

УДК 621.396+543.42

DOI: 10.53297/18293336-2023.1-87

**СОЗДАНИЕ ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА ДЛЯ РАБОТЫ  
ФОТОДЕТЕКТОРА С ПРОТИВОПОЛОЖНО РАСПОЛОЖЕННЫМ  
ДВОЙНЫМ ПОТЕНЦИАЛЬНЫМ БАРЬЕРОМ И СПЕКТРАЛЬНОГО  
АНАЛИЗА ИЗЛУЧЕНИЯ**

**С.Х. Худавердян<sup>1</sup>, М.Г. Хачатрян<sup>1</sup>, А.В. Амбарцумян<sup>2</sup>, Э.А. Макарян<sup>1,3</sup>**

*<sup>1</sup>Национальный политехнический университет Армении*

*<sup>2</sup>YEA Engineering*

*<sup>3</sup>PicsArt*

В настоящее время существуют разные системы мониторинга, которые предназначены для оптического контроля. Работа этих систем основана на их качественной и количественной оценке состава оптически прозрачных материалов по выходному оптическому сигналу. Такие системы применяются в таких сферах, как защита окружающей среды от загрязняющих веществ и излучений, производство продуктов питания и напитков, сельское хозяйство, ветеринария, управление сточными водами, клиническая диагностика, мониторинг лекарств и др. Очевидно, что сферы применения достаточно разнообразны и закрывают широкий спектр областей применения. Поэтому такие оптические системы нуждаются в дальнейшем совершенствовании, а исследования необходимо направить на миниатюризацию размеров, удешевление производства, повышение чувствительности и точности этих систем. Немаловажным фактором является необходимость усовершенствования систем для дистанционного контроля вредных веществ в онлайн-режиме. Целью данной работы является интегрирование результатов измерения тока и напряжения на образце фотодетектора с противоположно расположенным двойным потенциальным барьером и ранее разработанного алгоритма в программной среде LabView. Создан программный пакет, который дает возможность исследовать значения параметров фоточувствительности в зависимости от длины волны. Разработан интерактивный интерфейс, который позволяет получать спектральные характеристики и изучать их в онлайн-режиме. Кроме этого, с целью сравнительного анализа результатов данный алгоритм был реализован в программной среде Excel.

Разработанные интерактивные пакеты в средах LabView и Excel дают возможность исследовать основные характеристики фотодетектора с противоположно расположенным двойным потенциальным барьером и получать информацию о длинах волны поглощения в конкретной среде. На основе этого интерфейса проводится спектральный анализ излучения. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Получено совпадение характеристик с большой точностью. Результаты дают возможность включить в аналитические работы платформу Arduino Duo.

**Ключевые слова:** противоположно расположенная двухбарьерная структура, фотодетектор, спектральный анализ, программная среда LabView.

**Введение.** Ранее разработанная система оптического контроля работает на основе ее количественной и качественной оценки состава оптически прозрачных материалов по выходному оптическому отклику [1,2]. Эта система может применяться в ветеринарных исследованиях, сельском хозяйстве, производстве продуктов питания и напитков, управлении сточными водами, защите окружающей среды от загрязняющих веществ и излучений, клинической диагностике, мониторинге лекарств и многих других областях. В связи с широкими возможностями их применения дальнейшее совершенствование этих оптических систем должно быть направлено на их миниатюризацию, удешевление производства, повышение точности и чувствительности, особенно для дистанционного контроля вредных веществ в режиме реального времени [3–5]. Главной особенностью разработанной системы является использование спектрочувствительных и миниатюрных полупроводниковых фотоприемников взамен сложных и дорогих механико-оптических узлов.

