

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ  
ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

**Հովհաննիսյան Տարոն Սամվելի**

**ՕՐՅԵԿՏՆԵՐԸ ՀԵՌԱՎԵՐԼՈՒԾՈՂ ԴՅՈՒՐԱԿԻՐ ՖՈՏՈՍՊԵԿՏՐՈՄԵՏՐԱԶԱՓԻ  
ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

**ՍԵՂՄԱԳԻՐ**

Ե.12.03 «Հեռահաղորդակցական ցանցեր, սարքավորումներ և համակարգեր»  
մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական  
աստիճանի հայցման ատենախոսության

Երևան 2017

---

---

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

**Оганнисян Тарон Самвелович**

**РАЗРАБОТКА ПОРТАТИВНОГО ФОТОСПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ  
ДИСТАНЦИОННОГО АНАЛИЗА ОБЪЕКТОВ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.12.03– “Телекоммуникационные сети, оборудование и системы”

Ереван 2017

---

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի պետական  
ճարտարագիտական համալսարանում (Պոլիտեխնիկ)

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. Ս.Խ. Խուրապլերյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝  
Ֆ.-մ.գ.դ. Ա.Գ. Ղուլյան  
Ֆ.-մ.գ.թ. Մ.Հ. Ազարյան

Առաջատար կազմակերպություն՝  
«Երևանի կապի միջոցների  
գիտահետազոտական  
ինստիտուտ» ՓԲԸ

Պաշտպանությունը կայանալու է 2017թ. հուլիսի 3-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 2017թ. հունիսի 2-ին:

046 մասնագիտական խորհրդի  
գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.



Մ.Տ. Այլազյան

---

Тема диссертации утверждена в Государственном инженерном университете Армении  
(Политехник)

Научный руководитель: д.т.н. С.Х. Худавердян

Официальные оппоненты: д.ф.-м.н. А.Г. Гулян  
к.ф.-м.н. М.Г. Азарян

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

Защита диссертации состоится 3-го июля 2017г. 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 2-го июня 2017г.

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



Մ.Ս. Այվազյան

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Проблемы продовольственной и экологической безопасности в современном мире являются актуальными как с точки зрения сохранения эко- и биобаланса окружающей среды, так и создания комфортных условий и обеспечения высокого качества жизни населения. Во многих случаях от оперативности выявления и достоверности идентификации очагов опасных природных и антропогенных загрязнений, вредных и нежелательных веществ зависят жизнь и здоровье людей.

В последние годы для решения указанных выше проблем получили широкое распространение оптические методы и соответствующие технические средства с использованием современных телекоммуникационных технологий. Такой подход позволяет решать задачи с высокой оперативностью получения информации, бесконтактно и практически в режиме реального времени (on-line). При этом как непрерывно совершенствуются элементная база генерации, формирования, передачи и приема оптических сигналов, так и расширяются возможности обработки данных, идентификации и представления информации.

Современные фотоспектрометрические приборы обеспечивают высокую точность регистрации оптического сигнала, однако из-за наличия сложных и высокоточных механических и оптических узлов они имеют высокую себестоимость, крупные габариты и низкую надежность, что и ограничивает их практическое использование в полевых условиях.

Перспективным решением проблемы является использование в фотоспектрометрах полупроводниковых двухбарьерных фотодетекторных структур с селективной спектральной чувствительностью. Именно эти структуры являются основным **предметом исследования** диссертационной работы. Применение полупроводниковых двухбарьерных фотодетекторных структур в фотоспектрометрах требует дальнейших теоретических оценок, экспериментальных исследований и новых решений, особенно с точки зрения дистанционного получения и обработки оптической информации.

**Цель и задачи работы.** Целью диссертационной работы является разработка и исследование портативного, высокочувствительного и быстродействующего фотоспектрометра на основе полупроводниковых двухбарьерных структур для дистанционного анализа оптически прозрачных объектов.

Для достижения намеченной цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработка кремниевого фотодетектора нового типа;
- моделирование и исследование фотоэлектронных процессов в фотодетекторе;
- решение схемотехнических, аппаратных и программных задач обработки, идентификации и представления информативного оптического сигнала;
- анализ возможностей дистанционного фотоспектрометрического мониторинга объектов с применением современных телекоммуникационных технологий;

- изготовление и тестирование прототипа фотоспектрометра.

**Методы исследования.** Используются основные положения теории полупроводниковых устройств и цифровых логических схем, математические модели электронных процессов, средства описания на языках логических и схемотехнических уровней, методы логического проектирования, моделирования и анализа цифровых интегральных схем.

**Научная новизна.** В процессе проведения работ получены результаты, отличающиеся новизной:

1. Разработана фотодетекторная структура  $n^+(\text{Ag-силицид}) - p(\text{Si}) - n^+(\text{Si})$  с селективной спектральной чувствительностью.
2. Теоретически и экспериментально исследованы фотоэлектронные процессы в разработанных фотодетекторах.
3. Получены аналитические выражения, описывающие спектральное распределение фототока под влиянием внешнего напряжения смещения.
4. Разработан алгоритм моделирования фотоэлектронных процессов в фотодетекторе.
5. На основе встроенных программируемых логических интегральных схем (ИС) разработана система обработки оптических сигналов.
6. Предложена концептуальная модель системы дистанционного фотоспектрометрического мониторинга оптически прозрачных объектов с применением современных телекоммуникационных технологий.
7. Изготовлен и в полевых условиях протестирован прототип портативного фотоспектрометра.

**Практическая ценность работы.** Результаты исследований и предложенные технические решения могут способствовать проектированию и изготовлению портативных фотоспектрометров для инструментального анализа оптически прозрачных объектов. Они могут иметь большой спрос для мониторинга химических и биологических материалов, продуктов питания и окружающей среды в режиме реального времени. Сферы применения фотоспектрометров включают сельское хозяйство, контроль сточных вод, клиническую диагностику, пищевую, аэрокосмическую и горнодобывающую промышленности и т.д.

Практические вопросы построения сетей сбора/передачи данных дистанционного мониторинга объектов имеют важное значение не только для инженеров, но и для других специалистов, включая экологов.

**Внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы в базовой лаборатории “Фотоэлектронные приборы в системах оптической связи” НПУА и в проекте NATO SfP EAP. SFPP 984403 (2013-2016 гг.).

На предприятии RD Alfa Microelectronics (г.Рига, Латвия) проводятся работы по коммерциализации разработанных двухбарьерных фотодетекторных структур.

Полученные результаты использованы в учебных процессах кафедры “Системы связи” НПУА и внедрены в ЗАО “Синописис Армения”.

**Достоверность полученных результатов** подтверждена математическим обоснованием приведенных научных результатов и сопоставлением результатов моделирования и практических испытаний, применением классических и современных методов и аналитических средств исследования, детальной проверкой результатов исследования, оценкой достоверности результатов моделирования.

