

**ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՀԱՆՐԱՊԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿՐԹՈՒԹՅԱՆ, ԳԻՏՈՒԹՅԱՆ,
ՄՇԱԿՈՒՅԹԻ ԵՎ ՍՊՈՐՏԻ ՆԱԽԱՐԱՐՈՒԹՅՈՒՆ**

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

Մակարյան Էլյա Ավետիքի

**ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՏԻՐՈՒՅԹԻ ՍՊԵԿՏՐԻ ՀԵՌԱՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ
ՖՈՏՈՂԵՏԵԿՏՈՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ**

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

ՄԵՂՍԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2025

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ, КУЛЬТУРЫ И СПОРТА
РЕСПУБЛИКИ АРМЕНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ**

Макарян Эля Аветиковна

**РАЗРАБОТКА ФОТОДЕТЕКТОРА ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО
СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
05.12.03 – "Телекоммуникационные сети, устройства и системы"

ЕРЕВАН 2025

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական
համալսարանում

Գիտական ղեկավար՝ տ.գ.դ. պրոֆեսոր Ս. Խ. Խուդավերդյան

Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝ տ.գ.դ., պրոֆ. Հովհաննես Ավագի Գոմցյան
տ.գ.թ. Արմեն Գազիկի Այվազյան

Առաջատար կազմակերպություն՝ Հայ-Ռուսական համալսարան

Ատենախոսության պաշտպանությունը տեղի կունենա 2025թ. դեկտեմբերի 26-ին,
ժամը 14⁰⁰-ին, ՀԱՊՀ-ում գործող «Ռադիոտեխնիկայի և էլեկտրոնիկայի» 046
Մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցեն՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 17
մասնաշենք):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ-ի գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքված է 2025թ. նոյեմբերի 22-ին:

046 մասնագիտական խորհրդի
Գիտական քարտուղար, տ.գ.թ.  Բենիամին Ֆելիքսի Բադալյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете
Армении (НПУА)

Научный руководитель: д.т.н. Сурик Хачикович Худавердян


Официальные оппоненты: д.т.н. Оганес Авакович Гомцян
к.т.н. Армен Гагикович Айвазян

Ведущая организация: Российско-Армянский университет

Защита диссертации состоится 26-го декабря 2025г. в 14⁰⁰ ч. на заседании
Специализированного совета 046 - "Радиотехники и электроники", действующего при
Национальном политехническом университете Армении, по адресу: 0009, г. Ереван, ул.
Теряна, 105, корпус 17.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.

Автореферат разослан 22-го ноября 2025г.

Ученый секретарь
Специализированного совета 046 к.т.н.  Бениамин Феликсович Бадалян

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Дистанционный анализ оптического спектра играет важную роль в системах мониторинга окружающей среды, в промышленности, медицине, при проведении научных исследований.

Традиционные спектрометры, основанные на дифракционных решетках и призмах, имеют высокую стоимость и большие габариты, что ограничивает их применение для дистанционного мониторинга.

В данной работе предлагаются методы разработки новых типов спектрофотометрических и нетрадиционно высокочувствительных полупроводниковых фотодетекторов, основанных на кремниевых структурах с двумя противоположными потенциальными барьерами. Такой подход позволит, с одной стороны, исключить использование сложных оптических систем в спектрофотометрии, обеспечив высокую чувствительность, низкие затраты и компактные размеры, с другой — регистрировать слабый оптический сигнал, что очень важно для изучения едва заметных, но важных процессов на поверхности Земли и в космическом пространстве. Дальнейшее совершенствование таких приборов требует дополнительных исследований, чему и посвящена данная работа. Дополнительно рассматриваются способы передачи полученных спектральных данных для последующего анализа. В отличие от традиционных решений, где используются локальные вычисления, в данной работе исследуются методы безопасного удаленного доступа, включая **RDP** (Remote Desktop Protocol) что позволяет минимизировать риск утечки данных и повысить надежность системы. Такой подход делает возможным проведение мониторинга в реальном времени с защищенным доступом к результатам измерений из удаленных аналитических центров. Такое решение открывает перспективы для автономных систем экологического контроля, промышленного мониторинга и медицинской диагностики, обеспечивая не только высокую точность измерений, но и защиту передаваемых данных.

Предмет исследования. В диссертации рассматриваются функциональные возможности двухбарьерных фотодетекторов, принципы работы и на их основе проектирование систем оптического спектрального анализа, пригодного для дистанционного мониторинга.

Методы исследования. В ходе выполнения диссертационной работы были проведены следующие исследования:

- сравнительный анализ современных систем фотометрии и их технологических решений;
- экспериментальные исследования электрофизических и фотоэлектрических свойств фотодетекторов;
- математическое моделирование электронных процессов в фотодетекторах со спектрофотометрическими и необычно высокочувствительными свойствами;
- разработка алгоритмов спектрального анализа;
- создание макета спектрофотометра, применимого в системах дистанционного мониторинга, и их тестирование.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка высокочувствительной спектрофотометрической системы дистанционного мониторинга, основанной на двух барьерных фотодетекторах.

Основные задачи:

- изучение принципов работы микроспектрометров;
- анализ спектрофотометрических и высокочувствительных характеристик двухбарьерных фотодетекторов;

- разработка программного обеспечения работы фотодетектора с возможностью дистанционного мониторинга;
- создание и протестирование прототипа системы дистанционного мониторинга.

Научная новизна. В процессе выполнения работы были получены следующие новые научные результаты:

- Кремниевый фотодетектор с p^+-p-p^+ структурой, формирующейся при контакте обеднённых слоёв потенциальных барьеров, чувствительный в спектральном диапазоне 400–1000 нм.
- Связь функциональных возможностей фотодетектора, его спектрофотометрических характеристик — изменения знака спектрального фототока и высокой фоточувствительности — с разностью высот встречных потенциальных барьеров.
- Двухбарьерный кремниевый фотодетектор, новый фотоспектрометрический метод и механизм, обеспечивающий высокую (4,2 А/Вт) фоточувствительность.
- Алгоритм автоматической регистрации выходного оптического сигнала фотодетектора и программный пакет для онлайн-исследования в среде LabVIEW.

