

**ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«АЗЕРБАЙДЖАН ХАВА ЙОЛЛАРЫ»
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ АВИАЦИИ**

На правах рукописи

МУХТАРОВ РАМИЛЬ МАМЕД ОГЛУ

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ РАДИОАКТИВНЫХ И
ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора философии по технике

Баку – 2013

Работа выполнена в Национальной Академии Авиации Азербайджана.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник

З.Я.Садыгов

доктор философии по технике, доцент

Х.И.Абдуллаев

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор

А.З.Бадалов

доктор философии по технике,
доцент

Р.М.Рагимов

Ведущая организация:

Производственное Объединение «Промавтоматика»

Защита состоится «27__» _09_ 2013 г. в ____ часов на заседании
диссертационного совета В/Д 06.001 при Национальной Академии
Авиации по адресу AZ1045, г. Баку, Бина 25-й км, НАА.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НАА.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета В/Д 06.001
доктор философии по технике, доцент

С.Б.Габидуллаев

**«AZƏRBAYCAN HAVA YOLLARI»
QAPALI SƏHMDAR CƏMİYYƏTİ
MİLLİ AVIASİYA AKADEMİYASI**

Əlyazma hüququnda

RAMİL MƏMMƏD OĞLU MUXTAROV

**RADİOAKTİV VƏ PARTLAYICI MADDƏLƏRİN
YARIMKEÇİRİCİ DETEKTORLARI**

3311.02 – Təbii mühitə, maddələrə, materiallara və məmulatlara nəzarət
cihazları və üsulları

Texnika üzrə fəlsəfə doktoru elmi dərəcəsi
almaq üçün təqdim edilmiş dissertasiyanın

AVTOREFERATI

Bakı – 2013

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Глобализация экономики, террористическая и криминальная обстановка в мире вынуждает соответствующие государственные структуры принимать адекватные меры по обеспечению безопасности в аэропортах, на вокзалах и в других стратегических объектах страны. Особое внимание уделяется поиску незаконного перемещения взрывчатых веществ (ВВ) и радиоактивных материалов (РМ). Для решения этих задач используются различные досмотровые системы, такие как металлоискатели, устройства радиационного контроля, рентгеновские системы досмотра багажа пассажиров и другие. Известно множество методов обнаружения ВВ и РМ; от применения специально дрессированных животных, реагирующих на запах взрывчатых веществ до использования ядерно-физических эффектов. Однако не всегда удается обнаружить скрытые ВВ и РМ. Это связано с двумя основными причинами:

- в связи с ростом потока товаров, проходящих через контрольно-пропускные пункты, досмотровые системы обнаружения не всегда успевают надежно проверить состав грузов из-за их недостаточного быстродействия и чувствительности;
- перевозчики все время совершенствуют способы сокрытия и упаковки опасных незаконных грузов, которые трудно обнаруживать существующими приборами контроля.

Ключевым элементом всех технических средств обнаружения скрытых ВВ и РМ является детектор ядерных частиц. Рабочие параметры, такие как чувствительность, избирательность и быстродействие детектора определяют эффективность работы устройства обнаружения. Проведенный анализ современной научной литературы показывает, что сцинтилляционный детектор является наиболее эффективным прибором для обнаружения незаконной перевозки ВВ и РМ. Однако в подавляющем большинстве сцинтилляционных детекторов все еще используются крупногабаритные и достаточно дорогостоящие стеклянно-вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ), изобретенные в 30-х годах прошлого века. Низкий квантовый выход (~25%) фотокатода, высокое рабочее напряжение (~1500В) и чувствительность к магнитным полям также являются существенными недостатками

“Azərbaycan Hava Yolları”
Qapalı Səhmdar Cəmiyyəti
Milli Aviasiya Akademiyasının
Poliqrafiya Mərkəzində çap olunmuşdur.

SUMMARY

Semiconductor detectors of radioactive and explosive materials

The current international situation in the world and the political situation around the Republic of Azerbaijan require a reliable security of the state and its citizens. Particular attention is paid to search for illegal transportation of explosives and radioactive materials (RM) at airports, railway stations and other strategic sites. Different inspection systems such as metal detectors, radiation monitoring devices, X-ray systems for screening passenger luggage and others are used to solve these problems. However, it is not always possible to detect hidden explosives and RM.

Main element of all technical means for detecting the hidden explosives and RM is a detector of nuclear particles. The analysis of current scientific literature shows that the scintillation detector is the most effective instrument in this field. However, the vast majority of scintillation detectors still use large and rather expensive glass-vacuum photomultiplier tubes (PMT), invented in the 30's of the last century. Low quantum yield of photocathode (25%) and high voltage (~1500V) are also disadvantages PMT.

New methods of detection illegal transportation of RM and explosives on the basis of innovative semiconductor avalanche photodetectors with a metal-dielectric-semiconductor (MDS), metal-resistive layer-semiconductor (MRS) and micropixel structure have been investigated in this dissertation. For the first time, the service life of avalanche MDS structures has been experimentally examined

The possibility to create highly sensitive radiation detectors based on micro-pixel avalanche photodiodes (MLPD) has been offered and experimentally justified. A new construction has been suggested and technology has been developed to manufacture matrix MLPD for using in scintillator radiation detectors.

ФЭУ. Кроме того, при построении многоканальных систем регистрации, цена детектора становится важнейшим фактором, которая в случае ФЭУ достаточно высока.

Поэтому разработка новых способов обнаружения скрытых ВВ и РМ, основанных на использовании инновационных полупроводниковых аналогов ФЭУ является актуальной задачей. В настоящее время наиболее адекватными аналогами считаются лавинные фотоприемники, основанные на кремниевых МДП (металл-диэлектрик-полупроводник), МРП (металл-резистивный слой-полупроводник) и микропиксельных структурах.