**На защиту выносятся следующие научные положения:**

- фотодетекторная структура  $p^+(Ag\text{-силицид}) - p(Si) - n^+(Si)$  с селективной спектральной чувствительностью;
- математические выражения для описания состава спектра и интенсивности электромагнитного информативного излучения, а также зависимости фототока и энергетических параметров фотодетекторной структуры от внешнего напряжения;
- алгоритмы моделирования фотоэлектронных процессов в фотодетекторе для анализа его выходного оптического отклика;
- схемотехнические, аппаратные и программные решения регистрации, идентификации и отображения информативного сигнала фотоспектрометра;
- концептуальная модель системы дистанционного фотоспектрометрического мониторинга объектов.

**Апробация работы.** Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на:

- Международной конференции “CSIT: IEEE Computer Science and Information Technologies” (г. Ереван, Армения, 2015 г.);
- ежегодных научных конференциях НПУА (г. Ереван, Армения, 2014, 2016 гг.);
- научных семинарах кафедр “Радиотехника” и “Системы связи” НПУА (г. Ереван, Армения, 2014-2017 гг.).

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

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы, включающего 95 наименований, и трех приложений. Основной текст работы изложен на 120 страницах, включая 73 рисунка и 11 таблиц. Общий объем работы вместе с приложениями – 144 страницы. Диссертация написана на армянском языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**В первой главе** рассмотрено текущее состояние оптической спектроскопии, изложены разновидности фотоспектрометров и их составляющих узлов, представлены основные требования и ключевые факторы, определяющие эффективность практического применения, обоснована необходимость применения современных

телекоммуникационных технологий для получения информации в режиме реального времени.

Проведен критический анализ литературы по современным фотоспектрометрам. Отмечено, что фотоспектрометры обеспечивают высокую точность регистрации оптического сигнала, однако из-за наличия сложных и высокоточных механических и оптических узлов они имеют высокую себестоимость, крупные габариты и низкую надежность. Такие приборы очень трудно использовать в полевых условиях для анализа оптически прозрачных объектов.

Обоснована необходимость разработки высокочувствительного, портативного и быстродействующего фотоспектрометра. Отмечены основные пути решения, а именно: использование полупроводниковых фотодетекторов и новых технических решений для регистрации и измерения оптического сигнала фотоспектрометра.

Проанализированы технические параметры и технологические возможности создания фотодетекторов на основе кремниевых фотодиодных структур и приборов с зарядовой связью. Показаны основные преимущества фотодетекторов на основе кремниевых фотодиодных структур: быстродействие, низкая себестоимость, маленькие размеры, высокая светочувствительность, надежность, совместимость процесса изготовления с технологическим циклом производства комплементарных металл-оксид-полупроводниковых (КМОП) ИС. Кремниевые фотодиоды обеспечивают регистрацию оптического сигнала в широком диапазоне видимого и ультрафиолетового излучений (рис. 1) и имеют высокую спектральную чувствительность (рис. 2).

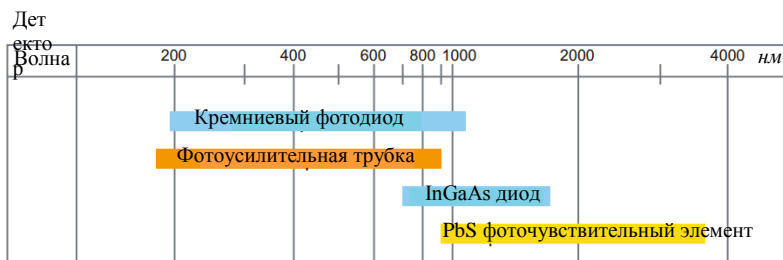


Рис. 1. Диапазон длин волн, регистрируемых различными детекторами

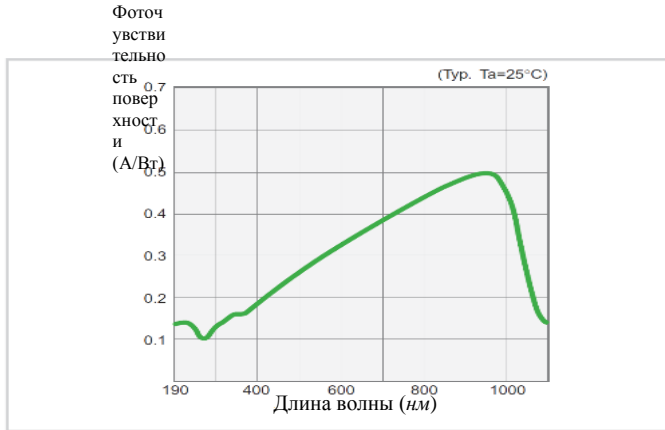


Рис. 2. Спектральная чувствительность кремниевого фотодиода

**Во второй главе** приведены результаты разработки, моделирования и исследования фотодетекторной структуры.

Предложенная структура состоит из  $n^+$ - $p$ - $n^+$  областей, причем  $p$  база охвачена истощенными областями двух противоположных барьеров (рис. 3). Истощенные области являются зонами регистрации излучения. Эффективный ток, протекающий через структуру, является разницей токов двух противоположных потенциальных барьеров. Положение точки соприкосновения двух барьеров  $x_m$  зависит от полярности и значения приложенного на структуру внешнего напряжения. Оно перемещается в направлении фоточувствительной поверхности прямо смещенного  $n^+$ - $p$  перехода (рис. 3). Потенциальная энергия в точке  $x_m$  минимальна. Поскольку перемещение  $x_m$  в направлении поверхности (точка "0" на рис. 3) расширяет область генерации тока, то разные волны вносят свой соответствующий вклад.

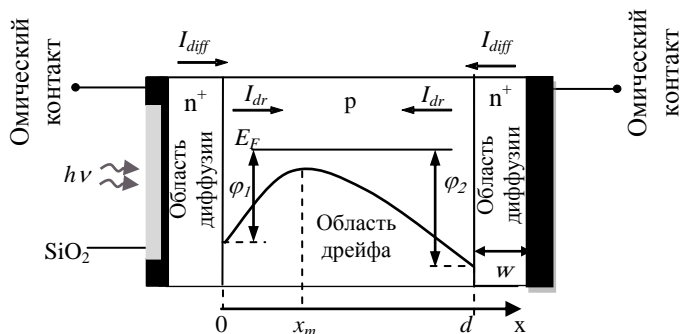


Рис. 3. Структура  $n^+$ - $p$ - $n^+$  и направления токов в ней

Информацию об отдельных волнах можно получить с использованием соответствующего алгоритма. Для разработки такого алгоритма необходимо найти

связь, существующую между положением точки  $x_m$ , приложенным напряжением  $V$ , коэффициентом поглощения  $\alpha$  и интенсивностью волны излучения  $F$ .

Решением уравнения Пуассона получено следующее выражение:

$$x_m = \frac{d}{2} - \frac{\varepsilon_0 V}{q^2 N_a d}, \quad (1)$$

где  $N_a$  – концентрация акцепторной примеси;  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества (в нашем случае – кремния);  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $q$  – заряд электрона;  $d$  – ширина р базы.

С помощью выражения (1) определяется глубина модуляции истощенных областей и положение точки  $x_m$ .