Практическая ценность работы.

1. **Разработан высокочувствительный фотодетектор.** Регистрация слабого оптического сигнала важна для изучения едва заметных, но важных процессов на поверхности Земли и в космическом пространстве. Дальнейшее совершенствование таких приборов требует дополнительных исследований, которые проводятся в данной работе.

В работе представлены разработка и исследование двухбарьерного кремниевого фотодетектора с аномально высокой спектральной чувствительностью (до 5 А/Вт), что значительно превосходит существующие аналоги (например, кремниевые фотодиоды HAMAMATSU с максимальной фоточувствительностью около 0,7 А/Вт). Это делает устройство перспективным для применения в системах мониторинга, требующих регистрации слабых оптических сигналов.

2. **Спектральный анализ без оптических и механических компонентов.** Предложен новый метод спектрального анализа на основе двухбарьерной структуры, исключающий необходимость использования дифракционных решёток, призм, высокоточных механических систем и сложных оптических фильтров. Это упрощает конструкцию спектрометров, снижает их стоимость и повышает надёжность.

3. **Энергоэффективность и миниатюризация.** Устройство совместимо с современными микросхемными технологиями, что позволяет интегрировать его в компактные и энергоэффективные системы, такие как IoT-устройства и портативные анализаторы.

4. **Низкий уровень шумов.** Фотодетектор из-за взаимокompенсации токов встречно направленных барьеров демонстрирует низкие темновые токи (десятки пА) и высокую пороговую чувствительность, что обеспечивает возможность регистрации слабых сигналов.

5. **Применение в мониторинговых системах.** Разработанный фотодетектор может быть использован в системах дистанционного мониторинга окружающей среды, в промышленности, медицине и космических технологиях.

Например:

- контроль загрязнения воды и воздуха (обнаружение нефтепродуктов, фенолов, тяжёлых металлов);
- медицинская диагностика (спектральный анализ крови и тканей);
- космические исследования (наблюдение за Землей и другими объектами).

Достоверность полученных результатов:

1. **Экспериментальная проверка.** Результаты подтверждены лабораторными испытаниями с использованием высокоточного оборудования (Keithley 6340, E7-25), монохроматора фирмы Кар-Цейс. Проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) и спектральной чувствительности.

2. **Теоретическое обоснование.** Работа включает математическое моделирование электронных процессов в двухбарьерной структуре путём решения уравнения Пуассона и непрерывности, а также анализ распределения фототока. Полученные теоретические зависимости согласуются с экспериментальными данными.
3. **Сравнение с аналогами.** Параметры фотодетектора (уровень шумов, быстродействие) сравнимы с коммерчески доступными аналогами (например, фотодиодами HAMAMATSU), а по фоточувствительности многократно выше них, что подтверждает конкурентоспособность предложенных фотодетекторов. Их использование в системах мониторинга делает ее более эффективным.
4. **Воспроизводимость.** Фотодетекторы изготавливаются по традиционной кремниевой технологии, а в прототипе системы мониторинга использованы достижения интегральной схемотехники. Методика измерений детально описана. Это позволяет воспроизвести результаты в других лабораториях.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлены конструктивно-технологические условия для обеспечения необычно высокой спектральной чувствительности фотодетектора.
2. Предложен новый метод спектрального анализа без применения традиционных оптических элементов и механических систем.
3. Обоснована связь функциональных возможностей фотодетектора с разностью высот встречных потенциальных барьеров.
4. Проведено математическое моделирование в среде LabVIEW и экспериментальная проверка по данным вольт-амперных характеристик.

Публикации. По теме диссертации опубликовано восемь научных работ, две из которых - в базе данных Scopus, и две - без соавторов. Полный список работ приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы из 105 наименований. Общий объем диссертации составляет 120 страницы, в том числе 57 рисунка и 3 таблицы. Диссертация написана на армянском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследования, представлены научная новизна, практическое значение полученных результатов и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассматриваются различные типы микроспектрометров, включая устройства на основе интерферометров Фабри-Перо (ФПИ) и Майкельсона (МЭМС), а также дифракционных решеток. Приводятся примеры коммерческих и экспериментальных моделей, таких как разработки компании VTT и Unispectr, с акцентом на их компактность, высокую чувствительность и применение в различных областях: от экологического мониторинга до медицины.

Описаны основные методы получения и фильтрации спектра излучения, включая использование призм, дифракционных решеток и резонансных структур (рис. 1). Особое внимание уделено технологии изготовления микроспектрометров, в частности, применению кремниевых и других полупроводниковых материалов, а также интеграции оптических и электронных компонентов в единую структуру.



Рис. 1. Основные методы получения и фильтрации спектра излучения

Основной характеристикой микроспектрометрической технологии является совмещение различных оптических и электрических сигналов (предпочтительно в одном кристалле). Кроме того, реализация многих из вышеперечисленных принципов преобразования требует механических перемещений конструктивных элементов микроспектрометра. К этим разнообразным и часто противоречивым требованиям добавляются стандартные требования по температурной стабильности, долговременной надежности, устойчивости к колебаниям и т. д. Эти трудности частично преодолеваются применением методов полупроводниковой спектроскопии.

С этой точки зрения в данной главе рассмотрены наиболее передовые альтернативные методы выбора длины волны, такие как полупроводниковые каскадные фотодетекторы и разноцветные структуры. Обсуждены преимущества полупроводниковых фотодетекторов, включая их высокую спектральную чувствительность и компактность, а также технологические ограничения, связанные с их производством и применением.

Эксперименты проводились для создания фотодетекторов без фильтров, которые могут выбирать узкие спектры оптического диапазона. Одними из самых интересных являются

каскадный ряд фотодетекторов с различной толщиной базы и разноцветные фотодетекторы. В первом случае используется каскадный ряд фотодетекторов с разной толщиной базы для управления длиной волны. Различие в фототоках выбранных фотодетекторов каскадного ряда обусловлено разницей между группой волн, поглощаемых в фотодетекторе с широкой базой, и частично поглощаемыми в фотодетекторе с узкой базой. Минимальное значение фоточувствительности ограничивается пороговой чувствительностью. Хотя спектральная селективность этих фотодетекторов приближается к моноволновой, их производство сталкивается с технологическими вызовами.

