPSF-1P



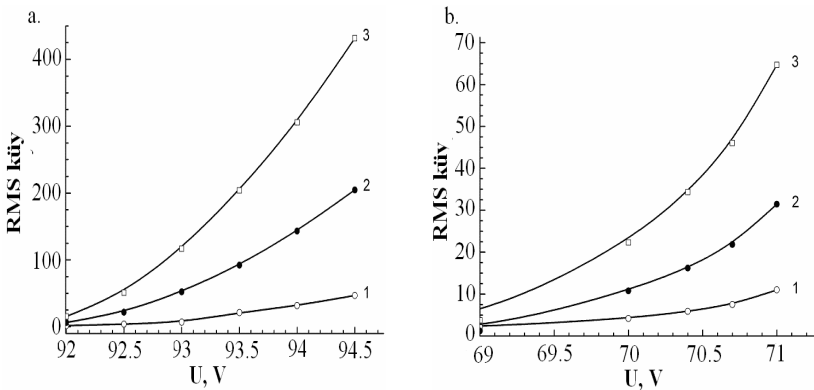
Şəkil. 10. 4,8MeV enerjili alfa zərrəciklərlə şüalandırılmış MPSF-ların qaranlıq cərəyanının (a.) və gücləndirmə əmsalının (b.) gərginlikdən asılılığı: 1-şüalanmadan əvvəl; 2- 3×10^7 alfa/sm²; 3- 3×10^8 alfa/sm²; 4- $6,3 \times 10^8$ alfa/sm².

tipli diodlar dozanın 5×10^{10} proton/sm² qiymətindən sonra işləmə gərginliyində MPSF-1P tipli diodların qaranlıq cərəyanı və RMS küyü MPSF-3B tipli diodların qaranlıq cərəyanı və RMS küyü ilə müqayisədə 51% və 58% daha çox dəyişməsi müşahidə olunmuşdur (şək. 11 a və b). MPSF-1P diodların eyni şüalanma dozasında foto signalın amplitudu MPSF-3B diodlar ilə müqayisədə 28 % daha çox dəyişmişdir. Protonla şüalanma zamanı alınan nəticələrdən müəyyən edilmişdir ki, MPSF diodlarda piksel sıxlığı artdıqca MPSF diodların parametrləri şüalanma dozasından daha zəif asılı olur. Başqa sözlə, MPSF-ların radiasiya davamlılığı yüksəlir.

MPSF-1P tipli diodlara 150MeV enerjili protonların təsirini daha geniş öyrənmək üçün bu tip diodlar 1×10^{11} proton/sm² dozaya qədər

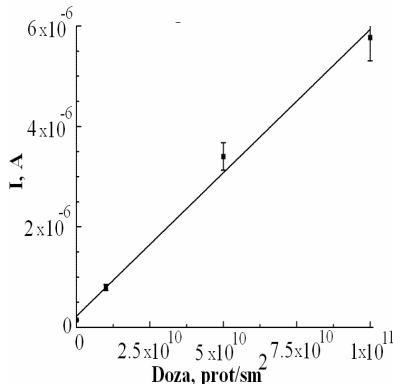
şüalandırılmışdır. Şüalandırılmış diodların qaranlıq cərəyanının və gücləndirmə əmsalinin gərginlikdən asılılığı geniş tədqiq edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, protonla şüalanma dozasının 1×10^{11} proton/sm² qiymətindən sonra MPSF-1P tipli diodların qaranlıq cərəyanı ~100 dəfə artır, gücləndirmə əmsalı isə ~92 % azalır.

MPSF-1P diodların işləmə gərginliyində qaranlıq cərəyanı 150MeV enerjili protonun dozasından xətti asılı olduğu və zədələnmə sabitinin 3.2×10^{-17} A/sm olduğu müəyyənləşdirilmişdir (şək. 12).



Şəkil. 11. Protonla şüalandırılmış MPSF-1P (a) və MPSF-3B (b) tipli fotodiodların RMS küyünün gərginlikdən asılılığı: 1- şüalanmadan əvvəl; 2- 1×10^{10} proton/sm²; 3- 5×10^{10} proton/sm².

