

Əlyazma hüququnda

XƏQANI İMRAN OĞLU ABDULLAYEV

**İNFORMASIYA EMALI SİSTEMLƏRİNDƏ SELVARI
FOTOQƏBULEDİCİLƏR**

3361.01 – Bərk cisim elektronika, radioelektron komponentləri, mikro və nanoelektronika;
3311.02 – Təbii mühitə, maddələrə, materiallara və məmulatlara nəzarət cihazları və üsulları

ixtisaslarından texnika üzrə elmlər doktoru elmi dərəcəsi almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

A V T O R E F E R A T I

BAKI - 2017

İş Milli Aviasiya Akademiyasında yerinə yetirilmişdir.

Elmi məsləhətçilər:

F.-r.e.d., professor, AMEA-nın həqiqi üzvü
T.e.d., professor, AMEA-nın müxbir üzvü

A.M. Paşayev
A.R. Həsənov

Rəsmi opponətlər:

t.e.d., professor
t.e.d., professor
t.e.d., professor

B.M. Əzizov
Ə.İ. Məmmədov
T.M. Qasımzadə

Aparıcı təşkilat:

Azərbaycan Respublikası Müdafiə Sənayesi Nazirliyinin Elmi-tədqiqat İnstitutu

Müdafiə “26” yanvar 2018-ci il tarixində, saat 14⁰⁰-da, AZ1045, Bakı şəhəri, Mərdəkan pr. 30 ünvanında yerləşən Milli Aviasiya Akademiyası nəzdində yaradılmış B/D.06.001 Dissertasiya Şurasında keçiriləcəkdir.

Dissertasiya işi ilə MAA-nın kitabxanasında tanış olmaq olar.

Avtoreferat “25” dekabr 2017-ci il tarixində paylanmışdır.

B/D.06.001 Dissertasiya Şurasının
elmi katibi, tex. üzrə f.d., dosent

S.B. Həbibullayev

İŞİN ÜMUMİ XARAKTERİSTİKASI

Dissertasiya tədqiqatının aktuallığı. Müasir dövrdə elm və texnikanın müxtəlif sahələrinin inkişafında optoelektron cihazlarının rolu durmadan artır. Kiçik dalğa uzunluqlu işıq rəqslərinin yayıldığı optik kanalın yüksək informasiya tutumuna malik olması, iti istiqamətli işıq şüası ilə elektromaqnit enerjisinin konsentrasiya olunmuş şəkildə və az itkilərlə məkanın verilmiş oblastına ötürülməsi imkanı, informasiyanın paralel emalını həyata keçirməyə imkan verən işıq şüasının ikili – zaman və məkan modulyasiyasının mümkünlüyü, optik şüalanmanın yayıldığı kanalların bir-birinə təsir etməməsi və maneələrdən yüksək müdafiə olunması və s. bu kimi üstün cəhətlər optoelektronika qurğuları üçün perspektivli tətbiq sahələri yaradır.

İnformasiya emalı sisteminin əsas elementlərindən biri optik informasiyanı elektrik siqnallarına çevirən fotoqəbuledicidir. Bir çox hallarda məhz qəbuledicinin parametrləri (həssaslıq, cəldlik, müxtəlif parametrlər üzrə ayırdetmə qabiliyyəti və s.) informasiyanın optik emalı sisteminin səmərəliliyini müəyyən edir. Emal edilən informasiyanın həm sürətinə, həm də həcminə qoyulan yüksək tələbləri fotoqəbuledici matrislər təmin edə bilər.

Dissertasiya tədqiqatının aktuallığı informasiyanın müxtəlif optik, optoelektron və akustooptik emal qurğularında yeni matrisli mikropikselli selvari fotodiodların (MSFD) istifadə edilməsi mümkünlüyünə artan maraq ilə təmin edilir. Bu işə ənənəvi fotoelektron vurucularla (FEV) müqayisədə MSFD-nin kompaktlığı, yüksək kvant effektivliyi, aşağı işçi gərginliyi, maqnit sahəsinə həssas olmaması və potensial olaraq daha aşağı dəyəri ilə şərtlənir.

Elmi problemin işlənmə vəziyyəti. Dissertasiya işinin başlanğıcında MSFD-nin iki əsas tipi – səthi piksellə və dərin yerləşmiş piksellə selvari fotodiodlar məlum idi. Lakin MSFD tipli selvari fotodiodların informasiya emalı sistemlərində tətbiqi baxımından onların bir sıra problemləri, o cümlədən həssaslığın səth üzrə bircinsliyi və cəldlik ilə əlaqədar olan problemlər, habelə matrisli MSFD-nin yaradılması problemləri həll olunmamış qalırdı. Buna görə də cihazın işçi parametrlərinin yaxşılaşdırılması üçün MSFD-də selvari prosesin davamlı tədqiqatları tələb edilirdi.

Tədqiqatın məqsədi və həll edilən məsələləri. Dissertasiyanın məqsədi informasiyanın optoelektron və akustooptik emalı sistemlərində tətbiqini təmin etmək üçün yeni birkanallı və matrisli selvari

fotoqəbuledicilərin tədqiqi və işlənməsidir. Qoyulan məqsədin reallaşdırılması aşağıdakı əsas məsələlərin ardıcıl həlli ilə həyata keçirilmişdir:

1. İnformasiyanın qəbulu və emalının müasir optik sistemlərinin səmərəliliyini məhdudlayan fiziki və texnoloji səbəblərin tədqiqi.
2. Qeyri-bircins yarımkeçirici altlığa malik çoxlaylı silisium strukturlarında yükdaşıyıcıların selvari çoxalmasının xüsusiyyətlərinin tədqiqi.
3. Heyger rejimində işləyən selvari silisium strukturlarının parametrlərinin hesablanması üçün fiziki modelin işlənməsi.
4. İnformasiyanın optoelektron və akustooptik emalı qurğularında tətbiq edilmək üçün yüksək həssaslığa və cəldliyə malik matrisli kompakt fotoqəbuledicilərin işlənməsi.
5. Silisium mikropikselli fotodiodların gizli partlayıcı və radioaktiv materialların optoelektron aşkarlanması qurğularında tətbiq edilməsi imkanının tədqiqi.
6. Silisium mikropikselli fotodiodların akustooptik informasiya emalı sistemlərində tətbiq edilməsi imkanının tədqiqi.

İşin tədqiqat obyektini informasiyanın optoelektron və akustooptik emalı qurğularında tətbiq edilmək üçün yüksək həssaslığa və bircinsliyə malik olan MSFD tipli yarımkeçirici fotoelektron vurucuları və onların əsasında yaradılan birkanallı və matrisli fotoqəbulediciləridir.

Tədqiqatın nəzəri və metodoloji əsasları. Dissertasiya işində empirik (müqayisə, ölçmə, eksperiment) və nəzəri (analiz və sintez, ideallaşdırma) tədqiqat metodlarından istifadə edilmişdir. MSFD-nin parametrlərinin riyazi hesablanma metodları işlənmişdir. Bunun üçün bir və iki tərtibli diferensial tənliklərin həlli metodlarından istifadə edilmişdir.

İşin elmi yeniliyi ondan ibarətdir ki, burada yarımkeçirici altlığın lokal mikro-qeyri-bircinsliklərinin silisium selvari fotoqəbuledicilərin parametrlərinə təsirinin fiziki modeli təklif edilmiş; MSFD-lərin hədd parametrlərinin hesablanması üçün yeni fiziki model işlənmiş; partlayıcı və radioaktiv maddələrin optoelektron aşkarlanması qurğularında tətbiq edilmək üçün MSFD-lərdən ibarət kompakt matrisin hazırlanması üsulu təklif edilmiş; siqnalların akustooptik emalı sistemlərinin fotoqəbuledicilərində MSFD-nin tətbiqinin mümkünlüyü nəzəri və təcrübi olaraq əsaslandırılmışdır.

İşin praktiki əhəmiyyəti onunla təmin edilir ki, burada partlayıcı və radioaktiv maddələrin aşkarlanması qurğularında istifadə edilmək üçün MSFD əsasında yüksək həssaslığa malik detektorun yaradılması

mümkünlüyü təklif edilmiş və təcrübi yolla əsaslandırılmış; Ssintilyatorlu radiasiya detektorlarında istifadə edilmək üçün matrisli MSFD-nin yeni konstruksiyası təklif edilmiş və hazırlanma texnologiyası işlənmiş; Radiasiya kalorimetriya qurğuları üçün ssintilyatorlu detektorların (SD) yeni matrisi işlənmiş; MSFD əsaslı birkanallı qamma-karotaj qurğusu işlənmiş və sınaqdan keçirilmiş; Pozitron-emissiya tomoqraflarında (PET) istifadə edilmək üçün yeni, kompakt SD işlənmiş və sınaqdan keçirilmiş; Sıqnalların akustooptik emalı sistemlərində MSFD tətbiq edilmiş və sınaqları aparılmışdır.

Müdafiyyə çıxarılan əsas elmi müddəalar:

1. İnformasiyanın optik emalı sistemlərinin qənaətliliyinin və səmərəliliyinin yaxşılaşdırılması üçün bərkcisimli foton sayğaclarının istifadəsi zərurətinin elmi-texniki əsaslandırılması.

2. Çoxlaylı silisium fotoqəbuledicilərində yarımkeçiricinin səthi boyunca yükün yayılaraq axmasının selvari prosesin səth üzrə bircinsliyinə təsirinin mexanizmi.

3. MSFD-də fotoelektronların güclənmə əmsalının səth üzrə stabilləşdirilməsinin fiziki mexanizmi.

4. Selvari fotodiodların deşilmə gərginliyinin müəyyən edilməsi üçün diodun stasionar VAX-nın xətti ekstrapolyasiyasına əsaslanan metodika.

5. Yarımkeçiricinin selvari oblastının ikilaylı modelinə əsaslanan MSFD-də birelektronlu fotoreaksiyanın parametrlərinin hesablanması metodu.

6. İnformasiyanın çoxkanallı qəbulu və emalı sistemlərində istifadə üçün silisium MSFD-lər əsasında koordinat-həssas fotoqəbuledicilərin işlənməsi üsulu.

7. Matrisli silisium MSFD-lərin tətbiqi ilə gizli partlayıcı və radioaktiv materialların aşkarlanması metodu.

8. Sıqnalların akustooptik emalı qurğularında matrisli fotoqəbuledicilərin tətbiqinin və sınaqlarının nəticələri.

Tədqiqat nəticələrinin aprobasiyası. İşin əsas nəzəri və praktiki nəticələri aşağıdakı beynəlxalq və respublika konfranslarında məruzə edilmiş və müzakirə olunmuşdur:

Международная научно-техническая конференция, посвященная 85-летию гражданской авиации России. Москва, 22-23 апреля 2008 г.; ADNA-nın 90 illik yubileyinə həsr olunmuş “Neft-qaz, neft emalı və neft-kimya” beynəlxalq elmi konfransının materialları, Bakı 2010; “Müasir informasiya və telekommunikasiya texnologiyalarının inkişaf perspektivləri” beynəlxalq elmi-texniki konfrans. Bakı, 22-24 sentyabr

2011-ci il; International Workshop on New Photon-detectors. LAL Orsay, France, June 13-15, 2012; Radiasiya tədqiqatları və onların praktiki aspektləri. VII Konfrans. Bakı, 20-21 noyabr 2013-cü il; 21-я Международная научно-техническая конференция «Современные телевидение и радиоэлектроника». Москва, Россия, 19-20 марта 2013 г.; Четвертая международная конференция «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии» (ИСМАРТ 2014). Минск, Белорусский Государственный Университет, 12-16 октября 2014 г.; Межрегиональный научно-практический семинар «Проблемы автоматизации и управление в технических системах». Ростов на Дону, Южный Федеральный Университет, 01-05 октября 2014 г.; Sənaye ilinə həsr olunmuş elmi-texniki konfrans. Bakı, AzTU, 15-16 dekabr 2014-cü il; XII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАиУ-2014), посв. 100-летию университетского образования юга России. Ростов-на-Дону, Южный Федеральный Университет, 2015; Первая (29 февраля – 01 марта 2016 г.) и вторая (21-23 февраля 2017 г.) научно-практическая молодежная конференции «Творческий потенциал молодежи в решении авиакосмических проблем» (Февральские чтения). Баку, НАА.

Publikasiyalar. Dissertasiya 2004-2017-ci illər ərzində "Journal of Instrumentation (JINST)", "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research", "Письма в ЖТФ", "Специальная техника", "Радиоэлектроника", "Наука, техника и образование", "Альтернативная энергетика и экология", "AMEA-nın Xəbərləri", "Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri", "MAA-nın Elmi Məcmuələri", "MAA-nın Elmi Əsərləri" jurnallarında və beynəlxalq konfransların materiallarında dərc edilmiş işlərin nəticələrinə əsaslanır.

Dissertasiya işinin materialları üzrə 44 elmi iş, o cümlədən 1 patent, resenziya olunan elmi jurnallarda 11 məqalə və 9-u beynəlxalq olmaqla 14 konfrans məruzələrinin tezisləri və materialları çap edilmişdir. 18 iş xarici, 26 iş isə respublika səviyyəli elmi jurnallarda nəşr olunmuşdur.

İşin iri elmi proqramlar və mövzularla əlaqəsi.

Dissertasiya işində əsas nəticələr aşağıdakı elmi-tədqiqat işlərinin yerinə yetirilməsi zamanı alınmışdır:

1. Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu (Rusiya, Dubna şəh.), Rusiya Elmlər Akademiyasının Nüvə Tədqiqatları İnstitutu, Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası, Azərbaycan Milli Elmlər Akademiyasının Fizika İnstitutu, "Zecotek Photonics Singapore Pte Ltd" şirkəti və "Дубна-

Детекторы” Elm-İstehsalat Birliyi arasında “Mikropikselli selvari fotodiodların (MSFD) işlənməsi və tətbiqi üzrə birgə elmi, texnoloji və innovasiya fəaliyyəti barədə” Kollaborasiya sazişi (Protokol №11/12, 05 dekabr 2011-ci il).

2. Azərbaycan Respublikası Dövlət Neft Şirkətinin Elmi-Tərəqqi Fondunun "Karotaj stansiyaları üçün ölçü sisteminin işlənməsi" mövzulu qrant layihəsi (İcra müddəti: 09.2013 - 09.2015).

Müəllifin şəxsi töhfəsi. Dissertasiya işindəki əsas elmi müddəalar, nəzəri və təcrübi tədqiqatlar, nəticələr və tövsiyələr müəllif tərəfindən müstəqil olaraq əldə edilmişdir. Bir sıra məsələlərin reallaşdırılması proqramı və onların tətbiqi müəllifin doktorantı ilə birgə yerinə yetirilmişdir. Tədqiqatların nəticələrinin praktiki reallaşdırılması və onların tətbiq edilməsi Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyasının, AMEA-nın Fizika İnstitutunun, AMEA-nın Radiasiya Problemləri İnstitutunun və Rusiyanın Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutunun (Dubna şəh.) əməkdaşları ilə birgə həyata keçirilmişdir.