Во втором подходе используются высокоомные слои, которые создаются на разных глубинах поверхности для поглощения цветов, соответствующих этим глубинам. Этот метод также сталкивается с технологическими трудностями, причем не только из-за сложности изготовления множества слоев, но и потому, что важны резкие переходы между этими слоями. Отсутствие точности на этих переходах может привести к размытию зарегистрированного спектра излучения.

Также были созданы фотодиоды на основе полупроводников $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$. Селективность волн в них зависит от записи групп волн, поглощаемых в высокоомных слоях. Для выборочной чувствительности к волнам эти фотодиоды имеют более высокий коэффициент поглощения в ближайшем инфракрасном диапазоне по сравнению с кремнием, что при поглощении излучения приводит к более высокой квантовой эффективности и выходному току. Кроме того, они облегчают создание фотодетекторов с вертикальными интегрированными гетеропереходами.

В слоистой структуре фотодетектора $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ селективность длины волны достигается регулированием отношения алюминия и галлия в полупроводниковой системе $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$. Это приводит к изменению запрещенной зоны AlGaAs , что, в свою очередь, изменяет спектральный максимум. В гетероструктуре большая часть запрещенной зоны предназначена для фильтрации коротких волн, в то время как активный слой фотодиода сконструирован для ослабления чувствительности к определенным волнам.

В главе обсуждены также перспективы применения микроспектрометров в различных областях, включая экологию (мониторинг загрязнений в оптически прозрачных объектах), промышленность (контроль качества), медицину (диагностика) и космические технологии. Подчеркивается важность дальнейших исследований для повышения точности и эффективности этих устройств.

Глава завершается выводом о том, что микроспектрометры представляют собой перспективное направление в науке и технике, а их развитие требует междисциплинарного подхода и инновационных решений.

Во второй главе разработана и исследована кремниевая n^+-p-n^+ структура с двумя встречными потенциальными барьерами, предназначенная для высокой фоточувствительности и спектрального анализа оптического излучения. Исследовано двухбарьерное устройство (рис. 2), в котором размеры областей n^+-p-n^+ и концентрации примесей в них выбраны так, чтобы обеспечить смыкание обеднённых слоев потенциальных барьеров в p -базе, шириной d , в точке x_m .

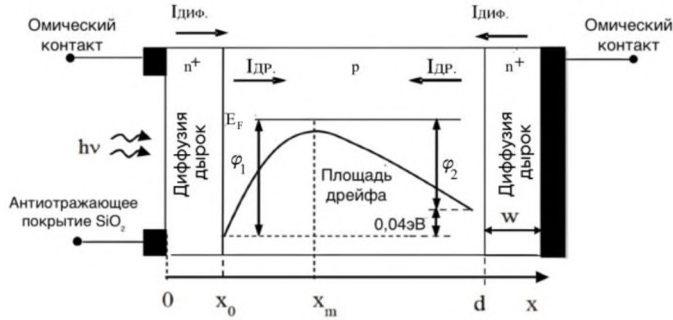


Рис.2. Поперечное сечение $n^+ - p - n^+$ структуры фотодетектора, распределение потенциалов для дырок в p – базе и направления дрейфовых и диффузионных фототоков

В $n^+ - p - n^+$ структуре согласованы глубина проникновения длинных волн и ширина активной среды для последовательной регистрации волн, а также обеспечена возможность спектрального анализа пучка. Концентрация примесей в p -базе исследуемого образца составляет $1,2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в приповерхностной области $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а в тыльной области - 10^{18} см^{-3} . В этих условиях измеренное значение разницы высот барьеров составляет $\sim 40 \text{ мВ}$, которое соответствовало расчетному значению. Левосторонний n^+ слой имеет небольшую ширину ($0,3 \text{ мкм}$) по сравнению с базой ($5,5 \text{ мкм}$), и основное поглощение излучения происходит в базе и её тыльной области.

Был подготовлен опытный образец. Изучены электрофизические и фотоэлектрические свойства структуры $n^+ - p - n^+$ с эпитаксиальным ростом базы и выявлена спектрально-избирательная чувствительность.

Решением уравнения Пуассона и непрерывности получена линейная зависимость положения точки x_m с разницей высот потенциальных барьеров $\Delta\phi$ с напряжением смещения V :

$$x_m = \frac{d - x_0}{2} - \frac{\varepsilon \varepsilon_0 (\Delta\phi - qV)}{N_d q^2 (d - x_0)},$$

где ε и ε_0 — диэлектрические проницаемости кремния и вакуума.

Фототок для данной волны равен

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

Интенсивность этой волны

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

Зависимость коэффициента поглощения α от положения x_m для выбора длины волны равна

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

где x_m - точка соприкосновения потенциальных барьеров; ϵ_0 - диэлектрические проницаемости вакуума и материала; S - фоточувствительная площадь детектора; d - ширина потенциальных барьеров; q - заряд электрона; N_a - концентрация примесей (акцепторов) в базе; $\Delta\phi$ - разность высот потенциальных барьеров; V - приложенное напряжение. Эти выражения лежат в основе алгоритма.

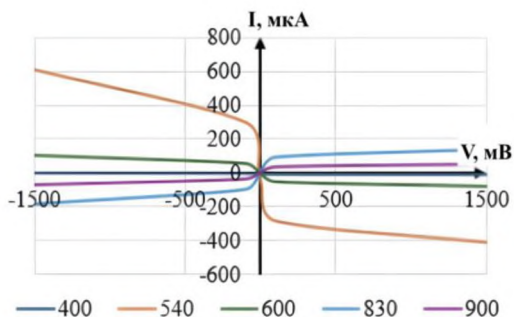


Рис. 3. ВАХ неинвертирующих образцов (длина волны указана в нм)

ВАХ измерялись с помощью точного измерительного прибора Keithley 6340. Погрешность измерения напряжения в диапазоне ± 2 В составляет 1 мкВ, точность - $\pm 0,02\%$. Погрешность измерения тока в диапазоне ± 100 мкА составляет 1 пА, точность - $\pm 0,02\%$. Напряжение изменялось в диапазоне ± 5 В с шагом 1 мВ. Прибор предотвращает нежелательные отклонения напряжения и снижает погрешности ВАХ фотодетектора при пошаговом изменении напряжения. В результате полученная ВАХ имеет чётко выраженные положительные и отрицательные токи насыщения (рис. 3).

