

УДК 621.383.51:621.317.7

DOI: 10.53297/18293336-2025.1-91

**СИСТЕМА ОПТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ОСНОВЕ
ДВУХБАРЬЕРНЫХ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ**

**С.Х. Худавердян, А.В. Агабекян, И.А. Погосян, М.Г. Хачатрян,
Э.А. Макарян**

Национальный политехнический университет Армении

Оптические системы мониторинга активно используются для анализа прозрачных сред в сельском хозяйстве, экологии, пищевой и медицинской отраслях. Современные требования к таким системам включают высокую точность, мобильность и экономичность, что делает актуальной разработку компактных решений для лабораторных и полевых исследований.

В данной работе представлена система оптического мониторинга на основе двухбарьерных кремниевых фотоприемников, обладающих высокой спектральной чувствительностью в диапазоне 350...900 нм. Ранее были разработаны прототипы фотоприемников, включая алгоритмы обработки спектральных данных. Однако для создания полноценной системы мониторинга требовалось решить задачу интеграции фотоприемников в компактное устройство с беспроводным интерфейсом и возможностью дистанционного управления.

В качестве оптимального решения для технологии связи был выбран протокол LoRaWAN, обеспечивающий дальность связи до 10...15 км и сверхнизкое энергопотребление. Аппаратная платформа включает регулируемый источник света, прецизионные аналого-цифровой и цифроаналоговый преобразователи, микроконтроллер для обработки данных и жидкокристаллический дисплей для визуализации. Реализована автоматизированная процедура измерения вольт-амперных характеристик фотоприемника с последующей обработкой в среде LabVIEW. Система обеспечивает определение длин волн, их интенсивностей, а также функцию сравнения с допустимыми нормами концентрации веществ с сигнализацией при отклонениях.

Тестирование макета системы мониторинга подтвердило точность измерений ($\pm 2\%$) и низкое энергопотребление (15 мВт). Система демонстрирует сопоставимую с коммерческими аналогами точность при определении концентраций (погрешность 3,5% для нитратов), но при меньшей стоимости.

Перспективы разработки связаны с расширением спектрального диапазона и оптимизацией алгоритмов. Система может применяться для автономного мониторинга жидких сред в промышленности, экологии и медицине.

Ключевые слова: оптический мониторинг, двухбарьерный фотоприемник, спектральный анализ, LoRaWAN.

Введение. Современные оптические системы мониторинга занимают важное место в инструментальном анализе, обеспечивая комплексную оценку состава и свойств оптически прозрачных материалов на основе их спектральных характеристик. Эти системы выполняют как количественный, так и качественный анализ, преобразуя оптические сигналы в информативные данные о составе исследуемых сред. Области применения таких систем чрезвычайно разнообразны: от контроля качества сельскохозяйственной продукции и мониторинга пищевых производств до экологического надзора и современных методов биомедицинской диагностики.

В последние годы значительно возросли требования к характеристикам оптических систем мониторинга. Современные решения должны сочетать высокую точность измерений с мобильностью, энергоэффективностью и экономической доступностью [1-3]. Эти системы должны быть компактными и способными работать в режиме реального времени как в условиях лаборатории, так и при проведении полевых исследований.

Особую актуальность приобретает разработка основного компонента систем мониторинга – фотоприемника. В рамках предыдущих исследований нами были успешно разработаны и испытаны двухбарьерные кремниевые фотоприемники, демонстрирующие исключительную спектральную чувствительность в широком диапазоне длин волн (350...900 нм) [4-6]. Проведенные исследования позволили детально изучить их эксплуатационные характеристики, разработать специализированные алгоритмы обработки сигналов и создать программное обеспечение для точного определения спектральной зависимости интенсивности поглощенного излучения. Были изготовлены и протестированы прототипы фотоприемников, в том числе с инновационным антиотражающим наноструктурированным поверхностным слоем, значительно повышающим эффективность устройств [7, 8].

Однако для создания законченного, готового к практическому применению решения необходимо решить ключевую задачу по интеграции разработанных фотоприемников в компактное устройство, оснащенное современными средствами дистанционного управления и беспроводной передачи данных. Это позволит существенно расширить функциональные возможности системы и область ее применения.

