

Стенд для исследования
позиционно-чувствительного фотоприемника

В.И. Чукита¹,
Э.А. Сенокосов¹,
В.С. Фещенко^{2,@}

¹Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко, Тирасполь
MD-3300, Приднестровская Молдавская Республика

²ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест», Москва 121108,
Россия

@Автор для переписки, e-mail: feshchenko@mail.ru

В работе рассмотрены позиционно – чувствительные фотоприемники (ПЧФ), которые предназначены для обнаружения источника электромагнитного излучения оптического диапазона и определения координаты облучаемой области в режиме реального времени, а также слежения за движущимися оптическими объектами. Приведены данные о фотоприёмниках на основе фоточувствительных эпитаксиальных слоев CdSe/Слюда, имеющих нетрадиционную схему расположения и коммутации электрических контактов. Выходным сигналом таких ПЧФ является поперечная разность потенциалов, которая возникает между двумя его контактами после засветки одной из областей фотоприемника. Они могут составить альтернативу или конкуренцию существующим фотоэлементам в связи с высокой точностью, быстродействием, простоте изготовления и дешевизне. Однако для широкого применения ФЧП существуют существенные препятствия, в частности, аналоговый тип выходного сигнала, а также трудности «ручной» калибровки вновь изготовленного фотоприёмника, которая занимает длительное время. Нами разработан стенд для исследования позиционно – чувствительных фотоприемников, который позволяет оцифровывать сигнал, получаемый с фотоприёмника, в режиме реального времени, с высокой точностью определять координаты облученной области на фотоприёмнике и исследовать такие его характеристики, как заданное значение темнового тока фотоприемника, световой ток при определенной освещенности, выходное напряжение. На стенде проведены исследования позиционно – чувствительных фотоприемников на основе системы CdS/Слюда и показано, что измеренные характеристики и параметры фотоприёмников совпадают с теоретическими в пределах погрешности. Даны рекомендации по применению стенда .

Ключевые слова: эпитаксиальный слой, позиционно-чувствительный фотоприемник, эквипотенциальная линия тока, микроконтроллер, дельта-сигма аналого-цифровой преобразователь, электронный коммутатор, программируемый усилитель, индикаторное устройство.

The Stand for Research of Positional-Sensitive Photosensor

Vitaly I. Chukita¹,

Eduard A. Senokosov¹,

Valery S. Feshchenko^{2,@}

¹*Shevchenko Pridnestrovian State University, Tiraspol, MD-3300, Pridnestrovian Moldavian Republic*

²*Production-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd., Moscow 121108, Russia*

@Corresponding author e-mail: feshchenko@mail.ru

The paper considers position-sensitive photodetectors (PSP), which are designed to detect the source of electromagnetic radiation in the optical range and determine the coordinates of the irradiated area in real time, as well as to track moving optical objects. In particular, data are presented on photodetectors based on photosensitive epitaxial CdSe/mica layers with an unconventional layout and switching of electrical contacts. The output signal of such PSP is the transverse potential difference that appears between its two contacts after exposure of one of the areas of the photodetector. These PSPs can be an alternative or competition to existing photocells due to high accuracy, speed, ease of manufacture and low cost. But there are significant obstacles for their wide application. First, it is an analog type of output signal, which prevents its further processing. And, second, it is difficult to calibrate “manually” a newly made photosensor: it takes a long time associated with the accumulation and processing of large amounts of data. The introduction of computer technology and the creation of an information-measuring system allow us to process the output signals of such photodetectors with high accuracy and speed in real time. To solve this problem we have developed a stand for the study of position-sensitive photodetectors, which is presented in this paper. This stand allows digitizing the signal received from the photodetector, in real time, with high accuracy to determine the coordinates of the irradiated area on the photodetector and explore its characteristics such as the specified value of the dark current of the photodetector, light current at a certain illumination, and output voltage. At this stand, position-sensitive photodetectors based on the CdS/mica system were studied. It is shown that the characteristics and parameters of photoreceivers measured on this stand coincide with theoretical ones, within the error limits. Recommendations on the use of the stand are given.

Keywords: epitaxial layer, position-sensitive photodetector, equipotential current line, microcontroller, delta-sigma analog-to-digital converter, electronic switch, programmable amplifier, indicator device.