Elmi məsləhətçilər Paşayev A.M., Həsənov A.R. və həmmüəllif Sadıqov Z.Y. tərəfindən bir sıra elmi məsələlər qoyulmuşdur. Həmmüəllif Sadıqov Z.Y. tərəfindən MSFD-nin hazırlanma texnologiyası işlənməmişdir. Həmmüəlliflər Əhmədov G.S., Əhmədov F.İ., Jejer V.N., Sadıqov A.Z., Titov A.İ., Anfimov N.V., Bokova T.Y. ilə birgə MSFD-də fotoreaksiyanın formalaşması modeli qurulmuşdur. Muxtarov R.M. ilə birgə silisium selvari stukturların iş modeli, MSFD əsasında təhlükəli əşyaların aşkaredici detektoru işlənməmişdir. Həmmüəlliflər Həsənov A.R. və Həsənov R.A. ilə birgə siqnalların akustooptik emalı qurğularında MSFD-nin sınaqları aparılmışdır. Bütün həmmüəlliflərlə birgə alınmış nəticələrin analizi və müzakirəsi aparılmışdır.

İşin strukturu və həcmi. Dissertasiya girişdən, altı fəsildən, işin ümumi nəticələrindən, ədəbiyyat siyahısından ibarətdir. Dissertasiyanın əsas məzmunu 82 şəkil, 226 addan ibarət ədəbiyyat siyahısı daxil olmaqla 270 çap vərəqində verilmişdir.

İŞİN MƏZMUNU

Girişdə mövzunun aktuallığı əsaslandırılmış, tədqiqatın əsas məqsədi və məsələləri müəyyən edilmiş, işin elmi yeniliyi, praktiki əhəmiyyəti və müdafiyyə çıxarılan əsas müddəalar şərh edilmişdir.

Dissertasiyanın 3 paragrafdan ibarət olan **birinci fəsl**i informasiya emalı sistemlərinin inkişafının analizinə həsr edilmişdir.

Bu fəsildə optik informasiya emalı sistemlərinin tətbiq sahəsini genişləndirmək və onların ötürmə sürətini artırmaq üçün aşağı maya dəyərli yeni matris FEV-in yaradılması zərurəti əsaslandırılmış, bu tələblərə cavab verə bilən matris fotoelektron vurucularının MSFD tipli strukturlar əsasında yaradıla bilməsi əsaslandırılmışdır.

Tərkibinə şüalanma mənbəyi, optik sistemlər, optik informasiyanı elektrik siqnallarına çevirən fotoqəbuledici (FQ) qurğular və digər zəruri elementlər daxil olan informasiyanın optik emalı sistemləri ətraflı nəzərdən keçirilmişdir. Göstərilmişdir ki, son illərdə optik və optoelektron sistemlərdə siqnalın həm zaman, həm də məkan modulyasiyası hesabına informasiya emalının son dərəcə yüksək sürətliliyi əldə edilmişdir ki, bu da öz növbəsində informasiyanın paralel emalını həyata keçirməyə imkan verir.

Müasir optik və optoelektron emal sistemlərinin səmərəliliyini məhdudlayan fiziki və texnoloji səbəblər müəyyən edilmişdir. Göstərilmişdir ki, optik informasiyanın müasir emal sistemlərinin inkişafını məhdudlayan əsas amillər istifadə edilən FQ-lərin həssaslığı və cəldliyidir. İnformasiyanın optik emalı sistemlərinin qənaətliliyinin və səmərəliliyinin yaxşılaşdırılması üçün bərkcisimli foton sayğaclarının istifadə edilməsi zərurəti əsaslandırılmışdır.

İnformasiyanın optoelektron emalı sistemlərində adətən FQ kimi vakuumlu fotoelektron qurğuları (FEQ) və ya yarımkeçirici (y/k) fotodiodlar, o cümlədən tunel fotodiodları istifadə edilir. Y/k FEV vakuum FEV-in alternativini hesab olunur və hazırda geniş yayılmaqdadır.

Fotoelektronların selvari çoxalmasına Şottki baryerlərinə, *p-n*-keçidlərinə, heterokeçidlərə və y/k-dielektrik strukturlarına əks sürüşmə gərginliyi verməklə nail olmaq olar. Bu zaman elektrik sahəsinin intensivliyi y/k-nın səthinə yaxın oblastda-fəza yükləri oblastında (FYO) müəyyən bir astana qiymətinə çatır və yükdaşıyıcılarının (elektronlar və deşiklər) axınının güclənməsi baş verir. Güclənmə onunla təmin edilir ki, yüksək elektrik sahələri oblastında y/k-nın atomlarının zərbə-sahə

ionlaşması yolu ilə yükdaşıyıcıları ikinci elektron-deşik cütlərinin yaranmasına kifayət edən kinetik enerji yığırlar.

Selvari cərəyanın bu seli təkanlayan cərəyanın qiymətinə nisbəti kimi təyin edilən yükdaşıyıcılarının çoxalma (güclənmə) əmsalı ($M=i_d/i_i$) selvari prosesin kəmiyyət xarakteristikasıdır. Selvari cihazın işlənilib hazırlanması zamanı zəruri olan daha mühüm parametrlər, həmçinin, selvari deşilmə potensialı, sahənin maksimal intensivliyi və selvari deşilmə zamanı FYO-nun enidir. Bu parametrlərin zaman stabilliyi və səth üzrə bircinsliyi selvari prosesin çoxalma əmsalının maksimal əldə edilə bilən qiymətini müəyyən edir.

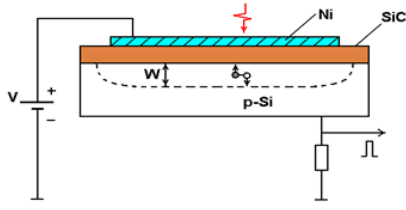
Son 50 il ərzində tədqiqatçılar ənənəvi vakuum FEV-in selvari fotodiodlarda (SFD) fotocərəyanın güclənməsi effekti əsasında y/k analoqunu yaratmağa cəhd etmişlər. Lakin SFD-lərin ən yaxşı nümunələri FEV-lərdən siqnalın güclənmə əmsalına görə 10^3 dəfədən çox geri qalırlar. Bu hal ənənəvi konstruksiyalı fotodiodlarda selvari prosesin yüksək stabilliyinin və səth üzrə bircinsliyinin təmin edilməsinin çox mürəkkəb olması ilə əlaqədardır, belə ki, real y/k kristallarda həmişə nöqtəvi defektlər, dislokasiyalar, legirləmə aşqarlarının lokal toplanma oblastları və digər qeyri-bircinsliklər olur. Bütün bunlar lokal idarə olunmayan deşilmələrin yaranmasına və cihazın sıradan çıxmasına səbəb olur.

Elmi ədəbiyyatda çap olunmuş işlərin analizi göstərir ki, selvari fotodiodların birinci alternativini Si-SiO₂ sistemi əsasında selvari metal-dielektrik-y/k (MDY) strukturudur. Dielektrik təbəqənin olması səbəbindən bu cihaz yalnız impuls qidalanma rejimində işləyə bilər. Lakin selvari MDY-strukturun praktiki istifadəsi böyük çətinlik törədir, belə ki, fotocərəyanın qiyməti MDY-strukturun özünün parametrləri ilə, qida gərginliyinin və qeydə alınan işıq parametrləri ilə müəyyən olunur. Yükdaşıyıcılarının selvari çoxalma rejimində MDY-strukturun praktiki tətbiqinin mümkünlüyünü məhdudlaşdıran daha iki problem də aşkar edilmişdir. Birinci problem – işçi gərginliyin dreyfidir ki, bu da yükdaşıyıcılarının selvari çoxalma rejimində Si-SiO₂ sərhədində strukturun oksid təbəqəsinin yüklənməsi səbəbindən, ikinci problem isə – hər bir qida impulsundan sonra qeyri-əsas yükdaşıyıcılarının tam rekombinasiyası üçün müəyyən zaman müddətinin tələb olunması zərurətindən yaranır.

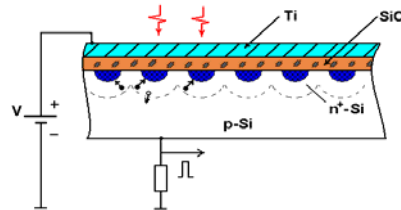
Ənənəvi selvari fotodiodların ikinci alternativini kimi metal-rezistiv təbəqə-y/k (MRY) selvari strukturu analiz edilmişdir. Rezistiv təbəqə qismində adətən kristallik silisiumdan hazırlanan altlığa çəkilmiş silisium karbid (SiC) və ya hidrogenləşdirilmiş amorf silisium (Si^{*}:H) təbəqələri istifadə edilir. Bu strukturlar da, MDY-strukturlar kimi, yastı paralel

strukturlardır. Fərq bundadır ki, onlarda dielektrik təbəqə keçirici rezistiv təbəqə ilə əvəz olunmuşdur (şəkil 1). Silisium karbiddən, yaxud hidrogenləşdirilmiş amorf silisiumdan ibarət rezistiv təbəqənin keçiriciliyinin kifayət qədər olması sayəsində bu cihazlar sabit elektrik qidalanması rejimində işləyə bilirlər. Lakin bu FQ-lər optik spektrin görünən və ultrabənövşəyi oblastlarında aşağı kvant çıxışına malikdir. Bu onunla əlaqədardır ki, cihazın bütün fəthəssas oblastı qəbul edilən optik şüalanmanı kifayət qədər udan rezistiv təbəqə ilə örtülür.

İşığa həssas səth boyunca süni qeyri-bircinsliyə malik MRY-strukturu xüsusi maraq kəsb edir. Bunun üçün rezistiv təbəqə ilə p -tip keçiriciliyə malik y/k arasında kiçik n^+-p -keçidlərdən ibarət matris formalaşdırılır (şəkil 2). Belə struktur işçi rejimdə işığa həssas səthi ayrı-ayrı həssas oblastlara bölür ki, onların da hər biri fotocərəyanın güclənməsi üçün müstəqil kanala çevrilirlər. Müstəqil oblastlara (piksellərə) bölünmə prosesi arzuolunmaz mikrodeşilmələrin yaranması problemini həll etməyə imkan verib.



Şəkil 1. Selvari MRY strukturunun en kəsiyi



Şəkil 2. Səth boyu süni qeyri-bircinslikləri olan MRY strukturunun en kəsiyi

Burada n^+ -oblastlı strukturların əsas xüsusiyyəti ondan ibarətdir ki, həmin strukturlarda fotocərəyanın güclənmə əmsalı baza strukturları ilə müqayisədə xeyli yüksəkdir. Müəyyən edilmişdir ki, n^+ -oblastlı strukturlarda fotocərəyanın güclənmə əmsalının kifayət qədər artması iki səbəbdən mümkündür. Birinci səbəb baza strukturları ilə müqayisədə yükdaşıyıcılarının çoxalma oblastını keçən deşiklərin qaranlıq cərəyanının miqdarının azalması ilə, ikinci səbəb isə y/k -nın səthində yarımsferik kəskin n^+-p -keçidlərinin formalaşmasından sonra deşilmə gərginliyinin fluktasiyasının azalması ilə əlaqədardır.

Müəyyən işlərdə kiçik $p-n$ -keçidlərinin matrisi şəklində süni qeyri-bircinsliklərə malik yeni selvari FQ-lərin konstruksiyasının və iş prinsipinin əsasları qoyulmuşdur. Bu cihazlar rekord parametrlərə (böyük işçi sahəsi, yüksək gücləndirmə əmsalları və s.) malik idi. Lakin bu FQ-lər optik spektrin görünən və ultrabənövşəyi oblastlarında kiçik kvant çıxışına malik

idilər. Bu, cihazın bütün fotohəssas oblastının qəbul edilən optik şüalanmanı xeyli udan rezistiv təbəqə ilə örtülməsi ilə bağlı idi.

Selvari fotodiodların üçüncü alternativini mikropikselli selvari fotodiodlardır (MSFD) ki, bunlarda fotohəssas səth qəbul edilən optik şüalanmanın gücünü zəiflədən rezistiv təbəqədən tamamilə azaddır. Son onillikdə MSFD-lərin işlənilib hazırlanmasında xeyli uğur əldə edilmişdir. MSFD-nin əsas konstruksiyaları və hazırlanma texnologiyaları Azərbaycan Respublikasının üç elmi mərkəzində (Fizika İnstitutu, Radiasiya Problemləri İnstitutu və Milli Aviasiya Akademiyası) xarici təşkilatlarla (Birləşmiş Nüvə Tədqiqatları İnstitutu - Rusiya, Zecotek Imaging System - Singapore və b.) birgə işlənilib hazırlanmışdır. Hal-hazırda belə MSFD-lərin otaq temperaturunda tək-tək işıq kvantlarını qeydə ala bilən eksperimental nümunələri hazırlanmış və sınaqdan keçirilmişdir. MSFD-lərin gücləndirmə əmsalı 10^5-10^7 qiymətlərinə (20-60% detektorlama effektivliyi ilə) çatır ki, bu da vakuum FEV-lərin ən yaxşı nümunələrinin parametrləri ilə müqayisə oluna bilər.

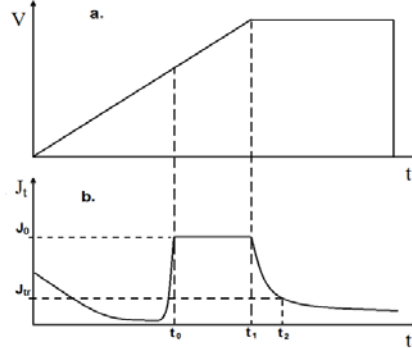
Bu fəsilə həmçinin FQ-lərin fundamental və izafi küyləri də analiz edilmişdir. Göstərilmişdir ki, ionlaşma toqquşmalarının təsadüfi xarakteri mütləq faydalı siqnalın güclənməsini müşayət edən əlavə (izafi) küy daxil edir. Selin izafi küyünün minimallaşdırılması üçün yüksək keyfiyyətli fotohəssas səthin və omik kontaktların seçilməsinə, elektronların və deşiklərin ionlaşma əmsallarının kəskin fərqlənməsinə, selin daha yüksək ionlaşma əmsalına malik daşıyıcılarla təkənlənməsinə, çoxalma əmsalının isə kifayət qədər böyük olmasına nail olmaq lazımdır.

İkinci fəsil 3 paraqrafdan ibarətdir. Burada MSFD-nin əsas parametrlərinin – qaranlıq cərəyanının, foton qeyd etmə effektivliyinin və deşilmə gərginliyinin təyin edilmə metodikalarına baxılmışdır. MSFD-lərin parametrlərinin müəyyən edilməsində yeni üsulların işlənilib hazırlanması onların konstruksiyasının və iş prinsipinin ənənəvi SFD-dən xeyli fərqlənməsi ilə əlaqədardır. MSFD-nin işçi səthi fərdi mikrorezistorlar vasitəsilə ümumi şina ilə birləşən, ölçüsü $100\mu \times 100\mu$ -dən çox olmayan müstəqil *p-n*-keçidlərdən (mikropiksəllərdən) təşkil olunmuşdur. Hər bir mikropiksel Heyger rejimində, yəni deşilmə gərginliyindən yüksək gərginlikdə işləməyə qadirdir, ona görə də onlarda fotoelektronun güclənmə əmsalı 10^6 -dan çox ola bilər. Bu səbəbdən SFD-lərin parametrlərinin ölçülmə üsullarının heç də hamısı MSFD-də tətbiq edilə bilmir.

