

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ  
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

## **Խուղավերդյան Դավիդ Սուրիկի**

**ՄՊԵԿՏՐԱՅԻՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ԿԻՍԱՀԱՂՈՂՉԱՅԻՆ  
ՖՈՏՈՂԵՏԵԿՏՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

Ե.27.01 «Էլեկտրոնիկա, միկրո և նանոէլեկտրոնիկա» մասնագիտությամբ  
տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի  
հայցման ատենախոսության

**ՄԵՂՍԱԳԻՐ**

ԵՐԵՎԱՆ 2019

---

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Худавердян Давид Сурикович**

**РАЗРАБОТКА ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ФОТОДЕТЕКТОРА ДЛЯ  
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05. 27.01- “Электроника, микро- и наноэлектроника”

ЕРЕВАН 2019

---

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում (ՀԱՊՀ)

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ., Վ.Շ. Մելիքյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ ֆ.-մ.գ.դ. Ֆ.Վ. Գասպարյան  
տ.գ.դ. Հ.Ա. Փիրումյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ «Երևանի կապի միջոցների գիտահետազոտական ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2019 թ. օգոստոսի 28-ին, ժամը 14<sup>00</sup>-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող 046 «Ռադիոտեխնիկա և էլեկտրոնիկա» մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17-րդ մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:  
Սեղմագիրն առաքված է 2019 թ. հունիսի 11- ին:

046 մասնագիտական խորհրդի գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.  Մ.Ց. Այվազյան

---

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.т.н. В.Ш. Меликян

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. Ф.В. Гаспарян  
д.т.н. Г.А. Пирумян

Ведущая организация: ЗАО «Ереванский научно-исследовательский институт средств связи»

Защита диссертации состоится 28 - го августа 2019 г. в 14<sup>00</sup> на заседании Специализированного совета 046 - “Радиотехника и электроника”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА), по адресу: 0009, г. Ереван, ул. Теряна 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 11-го июня 2019г.

Ученый секретарь Специализированного совета 046, к.т.н.

 М.Ս. Այվազյան

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время значимость прикладной науки существенно возросла. Это обусловлено необходимостью противостоять новым вызовам, стоящим перед человечеством. К ним, в первую очередь, относятся проблемы со здоровьем человека, биологическая и экологическая безопасность, климатические изменения, освоение Вселенной и Земли, создание мощной армии, мониторинг воды и продовольствия и др. Многие проблемы решаются с помощью первичного регистратора данных и анализатора. Здесь важную роль играет спектральный анализ оптического информативного сигнала, где в качестве первичного датчика выступает полупроводниковый фотодетектор. Улучшение его параметров с помощью новых спектрофотометрических функций представляет собой насущную проблему. На этом пути, по сравнению с существующими фотодетекторами, требуется обеспечение большей надежности, высокой спектральной чувствительности, низкой стоимости, веса, габаритов, энергии и материальных затрат.

Обычно спектральный анализ выполняется с помощью оборудования, которое содержит либо монохроматер, дифракционную решетку и призму, либо оптические фильтры. Их использование делает устройство менее эффективным и дорогостоящим. Устранение этих недостатков требует разработки полупроводникового фотодетектора с селективной спектральной чувствительностью и проведения спектрального анализа на их основе, что является чрезвычайно актуальной задачей. С использованием такого фотодетектора в спектрофотометрии, благодаря заложенному в нем новому физическому принципу, становится возможным исключить использование дифракционных решеток, призм и высокоточных механических систем, обеспечить высокое разрешение, надежность, быстрдействие регистрации спектра, низкие цены и габариты.

До настоящего времени работы в этом направлении проводились при особых условиях и наличии сложной технологии, из-за чего они остались на уровне исследований. Такие работы имеют высокий рыночный спрос. С точки зрения безопасности, это связано, в частности, с необходимостью решать в полевых условиях важные проблемы идентификации состава окружающей среды. Немаловажно использование таких фотодетекторов также в многоцелевых системах мониторинга, отвечающих современным требованиям.

**Предмет исследования.** Электронные процессы, происходящие в селективно фоточувствительной полупроводниковой  $p + (PtSi) - n (Si) - p + (Si)$  структуре, анализ их связей со структурными параметрами, теоретическое и экспериментальное обоснование селективной чувствительности оптического спектра и фотоспектрометрических свойств.

**Цель и задачи работы** является разработка новой полупроводниковой фотодетекторной структуры с селективной спектральной чувствительностью и обоснование основных технологических процессов изготовления структур. Исходя из намеченной цели, в работе были поставлены и решены следующие **задачи**:

- изготовление экспериментального образца, осуществление теоретического и экспериментального исследований их фотоэлектронных свойств;
- обоснование возможностей создания маломощной, низкоэнергетической, высокоточной, высокопроизводительной, надежной и многофункциональной фотоспектрометрической системы;
- разработка алгоритма, учитывающего наиболее полные причинно-следственные связи при получении спектральной зависимости интенсивности поглощаемого излучения;
- осуществление его тестирования под воздействием различного излучения;
- объяснение физических процессов. Обоснование возможностей многоцелевого применения.

**Методы исследования.** В процессе исследования были использованы основные положения теории полупроводниковых приборов, методы описания фотоэлектронных процессов с помощью уравнений Пуассона и диффузии и их численного моделирования при поглощении электромагнитных лучей по экспоненциальному закону Бугера в полупроводниковых двухбарьерных структурах.

#### **Научная новизна**

1. Разработан полупроводниковый фотоприемник с  $p + (PtSi) - n (Si) - p + (Si)$  структурой.
2. Реализована селективная регистрация отдельных волн в  $p + (PtSi) - n (Si) - p + (Si)$  структуре, проанализированы их интенсивность и возможность количественной оценки компонентов оптически прозрачных объектов.
3. Низкотемпературным формированием получен слой силицида: PtSi с толщиной 10...30 нм, прозрачный для ультрафиолетовых (УФ) лучей, а эпитаксиальным выращиванием  $p$ - $r$  переход. Кратковременность выращивания эпитаксиальной базы размером  $\sim 2$  мкм исключает самодиффузию из тыльного перехода.
4. Получены выражения, определяющие коэффициент поглощения под воздействием напряжения смещения и описывающие спектральное распределение фототока.
5. С помощью полученных выражений, включающих взаимосвязь структурных параметров, исследованы фотоэлектронные процессы, происходящие в фотодетекторе.
6. Предложен алгоритм обработки оптического информационного сигнала с повышенной точностью для получения спектральной зависимости интенсивности поглощаемого в фотодетекторе электромагнитного излучения.
7. Определены пороговая фоточувствительность и быстродействие фотодетектора, для которых получены высокие значения:  $3,4 \cdot 10^{-14}$  ВтГц $^{-1/2}$  и  $10^{-10}$  соответственно.
8. Получены низкие значения (до 10 пА) темновых токов и возможности регистрации малых мощностей ( $\sim 3 \cdot 10^{-11}$  Вт) излучения и интенсивностей ( $\sim 10^8$  квант/см $^2$ ·с).

Полученные структурные параметры обеспечивают спектральную избирательную чувствительность в диапазоне от 250 до 1000 нм и открывают возможность создания

новых типов спектрофотометров, которые исключают использование оптических систем и, следовательно, будут более надежными (не будут требовать оптической юстировки), легкими, малогабаритными, дешевыми, быстродействующими, пригодными для мониторинга в полевых условиях и особенно на больших площадях, где требуемое их большое число будет стоить дешевле.