Введение

Развитие современных систем автоматического управления предъявляет повышенные требования к системе сенсоров, в том числе оптического диапазона [1]. Отсюда вытекает необходимость в разработке новых конструкций сенсорной элементной базы, а также в применении новых материалов при их изготовлении [2]. Изменяются принципы съема и обработки сигналов, например, появляется требование оцифровать сигнал на выходе фотоприемника [2].

Рассматриваемые в настоящей работе позиционно-чувствительные фотоприемники (ПЧФ) предназначены для обнаружения источника электромагнитного излучения опти-

ческого диапазона, определения координаты облучаемой области в режиме реального времени и слежения за движущимися оптическими объектами [3]. Известны данные о фотоприемниках на основе фоточувствительных эпитаксиальных слоев CdSe/слода, имеющих нетрадиционную схему расположения и коммутации электрических контактов [4, 5]. Выходным сигналом таких ПЧФ является поперечная разность потенциалов, которая возникает между двумя его контактами после засветки одной из областей фотоприемника. Физические основы функционирования фотоприемников такого типа изложены в [4]. Указанные ПЧФ могут составить альтернативу или конкуренцию существующим фотоэлементам в связи с высокой точностью, быстродействием, простотой изготовления и дешевизной. Однако для их широкого применения имеются некоторые проблемы: во-первых, это аналоговый тип выходного сигнала, препятствующий дальнейшей его обработке; во-вторых – трудности «ручной» калибровки вновь изготовленного фотоприемника, которая занимает длительное время, связанное с накоплением и обработкой большого массива данных. Внедрение средств вычислительной техники и создание информационно-измерительной системы позволяет с высокой точностью и скоростью обрабатывать выходные сигналы таких фотоприемников в режиме реального времени. Решение подобных задач обычно осуществляется путем создания разного рода стендов [6, 7], которые позволяют исследовать объект в режиме реального времени.

В статье представлены результаты разработки и испытания стенда, который позволяет оцифровать выходной сигнал, откалибровать ПЧФ, определить его параметры и характеристики, а также использовать для обнаружения, сопровождения и определения координат источника света в режиме реального времени.

Разработка стенда для исследования позиционно-чувствительных фотоприемников

Нами разработан стенд для регистрации сигнала ПЧФ, преобразования его в цифровую форму и передачи на персональный компьютер. С помощью разработанной программы он собирает, обрабатывает и хранит полученные данные, что позволяет исключить субъективную ошибку оператора. Поставленная задача вызвана, в первую очередь, потребностью в высокой скорости и точности результатов измерений.

На рис. 1 приведена структурная схема стенда, который используется для определения координат облученной области фотоприемника и измерения параметров и характеристик исследуемых ПЧФ.

Поставленная задача решается с использованием одноканального низкошумящего 18-битного дельта-сигма аналого-цифрового преобразователя (АЦП) MCP3421¹, работающего со скоростью 3.75 выборки в секунду. Основным его достоинством является высокая точность измерения, обусловленная низким уровнем собственного шума, и встроенный программируемый усилитель входного сигнала. Такие АЦП работают в диапазоне частот до сотен кГц и обладают линейной передаточной характеристикой и низкой потребляемой мощностью. Взаимодействие АЦП и микроконтроллера осуществляется при помощи двухпроводного последовательного интерфейса I²C. Элементом управления измерительного устройства является микроконтроллер ATmega 32 PU². Его отличитель-

¹Microchip MCP3421 [DATASHEET] 18-Bit Analog-to-Digital Converter with I2C Interface and On-Board Reference.

²Atmel Atmega32A [DATASHEET] Atmel-8159F-8-bit AVR Microcontroller Datasheet Complete-09/2015.