Цель работы. Целью является разработка новых методов обнаружения незаконной транспортировки радиоактивных материалов и взрывчатых веществ на основе инновационных полупроводниковых лавинных фотоприемников, имеющих МДП, МРП и микропиксельные структуры. Реализация поставленных целей осуществлялась последовательным решением следующих основных задач:

- Исследование особенностей лавинного умножения носителей заряда в кремниевых МДП и МРП структурах с неоднородной полупроводниковой подложкой.
- Особенности формирования фотоотклика в лавинных МДП, МРП и микропиксельных структурах.
- Разработка методов обнаружения скрытых ВВ и РМ на базе кремниевых лавинных фотоприемников.
- Разработка матричного фотоприемника на основе кремниевых лавинных фотоприемников для применения в сцинтилляционных детекторах радиации.

Научная новизна работы обеспечивается тем, что в ней впервые предложена физическая модель влияния локальных микронеоднородностей в полупроводниковой подложке на параметры лавинных фотоприемников, изготовленных на основе кремниевых МДП, МРП и микропиксельных структур. Показано, что растекание умноженных носителей заряда вдоль поверхности лавинных структур является основной причиной пространственной неоднородности коэффициента усиления приборов. Впервые предложен способ изготовления компактной матрицы из микропиксельных лавинных фотодиодов для применения в устройствах обнаружения взрывчатых веществ.

Практическая ценность работы обеспечивается тем, что в ней впервые предложена и экспериментально обоснована возможность создания высокочувствительного детектора на базе микропиксельных лавинных фотодиодов (МЛФД) для применения в устройствах обнаружения ВВ и РМ. Предложена новая конструкция и разработана технология изготовления матричного МЛФД для применения в сцинтилляционных детекторах радиации.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Механизм формирования фотоотклика в лавинном МДП фотоприемнике, основанный на предположениях бесконечно тонкой толщины области умножения и малых синусоидальных возмущений.
2. Влияния растекания заряда вдоль поверхности полупроводника на пространственную однородность лавинного процесса в кремниевых МДП и МРП фотоприемниках.
3. Физический механизм стабилизации усиления фотоэлектронов в МРП и МЛФД фотоприемниках.
4. Метод обнаружения скрытых ВВ и РМ с применением кремниевых МЛФД.
5. Координатно-чувствительный фотоприемник на основе кремниевых МЛФД для применения в сцинтилляционных детекторах радиации.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях и симпозиумах:

- Международная конференция “Радиация и окружающая среда”, 1-2 июня 2010 года, Институт Радиационных Проблем НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан;
- Международная конференция “Физика-2010”, 30 июня – 02 июля 2010 года, Институт физики НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан;
- Вторая международная конференция “Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии”, 14-19 ноября 2010 года, Харьков, Украина;
- Международный симпозиум по Снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций и информированию партнеров о принципах Хйого, Азербайджанский Архитектурно-Строительный Университет, 25-26 ноября 2010 года, Баку, Азербайджан;

XÜLASƏ

Radioaktiv və partlayıcı maddələrin yarımkəçirici detektorları

Dünyanın qloballaşma dövrü, terrorçu və cinayət təhdidləri müvafiq dövlət qurumlarından aeroportlarda, vağzalarda, limanlarda və digər strateji obyektlərdə təhlükəsizliyin təmin edilməsi üzrə tədbirlərin həyata keçirilməsini tələb edir. Bu sahədə xüsusi diqqət partlayıcı və radioaktiv maddələrin qanunsuz daşınmasının aşkar edilməsinə yönəlmişdir. Bu məsələlərin həlli üçün metalaxtaranlar, radiasiya nəzarəti qurğuları, yüklərə və sərnişin baqajına rentgen baxış sistemləri və digər avadanlıqlardan istifadə olunur. Lakin hər zaman partlayıcı vasitə və radioaktiv maddələri aşkar etmək mümkün olmur.

Partlayıcı və radioaktiv maddələrin aşkar edilməsi üçün nəzərdə tutulan bütün texniki vasitələrin əsas elementi nüvə hissəciklərinin detektorudur. Aparılan təcrübələr ssintilyatorlu detektorların bu sahədə ən münasib qurğu olduğunu göstərmişdir. Lakin ssintilyatorlu detektorların böyük hissəsində iri, kifayət qədər bahalı, fotokatodunun kvant çıxışı aşağı olan (~25%) yüksək işçi gərginlik tələb edən və keçən əsrin 30-cu illərində kəşf olunan şüşə-vakuumlu fotoelektron vurucularından istifadə olunur.

Dissertasiyada fotoelektron vurucuların analoqları hesab olunan selvari metal-dielektrik təbəqə-yarımkəçirici (MDY) strukturlar, selvari metal-rezistiv təbəqə-yarımkəçirici (MRY) strukturlar və mikropikselli selvari fotodiodlar (MSFD) kimi fotoqəbuledicilər əsasında partlayıcı və radioaktiv maddələrin aşkar olunmasının yeni metodları tədqiq edilmişdir. İlk dəfə olaraq selvari MDY, MRY və MSFD strukturların iş parametrləri nəzəri yolla tədqiq olunmuşdur. Göstərilmişdir ki, bu qurğularda özü kəsilən selvari proses fərdi potensial çuxurlarında toplanan elektronların elektrik sahəsi tərəfindən təmin olunur. Tədqiq olunmuş üç müxtəlif strukturun iş parametrlərinin müqayisəsi göstərir ki, MSFD strukturlar praktiki istifadə üçün daha yararlıdır.

Bu işdə ilk dəfə olaraq MSFD əsasında yüksək həssaslığa malik radiasiya detektorlarının yaradılması mümkünliyü təklif edilmiş və təcrübi əsaslanmışdır. Ssintilyatorlu radiasiya detektorlarında tətbiq edilmək üçün matrisli MSFD-nin yeni konstruksiyası təklif edilmişdir.

материалов и радиационные технологии», Харьков, 14-19 ноября, 2010, стр. 52.

9. Мухтаров Р.М. Методы обнаружения ионизирующих излучений // Fövqəladə hallar riskinin azaldılması və Nyuqo prinsipləri barədə tərəfdaşların məlumatlandırılması mövzusunda Beynəlxalq Simpozium, Bakı, Azərbaycan Memarlıq və İnşaat Universiteti, 25-26 noyabr 2010, səh. 167-170.

