



AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ PREZİDENTİ YANINDA
ELMİN İNKİŞAFI FONDU

MÜQAVİLƏYƏ ƏLAVƏ

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Elmin İnkişafı Fondu
və “Türk Dünyası Araşdırmaları” məqsədli grant müsabiqəsi çərçivəsində
1-ci Azərbaycan-Türkiyə (“AzTürk-1”) alt-müsabiqəsinin
(EIF-BGM-5-AZTURK-1/2018) qalibi olmuş
layihənin yerinə yetirilməsi üzrə

ALINMIŞ NƏTİCƏLƏRİN ƏMƏLİ (TƏCRÜBİ) HƏYATA KEÇİRİLMƏSİ
VƏ LAYİHƏNİN NƏTİCƏLƏRİNDƏN GƏLƏCƏK TƏDQİQATLARDAN
İSTİFADƏ PERSPEKTİVLƏRİ HAQQINDA
MƏLUMAT VƏRƏQİ

(Qaydalar üzrə Əlavə 16)

Layihənin adı: **Yüksək həssaslıqlı fotodiodlar və bor təbəqəsi ilə örtülmüş ssintilyatorlu yeni neytron detektorlarının tədqiqi**

Layihə rəhbərinin soyadı, adı və atasının adı: **Əhmədov Fərid İbrahim oğlu**

Qrantın məbləği: **200 000 manat**

Layihənin nömrəsi: **EIF-BGM-5-AZTURK-1/2018-2/01/1-M-01**

Müqavilənin imzalanma tarixi: **17 avqust 2020-ci il**

Qrant layihəsinin yerinə yetirilmə müddəti: **24 ay**

Layihənin icra müddəti (başlama və bitmə tarixi): **01 sentyabr 2020-ci il – 01 sentyabr 2022-ci il**

Diqqət! Bütün məlumatlar 12 ölçülü Arial şrifti ilə, 1 intervalla doldurulmalıdır

Layihənin nəticələrinin əməli (təcrübi) həyata keçirilməsi

1 Layihənin əsas əməli (təcrübi) nəticələri, bu nəticələrin məlum analoqlar ilə müqayisəli xarakteristikası

- Layihə birinci ilində plana uyğun olaraq iki yeni tipli UB və İQ oblasta həssas olan fotoqeyd edicilərin hazırlanma texnologiyası işlənmişdir. Yeni hazırlanacaq quruluşda inversiya təbəqəsinin yaranması hesabına p-n keçidin formalaşması nəzərdə tutulubdur. Aktiv sahənin qalınlığının ~160nm olması bu tip qeydedicilərin yüklü zərrəcikləri də çox kiçik enerji itkisi olması hesabına qeyd etməyə imkan verəcəkdir. Hazırda təklif edilən bu quruluşun mövcud analoqu yoxdur.
- Yeni hazırlanmış MSFD-3NM fotodiodunun optimal halda gücləndirmə əmsalı MSFD-3NK fotodiodunun gücləndirmə əmsalından 1.8 dəfə çox olmuşdur. MSFD-3NM fotodiodlarının ifrat

gərginlik oblastı ~24 % artırılaq 3.53 V qədər qaldırılmışdı. İşləmə gərginliyində MSFD-3NM fotodiodunun qaranlıq cərəyanı MSFD-3NK fotodioduna nəzərən 3.5 dəfə azalmışdır. MSFD-3NM fotodiodunun tutumu – 202 pF, MSFD-3NK fotodiodunun tutumu -176 pF olduğu müəyyən edilmişdir. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, yeni hazırlanmış MAPD-3NM diodu əksər parametrlərinə görə MSFD-3NK diodu üstələyir və əksər təcrübələrdə uğurla tətbiq oluna bilər.

- Yeni hazırlanmış MSFD-3NM və LFS-3 ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar qeyd edilən siqnalın amplitudu enerjiden asılı olaraq xətti qanunla dəyişir: $E(\text{keV}) = -15.25 + \text{ADC} * 2.6787$. Detektor bloku geniş enerji intervalında öz xəttliliyini tam saxladığı müəyyən edilmişdir. Xəttliliyin saxlanması MSFD-3NM fotodiodlarında toplam piksellərinin sayının 136900 olması ilə bağlı olmuşdur. Enerjiyə görə paylanmasının qamma şüasının enerjisindən asılılığı 55% -dən 6.95 %-ə qədər dəyişdiyi müşahidə edilmişdir. Detektor bloku vasitəsi ilə minimum qeyd edilə bilən enerji 14.43keV olmuşdur. Alınan nəticələr göstərmişdir ki, MSFD-3NM və LFS-3 ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar dozimetriya və spektroskopiya sahəsində uğurla tətbiq oluna bilər.
- Yeni hazırlanmış MSFD-3NM və LaBr ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar 30-4440keV enerji intervalında xəttliliyi yoxlanılmışdır. Belə detektor sistemləri geniş enerji intervalında tətbiq edilməklə yanaşı həmçinin kiçik enerji ayırd etməsinin alınmasına imkan vermişdir. 662keV enerjili qamma şüası üçün enerji ayırd etməsi 4% alınmışdır. Bu isə LFS ssintilyatoru ilə alınmış nəticələrdən 50% daha optimaldır.
- Yeni quruluşlu Si-PİN fotodiodların ilk istehsalı həyata keçirilmişdir. Yeni hazırlanmış quruluşda 10 nm nazik titan təbəqəsinin istifadə edilməsi bu qeyd edicilərin ultra bənövşəyi oblastda həssaslığının artmasına imkan verir. Bununla yanaşı detektorda nazik təbəqənin istifadəsi bunların alfa zərrəcik detektorlarının hazırlanmasında tətbiqdə imkan verəcəkdir.
- Yeni quruluşlu Si-PİN fotodiodların qırmızı və göy işıqlara həssaslığı tədqiq edilmiş və göstərilmişdir ki, yeni hazırlanmış PİN fotodiodların həssaslığı APD və MAPD-3NK fotodiodları ilə eynidir (70%). VAX-dan əldə edilmiş nəticələrdən yeni Si-PİN fotodiodun qaranlıq cərəyanının 20V gərginlikdə 150 nA ətrafında olduğu təyin edilmişdir. Yeni hazırlanmış PİN fotodiodun VFX-dan istifadə edərək aktiv həcmnin qalınlığının 186 mkm olduğu müəyyən edilmişdir.
- SRİM simulyasiya proqramından istifadə edərək optimal bor təbəqəsinin qalınlığı və alfa zərrəciyinin bu təbəqə daxilində itirdiyi enerji hesablanmışdır. Hopdurulacaq bor təbəqəsinin qalınlığının 1mkm tərtibində olması qəbul edilmişdir. Bu zaman neytronun udulması hesabına yaranan 1.47 MeV enerjili alfa zərrəciyinin enerjisinin təqribən 400 keV enerjisinin bor təbəqəsində udulur və ssintilyatora daxil olan He ionlarının minimum enerjisi 1.07 MeV olmuşdur. Neytronların qeyd edilməsi üçün LSO, BGO və APD fotodiodların səthinə 1mkm qalınlıqlı B təbəqəsi hopdurulmuşdur.
- MSFD fotodiodun aşağı temperaturda həssaslığı tədqiq edilmiş və yeni fotodiodun deşilmə gərginliyin temperatur əmsalı 45 mV/C olduğu müəyyən edilmişdir.
- Plastik ssintilyator və MSFD fotodiod əsasında hazırlanmış detektorla sürətli neytronların qeyd etmə həssaslığı tədqiq edilmiş və göstərilmişdi ki, qeyd edilən hadisələrin 30 % məhz neytronlar hesabına formalaşır.

2 Layihənin nəticələrinin əməli (təcrübi) həyata keçirilməsi haqqında məlumat (istehsalatda tətbiq (tətbiqin aktını əlavə etməli); tədris və təhsildə (nəşr olunmuş elmi əsərlər və s. – təhsil sistemində tətbiqin aktını əlavə etməli); bağlanmış xarici müqavilələr və ya beynəlxalq layihələr (kimlə bağlanıb, müqavilənin və ya layihənin nömrəsi, adı, tarixi və dəyəri); dövlət proqramlarında (dövlət orqanının adı, qərarın nömrəsi və tarixi); ixtira üçün alınmış

patentlərdə (patentin nömrəsi, verilmə tarixi, ixtiranın adı); və digərlərində)

(burada doldurulmalı)

1. Layihənin nəticələrindən gələcək tədqiqatlarda istifadə perspektivləri

1

Nəticələrin istifadəsi perspektivləri (fundamental, tətbiqi və axtarış-innovasiya yönlü elmi-tədqiqat layihə və proqramlarında; dövlət proqramlarında; dövlət qurumlarının sahə tədqiqat proqramlarında; ixtira və patent üçün verilmiş ərizələrdə; beynəlxalq layihələrdə; və digərlərində)

(burada doldurulmalı)

Yeni hazırlanmış foto qeydedici və detektor sistemləri nüvə texnologiyalarında, tibdə, təhlükəsizlik sahəsində, hərbi sahədə və kosmik tədqiqatlarda uğurla tətbiq oluna bilər

SİFARIŞÇI:

Elmin İnkişafı Fondu

Baş məsləhətçi

Quliyeva Mülayim Sahib qızı

(imza)

“ __ ” _____ 20_ -ci il

İCRAÇI:

Layihə rəhbəri

Əhmədov Fərid İbrahim oğlu

(imza)

“ __ ” _____ 20_ -ci il



**AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ PREZİDENTİ YANINDA
ELMİN İNKİŞAFI FONDU**

MÜQAVİLƏYƏ ƏLAVƏ

**Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Elmin İnkişafı Fondu
və "Türk Dünyası Araşdırmaları" məqsədli qrant müsabiqəsi çərçivəsində
1-ci Azərbaycan-Türkiyə("AzTürk-1") alt-müsabiqəsinin
(EIF-BGM-5-AZTURK-1/2018) qalibi olmuş
layihənin yerinə yetirilməsi üzrə**

**ALINMIŞ ELMİ MƏHSUL HAQQINDA MƏLUMAT
(Qaydalar üzrə Əlavə 17)**

Layihənin adı: **Yüksək həssaslıqlı fotodiodlar və bor təbəqəsi ilə örtülmüş ssintilyatorlu yeni neytron detektorlarının tədqiqi**

Layihə rəhbərinin soyadı, adı və atasının adı: **Əhmədov Fərid İbrahim oğlu**

Qrantın məbləği: **200 000 manat**

Layihənin nömrəsi: **EIF-BGM-5-AZTURK-1/2018-2/01/1-M-01**

Müqavilənin imzalanma tarixi: **17 avqust 2020-ci il**

Qrant layihəsinin yerinə yetirilmə müddəti: **24 ay**

Layihənin icra müddəti (başlama və bitmə tarixi): **01 sentyabr 2020-ci il – 01 sentyabr 2022-ci il**

Diqqət! Bütün məlumatlar 12 ölçülü Arial şrifti ilə, 1 intervalla doldurulmalıdır

1. Elmi əsərlər (sayı)

№	Tamliq dərəcəsi	Dərc olunmuş	Çapa qəbul olunmuş və ya çapda olan	Çapa göndərilmiş
1.	Monoqrafiyalar			
	həmçinin, xaricdə çap olunmuş			
2.	Məqalələr			
	həmçinin xarici nəşrlərdə	10		
		5		

3.	Konfrans materiallarında məqalələr O cümlədən, beynəlxalq konfrans materiallarında	22nd The International Workshops on Radiation Imaging Detectors, Belgium, https://indico.cern.ch/event/820476/)	Beynəlxalq	Divar
4.	Məruzələrin tezisləri həmçinin, beynəlxalq tədbirlərin toplusunda			
5.	Digər (icmal, atlas, kataloq və s.)			

2. İxtira və patentlər (sayı)

Nö	Elmi məhsulun növü	Alınmış	Verilmiş	Ərizəsi verilmiş
1.	Patent, patent almaq üçün ərizə			
2.	İxtira			
3.	Səmərələşdirici təklif			

3. Elmi tədbirlərdə məruzələr (sayı)

Nö	Tədbirin adı (seminar, dəyirmi masa, konfrans, qurultay, simpozium və s.)	Tədbirin kateqoriyası (ölkədaxili, regional, beynəlxalq)	Məruzənin növü (plenar, dəvətli, şifahi, divar)	Sayı
1.				
2.				
3.				