Полный фототок, протекающий через структуру в условиях облучения интегральным потоком, определяется следующим образом:

$$\sum_{i,j} I_{Ph\ i,j} = \sum_{i,j} I_{dr1\ i,j} - \sum_{i,j} I_{dr2\ i,j} - \sum_{i,j} I_{dif\ i,j} = S q \sum_{i,j} F_0(\lambda_i) \left( 1 - 2e^{-\alpha_i x_{mj}} + \frac{e^{-\alpha_i d}}{1 + \alpha_i w} \right), \quad (2)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots$  меняется с изменением длины волны излучения, а  $j = 1, 2, 3, \dots$  – с изменением напряжения смещения;  $S$  – площадь фоточувствительной поверхности;  $w$  – толщина тыльной  $n^+$  области;  $F_0(\lambda_i)$  – полный поток фотонов с длиной волны  $\lambda_i$ .

Таким образом, пошагово ( $\Delta V$ ) меняя величину приложенного напряжения, можно регистрировать спектральное изменение интенсивности излучения.

Принимаем, что максимальные значения  $x_{m2}$  и  $x_{m1}$  соответствуют изменению напряжения смещения на 1 мВ и значениям фототока  $I_1$  и  $I_2$ . Применяя закон Ламберта о поглощении в однородных средах, получаем коэффициент поглощения  $\alpha$  данной волны:

$$\alpha_i = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{I_2}{I_1}. \quad (3)$$

Используя уравнение (3) и зависимость  $\alpha = f(\lambda_i)$ , можно найти длину волны излучения, а с помощью формулы (2) определить интенсивности отдельных длин волн в поглощенном излучении:

$$F_{0i} = \frac{I_i}{q S \left( 1 - 2e^{-\alpha_i x_{mj}} + \frac{e^{-\alpha_i d}}{1 + \alpha_i w} \right)}. \quad (4)$$

В результате с помощью уравнений (1), (3) и (4) определяются коэффициент поглощения, длина и интенсивность отдельных волн.

Упрощенный алгоритм нахождения указанных величин представлен на рис. 4.



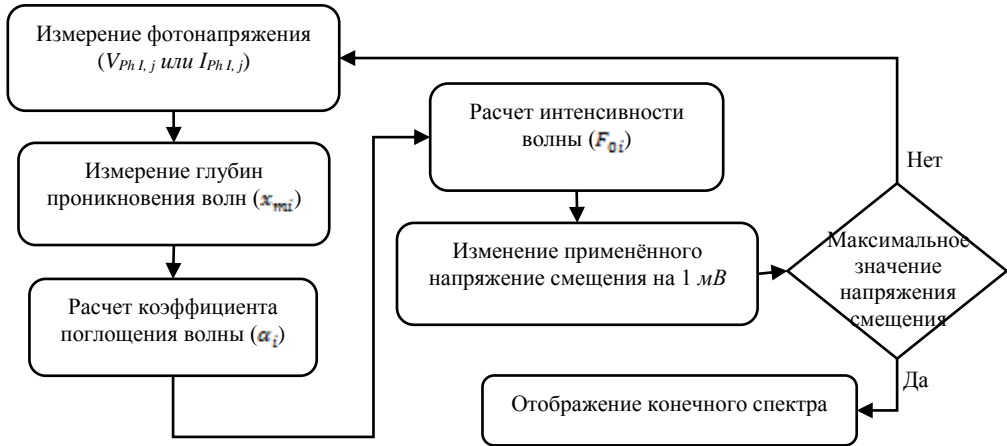


Рис. 4. Упрощенный алгоритм получения спектрального изменения интенсивности

Экспериментальные образцы предложенных фотодетекторов впервые были изготовлены на основе  $n^+$ (Ag-силицид) -  $p$ (Si) -  $n^+$ (Si) структур, зонная диаграмма и поперечное сечение которых приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Получение такой структуры совместимо с технологическим циклом производства КМОП ИС.

На рис. 6 показан общий вид изготовленного фотодетектора (технологические работы проводились на предприятии RD Alfa Microelectronics, г. Рига, Латвия).

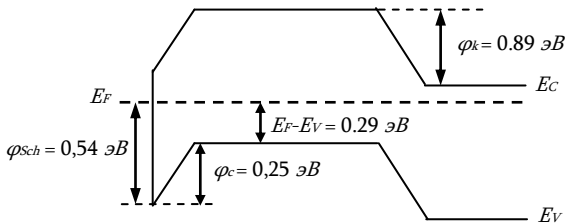


Рис. 5. Зонная диаграмма  $n^+$ (Ag-силицид) -  $p$ (Si) -  $n^+$ (Si) структур

Фототоки двух противоположно направленных барьеров в зависимости от значения применённого напряжения смещения компенсируют друг друга. На рис. 7 приведено спектральное распределение фототока экспериментальных образцов при нагрузочном сопротивлении 0,5 МОм.

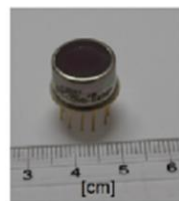
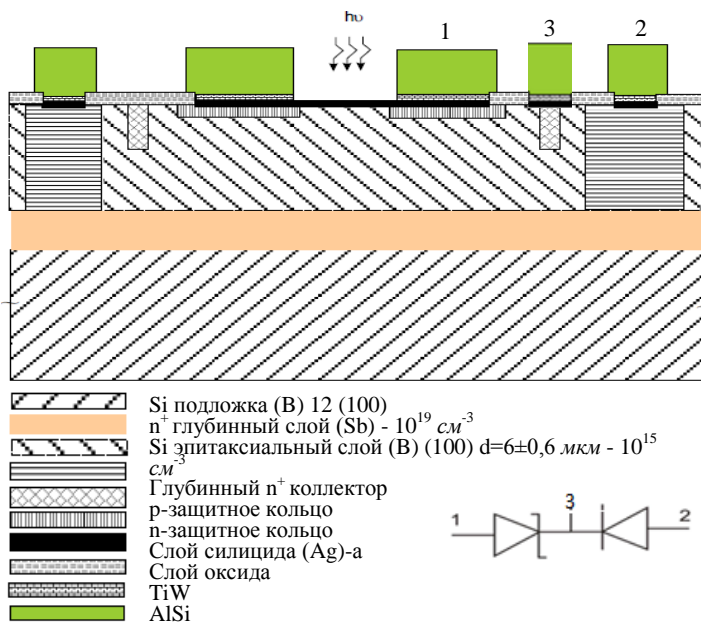


Рис. 6. Поперечное сечение n<sup>+</sup>(Ag-силицид) - p(Si) - n<sup>+</sup>(Si) структур

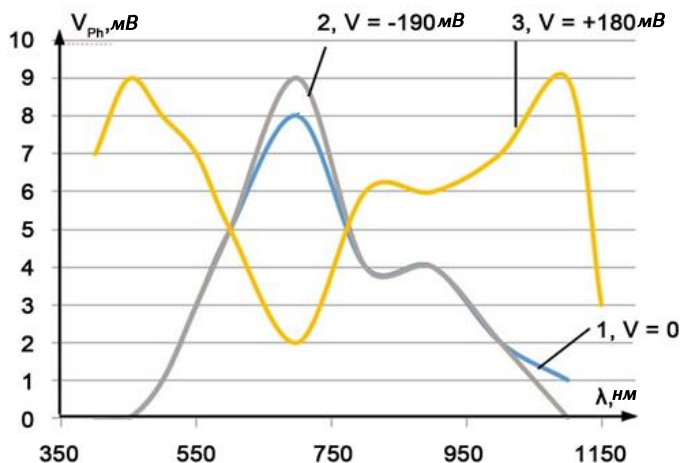


Рис. 7. Спектральное распределение фототока экспериментальных образцов

При отсутствии напряжения смещения (рис. 7, кривая 1) спектральный фототок главным образом определяется толщиной поверхностного потенциального барьера (барьер Шоттки), создающего коротковолновый пик. При нулевом значении

напряжения смещения расчетная толщина истощенной области поверхностного p - p перехода составляет примерно 1 мкм. Длинноволновый пик имеет маленькую высоту и обусловлен изменением толщины тыльного потенциального барьера, который находится на глубине 6 мкм от светочувствительной поверхности (рис. 6).