Целью настоящей работы является разработка комплексных аппаратных и схемотехнических решений для создания оптической системы мониторинга нового поколения на базе двухбарьерных фотоприемников, оснащенной беспроводным интерфейсом управления и передачи данных.

Анализ и выбор технологии связи. Современные требования к оптическим системам мониторинга выходят далеко за рамки простого обеспечения высокой точности измерений. В условиях цифровизации и развития концепции "Интернета вещей" (IoT) особую значимость приобретает способность

таких систем интегрироваться в распределенные сети сбора данных. Беспроводные технологии связи становятся ключевым элементом подобных решений, позволяя полностью исключить необходимость в проводных соединениях и обеспечивая возможность дистанционного контроля в режиме реального времени. Эти преимущества особенно значимы для полевых исследований, промышленного мониторинга и других приложений, где критически важны мобильность и автономность работы оборудования.

При выборе технологии связи были учтены следующие три параметра: дальность связи – возможность работы на расстояниях до нескольких километров; энергоэффективность – длительная автономная работа от батарейного питания; устойчивость к помехам – стабильность связи в условиях промышленных и городских шумов.

Традиционные решения, такие как Wi-Fi и Bluetooth, не удовлетворяют этим требованиям из-за ограниченной дальности и высокого энергопотребления. Сотовая связь, хотя и обеспечивает глобальное покрытие, требует существенных затрат на эксплуатацию. В этом контексте технология LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) представляет собой оптимальный компромисс между дальностью, энергопотреблением и стоимостью развертывания. Ее ключевыми особенностями являются [9, 10]:

- дальность связи до 10...15 км в сельской местности и 2...5 км в городских условиях;
- сверхнизкое энергопотребление, позволяющее устройствам работать от батарей несколько лет;
- адаптивная скорость передачи данных (от 0,3 до 50 кбит/с), обеспечивающая баланс между дальностью и пропускной способностью;
- встроенная помехоустойчивость за счет использования широкополосных сигналов с частотным разнесением.

Для оптических систем мониторинга, где не требуется высокая скорость передачи данных, но критически важны дальность и энергоэффективность, LoRaWAN является идеальным решением. Кроме того, эта технология поддерживает работу в лицензионно-свободных частотных диапазонах, что значительно снижает стоимость внедрения по сравнению с сотовыми сетями. Внедрение LoRaWAN позволит создавать масштабируемые сети датчиков, способные работать в автономном режиме годами, что открывает новые возможности для мониторинга в труднодоступных местах и на больших территориях.

Узел измерения и анализа спектрального отклика. В рамках разработки системы оптического мониторинга была предложена комплексная архитектура измерительного узла (рис. 1), 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. Источник оснащен системой точной настройки параметров излучения, что позволяет адаптировать его характеристики под конкретные задачи измерения.
- Двухбарьерный кремниевый фотоприемник с повышенной чувствительностью, выполняющий преобразование светового потока в электрический сигнал. Особенностью данного элемента является его способность сохранять стабильные характеристики при длительной эксплуатации.
- Прецизионные аналого-цифровые (АЦП) и цифроаналоговые (ЦАП) преобразователи, образующие интерфейс между аналоговой и цифровой частями системы. Эти компоненты обеспечивают высокоточное преобразование сигналов с минимальными искажениями.
- Микроконтроллерная платформа с реализованными алгоритмами цифровой обработки сигналов, выполняющая функции управления всеми компонентами системы и обработки поступающих данных.
- жидкокристаллический (ЖК) дисплей с расширенными возможностями визуализации, позволяющий отображать результаты измерений в различных форматах - как в виде графиков и диаграмм, так и в форме числовых значений с заданной точностью.
- Автономный блок питания (БП) с аккумуляторной батареей и интеллектуальной системой перезарядки, обеспечивающий стабильное электропитание всех компонентов системы в различных условиях эксплуатации.