150MeV enerjili protonla 1×10^{11} proton/sm² dozaya qədər şüalanmış MPSF-1P diodların piksellərinin işləmə qabiliyyətlərini saxlaması öyrənilmişdir. Bunun üçün şüalanmamış diodun 50V gərginlikdəki qaranlıq cərəyanı 600nm dalğa uzunluqlu işıqlandırıcı diodla artırılaraq şüalanmış diodun 50V gərginlikdəki qaranlıq cərəyanına çatdırılmışdır. Daha sonra şüalanmış və yeni diodun qaranlıq cərəyanının, gücləndirmə əmsalinin gərginlikdən asılılığının və volt-farad xarakteristikasının dəyişməsi tədqiq olunmuşdur. Məlum olmuşdur ki, şüalanmış və şüalanmamış diodun xarakteristikaları anoloji qayda ilə dəyişirlər. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, MPSF diodlar 150MeV enerjili protonlarla şüalanma dozasının 1×10^{11} proton/sm² qiymətindən sonra da piksellər öz işləmə qabiliyyətlərini



Şəkil. 12. Mikro-pikselli selvari fotodiodun qaranlıq cərəyanının şüalanma dozasından asılılığı.

saxlayırlar.

Bu fəsilin sonunda MPSF diodların digər analoqları ilə müqayisədə radiasiya davamlılığının yüksək olmasının səbəbləri göstərilmişdir. MPSF diodların yüksək radiasiya davamlılığının fiziki modeli hazırlanmışdır. MPSF diodların foto həssas həcmi iki hissədən ibarətdir $n^+ - p - n^+ - p - p^+$ (kəsik "a") və $n^+ - p - p - p^+$ (kəsik "b"). n^+ , p^+ laylarında və n^+ oblastlarında aşqar atomlarının konsentrasiyasının yüksək olması, bu oblastların həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunmasına imkan vermir. Aşağı gərginliklərdə həcmi yüklər oblastının yaranması n^+ layı ilə birinci epitaksial lay arasında baş verir və potensialın paylanması aşağıdakı şəkildə olur:

$$U(x) = \frac{qN_a(W-x)^2}{2\varepsilon_s}$$

burada q – elektronun yükü, W – U potensialındakı həcmi yüklər oblastının eni, ε_s – silisiumun dielektrik nüfuzluğu, N_a – akseptor aşqarların konsentrasiyasıdır.

MPSF diodlarda epitaksial laylarda akseptor mərkəzlərin konsentrasiyası $N_a = 1,85 \times 10^{15} \text{ sm}^{-3}$ olduğundan $U = U_1 = 19,3 \text{ V}$ gərginliyində həcmi yüklər oblastı n^+ oblastına çatır. Beləliklə $19,3 \text{ V}$ gərginliyində həcmi yüklər oblastının eni $W = d_{11} = d_1 - (d_p/2) = 3,7 \text{ mkm}$ olur. Gərginliyin daha böyük qiymətlərində birinci epitaksial layı ilə piksellər arasında $n-p$ keçidləri açılır və buna görə də altılıqla piksellər arasındakı potensial fərq dayanır. Tətbiq edilən potensialın $U \geq U_1 = 19,3 \text{ V}$ qiymətindən sonra, p -tip

keçiricilikli ikinci epitaksial lay həcmi yüklərlə əhatə olunmağa başlayır. Potensialın 19,3V böyük qiymətlərində piksellər sahənin birinci epitaksial laya nüfuz etməsini ekranlayır və bu səbəbdən potensial yalnız ikinci epitaksial laya düşür. Potensialın 38,6V qiymətlərində ikinci epitaksial lay tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunur və p^+ layının sərhəddinə çatır. Həcmi yüklər oblastının maksimal qalınlığı $W_{\max}=d_{12}=d_2-(d_1+(d_p/2))$ olur. Potensial 38,6 V-dan böyük olduqda potensial ikinci epitaksial layda elə paylanır ki, bu paylanma dielektrik layının qalınlığı $d_{12}=3,7\text{mkm}$ olan adi kondensatorlarda potensialın paylanması kimi olur.