**Практическая ценность работы.** Спектральный диапазон разработанного фотодетектора варьируется в пределах 250...1000 нм, а спектральная разрешимость ~1...30 нм. Фотодетектор позволит без использования оптических систем создать для целевого использования разные образцы высокоточных, дешевых и быстродействующих приборов спектрального анализа, осуществлять количественный анализ степени загрязнения воздуха, воды, пищи в указанном спектральном диапазоне и дистанционно оценивать их воздействие на людей, животных, растительность. С его помощью можно будет обнаружить наркотики и взрывчатые вещества, проводить неинвазивным методом анализ крови и т. д.

#### **Внедрение результатов работы:**

1. Разработанные  $p + (PtSi) - n(Si) - p + (Si)$  структуры были внедрены на предприятии RD Alfa Microelectronics (Рига, Латвия, имеется акт внедрения), а также ведутся работы по коммерциализации их спектрофотометрических свойств.
2. Результаты исследования были использованы в базовой лаборатории "Фотоэлектронные устройства оптических систем связи" НПУА и в рамках программы SAPP NATO SAP. SFPP 984403 (2013-2016), где автор был ответственным исполнителем.

Полученные результаты были использованы в учебном процессе кафедр "Микроэлектронные схемы и системы" и "Системы связи" НПУА.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена моделированием происходящих в фотодетекторе фотоэлектронных процессов с использованием классических и современных методов и средств анализа, сопоставлением с результатами экспериментальных исследований, их математическим обоснованием, а также тщательной проверкой результатов исследования и оценкой достоверности результатов моделирования.

#### **На защиту выносятся следующие основные положения:**

1. Экспериментальные образцы с  $(PtSi) - n(Si) - p^+(Si)$  структурой, полученной кратковременным (~ 4 мин) эпитаксиальным выращиванием базы толщиной ~ 2 мкм, исключающим самодиффузию из тыльного перехода, и слоем силицида с толщиной 10...30 нм, прозрачным для УФ лучей.
2. Спектральные анализы интенсивности различных источников излучения  $p + (PtSi) - n(Si) - p + (Si)$  структурой.
3. Выражения, определяющие коэффициент поглощения при внешнем напряжении смещения и описывающие спектральное распределение фототока фотодетектора.
4. Исследование фотоэлектрических процессов в детекторе при помощи указанных выражений, включающих взаимосвязь параметров структуры.

5. Высокий уровень пороговой фоточувствительности и быстродействия фотодетекторов со значениями  $3,4 \cdot 10^{-14}$  Вт·Гц<sup>-1/2</sup> и  $10^{-10}$  с соответственно.
6. Полученные малые темновые токи (до 10 пА). Возможность регистрации малых интенсивностей ( $\sim 10^8$  квант/см<sup>2</sup>·с) и мощностей ( $\sim 3 \cdot 10^{-11}$  Вт) излучения.
7. Возможность создания фотоспектрометрических приборов нового типа со спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн от 250 до 1000 нм.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на:

- 11-й Международной конференции “Semiconductor Micro-and Nanoelectronics” (Ереван, Армения, 2017);
- конференции “NANOSMAT” (Гренада, Испания, 2013);
- конференции “NATO Science for Peace and Security Programme, Tecnological Innovations in CBRNE Sensing and Detection for Safety, Security and Sustainability” (Ереван, Армения 2012);
- конференции “New developments in photodetection” (Екс-Ле-Бан, Франция, 2008);
- семинарах компании “RD Alfa Microelectronics” (г. Рига, Латвия, 2016-2018 гг.);
- научных семинарах кафедры “Микроэлектронные схемы и системы” НПУА (Ереван, Армения, 2016-2018 гг.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 13 научных работ, список которых приводится в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 134 наименований и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 134 страницы, в том числе 74 рисунка и 2 таблицы. Диссертация написана на армянском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна, практическая ценность полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматривается текущее состояние полупроводниковых фотодетекторов и систем с селективной спектральной чувствительностью, а также проведен обзор современной литературы по спектральному анализу информативного оптического излучения. Проанализирована работа селективно чувствительных полупроводниковых фотодетекторов, отмечены их недостатки и преимущества и обоснована необходимость создания новых типов полупроводниковых фотоприемников.

Выявлена роль спектроскопии оптического информативного сигнала во взаимоотношениях природа-человек и при использовании этих исследований в жизнедеятельности человека. Отмечены достижения и проблемы в этой области.

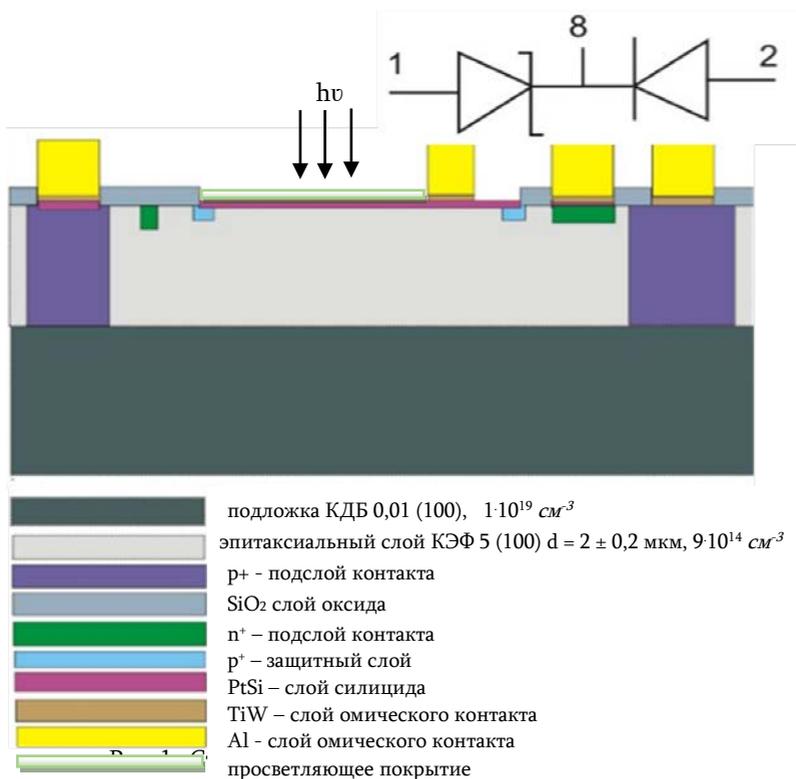
Обоснована потребность в полупроводниковом спектрометрическом фотодетекторе для устранения сложных, дорогих и менее надежных оптических компонентов в системах оптического спектрального анализа, использования в

полевых условиях малогабаритного устройства и решения проблем безопасности человека более дешевым и надежным способом.

**Во второй главе** основное внимание уделено уточнению структурных и технологических проблем фотоприемников и выявлению их свойств, вытекающих из фотоспектрометрии. Селективная спектральная fotocувствительность в фотодетекторной структуре обеспечивается вертикально расположенными по отношению к светочувствительной поверхности двумя противоположно направленными потенциальными барьерами, которые имеют точку соприкосновения. Последняя линейно меняется от внешнего напряжения и обеспечивает адекватное перераспределение волн. Выходным материалом является кремний, поэтому fotocувствительность фотодетектора на его основе лежит в диапазоне длин волн  $\sim 250 \dots 1000$  нм. В экспериментальных образцах она ограничена длинами волн, превышающими 300 нм, хотя выбранные толщины просветляющего и силицидного слоев (соответственно 50 и 30 нм) обеспечивают прохождение длин волн, превышающих 200 нм. Причиной является корпус фотодетектора с окном пропускания от 300 нм длин волн.