Разница высот потенциальных барьеров проявляет значительную чувствительность к температуре отжига. Отжиг при 950°C сохраняет разницу высот барьеров, определяемую градиентом концентрации примесей по всей структуре, что дает расчетную разность потенциалов приблизительно 0,04 эВ. Это подтверждается наблюдаемой фотоэлектродвижущей силой при нулевом токе (рис. 4, кривая 2).

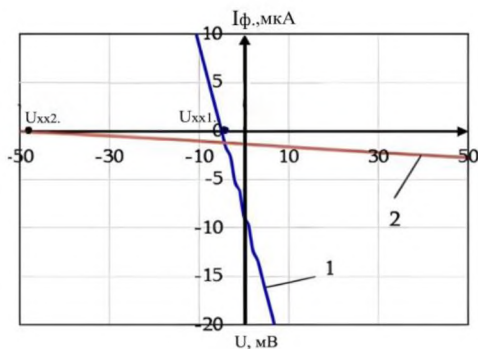


Рис. 4. ВАХ образцов после отжига при температурах 1000°C (кривая 1) и 950°C (кривая 2)

Коротковолновые (360...390 нм) и длинноволновые (670...870 нм) спектры фототока при различных напряжениях смещения показаны на рис. 5. В диапазоне напряжений от -50 до +40 мВ наблюдается инверсия спектрального фототока. Эффект инверсии исчезает после отжига при 1000°C, вероятно, из-за усиления диффузии примесей при высоких температурах, что выравнивает высоты барьеров. В результате фотоэлектродвижущая сила падает практически до нуля (рис. 4, кривая 1). При изменении напряжения смещения от положительного до отрицательного значений высота приповерхностного барьера уменьшается, становясь пропорциональной высоте заднего барьера. При напряжении от -40 мВ до +40 мВ положение точки инверсии спектрального фототока линейно зависит от напряжения смещения.

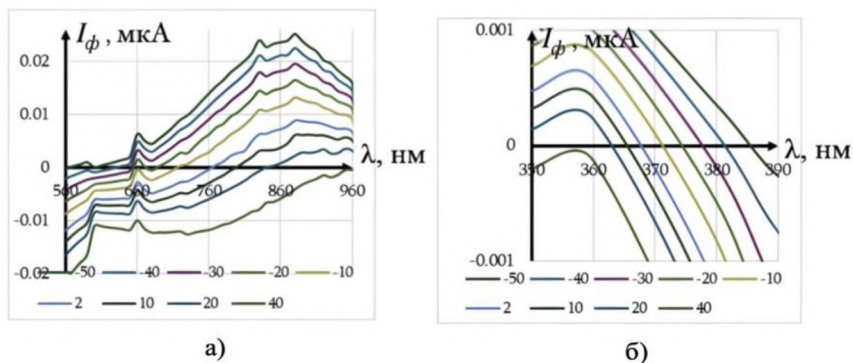


Рис. 5. Спектры длинноволнового (а) и коротковолнового (б) фототоков при различных напряжениях (напряжение указано в мВ)

Структуры, не имеющие инверсии спектрального фототока, демонстрируют обычное поведение полярности тока: положительный ток при положительном смещении, а отрицательный ток — при отрицательном смещении (рис. 6). Оба типа образцов демонстрируют отчетливые коротковолновые и длинноволновые максимумы фототока. Однако длинноволновой фототок значительно слабее, чем коротковолновой, что связано с меньшей долей поглощения длинноволновых фотонов.

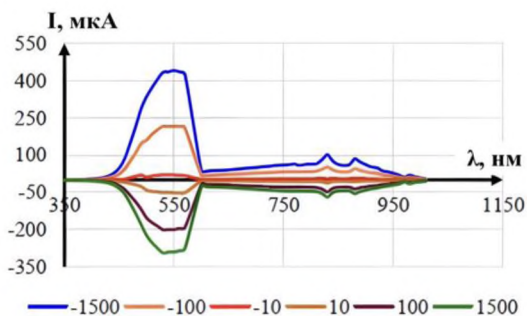


Рис. 6. Спектральные характеристики фототока при различных напряжениях (напряжение задается в мВ)

В коротковолновом максимуме (540 нм; рис. 6) приповерхностный барьер демонстрирует значительно более высокий ток насыщения, чем задний барьер для обеих полярностей напряжения (рис. 3). Эта асимметрия является результатом экспоненциального поглощения излучения, которое создает более высокие концентрации носителей в приповерхностном p^+ -слое по сравнению с задним p^+ -слоем. Максимальная компенсация встречных фототоков происходит при 600 нм (рис. 6), где токи насыщения от обоих барьеров достигают сравнительно низких значений. На более длинных волнах (830 нм и 900 нм) увеличенное поглощение в области заднего барьера приводит к почти сбалансированным токам насыщения от обоих барьеров.

Из экспериментальной зависимости спектрального фототока рассчитано усиление фототока. Усилением считалось отношение экспериментального спектрального фототока к расчетному. При расчете эффективность поглощения принималась равной 100%. Расчетный фототок обуславливался числом квантов, соответствующим спектральной мощности поглощенного пучка, которая получалась соотношением мощности данной волны и энергии кванта.

Коротковолновое усиление достигает 8×10^3 , в то время как длинноволновое усиление достигает 5×10^3 , демонстрируя исключительно высокую фоточувствительность по току (рис. 8). Относительно улучшенный длинноволновый отклик возникает из-за большего эффективного объема сбора.

