

УДК 621.382

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОЦЕССОВ В P<sup>+</sup>-N-P<sup>+</sup> СТРУКТУРАХ

Д.С. Худавердян

*Национальный политехнический университет Армении*

Изучены поглощение электромагнитных волн и фотоэлектронные процессы в p<sup>+</sup>-n-p<sup>+</sup> структурах в условиях внешнего напряжения смещения. Обнаружена связь между фототоками противоположно действующих потенциальных барьеров со степенью резкости p<sup>+</sup>-n и n-p<sup>+</sup> переходов. Показано, что в широком диапазоне напряжения смещения фототок тылового барьера превосходит фототок поверхностного барьера.

Выявлены обусловленные отдельными длинами волн фотоэлектронные процессы, происходящие в среде поглощения при изменении ее толщины, представлены их мотивы и возможности определения интенсивности и длины этих волн.

Проанализирована необходимость получения фотодетекторной полупроводниковой структуры с высокой спектральной чувствительностью для создания дешевой, быстродействующей системы анализа, пригодной в полевых условиях.

В процессе получения спектров трех светодиодов (синий, зеленый, красный) исследованы проблемы получения спектральной селективной чувствительности рассматриваемого фотодетектора и предложены пути их преодоления.

Проведен сравнительный анализ селективной чувствительности и сложности технологии получения исследуемых фотодетекторов с известными из литературы многослойными полупроводниковыми фотодетекторами, имеющими каскадообразные активные слои.

Исследована качественная связь между интенсивностью излучения и степенью колебания спектральных фототоков. Рассмотрена возможность реализации процесса оптического спектрального анализа с указанными структурами без высокоточных механических устройств, светофильтров, призм и дифракционных решеток. Рассмотрена также возможность использования исследуемых фотодетекторов, в частности, для создания многоцелевых систем мониторинга, получения информации об исследуемой среде и решения важных проблем безопасности путем проведения процессов идентификации.

**Ключевые слова:** противодействующий барьер, силицидный контакт, регистрирующая среда, спектральная чувствительность.

**Введение.** Спектрофотометрические полупроводниковые фотодетекторы направлены на реализацию процесса оптического спектрального анализа без высокоточных механических приспособлений, светофильтров, призм и

дифракционных решеток [1-3]. До сих пор работы в этом направлении оставались на уровне исследований [4-8]. Причина этого - относительно сложная технология изготовления и особые условия, предъявляемые к работе.

Потребность таких исследований обусловлена большим спросом рынка [9]. Это, в частности, диктуется необходимостью создания современных систем мониторинга с многоцелевым использованием получения информации о составе изучаемой среды и решением задач идентификации в целях безопасности [10,11].

С этой точки зрения создание системы анализа с высоким спектральным разрешением на базе полупроводниковых детекторов со спектральной селективной чувствительностью и их реальное внедрение в различных сферах будет большим достижением, поскольку такие системы будут иметь низкую стоимость, высокую производительность, могут быть пригодными для полевых условий и простыми в эксплуатации.

**Результаты исследования.** Исследованы экспериментальные образцы фотодетектора с планарной структурой, которая состоит из вертикально расположенных и противоположно действующих переходов.

Электромагнитное излучение падает со стороны поверхностного  $p^+-n$  перехода (продольное поглощение излучения) и распространяется в сторону области регистрации тылового  $n-p^+$  перехода.

На рис. 1 представлено схемное подключение фотодетектора. Контакт 3, снятый с  $n$  – базы, дает возможность вместе с контактами 1 или 2 по отдельности изучать фотоэлектронные свойства противоположно действующих  $p^+-n$  и  $n-p^+$  переходов. Барьер  $p^+-n$  - это силицид титана, имеющий высоту 0,84 эВ [12]. Положение уровня Ферми в  $n$  – базе при плотности примесей  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  составляет 0,27 эВ. Следовательно, высота поверхностного потенциального барьера составит 0,57 эВ, а ширина - 0,87 мкм, в то время как расчетная высота тылового  $n-p^+$  барьера - 0,76 эВ, а ширина – 1 мкм.

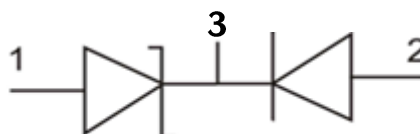


Рис. 1. Схемное соединение фотодетектора

На рис. 2 и 3 изображены вольт-амперные характеристики (ВАХ) отдельных переходов.