В работе [6] исследован новый подход и на его основе разработана фотоприемная структура, в которой с помощью структуры с противодействующими потенциальными барьерами (ППБ) можно зарегистрировать спектральный состав интегрального излучения, выходящего из оптически прозрачной исследуемой среды в диапазоне длин волн 350...1000 нм. Предложенная на основе разработанного алгоритма структура позволяет с большей, чем в [7-9], точностью проводить пространственное разделение информации, заложенной в волнах, в условиях продольного поглощения

электромагнитного излучения. Алгоритм также используется для получения спектрального распределения интенсивности этих волн. В результате выборочно зарегистрирован спектральный состав фотосигнала, исходящего от исследуемого вещества, и представлены результаты комплексного исследования характеристик фотодетекторов с ППБ.

**Постановка задачи.** Целью данного исследования является интегрирование результатов измерения тока и напряжения на образце фотодетектора с ППБ и разработанного алгоритма в программной среде LabView. Созданный программный пакет дает возможность исследовать спектральные значения параметров фоточувствительности в зависимости от длины волны. Разработанный интерактивный интерфейс позволяет получать спектральные характеристики и изучать их в онлайн-режиме. Кроме этого, с целью сравнительного анализа результатов данный алгоритм был представлен в среде Excel.

**Методы исследования.** На рис. 1 представлена блок-схема разработанной системы.

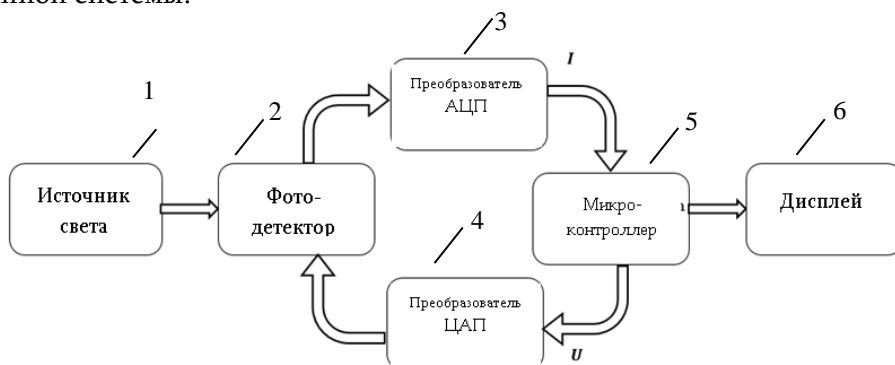


Рис. 1. Блок-схема разработанной системы

Блок-схема состоит из: источника света 1, предназначенного для создания световых сигналов с различными длинами волн; фотодетектора 2, предназначенного для преобразования светового потока в электрический сигнал; аналого-цифровых 3 и цифроаналоговых 4 преобразователей (АЦП и ЦАП), используемых для преобразования цифровых выходных сигналов микроконтроллера в аналоговые, а также для преобразования результатов измерений в цифровые; микроконтроллера 5, с помощью которого управ-

ляется работа представленной системы; жидкокристаллического дисплея 6 для просмотра результатов.

На вход фотоприемника подавалось ступенчато изменяющееся напряжение с шагом  $1\text{ мВ}$  в диапазоне  $\pm 1,5\text{ В}$  и измерялся ток. В результате измерений выяснилось, что для получения желаемых результатов необходимо измерять ток фотоприемника с точностью менее  $100\text{ пА}$ . В зависимости от спектра используемого света меняется вольт-амперная характеристика (ВАХ) фотоприемника. После обработки полученных значений ВАХ с помощью алгоритмов в микроконтроллере результаты измерений выводятся на дисплей как в виде графиков, так и в виде числовых значений. На экране отображается спектр источника света. Если источник излучения одноволновой, то видно только одно центральное значение с определенной апертурой, а в случае многоволнового - на графике отображаются пики с определенными апертурами, соответствующие каждой длине волны в спектре источника света.

В первоначальном варианте работа системы управляется компьютером. Команды, отправляемые на микроконтроллер, и полученная от него информация обрабатываются с помощью специальных алгоритмов, разработанных в компьютере. Связь между компьютером и микроконтроллером осуществляется через COM-порт.