Bu fəsilə selvari fotodiodların hazırlanması üçün istifadə olunan silisium lövhələrində **qaranlıq generasiya cərəyanının** qiymətləndirilməsi üçün kifayət qədər sadə və effektiv metodika təklif olunmuşdur. Metodika

selvari silisium MDY (metal-dielektrik-y/k) strukturunun parametrlərinin ölçülməsinə əsaslanır ki, bu strukturun da hazırlanması üçün cəmi iki texnoloji proses tələb olunur.

Tədqiqat işində qaranlıq generasiya cərəyanının ölçülməsinə imkan verən riyazi düsturu almaq üçün selvari MDY-strukturunun işinə impuls qida rejimində baxılmış, analitik ifadə trapezoidal formalı impuls qida gərginliyinin müxtəlif hissələri üçün tapılmışdır (şəkil 3, a).



Şəkil 3. Qida gərginliyinin (a) və tam cərəyanının (b) epürələri

Selvari MDY-strukturun fotoreaksiyası bir tərtibli inteqral tənliklə təsvir olunur

$$V = \psi_0 y^2 + \frac{Q_a}{C_d} y + \frac{1}{C_d} \int_0^t \frac{i_a}{1 - y^{2k}} dt , \quad (1)$$

burada, $y=W/W_0$; $Q_a=qN_aW_a$; q -elektronun yükü, N_a - p -tip keçiriciliyə malik silisium lövhəsində əsas aşqarların konsentrasiyası; W_a parametri $\psi_s=\psi_0$ olduqda fəza yükü oblastının qalınlığı; ψ_s -MDY-strukturunda y/k-dielektrik ayrılma sərhədində, uyğun olaraq, sahənin intensivliyi, ψ_0 - selvari MDY-strukturunun deşilmə potensialı; $i_a=i_t+i_c$; i_a -seli təkanlayan generasiya cərəyanı, i_t -qaranlıq generasiya cərəyanı, i_c -fotocərəyan; $k=1 \div 4$ -y/k-nın parametrlərindən və seli təkanlayan cərəyanın təbiətindən asılı olan empirik Miller parametridir. Bu parametrin qiymətini bilmək Miller düsturundan yükdaşıyıcılarının çoxalma əmsalını hesablamaq üçün lazımdır.

(1) tənliyinin həlli y/k-nın fəza yükləri oblastının (FYO) qalınlığının zamandan asılılığının ($W \sim t$) təyin edilməsinə gətirib çıxarır. Ümumi halda, generasiya cərəyanının $i_a(t)$ və qida gərginliyinin $V(t)$ zaman asılılığının verilmiş formasında, $W(t)$ -ni yuxarıda adı çəkilən tənliyin ədədi inteqrallanması yolu ilə təyin etmək olar. Lakin dissertasiya işində selvari

güclənmə əmsalının kifayət qədər böyük qiymətləri üçün bu tənliyin analitik həlli tapılmışdır və bu analitik həlldən (düsturdan) istifadə etməklə qaranlıq generasiya cərəyanını və empirik Miller parametrini eksperimental olaraq təyin etməyə imkan verən metod işlənmişdir. Bu parametrləri eksperimental olaraq təyin etməyə imkan verən aşağıdakı ifadə alınmışdır:

$$Z[J_r(t)] = \frac{4C_m \Delta t}{Q_a C_d} = \frac{1}{k} \cdot i_t + \frac{1}{k} \cdot i_c, \quad (2)$$

$$\left(1 - \frac{C_m}{C_d}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{J_r^2} - \frac{1}{J_0^2}\right)$$

burada, $\Delta t = t_2 - t_1$, t_1 - qida impulsunun yastı təpəsinin başladığı zaman anı; C_m - MDY-strukturun xüsusi tutumu; C_d - MDY-struktur dielektrikin tutumu; J_t - impuls rejimində tam cərəyan; J_r - seli təkanlayan sabit generasiya cərəyanıdır.

Şəkil 3, b -də t_2 nöqtəsində tam cərəyanın $J_t = J_r$ sabit generasiya fotocərəyanından i_c asılı olan qiymətini eksperimental olaraq ölçməklə fiksə olunmuş $\Delta t = t_2 - t_1 = const$ qiymətində Z -funksiyasının i_c -dən asılılığını qurmaq olar. Bu zaman Miller parametri k və seli təkanlayan qaranlıq generasiya cərəyanı i_t müvafiq olaraq yuxarıda göstərilən asılılığın maili hissəsinə görə və i_c oxu ilə kəsişmə nöqtəsinə görə təyin edilirlər.

Təklif olunan üsul minimal qaranlıq saymasına malik MSFD-nin istehsalı üçün yüksək keyfiyyətli silisium lövhələrinin seçimini həyata keçirməyə imkan verir.

İşdə **selvari fotodiodlarda fotonqeydetmə effektivliyinin təyin edilməsi üçün xüsusi metodika** işlənmişdir. Metodika kiçik intensivlikli işıq impulslarının tətbiqinə əsaslanır. Burada fotonların qeydə alınma effektivliyi bir fotonun 300nm-dən 1000nm-ə qədər dalğa uzunluğu oblastında qeydə alınma ehtimalı kimi müəyyən olunur.

İşıq impulsu tərəfindən MSFD-də yaranan fotoelektronların sayı Puasson paylanması ilə təsvir olunur və bu paylanmanın riyazi emalı nəticəsində fotodiodun qəbul etdiyi fotoelektronların orta sayı (μ) və fotodiodun üzərinə düşən fotonların orta sayı (m) təyin edilir. Bu zaman MSFD-nin fotonqeydetmə effektivliyi $PDE = \mu/m$ kimi müəyyən edilir.

Metodika eksperimental stenddə yoxlanılmışdır. Stenddə məlumatların sonradan kompüterə verilməsini və işlənməsini asanlaşdırmaq üçün "LeCroy 2249A" tipli yük-kod rəqəm çeviricisindən istifadə edilmişdir. Analox-rəqəm çeviricisindən (ARÇ) alınan verilənlər kontroller vasitəsilə kompüter tərəfindən histoqram şəklində – qeydə alınan impulslar sayının onların amplitudlarından asılılığı şəklində hesablanır.

İşlənmiş MSFD ayrı-ayrı fotoelektronların çox yaxşı qeydə alınma qabiliyyətini nümayiş etdirmişdir.

İşdə həmçinin **selvari fotodiodların deşilmə gərginliyinin (U_{br}) təyin edilmə metodikası** işlənmişdir. Metodika məlum Miller düsturunun

$$M = \frac{1}{1 - (U_{pn}/U_{br})^k} \quad (3)$$

istifadəsinə əsaslanır ki, burada U_{br} -selvari fotodiodun p - n -keçidinin deşilmə gərginliyi, $U_{pn} = U_d - J_t \cdot R_0$ -bilavasitə p - n -keçiddə düşən gərginlik, U_d -cihaza verilən gərginlik, J_t -fotodiodda tam cərəyan, R_0 -selvari fotodiodla ardıcıl birləşən rezistorun effektiv müqaviməti, k -Miller empirik parametridir.

Lakin selvari güclənmə əmsalının (M) fotodioda verilən gərginlikdən (U_d) asılılığının eksperimental verilənlərlə yaxşı uyğunlaşması üçün fotodiodun elektrik dövrəsindəki ardıcıl R_0 müqavimətində gərginliyin düşməsinə nəzərə almaq lazımdır. Sadələşdirilmiş Miller düsturu alınmışdır:

$$M = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{1 - \frac{U_d - M \cdot I_{ph} \cdot R_0}{U_{br}}} \quad (4)$$

$U_d < U_{br}$ gərginliklər oblastında ardıcıl R_0 rezistorunda gərginliyin düşmə qiymətini nəzərə almamaqla aşağıdakı ifadə alınmışdır:

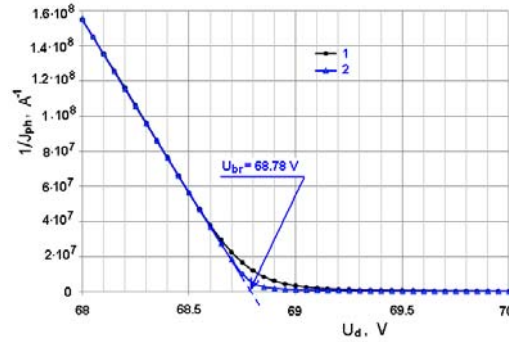
$$\frac{1}{J_{ph}} = \frac{k}{I_{ph} U_{br}} \cdot (U_{br} - U_d) \quad (5)$$

(5) ifadəsi $1/J_{ph}$ -in U_d gərginliyindən eksperimental asılılığının xətti ekstrapolyasiyasını istifadə etməklə, U_{br} və k parametrlərini təyin etməyə imkan verir.

İşlənmiş metodikanın yoxlanılması üçün eksperimental nümunələr qismində müxtəlif istehsalçılardan üç növ selvari fotodiod seçilmişdir: *Hamamatsu* (Yaponiya) firmasından *S10362-11-025U* mikropikselli selvari fotodiodu, *ITC-irst* italyan kollaborasiyası tərəfindən hazırlanmış təkpixselli selvari fotodiodu və *Zecotek* (Sinqapur) şirkəti ilə müəllifin kollaborasiya əməkdaşlığı ilə hazırlanmış *APD-33-128V* selvari fotodiodu. *S10362-11-025U* cihazı $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ işçi sahəyə malikdir ki, burada $25\mu \times 25\mu$ ölçülü 1600 piksel yerləşir. "ITC-irst" firmasından olan cihaz ardıcıl söndürücü $R_0 = 350\text{k}\Omega$ müqavimətli mikrorezistorlu, $40\mu \times 40\mu$ ölçülü tək pikseldən təşkil olunmuşdur. *MAPD-33-128* fotodiodu $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ ölçülü işçi sahəyə malik adi selvari dioddur.

S10362-11-025U selvari fotodioduna verilmiş gərginlik $U_d=15V$ olduqda ölçülmüş J_l tam qaranlıq cərəyanı 30 pA-dan çox deyil. Daimi işıq mənbəyi qismində 450 nm-ə yaxın dalğa uzunluğuna malik y/k işıq diodu istifadə olunmuşdur. $U_d=15V$ olduqda, seli təkanlayan fotocərəyanın ölçülmüş qiyməti $I_{ph}=120pA$ təşkil edir. Daha sonra $U_d > 15V$ oblastında fotocərəyanın J_{ph} qiymətinin verilmiş gərginlikdən asılılığı ölçülmüşdür.

Şəkil 4-də *S10362-11-025U* selvari fotodioduna verilmiş gərginlikdən (əyri 1) asılı olaraq, fotocərəyanın I/J_{ph} əks qiyməti göstərilmişdir.



Şəkil 4. Fotocərəyanın əks qiymətinin qoyulmuş gərginlikdən asılılığı:

1 – eksperimental asılılıq; 2 – Miller düsturu əsasında hesabi asılılıq

Eksperimental əyrinin xətti hissəsinin və (5) ifadəsinin ekstrapolyasiyasını istifadə etməklə, $U_{br}=68.78V$ və $k = 1.64$ parametrləri təyin edilmişdir. Bu verilənlər (5) düsturunun əsasında analoji asılılığın (əyri 2) qurulmasında istifadə edilmişdir ki, burada effektiv müqavimət R_0 piksellərin ardıcıl müqavimətinə bərabər qəbul edilir $R_p = 220k\Omega$. R_p -nin qiyməti cihazın birbaşa VAX-nın köməyi ilə müəyyən edilmişdir. Həmçinin müəyyən edilmişdir ki, ardıcıl müqavimətin R_0 qiymətinin $3M\Omega$ -a qədər artırılması $U_d < U_{br}$ gərginliklər oblastında əyrilərin xarakterinin nəzərə çarpacaq dəyişməsinə gətirib çıxarmır. Şəkil 4-dən görüldüyü kimi $U_d < U_{br}$ oblastında hesabi və eksperimental əyrilər yaxşı uyğunlaşır, yəni verilmiş gərginliklər oblastında selvari fotodiodun xarakteristikaları (fotocərəyan və çoxalma əmsalı) Miller düsturu ilə kifayət qədər dəqiq təsvir edilir.

Üçüncü fəsil 4 paraqrafdan ibarətdir və metal-rezistiv təbəqə-y/k (MRY-struktur) tipli çoxlaylı silisium strukturlarında fotocərəyanın güclənməsi xüsusiyyətlərinin tədqiqinə həsr edilmişdir. Rezistiv təbəqənin keçiriciliyinin kifayət qədər olması sayəsində MRY-struktur sabit qida

gərginliyi ilə işləyir. MRY-strukturunun işçi xarakteristikalarının stabilliyi, metal-dielektrik-y/k (MDY) strukturunda olduğu kimi heterokeçidin ayrılma sərhədinin xüsusiyyətləri ilə deyil, rezistiv təbəqənin həcmnin xüsusiyyətləri ilə, o cümlədən onun keçiriciliyinin qiyməti ilə müəyyən edilir. MRY-strukturlar xüsusi müqaviməti $(1 \div 10) \text{Om} \cdot \text{sm}$ olan p -tipli keçiriciliyə malik standart silisium lövhələr əsasında, həmçinin $4,5 \text{Om} \cdot \text{sm}$ xüsusi müqaviməti olan n -tipli keçiriciliyə malik lövhələr bazasında hazırlanmışdır. Genişzonalı (rezistiv) təbəqə qismində $(0,15 \div 0,2) \text{mkm}$ qalınlıqlı silisium karbidi (SiC) və ya $(0,2 \div 0,3) \text{mkm}$ qalınlıqda hidrogenləşdirilmiş amorf silisium (Si:H) istifadə edilmişdir.

Selvari qəbuledicinin səthi üzrə selvari prosesin bircinsliyi eksperimental olaraq ləkəsinin diametri 50mkm olan işıq diodu şüasının skanetməsi yolu ilə yoxlanılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, nümunənin $3 \times 3 \text{mm}^2$ -ə bərabər olan sahəsi üzrə güclənmə əmsalının nisbi dəyişməsi 12% -dən çox deyil.

Selvari MRY-strukturun parametrlərinə y/k-dəki müxtəlif qeyri-bircinsliklərin təsirinin mexanizmi araşdırılmışdır. Məlumdur ki, real y/k-də vakansiyalar, dislokasiyalar və digər qeyri-bircinsliklər olur. Bu qeyri-bircinsliklərin selvari strukturunun səthi üzərində təsadüfi paylanması müvafiq olaraq seli yaradan təkanlayıcı cərəyanın və y/k-də deşilmə potensialının kənarçıxmalarına səbəb olur. Deşilmə potensialının U_{br} dəyişməsindən daha çox selvari prosesin çoxalma (güclənmə) əmsalının kənarçıxmaları kəskin asılı olur. Deşilmə potensialı U_{br} y/k altlığda qadağan olunmuş zonanın eni E_g və aşqarların konsentrasiyası N_a kimi fiziki parametrlərlə təyin olunur. MRY-struktur sahəsi $S_1 \ll S_2$ olan yeganə qeyri-bircins oblasta malik olduğu halda (bu zaman $S_1 + S_2 = S$) nəzərdə tutulur ki, deşilmə potensialının qeyri-bircinsliyi S_2 sahəsinə malik digər oblastla müqayisədə yalnız y/k-nın S_1 sahəli oblastının aşqarlarının konsentrasiyasının artması ilə şərtlənir.