При смещении поверхностного барьера Шоттки в обратном направлении (зона регистрации расширяется), а тыльного p - n барьера – в прямом направлении, увеличивается фототок первого барьера (рис. 7, кривая 2).

При смещении тыльного барьера в обратном направлении спектральный фототок обусловлен его расширением. В этом случае длинноволновый пик становится более заметным (рис. 7, кривая 3), что связано с изменением толщины регистрирующей области. При увеличении обратного напряжения (для тыльного барьера) волны поочередно заходят в область регистрации тыльного барьера и вносят свой вклад в общий фототок.

На рис. 8 представлены темновая вольт-амперная характеристика (ВАХ) и ВАХ под воздействием света красного фотодиода марки L-813SRC-J4. Как видно, темновые токи примерно на три порядка меньше фототоков в широком диапазоне напряжений, что позволяет регистрировать малые интенсивности лучей света и провести их анализ.

Используя цифровые данные световой ВАХ, с помощью разработанного алгоритма были получены спектральные характеристики разных светодиодов (рис. 9) и люминесцентной лампы (рис. 10). Для сравнения, на рис. 10 представлена также паспортная спектральная характеристика люминесцентной лампы. Как видно из рис. 9 и 10, максимальное отклонение спектральной чувствительности составляет примерно 5...10 нм. Разрешающая способность фотодетектора в видимой области спектра при разных измерениях составляла 1..3 нм, а регистрируемый диапазон длин волн - от 350 нм до 1100 нм.

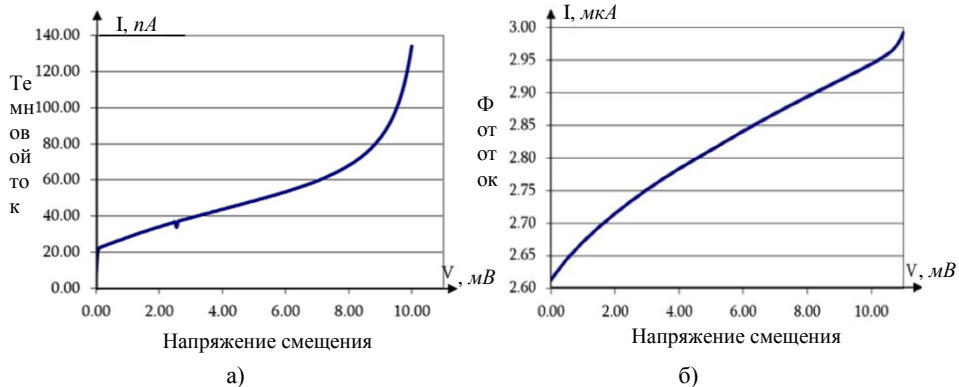


Рис. 8. Темновая (а) и световая (б) ВАХ образцов

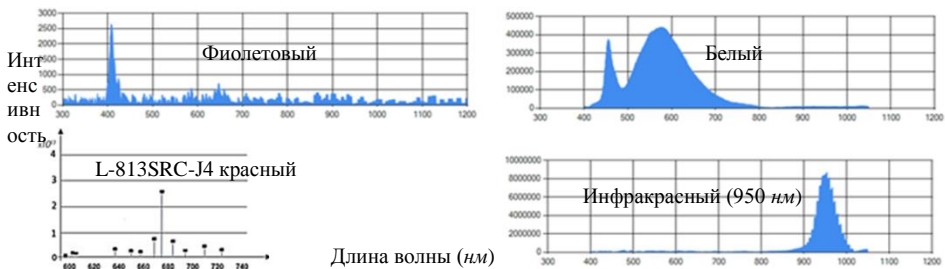


Рис. 9. Спектральные характеристики разных светодиодов

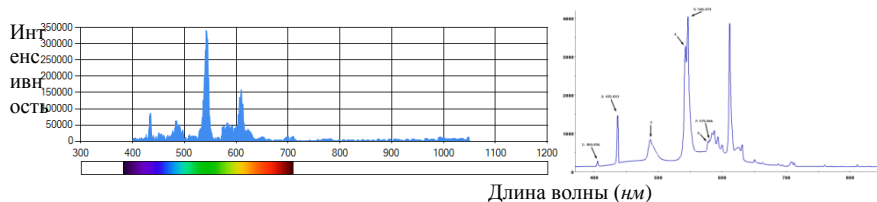


Рис. 10. Измеренный и паспортный спектры люминесцентной лампы

**В третьей главе** рассмотрен комплекс задач по практической реализации портативного фотоспектрометра на основе разработанных двухбарьерных  $p^+(Ag\text{-}Si) - n^+(Si)$  структур для дистанционного анализа оптически прозрачных объектов.

Обоснована целесообразность использования встроенных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) в качестве элементной базы цифровой обработки сигналов фотоспектрометра. Это позволяет уменьшить габариты, вес и стоимость фотоспектрометра по сравнению с аналогичными приборами с цифровой обработкой сигнала на основе альтернативных аппаратных платформ. Кроме того, использование ПЛИС дает возможность минимизации времени задержки при обработке оптических сигналов, что обеспечивает оперативность получения информации и идентификацию опасных природных и антропогенных загрязнений, вредных и нежелательных веществ.

На рис.11 и 12 соответственно показаны структура и блок-схемы предложенной системы обработки оптических сигналов фотоспектрометра.