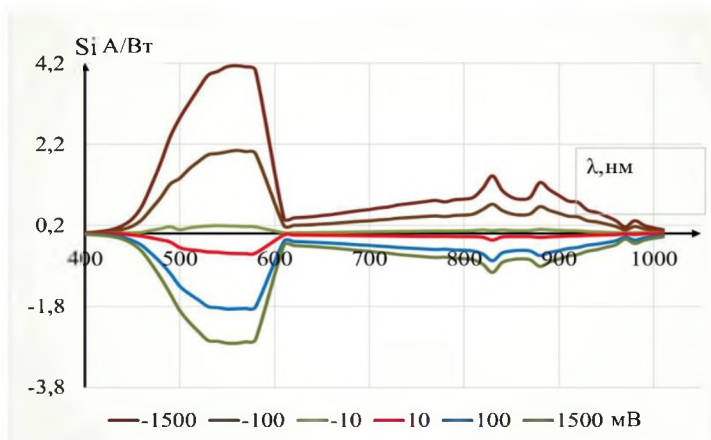


Рис. 8. Спектральная зависимость фоточувствительности структуры p^+-p-p^+

Общий механизм усиления обусловлен:

- увеличением плотности неосновных носителей в базовой области из-за инжекции электронов из прямо смещенного перехода;
- уменьшением высоты барьера прямо смещенного перехода;
- компенсацией пространственного заряда барьера фотогенерированными носителями.

Как видно из рис. 8, фоточувствительность в коротковолновой области спектра ($\lambda=570$ нм, $Si=4,2$ A/Bт) в несколько раз превышала спектральную фоточувствительность в области собственного поглощения кремния ($\lambda=850$ нм, $Si=1,4$ A/Bт). Лучшие образцы фотодиодов HAMANACU имеют фоточувствительность $\sim 0,7$ A/Bт, что в 6...7 раз меньше фоточувствительности исследуемых образцов. При расширении тыльного барьера и уменьшении ширины приповерхностного барьера общая фоточувствительность увеличивается, при этом фоточувствительность в области собственного поглощения

становится значительно больше ($\sim 12 \text{ A/BT}$), чем в коротковолновой области ($\sim 6 \text{ A/BT}$). Это связано с тем, что поглощение в приповерхностной области уменьшается и увеличивается в тыльной области.

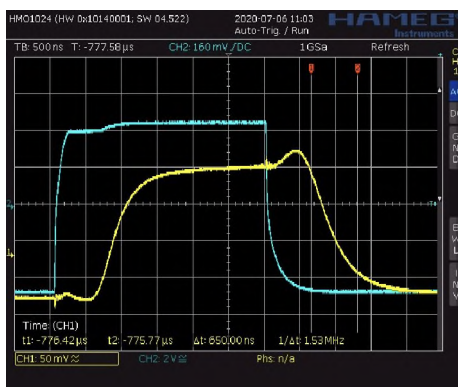


Рис. 9. Время нарастания и спада импульса фотоответа в образцах без инверсии спектрального фототока

Для определения быстродействия на образец падал прямоугольный световой импульс от красного светодиода, быстродействие которого составляло 100 МГц . На импульсном отклике фотодетектора по времени нарастания и спада фотосигнала определялось быстродействие исследуемого образца, которое составляло $1,53 \text{ МГц}$ (рис. 9). Это сопоставимо с быстродействиями на рынке существующих кремниевых р-п фотодетекторов.

Во третьей главе разработана система мониторинга, оснащенная спектрофотометрическим узлом и обеспечивающая обработку полученных результатов с использованием современных телекоммуникационных средств и цифрового моделирования процессов.

В диссертационной работе разработаны комплексные методы аппаратных и схемотехнических решений для создания оптической системы мониторинга нового поколения на базе двухбарьерных фотоприемников, оснащенной беспроводным интерфейсом управления и передачи данных.

Основное внимание уделено системе, в которой микроконтроллер считывает и обрабатывает значения напряжения и силы тока с фотодетектора, а затем передает эти данные через **WiFi**-модуль. После передачи для удаленного управления применяется протокол **RDP**, обеспечивающий доступ к системе из любого места. Смоделированы фотоэлектронные процессы, происходящие в вертикально расположенном двухбарьерном фотодетекторе под действием внешнего напряжения смещения в зависимости от характеристик проникающих волн. В условиях продольного освещения для получения спектральной зависимости интенсивности поглощаемого излучения, с использованием вышеуказанных математических моделей, был разработан алгоритм селекции отдельных волн из интегрального потока оптического сигнала при изменении внешнего напряжения смещения с шагом 1 мВ . Алгоритм учитывает основные причинно-следственные связи между коэффициентом поглощения и конструктивно-технологическими параметрами. Он позволяет получать интенсивности отдельных волн в оптическом диапазоне, где имеются смена знаков спектрального фототока и линейная зависимость положения точки смены знака от приложенного напряжения.

Для запуска алгоритма был разработан и подготовлен макет устройства спектрального анализа, в котором для анализа выходного сигнала фотодетектора использовалась плата Arduino Nano под управлением микроконтроллера. Макет был протестирован с использованием разноцветных светодиодов. Спектральная зависимость интенсивности и ее численные данные получены на экране по новому принципу. Данный метод отличается новизной и открывает перспективу дальнейшего развития направления микроспектрофотометров.

Узел измерения и анализа спектрального отклика. В рамках разработки системы оптического мониторинга была предложена комплексная структурная система измерительного узла (рис. 10), представляющая собой интегрированное решение, объединяющее аппаратные и программные компоненты для автоматизированного измерения спектральных характеристик. Данный узел обеспечивает полный цикл обработки оптического сигнала - от его регистрации до анализа и визуализации результатов. Основу системы составляют следующие ключевые компоненты:

- источник света с регулируемым спектральным составом, обеспечивающий генерацию как монохроматического, так и полихроматического излучения в широком рабочем диапазоне 350...900 нм;
- двухбарьерный кремниевый фотоприемник с коротковолновой и длинноволновой чувствительностью, выполняющий преобразование светового потока в электрический сигнал. Особенностью данного элемента является его способность сохранять стабильные характеристики при длительной эксплуатации, так как он получен традиционной кремниевой, надежной технологией;
- прецизионные аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи, образующие интерфейс между аналоговой и цифровой частями системы. Эти компоненты обеспечивают преобразование сигналов с минимальными искажениями;
- микроконтроллерная платформа с алгоритмом цифровой обработки сигналов, выполняющая функции управления всеми компонентами системы и обработки поступающих данных;
- автономный блок питания с аккумуляторной батареей и интеллектуальной системой перезарядки, обеспечивающий стабильное электропитание всех компонентов системы в различных условиях эксплуатации.