İşdə iki sərhəd halı üçün hesablamalar aparılmışdır: birinci halda $R_{12} \ll R_{r1}, R_{r2}$ (yüksək səthi keçiricilik şərti); ikinci halda $R_{12} \gg R_{r1}, R_{r2}$ (səthi keçiriciliyin olmaması). Burada $R_{12} - S_1$ və S_2 oblastları arasında səthi sızma cərəyanının müqavimətidir.

Səthi sızma müqavimətinin genişzonalı təbəqənin müqavimətindən xeyli kiçik olduğu birinci halda selvari cərəyanın əsas hissəsi qeyri-bircinslik oblastından (S_1 oblastından) S_2 sahəli oblasta axır. S_1 oblastında deşilmə gərginliyinin qiyməti az olduğuna görə orada selvari proses MRY-strukturun elektrodlarında daha aşağı gərginlik olduğu halda başlayır.

Yükdaşıyıcılarının S_1 oblastından S_2 oblastına axması S_2 oblastının səthi potensialının artmasının yavaşmasına gətirir ki, bunun nəticəsində işçi sahəsinin böyük hissəsində ($S_2 \gg S_1$ olduğuna görə) selvari proses sönür. MRY-struktura bir qədər gərginlik verildikdən sonra S_1 və S_2 oblastlarında çoxalma əmsalları öz aralarında min dəfədən çox fərqlənən maksimal qiymətlərinə çatırlar.

Səthi yük əlaqəsinin olmadığı ikinci halda S_1 və S_2 oblastları özlərini müxtəlif deşilmə gərginliyi qiymətlərinə malik müstəqil heterostrukturlar kimi aparırlar. Ona görə də S_1 oblastında selvari proses daha aşağı gərginlikdə başlayır, belə ki, bu oblastda deşilmə gərginliyi digər oblastla müqayisədə 0,1V azalmış olur. Bu oblastlar üzərində öz xassələrinə görə eyni olan genişzonalı təbəqələr olduğuna görə gərginlik artdıqca bu oblastlarda M_1 və M_2 çoxalma əmsalları bir-birinə yaxınlaşır və müəyyən gərginliyə çatdıqdan sonra təqribən bərabərləşir. Bu zaman MRY-strukturda çoxalma əmsalı gərginliyin artması ilə sabit sürətlə artır.

Bu o deməkdir ki, selvari prosesi deşilmə gərginliyinin praktiki olaraq istənilən qeyri-bircinsliyinə (səth üzrə variasiyalara) malik altlıq üzərində həyata keçirmək mümkündür. Bunun üçün həssas sahəni kiçik müstəqil (yəni yük əlaqəsi olmayan) sahələrə bölmək, sonra isə onlara uyğun müqavimət R_r qoşmaq lazımdır (baxılan hal üçün $R_{r1}=R_{r2}=R_r$).

Yuxarıda göstərilən S_1 və S_2 sahəli iki müstəqil pikselə malik strukturları $S_1=S_2=0,01\text{mm}^2$ şərti ödənməklə nəzərdən keçirilmişdir. Nəzərdə tutulur ki, generasiya cərəyanı $i_a=10\text{pA}$ (10^{-11}A) olduğu halda bütün həssas sahə $S=S_1+S_2$ üzərində $M \sim 10^5$ orta güclənmə əmsalı ilə bircins selvari prosesi əldə etmək lazımdır. Tutaq ki, nümunəyə $V=43\text{V}$ gərginlik verilmişdir. Bu gərginlik ψ_{01} və ψ_{02} deşilmə gərginliyindən böyükdür, ona görə də gərginliyin artığı R_{r1} və R_{r2} müqavimətlərində düşəcəkdir. $M \gg 1$ olduqda $(V_{r1}-V_{r2})=(\psi_{s1}-\psi_{s2}) \approx (\psi_{02}-\psi_{01})=0,1\text{V}$, $V-\max(\psi_{01}; \psi_{02})=1\text{V} \gg (\psi_{02}-\psi_{01}) \approx (V_{r1}-V_{r2})$ olacaqdır. Buradan alınır ki, $R_{r1} \approx (V-\psi_{02})/(i_a \cdot M) = 1/(10^{-11} \cdot 10^5) = 10^6\text{Om}$. Bu zaman nümunəyə verilən gərginlik (V) nə qədər böyük olarsa, M_1 və M_2 arasında fərq o qədər kiçik olacaqdır. Tədqiqatlar göstərmişdir ki, MRY-struktur $p-n$ -keçidlər əsasında strukturlardan fərqli olaraq qida gərginliyinin yüksək stabilliyini tələb etmir, çünki MRY-strukturda gərginliyin müəyyən qiymətindən başlayaraq selvari prosesin çoxalma əmsalı verilən gərginlikdən zəif asılı olur. Bunun sayəsində MRY-strukturda y/k -rezistiv təbəqə ayrılma sərhədinin bütün səthi boyunca bircins selvari proses həyata keçirilə bilər.

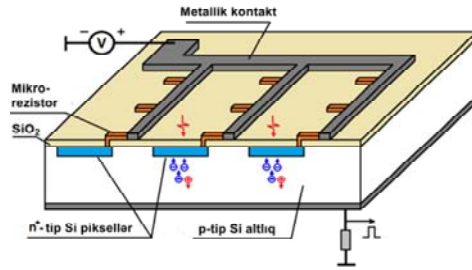
Bu fəsilə **selvari silisium strukturunun səthi boyu yük paketinin yayılması prosesi** tədqiq edilmişdir. Göstərilmişdir ki, selvari proses

nəticəsində Si-SiC sərhədində MRY-strukturun mikro-qeyri-bircinsliklərində rezistiv təbəqənin (yəni SiC) keçiriciliyinin kifayət qədər olmaması səbəbindən yük paketi yarana bilər. Bu yük paketi Si-SiC sərhədi boyu yayıla (dağıla) bilər və cihazın digər oblastlarında selvari prosesə təsir edə və fotocərəyanın güclənmə əmsalını məhdudlaya bilər.

Y/k-nin səthi boyunca sahənin yayılması tənliyini almaq üçün Puasson tənliyinin məlum həllindən istifadə edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, fotocərəyanın yüksək güclənmə əmsallarının alınması üçün çoxalmış yükdaşıyıcılarının FQ-nin bir oblastından digərinə axmasının qarşısını almaq lazımdır.

Dördüncü fəsil 4 paraqrafdan ibarətdir və MSFD tipli birkanallı FQ-lərin hazırlanma üsullarına və onlarda fotosiqnalın selvari güclənməsinin xüsusiyyətlərinin tədqiqinə həsr olunmuşdur. İki tip MSFD-nin - pikselləri səthi yerləşdirilmiş selvari fotodiodların və pikselləri dərin yerləşdirilmiş selvari fotodiodların tədqiqatlarının nəticələri verilmişdir.

Səthi piksellərə malik selvari fotodiod silisium altlığın səthində hazırlanmış 20 mkm-dən 100 mkm-ə qədər xarakterik ölçüyə malik kiçik, müstəqil *p-n*-keçidlərdən (piksellərdən) ibarət matrisdən təşkil olunmuşdur (şəkil 5).



Şəkil 5. Səthi pikselləli selvari fotodiodların en kəsiyi

Piksellərin arasında cərəyan əlaqəsinin qarşısının alınması üçün onlar müəyyən intervalla yerləşdirilmişdir. Hər bir piksel müqaviməti 10^5-10^7 Om olan fərdi pilyonkalı rezistor vasitəsilə ümumi keçirici şına ilə birləşdirilmişdir. Beləliklə, MSFD-də piksellərin sıxlığı piksellərin ölçüsündən və cihazın tətbiq oblastından asılı olaraq ($10^2-3 \cdot 10^3$) piksel/mm²-ə qədər təşkil edə bilər.

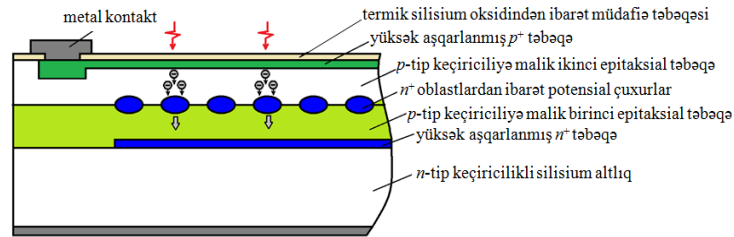
Piksellərdəki potensialın dəşilmə potensialından aşağı enməsi zamanı hər bir pikseldə fərdi mikrorezistor selvari prosesin getdiyi müddətdə pikselin qida mənbəyindən nəzərə çarpacaq dərəcədə yüklənməsinin qarşısını alır və nəticədə selvari prosesin sönməsi baş verir. İşə düşmüş

piksellərdən siqnallar ümumi yükə (keçirici şinada) cəmlənir, və beləliklə, cihazın fotoreaksiyasının xəttliliyi təmin edilir. Cihazın fotoreaksiyası o vaxta qədər xətti qalır ki, bir pikselə iki və ya daha çox fotonun düşmə ehtimalı vahiddən xeyli kiçik olmuş olsun.

Lakin yuxarıda qeyd edilən MSFD-lər piksellərin aşağı sıxlığı səbəbindən fotoreaksiyanın kifayət qədər geniş xəttlilik diapazonuna malik ola bilmirlər. Bu, 1000-dən artıq foton sayına malik işıq impulslarının qeydə alınması tələb olunduğu hallarda verilmiş konstruksiyalı MSFD-lərin tətbiq oblastlarında öz yerini tuta bilər.

Digər (ikinci) tip MSFD-lər səthində p -tip keçiriciliyə malik iki epitaksial təbəqənin yetişdirildiyi n -tip keçiriciliyə malik silisium altlıqdan ibarətdir. Epitaksial təbəqələrin xüsusi müqavimətlərini adətən $(5-10)\text{Om}\cdot\text{sm}$ intervalında, qalınlıqlarını isə hər biri 4mkm olmaqla seçirlər. Epitaksial təbəqələrin arasında konkret icradan asılı olaraq 5mkm -dən 10mkm -ə qədər addımla n^+ -tip keçiriciliyə malik yüksək legirlənmiş oblastlardan ibarət matris formalaşdırılmışdır. Bu, cihazın sahəsinin həssaslığı 100% olduğu zaman piksellərin sıxlığının 40000 piksel/ mm^2 -ə qədər artırılmasını təmin edir.

Belə MSFD-nin üstünlüyü ondadır ki, səthi piksellərə malik MSFD-yə nəzərən burada piksellərin (müstəqil çoxalma kanallarının) daha çox sıxlığını reallaşdırmaq olar. Bu onunla əlaqədardır ki, baxılan MSFD, piksellərin sıxlığı artan zaman həssas sahənin xeyli hissəsini tuta biləcək ümumi keçirici (metal) şina və fərdi mikro-rezistorlara malik deyil. Baxılan MSFD-də söndürücü fərdi rezistorun vəzifəsini hər bir pikselin altında yerləşdirilən düz qoşulmuş p - n -keçidi yerinə yetirir (şəkil 6).



Şəkil 6. Pikselləri dərin yerləşdirilmiş selvari fotodiodların en kəsiyi

İşçi rejimdə MSFD-yə altlığa nəzərən mənfi gərginlik verilir. Cihazın kəsəlməsi altlıqla birinci epitaksial təbəqənin sərhədində yerləşən birinci p - n -keçiddən başlayır. Gərginliyin müəyyən qiymətində kəsəlməmiş oblast n^+ -oblastlar matrisinə çatır və orada mövcud olan ikinci

$p-n$ -keçidi qismən açıq. Bu andan etibarən yalnız n^+ -oblastların ikinci epitaksial təbəqə ilə sərhədində yerləşən üçüncü $p-n$ -keçidi kasadlaşmağa başlayır. Gərginliyin sonrakı artırılması ikinci epitaksial təbəqənin tamamilə kasadlaşmasına gətirir. Bunun nəticəsində MSFD-nin kasadlaşmış oblastında n^+ -oblastlardan təşkil olunmuş potensial çuxurlar matrisi əmələ gəlir, belə ki, bu oblastlardan hər birinin üzərində cihazın bütün həssas səthindən fotoelektronların toplanmasını təmin edən yarımküre şəklində elektrik sahəsi formalaşır. Beləliklə, cihazın həssas səthi bir-birindən tamamilə müstəqil fərdi piksellərə (və ya çoxalma mikrokanallarına) malik fotohəssas oblastlara bölünmüş olur.

Mikrokanallarda yükdaşıyıcılarının selvari çoxalması n^+ -oblastlara malik ikinci epitaksial təbəqənin sərhədyanı oblastında baş verir ki, burada elektrik sahəsinin yüksək gərginliyi yaranır. Çoxalmış elektronlar n^+ -oblastlar tərəfindən yaranan potensial çuxurlarında toplanır ki, bu da ikinci epitaksial təbəqədə elektrik sahəsinin müəyyən astana qiymətindən aşağı düşməsinə səbəb olur, nəticədə, həmin kanalda selvari proses dayanır. Çoxalma mikrokanalında əvvəlki sahənin bərpası toplanmış yükün birinci epitaksial təbəqə ilə n^+ -oblast arasında yaranan düz sürüşdürülmüş $p-n$ -keçiddən altlığın həcminə axması sayəsində baş verir.

Ekspperimental olaraq müəyyən edilmişdir ki, epitaksial texnologiyadan istifadə etməklə hazırlanan dərin yerləşdirilmiş piksellərə malik MSFD cihazları daha yaxşı parametrlərə malik olurlar.

Silisiyum epitaksial təbəqələrinin hazırlanma texnologiyası nəzərdən keçirilmişdir. Hal-hazırda silisiyum epitaksial təbəqələrinin keyfiyyəti həcmi kristallik silisiyum lövhələrinin keyfiyyətindən qətiyyəən geri qalmır. Müasir texnologiya epitaksial silisiyum təbəqələrini təkcə y/k (silisiyum, germanium və b.) kristallik lövhələr üzərində deyil, həm də dielektrik (səpfil, fiانيت və b.) lövhələr üzərində yaratmağa (yetişdirməyə) imkan verir.

Bu fəsildə həmçinin **MSFD-də çoxfotoelektronlu impulsların formalaşma modeli işlənmişdir**. MSFD-nin geniş tətbiq edilməsinə baxmayaraq, onlarda fotoreaksiyanın formalaşması xarakterini təsvir edən analitik ifadə hələ də alınmamışdır. Bu y/k $p-n$ -keçiddə selvari prosesi təsvir edən tənliklər sisteminin riyazi həllinin çətinlikləri ilə bağlıdır. Bu işdə müəyyən yaxınlaşmalarla (təqribiliklə) MSFD-nin fotoreaksiyasının formasının analitik ifadəsi alınmışdır. Bunun üçün silisiyum kəskin $p-n^+$ -keçidində selvari prosesi təsvir edən tənliklər sisteminə baxılmışdır. Tənliklər sisteminə elektronlar və deşiklər üçün kəsilməzlik tənliyi, fəza yükləri oblastında (FYO) potensialın paylanması təsvir edən Puasson

tənliyi daxildir. Müəyyən başlanğıc şərtlər daxilində aşağıdakı tənlik alınmışdır:

$$\frac{dJ_t}{dt} + \frac{2v_s}{W}(1 - \alpha W)J_t = \frac{2v_s i_a}{W}, \quad (6)$$

burada, $J_t = \frac{1}{W} \int_0^W (J_n + J_p) dx$ - tam cərəyan, $i_a = q \int_0^W G(x) dx$ - seli təkanlayan qeyri-stasionar cərəyandır (məsələn, fotocərəyan). Burada (6) tənliyinin inteqrallanması zamanı ionlaşma əmsalının y/k -nin FYO-nun bütün enində sabit olduğu ehtimal edilir. (6) tənliyi $(1 - \alpha W)$ ifadəsinin qiymətindən asılı olaraq, iki həllə malikdir:

$$J_t(t) = \frac{2}{\tau} \exp(-Lt) \int_0^t i_a \exp(Lt') dt', \quad \alpha W \neq 1 \text{ olduqda}, \quad (7)$$

burada, $L = (2/\tau) \times (1 - \alpha W)$, $\tau = W/v_s$ - yükdaşıyıcılarının y/k -nin FYO-dan uçub keçmə vaxtıdır və

$$J_t(t) = \frac{2}{\tau} \int_0^t i_a dt', \quad \alpha W = 1 \text{ olduqda}. \quad (8)$$

(7) ifadəsi göstərir ki, $\alpha W > 1$ olduqda, istənilən formalı və müddətli təkanlayıcı cərəyan selvari fotodiodda selvari cərəyanın sonsuz artımına səbəb olur.

