

Сергей Георгиевич МОНТАНАРИ¹

УДК 62-971.4:621.384.3

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ФОТОПРИЕМНИКА В ЛАЗЕРНОМ ЛОКАТОРЕ УТЕЧЕК МЕТАНА «АЭРОПОИСК-3М»

¹ кандидат физико-математических наук, доцент
кафедры экспериментальной физики и нанотехнологий,
Физико-технический институт,
Тюменский государственный университет
smontanari@mail.ru

Аннотация

В работе представлены результаты экспериментального исследования температурной зависимости основных параметров полупроводниковых фоторезисторов среднего ИК диапазона на основе PbSe. Именно такие фоторезисторы используются в приемном оптическом тракте ($\lambda \sim 3,4$ мкм) вертолетных лазерных локаторов утечек метана из магистральных газопроводов «Аэропоиск-3М», разработанных в Тюменском государственном университете. Данные локаторы эксплуатируются в газотранспортных предприятиях ПАО «Газпром» в условиях значительных сезонных температурных перепадов, поэтому изучение влияния изменений температуры на основные параметры фоторезисторов и, в целом, на эксплуатационные характеристики лазерных локаторов утечек метана представляет практический интерес. В работе описана экспериментальная лабораторная установка, предназначенная для исследования зависимости темнового сопротивления, вольт-ваттной чувствительности, спектральной плотности среднеквадратичного напряжения шумов и обнаружительной способности фоторезистора от температуры, приведена методика измерений, представлены полученные экспериментальные результаты и их обсуждение. На основе анализа экспериментальных данных в работе сделан вывод об оптимальном температурном диапазоне работы используемых полупроводниковых PbSe фоторезисторов, лежащим в пределах 5..10°C. Именно при

Цитирование: Монтанари С. Г. Выбор оптимальной рабочей температуры фотоприемника в лазерном локаторе утечек метана «Аэропоиск-3М» / С. Г. Монтанари // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2017. Том 3. № 1. С. 37-45.
DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-37-45

таких температурах достигается максимальное значение обнаружительной способности используемых фотоприемников при сохранении приемлемого быстродействия лазерного локатора утечек метана. Применение системы активной (на основе малогабаритных элементов Пельтье) термостабилизации фотоприемника в пределах указанного температурного диапазона позволит заметным образом улучшить характеристики локатора «Аэропоиск-3М», в частности, повысить стабильность его работы при круглогодичной эксплуатации и увеличить чувствительность обнаружения утечек метана в периоды, характеризующиеся высокой температурой окружающей среды.

Ключевые слова

Температурная зависимость, полупроводниковые фоторезисторы среднего ИК диапазона, темновое сопротивление, обнаружительная способность, утечки метана, вертолетный лазерный локатор утечек метана.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-37-45

В оптических лазерных приборах среднего ИК диапазона (длина волны $\lambda \sim 3..4$ мкм) широко применяются полупроводниковые фоторезисторы на основе PbSe [1; 7; 9]. Аналогичные фоторезисторы используются и в вертолетном лазерном локаторе утечек метана из магистральных газопроводов «Аэропоиск-3М» (далее — лазерный локатор) [2-4]. Поскольку данный прибор эксплуатируется газотранспортными предприятиями ПАО «Газпром» круглогодично, сезонный диапазон изменения его рабочей температуры может достигать 50..70 °С. Известно, что обнаружительная способность и другие параметры полупроводниковых фоторезисторов существенно зависят от температуры [9]. В связи с этим актуальным является вопрос о применении в локаторе терморегулируемых фотоприемников и выборе их оптимальной рабочей температуры. Техническим аспектом рассматриваемой проблемы является обеспечение стабилизации температуры фотоприемника.

Блок-схема экспериментальной установки для измерения температурной зависимости параметров фотоприемников показана на рис. 1.

Выходная мощность излучения He-Ne лазера составляла 5 мВт на длине волны $\lambda = 3,3922$ мкм. В качестве модулятора 2 был использован обтюратор с регулируемой скоростью вращения, что позволяло изменять частоту модуляции в пределах от 0 до 8 кГц. Для того чтобы обеспечить работу фоторезистора в линейном режиме, мощность лазерного излучения понижалась с помощью ступенчатого оптического ослабителя 3 до величины 10 ± 1 мкВт.

