



AZƏRBAYCAN ELM FONDU

**Azərbaycan Elm Fondunun
“Yaşıl dünya naminə həmrəylik ili”nə həsr olunmuş
“Əsas Qrant Müsabiqəsi-2024” ün
(AEF-MGC-2024-2(50)) qalibi olmuş
layihənin yerinə yetirilməsi üzrə aralıq
(rüblük olaraq 1-ci mərhələ)**

ELMİ-TEXNİKİ HESABAT

Layihənin adı: **Batiometrik metodla su mənbələrinin dib və sahil dinamikasının qiymətləndirilməsi üçün yüksək effektivliyə malik LİDAR modulunun hazırlanması və praktik tətbiqi**

Layihə rəhbərinin soyadı, adı və atasının adı: **Sadıqov Azər Zirəddin oğlu**

Layihənin nömrəsi: **AEF-MGC-2024-2(50)-16/04/1-M-04**

Müqavilənin imzalanma tarixi: **21 oktyabr 2024-cü il**

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

Layihənin icra müddəti (başlama və bitmə tarixi): **01 noyabr 2024-cü il – 31 oktyabr 2026-cı il**

Layihənin **I mərhələ** üzrə (rüb) məbləği:

Hesabatda aşağıdakı məsələlər işıqlandırılmalıdır:

1	Layihənin həyata keçirilməsi üzrə cari rübdə yerinə yetirilmiş elmi işlər <i>Layihə çərçivəsində hazırlanacaq LİDAR detektorunun əsas tərkib hissəsi olan silisium fotogücləndiricilər xüsusi olaraq silisium altlıqdan seçilmişdir. Silisium materialının seçimi zamanı onun optik və elektrik xüsusiyyətləri, o cümlədən yüksək foton qeydetmə effektivliyi, aşağı səs-küy səviyyəsi və geniş spektral cavab sahəsi kimi mühüm parametrlər diqqətlə araşdırılmışdır. Fotoqeydedicilər seçilərkən onların foton qeydetmə effektivliyi və amplitud ayırdetmə qabiliyyəti xüsusi olaraq qiymətləndirilmişdir, çünki bu xüsusiyyətlər cihazın yüksək dəqiqliklə işləməsinə təmin edən əsas faktorlar hesab olunur.</i> <i>Seçilmiş fotogücləndiricilər əsasında nümunələr hazırlanmış və bu mərhələdə müasir qablaşdırma texnologiyaları tətbiq edilmişdir. Qablaşdırma prosesi fotodiodların mexaniki və termal sabitliyini təmin etmək üçün xüsusi laboratoriya şəraitində (təmiz otaq) həyata keçirilmişdir. Bu məqsədlə, yüksək davamlılıq və uzunmüddətli işləmə qabiliyyətinə malik materiallar seçilmişdir. Bundan əlavə, ultrasəsli qaynaq texnologiyasından (50 mikron diametrdə alyuminiyum naqillər) istifadə edilərək keçirici kontaktlar hazırlanmış və bu, cihazın elektrik kontaktlarını təmin edilmişdir. Nümunələrinin səthini qorunması üçün AA-BOND F113 markalı epoksid istifadə edilmişdir. Epoksid 99.99% işıq keçiriciliyinə malikdir və işığın udulmasını minimuma endirmək üçün epoksid təbəqənin qalınlığı 0.5 mm seçilmişdir.</i> <i>Hazırlanmış nümunələrlə laboratoriya şəraitində geniş təcrübi və analitik tədqiqatlar aparılmışdır. Bu tədqiqatlar zamanı işləmə gərginlikləri, ifrat gərginlikləri, foton qeydetmə effektivlikləri, gücləndirmə əmsalları,</i>
----------	---