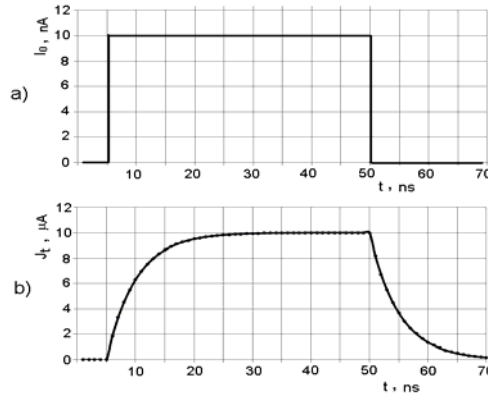
Tək fotoelektronun təkənladığı impuls cərəyanının formalaşma prosesi böyük maraq doğurur. αW ifadəsinin qiymətindən asılı olaraq, tək elektronlar da eksponensial enən, yaxud sabit selvari cərəyan yarada bilərlər. $\alpha W < 1$ şərti ödənildikdə, seli təkanlayan qeyri-stasionar cərəyan başa çatdıqdan sonra cihazın fotoreaksiyası sönür. Buna misal olaraq, düzbucaqlı işıq impulsuna cihazın fotoreaksiyasının formasına baxmaq olar. Fotoreaksiyanın ön və arxa cəbhələrini təsvir edən müvafiq ifadələr alınmışdır.

Şəkil 7-də düzbucaqlı işıq impulsunun qeydə alınması zamanı selvari fotoreaksiya verilmişdir. Hesabatlarda aşağıdakı qiymətlər istifadə olunmuşdur: $M = 1/(1 - \alpha W) = 1000$, $I_0 = 10 \text{ nA}$, $t_1 = 5 \text{ ns}$, $t_2 = 50 \text{ ns}$, $\tau = 10 \text{ ps}$.

Görünür ki, fotoreaksiyanın cəbhələri selvari prosesin $\tau_i = (\tau M/2)$ -yə bərabər olan inteqrallama müddəti ilə xarakterizə olunur. Cihazın buraxma zolağını $\Delta f = 1/\tau_i$ nəzərə alsaq, $\Delta f \cdot M = (2/\tau) = \text{const}$ alınır. Bu deşilmə potensialından aşağıda işləyən selvari fotodiodun buraxma zolağının selvari prosesin güclənmə əmsalına tərs mütənasib olduğunu bildirir.

İşdə MSFD-də birelektronlu impulsların güclənməsinin fiziki modeli işlənmişdir. Qeyd edilmişdir ki, hal-hazırda MSFD-yə çoxlu

eksperimental və nəzəri işlər həsr olunmasına baxmayaraq onun piksellərində cihazın əsas xarakteristikalarını təsvir edən selvari prosesin inkişafı və sönməsinin adekvat fiziki modeli hələ də yaradılmamışdır.



Şəkil 7. İşıq siqnalının (a) və selvari fotodiodun fotoreaksiyasının (b) forması

Təklif edilən modellərin əksəriyyəti cihazın ekvivalent elektrik sxemlərinə əsaslanır ki, bu zaman piksellərin daxilində baş verən selvari prosesin xarakteri nəzərə alınmır. Bu işdə MSFD piksellərində selvari prosesin inkişafının və sönməsinin fiziki modeli vermişdir. Təklif edilən modeldə uyğun olaraq elektronlar və deşiklər üçün iki ayrı-ayrı selvari oblasta (təbəqələrə) malik $p^+ - i - n^+$ struktur nəzərdən keçirilir. Bu onunla şərtlənir ki, silisium MSFD cihazı identik $p-n$ -keçidlər (piksellər) matrisindən ibarət olur. Hər bir piksel fərdi rezistorun köməyi ilə ümumi şinaya birləşir. Ona görə də cihazın xarakteristikalarının təsvir edilməsi üçün bir pikselin işinə baxmaq kifayət edir. Şəkil 8,a-da fərdi müqaviməti R_p olan bir MSFD pikseli göstərilmişdir. Piksel $p^+ - i - n^+$ strukturdan ibarətdir. Bu struktura W qalınlıqlı i -təbəqəsində selvari prosesin inkişafı üçün kifayət edən $E = E_d = U_d / W$ qiymətə malik bircins elektrik sahəsi yaranan $U = U_d$ gərginliyi verilir.

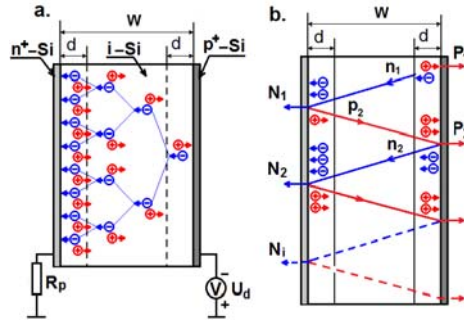
Strukturun i -oblastında, məsələn pikselin katodunun yanında, əmələ gələn tək fotoelektron bütün qalınlığı W keçərək, yeni elektron-deşik cütləri yaradır, belə ki, elektron-deşik cütlərinin böyük hissəsi anod sərhədinin yaxınlığında (n^+ təbəqənin yanında) yaranır. Tək deşik tərəfindən yaradılan selvari proses də analoji xarakterə malikdir, yəni elektron-deşik cütlərinin əsas hissəsi katodun sərhədi yaxınlığında (p^+ təbəqənin yanında) yaranır.

Ona görə də təklif edilən modeldə nəzərdə tutulur ki, elektronlarla və deşiklərlə zərbəli ionlaşma prosesi yalnız uyğun olaraq pikselin anod və katod elektrodlarının yaxınlığında yerləşən $d \ll W$ qalınlıqlı iki nazik oblastda mümkündür.

Şəkil 8,b-də selvari prosesin sxemi göstərilmişdir. Burada $t=0$ zaman anında katodun yanında bir fotoelektron ($n_1=1$) yarandığı fərz edilir. Bu elektron $\tau = (W/v)$ zaman ərzində bütün i -oblastı uçub keçərək, anod sərhədi yaxınlığında zərbə ionlaşması sayəsində elektron-deşik cütləri yaradır, burada v - i -təbəqədə yükdaşıyıcılarının maksimal hərəkət sürətidir. MSFD pikselində tək elektronun güclənmə əmsalını (M) aşağıdakı ifadənin köməyi ilə təyin edirik:

$$M = N_1 + \sum_{i=2}^{\infty} N_i \quad (9)$$

Müəyyən edilmişdir ki, işlənmiş model MSFD-nin piksellərində selvari prosesin məntiqli təsvirini verir. O, həm Heyger rejimində (deşilmə gərginliyindən yuxarı), həm də adi rejimdə (deşilmə gərginliyindən aşağı) selvari fotodiodların işini modelləşdirməyə imkan verir. Boşalma cərəyanının ön və arxa cəbhəsinin xarakterik müddəti eyni qiymətə ~ 50 ps malikdir. MSFD pikselinin xarici yüklənmə cərəyanının ön cəbhəsinin müddəti də eyni qiymətə malik olur.



Şəkil 8. MSFD pikselinin iş rejimi.

Mühüm nəticələrdən biri də pikselin anodu və katodu arasındakı potensiallar fərqinindeşilmə gərginliyinin qiymətinə çatdığı halda selin xarakterinin müəyyən edilməsidir. Gərginlik enməyə davam etdikcə yeni elektron-deşik cütlərinin yaranma sürəti azalır. Gərginlikdeşilmə gərginliyindən aşağı endikdən sonra yaranan yükdaşıyıcılarının sayıdeşilmə gərginliyindən yuxarı oblastda yarananların sayı ilə təqribən eyni olur. Bunun nəticəsində impulsların yükünün sürüşmə gərginliyindən xətti

asırlılığının maili əyrisindən təyin edilən pikselin effektiv tutumu onun real tutumundan təqribən iki dəfə böyük olur $C_{eff} = 2 \cdot C_p$.

Tədqiqat çərçivəsində **MSFD əsaslı birkanallı qamma-karotaj qurğusu işlənmiş və sınaqdan keçirilmişdir**. Qeyd edilmişdir ki, hal-hazırda impuls rejimli neytron karotaja malik quyu cihazlarından geniş istifadə edilir. Bu cihazlarda FQ kimi SD əsasında vakuum FEV-dən istifadə edilir. Lakin vakuum FEV-in əvvəldə qeyd edilən bir sıra çatışmazlıqların cəmi kompleks təcrübi işlərin nəticələrini pisləşdirir. Məhz, bu səbəbdən karotaj qurğularındakı SD-lərdə MSFD-lərin istifadə olunması mümkünlüyü araşdırılmış və yeni növ MSFD əsaslı ssintilyatorlu qamma-detektorlar işlənilib hazırlanmışdır.

Karotaj qurğularının tələblərinə cavab verən MSFD əsaslı SD-nin sınaqdan keçirilməsi Na^{22} radioaktiv mənbədən gələn 511KeV enerjili qamma kvantların aşkarlanması şəraitində yerinə yetirilmişdir.

Bərk cisim ssintilyatoru kimi $3,4mm \times 3,4mm \times 10mm$ ölçüyə malik Zecotek Photonics Inc. şirkətinin LFS kristalları götürülmüşdür. Ssintilyatorlu detektor MSFD-yə verilən 90V gərginlikdə sınaqdan keçirilmişdir. 511KeV enerjili qamma kvantların aşkarlanması zamanı siqnalların amplitud paylanması (energetik ayırdetməsi) tədqiq edilmiş və 511KeV və 1275KeV enerjili qamma kvantlara müvafiq 2 pik müəyyən edilmişdir. Piklərin amplitudu Na^{22} mənbədən buraxılmış qamma kvantların tezliyinə uyğundur. Məsələ burasındadır ki, bu radioaktiv mənbə əsasən 511KeV enerjili qamma kvantlar buraxır. Energetik ayırdetmənin hesablanmış qiyməti 12% təşkil etmişdir.

Qamma karotaj zəndu detektorunun modulu texniki və fiziki xüsusiyyətləri üzrə öz analoqları ilə müqayisədə bir çox üstünlüklərə (aşağı işçi gərginliyi, yüksək energetik ayırdetməsi, yüksək fotonqeydetmə həssaslığı, güclənmənin xəttliliyi, maqnit sahəsinə həssas olmaması, mexaniki möhkəmliyi və s.) malikdir.

Beşinci fəsil 5 paragrafdan ibarətdir və matrisli radiasiya detektorları üçün ssintilyasiya kristallarının analizi və seçimi, optik informasiyanın qəbulu üçün matrisli selvari fotodiodların işlənməsi və onların ətraf mühitə, maddələrə, materiallara nəzarət cihazlarında tətbiqi məsələlərinə həsr olunmuşdur. Minimal qeyri-həssas oblasta malik kompakt və ucuz matrisli FQ-lərin konstruksiyası və hazırlanma üsulları təklif edilmişdir.

Qurğu, üzərində matrisli FQ-dəki fətohəssas elementlərin – fotodiodların miqdarına bərabər sayda elementləri olan keçirici oblastlar matrisi hazırlanmış dielektrik korpusdan ibarətdir. Hər bir keçirici oblast dielektrik korpusdan keçməklə əks tərəfdə fərdi elektrik çıxışına malikdir.

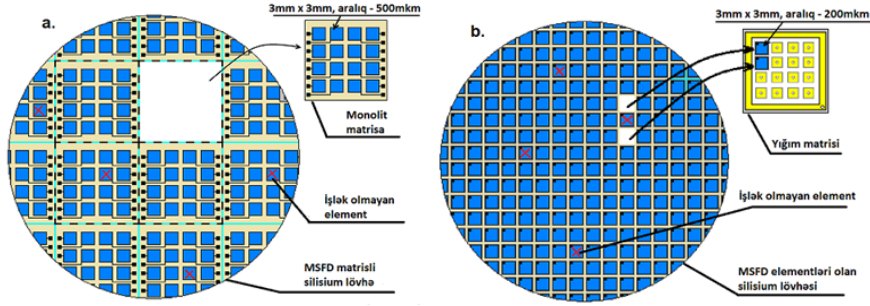
Fotodiodlar keçirici oblastlarda elə yerləşdirilmişdir ki, hər bir fotodiodun arxa elektrodu uyğun keçirici oblastla elektrik kontaktına malik olur. Fotodiodların y/k altlıqları bir-birindən tamamilə ayrılmışdır. Hər bir fotodiod ön elektroda və arxa elektroda malikdir. Arxa elektrodlar fotohəssas səthə nəzərən fotodiodların altlığının əks tərəfində hazırlanmışdır. Onlar tamamilə bir-birindən izolə edilmiş və matrisli FQ-nin hər bir elementindən siqnalın fərdi çıxarılmasını təmin edirlər. Fotodiodların ön elektrodları qurğunun səthində yerləşən ümumi keçirici şınaya birləşir. Keçirici şına həmçinin dielektrik korpusun əks tərəfinə elektrik çıxışına malikdir. O, matrisli FQ-yə ümumi qıda gərginliyinin verilməsi üçün nəzərdə tutulmuşdur. Beləliklə, elementlərin istənilən sayına malik daha ucuz və kompakt (yəni fotohəssas sahələri arasında minimal ara olan) matrisli FQ reallaşdırılır.

MSFD matrisin təklif edilən hazırlanma texnologiyası verilmişdir. Matrisdə metal kontakt zolaqlarının olmaması analoqlarla müqayisədə cihazın həndəsi amilini (həssas sahənin hissəsini) xeyli artırmağa imkan verir. Texnologiyanın bugünkü inkişaf səviyyəsi matrisin həssas oblastları arasındakı aranı 20 mkm-ə qədər azaltmağa imkan verir. Bununla yanaşı təklif edilən hazırlanma üsulu işlənmiş matrisin maya dəyərini monolit matrislə müqayisədə xeyli azaltmağa imkan verir. Məsələn bundadır ki, monolit matris texnologiyasında (şəkil 9,a) cihazlarla hazır lövhənin 70%-dən çoxu istifadə olunmadığı halda, ayrı-ayrı elementlərdən ibarət matris üçün təklif edilən üsul hazır lövhənin 90%-dən çox sahəsini istifadə etməyə imkan verir (şəkil 9,b). İşlənmiş matrislər radiometriyada qamma şüaların koordinat-həssas SD-lərin yaradılması üçün, həmçinin optik təsvirlərin müasir optoelektron qəbul və emal qurğularında tətbiq edilə bilər.