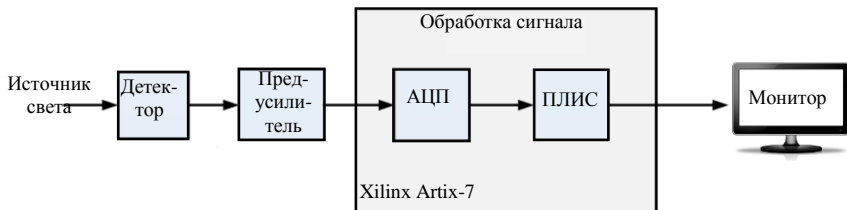


Рис. 11. Структурная схема системы обработки оптического сигнала

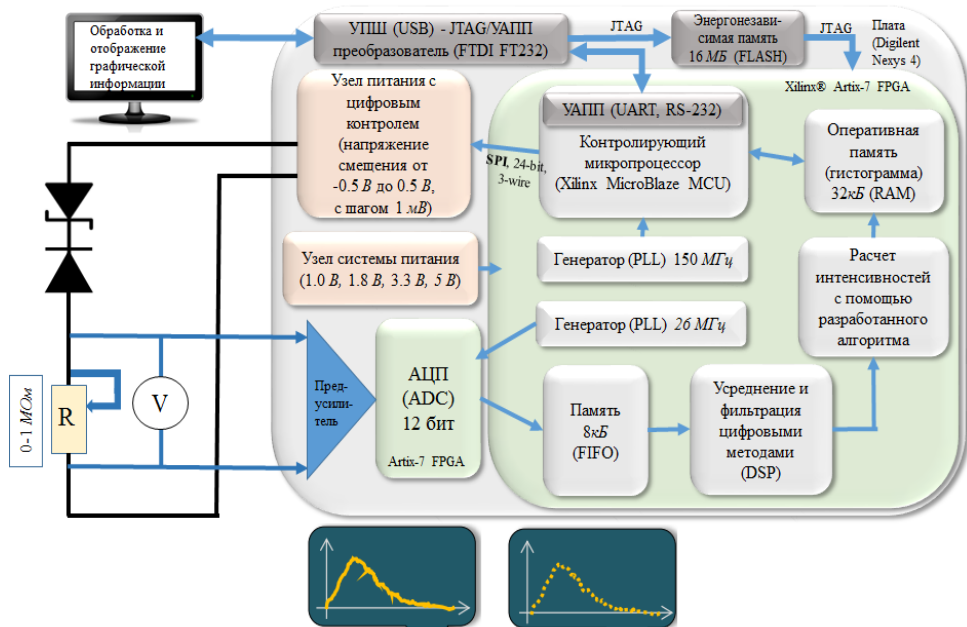


Рис. 12. Блок-схема системы обработки оптического сигнала

Для практической реализации предложенной системы обработки оптического сигнала была выбрана ПЛИС семейства Artix-7 фирмы Xilinx®, что является также эффективной аппаратной платформой для дальнейшей реализации телекоммуникационных (проводных и беспроводных) интерфейсов.

Основными функциями ПЛИС Artix-7 являются:

- приложение пошагового напряжения смещения на фотодетектор;
- аналого-цифровое преобразование (АЦП) с высокой разрешающей способностью (12 бит, 1 Мвыборка/с);

- сбор и обработка данных от соединенных датчиков;
- регистрация и хранение входных данных (буфер информации);
- полная обработка данных цифровыми методами, используя разработанные алгоритмы;
- управление и контроль процессов регистрации, обработки, хранения и передачи данных;
- обеспечение интерфейса с соединенными внешними периферическими устройствами.

Цифровые схемы в узлах предложенной системы обработки оптического сигнала были описаны языками описания аппаратуры Verilog и SystemVerilog (частично) и синтезированы в среде Xilinx® Vivado Design Suite. В таблице приведены результаты синтеза для ПЛИС Xilinx® Artix-7 (модель XC7A100T).

*Таблица*

*Результаты синтеза цифрового узла обработки сигнала для реализации на ПЛИС*

<b>Ресурсы</b>	<b>Кол-во исполыз. блоков</b>	<b>%</b>
<b>Использованные блоки ПЛИС</b>	9639	47
<b>Slices LUTs</b>	21.745	26
<b>Slices FFs</b>	28.399	34
<b>BRAM (36kb)</b>	106	36
<b>DSP48E</b>	136	43
<b>Максимальная частота</b>	201 МГц	
<b>Потребляемая мощность</b>	5,17 Вт	

Логическое моделирование было проведено в средах Xilinx® iSim (ISE Simulator) и Vivado Simulator. На рис. 13 приведены результаты приема данных с АЦП и его настройки путем динамической передачи конфигурационных данных с помощью внутреннего интерфейса DRP. Моделирование показало, что время получения одного конечного спектра (без усреднения измерений) составляет примерно 5...10 мс. При усреднении отдельных измерений или полученных конечных спектров улучшается соотношение сигнал-шум, но увеличивается общее время измерения. Параметры усреднения доступны для настройки через разработанное программное обеспечение (ПО).

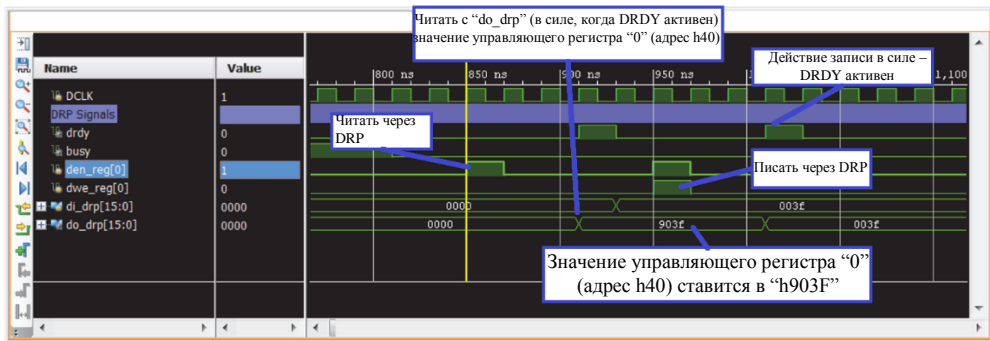


Рис. 13. Результаты логического моделирования узла обработки сигнала в среде iSim

Был изготовлен прототип компактного (определяется размерами экрана), портативного (300 г без аккумулятора питания), дешёвого (себестоимость примерно 70.000 драм) и достаточно быстродействующего (без усреднения время измерение составляет 5...10 мс) фотоспектрометра. Фотоспектрометр успешно был протестирован в лабораторных условиях. Разрешающая способность прототипа инструмента в видимой области спектра при разных измерениях составляла 1...3 нм, а регистрируемый диапазон длин волн - от 350 нм до 1100 нм, что позволяет обнаружить вещества, поглощающие или излучающие в этом диапазоне. На рис. 14 показан общий вид печатных плат узлов обработки оптического сигнала (а), источника биполярного напряжения смещения фотодетектора (б) и модуля связи GSM/GPRS+GPS (с), использованных в прототипе фотоспектрометра.

Предложена концептуальная модель системы дистанционного фотоспектрометрического мониторинга объектов, состоящая из узлов сбора первичных данных (стационарные и мобильные контрольные посты), передачи (прямая и обратная связь на базе глобальных каналов сотовой связи и местоопределения (GSM/GPRS+GPS), обработки, хранения, идентификации и представления информации (центральный сервер с общей базой данных) для пользователей различного уровня. Высококачественный и высокоскоростной канал связи обладает широкой территорией распространения, а GPS-модемы, встроенные в мобильные посты мониторинга, дают информацию не только об измеряемых параметрах, но и о координатах мобильного поста.