SİFARIŞÇI:

Elmin İnkişafı Fondu

Baş məsləhətçi

Quliyeva Mülayim Sahib qızı

(imza)

“ _ ” _____ 20_ -ci il

İCRAÇI:

Layihə rəhbəri

Əhmədov Fərid İbrahim oğlu

(imza)

“ _ ” _____ 20_ -ci il



AZƏRBAYCAN RESPUBLİKASININ PREZİDENTİ YANINDA ELMİN İNKİŞAFI FONDU

Azərbaycan Respublikasının Prezidenti yanında Elmin İnkişafı Fondu
və "Türk Dünyası Araşdırmaları" məqsədli qrant müsabiqəsi çərçivəsində
1-ci Azərbaycan-Türkiyə("AzTürk-1") alt-müsabiqəsinin
(EIF-BGM-5-AZTURK-1/2018) qalibi olmuş
layihənin yerinə yetirilməsi üzrə

YEKUN ELMİ-TEXNİKİ HESABAT

Layihənin adı: **Yüksək həssaslıqlı fotodiodlar və bor təbəqəsi ilə örtülmüş ssintilyatorlu yeni neytron detektorlarının tədqiqi**

Layihə rəhbərinin soyadı, adı və atasının adı: **Əhmədov Fərid İbrahim oğlu**

Qrantın məbləği: **200 000 manat**

Layihənin nömrəsi: **EIF-BGM-5-AZTURK-1/2018-2/01/1-M-01**

Müqavilənin imzalanma tarixi: **17 avqust 2020-ci il**

Qrant layihəsinin yerinə yetirilmə müddəti: **24 ay**

Layihənin icra müddəti (başlama və bitmə tarixi): **01 sentyabr 2020-ci il – 01 sentyabr 2022-ci il**

Diqqət! Bütün məlumatlar 12 ölçülü Arial şrifti ilə, 1 intervalla doldurulmalıdır

Diqqət! Uyğun məlumat olmadığı təqdirdə müvafiq bölmə boş buraxılır

Hesabatda aşağıdakı məsələlər işıqlandırılmalıdır:

1	Layihənin həyata keçirilməsi üzrə yerinə yetirilmiş işlər, istifadə olunmuş üsul və yanaşmalar Amplitudun paylanması metodu, impuls formasına görə ayırmalar, məlumatların emalı və hesablama, məntiq alqoritmlərin yazılması.
2	Layihənin həyata keçirilməsi üzrə planda nəzərdə tutulmuş işlərin yerinə yetirilmə dərəcəsi (faizlə qiymətləndirməli) Plan üzrə nəzərdə tutulan işlər tam yerinə yetirilmişdir, yəni müasir detektor modulu yığılmışdır. Alınan modul hazırlanan elektronika plataları ilə uyğunlaşdırılmışdır (~90%).
3	Hesabat dövründə alınmış elmi nəticələr (onların yenilik dərəcəsi, elmi və təcrübi əhəmiyyəti, nəticələrin istifadəsi və tətbiqi mümkün olan sahələr aydın şəkildə göstərilməlidir) Layihə çərçivəsində iki tip fotodiodların istehsalı həyata keçirilmişdir. 1.Ultra bənövşəyi (UB) və görünən oblastda olan şüaları qeydetmək üçün nəzərdə tutulmuş PİN fotodiodları hazırlanmış və test edilmişdir. PİN diodların daxili gücləndirməsi ~1, işləmə gərginliyi 30V və qaranlıq

cərəyanı 300nA yüksək olmuşdur.

2. Səthi və dərin pikselləli selvari fotodiodlar. Səthi pikselləli fotodiodlar (SSFD) infra qırmızı (İQ) oblastı qeyd etmək üçün nəzərə tutulmuşdur. Bu tip SSFD-lərin daxili gücləndirməsi 10-100 ətrafında dəyişməsi nəzərə alınmışdır. mikropikselləli selvari fotodiodlar (MSFD) görünən oblastda olan fotonların qeydedilməsi üçün nəzərdə tutulmuşdur. MSFD daxili gücləndirməsi $\sim 1-3 \cdot 10^5$ ətrafında olmuşdur.

PİN fotodiodun quruluşu şəkl1-də göstərilmişdir. Diodun hazırlanması p-tip FZ və CH metodları ilə alınmış vayferlərdə aparılacaqdır. PİN diodlar üçün istifadə edilən vayferlərin xüsusi müqaviməti 500÷1000 Ohm*cm arasında dəyişəcəkdir. PİN diodun istehsalında 5 şablon istifadə ediləndir.

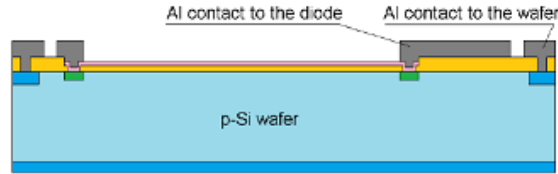
a-vayferin hər iki tərəfinə Boron diffuziya edilir (qoruyucu həlqə və kontakt oblastı yaradılması)

b-Fosfor diffuziya edilərək ikinci qoruyucu həlqə yaradılır.

c- Səthdə 150 nm qalınlıqlı nazik SiO₂ təbəqəsi yaradılır.

d-Şəffaf Ti təbəqəsi yaradılır (10 nm)

e-Alüminium kontakt oblastlar hazırlanılır.



Şəkl.1 UB oblastda işləyən PİN fotodiodunun quruluşu

Qurğunun işləmə prinsipi; Struktura tərs istiqamətdə gərginlik qoşulduqda gərginlik müəyyən qiymətlərində həcmi yüklər oblastı quruluşun daxilinə nüfuz edir. Ti təbəqəsinə tətbiq edilən gərginlik hesabına n oblast arasında inversiya təbəqəsi yaranır. P-tip vayferdə yaranan bu təbəqə özünü n tip kimi göstərir. Bu təbəqənin qalınlığı bir neçə nm qalınlığında olur. Beləliklə quruluşun tərkibində p-n keçid yaradılır. Fotonların və ionlaşdırıcı zərrəciklərin yaratdığı elektron deşiklər p-n keçiddən elektrodlara doğru yönələrək siqnalın yaranmasını təşkil edir. Quruluşda çox nazik təbəqələr istifadə edildiyindən bu detektorlar ultra bənövşəyi işıqları tutmaqla yanaşı yüklü zərrəcikləridə enerji itirmədən qeyd etməyə imkan verəcəkdir.

SSFD fotodiodun quruluşu şəkl2-də göstərilmişdir. Diodun hazırlanması p-tip FZ və CH metodları ilə alınmış vayferlərdə aparılacaqdır. Vayferlərin sayı 5 ədəd və diametri 150mm olacaqdır. SSFD diodlar üçün istifadə edilən vayferlərin xüsusi müqaviməti 3÷5 Ohm*cm arasında dəyişəcəkdir. SSFD diodun istehsalında 7 şablon istifadə ediləndir.

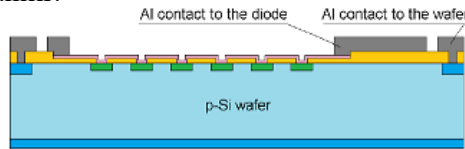
a-vayferin hər iki tərəfinə Boron diffuziya edilir (qoyucu həlqə və kontakt oblastı yaradılması)

b-Fosfor diffuziya edilərək çox saylı pn-keçidlər yaradılır.

c- Səthdə 150nm qalınlıqlı nazik SiO₂ təbəqəsi yaradılır.

d-Şəffaf Ti təbəqəsi yaradılır və pikselləri birləşdirir (10nm)

e-Alüminium kontakt oblastlar hazırlanılır.



Şəkl.2 İQ oblastda işləyən SSFD fotodiodunun quruluşu

Qurğunun işləmə prinsipi; Struktura tərs istiqamətdə gərginlik qoşulduqda gərginlik müəyyən qiymətlərində p-n keçidlərdə həcmi yüklər oblastı yaranır və gərginlik artdıqca həcmi yüklər oblastı maksimum qiymətə yaxınlaşır. Gərginliyin sonrakı qiymətlərində piksellərin olduğu nöqtələrdə sahə artır. Bu zaman fotonların udulması hesabına yaranan elektronlar sahə hesabına sürətlənərək zərbə ilə ionizasiya hesabına elektron deşik çütü yaradır. Bu hadisələr deşilmə gərginliyinin yaxın ətrafında baş verir və nəticədə gücləndirmə artır.

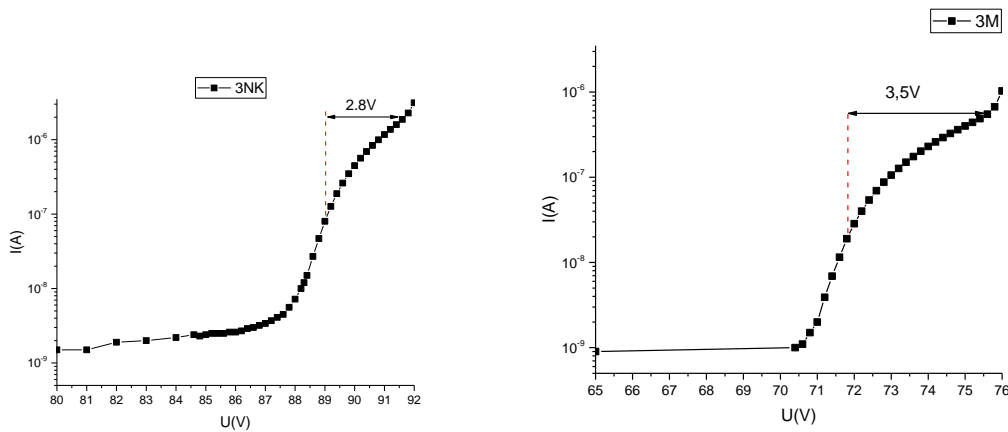
3.Lahiyyə üzrə nəzərdə tutulmuş yeni MSFD (MAPD-3NM) fotodiodlarının istehsalı həyata keçirilmişdir. MSFD-3NM fotodiodu iki p-tip epitaksial təbəqədən və onların arasında yerləşən addımı 10mkm olan paralel qoşulmuş çox saylı piksellərdən ibarətdir. Struktur n tip ölçüsü 150mm olan vayfer üzərində hazırlanmışdır. Birinci epitaksial təbəqənin qalınlığı 7mkm və 2-ci epitaksial təbəqənin qalınlığı isə 3mkm seçilmişdir. Pikselin diametri 7mkm olmuşdur. Diodun piksel sıxlığı 10000piksel/mm² olmuşdur. Yeni MSFD-3NM fotodiodları əvvəlki analoqları ilə müqayisədə deşilmə gərginliyi 20%, qaranlıq cərəyanı 3.5 dəfə azaldılmışdır. Yeni diodlarda ifrat gərginlik oblastı ~24% artaraq yaxşılaşmışdır.

Təcrübi nəticələr

Təcrübələrdə istifadə edilən fotodiodlar dərin piksellə MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodlarıdır. İstifadə edilən MSFD-3NK fotodiodu cənubi Koreyanın NANOFAB (National NanoFab Center) mərkəzində (2013) və MSFD-3NM fotodiodu isə Malasiyanın MIMOS (Malaysia's national Applied Research and Development Centre) mərkəzində (2020) istehsal edilmişdir. Hər iki tip fotodiodun piksel diametri və addımları eyni seçilmişdir. MSFD-3NK və 3NM fotodiodlarında piksel sıxlığı 10000 piksel/mm² olmuşdur.

Fotodiodların volt-ampere (VAX) və volt farad (VFX) xarakteristikasını təyin etmək üçün Keithley 6487 və E7-20M Измеритель Иммитанс qurğusundan istifadə edilmişdir.

Şəkil.3-də MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunun tərs istiqamətdə volt-ampere xarakteristikası verilmişdir. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunda 80V isə 70.4V gərginliyə qədər olan rejim gücləndirmə əmsalının kiçik olduğu rejimə ($\Delta U < 0V$, harada ki $\Delta U = U_{tətbiq} - U_{deşilmə}$, $U_{tətbiq}$ -tətbiq edilən gərginlik və $U_{deşilmə}$ -deşilmə gərginliyidir) gücləndirmə əmsalının yüksək olduğu ifrat gərginlik oblastı ($\Delta U > 0V$) Heyger rejiminə uyğun gəlir. MSFD-3NK fotodiodunda ifrat gərginlik oblastı 89-91.6 V intervalını və MSFD-3NM fotodiodunda isə 71.6-75.6V intervalına uyğun gəlmişdir. İşləmə gərginliyində qaranlıq cərəyanı MSFD-3NK fotodiodunda 1569 nA və MSFD-3NM fotodiodunda 448 nA olmuşdur.

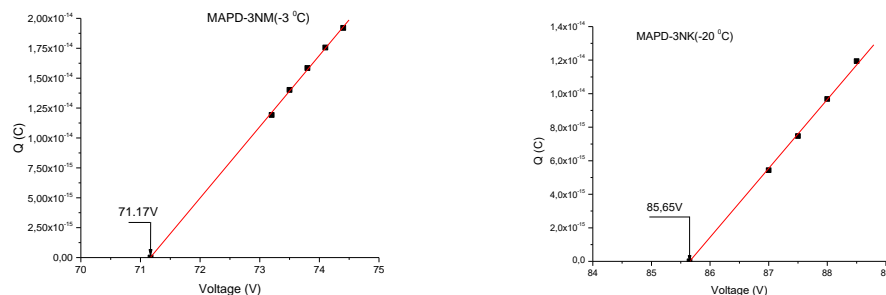


Şəkil 3. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodunun tərs istiqamətdə volt-ampere xarakteristikası (VAX).