На рис.1 приведено поперечное сечение планарной версии структуры фотодетектора. Высокоомный база  $n$  - Si толщиной  $d$  со стороны поверхности включает в себя металл -  $n$  (Si) - силицидный барьер, а с тыльной стороны  $p$  -  $n$  переход. Последний граничит с высоколегированным диффузионным и граничным  $p^+$  слоями. Структура для вывода омического контакта имеет  $p^+$  слой,  $p^+$  - защитное покрытие, поверхностный оксидный слой  $SiO_2$  для пассивации, силицидную пленку PtSi и последовательно расположенные слои TiW и Al, обеспечивающие омический контакт. Фоточувствительная поверхность покрыта прозрачным для УФ излучения антиотражающим слоем  $SiO_2$ . Таким образом, обеспечивается вертикальное расположение потенциальных барьеров, при котором продольно поглощающее излучение последовательно проходит через поверхностный, затем через тыльный барьеры и обеспечивает распределение волнового поля между барьерами и модуляцию разделенных доз путем изменения напряжения смещения.

Рассмотрены процессы образования силицидного слоя PtSi с  $p^+$  проводимостью и эпитаксиально выращенной  $n$ -базой. Для получения больше высоты потенциального барьера в качестве силицидного металла выбран Pt, потенциальный барьер которого сформирован низкотемпературной обработкой ( $\sim 360$  °C). Это в сочетании с кратковременным (4 мин) эпитаксиальным ростом базы (при температуре 1150 °C) с толщиной 2 мкм при плотности примесей  $9 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> обеспечивает получение резких переходов. Кратковременность температурной обработки сводит к минимуму самодиффузию от тыльного перехода. Расчет ширины барьеров дал значения  $d_{p-n} \sim 1$  мкм и  $d_{PtSi} \sim 0,917$  мкм. Таким образом, двухмикронная база охватывается областями барьеров с точкой стыковки на глубине 0,917 мкм.



На рис. 2 приведены фотодетектор в корпусе и его топология. Используются выводы корпуса: 1 - от силицида, 2 - от тыльной  $p^+$  области, 8 - от базы.

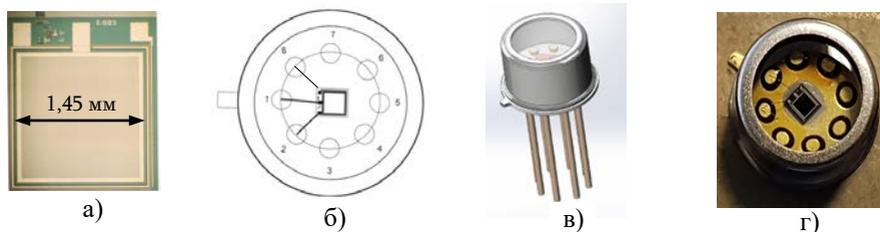


Рис. 2. Топология фотодетектора (а). Фотодетектор в корпусе: контакты на корпусе, вид сбоку, вид сверху (б - г)

На корпусе стеклянная пластина толщиной 1 мм, которая изготовлена немецкой фирмой SCHOTT и пропускает излучение начиная от 300 нм длин волн. Анализированы закономерности перемещения точки прикосновения потенциальных барьеров  $x_m$  в базе в зависимости от плотности примесей  $N_d$  и

приложенного напряжения смещения. Выявлено, что изменение ширины потенциальных барьеров происходит более эффективно при малых плотностях примесей (рис. 3) и низких напряжениях (рис. 4).

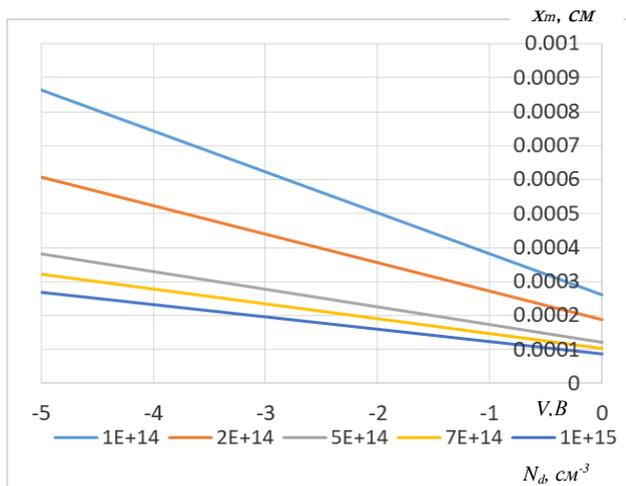


Рис. 3. Зависимость точки стыковки потенциальных барьеров от внешнего напряжения при разных плотностях примесей

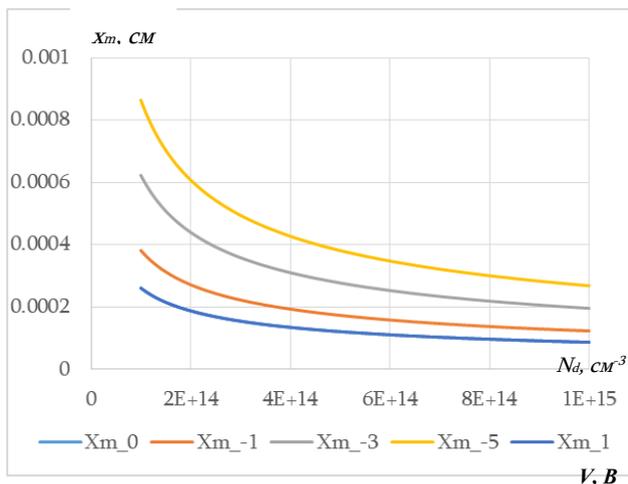


Рис. 4. Зависимость точки стыковки потенциальных барьеров от плотности примесей при разных напряжениях смещения

Выявлена связь между цифровыми данными вольт-амперных характеристиках (ВАХ) и длинам отдельных волн и их интенсивностью. Это послужило основой для спектрального анализа исследуемых объектов типа и количества их примесей.

**В третьей главе** представлены методы измерения фотоэлектрических характеристик и результаты получения параметров фотодетектора. Для измерения были использованы прецизионные измерительные приборы Keithley-6340 и B2912A, которые обеспечивают подачу напряжения на фотодетектор с шагом 1 мВ, доступ к компьютеру и получение цифровых данных ВАХ в автоматическом режиме.

Для подавления шумов фотодетектор предварительно был экранирован металлической коробкой, которая была надежно заземлена. Это позволило получить значение темновых токов 10 пА. Результаты сравнены с данными, полученными по разработанной схеме измерения RD Alfa Microelectronics.

В последнем случае токи измерялись с точностью 1 нА, и поскольку фототоки намного больше, чем темновые токи, эти относительно высокие значения темновых токов не имели существенного значения. Измерялись ВАХ как отдельных переходов (напряжение на контактах 1-8 и 2-8, рис. 1), так и фотодетектора в целом (рис. 5) напряжение на контактах 1-2 (рис. 1). При любой поляризации напряжения смещения насыщение фототока обусловлено обратнсмещенным переходом (рис. 5).