Beləliklə, MPSF diodların daxilində potensialın paylanmasını müəyyən etmək üçün $U=U_0>(U_1+U_2)=38,6\text{V}$ potensialında birölçülü Puasson tənliyi üç oblast üçün (sərhəd şərtləri daxilində) həll edilmişdir.

Birinci p-tip epitaksial layda sərhəd şərtləri daxilində potensialın paylanması bu formada olur $U_1(x) = \frac{qN_a(d_{11}-x)^2}{2\varepsilon_s} + U_{01}$. n^+ oblastı həcmi

yükləri ilə əhatə olunmur və potensial sabit $U(x)=\text{const}=U_{01}$ qalır. Lakin ikinci epitaksial layda potensialın paylanması aşağıdakı kimi ifadə olunur:

$$U_2(x) = \frac{qN_a(x-d_{12})^2}{2\varepsilon_s} - \frac{qN_a(d_2-d_{12})^2}{\varepsilon_s}(x-d_{12}) - \frac{U-U_2}{(d_2-d_{12})(x-d_{12})} + U_{01}.$$

MPSF diodlarda "b" kəsiyində sərhəd şərtləri daxilində potensialın paylanması $U(x) = \frac{qN_a(d_2-x)^2}{2\varepsilon_s} - \frac{U_0-U_3}{d_2} \times (d_2-x)$ şəkilindədir.

Burada $U_3 = \frac{qN_a(d_2)^2}{2\varepsilon_s}$ qalınlığı $d_2=8\text{mkm}$ olan epitaksial layı tam

yoxsullaşdırmaq üçün lazım olan potensialdır. Potensialın "a" və "b" kəsiyi üçün alınan ifadələrindən istifadə edərək MPSF diodlarda potensialın dərinliyə görə paylanması müəyyən edilmişdir.

Məlum olmuşdur ki, "a" kəsiyində eyni bir "x" dərinliyində potensialın paylanması "b" kəsiyi ilə müqayisədə kəskin fərqlənir. Potensialın belə paylanması piksellər ətrafında yarım sferik formada ekvipotensial sahə yaradır. Piksellər ətrafında yaranan yarım sferik formaya malik ekvipotensial sahə fotoelektronların piksellərə toplanmasını təmin edir. Eyni ilə də birinci epitaksial layda və altlıq daxilində yaranan radiasiya defektlərinin yaratdığı dəşik cərəyanları piksellər arası boşluqdan keçərək selvari oblastda iştirak etmədən birbaşa anoda doğru axır. Bu səbəbdən də radiasiya defektləri hesabına yaranan qaranlıq cərəyan MPSF diodların parametirlərinə zəif təsir göstərir. Başqa sözlə, MPSF diodlarda

yükdaşıyıcıların özünə məxsus trayektoriyalarının olması bu tip diodların radiasiya davamlılığının yüksəlməsini təmin edir.

Həmçinin, bu fəsildə MPSF diodların radiasiya davamlılığını daha da yüksəltmək üçün bir sıra təkliflər irəli sürülmüşdür;

MPSF diodlarda səthi SiO_2 izalyator layının Si_3N_4 ilə əvəz edilməsi təklif edilmişdir. Məlumdur ki SiO_2 izalyatorlarında yük hallarının (qeyd edilmiş və hərəkət edən) konsentrasiyası kifayət qədər yüksəkdir. İonlaşdırıcı zərrəciklərlə şüalanma zamanı SiO_2 izalyatorunda yük hallarının konsentrasiyası kəskin dəyişə bilər. Yük hallarının konsentrasiyasının belə kəskin dəyişməsi diodların işləmə gərginliklərinin sürüşməsinə və qeyri stabilliyinə səbəb olur. SiO_2 izalyatorundan fərqli olaraq Si_3N_4 izalyatorunda yük hallarının konsentrasiyası çox kiçikdir və yüksək radiasiya davamlılığına malikdir.