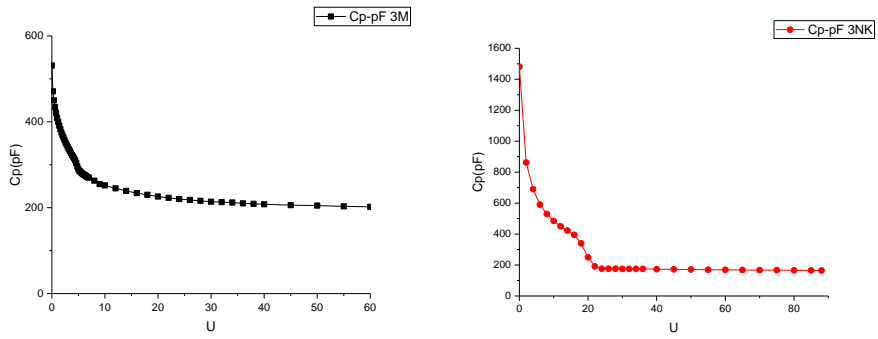
Şəkil.4-də (a) zəif işıq selindən istifadə edərək tək fotoelektronların paylanma spektri çəkilmişdir. MSFD-3NK fotodiodlarınındeşilmə gərginliyi 85.65 V və optimal gərginlikdə (88 V) gücləndirmə əmsalı $\sim 6 \cdot 10^4$ olmuşdur (-20 C). MSFD tətbiq edilən maksimal ifrat gərginliyi 2.85 V-a qədər qaldırmaq mümkün olmuşdur. Bir pikselin tutumu isə 4.2 fF olmuşdur.

MSFD-3NM fotodiodlarında isədeşilmə gərginliyi 71.17 V olmuş və optimal gərginlikdə 74.5V gücləndirmə əmsalı $1.1 \cdot 10^5$ olmuşdur (-3 C) (Şəkil.4.a). MSFD-3NM fotodiodlarında maksimal ifrat gərginlik 3.53 V alınmışdır. MSFD-3NK diodlarınındeşilmə gərginliyi 85.65V və optimal gərginlikdə 88V gücləndirmə əmsalı $6 \cdot 10^4$ olmuşdur (-20 C) (Şəkil.4.b). Maksimal ifrat gərginlik 2.8 V alınmışdır.

Bir pikselin tutumu isə 5.7 fF olmuşdur. Yeni diodlarda ifrat gərginlik oblastı $\sim 24\%$ artaraq yaxşılaşmışdır.



Şəkil 4. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodlarında tək fotoelektronların amplitud paylanması və birinci fotoelektrona uyğun gələn yükin gərginlikdən asılılığı .



Şəkil 5. MSFD-3NK və MSFD-3NM fotodiodun tutumunun gərginlikdən asılılığı.

MSFD-3NK və MSFD-3M fotodiodların tutumunun ölçülməsi zamanı E7-20 ИЗМЕРИТЕЛЬ ИММИТАНС cihazından istifadə edilmişdir (Şək.5). MSFD-3NK fotodiodunda gərginliyin 23 V qiymətində epitaksial təbəqə tam həcmi yüklər oblastı ilə əhatə olunur və tutum azalır. Gərginliyin sonrakı böyük qiymətlərində MSFD-3NK fotodiodunun tutumu 176 pF olmuşdur.

4.Yeni hazırlanacaq PİN fotodiodların istehsalat şablonları hazırlanmış və MSFD-3NM + LFS-3 ssintilyatorlu detektorun hazırlanması və qamma şüalara həssaslığı tədqiq edilmişdir.

MSFD-3NM + LFS-3 ssintilyatorlu detektorun hazırlanma ardıcılığı

-Təcrübədə istifadə edilən MSFD-3NM fotodiodu 2020 ci illərdə bizim kalobarasiya tərəfindən hazırlanmışdır.Yeni MSFD-3NM fotodiodu Malasiyanın MIMOS (Malaysia's national Applied Research and Development Centre) mərkəzində istehsal edilmişdir. Diodun aktiv sahəsi 3.7mm*3.7mm, piksel addımı və diametri 10mkm/7mkm, işləmə gərginliyi 73-74.5V və gücləndirmə əmsalı $1.1 \cdot 10^5$ -dir.

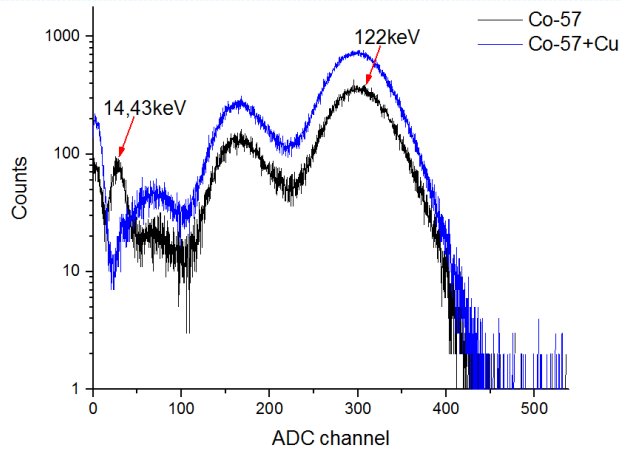
- LFS-3 ssintilyatoru qeyri-üzvi ssintilyator olub, ölçüsü 3mm*3mm*10mm , sönmə müddəti 35 nsan, kristalın sıxlığı 7.34 q/sm³, emissiya spektrinin maksimal dalğa uzunluğu 435 nm və işıq çıxışı 35000 foton/MeV olmuşdur.

-İlkin olaraq LSF-3 ssintilyatorunun MSFD-3NM fotodiodun birləşən tərəfindən başqa digər tərəfləri ağ nazik teflon təbəqəsi ilə sarınmışdır. Daha sonra LSF-3 ssintilyatoru MSFD-3NM fotodioduna şəffaf optik ötürücü ilə birləşdirilmişdir. Detektor blokundan alınan siqnalın işlənməsi üçün MAPD Spectrig modulundan istifadə edilmişdir. Ölçmələr 23 °C temperaturda aparılmışdır. MSFD-3NM fotodioduna 74.5V gərginlik tətbiq edilmişdir. Radioaktiv qamma mənbəsi olaraq Co-57, Na-22 və Eu-152 izotoplarından istifadə edilmişdir və qamma mənbələri LFS-3 ssintilyatorunun səthindən 1sm məsafədə yerləşdirilmişdir.

-MSFD-3NM + LFS-3 ssintilyatorlu detektorun qamma şüalara həssaslığının yoxlanılması

Co-57 mənbəsindən buraxılan qamma şüaların qeyd edilməsi.

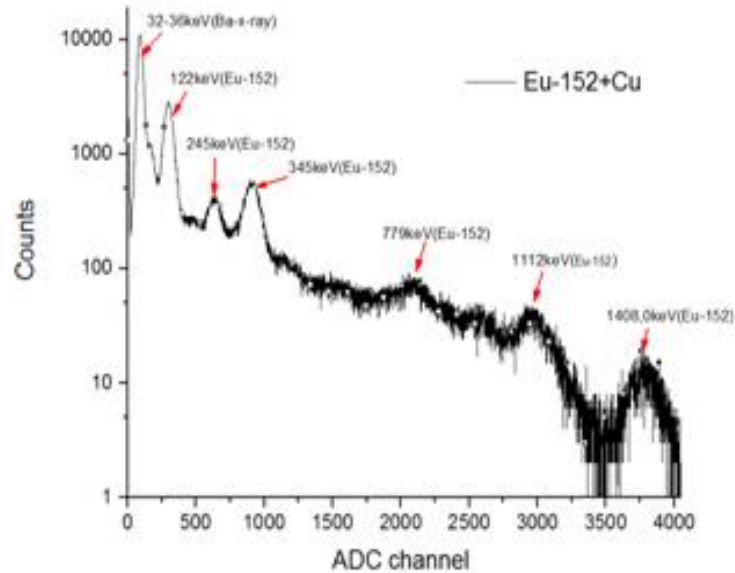
Co-57 mənbəsindən buraxılan qamma şüalarının qeyd edilməsi zamanı dəyişən gücləndiricinin gücləndirməsi 35 dB, Na-22 və Eu-152 mənbələrində isə dəyişən gücləndiricinin gücləndirməsi 25 dB seçilmişdir. Co-57 mənbəsi enerjiləri 122keV və 14,43keV olan müxtəlif qamma və x-ray şüaları buraxır. 122keV enerjide Kompton səpilməsi baş verir və səpilmədə iştirak edib enerjisini tam itirməyən ssintilyatoru tərk edən elektron və ya qamma şüası nəticəsində yaranan hadisələr aşağı enerji oblastında müşahidə edilir (112-220-ci kanal). 14.43keV enerjili x ray şüalanması olmağını yoxlamaq üçün mənbə ilə detektor arasına 2 mm qalınlıqlı mis təbəqə yerləşdirilmişdir, lakin şüalanma spektrində heç bir dəyişiklik olmamışdır və bu hadisə 14.43 keV enerjili şüanın x-ray şüalanması olduğunun göstəricisidir. Hər iki şüalanma üçün enerji ayırd etməsi 55.73 % və 23.69 % alınmışdır.



Şəkil 6. Co-57 mənbəsinin buraxdığı qamma şüalarının amplitud paylanma spektri

Eu-152 nöqtəvi mənbəsinin buraxdığı qamma şüaların amplitud paylanma spektri.

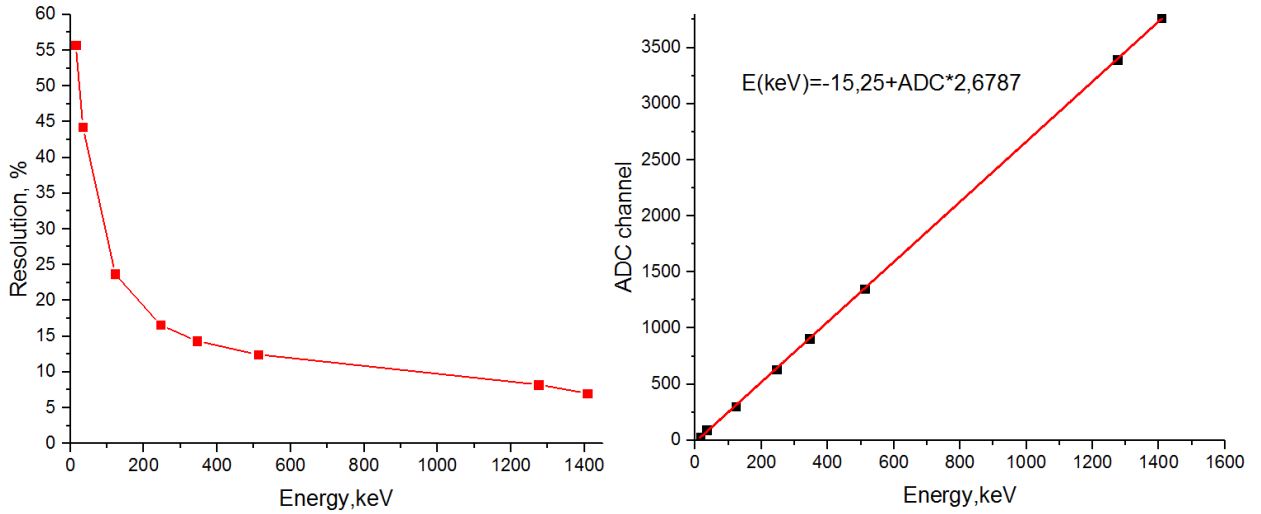
Son olaraq Eu-152 nöqtəvi mənbəsi şüalandırılmış və beləliklə, qamma şüaların amplitud paylanma spektrində Eu-152 mənbəsinin buraxdığı 8 qamma şüaların xətti müşahidə edilmişdir və bu spektrlərin enerjiləri 32keV, 122keV, 245keV, 345keV, 779keV, 964keV, 1112keV və 1435.8keV olmuşdur, enerji ayırdetməsi isə 44.25% (34keV), 23.7% (122keV), 16.56% (245keV), 14.33% (345keV) və 6.95% (1408keV) alınmışdır.



Şəkil 7. Eu-152 mənbəsinin buraxdığı qamma şüalarının amplitud paylanması

MSFD-3NM + LFS- 3 detektor blokunda qeyd edilən siqnalın xəttiliyinin saxlanması

Daha sonra qeyd edilən qamma şüalarının amplitud paylanasından istifadə edərək MSFD-3NM+ LFS ssintilyatorundan ibarət detektor blokunun xəttiliyi qurulmuş və detektor bloku öz xəttiliyini 14.43keV-1408keV enerji intervalında tam saxladığı və $E(\text{keV}) = -15.25 + \text{ADC} * 2.6787$ qanuna uyğunluqla dəyişdiyi müəyyən edilmişdir.



Şəkil 8. MSFD-3NM+ LFS sisintilyatorundan ibarət detektor bloku ilə alınmış enerji ayırd etməsinin qamma şüasının enerjisindən asılılığı və kalibrləmə əyrisi

Xətilyin saxlanması MSFD-3NM fotodiodlarında toplam piksellərinin sayının 136900 olması ilə bağlı olmuşdur. Naməlum radioizotopların yaydığı qamma şüasının enerjisi bu asılılıq vasitəsi ilə təyin edilmişdir. “MSFD-3NM + LFS-3” detektor bloku, MSFD fotodiodu yüksək piksel sıxlığına malik olması səbəbindən böyük enerji intervalında xətti asılılıq nümayiş etdirir. Bu zaman fotoelektronların enerjiyə görə paylanmasının qamma şüasının enerjisindən asılılığı 55% -dən 6.95 %-ə qədər dəyişdiyi müşahidə edilmişdir. Detektor bloku vasitəsi ilə minimum qeyd ediləbilən enerji 14.43keV olmuşdur.