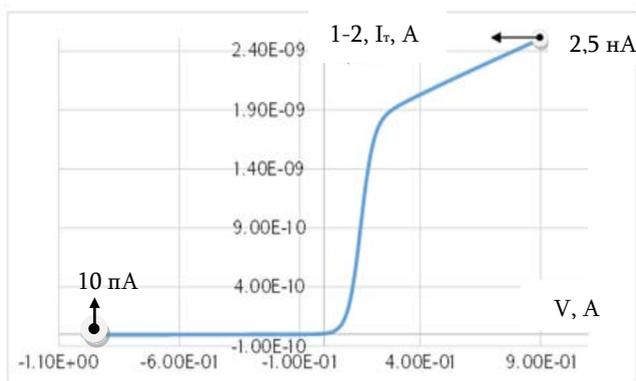


Рис.5. Темновая ВАХ фотодетектора

В случае обратного смещения тыльного барьера, по сравнению с поверхностным барьером, фототок имеет меньшее значение ( $\sim 10$  пА) и резкое насыщение. Исследования показали, что при поглощении электромагнитного излучения коротковолновый ток насыщения при одинаковой интенсивности света значительно больше длинноволнового тока, что обусловлено поглощением основной части излучения в приповерхностном обратнсмещенном переходе, в отличие от длинноволнового поглощения, основная часть которого происходит в областях двух противоположных барьеров.

На рис. 6 приведена ВАХ при поглощении излучения синего, зеленого, красного светодиодов марок L-813SRC-J14 (AlGaInP), 153GC (GaP), LL-304B-B4- GD (InGaN) соответственно и ксеноновой лампы.

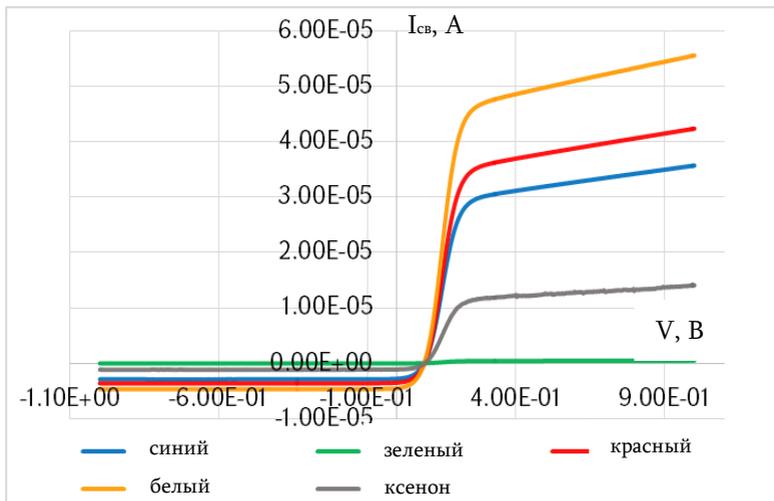


Рис.6. Световые ВАХ фотодетектора при излучении разных светодиодов и ксеноновой лампы

Все кривые на рис. 6 имеют нулевой ток при напряжении 0,19 В, что совпадает с разницей высот потенциальных барьеров.

Глубина поглощения короткой волны меньше, чем длинной волны. В результате в изучаемых  $p^+ - n - p^+$  структурах при продольном поглощении излучения, в зависимости от длины волны, в противодействующих барьерах появляются разные доли фототоков, обусловленные длинными и короткими волнами. В этом случае в фототоке приповерхностного барьера коротковолновые лучи имеют больший вклад, чем в фототоке тыльного  $p^+ - n$  барьера. Для длинных волн в зависимости от условий наблюдается обратное. При увеличении внешнего напряжения смещения, когда в базе тыльный барьер расширяется за счет поверхностного барьера, коротковолновый фототок меняет свой знак (рис. 7) при меньшем значении абсолютного напряжения ( $\lambda=462$  нм...0,70 В), чем длинноволновый ( $\lambda=660$  нм...0,88 В).

Исследованы вольт-фарадные характеристики. Двухбарьерная структура представляет последовательно соединенные плоские конденсаторы. С учетом зарядовых емкостей отдельных переходов и выражений для положения точки стыковки барьеров  $x_m$  получено выражение емкости фотодетектора:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 S \frac{q^2 N_a d}{2x_m q^2 N_a d + \varepsilon \varepsilon_0 (\Delta\varphi + qV)},$$

где  $N_d$  - концентрация доноров в базе;  $\epsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала;  $\epsilon_0$  - диэлектрическая проницаемость вакуума;  $q$  - заряд электрона;  $d$  - ширина базы;  $x_m$  - положение точки стыковки барьеров;  $\Delta\phi$  - разница высоты силицидного и тыльного потенциальных барьеров;  $V$  - напряжение смещения.

Из приведенного выражения очевидно, что увеличение обратного напряжения поверхностного барьера увеличивает его ширину и уменьшает ширину тыльного барьера. Как только они становятся равными ( $\Delta\phi=0$ ), имеем максимум значения емкости. При дальнейшем увеличении напряжения поверхностный барьер становится преобладающим, и емкость начинает уменьшаться. Эти закономерности подтверждаются экспериментальными результатами на рис. 8.

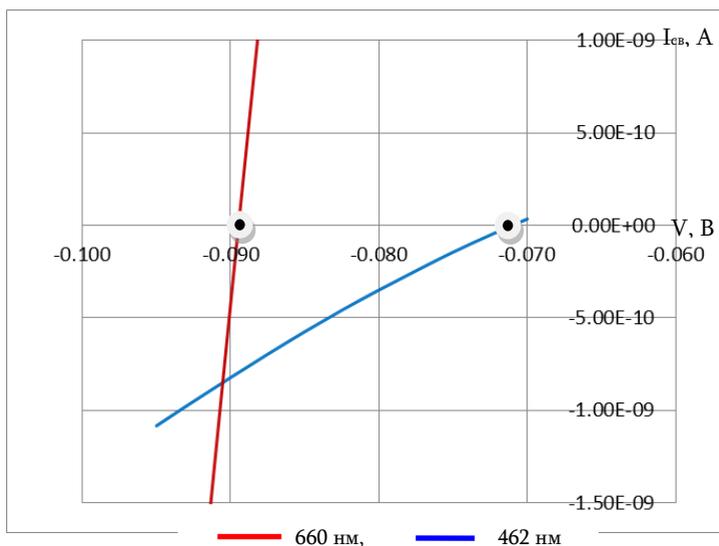


Рис. 7. Смена знака фототока в зависимости от напряжения смещения для разных длин волн

При темновом и световом воздействии экспериментально выявлены закономерности изменения емкости в зависимости от напряжения смещения как для отдельных барьеров, так и для фотодетектора в целом. В первом случае наблюдается снижение емкости с увеличением напряжения по классическому закону. Во втором случае (рис. 8) емкость до напряжения, равного разнице высоты потенциальных барьеров, с учетом вышеуказанного возрастает, а затем после сравнения барьеров преобладающим становится поверхностный барьер, дальнейшее расширение которого приводит к плавному уменьшению емкости.

Вследствие того, что при поглощении света высота барьеров уменьшается, индуктивность на свету больше, чем в темноте.