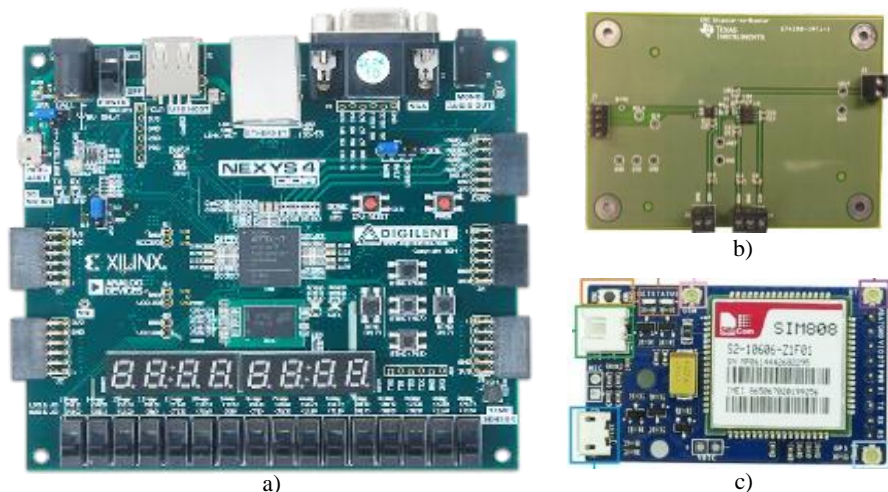


Рис. 14. Общий вид плат основных узлов прототипа спектрометра

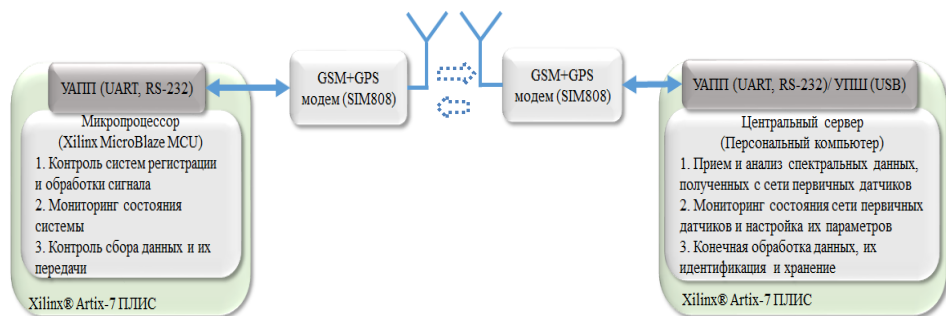


Рис. 15. Схема дистанционного фотоспектрометрического мониторинга объектов



В рамках предлагаемой концептуальной модели при помощи GSM-модема SIMCom® SIM808 первичная информация, полученная портативным фотоспектрометром, передается в центральный сервер через GSM-сеть (рис. 15). На сервере проводятся дальнейший анализ полученных спектральных данных и их идентификация (сравнение с базой эталонных спектров).

Разработано ПО UV-Visible Spectrum для отображения спектральных данных и конечного спектра, полученных с помощью фотоспектрометра, а также для обратной связи с инструментом через интерфейс JTAG (USB-JTAG конвертер) с целью контроля измерений и настройки параметров. Разработка ПО осуществлена в среде Microsoft Visual Studio 2015 (вместе с фреймворком .NET 4.6), используя языки программирования и скриптования C# 6.0 и Python 3.5. ПО предназначено для Windows 7 и более новых операционных систем. Интерфейс программы UV-Visible Spectrum представлен на рис. 16 и 17.

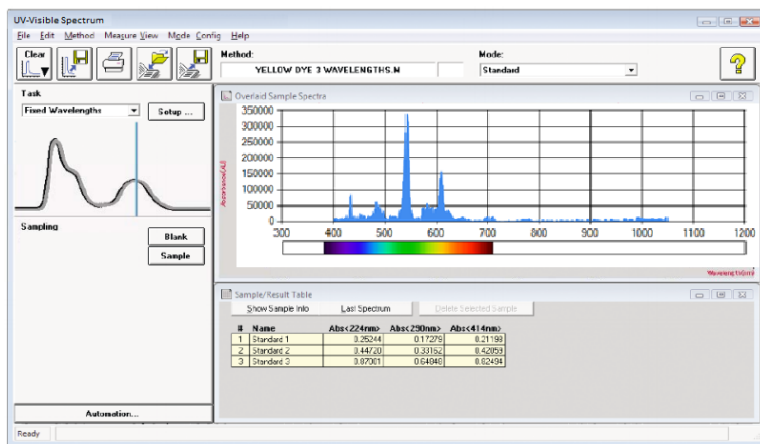


Рис. 16. Общий интерфейс программного средства UV-Visible Spectrum

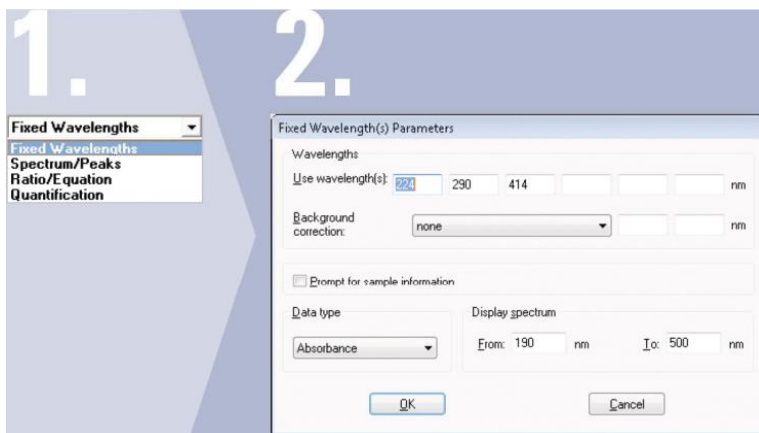


Рис. 17. Настройка параметров измерения в программе UV-Visible Spectrum

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Разработана фотодетекторная двухбарьерная полупроводниковая структура  $n^+$ (силицид Ag) -  $p$ (Si) -  $n^+$ (Si), в базовой области которой происходит процесс поглощения электромагнитного излучения со смешанным спектром, позволяющий различать отдельные волны, анализировать их интенсивности и количественно оценить характеристики оптически прозрачных объектов. Получение такой структуры совместимо с технологическим циклом производства КМОП ИС [4, 7].
2. Получены аналитические выражения, описывающие спектральное распределение фототока фотодетекторной структуры под влиянием внешнего напряжения смещения [2, 6, 8].
3. Предложен алгоритм обработки информативного оптического сигнала разработанной фотодетекторной структуры для пошаговой регистрации конечной спектральной зависимости интенсивности излучения [3-4].
4. Изготовлены образцы предложенных фотодетекторов на основе  $n^+$ (Ag-силицид) -  $p$ (Si) -  $n^+$ (Si) структур, исследованы их спектральные характеристики и выявлены основные фотоспектрометрические возможности [4, 7].
5. Созданы составляющие узлы портативного фотоспектрометра на основе двухбарьерных фотодетекторов для обработки, идентификации, хранения и отображения выходного оптического отклика. Разработанный аппаратный узел цифровой обработки оптического сигнала описан языками Verilog и SystemVerilog, синтезирован в среде Vivado Design Suite<sup>®</sup> и реализован на основе встроенных программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) [1, 5].
6. Для отображения спектральных данных и получения конечного спектра разработан программный продукт UV-Visible Spectrum, реализованный в среде Microsoft<sup>®</sup> Visual

Studio 2015 с применением языков программирования и скриптования C# 6.0 (вместе с фреймворком .Net 4.6) и Python 3.5.