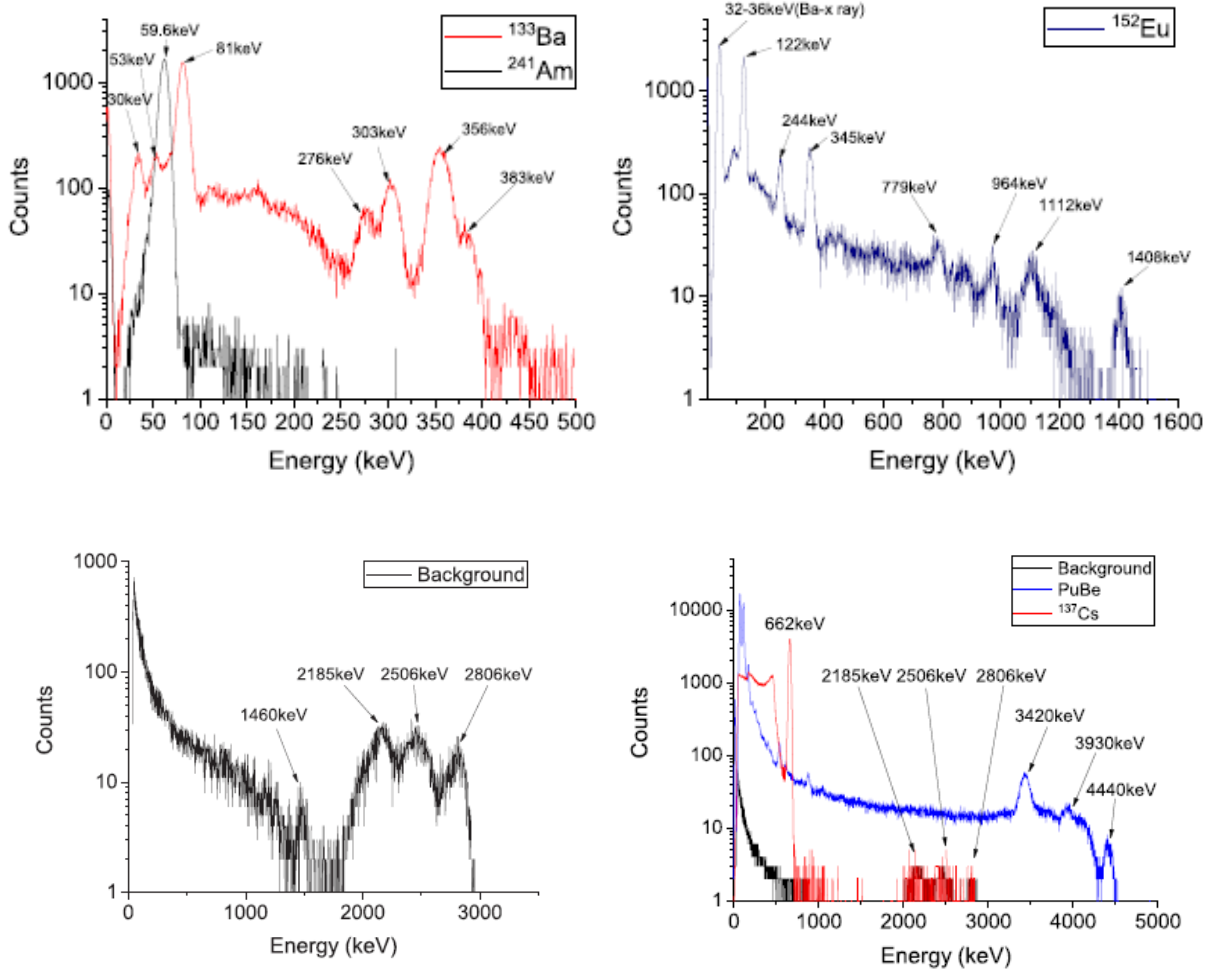
5.Yeni 16 elementli matrisin yığılması. Layihədə nəzərdə tutulan ardıcılığa uyğun olaraq yeni hazırlanacaq PİN fotodiodların istehsalatı NÜRDAM-da başlanılmışdır. Bununla yanaşı MSFD-3NM əsaslı 16 elementli matrisin hazırlanması həyata keçirilmişdir. Hazırlanmış matris elementinin texniki parametrləri təyin edilmiş və aşağıdakı cədvəldə verilmişdir.

Manufacture	Zecotek Photonics
Type	MAPD-3NM
Package	PCB
Active area	17×17 mm ²
Channel	16 (4×4, each element - 3.7×3.7 mm ²)
Pixel pitch/pixel (diameter)	10 um/7 um
Total Pixels	2190400 (136900 pixels/channel)
Fill factor	76 %
Gain	1×10 ⁵
Spectral response	300-900 nm (max at 450 nm)
Operation voltage range	73-74.8 V
Breakdown voltage	71.1 V
Dark current	2-8 uA
Capacitance/channel	3.2nF/202 pF

7.Yeni hazırlanmış MSFD-3NM və LaBr ssintilyatoru əsasında hazırlanmış detektorlar 30-4440keV enerji intervalında xəttilyi yoxlanılmışdır. Belə detektor sistemləri geniş enerji intervalında tətbiq edilməklə yanaşı həmçinin də kiçik enerji ayırd etməsinin alınmasına imkan vermişdir. 662keV enerjili qamma şüası üçün enerji ayırd etməsi 4% alınmışdır. Bu isə LFS ssintilyatoru ilə alınmış nəticələrdən 50% daha optimaldır

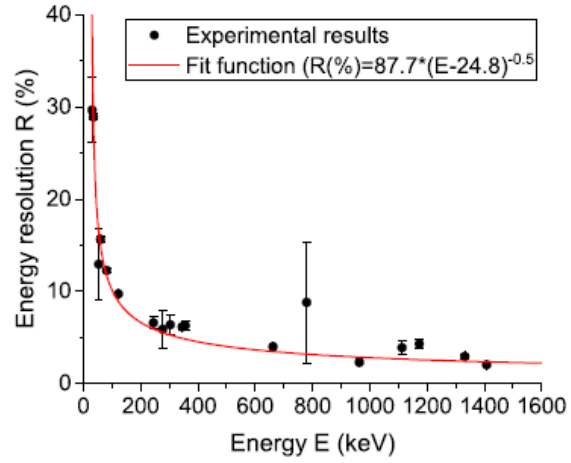
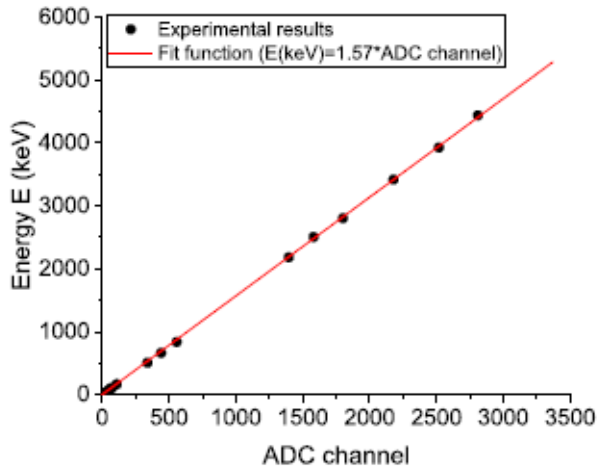
Ssintilyator olaraq LaBr istifadə edilmişdir. Ölçmələr otaq temperaturunda aparılmış və siqnalın oxunması üçün əməkdaşlıq çərçivəsində hazırlanmış MAPD Spectrig qurğusundan istifadə edilmişdir. Qamma mənbəsi olaraq 109Cd, 137Cs, 133Ba və 152Eu mənbəsi istifadə edilmişdir. Qeyd edilən qamma şüaların enerjisi 30-4440 keV

enerji intervalını əhatə etmişdir.



Şəkil 9. Am-241, Ba-133, Eu-152, daxili fon, Cs-137 və PuBe mənbəsinin buraxdığı qamma şüalarının amplitud paylanması

Daxili fon çəkilərkən müşahidə edilən 2185keV, 2506keV və 2806 keV enerjili hadisələr kristalın daxilindəki $^{223}\text{Ra} + ^{227}\text{Th}$ çevrilməsi zamanı buraxılan enerjiləri ^{211}Bi ($E_U = 6622 \text{ keV}$), və ^{215}Po ($E_U = 7386 \text{ keV}$) olan alfa şüalanmasına uyğun gəlir. PuBe izotopunda alfa mənbəsinin Be izotopu ilə nüvə reaksiyasına daxil olduğunda $\alpha + ^9\text{Be} \rightarrow n + ^{12}\text{C}$ yeni yaranan karbon izotopu həyəcanlanmış halda olur. Bu zaman karbon izotopu 4440keV enerjili qamma şüası buraxır. Buraxılan qamma şüasının annihilyasiyası zamanı buraxılan 511keV enerjili qamma şüalar bir neçə dəfə detektoru tərk etdiyindən spektrdə $4440-511\text{keV}=3929\text{keV}$ və $4440-2*511\text{keV}=3418\text{keV}$ enerjili qamma şüaları müşahidə edilir.

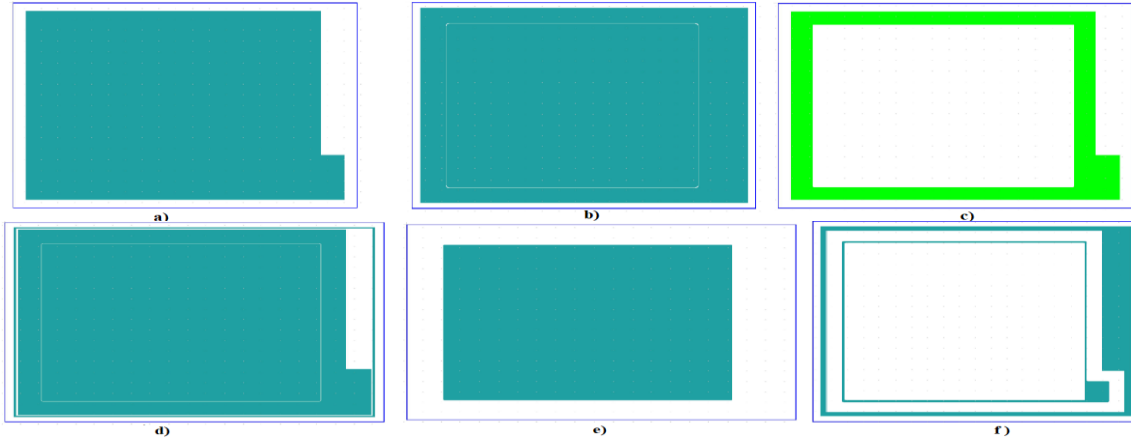


Şəkil 10. MSFD-3NM+ LaBr sisintilyatorundan ibarət detektor bloku ilə alınmış enerji ayırd etməsinin qamma şüasının enerjisindən asılılığı və kalibrləmə əyrisi

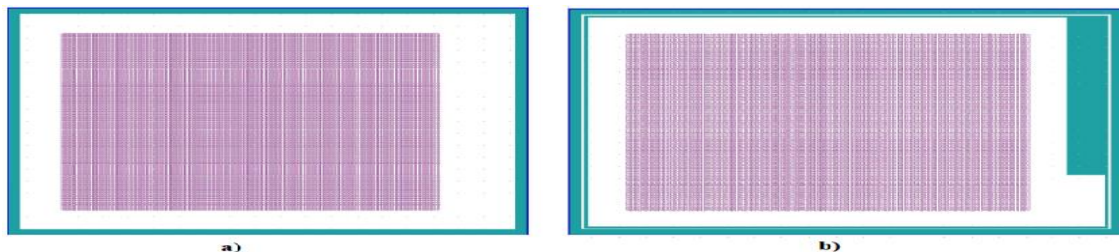
Yeni detektor modulu 4440 keV enerji intervalına kimi xətiliyini saxlamış və 662keV enerjili qamma şüası üçün enerji ayırd etməsi 4% alınmışdır. Alınan nəticələr göstərmişdir ki bu tip qeydedicilərin plastik ssintilyatorlar əsasında hazırlan detektorlarda da uğurla tətbiq oluna bilər.

6. Silisium əsaslı PIN fotodiod (Si-PIN PD) və Pikselli Fotodiodun (Px-PD) istehsalında istifadə olunan yeni hazırlanmış litoqrafiya maskalarının hazırlanması və test edilməsi.

NURDAM və AMEA tədqiqatçıları ilə aparılan qiymətləndirmələr nəticəsində, Si-PIN PD və Px-PD istehsalı üçün cəmi 8 litoqrafiya maskasına ehtiyac olduğu qənaətinə gəlinmişdi. İstehsal edilməsi planlaşdırılan iki fərqli fotodiod üçün 6 maska ümumdür (Şəkil 11a-11f), digər 2 maska isə Px-PD-lərin piksellərinə uyğun olaraq fərqli dizayn edilmişdir (Şəkil 12 a və b).



