



Приемники терагерцевого излучения на основе силленитов: аспекты проектирования

В. М. Петров¹, Г. А. Лудников²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

² Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена возможность использования кристаллов группы силленитов ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) для регистрации излучения терагерцевого (ближнего инфракрасного) диапазона. Фоточувствительность для спектрального диапазона 3–30 мкм обеспечивается за счет использования мелких ловушечных уровней, находящихся вблизи дна зоны проводимости. Определены срезы кристалла, при котором могут быть использованы электрооптический и пьезоэлектрический эффекты для создания напряжения на поверхностных электродах. Electrodes, выполненные в виде встречно-штыревого преобразователя или спирали, дополняют устройство новыми функциональными возможностями.

Ключевые слова: терагерцевые сенсоры, наноантенны, электрооптический эффект, пьезоэлектрический эффект

Статья получена: 02.04.2023

Статья принята: 02.06.2023

ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач при создании эффективных терагерцевых наноантенн является возможность точной настройки их оптического отклика с использованием электрических полей. Для этого необходимо выбрать материал, который обладал бы как светочувствительностью, например – фотопроводимостью, так и наличием физического

Sillenite-Based Terahertz Radiation Receivers: Design Aspects

V. M. Petrov¹, G. A. Ludnikov²

¹ Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

² National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia

The possible application of crystals from the sillenite group ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$) to detect radiation in the terahertz (near infrared) range is considered. Photosensitivity for the spectral range of 3–30 μm is provided by application of the shallow traps located near the bottom of the conduction band. The crystal sections are determined, at which the electro-optical and piezoelectric effects can be used to develop a voltage on the surface electrodes. The electrodes made in the form of an interdigital transducer or a spiral complement the device with new functional capabilities.

Keywords: terahertz sensors, nanoantennas, electro-optical effect, piezoelectric effect

Article received: 02.04.2023

Article accepted: 02.06.2023

INTRODUCTION

During the development of highly efficient terahertz nanoantennas one of the objectives is the possible fine tuning of their optical response using the electric fields. For this purpose, it is necessary to select a material that would have both light sensitivity, for example, photoconductivity, and availability of a physical mechanism that can be used to control the antenna response. The electrical tuning capabilities of nanoantennas have been demonstrated for the semiconductor structures due to the density control of charge carriers [1–3], nanoantennas based on a graphene sheet located on any substrate by controlling the dipole moment [4–8], and also due to the nano-mechanical deformations caused by the forces of various nature [9, 10], including the Casimir interaction [11].



механизма, при помощи которого можно управлять откликом антенны. Возможности электрической настройки наноантенны были продемонстрированы для полупроводниковых структур за счет управления плотностью носителей заряда [1-3], наноантенн на основе листа графена, расположенного на какой-либо подложке за счет управления дипольным моментом [4-8], а также за счет наномеханических деформаций, вызванных силами различной природы [9, 10], в том числе, взаимодействием Казимира [11].

Выбор подходящего материала для управляемой наноантенны не ограничивается перечисленными выше материалами. Так, еще в 1995 году была продемонстрирована оптическая запись информации в кристаллах силиката висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ на т. н. мелких ловушечных уровнях [12], располагающихся в диапазоне практически от 0 до 1,5-1,9 эВ от дна зоны проводимости (см. рис. 1). Концентрация таких ловушечных уровней оценивается в 10^{14} - 10^{15} см^{-1} [13]. Позднее была продемонстрирована эффективная оптическая запись динамических голограмм в кристаллах титаната висмута $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ [14].

Кристаллы силленитов принадлежат к точечной группе 23, с объемноцентрированной ячейкой без центра инверсии, что допускает наличие оптической активности, электрооптического, пьезоэлектрического и обратного флексо-электрического эффектов [15]. Особо следует выделить наличие у кристаллов данной группы обратного флексо-электрического эффекта, который проявляется в значительной мере на расстояниях между заряженными областями порядка 100 нм [16].

Наличие мелких ловушечных уровней с глубокой залегания ΔW_{TR} обеспечивает фоточувствительность кристаллов группы силленитов в красной и инфракрасной области спектра, что позволяет использовать их в качестве фотоприемников диапазона от единиц ТГц до 100 ТГц (0,4 эВ).

В исходном состоянии оптическая индикатриса таких кристаллов представляет сферу. Это значит, что величина показателя преломления n во всех направлениях одинакова. Однако при приложении внешнего электрического поля происходит деформация сферы. В зависимости от взаимной ориентации кристаллографических осей и направления прикладываемого поля E_0 , такие деформации могут иметь различную форму. Целью настоящей работы было определение наиболее подходящих срезов кристалла силиката висмута $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ и выбор соответствующей геометрии электродов, позволяющих регистрировать

The selection of a suitable material for a controlled nanoantenna is not limited to the materials listed above. Thus, back in 1995, the optical data recording in the bismuth silicate crystals $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ was demonstrated in the so-called shallow traps [12], located in the range almost from 0 to 1.5-1.9 eV from the bottom of the conduction band (see Fig. 1). The concentration of such traps is estimated at the level of 10^{14} - 10^{15} cm^{-1} [13]. Later, the efficient optical recording of dynamic holograms in the bismuth titanate crystals $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ was demonstrated [14].