	kvant çıxımı, amplitud ayırdetmə qabiliyyəti və bərpa olma müddətləri kimi mühüm parametrlər dəqiqliklə ölçülmüşdür. Ölçmələr yüksək dəqiqliyə malik cihazlar vasitəsilə həyata keçirilmiş və nümunələrin performansına bağlı detallı məlumatlar əldə edilmişdir. Bu nəticələr əsasında cihazların səmərəliliyi və etibarlılığı qiymətləndirilmişdir. Aparılan təcrübi və analitik işlər cihazların yüksək performanslı, uzunömürlü və beynəlxalq standartlara uyğun şəkildə hazırlanmasına imkan yaratmışdır.
2	Layihənin həyata keçirilməsi üzrə planda nəzərdə tutulmuş işlərin yerinə yetirilmə dərəcəsi (cari rüb üçün, faizlə qiymətləndirməli)
	85
3	Hesabat dövründə alınmış elmi nəticələr, onların yenilik dərəcəsi Fotodiod nümunələrinindeşilmə və işləmə gərginlikləri volt-ampere metodikası vasitəsilə dəqiqliklə müəyyən edilmişdir. Bu metod, fotodiodların qaranlıq şəraitdə xarakteristikalarının təhlilini təmin etmək üçün istifadə edilmişdir. Metodika çərçivəsində fotodiodlara gərginlik tətbiq edilərək onların qaranlıq cərəyanları ölçülmüş və aşağıda verilmiş düstur əsasında cərəyan-gərginlik asılılığı qurulmuşdur. $f(U) = \frac{d(\ln I(U))}{dU} = \frac{1}{I} \times \frac{dI(U)}{dU}.$ Nəticələrə əsasən,deşilmə gərginliyi U_{br}, 71 – 71, 3 V intervalında, işləmə gərginliyi U_{op} isə, 74, 2 – 75, 2 V intervalında müəyyən edilmişdir. Ölçmələr 21°C temperaturunda aparılmışdır. Bundan əlavə, yeni hazırlanmış fotodiodların amplitud ayırdetmə qabiliyyəti də ölçülmüş və nəticələr Yapon şirkəti HAMAMATSU və Alman şirkəti KETEK tərəfindən istehsal edilən son fotoqeydedicilərlə müqayisə edilmişdir. Təcrübələrin aparılması üçün Şəkil 2-də göstərilən xüsusi təcrübi dövrə hazırlanmışdır. Bu dövrədə nümunələrə gərginlik mənbəsindən tərs istiqamətdə,deşilmə gərginliyindən 3 V yuxarı gərginlik tətbiq edilmişdir. Təcrübə zamanı ikikaskadlı, güclənmə əmsalı müvafiq olaraq 8, 25 və 100 olan gücləndirici cihazlardan istifadə edilmişdir. İşıq mənbəyi kimi impuls işıq mənbəsi istifadə edilmişdir. Bu işıq mənbəyi 405 nm dalğa uzunluğuna, 1 kHz tezliyə, 2 A amplituda və 40 ps impuls müddətinə malik olan LED-dən ibarət olmuşdur. LED-dən buraxılan foton seli (hər impulsda 1200 foton) 2 mm diametrində olan optik kabel vasitəsilə fotodiod nümunələrinin üzərinə yönəldilmişdir. Təcrübə zamanı gücləndiricidən alınan signal xüsusi olaraq bölünərək həm osiloskopa, həm də CAEN analoq-rəqəmsal çeviriciyə (ARÇ) ötürülmüşdür. Signalların təhlili normal paylanma funksiyası (Qaus) vasitəsilə aparılmışdır: $G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$ Harada ki, μ — riyazi gözləmə (orta qiymət), σ parametri — paylanmanın orta kvadratik kanarlaşması (σ^2 — dispersiya). Metodikaya uyğun olaraq amplitud ayırd etməsi, $R = \frac{FWHM}{X_C} * 100\%$ Harada ki, X_C- pikin mərkəzi, FWHM- pikin yarı eninin yarı hündürlüyünə qiymətidir Təcrübənin nəticələri aşağıdakı cədvəldə göstərilmişdir. Təcrübi nümunələrin foton qeydetmə effektivliyi tədqiq edilmişdir. Burada fotonların qeydə alınma effektivliyi bir fotonun 300 nm-dən 1000 nm-ə qədər dalğa uzunluğu oblastında qeydə alınma ehtimalı kimi müəyyən olunur. Məlumdur ki, yarımkeçirici fotoedektorun üzərinə düşən foton seli onun həssas (yəni kasadlaşmış) oblastında udulur. Bu zaman fotoeffekt sayəsində yarımkeçiricidə sərbəst hərəkət edən və cihazın xarici elektrik dövrəsində fotocərəyan yaradan fotoelektronlar əmələ gəlir. Bir fotonun fotoelektron yaratmasının orta ehtimalı kvant çıxışı adlanır. Fotoeffekt prosesinin özü binomial (və ya binar) paylanma ilə təsvir edilir.

İmpulsda fotonların sayı sabit olmayıb, məlum Puasson paylanmasına tabedir. Fotoeffektin binar proses olduğunu nəzərə alaraq, Puasson paylanmasının binar paylanma ilə riyazi burumu yeni orta ədədlə yeni Puasson paylanmasını verir. Bu səbəbdən işıq impulsu tərəfindən yaranan fotoelektronların sayı Puasson paylanmasına tabedir:

$$P(n, \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!},$$

burada $\mu = m \cdot q_p$ – fotoeffekt nəticəsində yaranan fotoelektronların orta sayı, $P(n, \mu)$ – fotodetektorun çıxışında orta qiyməti μ -yə bərabər olan n fotoelektronların müşahidə olunma ehtimalı, m – fotoqəbuledicinin üzərinə düşən fotonların orta sayı, q_p – fotodetektorun kvant effektivliyi və ya PDE (Photon Detection Efficiency), yəni fotonun qeydə alınma effektivliyidir.