Фотоприемник 4 был изготовлен на основе используемого в локаторе фоторезистора (аналог ФР-611) и элемента Пельтье, который обеспечивал возможность изменения температуры в пределах $\Delta T \approx 60$ °С при силе тока до 0,7 А. Такие фотоприемники с термоэлектрическими охладителями выпускаются промышленностью, в том числе и отечественной [8]. Для контроля температуры фоторезистора был использован электронный термометр на основе полупроводникового датчика LM335 с максимальной результирующей погрешностью

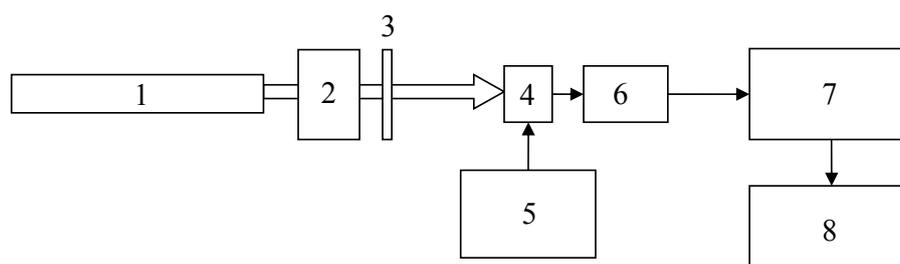


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для измерения температурной зависимости параметров фотоприемников: 1 — He-Ne лазер; 2 — модулятор; 3 — фильтр-ослабитель; 4 — фоторезистор с элементом Пельтье; 5 — блок регулировки и стабилизации температуры фоторезистора; 6 — малошумящий предусилитель; 7 — PC-осциллограф; 8 — компьютер

Fig. 1. Block diagram of the experimental facility for measuring the temperature dependence of the photodetector parameters: 1 — HeNe laser; 2 — modulator; 3 — filter-attenuator; 4 — photoresistor with thermoelectric cooler; 5 — block for adjusting and stabilizing the temperature of the photoresistor; 6 — low-noise preamplifier; 7 — oscilloscope; 8 — computer

измерения температуры в интересующем диапазоне, не превышающей $\pm 1^\circ\text{C}$. Предварительный усилитель сигнала фотоприемника был выполнен на основе малошумящего инструментального усилителя AD620 с коэффициентом усиления, равным 100.

Использованный в составе установки PC-осциллограф (Velleman PCSGU250) позволял измерять не только величину (амплитуду) сигналов, но и спектральную плотность среднеквадратичного напряжения шумов.

На рис. 2 представлена измеренная зависимость величины темнового сопротивления фоторезистора R_t от температуры, которая хорошо согласуется с литературными данными [9: 20]. В процессе измерений напряжение питания фоторезистора поддерживалось постоянным (5 В).

Измерение зависимости вольтовой (вольт-ваттной) чувствительности фоторезистора S [В/Вт] от температуры выполнялось при частоте модуляции лазерного излучения 7 кГц, соответствующей рабочей частоте модуляции, используемой в лазерном локаторе. В процессе измерений мощность лазерного излучения периодически контролировалась с помощью измерителя мощности ИМО-2Н, что позволяло уменьшить погрешность, связанную с долговременной нестабильностью лазера. Результаты измерений показаны на рис. 3. Как видно из графика, чувствительность S фоторезистора возрастает при снижении температуры вплоть до 0°C , а при дальнейшем понижении температуры начинает уменьшаться.

Такое поведение чувствительности объясняется тем, что с понижением температуры возрастает постоянная времени фоторезистора $\tau_{\text{фр}}$, что приводит к сужению ширины полосы пропускания. При фиксированной частоте модуляции, близкой к верхней граничной частоте полосы пропускания фоторезистора,