The sillenite crystals belong to the point group 23, with a body-centered cell without an inversion center that allows for the availability of optical activity, electro-optical, piezoelectric, and inverse flexoelectric effects [15]. It is especially important to note the availability of an inverse flexoelectric effect in the crystals of this group that is shown to a large extent at the distances between the charged regions of the order of 100 nm [16].

The availability of shallow traps with a formation depth ΔW_{TR} ensures the photosensitivity of crystals of the sillenite group in the red and infrared ranges that allows them to be used as the photodetectors in the range from a few THz to 100 THz (0.4 eV).

In the initial state, the optical indicatrix of such crystals is a sphere. This means that the refractive index n is the same in all directions. However, when an external electric field is applied, the sphere is deformed. Depending on the mutual orientation of the crystallographic axes and direction of the applied

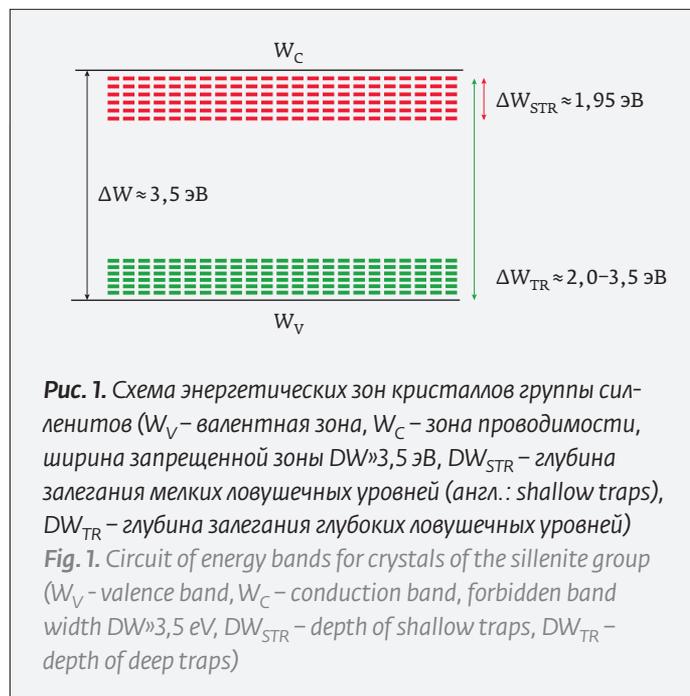


Рис. 1. Схема энергетических зон кристаллов группы силленитов (W_V – валентная зона, W_C – зона проводимости, ширина запрещенной зоны $DW \approx 3,5$ эВ, DW_{STR} – глубина залегания мелких ловушечных уровней (англ.: shallow traps), DW_{TR} – глубина залегания глубоких ловушечных уровней)

Fig. 1. Circuit of energy bands for crystals of the sillenite group (W_V – valence band, W_C – conduction band, forbidden band width $DW \approx 3,5$ eV, DW_{STR} – depth of shallow traps, DW_{TR} – depth of deep traps)

электрический сигнал, возникающий в результате взаимодействия терагерцевого излучения и фотодетектора.

ВЫБОР ОРИЕНТАЦИИ КРИСТАЛЛА

Основные оптические свойства кристаллов группы силленитов приведены в таблице. Тензоры электрооптических коэффициентов r_{41} и d_{41} имеют одинаковый вид:

$$\hat{r}_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Нами были выявлены две ориентации среза кристалла, подходящие для задачи детектирования терагерцевого излучения (рис. 2а, б).

Как видно из приведенных рисунков, в первом случае сечение оптической индикатрисы плоскостью образца, имеющее форму круга, приобретает форму эллипса, оси x' и y' которого повернуты на угол 45° относительно исходного положения (рис. 2а). В результате возникают изменения показателя преломления. В одном случае это будет величина $-\Delta n$ (вдоль оси x'), в другом случае – величина $+\Delta n$ (вдоль оси y'). Для использования излучения с обыкновенной поляризацией:

$$\Delta n_{x'} = n_0 - \frac{r_{41} n_0^3}{2} E, \quad \Delta n_{y'} = n_0 + \frac{r_{41} n_0^3}{2} E. \quad (2)$$

Для среза, показанного на рис. 2б, изначально сечение оптической индикатрисы при приложении продольного электрического поля меняет только свой радиус. Изменения формы оптической индикатрисы не происходит. В этом случае имеем только одно изменение показателя преломления вдоль радиально направления Δn_{rad} :

$$\Delta n_{rad} = \frac{r_{41} n_0^3}{2\sqrt{3}} E. \quad (3)$$

Электрооптические и пьезоэлектрические свойства этих кристаллов имеют одинаковую симметрию и связаны между собой.