10. Мухтаров Р.М. Исследование стационарного лавинного процесса в МПП-структуре // Milli Aviasiya Akademiyasının Elmi Əsərləri, Bakı, 2010, №2, səh.145-151.

11. Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М. Разработка и исследование резистивного слоя в лавинных МПП-фотоприемниках // “Müasir informasiya və telekommunikasiya texnologiyalarının inkişaf perspektivləri” Beynəlxalq elmi-texniki konfransının Materialları. Bakı, 22-24 sentyabr 2011-ci il. Azərbaycan Texniki Universitetinin Elmi Əsərləri, № 2, 2011. səh. 151-156.

- Международная научно-техническая конференция «Перспективы развития современных информационных и коммуникационных технологий», Азербайджанский Технический Университет, 22-24 сентября 2011 года, Баку, Азербайджан;

- Международная Конференция «Инженерия Сцинтилляционных Материалов и Радиационные Технологии», 19-23 ноября, 2012, Дубна, Россия.

Публикации. По результатам диссертации опубликованы 11 работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, выводов и списка использованной литературы. Диссертация изложена на 105 печатных страницах и 29-х рисунках. Общий объем работы составляет 136 страницы.

Во введении обоснована актуальность исследуемой проблемы, описано ее состояние, сформулированы цель и задачи, изложены научная новизна работы, основные защищаемые положения, практическая ценность полученных результатов, апробация и структура диссертации.

В первой главе, состоящей из 4-х параграфов, приведен обзор работ, посвященных анализу методов обнаружения незаконной перевозки опасных грузов в аэропортах и на вокзалах. Рассмотрены опасные грузы и правила их перевозки, источники радиации и их основные свойства, методы обнаружения взрывчатых и радиоактивных веществ. Детально анализированы недостатки и преимущества современных детекторов радиации. Установлены наиболее перспективные детекторы, с помощью которых решены задачи диссертационной работы.

В настоящее время основными методами для обнаружения и измерения ионизирующих излучений являются фотографический, химический, ионизационный и сцинтилляционный методы. Первые два метода используются достаточно редко из-за малой скорости обнаружения. Ионизационный метод малоэффективен при малых дозах радиации, дошедшей до детектора, т.е. он неэффективен для обнаружения радиации с большого расстояния. Четвертый метод (сцинтилляционный) не имеет таких недостатков.

Сцинтилляционный метод основывается на регистрации вспышки света, возникающей при попадании заряженной частицы в жидкую или твердотельную среду – сцинтиллятор, обладающий

способностью люминесцировать. Испускаемый световой импульс обычно регистрируют с помощью ФЭУ.

В течение последних лет исследователи всего мира пытались создать полупроводниковый аналог ФЭУ на базе полупроводниковых лавинных структур. В качестве первой альтернативы ФЭУ предлагались лавинная МДП структура на основе системы кремний-двуокись кремния (Si-SiO_2). Второй альтернативой является лавинная МРП структура. Здесь в качестве резистивного слоя обычно используют слои карбида кремния (SiC) или гидрогенизированного аморфного кремния (Si:H), нанесенные на подложку из кристаллического кремния толщиной 0,5мм. Эти структуры отличаются от известной МДП-структуры тем, что в них диэлектрический слой заменен проводящим резистивным слоем. Третьей альтернативой ФЭУ являются микропиксельные лавинные фотодиоды (МЛФД). В последние годы, достигнут значительный успех в разработке новых МЛФД. В настоящее время изготовлены и испытаны экспериментальные образцы таких приборов, способных регистрировать единичные световые кванты при комнатной температуре. Коэффициент усиления МЛФД достигает величины 10^5 – 10^6 при эффективности детектирования фотонов 20–40%, что значительно превышает параметры традиционных вакуумных ФЭУ.

Вторая глава, состоящая из 4-х параграфов, посвящена исследованию процесса лавинного усиления фототока в кремниевой МДП структуре. Относительно простая технология изготовления лавинных МДП структур является преимуществом этих приборов. Однако, из-за наличия диэлектрического слоя эти приборы могут работать только в режиме импульсного питания.

Лавинный МДП фотоприемник изготавливается в виде плоскопараллельного конденсатора и обычно, имеет структуру кремний-двуокись кремния-полупрозрачный металлический электрод из никеля ($\text{Si-SiO}_2\text{-Ni}$). Для изготовления таких структур используют кремниевые подложки р-типа проводимости с удельным сопротивлением 1 Ом·см. Диэлектрический слой из SiO_2 толщиной около 100 нм получают термическим окислением подложки при температуре 1000°C. При подаче положительного импульсного напряжения на полупрозрачный электрод, поверхность кремния на границе раздела Si-SiO_2 обедняется от основных носителей заряда (т.е. от свободных дырок). На практике удобно использовать линейно

координатно-чувствительных сцинтилляционных детекторах радиации. Отличительной чертой разработанной матрицы является то, что элементы матрицы (лавинные фотодиоды) полностью отделены друг от друга и имеют лицевой электрод и задний электрод. Лицевые электроды соединены друг с другом и имеют общий электрический контакт. Задние электроды лавинных фотодиодов имеют независимые электрические выходы для индивидуального приема сигнала с каждого элемента матрицы.