MPSF diodların radiasiya davamlılığını artırmaq üçün piksellərin ölçülərinin $2\div 3\text{mkm}$ tərtibində olması təklif edilir. Bu zaman MPSF piksellərin sıxlığı 62000piksel/mm^2 tərtibində olacaq. Piksellərin ölçülərinin kiçik olması radiasiya defektləri hesabına yaranan yükdaşıyıcıların selvari prosesi başlatma ehtimalını azaldır və həmçinin MPSF diodların xəttliliyini yüksəldir.

MPSF diodların radiasiya davamlılığını artırmaq üçün ikinci eptaksial layın qalınlığının azaldılması ($2\div 4\text{mkm}$ olması) təklif olunur. Radiasiya ilə şüalanma zamanı ikinci eptaksial layda əmələ gələn radiasiya defektlərinin yaratdığı yükdaşıyıcılar birbaşa olaraq piksellərdəki selvari prosesi başlatdırır. Eləcədə, yaranan radiasiya defektləri foto signalın yüklərinin tutulmasına səbəb olur. Məhz ikinci eptaksial layın qalınlığının azaldılması radiasiya şüalanması nəticəsində bu layda yaranan defektlərin konsentrasiyasını azaldır. Bu isə MPSF diodların gücləndirmə əmsalının və qaranlıq cərəyanının daha az dəyişməsinə səbəb olur.

Tərəfimizdən irəli sürülən bu təkliflər əsasında yeni yaradılacaq MPSF diodların radiasiya davamlılığını yüksəltmək mümkündür.

ƏSAS NƏTİCƏLƏR

Dissertasiya işində əldə edilən elmi yeniliklər və əsas nəticələr ümumiləşdirilərək 6 bənddə öz əksini tapmışdır:

1. MPSF tipli fotoqəbuledicilərin fiziki xassələrinə 4,8MeV enerjili alfa zərrəciklərin $\sim 7 \times 10^8$ alfa/sm² və 150MeV enerjili protonların 1×10^{11} proton/sm² dozasının təsiri öyrənilmişdir. Alfa zərrəcikləri ilə şüalanma nəticəsində diodun qaranlıq cərəyanı ~ 90 dəfə artmış, gücləndirmə əmsalı isə 88% azalmışdır. Protonla şüalanma zamanı qaranlıq cərəyanın $\sim 10^2$ dəfə artması və gücləndirmə əmsalının 92% azalması müşahidə edilmişdir. Müəyyən olunmuşdur ki, radiasiya defektləri hesabına MPSF diodların birinci epitaksial layında yaranan dəşiklər elektrik sahəsinin xüsusi paylanması nəticəsində selvari prosesdə iştirak etmədən bir başa anoda doğru istiqamətlənir. İkinci epitaksial layda yaranan generasiya və tutma mərkəzləri qaranlıq cərəyanın, gücləndirmə əmsalının dəyişməsinə səbəb olur.

2. MPSF diodlar və LFS ssintilyator əsasında 59,6keV–1,33MeV enerjili qamma şüaları aşkar etmə qabiliyyətinə malik detektorlar hazırlanmışdır. Göstərilmişdir ki, təqdim edilən detektorlar bir-birindən 30keV enerji ilə fərqlənən qamma kvantları amplituda görə ayırd edə bilər. Həmçinin bu detektorlar eyni anda qeyd edilən alfa zərrəcikləri və qamma kvantları signalın formasına görə bir-birindən ayırır. Bu tip qamma detektorlar yeni kompakt qamma kameraların, qamma spektroskopiyanın və qamma dozimetriyanın təkmilləşdirilməsində istifadə oluna bilər.