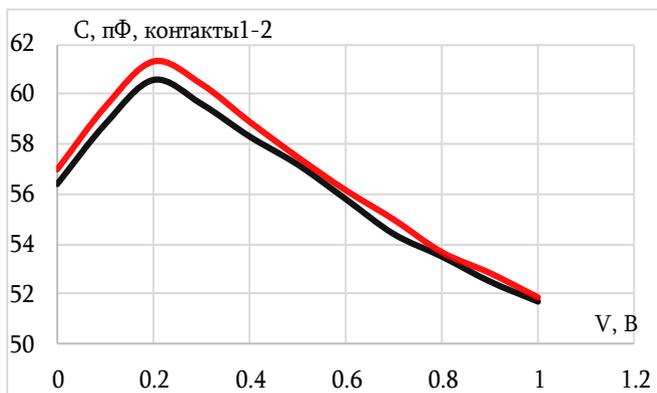


Рис. 8. Вольт-фарадные характеристики  $p^+ - n - p^+$  структур, красная линия - при освещении, черная - в темноте

Исследованы  $p^+ (PtSi) - n (Si) - p^+ (Si)$  структура и взаимосвязь параметров в ней поглощенного излучения с точки зрения получения селективной спектральной чувствительности. Получены выражения для точки стыковки:

барьеров  $x_m$ :

$$x_m = \frac{d}{2} - \frac{\epsilon \epsilon_0 (\Delta \varphi + qV)}{q^2 N_A d};$$

для фототока:

$$I_{св\ ij} = qSF_{i0} \left( 1 - 2e^{-\alpha_i x_{mj}} + \frac{e^{-\alpha_i d}}{1 + \alpha_i w} \right),$$

где  $w$  – ширина тыльной диффузионной области.

Поскольку экспериментальные данные фототока малые величины, то имеет смысл воспользоваться преобразованием ряда Маклорена относительно точки “0”. Исходя из этого, решением соответствующего уравнения получено выражение для коэффициента поглощения:

$$\alpha = \frac{2A(x_{m2} - x_{m3}) - x_{m1} + x_{m2}}{A(x_{m2}^2 - x_{m3}^2) - x_{m1}^2 + x_{m2}^2},$$

где  $A = \frac{I_1 - I_2}{I_2 - I_3}$  определяется экспериментальными значениями трех близлежащих по напряжению фототоков.

С использованием этих выражений разработан алгоритм получения спектральной зависимости интенсивности. Упрощенная блок-схема приведена на рис. 9.

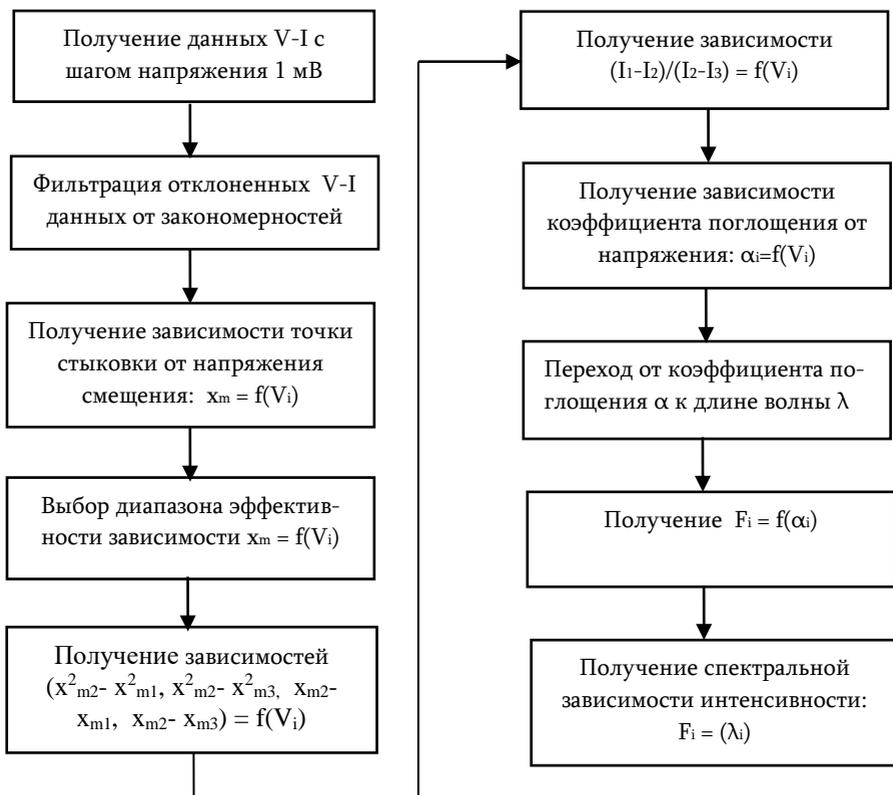


Рис. 9. Упрощенная схема алгоритма

**Глава четвертая** посвящена тестированию разработанного алгоритма и освещению результатов спектрального анализа. Алгоритм был протестирован с использованием излучения синего, зеленого, красного и белого светодиодов и ксеноновой лампы.

Цифровые данные световых ВАХ фотодетектора являлись входными данными алгоритма. Автоматическая реализация алгоритма была обеспечена в программной среде Exeel.

На рис.10 в относительных единицах приведены полученные спектральные кривые по сравнению с эталонными. Источниками излучения являлись синие, зеленые и красные светодиоды. Полученные кривые имеют узкий спектр по сравнению с эталонными при синем и красном излучении. Относительная повторяемость наблюдается в случае зеленого поглощения. Это можно объяснить тем, что зеленое излучение по глубине ( $\lambda_{\max} = 565$  нм, а  $1/\alpha = 1,7$  мкм) поглощения хорошо распределяется между обоими барьерами и активно участвует в модуляционном

распределении при изменении внешнего напряжения смещения. Между тем синее излучение поглощается преимущественно у поверхностного барьера ( $\lambda_{\max} = 462$  нм,  $1/\alpha = 0,47$  мкм), а красное - у тыльного ( $\lambda_{\max} = 660$  нм,  $1/\alpha = 3,87$  мкм).

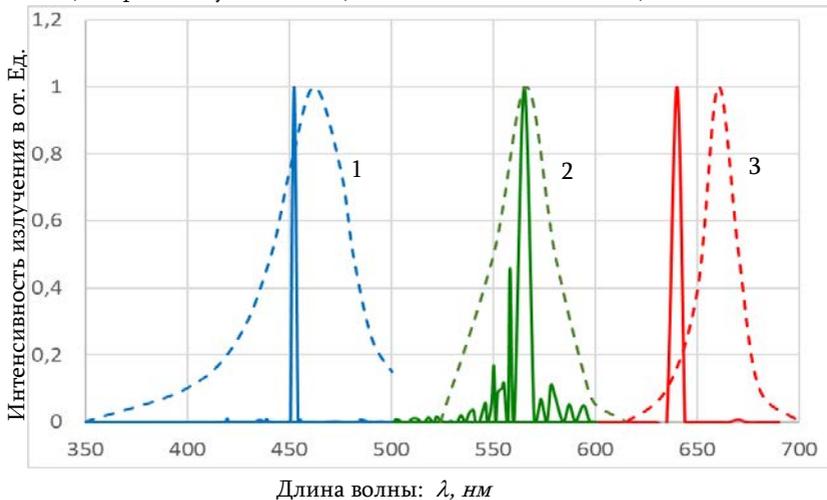


Рис. 10. Спектральные зависимости светодиодов марки: 1 - LL-304BC4B-B4-IGD (InGaN), 2 - L-53GC (GaP), 3 - L-813SRC-J14 (AlGaInP). Сплошные линии – экспериментальные, пунктирные линии – эталонные

На рис. 11 показана эталонная спектральная зависимость излучения белого светодиода, а на рис. 12 - полученная экспериментальная кривая. Очевидно достаточно близкое совпадение.