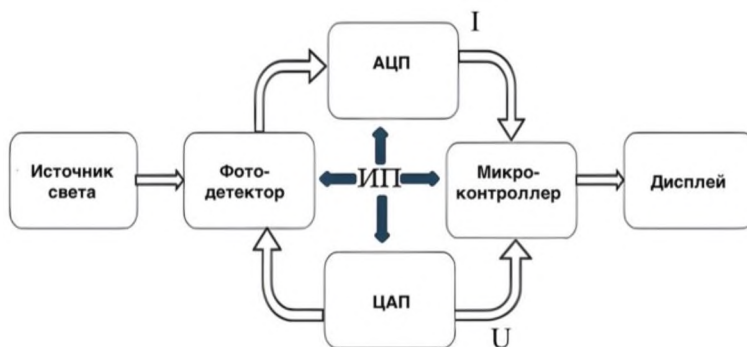


Рис. 10. Структурная схема разработанной системы (ИП - источник питания)

Для обеспечения высокой точности измерений в измерительном узле реализована специализированная процедура измерения ВАХ фотоприемника (рис. 11). Методика основана на плавном сканировании напряжения смещения с одновременной регистрацией фототока. Прецизионные АЦП и ЦАП обеспечивают высокую точность измерений, что позволяет фиксировать изменения тока величиной до 100 пА при шаге изменения напряжения 1 мВ.

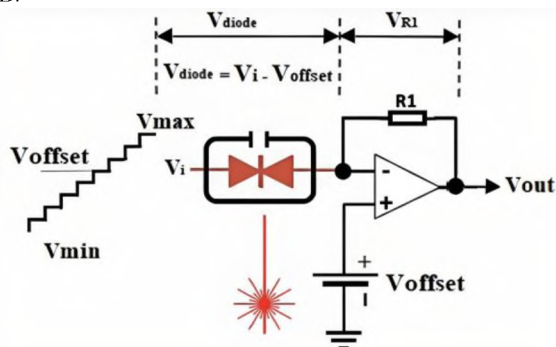


Рис. 11. Процедура измерения и обработки ВАХ фотоприемника

Обработка спектральных данных осуществляется с помощью специализированного алгоритма, реализованного в среде LabVIEW. В программном режиме путем вычислений получаем длины имеющихся волн и их интенсивности, а также зависимости фототоков от напряжения. В результате имеем спектральную зависимость интенсивности для наблюдаемых волн. Результаты измерений отображаются на экране встроенного дисплея как в виде графиков, так и в виде числовых значений. На экране, для сравнения, также отображается эталонный спектр источника света.

Для запуска алгоритма был разработан и подготовлен макет устройства спектрального анализа (рис. 12), в котором для анализа выходного сигнала фотодетектора использовалась плата Arduino Nano под управлением микроконтроллера, имеющая необходимые средства: 54 цифровых входа/выхода, 16 аналоговых входов, 4 UART, кварцевый резонатор, слот USB, слот питания, слот ICSP для программирования и кнопки сброса. Плата Arduino Nano 2560 построена на базе 8-битного микроконтроллера Atmega 2560 Atmega16U2 семейства

AVR, обеспечивающего подключение Arduino к USB-порту компьютера. При подключении к компьютеру Arduino Nano определяется как виртуальный COM-порт через USB-интерфейс. На печатной плате над оптопарой (излучатель-фотодетектор) установлен микроконтроллер. Таким образом, обеспечивается компактное расположение элементов измерительной схемы.

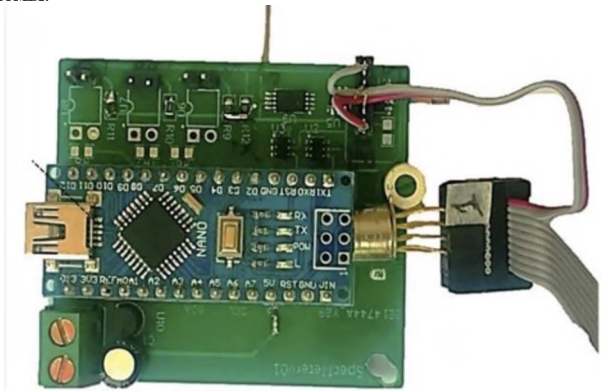


Рис.12. Модель устройства спектрального анализа

На вход алгоритма подается ступенчатое напряжение с шагом в 1 мВ, а на выходе в результате соответствующих процессов получается спектральная зависимость интенсивности излучения.

Макет был протестирован с использованием разноцветных светодиодов. На рис. 13 представлены спектральная зависимость интенсивности зеленого светодиода, полученного на экране по новому принципу, и ее численные данные. Данный метод, в котором селекция волн осуществляется одним полупроводниковым фотодетектором, открывает перспективу дальнейшего развития в области микроразмерных спектрофотометров.

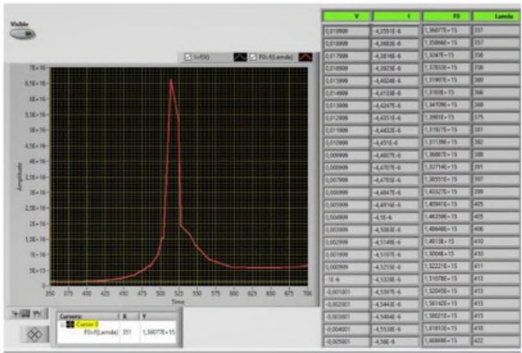


Рис. 13. Спектральная зависимость интенсивности пучка, полученная по численным данным

Для идентификации смесей методом спектрального анализа и оценки их количества были использованы протокол RDP (Remote Desktop) удаленной системы и среда графического программирования LABVIEW. RDP был создан в Microsoft для обеспечения удаленного доступа к серверам и рабочим станциям Windows. Последней версией сервера

терминалов является версия 6.1, которая включена в состав Windows 2008 Server и Windows Vista SP1. В настоящее время RDP является основным протоколом удаленного управления семейством систем Windows, и для операционной системы Microsoft существуют программы — подписки.