Основные содержание диссертации опубликованы в работах

1. Sadygov Z., Zerrouk F., Ariffin A., Muxtarov R. et. al. Spatial distribution of photo-sensitivity in new micro-pixel avalanche photodiodes: Assembly of 64-element arrays // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., 2009, A 610, p.390–392.
2. Sadygov Z., Zerrouk F., Muxtarov R. et. al. Performance of a new micro-pixel avalanche photo diodes from Zecotek Photonics // Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res., 2009, A 610, p.381–383.
3. Садыгов З.Я., Ольшевский А.Г., Мухтаров Р.М. и др. Микроканальный лавинный фотодиод с широким диапазоном линейности // Письма в ЖТФ, 2010, т.36, вып.11, с.83–89.
4. Мухтаров Р.М. Кинетика формирования импульсного фототока в лавинной МРП-структуре // Sumqayıt Dövlət Universiteti, Elmi xəbərlər, 2010, c.10, №2, səh.12-14.
5. Садыгов З.Я., Абдуллаев Х.И., Мухтаров Р.М. Модель работы кремниевых лавинных структур с неоднородной полупроводниковой подложкой // Azərbaycan Milli Aviasiya Akademiyası, Elmi məcmuələr, 2010, c.12, №2, s.32-35.
6. Dövlətov Ə.A., Sadiqov Z.Y., Muxtarov R.M. Yeni mikropikselli selvari radiasiya detektoru / “Radiasiya və ətraf mühit” Respublika Konfransı, AMEA Radiasiya Problemləri İnstitutu, 1-2 iyun, 2010, Bakı, səh. 46-47.
7. Sadygov Z., Dovlatov A., Safarov N., Muxtarov R. A new avalanche photodiode with wide linearity range // Azerbaijan Journal of Physics, Volume XVI, Number 2, Series: En, Baku, June 2010, p. 367-369.
8. Садыгов З., Ольшевский А., Анфимов Н., Мухтаров Р. и др. Мультипиксельные лавинные фотодиоды: конструкции и параметры Международная конференция «Инженерия сцинтилляционных

5 – Поток альфа частиц, 6 – Детектор альфа частиц, 7 – Проверяемый груз (объект), 8 – Координатно-чувствительный сцинтилляционный детектор на базе МЛФД, 9 – Компьютер для обработки и хранения данных

Основные результаты и выводы

Научные результаты, полученные в диссертации, заключаются в следующем:

1. Выяснено, что форма фотоотклика в МДП и МРП фотоприемниках не повторяет форму падающих на них световых импульсов. Это приводит к нелинейности амплитуды фототока при увеличении мощности принимаемого светового импульса. Поэтому использование МДП и МРП фотоприемников в аналоговых фотоприемных устройствах, в том числе в детекторах идентификации радиоактивных источников крайне затруднено.

2. Показано, что основной причиной ограничения коэффициента усиления в кремниевых МДП и МРП структурах является растекание умноженных носителей заряда вдоль поверхности полупроводника. Установлено, что для получения высоких коэффициентов усиления фототока следует локализовать области лавинного умножения, т.е. предотвратить растекание умноженных носителей заряда из одной области в другую область фотоприемника.

3. Исследован физический механизм стабилизации фотоотклика независимых пикселей в лавинных фотоприемниках на слабые световые потоки, в том числе на единичные фотоэлектроны. Выяснено, что после некоторого характерного напряжения питания в каждом пикселе рост амплитуды фототока значительно замедляется с ростом приложенного напряжения, т.е. амплитуда лавинного тока в микропикселях стабилизируется. Уровень стабилизации определяется величиной сопротивления гасящей лавину микрорезисторов.

4. Впервые предложен новый метод обнаружения скрытых взрывчатых и радиоактивных материалов с помощью микропиксельных лавинных детекторов. Изготовлен и испытан высокоэффективный и дешевый сцинтилляционный детектор радиации, состоящий из кремниевого микропиксельного лавинного фотодиода, оптически соединенного с кристаллическим сцинтиллятором LFS.

5. Впервые предложен и реализован новый метод изготовления компактных матриц лавинных фотодиодов для применения в

нарастающее или трапецеидальное импульсное напряжение длительностью около 500 мкс. Приложенное импульсное напряжение распределяется между полупроводником и диэлектриком МДП структуры. После достижения некоторого порогового потенциала в полупроводнике достигается высокое электрическое поле, и в результате этого в структуре начинается лавинное умножение носителей заряда. Неосновные носители заряда (в данном случае электроны) после умножения в полупроводнике МДП структуры накапливаются на границе полупроводник-диэлектрик и уменьшают электрическое поле в лавинной области полупроводника. В результате этого лавинный процесс гасится в течение 10-50 нс после начала усиления фототока. Особенность лавинной МДП структуры заключается в том, что после каждого импульса питания требуется определенное время, обычно около 100 мкс или больше, для того, чтобы созданные лавиной носители заряда (электроны и дырки) рекомбинировали между собой, т.е. интервал между импульсами питания должен быть больше 100 мкс.

Механизм усиления импульсного фототока в лавинной МДП-структуре исследовался с помощью решения системы уравнений, описывающей электронные процессы в полупроводнике. В систему уравнений входят уравнение непрерывности для электронов и дырок, уравнение Пуассона для распределения электрического потенциала и известная формула Миллера, связывающая коэффициент умножения лавинного процесса с напряжением, падающим в полупроводнике структуры. Лавинный процесс исследовался при синусоидально модулированном световом сигнале.

Система уравнений решалась численным методом на компьютере. Показано, что форма фотоотклика в лавинной МДП структуре не повторяет форму падающих на них световых импульсов. Это приводит к нелинейности амплитуды фототока при увеличении мощности принимаемого светового импульса. Амплитуда (I_m) фототока при этом определяется емкостями диэлектрика (C_d) и обедненной области МДП структуры, скоростью роста (K) питающего напряжения и частоты модуляции (C) регистрируемого света (см. Рис. 1).

Однако существуют еще две проблемы, ограничивающие возможность практического применения МДП структур в режиме лавинного умножения носителей заряда. Первая проблема связана с дрейфом величины рабочего напряжения, вызванным зарядкой окисла

структуры при лавинном умножении носителей заряда на границе Si-SiO₂. Вторая проблема вызвана необходимостью наличия определенного времени для полной рекомбинации неосновных носителей заряда после каждого импульса питания.