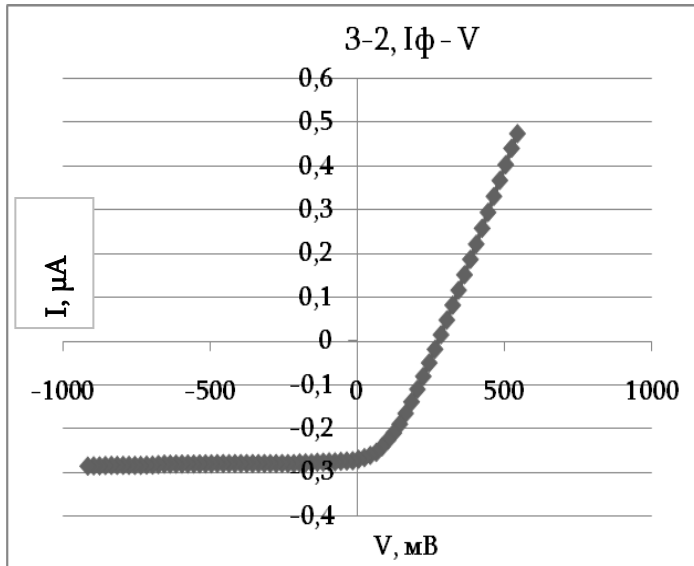


Рис. 2. ВАХ  $n - p^+$  барьера при поглощении волны длиной  $\lambda = 705$  нм

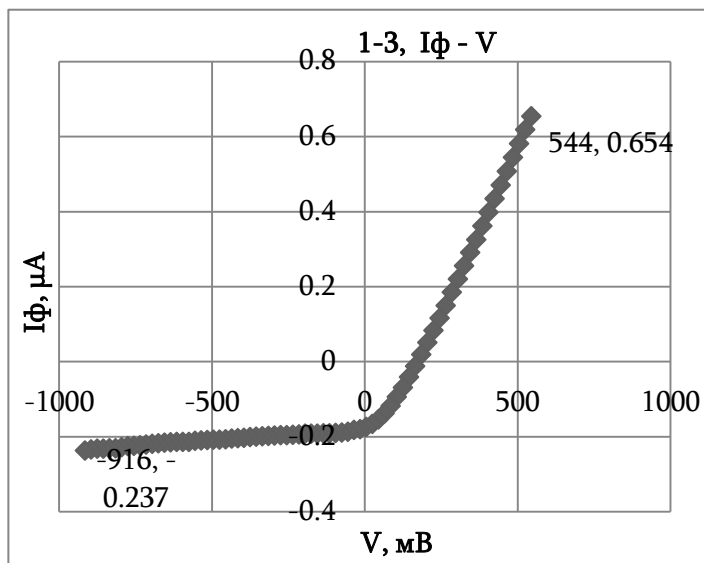


Рис. 3. ВАХ  $p^+ - n$  барьера при поглощении волны длиной  $\lambda = 705$  нм

В условиях падающего луча со стороны силицидного барьера при продольном поглощении тыловой  $n - p^+$  переход с большей высотой обеспечивает более значительные величины фототока насыщения с малым

изменением его значения (рис. 2), чем  $p^+ - n$  переход (рис. 3). Это обусловлено бо́льшей резкостью тылового барьера и сравнительно бо́льшей глубиной поглощения волны с длиной  $\lambda = 705 \text{ нм}$ .

Обратная величина коэффициента поглощения указанной волны  $1/\alpha = 2,6 \text{ мкм}$  характеризует глубину поглощения. Ширина  $n$ - базы равна  $2 \text{ мкм}$ . Если тыловой барьер в базу проникает на  $1 \text{ мкм}$ , то с учетом диффузионной  $p^+$  области волна в бо́льшей степени поглощается в области действия тылового барьера и создает фототок, который больше, чем фототок поверхностного барьера.