Опорное и ступенчатое напряжения, подаваемые на входы операционного усилителя, контролируются с помощью микроконтроллера. Опорное напряжение остается в течение всего измерения неизменным -  $1,5\text{ В}$ . Шаговое напряжение изменяется в диапазоне  $0...3\text{ В}$  с шагом  $1\text{ мВ}$ . Для получения аналогового сигнала на входе фотоприемника используется 12-битный ЦАП модели МСР4725, удовлетворяющий требованиям задачи по своим параметрам. В результате исследования справочных данных выбранного фотоприемника выяснилось, что он работает с отрицательными и положительными напряжениями. В фотоприемнике два р-п перехода подключены противоположно. Для обеспечения усиления фототока фотоприемника используется дифференциальный усилитель в качестве преобразователя ток-напряжение: к положительному входу подключено опорное напряжение, а к отрицательному входу - пошагово изменяющееся пере-

менное напряжение. Параллельно к фотоприемнику подключен 16-разрядный дельта-сигма АЦП модели ADS1100. На фотодетекторе, изменяя напряжение, измеряется фототок, проходящий через фотодетектор. На сопротивлении нагрузки получены цифровые значения ВАХ. Микроконтроллер обрабатывает полученные результаты и передает их на компьютер, на котором отображается спектр источника света на графике и в виде таблицы. Выбором используемых быстродействующих элементов обеспечиваются их низкий уровень шумов и требуемая точность напряжения и тока. Используемый усилитель имеет высокий коэффициент усиления, малые входные токи и низкий коэффициент шума.

Измеренные значения тока и напряжения были введены в Excel. На их основе были проведены расчеты параметров, которые были использованы в уравнениях для расчета фоточувствительности, а также для получения спектральных характеристик. На рис. 2 представлено одно из окон Excel, где интегрированный разработанный алгоритм позволяет видеть значения фоточувствительности в зависимости от длины волны. Главным преимуществом такого исследования является интерактивная работа с характеристиками, где можно наблюдать изменения характеристик после каждого изменения параметров.

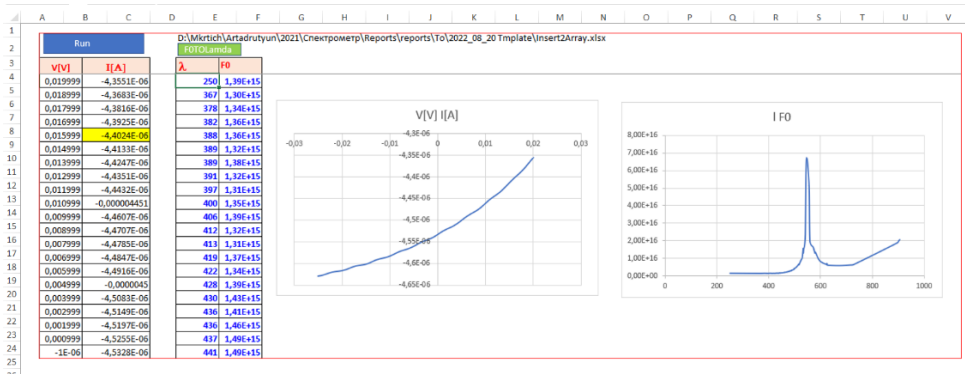


Рис. 2. Полученные графики разработанного алгоритма в среде Excel

Также было разработано окно, где можно отображать ВАХ на основе измеренных значений тока и напряжения на образце фотодетектора с помощью структуры с ППБ. Создана возможность фильтровать кривую. На

рис. 3 представлено окно Excel, где отображается ВАХ фотодетектора с ППБ.