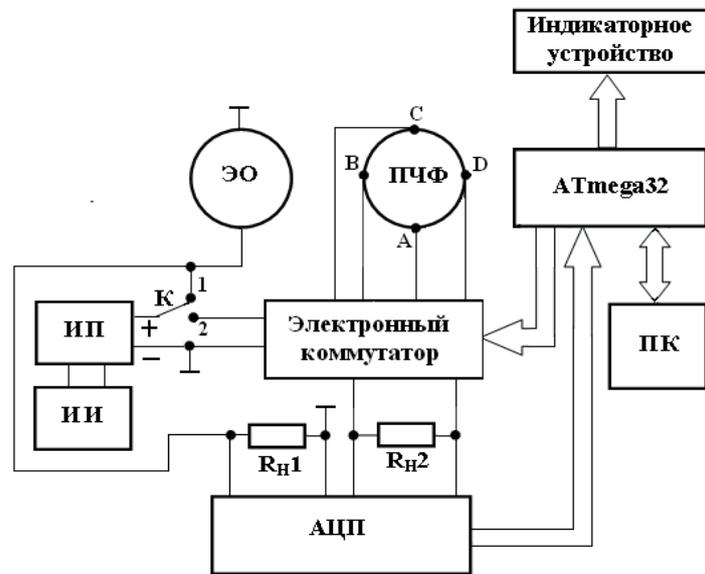


Рис. 1. Структурная схема стенда.

ной особенностью является большой объем внутренней памяти, необходимой для решения поставленной задачи. Контроллер принимает результаты измерений в цифровой форме от внешнего АЦП. Затем обрабатывает их, согласно алгоритму его программы, и передает непосредственно в память персонального компьютера (ПК) для хранения и дальнейшей их обработки. В структурную схему устройства для проверки работоспособности и снижения погрешности измерения введен эталонный образец (ЭО), формирующий при определенных условиях на выходе сигнал с известными высокостабильными параметрами (световой ток). В качестве ЭО брали фоторезистор ФСД-1 [8].

Когда ключ (К) находится в положении 1, происходит проверка работоспособности устройства. В это время ЭО подключен к источнику стабилизированного постоянного напряжения (ИП). В результате с резистора нагрузки $R_{н1}$ снимается выходной сигнал, который с помощью АЦП преобразуется в цифровую форму. При переключении К в положение 2 стабилизированное напряжение подается к паре контактов А и С через замкнутые контакты электронного коммутатора. При этом через фотоприемный элемент пропускается входной ток $I_{вх}$. К другим контактам В и D, расположенным на эквипотенциальной линии тока, электронный коммутатор подключает сопротивление нагрузки $R_{н2}$, с которого снимается «поперечное» выходное напряжение U_{BD} , возникающее при локальной засветке зондом поверхности приемного элемента ПЧФ. Выходное напряжение U_{BD} соответствует определенной координате (X). В следующий момент времени электронный коммутатор подключает источник постоянного напряжения к контактам В и D, а с контактов А и С снимается полезный сигнал U_{AC} , соответствующий другой координате (Y). Управление электронным коммутатором осуществляется с помощью микроконтроллера по заданной программе. Время переключения электронного коммутатора устанавливается программно и составляет 40 мс, а время релаксации фотоприемного элемента соответствует величине 20 мс. Такой режим работы ПЧФ обеспечивает определение координат X и Y облучаемой поверхности фотоприемного элемента.

Методика измерения и основные экспериментальные результаты

С целью исследования параметров и характеристик ПЧФ использовали эпитаксиальные слои CdSe/слюда в форме диска радиусом $R = 9$ мм и толщиной $d = 40$ мкм. Они обладали n -типом проводимости, удельная величина которой при 300 К составляла $8.0 \cdot 10^{-9} \text{ Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$. При освещенности интегральным светом 200 лк кратность фотоответа исследованных слоев CdSe/слюда имела значение $\approx 10^4$.

Зондирование образцов осуществляли с помощью источника излучения (ИИ), представляющего собой твердотельный лазер LD-76005W с длиной волны 670 нм и средней мощностью 3 мВт. Луч лазера направляли перпендикулярно поверхности приемного элемента и фокусировали в пятно радиусом $a \approx 0.5$ мм. Текущее значения измеряемых величин контролировали на жидкокристаллическом символьном индикаторном устройстве BC 1604, построенном на базе встроенного контроллера ST7066 [9]. В режиме реального времени на индикаторном устройстве отображается заданное значение темнового тока фотоприемника, его световой ток при определенной освещенности, выходное напряжение ПЧФ и координаты облученной области.