3. MPSF diodların gücləndirmə əmsalını dəşilmə gərginliyindən aşağı və yüksək gərginliklərdə tədqiq etməyə imkan verən yeni metod işlənmişdir. Təklif edilən yeni üsul mövcud zəif işıq seli metodundan fərqli olaraq MPSF diodların gücləndirmə əmsalını çox geniş gərginliklər intervalında dəyişməsinə və radiasiyanın gücləndirmə əmsalına təsirini müəyyən etməyə imkan verir.

4. İlk dəfə olaraq piksellərdəki aşqar atomlarının səthi sıxlığını dəyişməklə potensial çəpərin hündürlüyünün idarə olunması mümkünlüyü müəyyən edilmişdir. Məlum olmuşdur ki, n^+ tipli mərkəzlərdə aşqar atomların səthi sıxlığının $1,6\text{--}1,3 \times 10^{12}$ atom/sm² qiymətlərində piksellərlə birinci epitaksial layı arasında yaranan potensial çəpərin hündürlüyünün kəskin azalması, aşqar atomların səthi sıxlığının $3,3 \times 10^{12}$ atom/sm² –dən yüksək qiymətlərində isə potensial çəpərin hündürlüyünün kəskin artması müşahidə edilmişdir.

5. MPSF diodların bərpa olunma müddətinin gücləndirmə əmsalından asılı olduğu müəyyən olunmuşdur. Gücləndirmə əmsalının aşağı qiymətlərində ($M < 10^4$) selvari proses zamanı yaranan elektronların əksər hissəsi (~90%) potensial çuxurda toplandığından potensial çəpərin hündürlüyü azalır və potensial çuxuru tərk edən elektronların katoda doğru qısamüddətli axını baş verir. Çuxurdakı yükün azalması hesabına potensial çəpərin hündürlüyü yenidən artır və çuxurda qalan elektronların (~10%) axınının bir neçə milli saniyə gecikməsinə səbəb olur. Bu isə MPSF diodun bərpa olunma müddətini artırır. Gücləndirmə əmsalının yüksək ($M > 10^4$) qiymətlərində isə selvari oblastda yaranan elektronların əksəriyyəti ani olaraq katoda axır və çox kiçik hissəsi çuxurda toplanır. Bu səbəbdən də gücləndirmə əmsalı artdıqca bərpa olunma müddəti azalır.

6. Kiçik bərpa olunma müddətli yeni tipli MPSF- diodların iş prinsipi müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki, bu tip MPSF diodlara əks istiqamətdə təbiiq edilən gərginliyin müəyyən qiymətində p -tipli birinci eptaksia layı həcmi yüklər oblastı ilə tam əhatə olunur və həcmi yüklər oblastı n^+ - tipli piksellərə çatır. Gərginliyin yüksək qiymətində piksellər və ikinci eptaksiya layı həcmi yüklər oblastı ilə tam əhatə olunur. İkinci eptaksia layı ilə n^+ - tipli mərkəzlərin sərhədində selvari proses baş verir. n^+ - tipli piksel mərkəzlərində aşqar atomlarının optimal səthi yük sıxlığının ($1,3 \times 10^{12} \text{ atom/sm}^2$) seçilməsi potensial çəpərin hündürlüyünün, həmçinin bərpa olunma müddətinin kəskin azalmasına səbəb olur. Təklif olunmuş MPSF diodun bərpa olunma müddəti əvvəlki tip MPSF diodlarla müqayisədə $2,6 \times 10^4$ dəfə kiçikdir və daha yüksək tezlikli siqnalları qeyd etməyə imkan verir ($> 20 \text{ MHz}$).