На рис. 4 приведена ВАХ структуры при поглощении той же волны, когда напряжение падает между контактами 1 и 2. Смена знака напряжения приводит к насыщению фототоков противоположно действующих потенциальных барьеров, каждый в своей обратно смещенной области. Как видно из рисунка, при отрицательном напряжении смещения имеет место насыщение фототока  $n-p^+$  перехода, а при положительном -  $p^+ - n$  перехода. При этом во втором случае насыщение происходит более плавно. Это, вероятно, обусловлено тем, что с ростом напряжения смещения все еще сохраняется влияние потенциального барьера с большей высотой. При этом, по сравнению с тыловым, поверхностный потенциальный барьер имеет меньшую высоту с меньшей противодействующей силой, что приводит к резкому насыщению фототока.

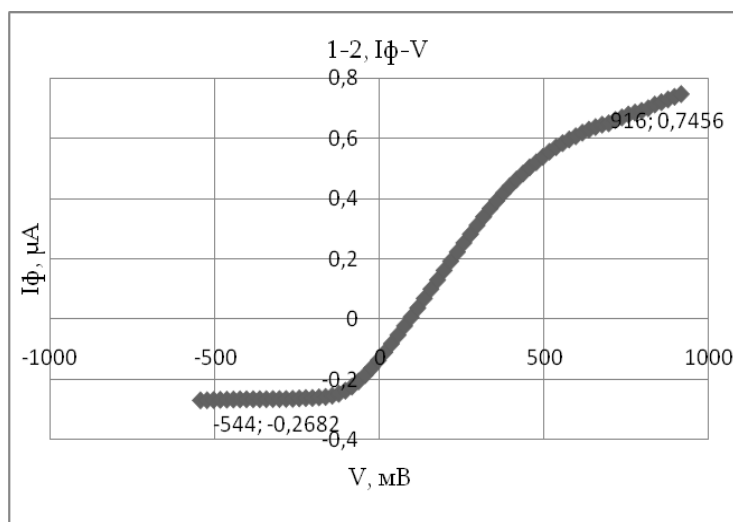


Рис. 4. ВАХ  $p^+ - n - p^+$  барьера при поглощения волны длиной  $\lambda = 705 \text{ нм}$

Глубина поглощения коротких волн меньше, чем длинных. Вследствие этого в исследуемых  $p^+ - n - p^+$  структурах в условиях продольного поглощения

излучения в зависимости от длины волны появляются разные доли фототоков противодействующих барьеров. При этом в фототоке поверхностного p+ - n барьера короткие волны имеют больший вклад, чем в фототоке тылового барьера.

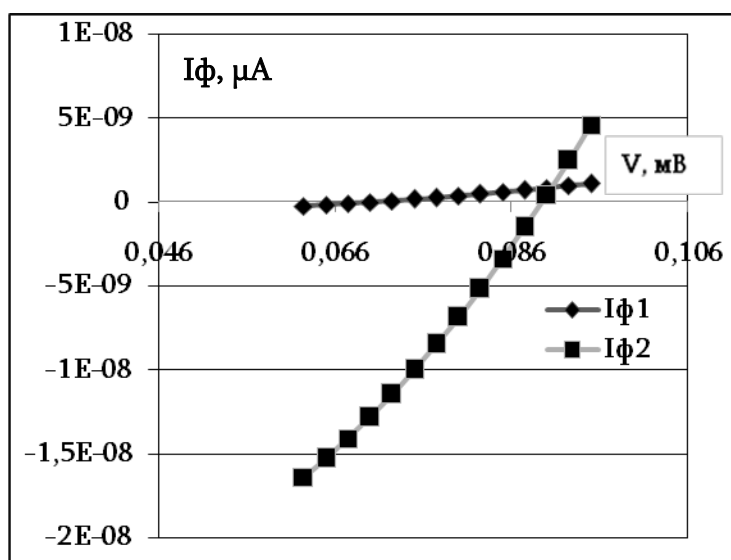


Рис. 5. Смена знака фототока в зависимости от напряжения смещения при разных длинах волн