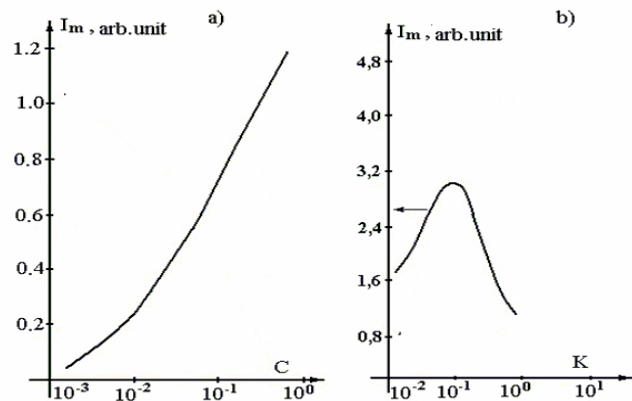


Рис. 1. Зависимость амплитуды (I_m) фотоотклика лавинной МДП-структуры от частоты модуляции света (а) и скорости роста импульса питания (б)

Таким образом, исследования показали, что использование лавинной МДП структуры представляет большую трудность. Особенно, импульсный режим работы МДП структуры значительно затрудняет ее применение в устройствах по обнаружению радиационных веществ.

Третья глава, состоящая из 4-х параграфов, посвящена исследованию особенностей лавинного усиления фототока в кремниевой МРП структуре. Благодаря достаточной проводимости резистивного слоя МРП структура работает при постоянном питающем напряжении. Стабильность рабочих характеристик МРП структуры определяется не свойствами границы раздела гетероперехода, как в МДП структуре, а свойствами объема резистивного слоя, в том числе величиной его проводимости.

В МРП структуре достигается однородный лавинный процесс по всей рабочей площади, обеспечиваемый выбором величины проводимости резистивного слоя, ограничивающего величину лавинного тока. Однако это приводит к падению коэффициента

обеспечивают индивидуальный съем сигнала с каждого элемента матричного фотоприемника. Лицевые электроды элементов МЛФД соединены алюминиевой проволокой 6 диаметром 40 мкм к общей металлической шине 7 путем ультразвуковой микросварки. Металлическая шина также имеет электрический выход 8 в противоположную сторону диэлектрического корпуса. Она предназначена для подачи общего напряжения питания к матричному фотоприемнику. Затем на задней стороне корпуса припаивают штыревые электрические контакты (ножки) 9.

Таким образом, в данной работе разработан и испытан 64-канальный координатно-чувствительный сцинтилляционный детектор на базе матрицы МЛФД. По своим рабочим параметрам 64-элементная матрица МЛФД может успешно применяться для создания новейших приборов обнаружения опасных грузов – радиоактивных материалов и взрывчатых веществ.

На рис. 7. представлена схема ММН-детектора, в котором могут быть использованы матричные микропиксельные лавинные фотодиоды, разработанные в настоящей работе. Основными узлами ММН-детектора являются ускоритель дейтронов, обеспечивающий образования нейтронного потока и координатно-чувствительный сцинтилляционный детектор гамма излучения.

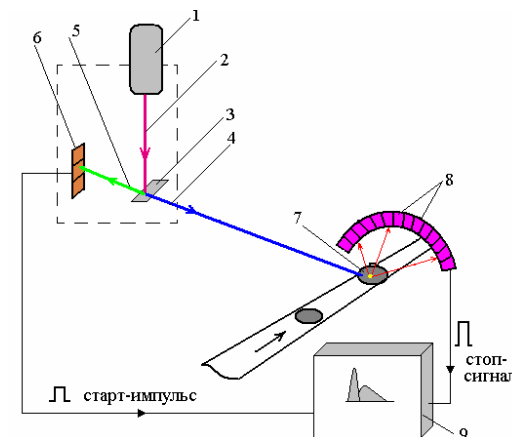


Рис. 7. Схема установки обнаружения взрывчатых веществ и радиоактивных материалов: 1 – Ускоритель дейтронов, 2 – Поток дейтронов, 3 – пластина-мишень из трития (TiT₂), 4 – Поток нейтронов,

На рис. 6 показана технологическая последовательность изготовления 64-элементной матрицы МЛФД. Матрица МЛФД содержит плоский диэлектрический корпус 1 из стеклотекстолита. Внешние размеры корпуса составляют 32мм·32мм. Сами элементы матрицы устанавливались на площади 28мм·28мм. На поверхности диэлектрического корпуса выполнена матрица металлических областей 2 с числом элементов равным количеству элементов МЛФД. Каждая металлическая область имеет индивидуальный электрический выход 3 в противоположную сторону сквозь диэлектрический корпус.

Элементы МЛФД 4 установлены на металлических областях 2 так, чтобы тыльный электрод каждого фотодиода имел электрический контакт с соответствующей металлической областью. Затем полупроводниковые подложки МЛФД полностью отделяют друг от друга путем дисковой резки. Ширину зазора 5 между элементами МЛФД устанавливают около 100мкм.

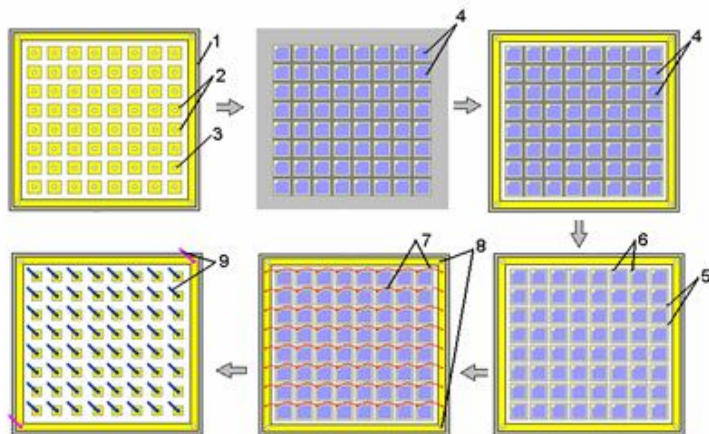


Рис. 6. Последовательность операций при сборке 64-элементной матрицы МЛФД: 1 – диэлектрический корпус, 2 – матрица металлических областей, 3 – индивидуальный электрический выход, 4 – элементы МЛФД, 5 – диэлектрический зазор между элементами, 6 – лицевой электрод МЛФД, 7 – общая металлическая шина, 8 – электрический выход в обратную сторону, 9 – штыревые электрические контакты к обратной стороне МЛФД

Каждый элемент МЛФД имеет лицевой электрод 6 и тыльный (задний) электрод. Задние электроды выполнены на противоположной стороне подложки фотодиодов по отношению к фоточувствительной поверхности. Они полностью изолированы друг от друга и

усиления лавинного процесса при регистрации постоянного светового сигнала. Этот процесс изучался на основе эквивалентной электрической схемы лавинной МРП структуры. Установлено, что с увеличением постоянного иницирующего тока i_a коэффициент умножения M лавинного процесса падает так, что величина полного тока J , практически не изменяется. Другими словами, МРП структура, также как МДП структура, не может регистрировать постоянный световой поток. Несмотря на это лавинная МРП структура прекрасно усиливает импульсный фототок.