DİSSERTASIYANIN ƏSAS NƏTİCƏLƏRİ ÜZRƏ ÇAP OLUNMUŞ İŞLƏRİN SİYAHISI

1. F. Ahmadov, Z. Sadygov, R. Madatov, Radiation damage in silicon micro-pixel avalanche photodiodes caused by 150 MeV proton irradiation, tezis, Iinternational Conference on Perspectives of Peaceful use of Nuclear Energy, 8-10 November, 2010, Baku, p 94-95.
2. З. Садыгов, А. Ольшевский, Н. Анфимов, Ф. Ахмедов, В. Жежер, З. Крумштейн, Р. Мухтаров, В. Чалышев, И. Чириков-Зорин, Мультипиксельные лавинные фотодиоды: конструкции и параметры, tezis, Международная Конференция «Инженерия Сцинтилляционных Материалов и Радиационные Технологии», 14-19 Ноября, 2010, Харьков, Украина, с 52.
3. F.I. Ahmadov, R.S. Madatov, Z.Y. Sadygov, Y.M. Mustafayev, Investigation of Radiation Effect to Micro-Channel Avalanche Photo Diode, məqalə, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Xəbərləri, Fizika–riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, fizika və astronomiya Bakı-2011, V.31, N.5, s.14-17
4. F. Ahmadov, G.Ahmadov, Z. Sadygov, R. Madatov, Micro-Channel Avalanche Photo Diode as Alpha Detector, tezis, 19th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, 21-26 May, 2011, Dubna, Russia, p.231-233.
5. F. Ahmadov, Z. Sadygov, R. Madatov, R. Mechtiyeva, Scintillation detectors based on MAPD for gamma ray and alpha particle, tezis, Nüvə enerjisinin gələcəyin enerji təminatında rolu. Beynəlxalq konfransın materialları, 23-25 Noyabr, 2011, Bakı, s.80.
6. F. Ahmadov, R. Madatov, Investigation of Radiation Effect to Micro-Channel Avalanche Photo Diode (MAPD), tezis, XV JINR Annual Young Scientists and Specialists, 14-19 February, 2011, Dubna, Russia, p. 182-185
7. Ахмедов Ф.И., Садыгов З.Я., Мадатов Р.С., Кремниевые мульти-пиксельные лавинные фотодиоды и возможные области их применения, tezis, XIII Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто и наноэлектронике, 21-25 ноября, 2011, Санкт-Петербург, Россия. с. 21
8. F. Ahmadov, G. Ahmadov, R. Madatov, Z. Sadygov, V. Shvetsov, S.Tiutiunnikov, Yu. Kopach, V. Zhezher, Silicon micro-pixels

- avalanche photodiodes and scintillation detectors, tezis, 20th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei, 21-26 May, 2012, Alushta, Ukraine, p. 205-208
9. Z. Sadygov, F. Ahmadov, X. Abdullaev, N. Anfimov, E. Guliyev, Z. Krumshtein, R. Madatov, A. Olshevski, V. Shvetsov, V. Zhezher, Development of scintillation detectors based on micro-pixels avalanche photodiodes, tezis, International Workshop PhotoDet, 5-13 June, 2012, Paris, France, p. 1
 10. Z. Y. Sadiqov, A.A. Dövlətov, N.A. Səfərov, R.S.Mədətov, F.İ. Əhmədov, X.I. Abdullayev, R.M. Muxtarov, Mikro-pikselli selvari fotodiodların bərpa olunma müddətinin öyrənilməsi, məqalə, Fizika Jurnalı, 2012, CİLD 18, №1, s. 10-11
 11. Z. Y. Sadygov, F. I. Ahmadov, N.V. Anfimov, X.I. Abdullaev, A. A. Dovlatov, Z.V. Krumshtein, R.S. Madatov, A.G. Molokanov, A.A. Nozdrin, A.G. Olshevski, N.A. Safarov, V.N. Shvetsov, Performance of silicon micropixel avalanche photodiode after irradiation by 150MeV proton beam, məqalə, Fizika Jurnalı, 2012, CİLD 18, №2, s 18-19
 12. X.İ.Abdullayev, A.A.Dövlətov, F.İ.Əhmədov, R.S.Mədətov, R.M.Muxtarov, Z.Y.Sadiqov, N.A.Səfərov, 4,8MeV enerjili alfa zərrəciklərinin mikro-pikselli selvari fotodioların fiziki xassələrinə təsirinin öyrənilməsi, məqalə, Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Məcmuələr, CİLD 14, №1,2012, s. 12-14
 13. Ф.И. Ахмадов, З.Я.Садыгов,Р.С.Мадатов, А.З.Садыгов, Международная Конференция «Инженерия Сцинтилляционных Материалов и Радиационные Технологии», 19-23 Ноября , 2012, Дубна,
 14. Z. Sadygov, F. Ahmadov, X. Abdullaev, N. Anfimov, E. Guliyev, Z. Krumshtein, R. Madatov, A. Olshevski, V. Shvetsov, V. Zhezher, Development of scintillation detectors based on micro-pixels avalanche photodiodes, məqalə, Proceedings of Science, 2012, (PhotoDet 2012) 37
 15. З.Садыгов, Х.Абдуллаев, Н.Анфимов, Ф.Ахмедов, Я.Гусейнов, И.Железных, Р.Мадатов, Р.Мухтаров, А.Ольшевский, Микроканальный лавинный фотодиод с быстрым временем восстановления параметров, məqalə, Письма в Журнал Технической Физики, 2013 , Т39.вып 11, с 7-12