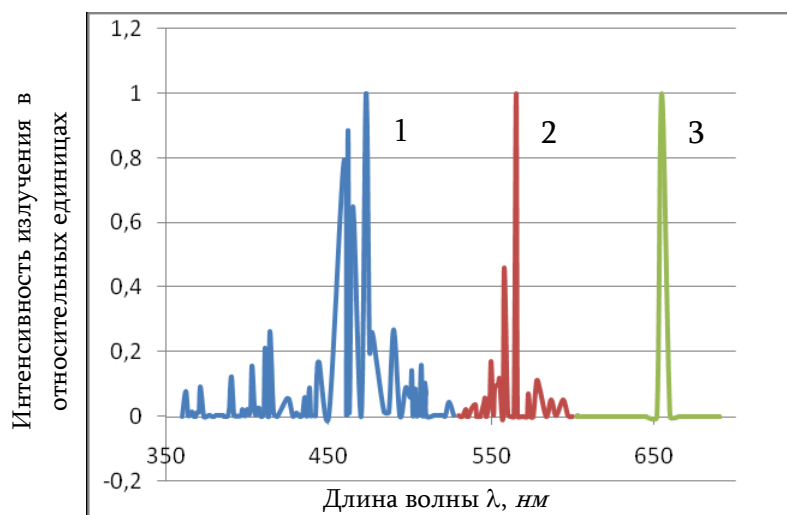


Рис.6. Экспериментальные спектральные зависимости светодиодов марки: 1 - LL-304BC4B-B4-IGD (InGaN), 2 - L-53GC (GaP), 3 - L-813SRC-J14 (AlGaInP)

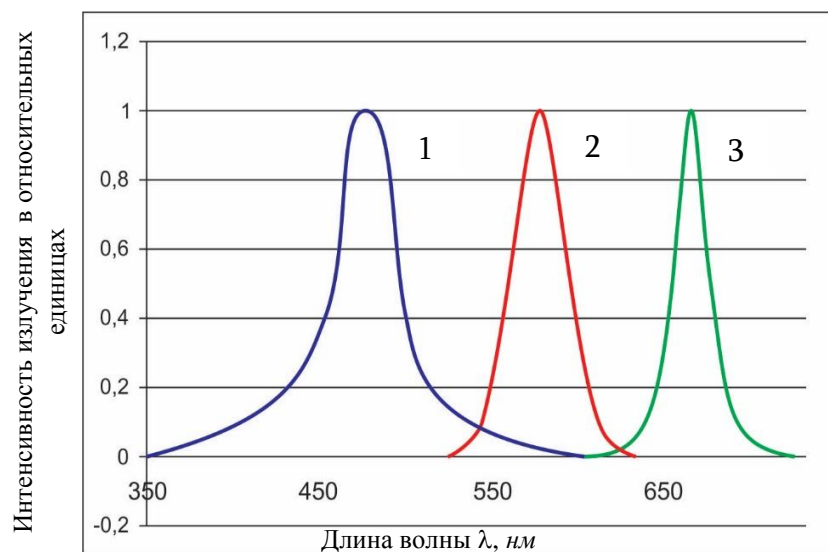


Рис.7. Паспортные спектральные зависимости светодиодов марки:  
 1 - LL-304BC4B-B4-IGD (InGaN), 2 - L-53GC (GaP), 3 - L-813SRC-J14 (AlGaInP)

Это приводит к тому, что с увеличением внешнего напряжения смещения коротковолновый фототок меняет свой знак при меньшем абсолютном значении напряжения (при  $\lambda = 500 \text{ нм}$  - 0,70 В), чем длинноволновый (при  $\lambda = 650 \text{ нм}$  - 0,88 В) (рис. 5, кривые I $\phi$ 1 и I $\phi$ 2 соответственно).

На рис. 6 и 7 приведены спектральные зависимости интенсивности исследуемых фотодетекторов при поглощении излучения от светодиодов марки L-813SRC-J14 (AlGaInP), 153GC (GaP), LL-304B-B4- GD (InGaN): рис. 6 – экспериментальная зависимость, рис. 7 – данные производителей.

Максимумы спектров от производителей находятся соответственно на длинах волн  $\lambda_{\text{max}} = 660, 565 \text{ и } 462 \text{ нм}$ . Очевидно, что сравниваемые спектры очень близки друг к другу.

### Выводы

1. Разработаны и изготовлены экспериментальные p+-n-p+ структуры с эпитаксиальным выращиванием базы и исследованы их электрофизические и фотоэлектрические свойства. Выявлены возможности реализации их спектральной селективной чувствительности. При этом, чем ближе волна к области собственного поглощения материала фотодетектора, тем однозначнее спектральные интенсивности.