Исследования показали, что МРП структура не требует высокой стабильности питающего напряжения, в отличие от структур на основе р-п-переходов, поскольку в МРП структуре, начиная с некоторой величины напряжения коэффициент умножения лавинного процесса слабо зависит от приложенного напряжения. За счет этого в МРП структуре может осуществляться однородный лавинный процесс по всей плоскости границы раздела полупроводник-резистивный слой.

В работе детально исследован механизм влияния различных неоднородностей в полупроводнике на параметры лавинной МРП структуры. Известно, что в реальном полупроводнике содержатся вакансии, дислокации и другие неоднородности. Случайное распределение этих неоднородностей по поверхности лавинной структуры приводит к соответствующему разбросу иницирующего лавину тока и потенциала пробоя в полупроводнике, причем от изменения потенциала пробоя V_b наиболее резко зависит разброс коэффициента умножения лавинного процесса.

Потенциал пробоя V_b определяется такими физическими параметрами, как ширина запрещенной зоны E_g и концентрация примесей N_a в полупроводниковой подложке. Полуэмпирическое выражение для V_b имеет следующий вид:

$$V_b = 600 \sqrt{1,132 \sqrt{1016734}}$$

(вольт).

Для простоты рассмотрен случай, когда МРП структура имеет единственную область неоднородности с площадью $S_1 \ll S_2$, причем $S_1 + S_2 = S$. Предполагается, что неоднородность потенциала пробоя вызвана только увеличением концентрации примесей области полупроводника с площадью S_1 по сравнению с остальной областью с

площадью S_2 . При этом, применив законы Кирхгофа к эквивалентной схеме на рис. 2 имеем:

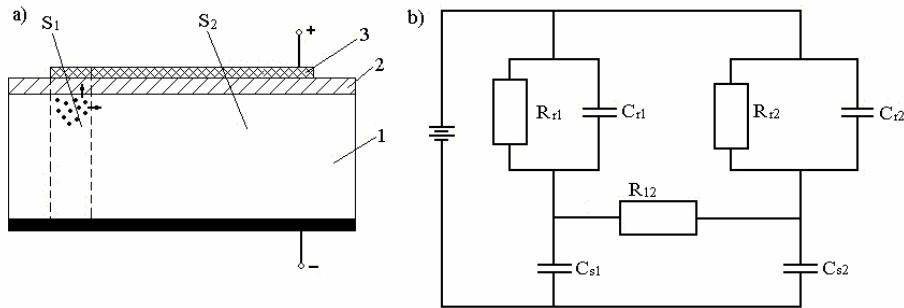


Рис. 2. Сечение (a) и электрическая эквивалентная схема (b) лавинной МРП структуры с неоднородной полупроводниковой подложкой:
1 - кремниевая подложка р-типа проводимости, 2 - резистивный слой из карбида кремния (SiC), 3 - полупрозрачный металлический электрод

$$I_{11} + I_{12} + I_{13} + I_{14} + I_{15} + I_{16} + I_{17} + I_{18} + I_{19} + I_{20} + I_{21} + I_{22} + I_{23} + I_{24} + I_{25} + I_{26} + I_{27} + I_{28} + I_{29} + I_{30} + I_{31} + I_{32} + I_{33} + I_{34} + I_{35} + I_{36} + I_{37} + I_{38} + I_{39} + I_{40} + I_{41} + I_{42} + I_{43} + I_{44} + I_{45} + I_{46} + I_{47} + I_{48} + I_{49} + I_{50} + I_{51} + I_{52} + I_{53} + I_{54} + I_{55} + I_{56} + I_{57} + I_{58} + I_{59} + I_{60} + I_{61} + I_{62} + I_{63} + I_{64} = I_{11} + I_{12} + I_{13} + I_{14} + I_{15} + I_{16} + I_{17} + I_{18} + I_{19} + I_{20} + I_{21} + I_{22} + I_{23} + I_{24} + I_{25} + I_{26} + I_{27} + I_{28} + I_{29} + I_{30} + I_{31} + I_{32} + I_{33} + I_{34} + I_{35} + I_{36} + I_{37} + I_{38} + I_{39} + I_{40} + I_{41} + I_{42} + I_{43} + I_{44} + I_{45} + I_{46} + I_{47} + I_{48} + I_{49} + I_{50} + I_{51} + I_{52} + I_{53} + I_{54} + I_{55} + I_{56} + I_{57} + I_{58} + I_{59} + I_{60} + I_{61} + I_{62} + I_{63} + I_{64}$$

где R_{12} - сопротивление поверхностной утечки тока между областями S_1 и S_2 , V_{12} - падение напряжения на сопротивлении поверхностной утечки

$$I_{11} = I_{12} \Psi_{11} \Psi_{01}$$

$$I_{22} = I_{12} \Psi_{22} \Psi_{02}$$

$$I_{11} = I_{12} \Psi_{11}$$

$$I_{22} = I_{12} \Psi_{22}$$

, $Q_1 = qN_{a1}W_{a1}S_1$, $Q_2 = qN_{a2}W_{a2}S_2$, $V = \xi t$, W_{a1} и W_{a2} - максимально возможные толщины обедненной области при $\Psi_{s1} = \Psi_{01}$ и $\Psi_{s2} = \Psi_{02}$, соответственно. Здесь параметры с индексами "1" и "2" относятся к областям S_1 и S_2 соответственно.