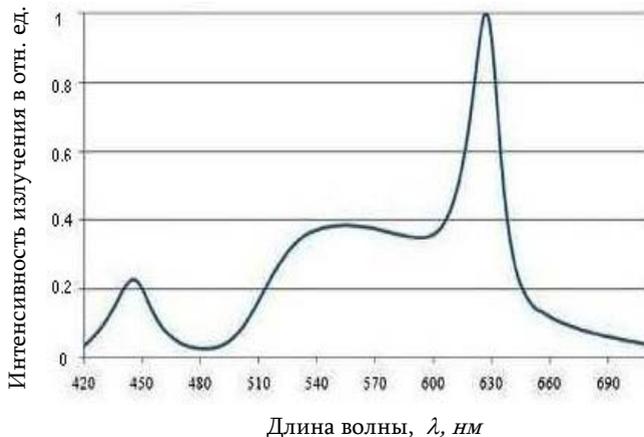


Рис. 11. Эталонное спектральное распределение излучения белого светодиода марки LL-1003WC2D-W2-1B

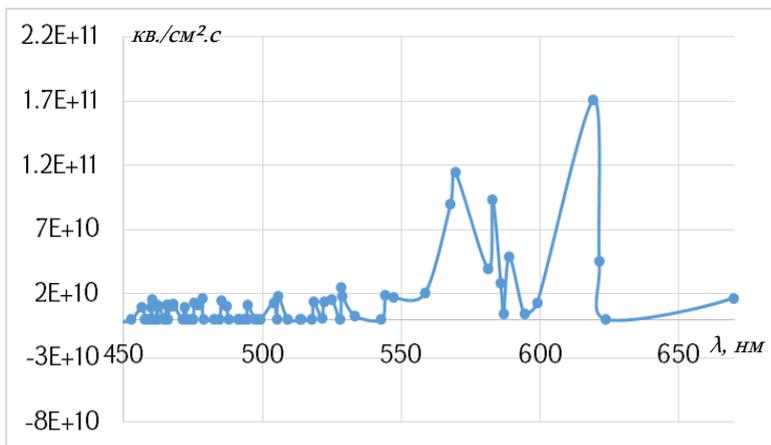


Рис. 12. Экспериментальное спектральное распределение излучения белого светодиода марки LL-1003WC2D-W2-1B

В экспериментах выходными данными являлись спектральные распределения интенсивностей указанных источников излучения, полученных в результате экспериментов. Они повторяли эталонные зависимости с точностью от 1 до 30 нм. Очевидно, что сравнимые спектры близки друг к другу. Это дает возможность проведения спектрального анализа с разработанным фотодетектором разного назначения.

При оценке шума фотодетектора предполагается, что тепловые шумы при комнатной температуре и частотные шумы на частотах выше 100...1000 Гц имеют низкий уровень; основным видами шумов можно считать дробовые шумы, при оценке которых была получена равная шуму пороговая чувствительность  $\sim 7,8 \cdot 10^{-14}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ , когда отсутствует диффузионный ток с тыльного перехода, и  $\sim 3,4 \cdot 10^{-14}$  Вт·Гц $^{-1/2}$ , когда этот ток присутствует.

Таким образом, исследованные структуры имеют низкий уровень шума и высокую пороговую чувствительность. Это открывает перспективу анализа спектра слабых сигналов, необходимых при исследовании, например, слабое излучение далеких звезд.

Принимая во внимание, что база является активной средой, занятой противоположно направленными барьерами, при оценке быстродействия были учтены созданные ими поля, скорость дрейфа, время пролета через базу и постоянная времени  $\tau_{RC} = RC$ . Получено значение быстродействия структуры  $\sim 10^{-10}$  с, которое определяется относительно высоким временем дрейфа.

Эти особенности избирательной спектральной чувствительности открывают перспективы для создания фотодетекторов с новыми функциональными возможностями и на их основе разнофункциональных приборов для анализа

оптического излучения. В них будут устранены оптические пути, дифракционные решетки, а многочисленные фотодиоды будут заменены одним фотодетектором, который будет обладать следующими преимуществами:

- Небольшие размеры, достигаемые путем устранения оптического пути и дифракционной решетки;
- Отсутствие настройки луча, поскольку нет оптических элементов, требующих точной настройки;
- Высокая фоточувствительность, так как отсутствуют понижающие светофильтры, оптические пути, призмы, дифракционные решетки;
- Низкая стоимость из-за низкой материалоемкости и отсутствия оптических дорогостоящих элементов.

Указанные преимущества дадут возможность получить самые простые спектрофотометры (потребности в линзах, призмах, узлах дифракции и фотодиодах больше не будут существовать). Это значительно снизит затраты, вследствие чего такой фотоприемник может обеспечить лидирующие позиции на рынке спектроскопии.

Широкий спектр задач, решенных посредством спектрального анализа, включает в себя анализ всех возможных вариантов оптически прозрачной среды, конкретных материалов особой чистоты, видов производства, разведку горных пород, анализ состава звезд, контроль промышленных и бытовых сточных вод, мониторинг загрязнения воздуха, сельскохозяйственных объектов, решение медицинских, физических и других проблем.

Представленный фотодетектор также может иметь большой спрос в оптических системах мониторинга в качестве первичного информационного фотоэлемента, который способен анализировать информацию оптического сигнала через недорогую электронику, идентифицировать вредные и другие типы материалов исследуемой среды, определять их количество, сообщать по беспроводной сети, помогая устранить возможные опасности, решая таким образом вопросы безопасности.

По этой причине к 2014 году общий объем рынка спектроскопии составил около 7,5 млрд. долл. США. К 2019 году согласно прогнозам он составит 9,5 млрд. долл. США, а в 2022 году мировой рынок спектроскопии составит 39 млрд. долл. США.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

1. Исследованы экспериментальные образцы с  $p^+ (PtSi) - n (Si) - p^+ (Si)$  структурой. Показано, что с помощью внешнего напряжения смещения, изменяя ширину потенциальных барьеров в базе один за счет другого, можно добиться селективной спектральной чувствительности [1-3].
2. В случае продольного поглощения коротких и длинных волн противодействующие барьеры создают разные доли фототоков, и когда тыльный барьер смещен в обратном направлении, с увеличением напряжения он расширяется за счет поверхностного барьера, при этом коротковолновый фототок

меняет свой знак при меньшем значении напряжения, чем длинноволновый [8-12].