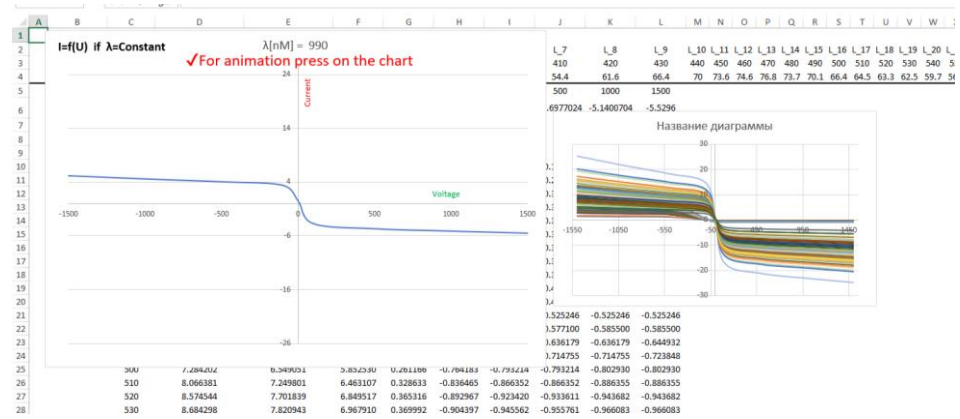


Рис. 3. ВАХ фотодетектора с ППБ в среде Excel

На рис. 4 представлены характеристики тока фотодетектора с ППБ в зависимости от длины волны. Разработанный интерактивный режим очень удобен для изучения процесса поглощения для конкретной длины волны.

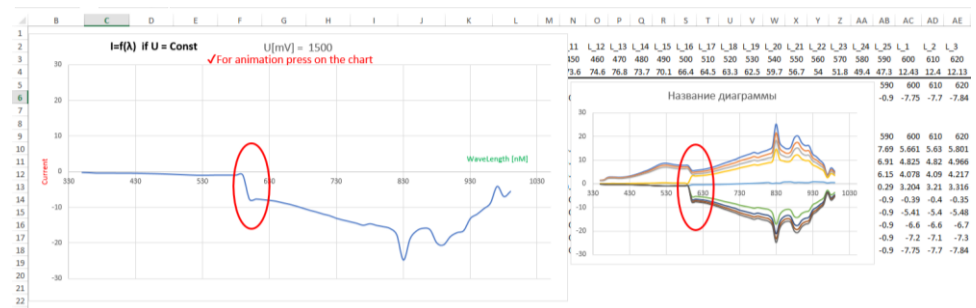


Рис. 4. Спектральные характеристики фотодетектора в среде Excel

На рис. 5 и 6 представлены спектральная и вольт-амперная характеристики фотодетектора ППБ в программной среде LabView.