эпитаксиальный слой р-типа проводимости, 5 - потенциальные ямы из p^+ -областей, 6 - высоколегированный p^+ -слой для ограничения обедненной области, 7 - кремниевая подложка n-типа проводимости.

Одним из преимуществ данного МЛФД является то, что в нем можно осуществить большую плотность пикселей (независимых каналов умножения), чем в МЛФД с поверхностными пикселями. Это связано тем, что рассмотренный МЛФД не имеет общей проводящей шины и индивидуальных резисторов, которые могли бы занимать значительную часть чувствительной площади при увеличении плотности пикселей. В данном МЛФД функцию гасящего индивидуального резистора выполняет прямо смещенный р-п-переход, расположенный под каждым пикселем.

В рамках настоящей работы были разработаны и исследованы образцы одноэлементных и матричных микропиксельных фотодиодов (рис. 5).

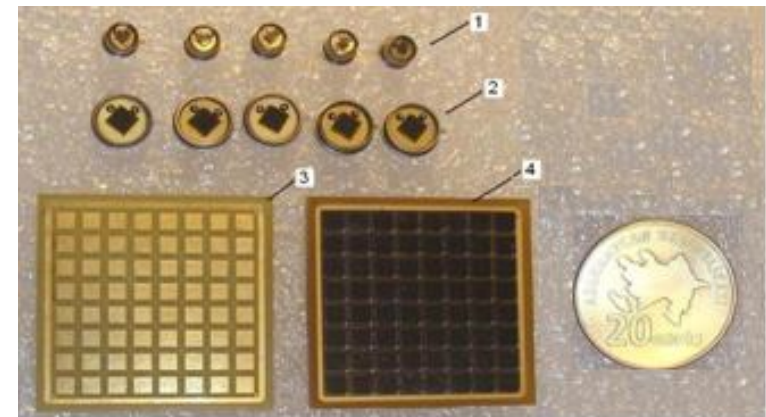


Рис. 5. Экспериментальные образцы разработанных МЛФД:

- 1 – одноэлементный МЛФД с площадью $1\text{ мм} \cdot 1\text{ мм} = 1\text{ мм}^2$,
- 2 – одноэлементный МЛФД с площадью $3\text{ мм} \cdot 3\text{ мм} = 9\text{ мм}^2$,
- 3 – диэлектрический корпус для матрицы МЛФД, 4 – 64-элементная матрица МЛФД в сборке

Одним из основных задач диссертации являлось создание конструкции и способа изготовления дешевого и компактного матричного фотоприемника с минимальной нечувствительной областью.

пикселя возникает лавинный процесс, и в результате этого происходит разрядка емкости пикселя до величины ниже потенциала пробоя. Лавинный ток через индивидуальный резистор стекает в общую проводящую шину, и принимается как фотосигнал. Таким образом, каждый пиксель прибора работает аналогично известному гейгеровскому счетчику.

Гашение лавинного процесса в пикселях происходит из-за падения потенциала в нем ниже пробойного благодаря наличию в каждом пикселе индивидуального пленочного резистора, который не допускает заметной зарядки пикселя от источника напряжения за время протекания лавинного процесса. Сигналы от сработавших пикселей суммируются на общей нагрузке (проводящей шине), и таким образом обеспечивается линейность фотоотклика прибора. Фотоотклик прибора остается линейным, пока вероятность попадания двух или более фотонов на один пиксель много меньше единицы.

Однако упомянутые выше МЛФД не имеют достаточно широкого диапазона линейности фотоотклика из-за низкой плотности пикселей. Это может иметь место в тех областях применения МЛФД данной конструкции, когда требуется регистрировать световые импульсы с числом фотонов более 1000.

Конструкция микропиксельного лавинного фотодиода другого (второго) типа приведена на рис. 4. Она представляет собой кремниевую подложку n-типа проводимости, на поверхности которой выращены два эпитаксиальных слоя p-типа проводимости.

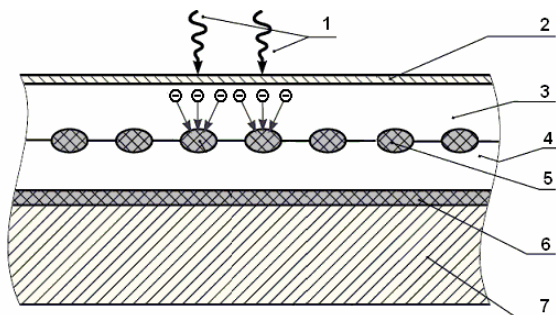


Рис. 4. Поперечное сечение лавинных фотодиодов с глубоко спрятанными пикселями: 1 - регистрируемые фотоны, 2 - высоколегированный p^+ -слой для обеспечения контакта к эпитаксиальному слою, 3 - второй эпитаксиальный слой p-типа проводимости, 4 - первый

Результаты численного расчета коэффициента умножения лавинного процесса представлены на рис. 3.

Расчеты проводились для двух крайних случаев: в первом случае $R_{12} \ll R_{r1}, R_{r2}$ (условие высокой поверхностной проводимости); во втором случае $R_{12} \gg R_{r1}, R_{r2}$ (отсутствие поверхностной проводимости).