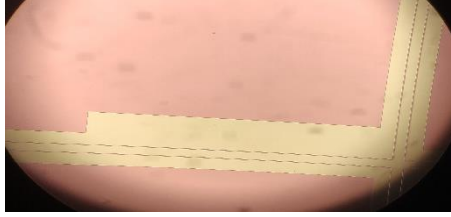
Şək. 11. a) P⁺⁺ mask b) N⁺⁺ mask c) Oksid aşındırma mask d) Metal yuvası mask e) Titanium aşındırma mask f) Aluminum aşındırma mask



Şək. 12. a) N⁺⁺ Pikel mask b) Pikel yuvası mask

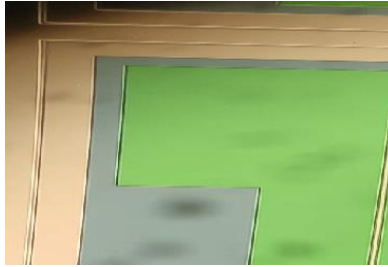
Silisium PIN Fotodiod üçün İstehsal Prosesi

Ön və arxa tərəfdən silisium altlığın hər iki tərəfinin nəm aşındırma yolu ilə oksid ($d \approx 550$ nm) təbəqəsinin götürülməsi.



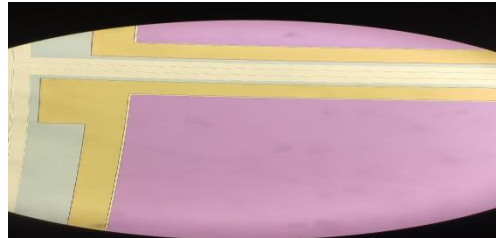
Şəkil 13. SiO₂ təbəqəsi götürüldükdən sonra

Boron silisium altlığın arxa və ön tərəfindən diffuziya olunması (şək. 14). Göy rənglər aşqarlanmış regionlardır.



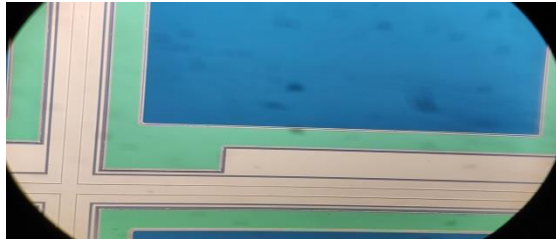
Şək.14 . Boron hopdurulmuş quruluşun şəkili

P⁺ bölgəsinin dopinq prosesi uğurla başa çatdıqdan sonra ikinci litoqrafiya prosesi tətbiq edilərək açılan kanallara Fosfor əlavə edilərək N⁺ bölgəsi yaradılmışdır. Bu məqsədə uyğun olaraq, Px PD-lər üçün piksel nöqtələri N⁺ bölgələridir. Buna görə də, Si-PIN PD-lər üçün Şəkil 11 d-də göstərilən maskanın və Px-PD-lər üçün Şəkil 12a-da göstərilən maskanın tətbiqi ilə ikinci litoqrafiya prosesi həyata keçirilmişdir (Şəkil 15).



Şək.15 . Si-PIN PD quruluşun fosforla aşqarlanması

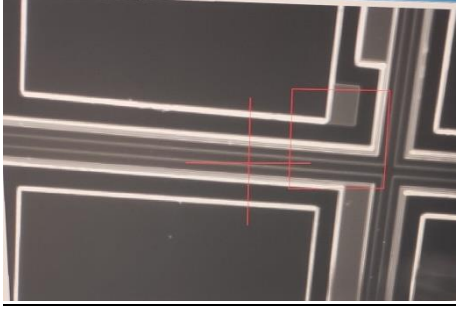
10 nm Titanium təbəqəsi ilə Si-PIN PD səthinin örtülməsi. Xüsusi həlledicilərlə lazımsız bölgələrdən Ti təbəqəsinin aşındırılması şəkil 16.



Şək. 16. Ti təbəqəli Si-PIN PD quruluş

Daha sonra, Si-PIN PD səthi (şək. 17) aluminium ilə örtülmüşdür. Aluminium təbəqənin qalınlığı 1000 nm

olmuş və maska uyğun olaraq qalan hissələr aşındırılmışdır (Şək.17). Sonunda Si-PIN PD istehsalatı tamamlanmışdır.

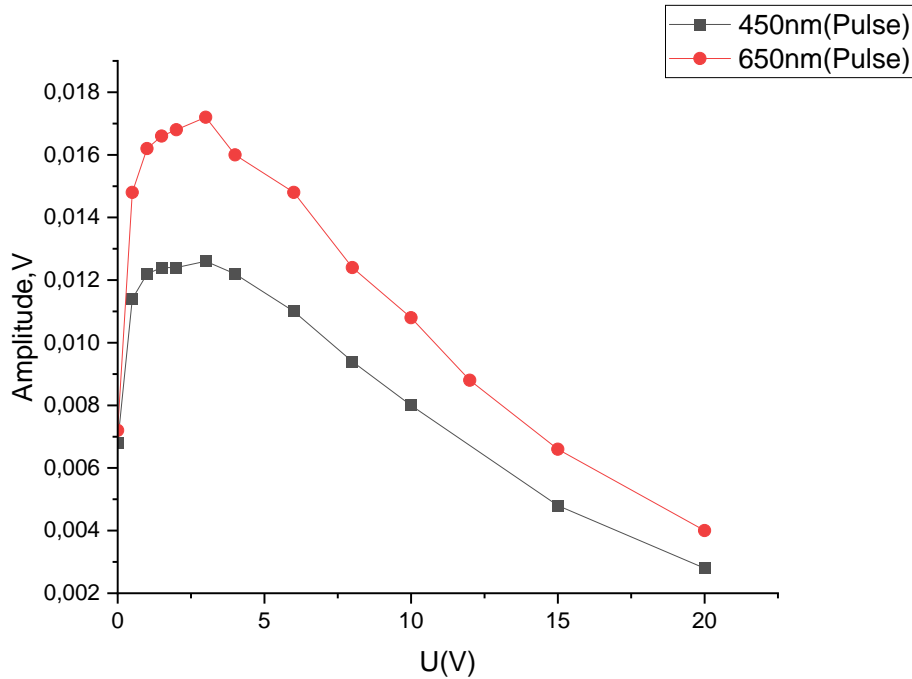


Şək. 17. Aluminium metal kontaktlı Si-PIN PD quruluş

AMEA-Radiasiya Problemləri İnstitutu və Türkiyənin Abant İzzet Baysal Universitetinin Nüvə Detektorları və Araşdırma Mərkəzinin (NÜRDAM) əməkdaşlarının birgə istehsal etdiyi Si-PIN fotodiodlar hazırlanmışdır. Yeni hazırlanmış Si-PIN fotodiodların yoxlanılması və test edilməsi AMEA-Radiasiya Problemləri İnstitutuna həyata keçirilmişdir.

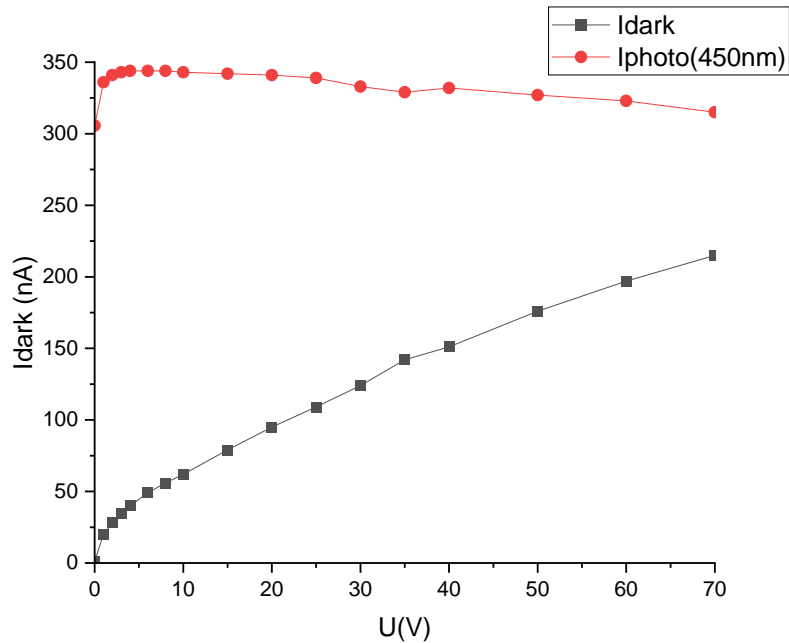
Yeni hazırlanmış PIN fotodiodların yoxlanması Radiasiya Problemləri İnstitutunda həyata keçirilmişdir.

PIN fotodiodların həssaslıqlarını yoxlamaq üçün 450nm və 650nm dalğauzunluqlu işıqlandırıcılar istifadə edilmişdir. Generatoran işıqlandırıcı diode impuls eni 5µsec və tezliyi 1kHz olan düzbucaqlı impulslar verilmişdir. Birinci şəkildə PIN diodun aktiv sahəsinin mərkəzinə salınmış işıq selinin yaratdığı həssaslığın gərginlikdən asılılığı qurulmuşdur.



Şək. 18. PIN fotodiodun həssaslığının gərginlikdən asılılığı (impuls metodu).

Gərginlik artdıqca foto həssaslığın azalması RC böyük olmasa ilə bağlı olmuşdur. Bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün PIN fotodiod eni-960µsec və tezliyin 1kHz olan impulslardan istifadə edərək həssaslıq tədqiq edilmişdir. Bu zaman kəskin dəyişmə müşahidə edilməsədə həssaslığın azalması müşahidə edilmişdir. Bu dəyişmə sətdə istifadə edilən Ti təbəqəsinin müqavimətinin böyük olması ilə bağlı olmuşdur. PIN fotodiodun qaranlıq cərəyanı~100nA ətrafında olmuşdur.



Şək. 19. PİN fotodiodun həssaslığının gərginlikdən asılılığı (sabit işıq seli metodu).

PİN fotodiodun səthinə hopdurulmuş Ti təbəqəsinin həssaslığının tədqiqi.

Bunun üçün şüşə üzərinə iki hissəyə 10nm qalınlıqlı Ti təbəqəsi hopdurulmuşdur. Daha sonra LED ilə eni 40mksec tezliyi 1kHs olan işıq selindən istifadə edərək şəffaflıq tədqiq edilmişdir. İlk olaraq şüşənin üzərinə işıq seli salınmış amplitud təyin edilmiş APIN=15mV (with glass), daha sonra Ti təbəqəsinin üzərinə salınaraq APIN=14mV (with glass+Ti layer) amplitud təyin edilmişdir. Şəffaflığın $\eta=14/15=93\%$ olduğu təyin edilmişdir. Ti təbəqəsinin müqaviməti təyin edilərək kvadrat (tərəfləri $a=a$) hissə seçilmişdir və onun iki tərəfinə gümüş pastası yaxılmışdır. Bu zaman Ti təbəqəsinin müqaviməti $-1.2 \text{ M } \Omega$ olmuşdur.

Daha sonra 18nm Ti hopdurulmuş şüşənin şəffaflığı tədqiq edilmişdir və şəffaflığın $\eta=11.6/15=77\%$ olduğu təyin edilmişdir. Bu zaman Ti təbəqəsinin müqaviməti $-2.75k \Omega$ olmuşdur.

Növbəti mərhələ üçün PİN və piksellə fotodiodların səthində 18nm qalınlıqlı Ti təbəqəsinin hopdurulmasının daha optimal olduğu müəyyən edilmişdir.

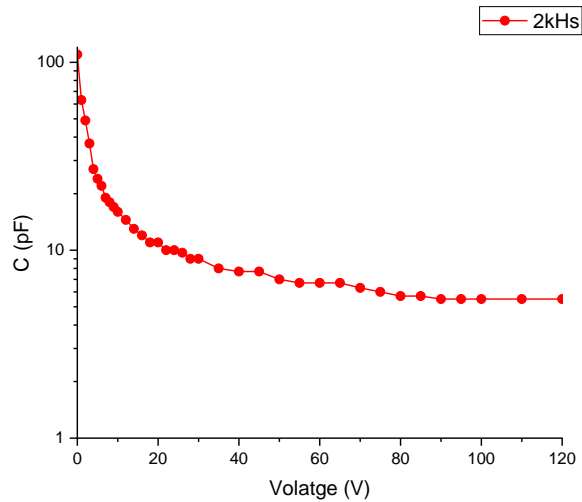
8.Yeni quruluşlu Si-PİN fotodiodların qırmızı və göy işıqlara həssaslığı tədqiq edilmiş və göstərilmişdir ki, yeni hazırlanmış PİN fotodiodların həssaslığı APD və MAPD-3NK fotodiodları ilə eynidir (70%). VAX-dan əldə edilmiş nəticələrdən yeni Si-PİN fotodiodun qaranlıq cərəyanının 20V gərginlikdə 150 nA ətrafında olduğu təyin edilmişdir. Yeni hazırlanmış PİN fotodiodun VFX-dan istifadə edərək aktiv həcmnin qalınlığının 186 mkm olduğu müəyyən edilmişdir.

Layihə üzrə Silisium əsaslı PİN fotodiodların (Si-PIN PD) ikinci istehsalı prosesi həyata keçirilmişdir.