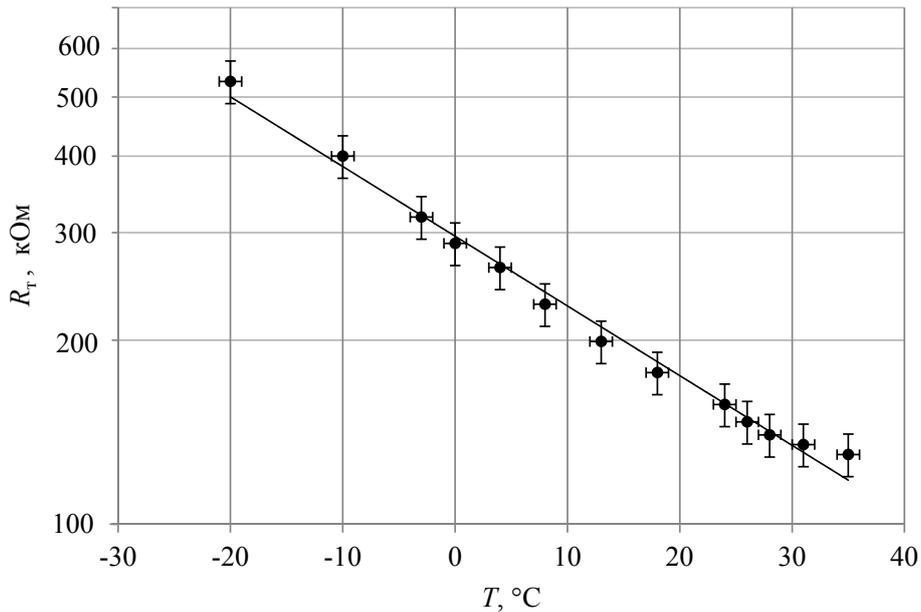


Рис. 2. Экспериментальная зависимость величины темнового сопротивления фоторезистора от температуры

Fig. 2. The experimental dependence of the value of the photoresistor dark resistance on the temperature

увеличение постоянной времени $\tau_{\text{ФР}}$ должно приводить к снижению его отклика на модулированное излучение. Это подтверждается результатами измерений при меньших частотах модуляции. Сделанная на основе обработки частотной характеристики оценка величины $\tau_{\text{ФР}}$ фоторезистора составила величину 18 ± 5 мкс при $T = 25$ °C.

Более информативным и важным параметром является удельная обнаружительная способность D^* [6], в которой учитывается уровень шумов фотоприемника. Аналогом удельной обнаружительной способности (с точностью до постоянного множителя) является величина отношения сигнал/шум, точнее, отношение вольт-ваттной чувствительности фотоприемника к спектральной плотности среднеквадратичного напряжения шумов $S/U_{\text{ш}}$.

Для исключения вклада собственных шумов предусилителя спектральная плотность среднеквадратичного напряжения шумов фоторезистора $U_{\text{ш}}$ определялась по формуле:

$$U_{\text{ш}} = \frac{\sqrt{U_{\text{ш ФР}}^2 - U_{\text{ш R}}^2}}{K_{\text{ус}}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{ш ФР}}$ и $U_{\text{ш R}}$ — измеренные спектральные плотности среднеквадратичного напряжения шумов на выходе предусилителя с подключенным фоторезистором и обычным резистором с $R = R_T$, соответственно, $K_{\text{ус}}$ — коэффициент усиления предусилителя. На частоте 7 кГц при температуре 25 °C спектральная плотность