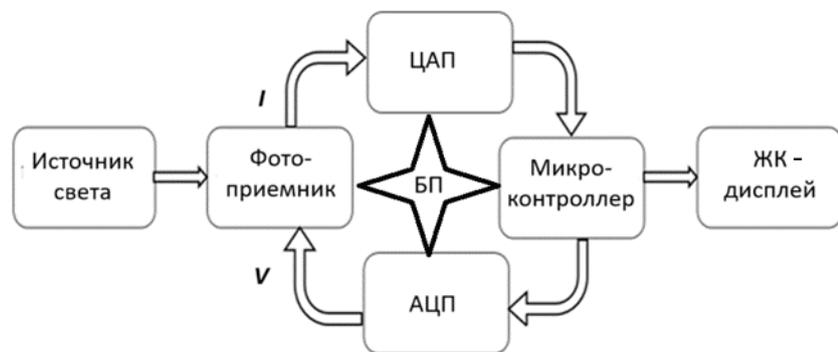


Рис. 1. Архитектура измерительного узла

Для обеспечения высокой точности измерений в измерительном узле реализована специализированная процедура измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) фотоприемника (рис. 2). Методика основана на плавном сканировании напряжения смещения с одновременной высокоточной регистрацией фототока. Прецизионные АЦП и ЦАП обеспечивают высокую точность

измерений, что позволяет фиксировать изменения тока величиной до 100 нА при шаге изменения напряжения 1 мВ.

Обработка спектральных данных осуществляется с помощью специализированного алгоритма, реализованного в среде LabVIEW. В программном режиме путем последовательных вычислений получаем длины всех имеющихся волн и их интенсивности, а также зависимости, обусловленные соответствующими волнами фототоков от напряжения. В результате имеем спектральную зависимость интенсивности для наблюдаемого количества волн. Результаты измерений отображаются на экране встроенного дисплея как в виде графиков, так и в виде числовых значений. На экране также отображается спектр источника света. Кроме того, программа идентификации вредных веществ имеет функцию сравнения “подходит – не подходит” и режим сигнализации в случае отклонений от допустимых норм концентрации вредных веществ. Тревожная информация появляется на экране в виде пульсирующего сигнала.

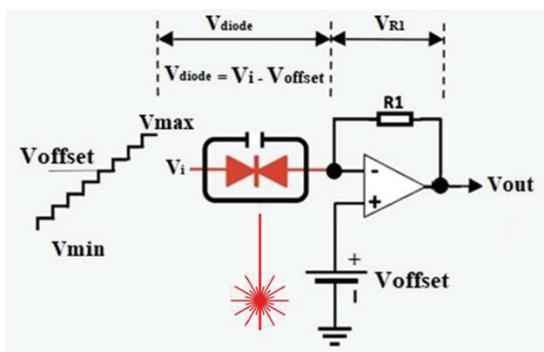


Рис. 2. Процедура измерения и обработки ВАХ фотоприемника

Аппаратурная реализация и тестирование. Для практической реализации системы был разработан компактный функциональный макет, в основу которого положена плата Arduino Mega 2560. Выбор данной платформы обусловлен оптимальным сочетанием вычислительной мощности и развитой периферии:

- центральный микроконтроллер ATmega2560 (8 бит, 16 МГц);
- 54 цифровых входа/выхода;
- 16 аналоговых входов;
- 4 аппаратных UART-интерфейса;
- встроенный USB-контроллер ATmega16U2.

Компактная компоновка устройства достигнута за счет размещения микроконтроллера непосредственно на печатной плате над оптопарой (излуча-

тель-фотоприемник). Программирование системы осуществляется через стандартный USB-интерфейс, при этом плата идентифицируется как виртуальный COM-порт, что значительно упрощает процесс разработки и отладки.

Разработанный макет поддерживает два режима работы: локальный и удаленный. Первый из них обеспечивается прямым подключением через USB-интерфейс. Удаленный режим имеет следующие технические возможности;

- встроенный Wi-Fi модуль для работы в локальных сетях;
- Remote Desktop Protocol (RDP) для удаленного управления;
- поддержка LoRaWAN для работы в распределенных сетях.