Layihə üzrə Silisium əsaslı PİN fotodiodların (Si-PIN PD) ikinci istehsalı həyata keçirilmişdir. Yeni PİN fotodiodların yoxlanılması 27.12.2021-ci ildə Radiasiya Problemləri İnstitutunda həyata keçirilmişdir. Yeni hazırlanan fotodiodların Volt-Farad xarakteristikası şəkil.20-də verilmişdir. Yeni hazırlanmış PİN fotodiodun sahəsi 3mm*3mm olmuşdur. Tətbiq edilən gərginliyin 80-90V qiymətində fotodiodun tutumu 5.5pF olmuşdur. Fotodiodun tutumunu təyin edərək E7-20 qurğusundan istifadə edilmişdir. Qurğudan verilən siqnalın parametrləri belə seçilmişdir: 40mV və 2 kHs Tezliyin aşağı qiymətinin seçilməsinin əsas səbəbi isə tutum təyin edilərkən siqnalın məhz Ti təbəqəsinə yox, məhz yarımqeçirici keçidə düşməsidir.

Tətbiq edilən gərginlik artdıqca PİN diodda (Ti-SiO-Si) elektronların SiO-Si sərhəddinə yığılır gərginliyin sonrakı qiymətlərində inversiya təbəqəsi yaranır. Gərginlik artdıqca yeni yaranan n-kanalla altlıq arasında fəza yüklər oblastının eni artır və nəticədə tutum azalır. Tətbiq edilən gərginliyin böyük

qiymətlərində 80-90V artıq fəza yüklər oblastı doymaya yaxınlaşmışdır. Bu zaman yeni PİN fotodiodun tutumunun 5.5pF olduğu tapılmışdır. PİN fotodiod üçün alınmış bu qiymətdən istifadə edərək fəza yüklər oblastının eni hesablanmışdır.



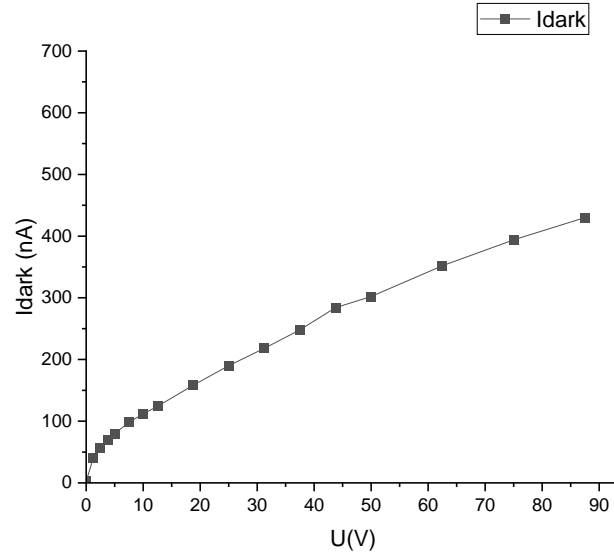
Şəkil 20. PİN fotodiodun volt-farad xarakteristikası.

$$C = \epsilon_0 \times \epsilon_{si} \times A / d$$

Burada ϵ_0 - dielektrik nüfuzluğu sabitidir- 8.85×10^{-12} F/m, ϵ_{si} - silisiumun dielektrik nüfuzluğu -11.7, A-p-n keçidin sahəsi (m^2) və d-həcmi yüklər oblastının qalınlığıdır (m).

$$d = (\epsilon_0 \times \epsilon_{si} \times A) / C = (8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} \times 11.7 \times 9 \times 10^{-6} \text{ m}^2) / 5.5 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.000186 \text{ m} = 186 \text{ mkm}$$

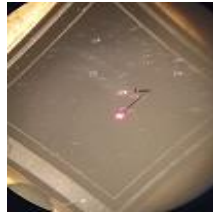
Beləliklə, PİN fotodiodun həcmi yüklər oblastının qalınlığı 186 mkm alınmışdır. Yeni hazırlanan PİN fotodiodun qaranlıq cərəyanı 350nA böyük alınmışdır. Bununla yanaşı, səthdəki Ti təbəqəsinin qalınlığı yetişdirilmə zamanı optimal seçilməmişdir. Qaranlıq cərəyanın belə böyük alınması vayferin keyfiyyətindən və aparılan texnoloji proseslərin təmizliyindən asılıdır. Bununla yanaşı, qaranlıq cərəyanı azaltmaq üçün gələcəkdə əlavə qoruyucu üzüklərin qoyulması nəzərdə tutulmuşdur.



Şəkil 21. PİN fotodiodun həssaslığının gərginlikdən asılılığı (sabit işıq seli metodu).

PİN fotodiodun həssaslığını tədqiq etmək üçün 650 nm dalğa uzunluqlu lazer istifadə edilmişdir. Lazer diodunu qidalandırmaq üçün Tektronix generatorundan davam etmə müddəti 1mksan, tezliyi 10kHs və amplitudu 4V olan düzbucaqlı siqnal verilmişdir. Fotohəssaslığı yoxlamaq üçün yığılmış dövrə şəklində göstərilmişdir. PİN fotodiodda yaranan siqnal 1kOm yükləmə müqavimətindən götürülərək ossiloskopa verilmişdir. Optik fokuslayıcıdan istifadə edərək lazer şüasının diametrini 30mkm qədər fokuslanmışdır. Daha sonra lazer foton selini elektrodlar arasına və PİN fotodiodun aktiv sahəsinin mərkəzinə salmaqla fotodiodun həssaslığı tədqiq edilmişdir.

İlk olaraq fokuslanmış lazer şüası fotodiodun mərkəzinə salınmışdır. Bu zaman yaranan fotosiqnal ossiloqrafa göstərilmişdir. Tətbiq edilən gərginliyin 18V qiymətində fotosiqnalın amplitudu 14.5mV olmuşdur.



Şəkil 22. Fotosiqnalın ilkin olaraq ossiloqrafda təsviri

Daha sonra fokuslanmış lazer şüası fotodiodun elektrodları arasına salınmışdır. Bu zaman yaranan fotosiqnal ossiloqrafa göstərilmişdir. Tətbiq edilən gərginliyin 18V qiymətində fotosiqnalın amplitudu 15.6 mV olmuşdur.

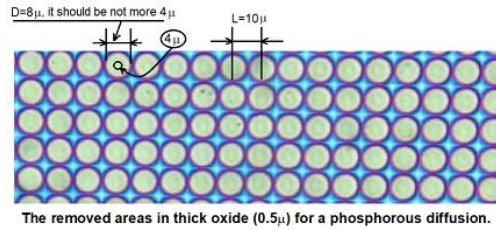


Şəkil 23. Lazer şüasının fotodiodun elektrodları arasında yaranan fotosiqnalın ossiloqrafda təsviri

Müəyyən olmuşdur ki, iki kontakt oblastının arası həssaslığa görə PİN fotodiodun aktiv sahəsindən 7.5% daha yüksəkdir. Aktiv sahəsinin həssaslığının aşağı alınmasının əsas səbəbi SiO₂ təbəqəsi üzərinə hopdurulmuş Ti təbəqəsinin müqavimətinin çox yüksək olması ilə bağlı olmuşdur.

Hopdurulmuş iki müxtəlif Ti təbəqəsinin müqaviməti təyin edilərək kvadrat (tərəfləri a=a) hissə seçilmişdir və onun iki tərəfinə gümüş pastası yaxılmışdır. Bu zaman Ti təbəqələrinin müqavimətləri 4.2 M Ω və 3 M Ω olmuşdur. Alınmış müqavimətlərdə bir-birindən fərqlənmişdir. Alınmış bu müqavimət bu fotodiodlar çox yüksək olmuşdur. Növbəti istehsalatda bu müqavimətin 100 dəfələrlə azaldılması nəzərdə tutulmuşdur.

Bu mərhələdə həmçinin yeni hazırlanmış piksellə fotodiodlarda test edilmişdir. Yeni hazırlanmış fotodiodlarda aşağıdakı problemlər aşkarlanmışdır (şək.23).



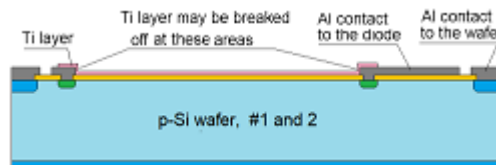
Şəkil 23. Piksellə fotodiodun səthinin Probe station PA200 qurğusu vasitəsi ilə görüntüsü.

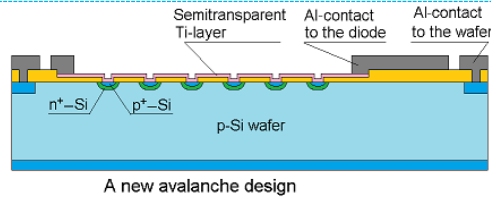
Piksəllər üçün açılmış yuvaların diametri 8 mkm olmuş və piksellərin addımı 10 mkm olmuşdur. Nəticədə hazırlanmış quruluş 10V gərginlikdə artıq sıradan çıxmış və Ti təbəqəsinin üzəri isə əlavə SiO təbəqəsi çəkildiyindən piksellər yoxlanılmamışdır. Beləliklə, növbəti istehsalat mərhələsində istehsalat kartlarında göstərilənlərə uyğun olaraq pikselin diametrinin 4 mkm olması və piksellərin addımı 10 mkm olması təklif edilmişdir.

Layihə üzrə Silisium əsaslı PİN fotodiodların (Si-PIN PD) üçüncü istehsalı ion implantasiya metodundan istifadə edərək həyata keçirilmişdir.

Yeni təkliflər əsasında hazırlanması nəzərdə tutulan PİN fotodiodların istehsalatı həyata keçirilmişdir. Bu zaman altıq olaraq p-tip, müqaviməti 700 Om olan silisiumdan istifadə edilmişdir. Daha sonra fotolitografiya metodundan istifadə edərək n+/p+ regionların açılması və aşqarlanması həyata keçirilmişdir. P-tip aşqar olaraq B (BBr₃) elementindən və n-tip aşqar olaraq fosfor elementindən istifadə olunmuşdur. Daha sonra səthində 90 nm qalınlığında SiO₂ təbəqəsi yetişdirilmişdir. Əvvəlki mərhələlərdə Ti təbəqəsinin hopdurulmasında problem olduğundan bu mərhələdə birinci Al kontaktların, daha sonra isə Ti təbəqəsinin hopdurulması həyata keçirilmişdir. Bu zaman nazik 70 nm Ti təbəqəsi səthdə yaranmışdır. Lakin bu zaman Al ilə Ti təbəqəsi arasında kontakt olmaması ehtimalı yaradılmışdır. Bunun səbəbi isə qalın Al təbəqəsinin (1000 nm) üzərinə Ti (15 nm) hopdurulması zamanı təbəqələrin kəsişmə nöqtəsinin qırılmasının baş verməsidir. Lakin bu çətinliyi aradan qaldırmaq üçün kontaktlardan birinin birbaşa Ti səthindən götürülməsi nəzərə alınmışdır. Lakin mövcud olan bu çətinlik NÜRDAM-ın Ti texnologiyasını tam mənimsəməsi ilə bağlı olmuşdur.

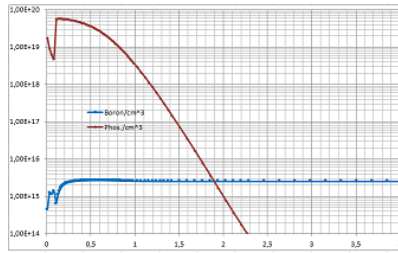
Bu mərhələdə fotodiodların hazırlanmasında Orta Doğu Texnik Universitetinin laboratoriyalarında ion implantasiya metodundan istifadə edilməsi planlaşdırılmışdır. İstifadə edilən ionların enerjisi 40 keV intervalında olmuşdur. Bu metodun istifadəsi qaranlıq cərəyanın azaldılmasına və p-n keçidlərin dərinliyə və enə nüfuz etməsini daha dəqiq təyin etməyə gətirib çıxarır. Bu isə yeni piksellə fotodiodların hazırlanmasına imkan verəcəkdir.





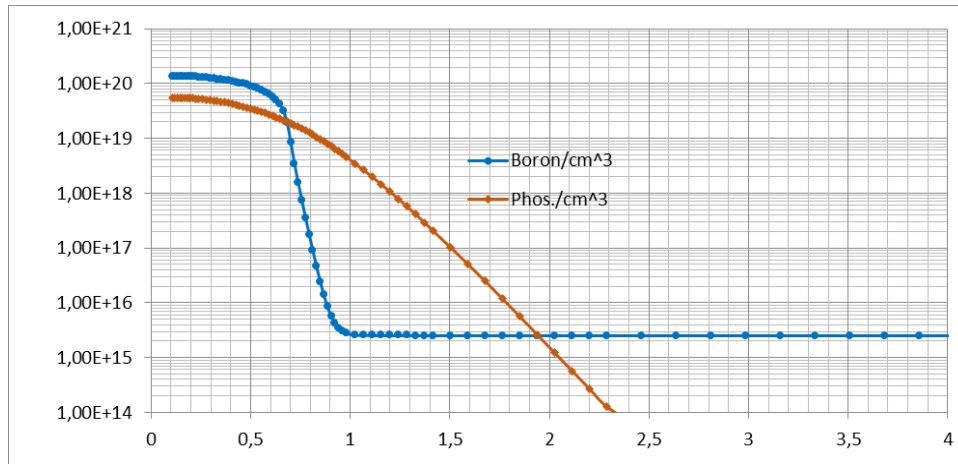
Şək.24-da hazırlanmış yeni fotodiodların sxemi göstərilmişdir.