İşdə həmçinin radiasiya kalorimetriya qurğuları üçün yaxşılaşdırılmış energetik və zaman ayırdetməsinə malik **yeni ssintilyasiya detektoru işlənmişdir**. Radiasiya kalorimetriya qurğusu qamma-fotonların və ya nüvə hissəciklərinin (protonların, neytronların və s.) enerjisinin müəyyən edilməsinə xidmət edir. Bunun üçün ən yaxşı energetik ayırdetmənin əldə edilməsi məqsədilə hissəciklərin enerjilərinin detektorun materialına tam ötürülməsinin təmin edilməsi tələb olunur. Bu radiasiya kalorimetrisinin SD-na qoyulan əsas tələbdir.

İxtiyari kolorimetrisin SD-nin əsas elementləri ssintilyator və onunla optik kontakta malik olan FQ, o cümlədən FQ-lər matrisidir. SD-nin iş prinsipi aşağıdakı kimidir: yüklənmiş nüvə zərrəcikləri ssintilyatordan keçərək onun atomlarını həyəcanlandırır. Atomlar əsas vəziyyətə qayıtmaqla bu ssintilyator üçün xarakterik olan dalğa uzunluqlu fotonlar

buraxır. Şüalanan işıq FQ tərəfindən qeydə alınır. FQ qismində fotoelektron vurucu, adı $p-n$ -fotodiod, yaxud selvari fotodiod istifadə edilə bilər. Neytronların və qamma-kvantların detektorlanması ssintilyatorun atomları ilə qarşılıqlı əlaqə zamanı yaranan ikinci yüklənmiş zərrəciklər vasitəsilə baş verir.

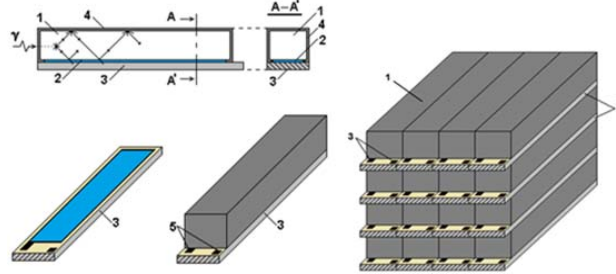


Şəkil 9. MSFD matrislərinin iki hazırlanma üsulunun müqayisəsi

Məlumdur ki, ssintilyasiya işığı bütün istiqamətlər üzrə izotrop şəkildə paylanmış olur. Ona görə də FQ-nın həssas səthinə toplanmış işığın gücü S_d/S_s nisbətində düz mütənasib olur, burada S_d – FQ-nın həssas səthinin sahəsi, S_s -ssintilyatorun bütün səthlərinin sahələrinin cəmidir. SD-nin hazırlanmasında adətən silindr və ya paralelepiped formalı bərkcisimli ssintilyatorlar istifadə edilir. FQ ssintilyatorun oturacaqlarından biri ilə optik kontakta malik olur, ssintilyatorun digər oturacağından isə detektorlanan zərrəciklər daxil olur. Burada əsas məqsəd ssintilyasiya işığının FQ-nın həssas səthinə maksimal toplanmasının təmin edilməsindən ibarətdir, çünki SD-nin energetik ayırdetməsi, zaman ayırdetməsi və digər mühüm parametrləri bundan asılıdır.

İşdə neytron və qamma-şüalanmasının bəzi məlum SD-ləri analiz edilmişdir. SD-nin adı çəkilən parametrlərinin yaxşılaşdırılmasının ilkin fiziki şərtləri y/k FQ-nın həssas səthində yığılmış ssintilyasiya işığının gücünün artırılması və stabilləşdirilməsidir. Tərəfimizdən işlənilmiş SD-də buna nail olmaq üçün y/k FQ-nı bərkcisimli ssintilyatorun təkə oturacağı ilə deyil, həm də ən azı bir yan səthi ilə optik kontakta yaradılmışdır, belə ki, burada bir bərkcisimli ssintilyator ilə bir və ya bir neçə y/k FQ-nın optik kontakta mümkündür. Hər bir y/k FQ ən azı iki metal kontakta malik olur ki, bunlar qıda gərginliyinin verilməsini və fotosiqnalın çıxarılmasını təmin edirlər.

Təklif olunan SD-nin mövcud analoqlarla müqayisədə bir sıra mühüm üstünlükləri vardır. Birincisi, y/k FQ-nin həssas səthində yığılmış ssintilyasiya işığının gücü xeyli artır, çünki bərk cisimli ssintilyatorun yan səthinin sahəsi onun oturacağıının sahəsindən xeyli böyük olur. İkincisi, bərk cisimli ssintilyatorun uzunluğu boyunca qamma-kvantların və neytronların qarşılıqlı əlaqə yerindən asılı olmayaraq, y/k FQ-nin həssas səthində yığılmış ssintilyasiya işığının gücü praktiki olaraq eyni olur. Üçüncüsü, bərk cisimli ssintilyatorun səthi məhsulun maya dəyərini artıran xüsusi güzgü cilalanmasını tələb etmir (şəkil 10).



Şəkil 10. 16 bərk cisimli ssintilyatorlu detektordan (SD) ibarət matrisin elementlərinin en kəsiyi və ümumi görünüşü: 1 - ssintilyasiya kristalı, 2 - ssintilyatorun MSFD ilə optik kontakta, 3 - MSFD, 4 - işıqkəsetdirici örtük, 5 - MSFD-nin metal kontaktları.

Şəkil 10-da verilmiş bərk cisimli ssintilyatorun konstruksiyası onun əsasında praktiki olaraq ixtiyari kanal sayına malik koordinat-həssas SD-lər matrisinin yaradılmasına imkan verir.

İşdə SD-nin hazırlanma üsulu verilmişdir. İşlənmiş 16 elementli SD-lər matrisi informasiyanın qəbulu və emalı sistemlərində nüvə hissəciklərinin və qamma-şüalanmalarının effektiv koordinat-həssas detektoru qismində, həmçinin gizli partlayıcı maddələrin və radioaktiv materialların aşkarlanması üçün nəzərdə tutulan qurğularda, həmçinin **pozitron-emissiya tomoqraf (PET)** qurğularında istifadə oluna bilər. Bu tomoqraflar insan orqanizmində baş verən funksional proseslərin üçölçülü təsvirini qurmağa imkan verir. PET heç bir kliniki təzahürləri olmayan şişləri yüksək etibarlılıqla aşkar edir, həmçinin xoşxassəli şişləri bədxassəli şişlərdən ayıra bilir.

PET-tədqiqatı prosesində pasiyentə pozitron-emissiyaedici radioizotop (məsələn, fluor izotopu ^{18}F) yeridilir. Bundan sonra izotop pasiyentdə sirkulyasiya edir və baş beyinə və ya ürək əzələsinə çatır. Annigilyasiya baş verən kimi tomoqraf izotopun lokalizasiyasını qeydə alır və onun konsentrasiyasını hesablayır. Annigilyasiyadan sonra yaranan xətt

bir-birinə nəzərən təqribən 180° istiqamətlənmiş (əks istiqamətdə) 511keV enerjili iki qamma-şüanın uçuş trayektoriyasından ibarətdir. Tomoqrafın işi bu şüaları qeydə almaqdan ibarətdir. Bu iki şüanın eyni zamanda əmələ gəlməsi verilən xətdə məhz pozitron annigilyasiyanın baş verdiyini bildirir. 511keV enerjili qamma-şüalar BGO, LSO və ya LFS-dən hazırlanmış ssintilyator kristalları ilə qarşılıqlı əlaqədə olduqda, onlar işıq fotonlarına çevrilir. Qamma-kvant cütlərinin yaranma və qeydə alınma prosesləri bir-birinin ardınca praktiki olaraq ani baş verir. Bu əks detektorlardan alınan ssintilyasiya hallarını müqayisə etməyə imkan verir. Tədqiq edilən obyektin ətrafında halqavari yerləşdirilən detektorlar qarşıda yerləşən detektorların əksəriyyəti ilə üst-üstə düşmələrin qeydiyyatı rejimində işləyirlər. Beləliklə, üst-üstə düşmələrin bir nöqtədə (reallıqda pasiyentin bədəninin 3mm-ə yaxın kiçik bir hissəsində) kəşifən bir neçə xətt (istiqamət) üzrə təyin edilməsi mümkündür.

Bu fəsildə həmçinin **partlayıcı maddələrin və radioaktiv materialların aşkar edilməsi üçün koordinat-həssas SD-nin işlənməsi və sınağı** məsələsinə baxılmışdır. Qeyd edilmişdir ki, hal-hazırda məlum üsullar arasında təhlükəli yükü 93%-dən pis olmayan ehtimalla aşkar etməyə imkan verən nişanlanmış neytronlar metodu (NNM) adlandırılan metod xüsusi maraq kəsb edir.

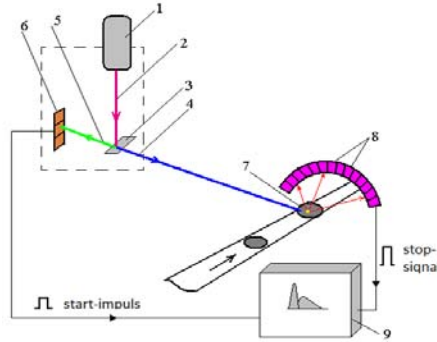
Gizlədilmiş təhlükəli yüklərin (partlayıcı maddələrin, radioaktiv materialların və s.) aşkar edilməsi üçün istifadə edilən bütün texniki vasitələrin (qurğuların) əsas elementi ssintilyasiya radiasiya detektorudur. İşdə MSFD matrisi əsasında 16-kanallı koordinat-həssas SD işlənməsi və sınaqdan keçirilmişdir.

Bu iş çərçivəsində işlənilən hazırlanmış MSFD əsaslı NNM-detektorunun funksional sxemi şəkil 11-də verilmişdir. NNM-detektorunun əsas elementləri neytron selinin yaradılmasını təmin edən deytronlar sürətləndiricisi və qamma-şüalanmasının koordinat-həssas SD-dur.

Qurğu aşağıdakı kimi işləyir. Enerjisi 450 keV olan deytronlar seli sürətləndiricidən tritium (TiT_2) hədəfinə (nişanına) istiqamətləndirilir və hədəfdə deyterium + tritium \rightarrow alfa zərrəcik + neytron (və ya, $d + t \rightarrow \alpha + n$) binar reaksiyası nəticəsində 14,1 MeV enerjili neytron və 3,5 MeV enerjili alfa zərrəcik cütü yaranır. Neytron seli yoxlanılan yükədən keçərək yükün daxilində olan predmetlərin (karbon, azot və s.) element tərkibinə uyğun xarakterik olan qamma kvantlar yaradır.

Obyektdən gələn qamma-şüalanmanın energetik spektri (və ya siqnalın amplitud paylanması) 100-ə yaxın matris MSFD-nin istifadə olunduğu koordinat-həssas SD vasitəsilə ölçülür. Yanlış (yaxud fon)

halların azaldılması üçün qamma-siqnalın MSFD-dən qəbulunun çox qısa (~20ns) zaman intervalı istifadə edilir. Bu zaman intervalı “start-impuls” verən digər detektor tərəfindən alfa-hissəciklərin qeydiyyatı anından sonra dərhal başlayır. Yəni, əgər alfa-hissəcik qeydə alınmışsa (“start-impuls”), bundan 20ns sonra ssintilyasiya MSFD detektorundan siqnal qəbul edilir (tədqiq edilir) (“stop-siqnal”). Bu proses dəfələrlə, məsələn, 10 min dəfəyə qədər təkrar edilir. Ssintilyasiya MSFD detektorundan alınan bütün verilənlər kompüterin yaddaşına yazılır. Yükün yoxlanması 30 saniyədən bir dəqiqəyə qədər zaman tələb edir. Bu informasiya obyektin üçölçülü təsvirini qurmağa və onun element tərkibini müəyyən etməyə imkan verir. Əşyanın element tərkibini, onun kütləsini və həcmi bilməklə, gizli partlayıcı maddələri müəyyən etmək olar. Məlum partlayıcı maddələrin qamma-şüa ilə şüalandırılması zamanı alınan energetik spektrlər – xüsusi şablonlar mövcuddur. Bu iş kompüter tərəfindən xüsusi proqram üzrə yerinə yetirilir.



Şəkil 11. Partlayıcı maddələrin və radioaktiv materialların aşkarlanma qurğusunun funksional sxemi: 1 – deytronlar sürətləndiricisi, 2 – deytronlar seli, 3 – tritiumdan (TiT₂) hazırlanmış lövhə-hədəf, 4 – neytronlar seli, 5 – alfa-zərrəciklər seli, 6 – alfa-zərrəciklər detektoru, 7 – yoxlanılan yük (obyekt), 8 – MSFD əsasında koordinat-həssas SD, 9 – verilənlərin emalı və saxlanması üçün kompüter.

Altıncı fəsil 6 paragrafdan ibarətdir və informasiyanın akustooptik emalı sistemlərində MSFD-nin tətbiqi və sınaqlarına həsr edilmişdir. Qeyd edilmişdir ki, bir-çox radiotexniki məsələlərin həlli kontekstində akustooptik effekt yüksək potensial imkanlara malikdir. Akustooptik effektin xüsusiyyətlərindən siqnalların zaman təhriflərinin kompensasiyası, onların zaman miqyasının dəyişdirilməsi, aşağı və yüksək tezlikli siqnalların zaman oxu üzərində emalı və bir sıra digər məsələlərin həlli üçün geniş tətbiq olunur.

İstənilən akustooptik prosessorun əsas tərkib hissələrindən biri (FQ) qurğudur. Ədədi analizin və eksperimental tədqiqatların nəticələrinə əsaslanaraq ilkin yaxınlaşmada akustooptik prosessorun zaman sabitinin iki həddin cəmi kimi formalaşdığını qəbul etmək olar. Bunlardan birincisi elastik dalğanın optik şüaya daxil olma vaxtı, ikincisi isə - fotodetektorun zaman sabitidir. Emalı mümkün olan informasiyanın maksimal tezliyi prosessorun zaman sabitinin əks qiyməti ilə müəyyən olunur. Aydınır ki, tezlik zolağının genişləndirilməsi üçün zaman sabitinin azaldılması zəruridir.

Müasir akustooptik prosessorlarda kiçik zaman sabitinə malik fotodetektor kimi FEV geniş tətbiq olunur. Bu qurğuların əsas mənfi cəhəti yüksək qıda gərginliyinin (1200-1500V) tətbiqinin zəruriliyidir. Beləliklə kiçik qıda gərginliyinə və kiçik zaman sabitinə malik fotodetektorların akustooptik prosessorlarda tətbiqi imkanlarının araşdırılması və uyğun tövsiyələrin işlənməsi yüksək aktualıq kəsb edir. Problemin həlli kontekstində MSFD-lər yüksək əhəmiyyət kəsb edir.

İşdə lazer-akustik ləngitmə xətlərinin (LALX) tətbiq sahələri və xüsusiyyətlərinə baxılmışdır. Göstərilmişdir ki, LALX-da siqnalların idarə olunan ləngidilməsi üçün elastik dalğaların lazer işığı dəsti ilə qarşılıqlı təsirindən istifadə edilir.