Fotocərəyan impulslarının amplitudu impulsun müddəti ərzində axmış yükə çevrilir və yük analog-rəqəm çeviricisinə (ARÇ) (ing. ADC – analog-digital converter) verilir. ARÇ-dən alınan məlumatlar kompüterdə analiz edilir və “kanalın nömrəsi (yük) – kanala düşən hadisələrin sayı” histoqramları şəklində təqdim olunur. ARÇ kanalının “qiyməti” 0,25 pKl təşkil edir. Bundan sonra bütün qiymətlər kanalların vahidlərində, və ya nisbi vahidlərdə göstəriləcəkdir. Signalların amplitudu, signal amplitudunun sıfıra bərabər qəbul edildiyi pyedestal kanalının qiymətindən hesablanır.

Heç bir fotoelektronun qeydə alınmaması ehtimalı

$$P(0, \mu) = \frac{\mu^0 e^{-\mu}}{0!} = e^{-\mu}$$

bərabərdir.

Buradan fotodetektora düşən fotoelektronların orta sayı müəyyən olunur:

$$\mu = -\ln P(0; \mu).$$

Fotodetektorda heç bir fotoelektronun yaranmadığı hala uyğun gələn signal ARÇ-nin pyedestalına düşür. Beləliklə, fotoelektronun olmaması ehtimalı:

$$P(0; \mu) = N_{pyed} / N,$$

burada N_{pyed} – pyedestalda hadisələrin sayı, N – hadisələrin ümumi sayıdır.

Beləliklə, μ və m məlum olduqda, fotonun qeydə alınma effektivliyini $PDE = \mu/m$ kimi müəyyən etmək olar.

Təcrübi stenddə “LeCroy 2249A” tipli yük-kod rəqəm çeviricisindən istifadə edilməsi məlumatların sonradan kompüterə verilməsi və işlənməsini asanlaşdırır.

Stenddə işıq mənbəyi qismində $\lambda = 420; 550$ və 640 nm dalğa uzunluğuna malik standart işıq diodları istifadə edilir. Işıq diodu $f = 1$ kHs tezlikli və 20ns müddətli gözləyici impulsar generatorundan qidalanır. İmpulsarın amplitudu $0 \div 5V$ intervalında tənzimlənir ki, bu da işıq diodunun şüalandırdığı işığın intensivliyini dəyişməyə imkan verir. Işıq diodunun şüalandırdığı işıq tədqiq edilən fotodioda hava ilə ötürülür. Işıq diodu impulsarının gözləyici generatoru stroblayıcı impulsar generatorunu işə salır. Fotoqəbuledicidən alınan fotosignalların integrallanmasına və rəqəmsallaşdırılmasına start vermək üçün stroblayıcı impulsar generatorunun impulsarı işıq impulsarı ilə zamana görə sinxronlanmışdır.

Selvari fotodiod tənzimlənən xarici gərginlik mənbəyindən ($U = 0 \div 120$ V) qidalanır. Qida mənbəyinin pulsasiyalarını, həmçinin xarici elektromaqnit şüalanmasından elektrik dövrəsində yarana bilən xarici yüksək tezlikli təsirlərin dəf edilməsi üçün fotodiodun qida dövrəsinə RC-süzgəc qoşulur.

Fotodiodun səthinə işıq impulsunun düşməsi nəticəsində cərəyan impulsu yaranır ki, bu azküylü yüksək sürətli xətti gücləndirici (Philips Scientific: model 777) vasitəsilə gücləndirilir.

Strob-impulsu ilə işıq signalının sinxronlaşdırılması imkan verir ki, qaranlıq (küy) impulslarının fonunda təkanlayıcı işığın təsiri altında fotodiodda yaranan impuls qeydə alınsın. Buna baxmayaraq, strob-impulsun müddəti ərzində küy impulslarının da bir hissəsinin qeydə alınması baş verir. ARÇ-dən alınan

verilənlər kontroller vasitəsilə kompüter tərəfindən histqram şəklində – qeydə alınan impulsar sayının onların amplitudlarından asılılığı şəklində hesablanır.