ФАРИД ИБРАГИМ оглы АХМЕДОВ
ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
КРЕМНИЕВЫЕ МИКРО-ПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ
ФОТОДИОДОВ

Резюме

Диссертационная работа посвящена исследованию радиационной стойкости кремниевых микро-пиксельных лавинных фотодиодов с двумя эпитаксиальными слоями *p*-типа проводимости. В качестве источников радиации использовались альфа частицы с энергией 4,8 МэВ и протоны с энергией 150 МэВ.

Показано, что при облучении микро-пиксельных лавинных фотодиодов альфа частицами дозой 7×10^8 частиц/см² или протонами дозой 1×10^{11} частиц/см² темновой ток увеличивается в 100 раз. При этом коэффициент усиления приборов уменьшается только на 90%. Это свидетельствует тому, что исследованные образцы имеют высокую радиационную стойкость по сравнению с традиционными лавинными фотодиодами. Выяснено, что улучшение радиационной стойкости связано с особенностью электрического поля вокруг пикселей в исследованных микро-пиксельных лавинных фотодиодах. Благодаря этой особенности значительная часть темнового генерационного проходит между пикселями, и не влияет на работу прибора.

В работе все эксперименты проводились при комнатной температуре. Анализ результатов проводились путем математической обработки амплитудного спектра выходных сигналов, полученных от микро-пиксельных лавинных фотодиодов.

FARID IBRAHIM oğlu AHMADOV
INVESTIGATION RADIATION HARDNESS OF MICRO-PIXEL
AVALANCHE PHOTODIODE BASED ON SILICON

Summary

Objective of this dissertation work is investigation of radiation hardness of the silicon micro-pixel avalanche photodiode (MAPD) having two epitaxial layers of p -type conductivity. The MAPD diode is irradiated by 150MeV proton and 4.8MeV alpha particle. Particular attention was given to investigate dark current and gain of photo signal in MAPD samples. It was found that dark current of the MAPD increased 100 times after irradiation at operation voltages. In the same time gain of the samples decreased by 90% only. The obtained results demonstrate that the MAPD has higher resistance to radiation compared to conventional avalanche photodiodes. This improvement of radiation hardness is connected with a special distribution of electric field around the pixels in the MAPD. Thanks to this feature, a significant amount of the dark charges generated by radiation defects flow between pixels and they do not affect its performance.

All experiments in this work were performed at room temperature. Analysis of the results carried out by digital processing of the amplitude spectrum of the output signals received from the MAPD.

Kağız formatı 60x84, 1/16
Fiziki çap vərəqi 1,5
Tiraj 100
AMEA-nın mətbəəsində çap olunmuşdur

На правах рукописи

ФАРИД ИБРАГИМ ОГЛЫ АХМЕДОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ
КРЕМНИЕВЫЕ МИКРО-ПИКСЕЛЬНЫХ ЛАВИННЫХ
ФОТОДИОДОВ**

2225.01 – Радиационное материаловедение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора философии по
физике

БАКУ - 2013