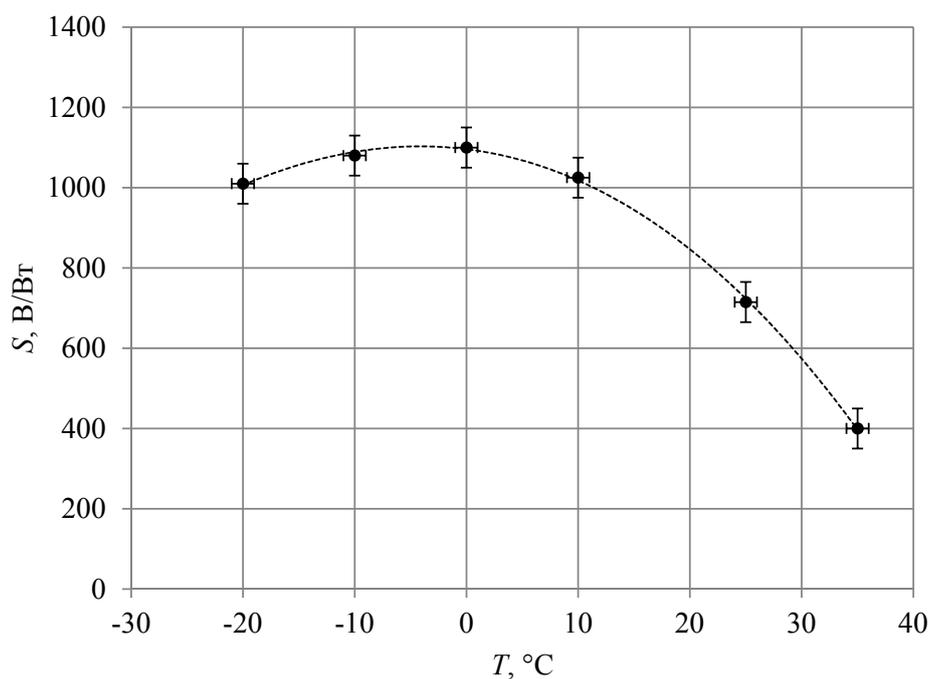


Рис. 3. Температурная зависимость вольт-ваттной чувствительности фоторезистора при частоте модуляции 7 кГц

Fig. 3. Temperature dependence of the volt-watt sensitivity of the photoresistor at the modulation frequency of 7 kHz

среднеквадратичного напряжения шумов фоторезистора $U_{\text{ш}}$ составила величину $280 \pm 30 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$.

На рис. 4 показана рассчитанная на основе полученных экспериментальных данных зависимость величины отношения сигнал/шум $S/U_{\text{ш}}$ от температуры для частоты модуляции 7 кГц.

Как видно из графика, обнаружительная способность $S/U_{\text{ш}}$ (при частоте модуляции 7 кГц) возрастает с понижением температуры вплоть до $\approx 10^\circ\text{C}$, а затем — убывает. Более быстрый спад величины $S/U_{\text{ш}}$ по сравнению с чувствительностью S при низких температурах объясняется некоторым возрастанием шумов фоторезистора, что так же качественно согласуется с литературными данными [5].

Работа фотоприемника в указанном выше оптимальном температурном диапазоне технически предполагает дооснащение лазерного локатора системой активной термостабилизации. При этом роль датчика температуры фоторезистора может с успехом выполнять сам фоторезистор благодаря сильной температурной зависимости его сопротивления (см. рис. 2). Использование в качестве сигнала обратной связи постоянной составляющей падения напряжения на фоторезисторе позволяет существенно упростить электронную схему термостабилизатора.

Таким образом, на основе анализа температурной зависимости обнаружительной способности применяемого в локаторе фоторезистора, можно сделать

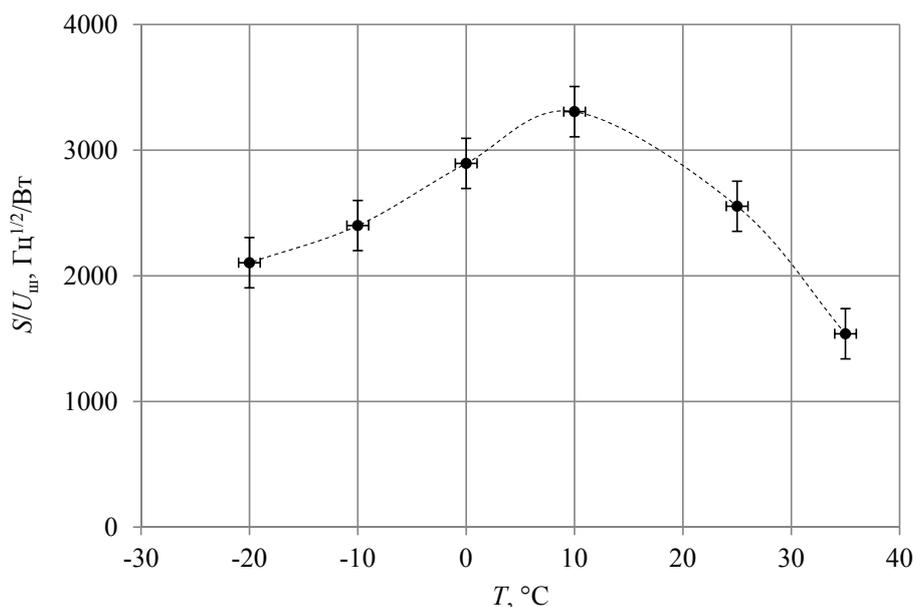


Рис. 4. Температурная зависимость отношения сигнал/шум ($S/U_{ш}$) фотоприемника при частоте модуляции 7 кГц