Şəkil 2.3-də işlənmiş MSFD-lərin çıxış impulslarının tipik amplitud spektri verilmişdir. $N = 21000$ olduqda, $N_{pyed} = 5150$ almaq olar:

$$\mu = \ln \left(\frac{N}{N_{pyed}} \right) = \ln(4,08) = 1,4 .$$

Fotodetektorun bir fotoelektrona (birinci pik) reaksiyası (çıxış yükü) güclənmə əmsalındır və Qauss paylanması ilə təsvir edilə bilər:

$$M(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{(x - Q_1)^2}{2\sigma_1^2} \right)$$

burada x – dəyişən kəmiyyət (yük), $Q_1 = Mq$ – fotoeffekt nəticəsində fotodetektorun çıxışında bir fotoelektronun yarandığı orta yük, $q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Kl – elektronun yükü, σ – uyğun olaraq, yükün paylanmasının standart kənar açılmasıdır.

Beləliklə, Qauss paylanmasının pik vəziyyəti (Q_1) fotodetektorun güclənmə əmsalını müəyyən edir və aşağıdakı kimi hesablanır:

$$Q_1 = P_1 - Q_0 .$$

Qeyd etmək lazımdır ki, baxılan halda fotodetektorun çıxış signalı K (baxılan halda $K = 40$) dəfə gücləndirən gücləndirici-zəiflədici sistemdən keçir, buna görə də fotodetektorun güclənmə əmsalı:

$$M = \frac{Q_1}{K \cdot q}$$

MSFD-nin güclənmə əmsalını mütləq vahidlərdə təyin etmək olar. Bu $M = (P_1 - P_0) \frac{K_n}{e}$ kimi müəyyən edilir, burada P_1 – bir fotoelektronun çoxalmasına uyğun olan birinci pikin vəziyyəti, P_0 – sıfır signalına uyğun olan pyedestal, $K_n = 0,25 \cdot 10^{-12}$ Kl – kanalın qiymətidir. Beləliklə, alırıq:

$$M = \frac{51,2 \cdot 0,25 \cdot 10^{-12} \text{ Kl}}{40 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Kl}} \cong 2 \cdot 10^6 .$$

Beləliklə, işlənmiş MAPD ayrı-ayrı fotoelektronların çox yaxşı qeydə alınma qabiliyyətini nümayiş etdirir və nümunələrin foton qeydetmə effektivliyi 30% təşkil etmişdir.

4 Layihənin yerinə yetirilməsi zamanı istifadə olunan üsul və yanaşmalar

Layihə çərçivəsində istifadə olunan üsul və yanaşmalar cihazın keyfiyyətli hazırlanmasını, yüksək performansla malik olmasını və funksional tələblərə cavab verməsini təmin etmişdir. Bu yanaşmaların hər biri xüsusi tələblərə uyğun olaraq elmi əsaslarla qurulmuşdur. İlk növbədə, silisium fotogücləndiricilərinin seçimi mərhələsində onların yüksək foton qeydetmə effektivliyi, geniş dinamik diapazon, aşağı küy səviyyəsi və bərpa olma müddəti kimi kritik texniki parametrləri diqqətlə qiymətləndirilmişdir. Bu parametrlər, cihazın ümumi performansını və LİDAR sistemlərində yüksək dəqiqliklə işləməsini təmin etmək baxımından çox mühüm rol oynayır.

Seçilmiş fotogücləndiricilərin qablaşdırılması üçün müasir və səmərəli texnologiyalar tətbiq edilmişdir. Bu prosesdə mexaniki sabitlik, yüksək davamlılıq və xarici təsirlərdən qorunma kimi vacib amillər nəzərə alınmışdır. Qablaşdırma zamanı optik interfeyslərin düzgün tənzimlənməsi xüsusi əhəmiyyət daşıyır və foton itkisini minimuma endirmək üçün kritik bir mərhələ olmuşdur. Bunun nəticəsində, nümunələrin uzunmüddətli sabitliyi və iş keyfiyyəti təmin edilmişdir.

Elektrik kontaktlarının hazırlanmasında ultrasəsli qaynaq texnologiyasından istifadə olunmuşdur. Bu texnologiya nümunələrin elektrik əlaqələrinin sabitliyini artırmaqla yanaşı, onların texniki parametrlərinə təsir