Дистанционное управление – самый востребованный вариант в ближайшем будущем. Это экономически эффективно, повышает производительность и позволяет пользователям получить опыт работы с удаленными рабочими столами и приложениями. Сервер удаленных рабочих столов позволяет пользователям работать, где угодно – дома, в дороге или в офисе. Удаленный пользователь (Remote user) не требует дополнительного оборудования для подключения к серверу. Все, что нужно, – это Интернет. Для подключения к удаленному компьютеру в режиме удаленной работы последний должен быть подключен к источнику питания и иметь доступ в Интернет. Необходимо иметь разрешение на подключение на дальнее расстояние (предоставляется администратором) (рис. 14).

Программа идентификации вредных веществ имеет режим сигнализации для фиксации отклонений от допустимых норм концентрации вредных веществ. С помощью программы будет создан архивный файл в формате Excel, куда будут записаны идентификационные показатели. Предоставляемая ими графика отображается на экране компьютера или мобильного телефона.

В результате реализована функция сравнения “подходит – не подходит”. Неподходящая информация передается оператору в виде тревожного сигнала (отображается на экране компьютера или мобильного телефона). Соединение GSM/GPRS используется для дистанционного управления системой.



Рис.14. Дистанционный спектральный анализ с помощью RDP

Данные передаются в диалоговом режиме посредством коротких сообщений.

С помощью представленного оптического аналитического прибора в оптически прозрачной среде можно обнаружить указанные вредные вещества и их количество. Прибор не содержит специальной дифракционной решетки или призмы, оптических узлов и прецизионных механических устройств, а также матрицы фотоприемников, характерных для обычных спектрофотометров. Благодаря разработанному фотоприемнику и алгоритму обработки выходного сигнала, а также системе дистанционного управления, пригодной для эксплуатации в полевых условиях, устройство имеет чрезвычайно низкую стоимость, малогабаритно и надежно. В этом заключается главная научно-техническая инновация.

С помощью разработанного алгоритма в условиях вертикального освещения противоположно направленной двухбарьерной структуры можно осуществлять селекцию отдельных волн из интегрального потока излучения. Алгоритм учитывает основные причинно-следственные связи между коэффициентом поглощения и конструктивно-технологическими параметрами.

Разработанный и изготовленный макет микроспектрометра был протестирован с использованием разноцветных светодиодов. Спектральная зависимость интенсивности и ее численные данные получены на экране по новому принципу. Данный метод отличается новизной и открывает перспективу дальнейшего развития направления микроразмерных спектрофотометров.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана структура фотодетектора с высокоомной подложкой и встречными потенциальными барьерами, обеспечивающая низкие темновые токи (порядка нескольких десятков пА) и низкий порог чувствительности (10^{-13} Вт·Гц^{-1/2}·см²).
2. Режим высокотемпературного отжига базового эпитаксиального слоя является критическим фактором, определяющим знак и величину сигнала фототока. Повышение температуры отжига до 950°C приводит к инверсии знака фотоотклика и значительному увеличению фоточувствительности. Оптимальный режим отжига (1000 °C, 20 минут) позволяет достичь высокой фоточувствительности.
3. Благодаря структурно-технологическим решениям, на части образцов была достигнута необычно высокая фоточувствительность на коротком ($\lambda \approx 570$ нм) и длинном ($\lambda \approx 850$ нм) спектральных максимумах фототока, составившая 4 А/Вт и 1,2 А/Вт соответственно.
4. Разработан алгоритм автоматической регистрации выходного информационного оптического сигнала фотодетектора и соответствующее программное обеспечение в среде LabVIEW.
5. Изготовлен опытный образец компактного мониторингового устройства и проведены его предварительные испытания и валидация в полевых условиях.
6. С использованием технологии WiFi и протокола TCP/IP обеспечен непрерывный и автоматический поток измерительных данных от исследуемого объекта в центр анализа без непосредственного вмешательства оператора.
7. Применена технология удаленной работы, позволяющая в реальном времени дистанционно управлять устройством и контролировать процесс измерений непосредственно из среды LabVIEW, что позволило расширить применимость устройства в полевых и труднодоступных условиях. Предложенное решение объединяет автоматизированный сбор и передачу данных (WiFi/IP) с интерактивным контролем со стороны оператора (RDP), создавая комплексную и гибкую систему мониторинга. [1...7].

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Хачатрян М.Г., Макарян Э.А., Худавердян А.С., Худавердян Д.С. Особенности оптоэлектронных характеристик двухбарьерных структур // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2021. - №1. - С. 79-91. DOI: 10.53297/18293336-2021.1-79
2. On the Selective Spectral Sensitivity of Oppositely Placed Double-Barrier Structure/ S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, G. Ayvazyan, M. Khachatryan, E. Makaryan // Photonics. - 2022. - V. 9 (8). - P. 558-568. ISSN 2304-6732. DOI: 10.3390/photonics9080558
3. Худавердян С.Х., Хачатрян М.Г., Амбарцумян А.В., Макарян Э.А. Создание программного пакета для работы фотодетектора с противоположно расположенным двойным потенциальным барьером и спектрального анализа излучения // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2023. - №1. - С. 87 – 96. DOI: 10.53297/18293336-2023.1-87
4. Худавердян С.Х., Айвазян М.Ц., Хачатрян М.Г., Макарян Э.А. Разработка и исследование макета микроспектрометра // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2023. - № 2. - С. 90-98. DOI:

10.53297/18293336-2023.2-90 19

5. New Functions of a Semiconductor Photodetector with a High-Resistivity Layer / S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, G. Ayvazyan, M. Khachatryan, E. Makaryan, L. Matevosyan // Proceedings of the Eighth International Symposium on Dielectric Materials and Applications (ISyDMA'8). Springer, Cham. - 2025. - P. 81-89. DOI: 10.1007/978-3-031-84809-4_6
6. Система оптического мониторинга на основе двухбарьерных кремниевых фотоприемников / Худавердян С.Х., Агабекян А.В., Петросян И.А., Хачатрян М.Г., Макарян Э.А. // Вестник НПУА: Информационные технологии, электроника, радиотехника. - 2025. - № 1. - С. 91-99. DOI:10.53297/18293336-2025.1-91
7. Մակարյան Է.Ա. Հակագրող պոտենցիալ արգելքներով ֆոտոդետեկտորային կառուցվածքի ՎԱԲ –ի ու ՎՖԲ – ի հետազոտումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր. Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան, 2022. - Մաս 1. - էջ 291 - 298:
8. Մակարյան Է.Ա. Կենսաբժշկական սարքերի կիրառմամբ անլար համակարգի նախագծումը // ՀԱՊՀ Լրաբեր, Գիտական հոդվածների ժողովածու. - Երևան. - 2019. - Մաս 1.- էջ 218 - 224.