3. С помощью разработанного алгоритма и путем решения уравнения для коэффициента поглощения получены спектральные распределения интенсивности ксеноновой лампы, а также синего, зеленого, красного и белого светодиодов, которые с точностью от 1...30 нм совпали с эталонным распределением соответствующих источников света [1-4].
4. Получены оценочные значения пороговой чувствительности экспериментальных образцов  $\sim 3,4 \cdot 10^{-14}$  ВтГц<sup>-1/2</sup> и быстродействия  $\sim 10^{-10}$ с. Они сопоставимы с соответствующими значениями полупроводникового фотоприемника на рынке. Получены очень низкие темновые токи ( $\sim 10$  пА), показаны возможности регистрации низких интенсивностей ( $\sim 10^8$  квант/см<sup>2</sup>·с) и мощностей ( $\sim 3 \cdot 10^{-11}$  Вт), что весьма важно при анализе слабых сигналов Космоса [1].
5. Степень ошибки восстановления спектра получается, в частности, из погрешности перехода от коэффициента поглощения  $\alpha$  к длине волны  $\lambda$ . Для кремния использовались значения  $\alpha = f(\lambda)$  с шагом 10 нм. Чтобы увеличить спектральную точность, необходимо использовать данные с меньшим шагом [4, 7].
6. Получены структуры с резкими p-n и силицидными переходами. Полученный низкотемпературным ( $\sim 360$  °С) осаждением PtSi силицидный слой имеет толщину 10...30 нм и прозрачен для околосветовых УФ лучей. Кратковременность ( $\sim 4$  мин) эпитаксиально выращенной базы с двухмикронной толщиной исключает самодиффузию с тыльного барьера [1, 5-7].
7. Концентрация примесей  $9 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup> в базе обеспечивает стыковку барьеров на глубине  $x_m = 0,917$  мкм, что дает возможность модулировать ширину барьеров с помощью внешнего напряжения [1, 13].
8. Поверхностный барьер должен быть прозрачным для коротких волн. В этом случае можно будет регистрировать волны, начинающиеся с 200 нм. Для этого необходимо использовать тонкий (толщиной 10...30 нм) слой силицида PtSi с высоким барьером и прозрачное для УФ излучения кварцевое окно [1, 7].

**Основные результаты диссертации** опубликованы в следующих работах:

1. Խոսրոպետրյան Դ.Ս. Մպեկտրաչափական ֆոտոդետեկտորի ֆունկցիոնալ հնարավորությունների հետազոտումը // ՀԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա. - 2018. - Հ. 71, N2. - Էջ 203-214:
2. Khudaverdyan S., Meliqyan V., Hovhannisyanyan T., Khudaverdyan D., Vaseashta A.. Identification and Analysis of Hazardous Materials Using Optical Spectroscopy // Optics and Photonics Journal. - 2017. - 7. - P 6 -17. ISSN Print: 2160-8881.
3. Meliqyan V.Sh., Khudaverdyan D.S., Khachatryan M.G., Khudaverdyan S.Kh. Selectively Sensitive Photodetector. Semiconductor Micro-and Nanoelectronics

- // Proceedings of the Eleventh International Conference, June 23-25, 2017.- Yerevan, Armenia, 2017.- P. 48-50.
4. Khudaverdyan D.S. On a New Method of Spectral Analysis. Semiconductor Micro-and Nanoelectronics //Proceedings of the eleventh International Conference, June 23-25, 2017.- Yerevan, Armenia, 2017.- P. 51-53.
  5. Khudaverdyan S.Kh., Khachatryan M.G., Khudaverdyan D.S., Tsaturyan S.H. and Vaseashta A.K. New Model of Spectral Analysis of Integral Flux of Radiation // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics.- Springer, 2013, DOI10.1007/978-94-007-7003-4.- P. 261-269.
  6. Khudaverdyan S.Kh., Avetisyan A.A., Khudaverdyan D.S., Vaseashta A.K. // Photoelectric Properties of Selectively sensitive Sensors for the Detection of Hazardous Materials // NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics, Springer.- 2013. Series B: Physics and Biophysics, DOI10.1007/978-94-007-7003-4.- P. 183-191.
  7. Khudaverdyan S.Kh., Petrosyan O.H., Dokholyan J.G., Khudaverdyan D.S., Tsaturyan S.H.. Modeling of a New Type of an Optoelectronic Biosensor for the Monitoring of the Environment and the Food Products // NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology. Published by Springer, ISBN 978-94-007-2487-7.- Springer, 2012.- P. 179-184.
  8. Khudaverdyan S.Kh., Dokholyan J.G., Kocharyan A.A., Khudaverdyan D.S. Particularities of Photoelectric Characteristics of "Partly" Forward-biased Field Transistor // Journal of Applied Electromagnetism.- 2007.- 9.- P. 45-56.
  9. Խուդավերդյան Ս.Խ., Դոխոլյան Ճ.Գ., Քոչարյան Ա.Ա., Խուդավերդյան Դ.Ս. Կիսահաղորդչային ֆոտոդետեկտորների սպեկտրային ընտրողական զգայնության բարձրացման եղանակ: ՀՀ Գյուտի արտոնագիր #1894 A2, 2006:
  10. Худавердян С.Х., Дохолян Ж.Г., Худавердян Д.С. Физическая модель селективной фоточувствительности в двухбарьерных полупроводниковых структурах //Вестник ГИУА. Моделирование, оптимизация, управление.- Ереван, 2006.- том 1, вып. 9.- С. 85-90.
  11. Худавердян С.Х., Дохолян Ж.Г., Кочарян А.А., Минасян С.В., Худавердян Д.С.. Бецфилтровый селективный фотодетектор на основе кремния для мониторинга ультрафиолетового излучения // Вестник ГИУА. Моделирование, оптимизация, управление.- Ереван, 2005.- Том 2, выпуск 8.- С. 68-73.
  12. Khudaverdyan S.Kh., Dokholyan J.G., Kocharyan A.A., Kechiyantz A.M., Khudaverdyan D.S.. On functional potentiality of photodiode structures with a high-resistance layer // ELSEVIER,J. Solid State Electronics.- 2005.- 49.- P. 634-639.
  13. Khudaverdyan S., Vaseashta A., Caturyan S., Khudaverdyan D. Optical Sensor For The Detection of Impurities In Water //Proceedings of the NANOSMAT, International Conference, Sep. 22-25, 2013.- Granada, Spain, 2013.-P. 91-93.

## ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից մարտահրավերները պահանջում են նոր, առավել արդյունավետ, տեխնիկական միջոցների ստեղծում, որոնք կօգնեն դիմակայելու մարդ/բնություն փոխհարաբերությունից ծագած բազմաթիվ վտանգների: Այդ ասպարեզում առաջավոր եղանակ հանդիսացող օպտիկական սպեկտրաչափությունը պահանջում է հուսալիության, արագագործության, ֆունկցիոնալ հնարավորության բարձրացում, նյութաձախսի և գնի իջեցում: Այդ խնդիրների լուծման համար նպաստավոր է օպտիկական ինֆորմատիվ ճառագայթի սպեկտրը ընտրողաբար գրանցող կիսահաղորդչային ֆոտոդետեկտորի ստեղծումը:

Սույն աշխատանքում մշակված և տեխնոլոգիապես իրականացված է կիսահաղորդչային երկարգեղք կառուցվածք, դրանում էլեկտրոնային գործընթացներով պայմանավորված սպեկտրային ընտրողական զգայնություն ապահովող ալգորիթմ, ինչը պատասխան է տալիս վերը նշված պահանջներին և բացում նոր հեռանկարներ օպտիկական սպեկտրային վերլուծությունում:

Այդ ճանապարհին ատենախոսական աշխատանքում իրականացվել է կիսահաղորդչային երկարգեղք կառուցվածքների հետազոտման հետևյալ գործընթացները