İşdə həmçinin siqnalların universal akustooptik zaman miqyasının çeviricisi, eninə-impuls modulyatoru, akustooptik razılaşıdırılmış süzgəc işlənməmiş, qurğuların struktur-elektrik sxemləri tərtib edilmiş, eksperimental tədqiqatları aparılmışdır.

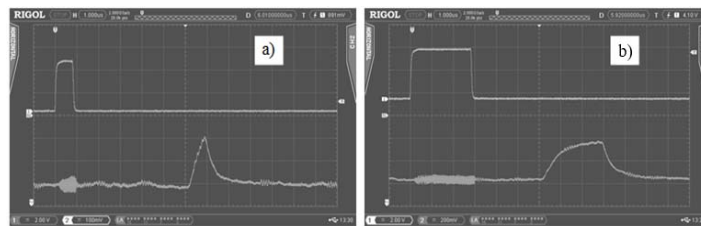
Siqnalların zaman təhriflərinin korreksiyasının akustooptik üsulu və onu reallaşdıran qurğuya baxılmışdır. İşdə emal olunan siqnala daxil edilən təhriflərin azaldılması məqsədilə zaman təhriflərinin geniş korreksiya diapazonuna, kiçik enerji sərfinə, yüksək cəldliyə malik akustooptik korreksiya qurğusunun yaradılması məsələsinə baxılmışdır.

Səsötürücünün işıqsəsötürücü ilə əvəz edilməsi yolu ilə ləngidilmiş siqnalın optik şüa ilə çıxarılması ilə siqnalların səlis idarə edilən ləngidilməsinə nail olurlar. Belə qurğu akustooptik ləngitmə xətti (AOLX) adlanır. Bu qurğularda (şəkil 12) elektrik siqnalı elektroakustik çeviricidə (EAÇ) elastik rəqslərinə çevrilir ki, bu rəqslər fotoelastik mühitdə (FEM) akustik uducu (AU) istiqamətində yayılır və giriş çeviricidən müəyyən dəyişkən məsafədə elastik-optik rabitə vasitəsilə çıxarılır. Radiotezlikli siqnal FEM-in bir ucunda ultrasəslərə çevrilir və elastik-optik əlaqə vasitəsilə giriş EAÇ-dan müəyyən dəyişkən məsafədə çıxarılır. EAÇ, FEM və akustik uducudan ibarət olan yuva akustooptik modulyator (AOM)

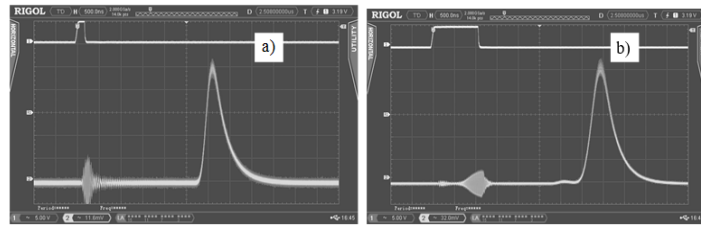
edilə bilər. Tərəfimizdən AOLX-un eksperimental tədqiqatlarında fotodiodlar və FEV tətbiq edilmişdir.

Göstərilmişdir ki, FEV üzərində olan FQQ yaxşı nəticələr təmin edir. Lakin FEV üzərində olan FQQ-yə əvvəldə qeyd edilən bir sıra çatışmazlıqlar xasdır ki, onlardan əsas olanı 1200-1500 V gərginlikli yüksək voltlu qida mənbəyinin tətbiq edilməsi zərurətidir. Aydındır ki, parametrləri FEV-in parametrlərinə yaxın olan fotodetektorun olması yüksək istismar-texniki xarakteristikalarına malik kiçik ölçülü AOLX-un işlənməsi üçün yaxşı stimula ola bilər. Belə potensial imkanlara selvari fotodiodlar matrisi - MSFD malikdir.

İşdə MAPD 3N tipli MSFD üzərində FQQ-nin işlənməsi və sınaqlarına baxılmışdır. ФЭУ-114 və MAPD 3N üzərində qurulan FQ birbaşa detektorlamaya malik AOLX-un maketində tədqiq olunmuş, giriş impulsunun müxtəlif müddətləri üçün AOLX-un giriş və çıxış impulslarının osilloqramları çıxarılmışdır. FQ-nin ФЭУ-114 və MAPD 3N üzərində qurulması hallarında ölçmə nəticələrinin bir-birinə yaxın olduğu müəyyən edilmişdir (şəkil 13 və şəkil 14).



Şəkil 13. ФЭУ-114 üzərində olan FQ-nin çıxışında gərginliklərin osilloqramları:
a) 1mks; b) 3 mks.



Şəkil 14. MAPD 3N üzərində olan FQ-nin çıxışında gərginliklərin osilloqramları:
a) 200 ns; b) 1 mks.

Şəkil 13,*a,b* və şəkil 14,*a,b*-də verilənlərdən asanlıqla FQ-nin ФЭУ-114 və MAPD 3N üzərində qurulması hallarında ölçmə nəticələrinin bir-birinə yaxın olduğu qənaətinə gəlmək olar.

Dissertasiya işində alınmış əsas nəticələr aşağıdakılardan ibarətdir:

1. Optik informasiyanın müasir emal sistemlərinin inkişafını məhdudlayan əsas səbəblərin istifadə edilən qəbuledicilərin həssaslığı və cəldliyi olduğu göstərilmiş, informasiyanın optik emalı sistemlərinin qənaətliliyinin və məhsuldarlığının yaxşılaşdırılması üçün bərkicimli foton sayğaclarının istifadə edilməsinin zəruriliyi əsaslandırılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, bunun üçün ən adekvat namizədlərdən biri Heyger rejimində işləyən çoxlaylı silisium selvari fotodiodlardır.
2. Aydınlaşdırılmışdır ki, selvari MRY strukturlarında fotocərəyanın güclənmə əmsalını məhdudlayan əsas səbəb çoxalmış yükdaşıyıcılarının yarımkeçirici-rezistiv təbəqə ayrılma sərhədi boyu axaraq yayılmasıdır. Müəyyən edilmişdir ki, fotocərəyanın yüksək güclənmə əmsallarının alınması üçün çoxalmış yükdaşıyıcılarının fotoqəbuledicinin bir oblastından digərinə axmasının qarşısını almaq lazımdır.
3. Qeyri-bircins yarımkeçirici altlıqlı selvari fotoqəbuledicilərin müstəqil piksellərinin fotoreaksiyasının amplitudunun məkan stabilləşməsinin mexanizminin tədqiqi ilə aydınlaşdırılmışdır ki, müəyyən xarakterik qida gərginliyindən sonra hər bir pikseldə fotocərəyanın amplitudunun artımı verilən gərginliyin artması ilə xeyli yavaşdır, yəni fotoreaksiyanın amplitudunun məkan kənaraxıxmaları azalır. Fotocərəyanın amplitudunun stabilləşmə səviyyəsi selvari prosesi söndürən mikrorezistorların müqavimətinin qiyməti ilə müəyyən edilir.
4. Həm adi rejimdə, həm də Heyger rejimində işləyən selvari fotodiodların deşilmə gərginliyini təyin etmək üçün stasionar VAX-ın xətti ekstrapolyasiyasına əsaslanan yeni metodika təklif olunmuşdur. Müəyyən edilmişdir ki, ardıcıl müqavimətdə gərginliyin düşməsinin nəzərə alındığı modifikasiya olunmuş Miller düsturu kifayət qədər dəqiqliklə mikropikselli selvari fotodetektorların əsas xarakteristikalarını təsvir edə bilər.
5. Mikropikselli selvari fotodetektorlarda birelektronlu fotoreaksiyanın formalaşmasının yarımkeçiricidə selvari oblastın ikilaylı xarakterinə əsaslanan yeni modeli təklif edilmişdir. Nəzəri olaraq təklif edilmiş və eksperimental olaraq təsdiqlənmişdir ki, Heyger boşalmasının tam yüklənməsi MSFD pikselinin tutumunun ikiqat qiyməti ilə müəyyən edilir.

6. İnformasiyanın çoxkanallı optik emalı sistemlərində tətbiq edilmək üçün selvari fotodiodların kompakt matrisinin hazırlanmasının yeni metodu təklif edilmiş və realizə olunmuşdur. İşlənmiş matrisin fərqli cəhəti ondan ibarətdir ki, matrisin elementləri (selvari fotodiodlar) bir-birindən tamamilə ayrılmışdır və üz və arxa elektrodlara malikdir. Üz elektrodlar bir-biri ilə birləşmişlər və ümumi elektrik kontaktına malikdirlər. Matrisin hər bir elementindən siqnalın fərdi qəbulu üçün selvari fotodiodların arxa elektrodları müstəqil elektrik çıxışlarına malikdir.
7. Mikropikselli selvari fotodetektorların köməyi ilə gizlədilmiş partlayıcı və radioaktiv materialların aşkar edilməsinin yeni metodu təklif edilmişdir. Silisium mikropikselli selvari fotodioddan və onunla optik birləşmiş BGO və LFS kristallik ssintilyatorlardan ibarət yüksək effektivliyə malik və nisbətən ucuz ssintilyatorlu radiasiya detektoru hazırlanmış və sınaqdan keçirilmişdir.
8. İnformasiyanın akustooptik emalı sistemlərində tətbiq edilmək üçün MAPD 3N tipli mikropikselli selvari fotodetektorun sınaqları aparılmış, ölçmə nəticələri MSFD-nin parametrlərinin ФЭУ-114 tipli fotoelektron vurucunun parametrləri ilə müqayisə olunduğunu təsdiqləmişdir.

Dissertasiya işinin əsas nəticələri aşağıdakı nəşrlərdə dərc edilmişdir:

Azərbaycan dilində

1. Abdullayev X.İ. Pozitron-emissiya tomoqrafları üçün kompakt ssintilyasiya detektoru // MAA-nın Elmi Əsərləri toplusu, Bakı 2016, №2, səh. 61-75.
2. Abdullayev X.İ., Muxtarov R.M. Mikropikselli selvari fotodiod əsasında təhlükəli əşyaların aşkaredici detektoru / "Gənclərin yaradıcı potensialı aviakosmik problemlərin həllində" I elmi-praktiki gənclər konfransının Materialları. Bakı, 29 fevral - 01 mart 2016-cı il, Milli Aviasiya Akademiyasının Poliqrafiya mərkəzi, səh. 77-80.
3. Abdullayev X.İ., İbrahimov R.Ə., Muxtarov R.M. Sadıqov A.Z. Ekoloji monitoring lidar sistemlərində mikropikselli selvari fotodiodların istifadəsi / Sənaye ilinə həsr olunmuş elmi-texniki konfransın materialları. Bakı, 15-16 dekabr 2014-cü il. AzTU-nun mətbəəsi, səh. 181÷184.
4. Paşayev A.M., Həsənov A.R., Abdullayev X.İ. Siqnalların zaman təhriflərinin korreksiyasının akustooptik üsulu və onu reallaşdıran qurğu (patent). İ 2005 0145.
5. Sadıqov Z.Y., Dövlətov A.A., Səfərov N.A., Mədətov R.S., Əhmədov F.İ., Abdullayev X.İ., Muxtarov R.M. Mikro-pikselli selvari fotodiodların bərpə olunma müddətinin öyrənilməsi // FİZİKA, March, 2012. Azerbaijan Journal of Physics, G.M. Abdullayev Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences, Volume XVIII, Number 1, Section: Az, p.10-11.
http://physics.gov.az/Dom/2012/v1/article/AJP_Fizika_01_2012_az.pdf

Rus dilində

6. Абдуллаев Х.И. Акустооптические преобразователи временного масштаба сигналов и их применение для обработки информации. Автореферат дис. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. по спец. 05.22.14-Системы и устройства радиотехники, радионавигации, радиолокации и телевидения. Типография АзТУ, 27.05.2004.
7. Абдуллаев Х.И. Графический метод определения напряжения пробоя лавинных фотодиодов // MAA-nın Elmi Əsərlər toplusu, Bakı 2014, №2, səh. 46-50.
8. Абдуллаев Х.И. Кремниевый детектор альфа частиц для применения в устройствах обнаружения взрывчатых веществ // MAA-nın Elmi Məcmuələri, Bakı 2013, cild 15, №4, səh. 122-126.
9. Абдуллаев Х.И. О возможности применения твердотельных фотоумножителей в нейтронно-каротажной аппаратуре / XII Всероссийская научная конференция молодых ученых, аспирантов и студентов "Информационные технологии, системный анализ и управление (ИТСАиУ-2014),

- посв. 100-летию университетского образования юга России. Сборник трудов. Ростов на Дону, Изд. Южного Федерального Университета, 2015, т. 4, с.199-204.
10. Абдуллаев Х.И. Способ определения темнового генерационного тока в лавинных микропиксельных фотодиодах // Наука, техника и образование, Москва, 2015, № 4 (10), стр. 90-92.
[http://scienceproblems.ru/images/PDF/%20Наука%20техника%20и%20образование%20\(10\).pdf](http://scienceproblems.ru/images/PDF/%20Наука%20техника%20и%20образование%20(10).pdf)
 11. Абдуллаев Х.И., Джафарова Е.А., Мухтаров Р.М., Садыгов З.Я., Султанов Ф.Н. Аналитическое описание формы фотоотклика в лавинных фотодиодах // МAA-nın Elmi Məcmuələri, Bakı 2014, cild 16, №1, səh. 20-23.
 12. Абдуллаев Х.И., Ахмедов Ф.И., Ахмедов Г.С. и др. Кремниевый детектор альфа частиц с низким темновым током // МAA-nın Elmi Məcmuələri, Bakı 2015, cild 17, №1, səh. 44-47.
 13. Абдуллаев Х.И., Байрамов Р.М., Ибрагимов Р.А. и др. Исследование возможностей создания ядерно-каротажного прибора на основе инновационных твердотельных фотоумножителей // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2014, cild 6, №3, səh. 106-112.
 14. Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М. Метод определения напряжения пробоя микропиксельных лавинных фотодиодов / Материалы 4-й Международной конференции «Инженерия сцинтиляционных материалов и радиационные технологии» (ИСМАРТ 2014). Минск, Белорусский Государственный Университет, 12-16 октября 2014 г. Стр. 13-14.
 15. Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М. Разработка и исследование резистивного слоя в лавинных МРП-фотоприемниках / “Müasir informasiya və telekommunikasiya texnologiyalarının inkişaf perspektivləri” Beynəlxalq elmi-texniki konfransının Materialları. Bakı, 22-24 sentyabr 2011-ci il. AzTU-nun Elmi Əsərləri. № 2, 2011. səh. 151÷156.
 16. Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М., Ахмедов Г.С., Ахмедов Ф.И., Садыгов А.З., Сулейманов С.С., Акперов Р.А. Методика сборки сцинтиляционного детектора гамма-излучения на основе микропиксельного лавинного фотодиода // МAA-nın Elmi Əsərlər toplusu, Bakı 2015, №1, səh. 29-36.
 17. Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М., Садыгов З.Я., Довлатов А.А., Сафаров Н.А., Ахмедов Ф.И., Мадатов Р.С. Исследование влияния альфа частиц с энергией 4,8 МэВ на физические свойства микропиксельных лавинных фотодиодов // МAA Elmi Məcmuələri, Bakı2012, cild 14, №1, səh.12-14.
 18. Гасанов А.Р., Аллахвердизаде Р.А., Абдуллаев Х.И. Искажения сигналов в акустооптических линиях задержки с прямым детектированием // Azərbaycan MEA-nın Xəbərləri, Fizika-riyaziyyat və texnika elmləri seriyası, 2005, №5, s. 225-229.
 19. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И. Акустооптический корректор временных