В соответствии с элементарной теорией токопротекания, развитой на основе решения уравнения Лапласа [9, 10], выходной сигнал напряжения U_{BD} исследуемых ПЧФ зависит от местоположения, радиуса и интенсивности L светового пятна, а также от величины I_{BX} и определяется выражением:

$$U_{BD} = \frac{\delta\sigma}{\sigma} \cdot \frac{a^2}{R^2} \cdot \frac{I_{ex}}{\pi\sigma d} \cdot \frac{8r_{00}^2 \sin 2\Theta}{(1-r_{00}^4)^2 + 4r_{00}^4 \sin^2 2\Theta}, \quad (1)$$

где $\delta\sigma$ – изменение фотопроводимости при локальной засветке образца в точке $K(\vec{r}_0)$;

$r_{00} = r_0/R$ – безразмерный радиус оптического зондирования;

r_0 – модуль радиус-вектора пятна засветки;

a – радиус пятна засветки;

Θ – угол между вектором \vec{r}_0 и положительным направлением оси X.

Величины R и d представляют собой радиус и толщину полупроводникового диска, соответственно. Удельная темновая электропроводность фотоприемника обозначается через σ , а ее изменение при локальной засветке в точке $K(\vec{r}_0)$, как уже отмечалось, равно $\delta\sigma$.

С помощью разработанного устройства исследовали зависимость выходного сигнала ПЧФ CdSe/слюда от безразмерного радиуса оптического зондирования светоприемного элемента: $U_{BD} = f(r_{00})$. Сканирование лучом по поверхности фотоэлемента осуществляли в направлении от центра фотоприемного элемента к периферии вдоль диагонали первого квадранта. Интенсивность светового зонда обеспечивала относительную величину фотоответа в области засветки ПЧФ на уровне $\delta\sigma/\sigma \ll 0.025$, соответствующем условию $\delta\sigma/\sigma \ll 1$, необходимому для получения выражения (1). На этом основании выполнялось допущение об отсутствии размытия пятна возбужденных носителей заряда под действием внешнего электрического поля. На рис. 2 (кривая 1) показана экспериментальная зависимость выходного напряжения ПЧФ CdSe/слюда от безразмерного радиуса оптического зондирования фотоэлемента, снятая при температуре 300 К и значении $I_{BX} = 3.0$ мкА и $\theta = \pi/4$. Установлено, что при $r_{00} = 0.77$ и $I_{BX} = 3.0$ мкА максимальное значение выходного напряжения составляет $U_{max} = 6.6$ В.

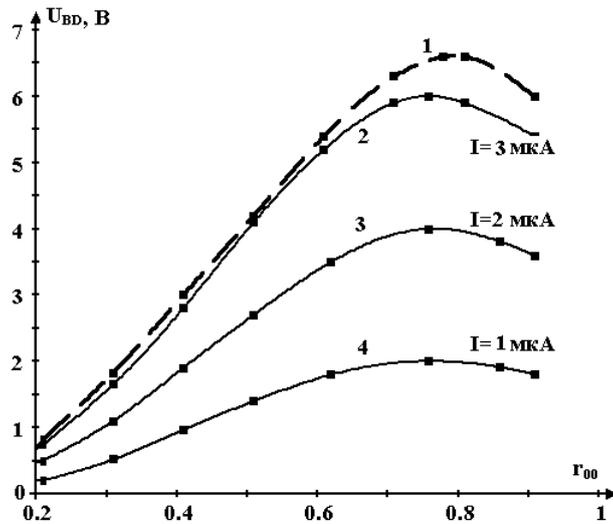


Рис. 2. Экспериментальная зависимость напряжения $U_{BD} = f(r_{00})$ при $I_{BX} = 3.0$ мкА и $\theta = \pi/4$ (кривая 1) и теоретические зависимости напряжения $U_{BD} = f(r_{00})$ при $I_{BX} = 3.0, 2.0, 1.0$ мкА и $\theta = \pi/4$ (соответственно кривые 2, 3, 4).