PROZWICH və TIDE proqramlarından istifadə edərək yeni quruluşlarda aşqar atomlarının paylanması və p-n keçidin hansı dərinlikdə yaranması göstərilmişdir. İlk olaraq p-tip altlıq daxilinə 50 keV enerjili fosfor ionları implantasiya edilmişdir. Bu zaman şüalanma dozası $3 \cdot 10^{15}/\text{sm}^2$ seçilmişdir. Payalanmadan görüldüyü kimi fosfor ionları silisium daxilində 2 mkm dərinliyə kimi nüfuz etmiş və maksimum konsentrasiya ($5 \cdot 10^{19}/\text{sm}^3$) 100 nm ətrafında müşahidə edilmişdir.



Şək.25 Fosfor ionunun p tip altlıq daxilində dərinliyə görə paylanması.

Daha sonra 50 keV enerjili bor ionlarından istifadə edərək silisium altlıq implantasiya edilmişdir. Bu zaman şüalanma dozası $5 \cdot 10^{15}/\text{sm}^2$ seçilmişdir. Bor ionlarının qaçış yolu 161 nm, aşqar atomlarının konsentrasiyası isə $1.5 \cdot 10^{20}/\text{sm}^3$ olmuşdur.



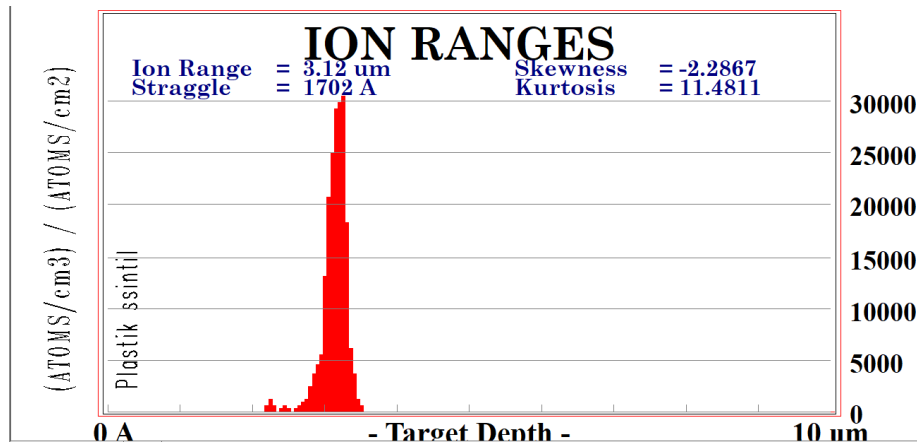
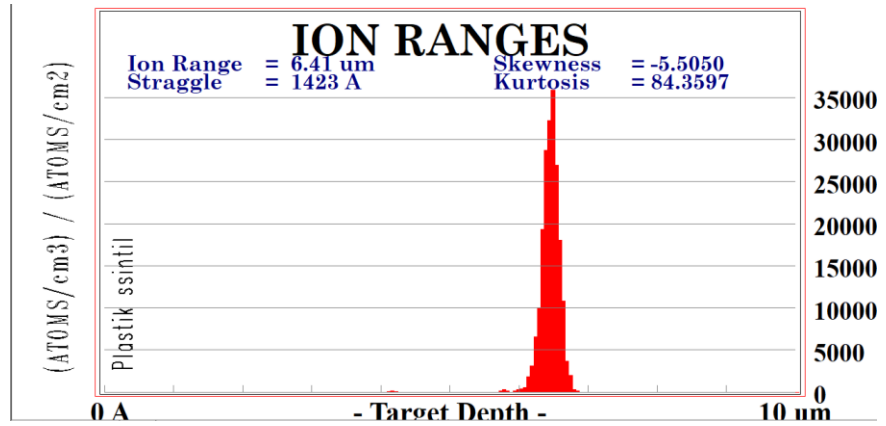
Şək.26 Bor ionunun p tip altlıq daxilində dərinliyə görə paylanması.

Fotodiodun deşilmə gərginliyinin 70 V ətrafında olması gözlənilir.

Bununla yanaşı layihə üzrə nəzərdə tutulmuş neytron detektorlarının hazırlanması üçün müxtəlif ssintilyator materiallarının səthinə qalınlığı 1 mkm olan bor təbəqəsi hopdurulmuş və ssintilyatorların neytronları qeydetmə həssaslığı tədqiq edilmişdir.

Təklif olunan neytron detektorlarında ssintilyator və fotodiodun səthində termal tutucu kimi bor istifadə olunmuşdur. Termal neytronların qeydedilməsi onların bor tərəfindən udulmasına əsaslanır və bu zaman

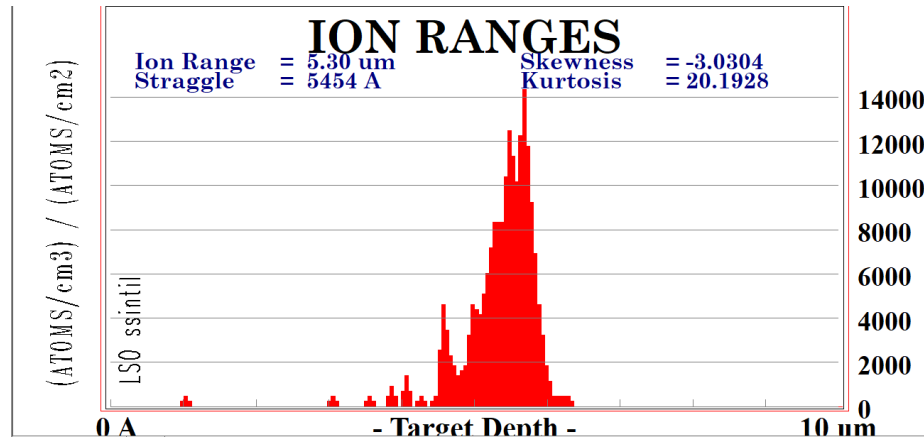
Li-ion (enerji- 0.84 MeV), alfa zərrəciyi (enerji -1.47 MeV) və qamma-şüası (enerji-0,48 MeV) əmələ gəlir. Reaksiyadan buraxılan qamma-şüaları və alfa hissəcikləri termal neytronları ayırd etmək üçün əsas rol oynayır. Bunun üçün ssintilyator olaraq LFS və plastik ssintilyatorlar istifadə edilməsi planlaşdırılmışdır. Alfa zərrəciyin enerjisinin kiçik olması ssintilyatorların üzərinə hopdurulacaq bor təbəqəsinin qalınlığının dəqiq seçilməsi olduqca vacibdir. Bunun üçün SRIM-2013 simulyasiya programından istifadə edərək 1.47 MeV enerjili alfa zərrəciklərin və 0.84 MeV enerjili Li ionunun qaçış yolu hesablanmışdır. Şəkildə 10 mkm qalınlıqlı plastik ssintilyator üzərinə 1.47 MeV enerjili He və 0.48 MeV enerjili Li ionunun qaçış yolunun nəzəri simulyasiyası göstərilmişdir. Məlum olmuşdur ki, 1.47 MeV enerjili He və 0.48 MeV enerjili Li ionunun CH birləşməli plastik ssintilyatorada qaçış yolunun uzunluğu 6.41 mkm və 3.12 mkm-dir (Şək.27). Başqa sözlə plastik ssintilyator üzərinə hopdurulacaq bor təbəqəsinin qalınlığının 1-2 mkm olması məhz reaksiya hesabına yaranan He ionun enerjisinin çox kiçik hissəsini bor təbəqəsi daxilində əksər hissəsini isə ssintilyator daxilində itirilməsi təmin ediləcəkdir. Aparılan simulyasiya nəticəsində məlum olmuşdur ki, 1.47 MeV enerjili He ionu qalınlığı 1 mkm olan bor təbəqəsində hər anqsterm məsafədə 40 eV/Ang enerji itirir. Beləliklə bor təbəqəsinin qalınlığının 10000 A olduğunu nəzərə alsaq onda He ionunun itirdiyi tam enerjinin 400 keV olduğunu taparıq. Başqa sözlə plastik ssintilyatora daxil olan He ionlarının minimum enerjisi 1.07 MeV olacaqdır. Əlbəttə bu qiymət düşmə bucağından asılı olaraq dəyişəcəkdir. Bu yolla neytronların qeyd edilməsi mümkün olacaqdır.



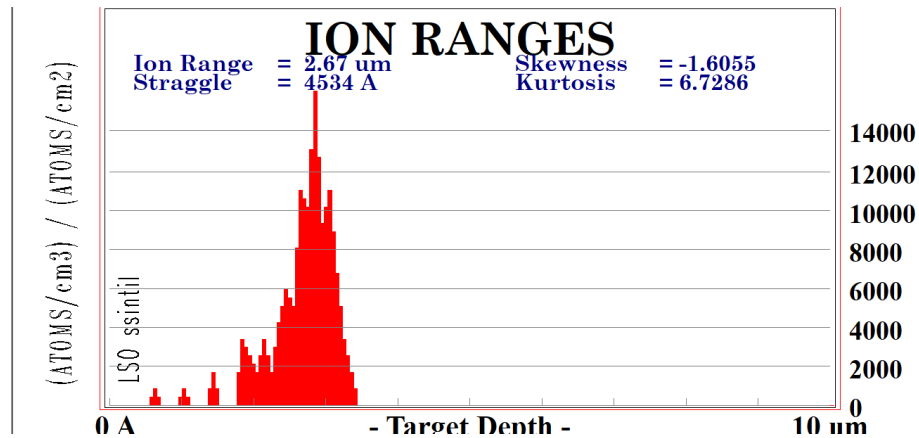
Şək. 27 1.47 MeV enerjili He ionunun və 0.48 MeV enerjili Li ionunun plastik ssintilyatorada qaçış yolunun uzunluğu və onun dərinliyə görə paylanması.

Şəkil 28-də 10 mkm qalınlıqlı LSO (LuSiO) ssintilyatorunda 1.47 MeV enerjili He və 0.48 MeV enerjili Li ionunun qaçış yolunun nəzəri simulyasiyası göstərilmişdir. Məlum olmuşdur ki, 1.47 MeV enerjili He və

0.48 MeV enerjili Li ionunun CH birləşməli plastik ssintilyatorda qaçış yolunun uzunluğu 5.3 mkm və 2.67 mkm olmuşdur. Başqa sözlə, plastik ssintilyator üzərinə hopdurulacaq bor təbəqəsinin qalınlığının 1-2 mkm olması məhz reaksiya hesabına yaranan He ionun enerjisinin çox kiçik hissəsini bor təbəqəsi daxilində əksər hissəsini isə ssintilyator daxilində itirilməsi təmin ediləcəkdir. Bu yolla neytronların qeyd edilməsi mümkün olacaqdır.

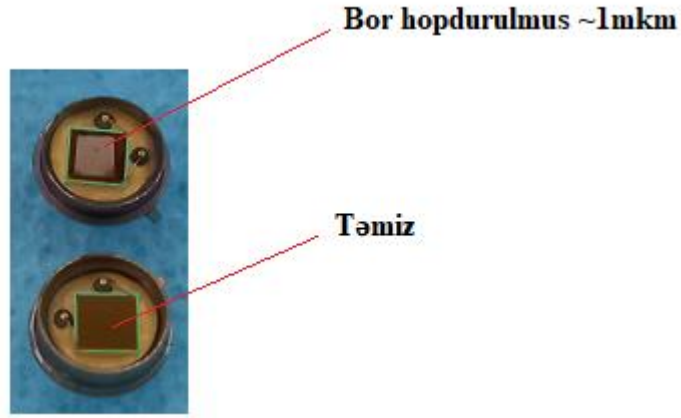


0.48 MeV Li ionunun LSO ssintilyator daxilində nüfuz etmə dərinliyi.



Şək. 28 1.47 MeV enerjili He ionunun və 0.48 MeV enerjili Li ionunun LSO ssintilyatorda qaçış yolunun uzunluğu və onun dərinliyə görə paylanması.

Fotodiodların səthinə 1 mkm qalınlıqlı bor təbəqəsinin hopdurulması həyata keçirilmişdir. Şəkil 29-da təmiz və bor hopdurulmuş PİN fotodiodların şəkilləri göstərilmişdir.



Şək. 29 Bor hopdurulmuş və hopdurulmamış PİN fotodiodlar.

Yeni hazırlanmış fotodiodların Çexiyanın West Bohemia və Texniki Universitetlərində test edilməsi.