2. Разработаны и апробированы программы, позволяющие переходить к числовым значениям длины волны от коэффициента поглощения и получать на

экране спектральную зависимость интенсивности. Это дает возможность осуществлять процессы, происходящие в разработанном алгоритме, начиная от подачи на входе числовых данных ВАХ до получения на экране спектральных характеристик.

3. Получены спектральные характеристики трех разных светодиодов, которые были сравнены с их эталонами. В разных спектральных промежутках получены спектральные точности в пределах 1...5 нм.

4. Разработанная система мониторинга с предложенным нами фотоспектрометрическим узлом может обеспечить анализ данных, полученных от современного телеметрического устройства, и проводить численное моделирование процессов. Ее можно использовать при обнаружении и исследовании вредных веществ в оптических прозрачных средах.

### Литература

1. **Pshinko G.N., Kobets S.A., Puzyrnayain L.N.** Concentration of U(VI) on a complexing sorbent for its determination by the spectrophotometric method // Journal of Water Chemistry and Technology.- 2013.- 35(4).- P.145-151.
2. [https://people.phys.ethz.chandrealu/ASSP10\\_Presentations/Optical%20Spectroscopy%20Techniques%20-%20Runar%20Sandnes.pdf](https://people.phys.ethz.chandrealu/ASSP10_Presentations/Optical%20Spectroscopy%20Techniques%20-%20Runar%20Sandnes.pdf)
3. <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-i-primeneniye-distantsionnykh-spektrometricheskikh-metodov-issledovaniya-prirodnikh>
4. Patent US 20130285187 A1. Photo cell devices and methods for spectrometric applications/ **Th. Kautzsch.**- 2013.
5. Patent US 8916873 B2. Photodetector with controllable Spectral response/ **Th. Kautzsch.**- 2014.
6. Improved selectivity from a wavelength addressable device for wireless stimulation of neural tissue / **Ç.S. Elif, S.F. David, G. Mutlu, et al.**- 2014.-doi: 10.3389/fneng.2014.00005// Front Neuroeng.- P. 1-12.
7. **Vanyushin I.V., Gergel V.A., Zimoglad V.A., Tishin Yu. I.** Adjusting the Spectral Response of Silicon Photodiodes by Additional Dopant Implantation // Russian Microelectronics.- 2005.- 34 (3).- P. 155–159.
8. Boron Distribution Profiling in Asymmetrical n<sup>+</sup>-p Silicon Photodiodes and New Creation Concept of Selectively Sensitive Photoelements for Megapixel Color Photoreceivers / **V.A. Gergel, A.V. Lependin, Y.I. Tishin, et al** // Proc. SPIE.- 2006.- P. 6260.
9. Technavio Releases New Report on Global Spectroscopy Market, 2016, <http://www.businesswire.com/news/home/20160127005709/en/Technavio-Releases-Report-Global-Spectroscopy-Market>.
10. **Peng J., Hongbo X., Zhiye H. and Zheming W.** Design of a Water Environment Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks // Sensors.- 2009.- 9.- P. 6411-6434.
11. **Normatov P I., Armstrong R., Normatov I.Sh., Narzulloev N.** Monitoring extreme water factors and studying the anthropogenic load of industrial objects on water

quality in the Zeravshan River basin // Russian Meteorology and Hydrology.- 2015.- 40, 5.- P. 347-354.

12. **Sze S.** Physics of semiconductor devices, 2nd edn.- Wiley-Interscience, New York, 1981.-450 p.

*Поступила в редакцию 25.02.2017.  
Принята к опубликованию 12.05.2017.*

## **P<sup>+</sup>- N - P<sup>+</sup> ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՈՒՄ ՖՈՏՈԷԼԵԿՏՐՈՆԱՅԻՆ ԳՈՐԾԸՆԹԱՑՆԵՐԻ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒՄԸ**