- искажений аналоговых сигналов // Радиотехника, Киев, 2004, т. 47, № 5, с. 73÷75.
20. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Байрамов Р.М., Эйнуллаев В.С., Рустамов А.Р. Быстродействующая акустооптическая линия задержки радиосигналов // Известия вузов. Радиотехника, Киев, 2010, т. 53, № 12, с. 51÷54.
 21. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Биннатов М.Ф., Абдурагимов К.Ф. Электронно-управляемая лазерно-акустическая линия задержки // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), Москва, 2006, №2, с. 67-69.
 22. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Гурбанов М.А., Дашдамирова Г.Э. Акустооптический согласованный фильтр с прямым детектированием / Sənayə ilinə həsr olunmuş elmi-texniki konfransın materialları. Bakı, 15-16 dekabr 2014-cü il. AzTU-nun mətbəəsi, s. 170÷175.
 23. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Джавадов Н.Г., Байрамов Р.М., Дашдамирова Г.Э. Акустооптический широтно-импульсный модулятор / Azərbaycan Texniki Universitetinin 60-illik yubileyinə həsr olunmuş "Təhsildə və elmdə innovasiya texnologiyaları" Respublika Elmi-Praktiki Konfransının Materialları. Bakı, AzTU, 2010, s.139-142.
 24. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Курбанов М.А. Использование особенностей фотоупругого эффекта для передачи звука / Международная научно-техническая конференция, посвященная 85-летию гражданской авиации России. Москва, 22-23 апреля 2008г.
 25. Гасанов А.Р., Гасанов Р.А., Абдуллаев Х.И. Переходная характеристика АОЛЗ / Труды 21-й МНТК «Современные телевидение и радиотехника», 19-20 марта 2013 г., Москва, Россия, с.198-202.
 26. Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Гасанов Р.А., Султанов Ф.Н., Тагиева Г.Г. Акустооптическая линия задержки для обработки широкополосных сигналов // Специальная техника, Москва, 2017, №2, с. 11-16.
 27. Гейдаров Н.Н., Садыгов А.З., Мадатов Р.С., Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М., Сулейманов С.С., Велиев Р.В. Новейшие детекторы гамма излучений для радиационного портального монитора / Материалы второй научно-практической молодежной конференции с международным участием «Творческий потенциал молодежи в решении авиакосмических проблем». Баку, 21-23 февраля 2017г., Национальная Академия Авиации, с.191-193.
 28. Пашаев А.М., Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М. О применимости формулы Миллера для определения параметров микропиксельных лавинных фотодиодов // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2016, cild 8, №3, səh. 7-13.
 29. Пашаев А.М., Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И. Акустооптический преобразователь временного масштаба видеосигналов //

- Радиоэлектроника, Киев, 2008, т.51, № 1, с. 75÷80.
30. Пашаев А.М., Гасанов А.Р., Абдуллаев Х.И., Гасанов Р.А., Байрамов Р.М. Акустооптический синтезатор имитационной помехи / Материалы седьмой международной НТК "Микроэлектронные преобразователи и приборы на их основе" МЭПП 27-29 ноября 2013, Баку-Сумгаит 2013, с. 186 - 190.
 31. Садыгов З., Абдуллаев Х., Анфимов Н., Ахмедов Ф., Мадатов Р., Мухтаров Р., Ольшевский А., Титов А. Микроканальный лавинный фотодиод с быстрым временем восстановления параметров. Письма в ЖТФ, 2013, том 39, вып. 11 с.7–12.
 32. Садыгов З.Я., Абдуллаев Х.И., Ахмедов Г.С., Ахмедов Ф.И., Бокова Т.Ю., Жежер В.Н., Мухтаров Р.М., Садыгов А.З., Сиделев А.В., Титов А.И. Физическая модель формирования одноэлектронного фотоотклика в микропиксельных лавинных фотодиодах / Материалы 4-й Международной конференции «Инженерия сцинтиляционных материалов и радиационные технологии» (ИСМАРТ 2014). Минск, Белорусский Государственный Университет, 12-16 октября 2014 г. Стр. 123.
 33. Садыгов З.Я., Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М. Модель работы кремниевых лавинных структур с неоднородной полупроводниковой подложкой // Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi məcmuələri, 2010, с.12, №2, s.32–35.

İngilis dilində

34. Abdullaev K.I. Development of new scintillation detectors matrix for the radiation colorimetry devices // Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, 2015, cild 7, №4, səh. 36-40.
35. Abdullayev X., Ahmadov F., Ahmadova G., Dovlatov A., Madatov R., Muxtarov R., Sadygov Z., Sadigov A., Safarov N. Micro-pixels avalanche photodiodes and applications / Radiasiya tədqiqatları və onların praktiki aspektləri. VII Konfrans. Bakı, 20-21 noyabr 2013, səh. 50.
36. Ahmadov F., Ahmadov G., Abdullaev X., Garibov A., Guliyev E., Khorev S., Madatov R., Muxtarov R., Naghiyev J., Sadigov A., Sadygov Z., Suleymanov S. and Zerrouk F. Development of compact radiation detectors based on MAPD photodiodes with Lutetium Fine Silicate and Stilbene scintillators // Journal of Instrumentation (JINST), 031P 0814, v.1, 10 february 2015. C02041.
37. Pashayev A.M., Hasanov A.R., Abdullayev Kh.I., Bayramov R.M., Rustamov A.R. Acousto-optic method of pulse-width modulation / ADNA-nın 90 illik yubileyinə həsr olunmuş "Neft-qaz, neft emalı və neft-kimya" beynəlxalq elmi konfransının materialları, Bakı, 2010, №5-6, (69-70), s. 278-280.
38. Pashayev A.M., Hasanov A.R., Abdullayev Kh.I., Bayramov R.M., Rustamov A.R. High-speed acousto-optic delay line // MAA-nın Elmi Məcmuələri, Bakı, 2009, cild 11, №4, s. 22-25.

39. Sadigov A., Suleymanov S., Ahmadov F., Ahmadov G., Abdullaev K., Akberov R., Heydarov N., Madatov R., Muxtarov R., Nazarov M., Valiyev R. A micropixel avalanche phototransistor for time of flight measurements // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. Available online 16 June 2016. Elsevier, Volume 845, 11 February 2017, Pages 621–622.
http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016890021630644.
40. Sadygov Z., Ahmadov F., Ahmadov G., Madatov R., Guliyev E., Anfimov N., Krumshstein Z., Olshevski A., Shvetsov V., Zhezher V., Abdullaev X. Development of scintillation detectors based on micropixel avalanche photodiodes / Proceedings, 3rd International Workshop on New Photon-detectors (PhotoDet 2012), LAL: Orsay, France, June 13-15, 2012.
pos.sissa.it, http://inspirehep.net/record/1240337
41. Sadygov Z., Abdullaev Kh., Akhmedov G., Akhmedov F., Mukhtarov R., Sadygov A., Titov A., Zhezher V. On possibilities of application of Miller düstura for determination of parameters of Micropixel Avalanche Photodiodes // E-preprint:
http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1404/1404.2108.pdf
42. Sadygov Z., Abdullaev Kh., Akhmedov G., Akhmedov F., Khorev S., Mukhtarov R., Sadigov A., Sidelev A., Titov A., Zerrouk F., Zhezher V. Model of single-electron performance of micropixel avalanche photo-diodes // MATHPUBS, Scientific Publication Data, October 2014. P.1-14.
http://www.mathpubs.com, https://arxiv.org/abs/1410.2619
43. Sadygov Z.Y., Ahmadov F.I., Anfimov N.V., Abdullaev X.I., Dovlatov A.A., Krumshstein Z.V., Madatov R.S., Molokanov A.G., Nozdrin A.A., Olshevski A.G., Safarov N.A., Shvetsov V.N. Performance of silicon micropixel avalanche photodiodes after irradiation by 150 MeV proton beam // FİZİKA, June, 2012. Azerbaijan Journal of Physics, G.M. Abdullayev Institute of Physics, Azerbaijan National Academy of Sciences, Department of Physical, Mathematical and Technical Sciences, Volume XVIII, Number 2, Section: En, p. 18-19.
http://physics.gov.az/Dom/2012/v2article/AJP_Fizika_02_2012_en.pdf
44. Sadygov Z.Y., Abdullaev X.I., Ahmadov F.I., Jafarova E.A., Dovlatov A.A., Madatov R.S., Muxtarov R.M., Sadygov A.Z., Safarov N.A. On futures of potential distribution in avalanche photodiodes with deeply buried pixels. - Fizika, v. XIX, No.2, 2013, p.17-19.
http://physics.gov.az/Dom/2013/AJP_Fizika_02_2013_en.pdf

**İNFORMASIYA EMALI SİSTEMLƏRİNDƏ SELVARI
FOTOQƏBULEDİCİLƏR**

Dissertasiyanın məqsədi informasiyanın optoelektron və akustooptik emalı sistemlərində tətbiqini təmin etmək üçün yeni bir-kanallı və matrisli selvari fotoqəbuledicilərin tədqiqi və işlənməsidir.

İnformasiyanın optik emalı sistemlərinin qənaətliliyinin və məhsuldarlığının yaxşılaşdırılması üçün bərkcisimli foton sayğaclarının istifadə edilməsinin zəruriliyi əsaslandırılmışdır. Müəyyən edilmişdir ki, bunun üçün ən adekvat namizədlərdən biri Heyger rejimində işləyən çoxlaylı silisium selvari fotodiodlardır.

İşin elmi yeniliyi ondan ibarətdir ki, burada yarımkəçirici altlığın lokal mikro-qeyri-bircinsliklərinin silisium selvari fotoqəbuledicilərin parametrlərinə təsirinin fiziki modeli təklif edilmiş; MSFD-lərin hədd parametrlərinin hesablanması üçün yeni fiziki model işlənmiş; partlayıcı və radioaktiv maddələrin optoelektron aşkarlanması qurğularında tətbiq edilmək üçün MSFD-lərdən ibarət kompakt matrisin hazırlanması üsulu təklif edilmiş; siqnalların akustooptik emalı sistemlərinin fotoqəbuledicilərində MSFD-nin tətbiqinin mümkünlüyü nəzəri və təcrübə olaraq əsaslandırılmışdır.

İşin praktiki əhəmiyyəti ondan ibarətdir ki, burada partlayıcı və radioaktiv maddələrin aşkarlanması qurğularında istifadə edilmək üçün MSFD əsasında yüksək həssaslığa malik detektor yaradılmışdır; ssintilyatorlu radiasiya detektorlarında istifadə edilmək üçün matrisli MSFD-nin yeni konstruksiyasının hazırlanma texnologiyası işlənmişdir; radiasiya kalorimetriya qurğuları üçün ssintilyatorlu detektorların yeni matrisi işlənmişdir; MSFD əsaslı birkanallı qamma-karotaj qurğusu işlənmiş və sınaqdan keçirilmişdir; pozitron-emissiya tomoqraflarında istifadə edilmək üçün yeni kompakt ssintilyatorlu detektor işlənmiş və sınaqdan keçirilmişdir; siqnalların akustooptik emalı sistemlərində MSFD tətbiq edilmiş və sınaqları aparılmışdır.

**ЛАВИННЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ В СИСТЕМАХ
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

Целью диссертации является исследование и разработка новых одноканальных и матричных лавинных фотоприемников для применения в оптоэлектронных и акустооптических системах обработки информации.

Обосновано необходимость использования твердотельных счетчиков фотонов для улучшения экономичности и производительности оптических систем обработки информации. Установлено, что одним из наиболее адекватных кандидатов для этого являются многослойные кремниевые лавинные фотодиоды, работающие в режиме Гейгеровского разряда.

Научная новизна работы заключается в том, что здесь предложена новая модель формирования одноэлектронного фотоотклика в микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД); предложена физическая модель влияния локальных микро-неоднородностей полупроводниковой подложки на параметры кремниевых лавинных фотоприемников; разработана новая физическая модель для расчета предельных параметров кремниевых МЛФД; предложен способ изготовления компактной матрицы из МЛФД для применения в оптоэлектронных устройствах обнаружения взрывчатых и радиоактивных веществ; теоретически и экспериментально обоснована возможность применения МЛФД в фотоприемниках акустооптических систем обработки сигналов.

Практическая ценность работы заключается в том, что в ней создан высокочувствительный детектор на базе МЛФД для применения в устройствах обнаружения взрывчатых и радиоактивных веществ; разработана технология изготовления новой конструкции матричного МЛФД для применения в сцинтилляционных детекторах радиации; разработана новая матрица сцинтилляционных детекторов для устройств радиационной колориметрии; разработано и проведено испытание одноканального гамма-каротажного устройства на основе МЛФД; разработан новый компактный сцинтилляционный детектор для применения в позитронно-эмиссионных томографах и проведено его испытание; осуществлено внедрение МЛФД в акустооптических системах обработки сигналов и проведено его испытания.

**AVALANCHE PHOTO RECEIVERS IN INFORMATION
PROCESSING SYSTEMS**

The aim of the thesis is to study and develop new single-channel and matrix avalanche photodetectors for using in optical, acousto-optic and optoelectronic information processing systems.

The necessity of using solid-state photon counters to improve the economy and productivity of optical information processing systems is substantiated. It was determined that one of the most adequate candidates for this is the multilayer silicon avalanche photodiodes that operated in the Heiger discharge mode.

The scientific novelty of the work is that has been proposed a new model for the formation of one-electron photoresponse in micro-pixel avalanche photodiodes (MAPD); has been proposed a physical model of the effect of local micro-inhomogeneities of a semiconductor substrate on the parameters of silicon avalanche photodetectors; has been developed a new physical model for calculating the limiting parameters of silicon MAPD; has been proposed method for manufacturing a compact matrix of MAPD for use in optoelectronic devices for detecting explosive and radioactive substances; theoretically and experimentally substantiated the possibility of using MAPD in photodetectors of acousto-optical signal processing systems.

The practical value of the work lies in the fact that it was created a highly sensitive detector based on MAPD for use in devices for detecting explosive and radioactive substances; developed technology for manufacturing a new design of a matrix MAPD for use in scintillation radiation detectors; developed a new matrix of scintillation detectors for radiation colorimetry devices; developed and tested a single-channel gamma-ray logging device based on MAPD; has been developed and tested a new compact scintillation detector for use in positron emission tomographs; MAPD is implemented in acousto-optic signal processing systems and tested.

Çapa imzalanıb 21.12.2017-cı il.
Tiraj - 100 nüsxə. Format 60x84 1/16

“Azərbaycan Hava Yolları” QSC-nin
Milli Aviasiya Akademiyasının
Poliqrafiya Mərkəzində çap edilib

На правах рукописи

АБДУЛЛАЕВ ХАГАНИ ИМРАН оглу

**ЛАВИННЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ В СИСТЕМАХ
ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора наук по технике

по специальностям:

3361.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника;

3311.02 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий

БАКУ - 2017