Зависимости $U_{BD} = f(r_{00})$, рассчитанные по формуле (1) при значениях $I_{BX} = 3.0, 2.0, 1.0$ мкА и $\theta = \pi/4$, представлены, соответственно, кривыми 2, 3, 4 (рис. 2). Видно, что экспериментальная зависимость $U_{BD} = f(r_{00})$ хорошо коррелирует с теоретическими расчетами, выполненными по формуле (1). Она проходит через максимум при $r_{00} = 0.77$, а экстремум теоретической зависимости соответствует значению $r_{00} = 0.75$, практически совпадающему с максимумом экспериментальной зависимости.

На возрастающем участке экспериментальной зависимости $U_{BD} = f(r_{00})$ при входном токе $I_{BX} = 3$ мкА и $\theta = \pi/4$ определена координатная чувствительность исследуемого образца ПЧФ на основе слоев CdSe/слюда:

$$\eta = \frac{U_{\max}}{\Delta r_{00} \cdot I_{BX} \cdot P} = \frac{6,6}{0,57 \cdot 3 \cdot 3} = 1,3 \frac{\text{В}}{\text{мм} \cdot \text{мкА} \cdot \text{мВт}}$$

где $\Delta r_{00} = r_{\max} - r_{\min} = 0.77 - 0.2 = 0.57$ мм.

Удельная спектральная чувствительность при $r_{00} = 0.75$ и $\theta = \pi/4$ составила:

$$\eta = \frac{U_{\max}}{I_{BX} \cdot P} = \frac{6,6}{3 \cdot 3} = 733 \cdot 10^{-3} \frac{\text{В}}{\text{мкА} \cdot \text{мВт}}$$

Заключение

Разработан стенд для преобразования выходного сигнала ПЧФ в цифровую форму и последующей передачи его на персональный компьютер. Он дает возможность в режиме реального времени контролировать фотоэлектрические параметры исследуемых ПЧФ:

- заданное значение темнового тока фотоприемника;
- световой ток при определенной освещенности;
- выходное напряжение ПЧФ;
- координаты облученной области.

Разработанное устройство позволяет автоматически управлять измерительным процессом, определять координаты облучаемой области в режиме реального времени, исследовать параметры и характеристики позиционно-чувствительных фотоприемников. Данный стенд может быть использован для контроля годности изготовленных ПЧФ, их калибровки. Целесообразно рекомендовать подготовку на основе этого стенда лабораторной работы по изучению свойств и характеристик ПЧФ из различных материалов.

Литература:

1. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2017. 1032 p.
2. Handbook of Optical Sensors / Eds. J.L. Santos, F. Farahi. Boca Raton: CRC Press, 2014. 718 p.
3. Горн Л.С., Хазанов Б.И. Позиционно-чувствительные детекторы. М.: Энергоиздат, 1982. 64 с.
4. Сенокосов Э.А., Чукита В.И., Хамидуллин Р.А., Чебан В.Н., Один И.Н., Чукичев М.В. Экспериментальное и теоретическое исследование характеристик позиционно-чувствительных фотоприемников на основе эпитаксиальных слоев n -CdSe/слюда // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. Вып. 5. С. 689–694. DOI: 10.21883/FTR.2017.05.44430.8406
5. Senokosov E.A., Chukita V.I., Khamidullin R.A., Cheban V.N., Odin I.N., Chukichev M.V. Position sensitivity characteristics of n -CdSe epitaxial layers grown on mica crystals in a quasi-closed system // Inorg. Mater. 2016. V. 52. № 8. P. 762–764. DOI: 10.1134/S002016851608015X
6. Битюков В.К., Иванов А.А., Миронов А.В., Михневич Н.Г., Перфильев В.С., Петров В.А. Стенд для исследования характеристик микросхем источников вторичного электропитания с накачкой заряда // Российский технологический журнал. 2016. Т. 4. № 3. С. 37–52.
7. Бугадян И.Ф., Дубровин В.Ф. Автоматизированный стенд для исследования волновых процессов // Вестник МГТУ МИРЭА. 2014. № 4. С. 223–237.
8. Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучения. Справочник. М.: ДМК Пресс, 2012. 640 с.
9. Сенокосов Э.А., Ключанов А.А., Усатый А.Н., Сергеев С.А., Федоров В.М. Устройство для регистрации слабых световых сигналов: А.с. СССР № 1436796, приоритет от 12.08.86, опубл. 08.07.88.
10. Ключанов А.А., Сенокосов Э.А., Усатый А.Н., Федоров В.М. Устройство для определения координаты светового пятна: А.с. СССР № 1499119, приоритет от 07.01.87, опубл. 07.08.89.