### **Դ.Ս. Խուդավերդյան**

Հետազոտվել են  $p^+ - n - p^+$  կառուցվածքում էլեկտրամագնիսական ճառագայթի կլանման և արտաքին շեղման լարման պայմաններում ընթացող ֆոտոէլեկտրոնային գործընթացները: Բացահայտվել է հակազդող պոտենցիալ արգելքների առաջացրած հագեցման ֆոտոհոսանքների և  $p^+ - n$  և  $n - p^+$  արգելքների կտրուկության աստիճանի կապը: Ցույց է տրվել շեղման լարման լայն միջակայքում թիկունքային արգելքի ստեղծած ֆոտոհոսանքի գերակայությունը մակերևութային արգելքի ֆոտոհոսանքի համեմատ: Պարզաբանվել են ճառագայթը կլանող միջավայրի խորության փոփոխությամբ պայմանավորված առանձին ալիքներն այդ միջավայր ներառող գործընթացները, դրանց շարժառիթները և ալիքների երկարությունների և ինտենսիվությունների որոշման հնարավորությունները: Վերլուծվել է ստացված կիսահաղորդչային ֆոտոդետեկտորային կառուցվածքի անհրաժեշտությունը էժան, արագագործ, դաշտային պայմաններում պիտանի, սպեկտրային բարձր զգայնությամբ վերլուծության համակարգի ստեղծման գործում: Երեք տարբեր լուսադիոդների (կապույտ, կանաչ, կարմիր) ճառագայթների սպեկտրների վերծանման գործընթացում հետազոտվել են ֆոտոդետեկտորի սպեկտրային ընտրողական զգայնության ստացման խնդիրները և դրանց հաղթահարման ուղիները: Կատարվել է արդի գրականությունում բերվող բազմաշերտ և բազայի տարբեր հաստությամբ ակտիվ շերտերի կասկադան շարք ունեցող կառուցվածքներով բազմազույն կիսահաղորդչային ֆոտոընդունիչների և հետազոտվող ֆոտոդետեկտորի համեմատական վերլուծություն՝ սպեկտրային ընտրողական զգայնության և ստացման տեխնոլոգիայի բարդության տեսանկյունից: Ուսումնասիրվել է ճառագայթի ինտենսիվության և սպեկտրային ֆոտոհոսանքի արժեքների տատանումների չափի միջև որակական կապը: Դիտարկվել են նաև նշված կառուցվածքով օպտիկական սպեկտրային վերլուծության գործընթացի իրականացման հնարավորությունները՝ ոչ բարձր ճշտությամբ մեխանիկական ու օպտիկական հարմարանքների, լուսազտիչների, պրիզմայի, դիֆրակցիոն ցանցի և դրանց կիրառման, մասնավորապես, բազմանպատակ մոնիթորինգային համակարգերի ստեղծման, հետազոտվող միջավայրի բաղադրության մասին տեղեկություն ունենալու և անվտանգության տեսակետից կարևոր նույնականացման խնդիրներ լուծելու բնագավառներում:

**Առանցքային բաներ.** հակազդող արգելք, սիլիցիդային հպակ, գրանցող միջավայր, սպեկտրային զգայնություն:

## INVESTIGATING THE PHOTOELECTRONIC PROCESSES IN $P^+ - N - P^+$ STRUCTURES

**D.S. Khudaverdyan**

The absorption of electromagnetic waves and the processes photoelectric  $p^+ - n - p^+$  structures have been investigated at the external bias voltage.

The connection potential between the photocurrents of the oppositely acting potential barriers with sharpness degree of  $p^+ - n$  and  $n - p^+$  junctions have been revealed.

It is shown that in a wide range of the biased voltage, the photocurrent of the rear barrier exceeds that of the surface barrier.

The photoelectrical processes due to the individual wavelengths, occurring in the absorption medium at the change of its thickness, their motives and the possibility of determining the intensity and length of these waves are introduced.

The necessity of obtaining a photodetector semiconductor structure to create a cheap, fast analysis system suitable to be used in the field and having high spectral sensitivity is analyzed.

In the process of obtaining spectra of three LED - blue, green, red, the problems of obtaining spectral selective sensitivity of the considered photodetectors are investigated and ways of overcoming them are proposed.

A comparative analysis of selective sensitivity and the technology complexity of the obtained photodetectors with multi-layered semiconductor photodetectors having cascade active layers is carried out.

The qualitative relationship between the emission intensity and the degree of fluctuation of spectral photocurrents has been investigated. The possibility of implementing the process of optical spectrum analysis with the mentioned structures without high-precision mechanical devices, filters, prisms and diffraction gratings is considered. The possibility of using the investigated photodetector, in particular, for creating multi-monitor systems, obtaining information about the test environment and addressing important safety issues through the identification processes.

**Keywords:** counteracting barrier, silicide contact, registering medium, spectral sensitivity.