Освещение поверхности кристалла излучением приводит к фотогенерации электронов с мелких ловушечных уровней в зону проводимости, что приводит к перераспределению объемного заряда внутри кристалла. Возникновение объемного заряда внутри кристалла приводит к его локальным механическим деформациям, что создает

field E_0 , such deformations can have various shapes. The purpose of this work is to determine the most suitable sections of a $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ bismuth silicate crystal and to select the appropriate electrode geometry that makes it possible to record an electric signal resulting from the interaction of terahertz radiation and a photodetector.

SELECTION OF CRYSTAL ORIENTATION

The main optical properties of crystals of the sillenite group are given in Table 1.

The tensors of the electrooptical coefficients r_{41} and d_{41} have the same form:



Рис. 2. Возможные срезы кристаллов, при которых возникают максимальные изменения показателя преломления Δn и индуцированных электрических полей, вызванных пьезоэффектом (синим цветом показано исходное состояние оптической индикатрисы, красным – измененное): а – излучение падает на кристалл вдоль плоскости $[001]$, внешнее управляющее поле E_0 приложено вдоль плоскости $[100]$; б – излучение падает на кристалл вдоль плоскости $[111]$, внешнее управляющее поле E_0 приложено вдоль плоскости $[111]$; с и d – спиральные формы исполнения электродов

Fig. 2. Possible crystal sections, at which the maximum changes in the refractive index Δn and induced electric fields occur due to the piezoelectric effect (the initial state of optical indicatrix is shown in blue, the amended state is shown in red): а – radiation is incident on the crystal along the $[001]$ plane, the external control field E_0 is applied along the $[100]$ plane; б – radiation is incident on the crystal along the $[111]$ plane, the external control field E_0 is applied along the $[111]$ plane; с and d – spiral forms of electrodes



электрическое напряжение на электродах, нанесенных на поверхность (рис. 2 с, d). Нами предлагается использовать два типа электродов. Для среза кристалла «а» мы предлагаем использовать электроды в виде встречно штыревых преобразователей. Система таких электродов должна быть ориентирована или вдоль оси x' , или вдоль оси y' . Для среза кристалла «b» система электродов должна быть выполнена в виде спирали.

Абсолютное значение напряжения, которое можно снять с электродов в значительной мере зависит от конструкции электродов и площади кристалла, на которую они нанесены. Наши оценки показывают, что для площади поверхности кристалла, на которую нанесены, например, электроды в виде встречно штыревых преобразователей величина напряжения может составлять микровольты, что достаточно для дальнейшего усиления и обработки выходного сигнала.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей работе нами предложено использовать мелкие ловушечные уровни в запрещенной зоне кристаллов группы силленитов для регистрации терагерцевого излучения, вплоть до 100 ТГц. Выявлены два среза кристалла, в которых можно использовать цепочку электрооптический эффект - пьезоэлектрический эффект для преобразования терагерцевого излучения в напряжение, снимаемое с электродов. Для эффективной работы такого фотоприемника необходимо прикладывать дополнительной электрическое поле. Интересно отметить, что в зависимости от полярности прикладываемого поля мы будем получать разный знак выходного напряжения при одном и том же падающем на фотоприемник излучении. При смене полярности напряжения эллипс оптической индикатрисы, обозначенный красным цветом на рис. 2а, повернется на 90° в направлении по часовой стрелки и окажется вытянутым вдоль оси x' . Такая особенность позволяет использовать не просто постоянно приложенное электрическое поле, а периодическое знакопеременное поле. В этом случае чувствительность фотоприемника может быть значительно улучшена за счет узкополосной фильтрации регистрируемого напряжения или использования техники синхронного фазового детектирования (англ.: *Lock-in Amplifier*).

Другой интересной особенностью обладают электроды, выполненные в форме спирали. Такие электроды могут быть успешно применены для регистрации излучения в виде оптических вих-

Таблица 1. Оптические свойства кристаллов группы силленитов

Table 1.

Параметры Parameters	$\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$	$\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$
Показатель преломления, n Refractive index, n	2,54	2,25	2,54
Поглощение, a , см^{-1} Absorption, a , cm^{-1}	2,3	3,0	2,1
Оптическая активность, r , град/мм Optical activity, r , deg/mm	31	8	30
Электро-оптический коэффициент r_{41} , пм/В Electrooptical coefficient r_{41} , pm/V	5,0	5,17	3,2
Пьезо-электрический коэффициент d_{41} , Кл/Н Piezoelectric coefficient d_{41} , C/N	$37,8 \pm 2,0 \cdot 10^{-12}$	-	-

$$\hat{r}_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ r_{41} & 0 & 0 \\ 0 & r_{41} & 0 \\ 0 & 0 & r_{41} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

We have identified two crystal section orientations suitable for detection of the terahertz radiation (Fig. 2a, b).