7. Предложена концептуальная модель системы дистанционного фотоспектрометрического мониторинга объектов, состоящая из узлов сбора первичных данных, передачи (прямая и обратная связь на базе глобальных каналов сотовой связи и местоопределения GSM/GPRS+GPS), обработки, хранения и представления информации.
8. В рамках предлагаемой концептуальной модели при помощи GSM/GPRS-модема первичная информация, полученная фотоспектрометром, передается в центральный сервер через GSM-сеть. На сервере проводится дальнейший анализ полученных спектральных данных.
9. Изготовлен и в полевых условиях протестирован прототип компактного (определяющими размерами экрана), портативного (300 г без аккумулятора питания), дешевого (себестоимость порядка 70.000 драм) и быстродействующего (продолжительность одного измерения 5...10 мс) фотоспектрометра. Разрешающая способность прототипа в видимой области спектра при разных измерениях составляла 1...3 нм, а регистрируемый диапазон длин волн – 350...1100 нм [4, 7].

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

1. Krrikyan H., Hovhannisyan T., Manukyan S. Prototyping System for USB3.0 Link Layer Using Synthesizable Assertions and Partial Reconfiguration // IEEE Computer Science and Information Technologies (CSIT 2015), 28 Sept.-2 Oct. 2015.-Yerevan, Armenia, 2015.-P. 19-22.
2. Խոդավերդյան Ա.Խ., Առուստամյան Վ.Ե., Դոխտյան Ժ.Գ., Հովհաննիսյան Տ.Ս., Մեհրաբյան Ն.Բ. Օպտիկական ճառագայթի սպեկտրային վերլուծություն կիսահաղորդչային ֆոտոդետեկտորով // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.-Մաս 1.-Երևան, 2015.-էջ. 263-271:
3. Khudaverdyan S., Hovhannisyan T., Meliqyan N., Mehrabyan N., Tsaturyan S., Khachatryan M., Vaseashta A. On the Model of Spectral Analysis of Optical Radiation // Journal of Electromagnetic Analysis and Applications.-2016.-Vol. 8, № 2.-DOI:10.4236/jemaa.2016.82003.-P. 23-32.
4. Hovhannisyan T.S. A New Method for Optical Spectroscopy // Proceedings of NPUA: Information Technologies, Electronics, Radio Engineering.-Yerevan, 2016.-№ 2.-P. 107-117.
5. Melikyan V.Sh., Krrikyan H.R., Hovhannisyan T.S., Babayan D.R. Synthesizable Assertions for Clock Domain Crossing Verification for the USB Prototype // Proceedings of the Republic of Armenia NAS and NPUA. Series of Technical Sciences.- 2016.-Vol. 69, № 2.-P.138-150.
6. Խոդավերդյան Ա.Խ., Խաչատրյան Մ.Գ., Հովհաննիսյան Տ.Ս., Մեհրաբյան Ն.Բ. Սպեկտրալուսաչափական հնարավորությամբ սիլիցիումային երկարգեղջ կառուցվածք // ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխնիկական գիտությունների սերիա.-2016.-Հատոր 69, № 4.-էջ. 393-402:

7. Khudaverdyan S., Meliqyan V., Hovhannisyan T., Khudaverdyan D., Vaseashta A. Identification and Analysis of Hazardous Materials Using Optical Spectroscopy // Optics and Photonics Journal.-2017.-Vol. 7, № 1.- DOI: 10.4236/opj.2017.71002.-P. 6-17.
8. Խոսրոսյան Ա.Բ., Խաչատրյան Մ.Գ., Հովհաննիսյան Տ.Ս., Մեհրաբյան Ն.Բ. Երկարազեղ կառուցվածքներով ֆոտոդետեկտորներում սպեկտրային ընտրողական զգայնության հնարավորությունների ուսումնասիրումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու.-Երևան, 2017.-Մաս 1.-Էջ. 390-395:

### ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Ժամանակակից ֆոտոսպեկտրաչափերը լայն կիրառություն են գտել մարդու գործունեության տարբեր ոլորտներում, ինչպիսիք են շրջակա միջավայրի պաշտպանությունը, նյութագիտությունը, քիմիան, մոլեկուլային կենսաբանությունը, բիոքիմիան և այլն՝ լուծելով հեռահայտնաբերման և հեռանույնականացման խնդիրներ:

Ֆոտոսպեկտրաչափը, կախված կառուցվածքից, ղեկավարումից և կարգաբերումից, ի վիճակի է որոշել օպտիկապես թափանցիկ միջավայրերում խառնուրդների տիպերը և դրանց քանակությունները՝ հիմնվելով այնքի ինտենսիվությունների սպեկտրային կախվածության վրա: Սակայն ներկայումս շուկայում առկա ֆոտոսպեկտրաչափերի մեծ մասն ունեն մի շարք թերություններ. 1. մեխանիկական և օպտիկական բարդ և ճշգրիտ հանգույցների կիրառումը և պարբերաբար կարգաբերման անհրաժեշտությունը, 2. հուսալիության պակասը, 3. չափերը և քաշը, 4. գինը, 5. կառավարման, չափումների մշակման և պահպանման, էկրանի վրա սպեկտրային տվյալների պատկերման համար արտաքին հանգույցի անհրաժեշտությունը, 6. ճկունության ցածր աստիճանը: Արդի պահանջների պայմաններում դրանք սահմանափակում են ֆոտոսպեկտրաչափերի կիրառությունը: Նշված թերությունները թույլ չեն տալիս ապահովել ներկայումս խիստ պահանջված, դաշտային պայմաններում, մեծ տարածությունների վրա իրականացվող հեռավերլուծություն: Այդտեղ անհրաժեշտ են էժան, արագագործ, փոքրաչափ և դյուրակիր, սպեկտրային բարձր զգայունությամբ առաջնային տվիչներ՝ համալրված ազդանշանի մշակման, տեղորոշման և հեռակապի հանգույցներով:

Նշված թերությունների վերացման ճանապարհին ատենախոսի կողմից կատարվել են հետևյալ աշխատանքները՝

1. Մշակվել է երկարազեղ կիսահաղորդչային ֆոտոդետեկտորային  $n^+(Ag\text{-ի սիլիցիդ}) - p(Si) - n^+(Si)$  կառուցվածք, որի բազային տիրույթում տեղի է ունենում խառը սպեկտրով էլեկտրամագնիսական ճառագայթի կլանման գործընթաց, ինչը թույլ է տալիս տարբերակել առանձին այիքներ, վերլուծել դրանց

ինտենսիվությունները և քանակապես գնահատել օպտիկապես թափանցիկ օբյեկտների բնութագրերը: Կառուցվածքի ստացումը համատեղելի է ԿՄՕԿ ԻՍ-երի արտադրության տեգնոլոգիական ցիկլի հետ [4, 7]:

2. Ստացվել են արտաքին շեղման լարման ազդեցության պայմաններում ֆոտոդետեկտորային կառուցվածքի ֆոտոհոսանքի սպեկտրային բաշխվածությունը նկարագրող արտահայտություններ [2, 6, 8 ]:
3. Առաջարկվել է մշակված ֆոտոդետեկտորային կառուցվածքի համար օպտիկական ինֆորմատիվ ազդանշանի մշակման այգորիթմ՝ ճառագայթի ինտենսիվության վերջնական սպեկտրային կախվածությունը քայլ առ քայլ ստանալու նպատակով [3-4]:
4. Պատրաստվել են առաջարկված  $n^+(Ag\text{-ի սիլիցիդ}) - p(Si) - n^+(Si)$  կառուցվածքով ֆոտոդետեկտորների նմուշներ, հետազոտվել են դրանց սպեկտրային բնութագրերը և բացահայտվել են հիմնական ֆոտոսպեկտրաչափական հնարավորությունները [4, 7]:
5. Ստեղծվել են երկարգեղք ֆոտոդետեկտորների վրա հիմնված դյուրակիր ֆոտոսպեկտրաչափի հանգույցներ՝ ելքային օպտիկական արձագանքի մշակման, նույնականացման, պահպանման և արտապատկերման համար: Օպտիկական ազդանշանի թվային մշակման սարքային հանգույցը նկարագրվել է Verilog և SystemVerilog լեզուներով, սինթեզվել է Vivado Design Suite՝ միջավայրում և իրագործվել է վերածրագրավորվող թվային փականների մատրիցի (ՎԹՓՄ, ռուս. ПЛИС, անգլ. FPGA) հիման վրա [1, 5]:
6. Սպեկտրային տվյալների արտապատկերման և վերջնական սպեկտրի ստացման համար մշակվել է UV-Visible Spectrum ծրագրային գործիքը, որն իրագործվել է Microsoft® Visual Studio 2015 միջավայրում՝ C# 6.0 (.Net 4.6 ֆրեյմվորքի հետ միասին) և Python 3.5 ծրագրավորման և սկրիպտավորման լեզուների կիրառմամբ:
7. Առաջարկվել է օբյեկտների ֆոտոսպեկտրաչափական հեռամոնիտորինգի համակարգի մոդել, որը բաղկացած է նախնական տվյալների հավաքագրման, տեղեկատվության փոխանցման (GSM/GPRS+GPS բջջային կապի և տեղորոշման գլոբալ կապուլիների վրա հիմնված ուղիղ և հակադարձ կապ), մշակման, պահպանման ու արտաբերման հանգույցներից:
8. Առաջարկվող մոդելի շրջանակներում GSM/GPRS մոդեմի օգնությամբ ֆոտոսպեկտրաչափով ստացված նախնական տեղեկատվությունը GSM ցանցով փոխանցվում է կենտրոնական սերվերին, որտեղ իրականացվում է ստացված սպեկտրային տվյալների հետագա վերլուծությունը:
9. Պատրաստվել և դաշտային պայմաններում փորձարկվել է փոքրաչափ (որոշվում է էկրանի չափերով), դյուրակիր (300 գրամ առանց սնուցման մարտկոցի), էժան (ինքնարժեքը մոտ 70.000 դրամ) և արագագործ (մեկ չափման տևողությունը մոտ 5...10 մկ) ֆոտոսպեկտրաչափի նախատիպ: Նախատիպի թույլատրելիությունը սպեկտրի տեսանելի տիրույթում տարբեր չափումների դեպքում կազմել է 1...3 նմ, իսկ այլքի երկարությունների գրանցվող միջակայքը՝ 350...1100 նմ [4, 7]:

## TARON SAMVEL HOVHANNISYAN

### DEVELOPMENT OF A PORTABLE PHOTOSPECTROMETER FOR REMOTE ANALYSIS OF OBJECTS

#### SUMMARY

Modern photospectrometers are widely used in different spheres of human activity, such as protection of natural environment, materials science, chemistry, molecular biology, biochemistry etc., solving problems of remote detection and identification.

Photospectrometers, depending on structure, control, configuration adjustment, can determine types of mixtures and their amount in optically transparent environments basing on spectral dependency of intensities of waves. But the most of the photospectrometers currently available in the market have many disadvantages: 1. the use of complex and precise optical and mechanical parts and the need in periodical calibration, 2. the lack of reliability, 3. the sizes and the weight, 4. the price, 5. the necessity of external block for control, processing and storage of measurements and displaying of spectral data on monitor, 6. the low level of flexibility. They do not fulfil the modern needs of many applications and limit the usage of photospectrometers. The mentioned disadvantages make it very difficult to provide currently very demanded remote analysis performed in field conditions, on long distances. There a cheap, responsive and high-performance, compact and portable primary sensor with high spectral sensitivity is required, equipped with signal processing, geolocation and telecommunication blocks.

On the way of solving the mentioned problems, the following results have been achieved in result of work done by the dissertator:

1. A dual-barrier semiconductor photodetector  $n^+(\text{silicide of Ag}) - p(\text{Si}) - n^+(\text{Si})$  structure has been developed, in base region of which happens the process of absorption of electromagnetic radiation with mixed spectrum, which allows to distinguish separate waves, analyze intensities of those and quantitatively evaluate the characteristics of optically transparent objects. The creation of structure is compatible with technological cycle of CMOS ICs production [4, 7].
2. Expressions describing the spectral distribution of photocurrent of photodetector structure under the influence of applied external bias voltage have been received [2, 6, 8].
3. For the developed photodetector structure an algorithm processing the optical informative signal has been proposed to receive the final spectral dependency of intensity of radiation, step by step [3-4].
4. Samples of photodetector with proposed  $n^+(\text{silicide of Ag}) - p(\text{Si}) - n^+(\text{Si})$  structure have been made, spectral characteristics of those have been researched and basic photospectrometric capabilities have been revealed [4, 7].
5. Blocks of portable photospectrometer based on dual-barrier photodetectors have been created to perform processing, identification, storage and displaying of output optical response. The hardware block for digital processing of optical signal has been described in Verilog and SystemVerilog languages, synthesized in Vivado Design Suite<sup>®</sup> environment and implemented in array of field-programmable logic gates (FPGA) [1,5].

6. To receive the final spectrum and display the spectral data UV-Visible Spectrum software tool has been developed, which has been implemented in Microsoft® Visual Studio 2015 environment using C# 6.0 (together with .Net 4.6 framework) and Python programming and scripting languages.
7. A model of system for photospectrometric remote monitoring of objects has been proposed, which consists of blocks for acquisition of initial data and for transfer (direct and reverse connection based on global channels of mobile communication and geolocation GSM/GPRS+GPS), processing, storage and displaying of information.
8. In the framework of the proposed model, with help of GSM/GPRS modem the initial information received by photospectrometer is transferred to central server through GSM network, where the further analysis of received spectral data is performed.
9. A compact (derived from the size of display), portable (300 g without supply battery), cheap (cost price about 70.000 *dram*), responsive and high-performance (duration of a single measurement about 5...10 *ms*) prototype of photospectrometer has been made and tested in field conditions [4, 7].

A handwritten signature in black ink, consisting of a series of loops and a long horizontal stroke extending to the right.