References:

1. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 2017. 1032 p.
2. Handbook of Optical Sensors. Eds. J.L. Santos, F. Farahi. Boca Raton: CRC Press, 2014. 718 p.

3. Gorn L.S., Khazanov B.I. Position-Sensitive Photodetectors. Moscow: Energoizdat Publ., 1982. 64 p. (in Russ.)
4. Senokosov E.A., Chukita V.I., Khamidulin R.A., Cheban V.N., Odin I.I., Chukichev M.V. Experimental and theoretical studies of the characteristics of the position-sensitive photodetectors on the basis of epitaxial layers of the n-CdSe/mica. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* (Semiconductors/Physics of the Solid State). 2017; 51(5):689-694. (in Russ.). DOI: 10.21883/FTP.2017.05.44430.8406
5. Senokosov E.A., Chukita V.I., Khamidullin R.A., Cheban V.N., Odin I.N., Chukichev M.V. Position sensitivity characteristics of n-CdSe epitaxial layers grown on mica crystals in a quasi-closed system. *Inorg. Mater.* 2016; 52(8):762-764. DOI: 10.1134/S002016851608015X
6. Bityukov V.K., Ivanov A.A., Mironov A.V., Mikhnevich N.G., Perfiliev V.S., Petrov V.A. Stand for studying the characteristics of chips of secondary power sources with charge pumping. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2016; 4(3):37-52. (in Russ.)
7. Bugadyan I.F., Dubrovin V.F. Automated stand for the study of wave processes. *Vestnik MGTU MIREA* (Herald of the MSTU MIREA). 2014; (4):223-237. (in Russ.)
8. Baranochnikov M.L. Receivers and radiation detectors. Handbook. Moscow: DMK Press Publ., 2012. 640 p. (in Russ.)
9. Senokosov E.A., Klukanov A.A., Usatyy A.N., Sergeev S.A., Fedorov V.M. Device for registration weak light signals: USSR Inventor's Certificate no. 1 436 796, 1988. Priority from 08/12/1986. (in Russ.)
10. Klukanov A.A., Senokosov E.A., Usatyy A.N., Fedorov V.M. Device for determining the coordinates of the light spot: USSR Inventor's Certificate no. 1 499 119, 1989. Priority from 01/01/1987. (in Russ.)

Об авторах:

Чукита Виталий Исакович, старший преподаватель кафедры твердотельной электроники и микроэлектроники, Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко (MD -3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128).

Сенокосов Эдуард Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой твердотельной электроники и микроэлектроники, Приднестровский государственный университет им. Т.Г. Шевченко (MD-3300, ПМР, Тирасполь, ул. 25 Октября, д. 128).

Фещенко Валерий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, начальник научно-производственной лаборатории № 1 ООО «Производственно-технологический центр «УралАлмазИнвест» (121108, Россия, Москва, ул. Ивана Франко, д. 4).

About the authors:

Vitaly I. Chukita, Senior Lecturer of the Chair of Solid-State Electronics and Microelectronics, Shevchenko Pridnestrovian State University (128, 25th of October st., Tiraspol MD-3300, PMR).

Eduard A. Senokosov, D.Sc. (Phys. and Mathem.), Professor, Head of the Chair of Solid-State Electronics and Microelectronics, Shevchenko Pridnestrovian State University (128, 25th of October st., Tiraspol MD-3300, PMR).

Valery S. Feshchenko, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Research and Production Laboratory № 1 of Production-Technological Center «UralAlmazInvest», Ltd. (4, Ivan Franko st., Moscow 121108, Russia).

Для цитирования: Чукита В.И., Сенокосов Э.А., Фещенко В.С. Стенд для исследования позиционно-чувствительного фотоприемника // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 3. С. 69–76. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76

For citation: Chukita V.I., Senokosov E.A., Feshchenko V.S. The stand for research of positional-sensitive photosensor. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(3):69-76. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-3-69-76