Çexiyanın West Bohemia Universitetinin Elektronika fakültəsində yeni hazırlanmış MSFD-3NM2 fotodiodlarının parametrlərinin $-50^{\circ}\text{C} \div -10^{\circ}\text{C}$ intervalda test etmək üçün Almaniyada istehsalı olan Vötsch VC³ 7060-5-M sınaq kamerasından istifadə edilmişdir. Vötsch VC³ 7060-5-M sınaq kamerası dəqiqədə 6 K-ə qədər yüksək temperatur dəyişmə sürətinə malikdir. Bununla yanaşı sınaq kamerası temperaturdan əlavə rütubəti 10% RH p-dən 95% RH-ə qədər tənzimləməyə imkan verir. Bu kamera vasitəsi ilə nümunələrin parametrlərini $-72^{\circ}\text{C} \div +180^{\circ}\text{C}$ temperatur diapazonunda tədqiq etmək mümkündür.

Şəkil.30-da kameranın daxilində işıqlandırıcı diod və MSFD fotodiod yerləşdirilmişdir. İşıqlandırıcı dioda generator vasitəsi ilə eni 6 nsan, tezliyi 10 kHs və amplitudu 3.9 V olan düzbucaqlı signal verilmişdir. Sinyalın oxunması və fotodiodun gərginliklə təmin etmək üçün MAPD SPECTRİG qurğusundan istifadə edilmişdir. Bu qurğu vasitəsi ilə MSFD fotodiodların $-50^{\circ}\text{C} \div -10^{\circ}\text{C}$ temperatur diapazonunda parametrləri tədqiq edilmişdir.

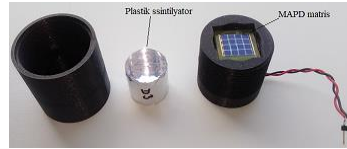


Şək.30 MSFD fotodiodun aşağı temperaturlarda parametrlərinin ölçülməsi üçün istifadə edilən qurğu.

MSFD fotodiodun gücləndirmə əmsalına uyğun gələn yükün müxtəlif temperaturda gərginlikdən asılılığı müəyyən edilmişdir. Yeni MSFD-3NM fotodiodunun deşilmə gərginliyinin temperatur əmsalı üçün $45 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ olduğu təyin edilmişdir.

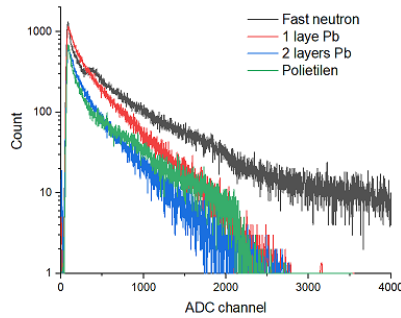
Lahiyyə üzrə MSFD fotodiod əsasında neytron detektoru hazırlamaq üçün NUVIA firmasının istehsalı olan plastik ssintilyator istifadə edilmişdir (Şək.31). İstifadə edilən plastik ssintilyatorun diametri 15 mm uzunluğu 20mm olmuşdur. Neytron mənbəsi olaraq Çexiyanın Texniki Universitetinin VandeGraf

sürətləndiricilər laboratoriyasında yüksək aktivlikli AmBe neytron mənbəsinə istifadə edilmişdir. AmBe mənbəsinin buraxdığı sürətli neytronları termal neytrona çevirmək üçün qalınlığı 14 sm olan polietilen istifadə edilmişdir. Bu zaman alınan neytronların enerjisi 0.025 eV tərtibində olmuşdur. Hazırlanmış detektorun 5 MeV enerjili neytronları birbaşa qeyd etməsində tədqiq edilmişdir. Daha sonra qeyd edilən spektrdən qamma şüalarının yaratdığı payı çıxmaq üçün qalınlığı 5 sm olan qurğuşun təbəqə istifadə edilmişdir. Bu zaman qeyd edilən hadisələrin sayı kəskin azalmışdır. Beləliklə, yeni hazırlanmış detektorun sürətli və termal neytronu qeyd etmə həssaslığı tədqiq edilmişdir.



Şəkil.31 Plastik ssintilyator, yeni hazırlanmış 16 elementli MAPD matrisi və korpus yerləşdirilməsi

Şəkil.32-da AmBe izotopunun buraxdığı neytron və qamma şüasının spektri verilmişdir. İstifadə edilən AmBe mənbəsinin aktivliyi 20MBk olmuşdur.



Şəkil.32 AmBe izotopunun buraxdığı neytron və qamma şüasının plastik ssintilyator və MAPD matrisi vasitəsi ilə çəkilmiş spektr.

Birinci olaraq AmBe mənbəsinin buraxdığı neytronlar birbaşa qeyd edilmişdir. Bu zaman hadisələrin daxilində neytronlar və qamma şüalarında müşahidə edilmişdir. Qamma şüaların təsirini aradan qaldırmaq üçün qalınlığı 5sm olan bir və iki təbəqəli qurğuşun istifadə edilmiş və bu zaman qamma şüaların spektrdəki payı minimuma edirlmişdir. Daha sonra sürətli neytronların spektrdəki payını azaltmaq üçün qalınlığı 14sm olan polietilen laylar istifadə edilmişdir. Beləliklə qeyd edilən hadisələrdən 150-2750ci kanallarda müşahidə edilən hadisələrin məhz neytronlar tərəfindən yaradıldığı müəyyən edilmişdir.

Növbəti mərhələ üçün termal neytronu qeyd etmək üçün qalınlığı 30mkm olan LiF və sürətli neytronları qeyd etmək üçün isə qalınlığı 2mm olan parafin təbəqəsindən istifadə edilməsi nəzərə alınmışdır.

Yeni hazırlanmış fotodiodların tətbiq sahələri

UB və görünən oblastda fotosiqnalların, ionlaşdırıcı qamma şüalarının və neytronların qeyd edilməsində uğurla tətbiq oluna bilər. Bu qeydedicilər əsasında hazırlanmış cihazlar radiasiya təhlükəsizliyi üzrə tibdə, ətraf mühitin təhlükəsizliyində və elmi təcrübələrdə uğurla tətbiq oluna bilər.

- 4 Layihə üzrə **elmi nəşrlər** (elmi jurnallarda məqalələr, monoqrafiyalar, icmalar, konfrans materiallarında məqalələr, tezislər) (dərc olunmuş, çapa qəbul olunmuş və çapa göndərilmişləri ayrılıqda qeyd etməklə, uyğun məlumat - jurnalın adı, nömrəsi, cildi, səhifələri, nəşriyyat, indeksi, İmpact Factor, həmmüəlliflər və s. bunun kimi məlumatlar - ciddi şəkildə dəqiq olaraq göstərməlidir) *(sürətlərini kağız üzərində və CD şəklində əlavə etməli!)*

1. F.İ. Əhmədov, Q.S. Əhmədov, Z.Y. Sadiqov, A.Z. Sadiqov, A.H. Məmmədli, N.V. Sadiqova, M. Holik, E.Yilmaz, Yeni MAPD- 3NM Silisium Əsaslı Fotoelektron Gücləndiricilərin Parametrlərinin Tədqiqi, AJP FİZİKA 2020 volume XXVI №3, section: Az

2. N.V. Sadigova , F.I. Ahmadov, A.Z. Sadigov, A.H. Mammadli, A.H. Gerayeva, N.N. Heydarov, Performance of New MAPD Photodiodes, AJP FIZIKA 2020 volume XXVI №3, section: En.
3. Sadigov A., Sadigova N., Ahmadov F., Yilmaz E., Mammadli A., Gerayeva A., IMPROVEMENT OF BURIED PIXEL AVALANCHE PHOTODETECTORS, Colloquium-journal the Polish international journal of scientific publications, #5(92), 2021, pp.8-11
4. F.İ.Əhmədov, A.H.Məmmədli, Q.S.Əhmədov, Z.Y.Sadıqov,A.Z.Sadıqov, M.Holik, E.Yilmaz, S.Nuriyev, MSFD-3NM FOTODİODLARI VƏ LFS SSİNTİLYATORUNUN QAMMA ŞÜALARI QEYDETMƏ HƏSASLIĞININ TƏDQIQI, Fizika, vol. XXVII, Section:az, №01 2021, s.40-43
5. G. Ahmadov, F. Ahmadov, R. Akbarov, D. Berikov, E. Doganci, M. Holik, A.Mammadli, Y. Mora,S. Nuruyev, P. Pridal, A. Sadygov, Z. Sadygov, E. Yilmaz, J. Zich, Gamma-ray spectroscopy with MAPD array in the readout of LaBr3 scintillator, Journal of Instrumentation **2021 JINST 16 P07020**(<https://doi.org/10.1088/1748-0221/16/07/P07020>) İF-1.4
6. D. Berikov, G. Ahmadov, Yu. Kopatch, A. Gagarski, V. Novitsky, H. Deng, G. Danilyan, S. Masalovich, Z. Salhi, E. Babcock, J. Klenke, and V. Hutanu, Effect of rotation in the γ -ray emission from 60 meV polarized neutron-induced fission of the 235 U isotope, Phys. Rev. C 104, 024607 – Published 9 August 2021 (<https://doi.org/10.1103/PhysRevC.104.024607>) İF-3.296
7. F. Ahmadov, G. Ahmadov, R. Akbarov, A. Aktag, E. Budak, E. Doganci, U. Gurer, M. Holik, A. Kahraman, H. Karaçali, S. Lyubchyk, A. Lyubchyk, S. Lyubchyk, A.Mammadli, F. Mamedov, S. Nuruyev, P.Pridal, A. Sadigov, Z. Sadygov, O. Urban, E. Yilmaz , O. Yilmaz, J. Zich, Investigation of parameters of new MAPD-3NM silicon photomultipliers, Journal of Instrumentation, (<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/01/C01001>) İF-1.4
- 8.Q.Əhmədov, 0.27 eV Enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə 235U nüvəsinin bölünməsi zamanı ani qamma kvantların və neytronların bucaq korrelyasiyasının ölçülməsi, AJP FİZİKA, 2022, volume XXVIII №1, s.31-34
9. Q.Əhmədov, 60 meV Enerjili polyarlaşmış neytronların təsiri ilə 235U nüvəsinin bölünməsi zamanı bölünmə oxunun fırlanma bucağının təyini, AJP FİZİKA, 2022, volume XXVIII №2, s.17-20
10. A. Z. Sadigov, F. I. Ahmadov, Z.Y. Sadygov, G. S. Ahmadov, D. Berikov, M. Holik, A. Mammadli, R. A. Akbarov, S. M. Nuruyev, A. A. Garibli, K. Ajdarli, E. Doganci, Y. Mora, E. Yilmaz, Improvement of parameters of micro-pixel avalanche photodiodes, Journal of Instrumentation, (<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/07/P07021>)İF-1.4

5 İxtira və patentlər, səmərələşdirici təkliflər

Yoxdur

6 Layihə üzrə ezamiyyətlər (ezamiyyə baş tutmuş təşkilatın adı, şəhər və ölkə, ezamiyyə tarixləri, həmçinin ezamiyyə vaxtı baş tutmuş müzakirələr, görüşlər, seminarlarda çıxışlar və s. dəqiq göstərməlidir)

17.10.2021-24.10.2021 tarixlərində Tükiyənin Abant İzzet Baysal Universitetinin Nüvə Detektorları və Araşdırma Mərkəzində istehsalat proseslərində (1ci mərhələ) iştirak edilmişdir.

09.03.2022-16.03.2022 tarixlərində Tükiyənin Abant İzzet Baysal Universitetinin Nüvə Detektorları və Araşdırma Mərkəzində istehsalat proseslərində (2ci mərhələ) iştirak edilmişdir.

7 Layihə üzrə elmi ekspedisiyalarda iştirak (əgər varsa)

Yoxdur

8 Layihə üzrə digər tədbirlərdə iştirak

(burada doldurmalı)

Yoxdur

9 Layihə mövzusu üzrə elmi məruzələr (seminar, dəyirmi masa, konfrans, qurultay, simpozium və s. çıxışlar) (məlumat tam şəkildə göstərməlidir: a) məruzənin növü: plenar, dəvətli, şifahi və ya divar məruzəsi; b) tədbirin kateqoriyası: ölkədaxili, regional, beynəlxalq)

	(burada doldurmalı) Yoxdur
10	Layihə üzrə əldə olunmuş cihaz, avadanlıq və qurğular, mal və materiallar, komplektləşdirmə məmulatları Yoxdur
11	Yerli həmkarlarla əlaqələr Yoxdur
12	Xarici həmkarlarla əlaqələr Çexiyanın West Bohemia və Texniki Universiteti
13	Layihə mövzusu üzrə kadr hazırlığı (əgər varsa) 2 magistr müdafiə etmiş və 1 PhD hazırlanılır
14	Sərgilərdə iştirak (əgər baş tutubsa) Yoxdur
15	Təcrübəartırmada iştirak və təcrübə mübadiləsi (əgər baş tutubsa) Yoxdur
16	Layihə mövzusu ilə bağlı elmi-kütləvi nəşrlər, kütləvi informasiya vasitələrində çıxışlar, yeni yaradılmış internet səhifələri və s. (məlumatı tam şəkildə göstərməlidir) Yoxdur

SİFARIŞÇI:

Elmin İnkişafı Fondu

Baş məsləhətçi

Quliyeva Mülayim Sahib qızı

(imza)

“ _ ” _____ 20_-ci il

İCRAÇI:

Layihə rəhbəri

Əhmədov Fərid İbrahim oğlu

(imza)

“ _ ” _____ 20_-ci il