Тестирование системы проводилось с использованием светодиодных источников излучения в видимом диапазоне. Использовались разноцветные светодиоды (синий, зеленый, красный) с пиковыми длинами волн 470, 525 и 630 нм соответственно. Интенсивность излучения регулировалась широтно-импульсной модуляцией. Данные с фотоприемника фиксировались с частотой 100 Гц через 16-битный АЦП.

На рис. 3а показан общий вид экрана системы мониторинга, а на рис. 3б - зависимость фототока от длины волны для зеленого светодиода. Максимальный фототок зарегистрирован при 515 нм, что соответствует ожидаемой (паспортной) характеристике светодиода (рис. 3в). Погрешность измерений не превышала $\pm 2\%$ благодаря алгоритму подавления шумов (скользящее среднее, медианная фильтрация).

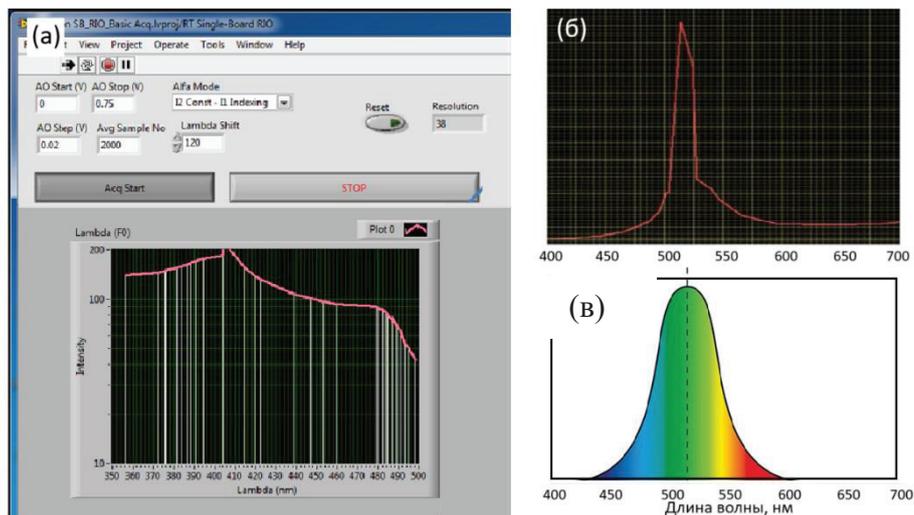


Рис. 3. Общий вид экрана системы мониторинга (а), измеренная (б) и паспортная (в) зависимости фототока от длины волны для зеленого светодиода

Оценку точности системы определяли для различных по оптической плотности модельных растворов. Сравнительный анализ с коммерческими спектрометрами выявил преимущества разработанного решения по энергоэффективности (15 мВт против 50...100 мВт) и стоимости при сопоставимой точности определения концентраций (погрешность 3,5% для нитратов). Ограничения связаны с естественным снижением чувствительности фотоприемника в ультрафиолетовой области (<400 нм) и пропускной способностью LoRaWAN для высокоскоростной передачи данных.

Полученные результаты подтверждают возможность применения системы для мониторинга жидких сред в автономном режиме, а дальнейшее развитие предполагает оптимизацию для расширенного спектрального диапазона.

Заключение. Проведенные исследования позволили разработать оптическую систему мониторинга, объединяющую высокоточные двухбарьерные кремниевые фотоприемники с современными беспроводными технологиями. Созданное решение демонстрирует высокую эффективность при анализе оптически прозрачных сред в широком спектральном диапазоне, обеспечивая при этом значительное преимущество по энергопотреблению и стоимости по сравнению с существующими коммерческими аналогами. Особую ценность представляет успешная интеграция всех компонентов системы в компактное устройство с автономным питанием, сохраняющее высокие метрологические характеристики. Применение технологии LoRaWAN открывает новые возможности для организации распределенных сетей мониторинга на обширных территориях, включая труднодоступные районы. Полученные результаты подтверждают перспективность выбранного подхода и создают основу для дальнейшего совершенствования системы.