Fig. 4. Temperature dependence of the signal-to-noise ratio ($S/U_{ш}$) of the photodetector at the modulation frequency of 7 kHz

вывод о целесообразности поддержания рабочей температуры фоторезистора в области 5..10 °C при, возможно, одновременном небольшом понижении частоты модуляции излучения до 5..6 кГц. При этом охлаждение фотоприемника до более низких температур (с одновременным значительным снижением частоты модуляции) не может быть рекомендовано, т. к., несмотря на повышение статической чувствительности локатора, его быстродействие ухудшится до неприемлемых значений. Доработка локатора путем введения дополнительного блока термостабилизации не потребует значительных затрат.

Автор выражает благодарность С. В. Кузнецову, Г. С. Ушкову и Е. Ю. Чернову за помощь при проведении экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бараночников М. Л. Приемники и детекторы излучений. Справочник / М. Л. Бараночников. М.: ДМК Пресс, 2012. 640 с.
2. Гармонов А. А. Охрана воздушной среды вдоль трасс магистральных газопроводов России / А. А. Гармонов, В. Е. Косицын, С. Г. Монтанари // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в Сибири и на Крайнем Севере». Тюмень, 1995. С. 5-6.
3. Гармонов А. А. Система диагностики лазерного локатора / А. А. Гармонов, А. А. Лямзин, С. Г. Монтанари // Материалы научно-технической конференции

- «Нефть и газ: проблемы недропользования, добычи и транспортирования», посвященной 90-летию со дня рождения В.И. Муравленко. Тюмень: ТюмГНГУ, 2002.
4. Долгов И. А. 10-летний опыт эксплуатации локатора утечек метана “Аэропоиск-3М” в ООО “Тюментрансгаз” / И. А. Долгов, С. В. Пахтусов, Н. И. Оляницкий, А. А. Гармонов, В. Е. Косицын, С. В. Кузнецов, С. Г. Монтанари // Тезисы докладов 3-й Международной конференции “Диагностика трубопроводов” (21-26 мая 2001, Россия, Москва). Москва, 2001. С. 374.
 5. Мухамедзянов Х. Н. Исследование характеристик фоторезисторов на основе гидрокхимически осажденных пленок твердого раствора $Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se$ / Х. Н. Мухамедзянов, В. Ф. Марков, Л. Н. Маскаева // Физика и техника полупроводников. 2013. Том 47. Вып. 4. С. 551-556. DOI: 10.1134/S1063782613040179
 6. Основные характеристики и параметры приемников излучения.
URL: <http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/7675/5/хар%20и%20пар%20прием%20изл.pdf>
 7. Сак А. В. Состояние и перспективы развития фотоэлектрических и оптоэлектронных компонентов на основе PbSe в ОАО НИИ «Гириконд» / А. В. Сак, С. Б. Бойко, А. Н. Тропин, Н. Э. Тропина // Электронная промышленность. 2014. № 2. С. 99-111.
 8. Фотоэлектрические полупроводниковые приемники излучения.
URL: http://www.giricond.ru/production/photoelectric/folder_1282852708/
 9. Technical Information. SD-12. Characteristics and Use of Infrared Detectors.
URL: <http://www.slac.stanford.edu/grp/arb/tn/arbvol5/AARD460.pdf>

Sergey G. MONTANARI¹

SELECTION OF THE OPTIMUM OPERATING TEMPERATURE OF THE PHOTODETECTOR IN THE HELICOPTER LASER LOCATOR OF METHANE LEAKS "AEROPISK-3M"