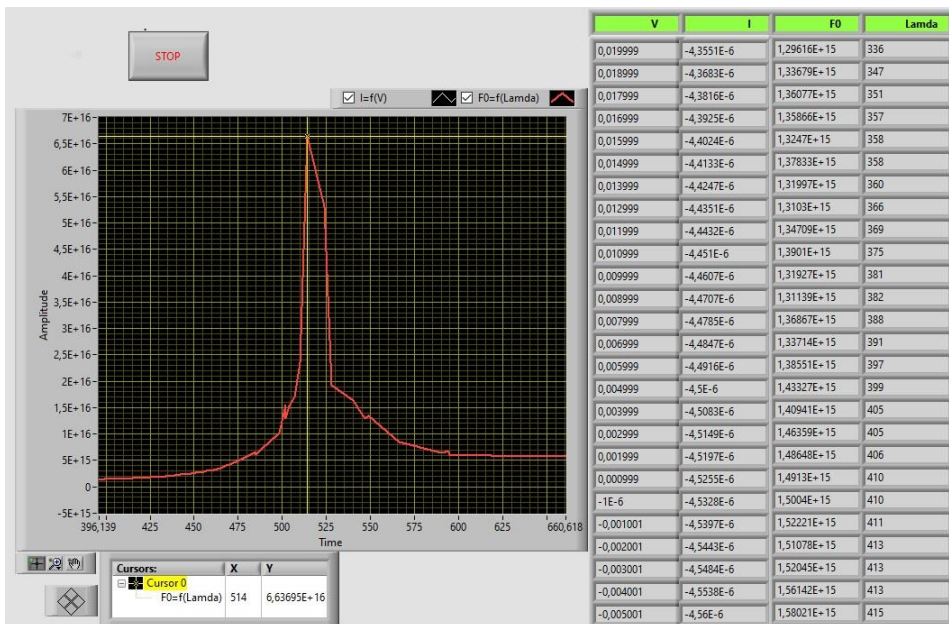


Рис. 5. Спектральная характеристика фотодетектора в среде LabView

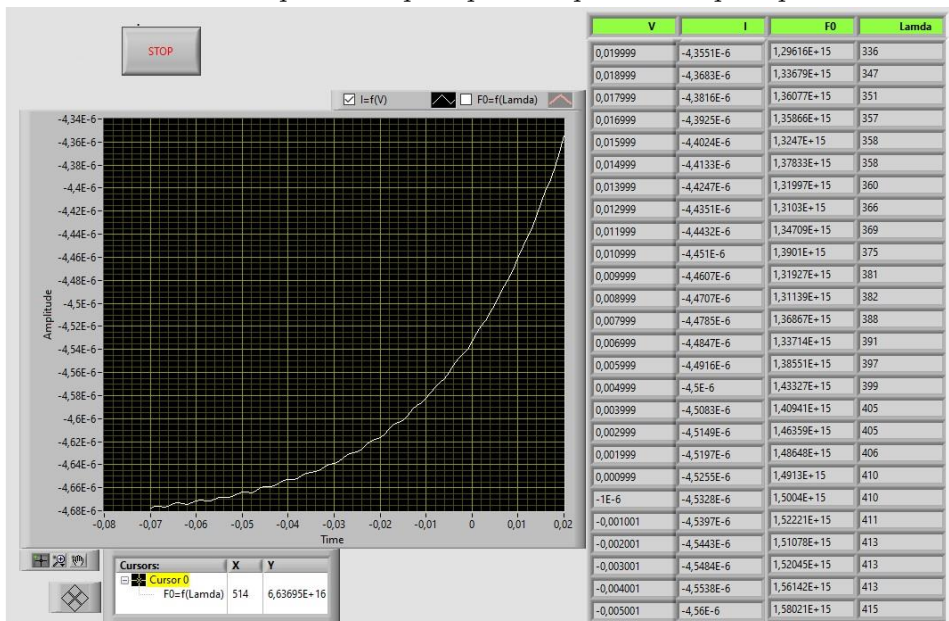


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика фотодетектора с ППБ в среде LabView

Сравнительный анализ результатов показывает, что полученные характеристики с высокой точностью совпадают в программных средах Excel и LabView.

**Заклучение.** Таким образом, ранее разработанный алгоритм был интегрирован в программных средах LabView и Excel. В обоих случаях разработан интерактивный пакет, с помощью которого можно исследовать главные характеристики фотодетектора с ППБ и, следовательно, иметь информацию о длинах волны поглощения в конкретной среде. Проведен сравнительный анализ полученных результатов. Очевидно, что характеристики совпадают с большой точностью. Результаты этих исследований будут представлены в последующих статьях.