Исследование выполнено при поддержке Комитета по высшему образованию и науке МОН РА (научный проект № 25RG-2B010).

Литература

1. **Chen J., Kuang H., Lin J.** Design and optimization of a multidirectional photodetector in optoelectronic integration // Opt. Lett. – 2024. – V. 49(4). – P. 997–1000.
2. **Tian J.** An overview of pyroelectric photodetector: Photoresponse mechanisms and applications // AIP Adv. – 2023. – V. 13(5). – P. 050701.
3. **Zhang X., Li W., Xie F.** Metamaterials for high-performance photodetectors // Appl. Phys. Rev. – 2024. – V. 11(4). – P. 041316.
4. On the selective spectral sensitivity of oppositely placed double-barrier structures / **S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, G. Ayvazyan, L. Matevosyan, M. Khachatryan, E. Makaryan** // Photonics. – 2022. – V. 9(8). – P. 558–568.
5. Functional capabilities of two-barrier semiconductor structures / **S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, G. Ayvazyan, M. Khachatryan, A. Khudaverdyan** // IFMBE Proc. – 2024. – V. 91. – P. 14–21.

6. **Khudaverdyan S., Vaseashta A.** Semiconductor photodetectors. Optical spectrometry. – Berlin, Germany: De Gruyter, 2024.
7. **Ayvazyan G., Vaseashta A., Gasparyan F., Khudaverdyan S.** Effect of thermal annealing on the structural and optical properties of black silicon // J. Mater Sci: Mater. Electron. – 2022. – V. 33. – P. 17001–17010.
8. **Ayvazyan G., Ayvazyan K., Hakhoyan L., Semchenko A.** NO₂ gas sensor based on pristine black silicon formed by reactive ion etching // Phys. Status Solidi RRL. – 2023. – V. 17(9). – P. 2300058.
9. **Almuhaya M.A.M., Jabbar W.A., Sulaiman N., Abdulmalek S.** A survey on Lo-ran technology: Recent trends, opportunities, simulation tools and future directions // Electronics. – 2022. – V. 11. – P. 164.
10. **Gaitan N.C., Floarea P.I., Tu T.** The implementation of a solution for low-power wide-area network using LoRaWAN // Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl. (IJACSA). – 2022. – V. 13. – P. 443–448.

*Поступила в редакцию 10.04.2025.
Принята к опубликованию 10.07.2025.*

ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄՈՆԻԹՈՐԻՆԳԻ ՀԱՄԱԿԱՐԳ՝ ՀԻՄՆՎԱԾ ԵՐԿԱՐԳԵԼՔ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ՖՈՏՈՆԵՂՈՒՆԻՉՆԵՐԻ ՎՐԱ

**Ս.Խ. Խուդավերդյան, Ա.Վ. Աղաբեկյան, Ի.Ա. Պողոսյան, Մ.Գ.
Խաչատրյան, Է.Ա. Մակարյան**

Օպտիկական մոնիթորինգի համակարգերը լայնորեն կիրառվում են թափանցիկ միջավայրերի վերլուծության համար գյուղատնտեսության, բնապահպանության, սննդի և բժշկության ոլորտներում: Նման համակարգերի նկատմամբ ժամանակակից պահանջները ներառում են բարձր ճշտություն, շարժունակություն և մատչելիություն, ինչը արդիական է դարձնում լաբորատոր և դաշտային հետազոտությունների համար կոմպակտ լուծումների մշակումը:

Սույն աշխատանքում ներկայացված է օպտիկական մոնիթորինգի համակարգ, որը հիմնված է երկարազեղ սիլիցիումային ֆոտոընդունիչների վրա՝ 350...900 նմ տիրույթում բարձր սպեկտրալ զգայնությամբ: Նախկինում մշակվել էին ֆոտոընդունիչների նախատիպեր՝ ներառյալ սպեկտրալ տվյալների մշակման ալգորիթմները: Սակայն մոնիթորինգի լիարժեք համակարգի ստեղծման համար անհրաժեշտ էր ֆոտոընդունիչները կոմպակտ սարքավորման մեջ ինտեգրելու խնդիրը՝ անլար ինտերֆեյսով և հեռակառավարման հնարավորությամբ:

Որպես կապի տեխնոլոգիայի օպտիմալ լուծում ընտրվեց LoRaWAN արձանագրությունը, որն ապահովում է մինչև 10...15 կմ հեռավորության վրա կապ և գերցածր էներգասպառում: Սարքային հարթակը ներառում է կարգավորվող լույսի աղբյուր, բարձր ճշգրտության ԱԹՓ/ԹԱՓ, տվյալների մշակման համար միկրոկոնտրոլեր և տվյալների վիզուալիզացման համար LCD էկրան: Իրականացվել է ֆոտոընդունիչի վոլտամպերային բնութագրերի ավտոմատացված չափման գործընթաց՝ LabVIEW միջավայրում հետագա մշակմամբ: Համակարգը թույլ է տալիս որոշել ալիքի երկարությունները, դրանց ինտենսիվությունները, ինչպես նաև համեմատել ստացված արդյունքները նյութերի կոնցենտրացիաների թույլատրելի սահմանների հետ՝ շեղումների դեպքում հաղորդելով ազդանշան:

Մոնիթորինգի համակարգի նախատիպի փորձարկումը հաստատել է չափումների ճշտությունը ($\pm 2\%$) և ցածր էներգասպառումը (15 մՎտ): Համակարգը ցուցաբերում է

համադրելի ճշտություն առևտրային անալիզների հետ կոնցենտրացիաների որոշման հարցում (սխալը՝ 3.5% նիտրատների համար), սակայն՝ ավելի ցածր արժեքով:

Ապագա զարգացումների հեռանկարները կապված են սպեկտրալ տիրույթի ընդլայնման և ալգորիթմների օպտիմալացման հետ: Համակարգը կարող է կիրառվել հեղուկ միջավայրերի ավտոնոմ մոնիթորինգի համար արդյունաբերության, բնապահպանության և բժշկության ոլորտներում:

Առանցքային բաներ. օպտիկական մոնիթորինգ, երկարգելք ֆոտոընդունիչ, սպեկտրալ վերլուծություն, LoRaWAN:

AN OPTICAL MONITORING SYSTEM BASED ON DOUBLE-BARRIER SILICON PHOTORECEIVERS

S.Kh. Khudaverdyan, A.V. Aghabekyan, I.A. Poghosyan, M.G. Khachatryan, E.A. Makaryan

Optical monitoring systems are widely used for the analysis of transparent media in agriculture, ecology, food, and medical industries. Modern requirements for such systems include high precision, mobility, and cost-effectiveness, which makes the development of compact solutions for laboratory and field research particularly relevant.

This work presents an optical monitoring system based on double-barrier silicon photoreceivers, which offer high spectral sensitivity in the range of 350...900 *nm*. Previously, prototypes of photoreceivers were developed, including algorithms for processing spectral data. However, to create a complete monitoring system, it was necessary to solve the problem of integrating the photoreceivers into a compact device with a wireless interface and remote control capabilities.

The LoRaWAN protocol was chosen as the optimal communication technology, providing a communication range of up to 10...15 *km* and ultra-low power consumption. The hardware platform includes an adjustable light source, precision analog-to-digital and digital-to-analog converters, a microcontroller for data processing, and an LCD for visualization. An automated procedure for measuring the current-voltage characteristics (*I-V* curves) of the photodetector was implemented, with subsequent processing in the LabVIEW environment. The system allows for the determination of wavelengths, their intensities, and includes a comparison function with permissible concentration limits of substances, providing alerts in case of deviations.

Testing of the system prototype confirmed the measurement accuracy ($\pm 2\%$) and low power consumption (15 *mW*). The system demonstrates an accuracy comparable to commercial counterparts when determining concentrations (error of 3.5% for nitrates), but at a lower cost.

Future development prospects include expanding the spectral range and optimizing the algorithms. The system can be applied for autonomous monitoring of liquid media in industry, environmental monitoring, and medicine.

Keywords: optical monitoring, double-barrier photodetector, spectral analysis, LoRaWAN.