1. Մշակվել է ԻՍ-երի արտադրության տեխնոլոգիական ցիկլի հետ համատեղելի երկարգեղք կիսահաղորդչային ֆոտոդետեկտորային  $p^+(PtSi) - n(Si) - p^+(Si)$  կառուցվածք: Ցույց է տրվել, որ արտաքին լարմամբ, մեկը մյուսի հաշվին, բազայում կարելի է փոխել պոտենցիալ արգելքների լայնությունները և ստանալ սպեկտրային ընտրողական զգայնության հնարավորություն:
2. Երկայնական կլանման պայմաններում արտաքին շեղման լարման աճին զուգընթաց, երբ բազայում թիկունքային արգելքը լայնանում է ի հաշիվ մակերևութայինի, հակազդող արգելքներում կարճ և երկար ալիքների կլանման և դրանց ստեղծած ֆոտոհոսանքների տարբեր չափաբաժիններով պայմանավորված, կարճալիքային ֆոտոհոսանքը, փոխում է իր նշանը լարման ավելի փոքր արժեքում, քան երկարալիքայինը:
3. Մշակվել է սպեկտրային ընտրողական զգայնության ստացման ալգորիթմ, որի գործընթացում լուծվել է կլանման գործակցի ճշկրիտ արժեքի ստացման հավասարում: Դրա օգտագործմամբ ստացվել են կապույտ, կանաչ, կարմիր և սպիտակ լուսադիոդների ու քսենոնային լամպի ճառագայթների սպեկտրային բաշխվածությունները, որոնք 1...30 նմ ճշտությամբ կրկնում են համապատասխան աղբյուրների էտալոնային բաշխվածությունները:
4. Գնահատվել են ֆոտոդետեկտորի շեմային ֆոտոզգայնությունն ու արագագործությունը: ստացվել են համապատասխանաբար  $3,4 \cdot 10^{-14}$  Վտ $\cdot$ Հց $^{-1/2}$  և  $10^{-10}$  վ արժեքներ: Դրանք համարվում են բարձր ցուցանիշներ: Ստացվել են մթնային շատ փոքր հոսանքները (մինչև 10 պԱ կարգի), շատ փոքր ինտենսիվություններ ( $\sim 10^8$  քվանտ/սմ $^2$ վ) և հզորություններ ( $\sim 3 \cdot 10^{-11}$  Վտ)

գրանցելու հնարավորություններ: Դա չափազանց կարևոր է տիեզերական թույլ ազդանշանների հետազոտություններում:

5. Սպեկտրի վերականգման սխալը, մասնավորապես կարող է պայմանավորվել կլանման  $\alpha$  գործակծից ալիքի  $\lambda$  երկարության անցման օգտագործված 10 նմ ճշտությամբ: Սխալը կարելի է նվազեցնել բարձր ճշտության տվյալների օգտագործմամբ:
6. Ստացվել է կտրուկ p-n և սիլիցիդային անցումներով կառուցվածք: Ցածրաջերմաստիճան ( $\sim 360$  °C) նստեցմամբ սիլիցիդային PtSi անցումը վերգետնյա ուլտրամանուշակագույն ճառագայթների համար թափանցիկ 10...30 նմ հաստությամբ շերտ է, իսկ բազան կարճատև ( $\sim 4$  րոպե) աճեցմամբ, թիկունքային անցումից ինքնադիֆուզիան բացառող,  $\sim 2$  մկմ լայնությամբ էպիտաքսիալ շերտ:
7. Բազայում խառնուրդների  $9 \cdot 10^{14}$  սմ<sup>-3</sup> խտության ապահովումը  $x_m = 0,917$  մկմ խորությամբ կետում հակադարձ արգելքների հպում է առաջացնում և արտաքին շեղման լարմամբ արգելքների լայնությունների, մեկը մյուսի հաշվին փոփոխության հնարավորություն ստեղծում:

Ստացված կառուցվածքային պարամետրերն ապակյա պատուհանի անցաթողումով պատեանավորված փորձանմուշները ապահովում են 300 - ից մինչև 1100 նմ երկարության ալիքների միջակայքում սպեկտրային ընտրողական զգայնություն և բացում սպեկտրաչափական նոր տեսակի սարքերի ստեղծման հնարավորություն, որոնք կբացառեն եղած սարքերում առկա օպտիկական համակարգերը, հետևաբար կլինեն ավելի հուսալի (օպտիկական ճշտաբերում չեն պահանջի), թեթև, քիչ նյութածախս, էժան, արագագործ, դաշտային պայմաններում և հատկապես մեծ տարածքներում մոնիտորինգի համար պիտանի:

DEVELOPMENT OF A SEMICONDUCTOR PHOTO DETECTOR FOR  
SPECTRAL ANALYSIS

SUMMARY

Modern challenges require the development of new, more effective technical means which will help to avert the dangers created by the interactions between the humans and the nature. The optical spectrometry, which is the leading trend in this field, requires the increase of the reliability, speed and functionality, and the decrease of the cost and material consumption. The creation of semiconductor photodetectors which selectively register the optical informative spectrum of the radiation would be the solution to these problems.

The research work presents the development and the technological implementation of two-barrier semiconductor structures, and the algorithm providing the spectral selective sensitivity conditioned by the electronic processes occurring in the structure. It responds to the above-stated requirements and opens up new opportunities for the optical spectral analysis.

The thesis introduces the processes of the study of two-barrier semiconductor structures:

1. A  $p^+ (PtSi) - n (Si) - p^+ (Si)$  two-barrier semiconductor photodetector structure compatible with the production cycle of ISs was developed. It was shown that it is possible to change the widths of potential barriers in the base by external voltage, one at the expense of another, and to receive spectral selective sensitivity.
2. At longitudinal absorption of the radiation, along with the increase of the external bias voltage, when the rear barrier in the base widens at the expense of the surface barrier, the short-wave photocurrent, conditioned by different photocurrent portions generated by the absorption of the short and long waves in the oppositely-directed barriers, changes its sign at smaller values of the voltage than the long-wave photocurrent.
3. An algorithm of receiving of the spectral selective sensitivity was developed. In the process of the development of the algorithm, the equation for the receiving of the accurate value of the absorption coefficient was solved. It helped to obtain the spectral distributions of the radiation of blue, green, red and white light-emitting diodes and xenon lamps, which repeat the reference values of the relevant sources accurate within 1-30 nm.
4. The speed and the threshold photosensitivity of the photodetector were estimated. The values of  $3,4 \cdot 10^{-14} \text{ W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  and  $10^{-10} \text{ V}$  were received respectively. They are considered to be high indices. There is the possibility to record very small dark currents (up to about 10 pA), very small intensities ( $\sim 10^8 \text{ Quantum/cm} \cdot \text{s}$ ) and low powers ( $\sim 3 \cdot 10^{-11} \text{ W}$ ). It is extremely important for the study of weak space signals.

5. The spectrum reconstruction error can be particularly caused by the transition from the absorption coefficient  $\alpha$  to the wavelength  $\lambda$  accurate within 10 nm. The error can be reduced by using high accuracy data.
6. The structure with abrupt p-n and silicide junctions was received. The silicide PtSi junction received at low-temperature ( $\sim 360$  °C) is a transparent layer of 10 to 30  $\mu\text{m}$  for the overground ultraviolet radiation, and the base is the epitaxial layer of  $\sim 2$   $\mu\text{m}$  that passed short deposition ( $\sim 4$  minutes), excluding self-diffusion from the rear junction.
7. The impurity density  $9 \cdot 10^{14} \text{cm}^{-3}$  in the base ensures the contact between the oppositely-directed barriers in the point  $x_m = 0.917$   $\mu\text{m}$  and enables the change of the widths of the barriers, one at the expense of another, by external bias voltage.

The obtained structural parameters provide the samples (with the permissible passability of the glass window) with the spectral selective sensitivity within the wavelength range of 300 to 1100 nm, and open up the possibilities for the creation of new spectrometric devices which will eliminate the optical systems of the existing devices thus making them more reliable (no optical accuracy required), lightweight, inexpensive, with low material consumption and higher-performance. They will be fit for use in the field, particularly, for monitoring of large areas.