	etməməsi ilə seçilmişdir. Ultrasəsli qaynaq cihazın daxili komponentləri arasında yüksək keyfiyyətli əlaqə təmin etmiş və beləliklə, ümumi performans müsbət təsir göstərmişdir. Laboratoriya şəraitində cihazın işləmə gərginliyi, ifrat gərginlik, foton qeydetmə effektivliyi, gücləndirmə əmsalı, kvant çıxımı və bərpa olma müddəti kimi əsas texniki parametrlər xüsusi təcrübə metodlarla ölçülmüşdür. Bu prosesdə yüksək dəqiqliklə işləyən analitik cihazlardan istifadə edilmişdir ki, bu da ölçmələrin dəqiqliyini və etibarlılığını təmin etmişdir. Eyni zamanda, ölçmə nəticələri təhlil edilərək nümunələrin performansı ətraflı şəkildə qiymətləndirilmişdir. Bu təhlillər əsasında cihazın texnoloji səviyyəsi artırılmış və daha optimal işləmə şəraiti təmin edilmişdir.
5	Layihə üzrə elmi nəşrlər (məqalələr, monoqrafiyalar, icmallar, konfrans materialları, tezislər) (dərəcə olunmuş, çapa qəbul olunmuş və çapa göndərilmişləri ayrılıqda qeyd etməklə) (surətlərini əlavə etməli!) Layihə çərçivəsində 1 konfrans materialı və 1 elmi məqalə Open Research Europe (scopus) jurnalına çapa göndərilmişdir. Konfrans materialı: Nərimin Süleymanova /Yeni nəsil optik sensorlar üçün elektronika bloklarının hazırlanması (https://sdu.edu.az/userfiles/file/file_pdf/NASCO%20XXVII%20Program%2009.12.2024.pdf) Elmi məqalə: Akbarov R, Nuruyev S, Tyutyunnikov S, P. Kucera, Holik M/Development and Testing of Compact Electronic Modules for Detectors Based on SiPM array (https://osf.io/j6q2b/download/?format=pdf)
6	İxtira və patentlər, səmərələşdirici təkliflər yoxdur
7	Layihə üzrə ezamiyyətlər Nəzərdə tutulmayıbdır
8	Layihə üzrə elmi ekspedisiyalarda iştirak Nəzərdə tutulmayıbdır
9	Layihə üzrə digər tədbirlərdə iştirak yoxdur
10	Layihə mövzusu üzrə elmi məruzələr (seminarlar, konfranslar, dəyirmi masalar və s. çıxışlar) Azərbaycan Respublikası Elm və Təhsil Nazirliyi, Elm və Ali Təhsil üzrə Dövlət Agentliyi, Sumqayıt Dövlət Universitetinin birgə təşkilatçılığı ilə 10-11 dekabr 2024-cü il tarixlərində Sumqayıt Dövlət Universitetində (SDU) "Yaşıl dünya naminə həmrəylik ili"nə həsr edilmiş "Doktorantların və gənc tədqiqatçıların XXVII (NASCO XXVII)" Respublika elmi konfransı keçirilmişdir (https://www.sdu.edu.az/az/news/3298). Konfransda layihə çərçivəsində görülməklə elektronika dövrələrin hazırlanması istiqamətində " YENİ NƏSİL OPTİK SENSORLAR ÜÇÜN ELEKTRONİKA BLOKLARININ HAZIRLANMASI" adlı tezisi auditoriyaya təqdim edilmişdir. Bu işdə optik sensorlar üçün xüsusi hazırlanmış elektron oxuma modulları işlənilib hazırlanmışdır. Araşdırma zamanı sensorun iş gərginliyinin sabit saxlanılması üçün kompakt gərginlik mənbələrinin istehsal prosesləri həyata keçirilmiş, sensordan alınan fotonik siqnalların emalı məqsədilə analoq-rəqəmsal çeviricinin funksional xüsusiyyətləri nəzərdən keçirilmiş və siqnalın sonrakı oxunmasını təmin edən siqnal gücləndiricisi ətraflı təsvir edilmişdir.
11	Layihə üzrə əldə olunmuş cihaz, avadanlıq və qurğular, mal və materiallar Nəzərdə tutulmayıbdır
12	Yerli həmkarlarla əlaqələr yoxdur
13	Xarici həmkarlarla əlaqələr

	<i>yoxdur</i>
14	Layihə mövzusu üzrə kadr hazırlığı
	<i>yoxdur</i>
15	Sərgilərdə iştirak
	<i>yoxdur</i>
16	Təcrübəartırmada iştirak və təcrübə mübadiləsi
	<i>yoxdur</i>
17	Layihə mövzusu ilə bağlı elmi-kütləvi nəşrlər, kütləvi informasiya vasitələrində çıxışlar, yeni yaradılmış internet səhifələri və s.
	<i>yoxdur</i>

Layihə rəhbərinin imzası _____ Sadıqov Azər Zirəddin oğlu

Tarix _____

QEYD: bütün hallarda uyğun olan bəndlər doldurulmalıdır.