¹ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor,
Department of Experimental Physics and Nanotechnology,
Institute of Physics and Technology, Tyumen State University
smontanari@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of an experimental study of the temperature dependence of the main parameters of semiconductor photoresistors of the middle IR range based on PbSe. These photoresistors are used in the receiving optical path ($\lambda \sim 3.4 \mu\text{m}$) of helicopter laser locators for methane leaks from the gas mains "Aeropisk-3M", developed at the Tyumen State University. These locators are operated in gas transportation enterprises of PJSC "Gazprom" in conditions of significant seasonal temperature differences, therefore, the study of the effect of temperature changes on the main parameters of photoresistors and, in general, on the operational characteristics of laser locators of methane leaks is of practical interest. The paper describes an experimental laboratory setup for investigating the dependence of the dark resistance, the volt-watt sensitivity, the spectral density of the root-mean-square noise voltage and the photoresistors detectability on temperature, the measurement procedure is presented, the experimental results obtained and their discussion are presented. Based on the analysis of the experimental data, a conclusion is drawn in the paper about the optimal temperature range of the semiconductor PbSe photoresistors used, lying within $5..10^\circ\text{C}$. It is at these temperatures that the maximum detection power of the photodetectors used is reached, while maintaining an acceptable speed of the laser locator of methane leaks. The use of an active (based on small Peltier elements) thermal stabilization of the photodetector within the specified temperature range will significantly improve the characteristics of the "Aeropisk-3M" locator, in particular, improve the stability of its operation during year-round operation and increase the sensitivity of detection of methane leaks in periods characterized by high Ambient temperature.

Citation: Montanari S. G. 2017. "Selection of the Optimum Operating Temperature of the Photodetector in the Helicopter Laser Locator of Methane Leaks "Aeropisk-3M"". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 3, no 1, pp. 37-45.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-37-45

Key words

Temperature dependence, semiconductor photoresistors of the middle IR range, dark resistance, detectability, methane leakage, helicopter laser locator of methane leaks.

DOI: 10.21684/2411-7978-2017-3-1-37-45

REFERENCES

1. Baranochnikov M.L. 2012. Priemniki i detektory izlucheniya. Spravochnik [Radiation Detectors and Receivers. Directory]. Moscow: DMK Press.
2. Garmonov A. A., Kositsyn V. E., Montanari S. G. 1995. "Okhrana vozduшной sredy vdol' trass magistral'nykh gazoprovodov Rossi" [Protection of the Air Environment along the Main Gas Pipelines of Russia]. Abstracts of the International Scientific and Practical Conference: "Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti v Sibiri i na Kraynem Severe", pp. 5-6. Tyumen.
3. Garmonov A. A., Lyamzin A. A., Montanari S. G. 2002 "Sistema diagnostiki lazernogo lokatora" [Laser Locator Diagnostic System]. Materials of Scientific and Technical Conference: "Nef't i gaz: problemy nedropol'zovaniya, dobychi i transportirovaniya», posvyashchenoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya V. I. Muravlenko". Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University.
4. Dolgov I. A., Pakhtusov S. V., Olyanitskiy N. I., Garmonov A. A., Kositsyn V. E., Kuznetsov S. V., Montanari S.G. 2001. "10-letniy opyt ekspluatatsii lokatora utechek metana 'Aeropoisk-3M' v OOO 'Tyumentransgaz'" [10-Year Experience in Operating the Methane Leakage Locator Aeropoisk-3M in LLC Tyumentransgaz]. Abstracts of the 3rd International Conference: "Diagnostika truboprovodov" (May 21-26, 2001, Russia, Moscow), pp. 374. Moscow.
5. Mukhamedzyanov H. N., Markov V. F., Maskaeva L. N. 2013. "Study of the Characteristics of Photoresistors Based on Hydrochemically Deposited Films of Pb_{0.902}Sn_{0.098}Se Solid Solution". Semiconductors, vol. 47, no 4, pp. 574-578. DOI: 10.1134/S1063782613040179
6. Osnovnye kharakteristiki i parametry priemnikov izlucheniya [Main Characteristics and Parameters of Radiation Receivers]. <http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/7675/5/xap%20и%20пар%20прием%20изл.pdf>
7. Sak A.V., Boyko S.B., Tropin A.N., Tropina N.E. 2014. "Sostoyaniye i perspektivy razvitiya fotoelektricheskikh i optoelektronnykh komponentov na osnove PbSe v OAO NII 'Girikond'" [Current State and Future Developments Concerning Photoelectric and Optoelectronic PbSe Based Components in JSC "NII Giricond"]. Electronic industry, no 2, pp. 99-111.
8. Fotoelektricheskie poluprovodnikovye priemniki izlucheniya [Photovoltaic Semiconductor Radiation Receivers]. http://www.giricond.ru/production/photoelectric/folder_1282852708/
9. Technical Information. SD-12. Characteristics and Use of Infrared Detectors. <http://www.slac.stanford.edu/grp/arb/tn/arbvol5/AARD460.pdf>