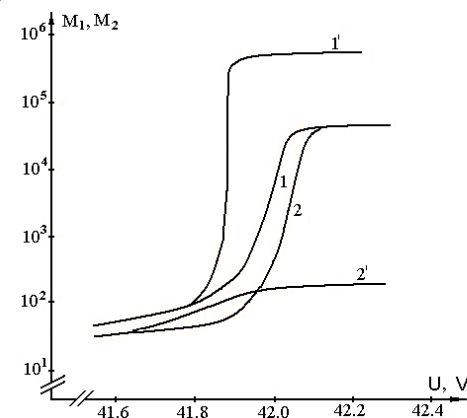


Рис. 3. Коэффициент умножения лавинного процесса в неоднородной МРП структуре в зависимости от приложенного напряжения при условиях $S_1 = 0,1 \text{ мм}^2$, $S_2 = 0,9 \text{ мм}^2$, $R_{r1} = 5 \cdot 10^6 \text{ Ом}$, $R_{r2} = 5,6 \cdot 10^5 \text{ Ом}$, $i_{a1} = 0,1 \text{ нА}$, $i_{a2} = 0,9 \text{ нА}$, $\psi_{01} = 41,9 \text{ В}$, $\psi_{02} = 42 \text{ В}$. $\alpha = 4$; кривые 1 и 2 соответствуют случаям R_{12}

$= \infty$, $R_{12} = 0$, соответственно

В первом случае, когда сопротивление поверхностной утечки значительно меньше, чем сопротивление широкозонного слоя, основная доля лавинного тока из области неоднородности (из области S_1) перетекает в область площадью S_2 . Поскольку в области S_1 величина напряжения пробоя понижена, то там лавинный процесс начинается при более низком напряжении на электродах МРП структуры. Перетекание носителей заряда из области S_1 в область S_2 приводит к замедлению роста поверхностного потенциала область S_2 , и в результате этого на большинстве рабочей площади (т.к. $S_2 \gg S_1$) лавинный процесс подавляется. После некоторого напряжения на

МРП структуре коэффициенты умножения в областях S_1 и S_2 достигают своих максимальных значений, отличающихся между собой в тысячу раз (кривые 1¹ и 2¹, на рис. 3).

Во втором случае, когда отсутствует поверхностная зарядовая связь области S_1 и S_2 (кривые 1 и 2) ведут себя, как независимые гетероструктуры с разными величинами напряжения пробоя. Поэтому, в области S_1 лавинный процесс начинается при более низком напряжении, так как в этой области напряжение пробоя понижено на 0,1В по сравнению с остальной областью. Поскольку над этими областями имеются одинаковые по свойствам широкозонные слои, то с ростом напряжения коэффициенты умножения M_1 и M_2 в этих областях приближаются друг к другу и после достижения некоторого напряжения почти выравниваются. При этом, коэффициент умножения в МРП структуре растет с постоянной скоростью при увеличении напряжения, т.е.

$$I_{\text{МРП}} = I_{\text{МДП}} + I_{\text{МРП}} + I_{\text{МДП}} = I_{\text{МРП}}.$$

Это означает, что лавинный процесс можно осуществить на подложке, практически с любой неоднородностью (вариации по поверхности) пробивного напряжения. Для этого чувствительную площадь нужно разбить на малые независимые (то есть без зарядовой связи) участки, а затем к ним подключать соответствующее сопротивление R_r (в данном случае $R_{r1} = R_{r2} = R_r$). Для определения величины этого сопротивления рассмотрим выше указанную структуру с двумя независимыми пикселями S_1 и S_2 при условии $S_1 = S_2 = 0,01 \text{ мм}^2$. Предположим, что при генерационном токе $i_a = 10 \text{ пА}$ (10^{-11} А) необходимо получить однородный лавинный процесс по всей чувствительной площади $S = S_1 + S_2$ при среднем коэффициенте усиления $M \sim 10^5$. Предположим, что к образцу приложено напряжение $V = 43 \text{ В}$. Это напряжение больше, чем напряжение пробоя Ψ_{01} и Ψ_{02} , поэтому излишки напряжения будут падать на сопротивлениях R_{r1} и R_{r2} . При $M \gg 1$ будет иметь место

$$(V_{r1} - V_{r2}) = (\Psi_{s1} - \Psi_{s2})$$

$$(\Psi_{02} - \Psi_{01}) = 0,1 \text{ В}, \quad V - \max(\Psi_{01}; \Psi_{02}) = 1 \text{ В} \gg (\Psi_{02} - \Psi_{01})$$

$$(V_{r1} - V_{r2}) = (\Psi_{s1} - \Psi_{s2}). \quad \text{Отсюда имеем}$$

$(V - \Psi_{02}) / (i_a \cdot M) = 1 / (10^{-11} \cdot 10^5) = 10^6 \text{ Ом}$. При этом, чем больше напряжение V , приложенного к образцу, тем меньше отличие между M_1 и M_2 . Этот результат является основным выводом предложенной модели стабилизации лавинного процесса в полупроводниковых структурах с независимыми пикселями.

В четвертой главе, рассматриваются технология изготовления и конструкции микропиксельных лавинных фотоприемников (МЛФД), результаты исследования характеристик матричных фотоприемников, принцип работы нового сцинтилляционного детектора для обнаружения скрытых взрывчатых веществ и радиоактивных материалов.

МЛФД обычно изготавливают на базе эпитаксиальных кремниевых пластин со специфическими параметрами, которые приведены в диссертации. Это вызвано сложной конструкцией МЛФД по сравнению с лавинными МДП и МРП фотоприемниками.

В работе были изучены два типа лавинных фотодиодов с микропикселями: первый – лавинный фотодиод с поверхностными пикселями, а второй – лавинный фотодиод с глубоко скрытыми пикселями.

Лавинный фотодиод с поверхностными пикселями содержит матрицу из маленьких независимых p-n-переходов (пикселей) с характерным размером от 20 мкм до 100 мкм, выполненных на поверхности кремниевой подложки. Пиксели расположены с определенным интервалом с целью предотвращения токовой связи между ними. Каждый пиксель соединен с общей проводящей шиной посредством индивидуального пленочного резистора с сопротивлением $10^5 - 10^7 \text{ Ом}$. Таким образом, плотность пикселей в МЛФД может составлять величину от 10^2 до $3 \cdot 10^3 \text{ пиксель/мм}^2$ в зависимости от размера пикселей и области применения прибора.

Ввиду малой площади пикселей, чаще всего, в них отсутствуют носители заряда, и они в таком положении имеют очень большое, практически бесконечное, сопротивление. Это обеспечивает возможность работы пикселей МЛФД в режиме перенапряжения, т.е. выше пробойного потенциала полупроводника МЛФД. При образовании единичного фотоэлектрона в чувствительной области