ԱՄՓՈՓԱԳԻՐ

Վերջին տարիներին հեռամոնիտորինգի ոլորտը զգալի առաջընթաց է գրանցել՝ պայմանավորված տարբեր ոլորտներում իրական ժամանակում, շրջակա միջավայրի մոնիտորինգից մինչև առողջապահություն, տվյալների արդյունավետ հավաքագրման անհրաժեշտությամբ: Օպտիկական տիրույթի ֆոտոդետեկտորները, որոնք զգայուն են լույսի որոշակի ալիքի երկարությունների նկատմամբ, վճռորոշ դերակատարում ունեն տարբեր նյութերի հատկությունների վերլուծության մեջ՝ սպեկտրաչափության միջոցով: Օգտագործելով տարբեր գույների լուսադիոդներ, այդ ֆոտոդետեկտորները կարող են գնահատել այնպիսի նյութերի կլանման, անդրադարձման և փոխանցման բնութագրերը, ինչպիսիք են ջուրը, դեղագործական արտադրանքը և այլ քիմիական նյութեր:

Ֆոտոդետեկտորային համակարգերի հիմնական մարտահրավերը՝ վերլուծության համար տվյալների հուսալի և արդյունավետ փոխանցումն է: Այն բանից հետո, երբ ֆոտոդետեկտորը հավաքում է սպեկտրային տեղեկատվություն, տվյալները պետք է ուղարկվեն կենտրոնացված համակարգեր կամ ամպային սերվերներ՝ մշակման, պահպանման և հետագա մեկնաբանման համար: Սա հանգեցրել է տվյալների փոխանցման այնպիսի տարբեր մեթոդների հետազոտման, որոնք հարմար են տարբեր միջավայրերի և տվյալների պահանջների համար: Ներկայիս շուկայական լուծումները օգտագործում են մի շարք տեխնոլոգիաներ, մասնավորապես, փոքր հեռավորության հավելվածների համար Wi-Fi և Bluetooth մեծ հեռավորությունների և ցածր էներգիայով հավելվածների համար՝ LoRaWAN և NB-IoT, ինչպես նաև ճշգրիտ տվյալների և բջջային հավելվածների համար բջջային ցանցեր:

Ստորև դիտարկվում է օպտիկական տիրույթի ֆոտոդետեկտորների մոնիտորինգի համակարգի զարգացումը, շեշտադրելով նյութերի վերլուծության համար լուսադիոդային սպեկտրաչափության օգտագործումը և շուկայում ներկայիս տվյալների փոխանցման առավել կենսունակ մեթոդները: Համեմատելով կապի տեխնոլոգիաները՝ մենք կարող ենք բացահայտել օպտիմալ լուծումներ, որոնք հարմարեցված են ֆոտոդետեկտորների հավելվածներում տվյալների անխափան փոխանցման հատուկ սցենարներին և պահանջներին:

Ատենախոսության հիմնական նպատակն է երկարգեյք ֆոտոդետեկտորների հիման վրա հեռահար մոնիտորինգի համար բարձր զգայունությամբ սպեկտրաչափական համակարգի մշակում:

Վերոնշյալ նպատակին հասնելու համար ատենախոսությունում լուծվել են հետևյալ խնդիրները՝

- Երկարգեյք ֆոտոդետեկտորների նոր մոդելների ուսումնասիրման և դրանց բարձր զգայունության մեխանիզմների և սպեկտրաչափության հնարավորության բացահայտում:
- Հեռամոնիտորինգի համար նոր տեխնոլոգիական մոտեցումների առաջարկ:
- Ֆոտոդետեկտորների վրա հիմնված տվյալների թվայնացման ու փոխանցման մեթոդների կատարելագործում:
- Հեռահար սպեկտրաչափի մակետի նախագծում և իրականացում:

ELYA AVETIK MAKARYAN
DEVELOPMENT OF A PHOTODETECTOR FOR OPTICAL RANGE SPECTRAL
REMOTE ANALYSIS

SUMMARY

In recent years, the field of remote monitoring has made significant progress, driven by the need for efficient real-time data collection across various industries, from environmental monitoring to healthcare. Optical-range photodetectors, which are sensitive to specific wavelengths of light, play a crucial role in analyzing the properties of different materials through spectrometry. By using LEDs of various colors, these photodetectors can assess the absorption, reflection, and transmission characteristics of substances such as water, pharmaceuticals, and other chemical compounds.

The primary challenge of photodetector-based systems is the reliable and efficient transmission of data for analysis. Once a photodetector collects spectral information, the data must be transmitted to centralized systems or cloud servers for processing, storage, and further interpretation. This has led to the exploration of various data transmission methods that are suitable for different environments and data requirements. Current market solutions employ a range of technologies, including Wi-Fi and Bluetooth for short-range applications, LoRaWAN and NB-IoT for long-range and low-power applications, and cellular networks for precise data transmission and mobile applications.

This study examines the development of an optical-range photodetector monitoring system, emphasizing the use of LED-based spectrometry for material analysis and the most viable data transmission methods available on the market. By comparing communication technologies, we can identify optimal solutions tailored to the specific scenarios and requirements of seamless data transmission in photodetector applications.

The main objective of this dissertation is to develop a highly sensitive spectrometric system for remote monitoring based on dual-gate photodetectors.

To achieve this goal, the dissertation addresses the following tasks:

- Investigating new models of dual-gate photodetectors and identifying their high-sensitivity mechanisms.
- Proposing new technological approaches for remote monitoring.
- Enhancing methods for digitizing and transmitting data based on photodetectors.
- Designing and implementing a prototype of a remote spectrometer.