### Литература

1. **Worsfold P., Zagatto E.** Spectrophotometry-Overview. In Encyclopedia of Analytical // Science.- 3rd ed. / **P. Worsfold, C. Poole, A. Townshend, M. Miró, Eds** .- Academic Pres, Oxford, UK, 2019.- P. 244–248.
2. **Thomas O., Burgees C.** UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater.- 2nd ed. // Elsevier Science.- London, UK, 2017.- P. 2.
3. Global Spectrophotometer Market 2020–2024. Available online: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5157122/global-spectrophotometer-market-2020-2024> (accessed on 24 June 2022).
4. **Albert D.R., Todt M.A., Davis H.F.** A Low-Cost Quantitative Absorption Spectrophotometer // J. Chem. Educ.- 2012.- 89.- P. 1432–1435.  
<https://doi.org/10.1021/ed200829d>
5. **Bui D.A., Hauser P.C.** Analytical Devices based on Light-emitting Diodes-a Review of the State-of-the-Art // Anal. Chim. Acta.- 2015.- 853.- P. 46–58.  
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.09.044>
6. On the Selective Spectral Sensitivity of Oppositely Placed Double-Barrier Structures / **S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, G. Ayyvazyan, L. Matevosyan, A. Khudaverdyan, M. Khachatryan, and E. Makaryan** // Photonics.- 2022.- 9(8).- P. 558;  
doi:10.3390/photonics9080558
7. New Method of Optical Spectroscopy for Environmental Protection and Safety / **S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, M. Khachatryan, M. Lapkis, S. Rudenko** // Functional Nanostructures and Sensors for CBRN Defence and Environmental Safety and Security: Springer.- Berlin, Heidelberg, Germany, 2020.- P. 271–281.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-024-1909-2\\_19](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1909-2_19)

8. On the Semiconductor Spectroscopy for Identification of Emergent Contaminants in Transparent Mediums / **S. Khudaverdyan, A. Vaseashta, G. Ayvazyan, M. Khachatryan, A. Atvars, M. Lapkis, S. Rudenko** // Advanced Sciences and Technologies for Security Applications; Springer Nature: Cham.- Switzerland, 2021.- P. 663–689. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76008-3\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76008-3_29)
9. **Green M.A.** Self-consistent Optical Parameters of Intrinsic Silicon at 300K Including Temperature Coefficients // Sol. Energy Mat. Sol. Cells.- 2008.- 92.- P. 1305–1310. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.06.009>

*Поступила в редакцию 10.04.2023.*

*Принята к опубликованию 19.06.2023.*

**ՃԱՌԱԳԱՅԹՄԱՆ ՍՊԵԿՏՐՍՅՈՒՆ ՎԵՐԼՈՒԾՈՒԹՅԱՆ ՀԱՄԱՐ ՀԱԿԱՌԱԿ  
ՏԵՂԱԿԱՅՎԱԾ ԿՐԿՆԱԿԻ ՊՈՏԵՆՑԻԱԼ ԱՐԳԵԼՔՈՎ ՖՈՏՈՂԵՏԵԿՏՈՐԻ  
ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԾՐԱԳՐՍՅՈՒՆ ՓԱԹԵԹԻ ՍՏԵՂԾՈՒՄԸ**

**Ս.Խ. Խոնդավերդյան, Մ.Գ. Խաչատրյան, Հ.Վ. Համբարձումյան, Է.Ա. Մակարյան**

Ներկայումս կան մշտադիտարկման տարբեր համակարգեր, որոնք նախատեսված են օպտիկական հսկողության համար: Այս համակարգերի կիրառումը հիմնված է էլքային օպտիկական ազդանշանից օպտիկապետ թափանցիկ նյութերի կազմի որակական և քանակական գնահատման վրա: Նման համակարգերն օգտագործվում են այնպիսի ոլորտներում, ինչպիսիք են շրջակա միջավայրի պաշտպանությունը աղտոտվածությունից և ճառագայթումից, սննդամթերքի և խմիչքների արտադրությունը, գյուղատնտեսությունը, անասնաբուժությունը, կեղտաջրերի կառավարումը, կլինիկական ախտորոշումը, դեղերի մշտադիտարկումը և այլն: Ակնհայտ է, որ կիրառման շրջանակը բավականին բազմազան է և ընդգրկում է օգտագործման բնագավառների լայն շրջանակ: Հետևաբար, նման օպտիկական համակարգերը հետագա կատարելագործման կարիք ունեն, և հետազոտությունները պետք է ուղղված լինեն դրանց չափերի փոքրացմանը, արտադրության արժեքի նվազեցմանը և զգայնության ու ճշտության բարձրացմանը: Մեծ նշանակություն ունի առցանց ռեժիմում վնասակար նյութերի հեռահար մշտադիտարկման համակարգերի կատարելագործման անհրաժեշտությունը: Աշխատանքի նպատակն է հակառակ տեղակայված կրկնակի պոտենցիալ արգելքով ֆոտոդետեկտորի նմուշի վրա հոսանքի և լարման չափումների արդյունքների և նախկինում մշակված ալգորիթմի ինտեգրումը LabView ծրագրային միջավայրում: Ստեղծվել է ծրագրային փաթեթ, որը հնարավորություն է տալիս ուսումնասիրել ֆոտոզգայնության և ալիքի երկարության պարամետրերի արժեքները: Մշակվել է ինտերակտիվ ինտերֆեյս, որը թույլ է տալիս ստանալ սպեկտրային բնութագրեր և ուսումնասիրել դրանք առցանց ռեժիմում: Բացի այդ, արդյունքների համեմատական վերլուծության նպատակով այս ալգորիթմը իրականացվել է նաև Excel-ում:

LabView և Excel միջավայրերում մշակված ինտերակտիվ փաթեթները հնարավորություն են տալիս ուսումնասիրել կրկնակի պոտենցիալ արգելքով ֆոտոդետեկտորի հիմնական բնութագրերը և տեղեկություն ստանալ որոշակի միջավայրում կլանման ալիքի երկարությունների մասին: Այս ինտերֆեյսի հիման վրա հնարավոր է իրականացնել ճառագայթման սպեկտրալ վերլուծություն: Կատարվել է ստացված արդյունքների համեմատական վերլուծություն: Բնութագրերը մեծ ճշտությամբ

համընկնում են: Արդյունքները հնարավորություն են տալիս վերլուծական աշխատանքում ներառել Arduino Duo հարթակը:

**Առանցքային բառեր.** հակառակ տեղակայված երկարգեղք կառուցվածք, ֆոտոդետեկտոր, սպեկտրային վերլուծություն, LabView ծրագրային միջավայր:

## CREATION OF A SOFTWARE PACKAGE FOR OPERATION OF A PHOTODETECTOR WITH AN OPPOSITE DOUBLE POTENTIAL BARRIER FOR SPECTRAL ANALYSIS OF RADIATION

**S.Kh. Khudaverdyan, M.G. Khachatryan, H.V. Hambardzumyan,  
E.A. Makaryan**

Currently, there are different monitoring systems that are designed for optical control. The operation of these systems is based on its qualitative and quantitative assessment of the composition of optically transparent materials from the output optical signal. Such systems are used in areas such as environmental protection from pollutants and radiation, food and beverage production, agriculture, veterinary medicine, wastewater management, clinical diagnostics, drug monitoring, etc. Obviously, the scope of application is quite diverse and covers a wide range of applications. Therefore, such optical systems need further improvement, and research should be directed to miniaturization of sizes, reduction in the cost of production, and increase in the sensitivity and accuracy of these systems. Of great importance is the need to improve systems for remote monitoring of harmful substances in online mode. The aim of this paper is to integrate the results of current and voltage measurements on a photodetector sample with an opposite double potential barrier and a previously developed algorithm in the LabView software environment. A software package has been created that makes it possible to investigate the values of photosensitivity and wavelength parameters. An interactive interface has been developed that will allow obtaining spectral characteristics and studying them online. In addition, for the purpose of comparative analysis of the results, this algorithm was implemented in Excel.

The developed interactive packages in the LabView and Excel environments make it possible to study the main characteristics of a photodetector with an opposite double potential barrier, and to obtain information about the absorption wavelengths in a particular medium. Based on this interface, it is possible to carry out spectral analysis of radiation. A comparative analysis of the obtained results was carried out. Coincidence of characteristics with great accuracy is obtained. The results make it possible to include the Arduino Duo platform in analytical work.

**Keywords:** oppositely located two-barrier structure, photodetector, spectral analysis, LabView software environment.