As can be seen from the figures, in the first case, the cross section of the optical indicatrix by the sample plane with the circle shape, takes the shape of an ellipse, the x' and y' axes of which are rotated by an angle of 45° relative to the initial position (Fig. 2a). As a result, there are changes in the refractive index. In one case, this will be the value $-\Delta n$ (along the x' axis); in the other case, it will be the value $+\Delta n$ (along the y' axis). To use radiation with the ordinary polarization:

$$\Delta n_{x'} = n_0 - \frac{r_{41}n_0^3}{2} E, \quad \Delta n_{y'} = n_0 + \frac{r_{41}n_0^3}{2} E. \quad (2)$$

For the section shown in Fig. 2b, the initial cross section of the optical indicatrix changes only its radius when a longitudinal electric field is applied. There is no change in the optical indicatrix shape. In this case, we have only one change in the refractive index along the radial direction Δn_{rad} :



рей, имеющих осевую симметрию. В этом случае также, в зависимости от знака прикладываемого поля E_0 будет меняться радиус сечения оптической индикатрисы (либо $+\Delta n$, либо $-\Delta n$ относительно начального значения показателя преломления), что также обеспечит генерацию знакопеременного сигнала.

Кроме того, такие фотоприемники обладают ярко выраженными диаграммо образующими свойствами по отношению к чувствительности к падающему излучению. Очевидно, что только излучение, падающее на пластину вдоль оси [001] или [111], будет обеспечивать нужное взаимодействие с тензором электрооптических и пьезоэлектрических коэффициентов. Излучение, направленное под углом к этим осям, не будет давать вклад в регистрируемый электрический сигнал.

REFERENCES

1. **Chen H.-T., Padilla W. J., Zide J. M., Gossard A. C., Taylor A. J., Averitt R. D.** Active terahertz metamaterial devices. *Nature*. 2006;444:597–600. DOI: 10.1038/nature05343
2. **Chen H.-T., Lu H., Azad A. K., Averitt R. D., Gossard A. C., Trugman S. A. et al.** Electronic control of extraordinary terahertz transmission through subwavelength metal hole arrays. *Optics Express*. 2008;16:7641–7648. DOI: 10.1364/OE.16.007641.
3. **Jun Y. C., Gonzales E., Reno J. L., Shaner E. A., Gabbay A., Brener I.** Active tuning of mid-infrared metamaterials by electrical control of carrier densities. *Optics Express*. 2012;20:1903–1911. DOI: 10.1364/OE.20.001903.
4. **Blackledge J. M., Boretti A., Rosa L., Castelletto S.** Fractal Graphene Patch Antennas and the THz Communications Revolution. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2021;1060: 012001. IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/1060/1/012001.
5. **Xingang R., Wei E., Wallace C. H. Choy.** Tuning optical responses of metallic dipole nanoantenna using graphene. *Optics Express*, 2013;21(26):3182–31829. DOI:10.1364/OE.21.031824.
6. **Klimchitskaya G. L., Korikov C. C., Petrov V. M.** Theory of reflectivity of graphene-coated material plates. *Phys. Rev. B*. 2015;92:125419. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.92.125419>.
7. **Klimchitskaya G. L., Korikov C. C., Petrov V. M.** Erratum: Theory of reflectivity of graphene-coated material plates. *Phys. Rev. B*. 2016;93:159906(E). DOI: 10.1103/PhysRevB.92.125419.
8. **Klimchitskaya G. L., Mostepanenko V. M., Petrov V. M.** Impact of chemical potential on the reflectance of graphene in the infrared and microwave domains. *Phys. Rev. A*. 2018;98:023809-1-10. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.98.023809>.
9. **Ou J.-Y., Plum E., Zhang J., Zheludev N. I.** An electromechanically reconfigurable plasmonic metamaterial operating in the near-infrared. *Nature Nanotechnology*. 2013;8:252–255. DOI: 10.1038/nnano.2013.25.
10. **Chen K, Razinskas G, Feichtner T, Grossmann S, Christiansen S, Hecht B.** Electromechanically tunable suspended optical nanoantenna. *Nano Letters. 12 Applications of Nanobiotechnology*. 2016;16:2680–2685. DOI: 10.1021/acs.nanolett.6b00323.
11. **Klimchitskaya G. L., Mostepanenko V. M., Petrov V. M., Tschudi T.** Optical Chopper Driven by the Casimir Force. *Phys. Rev. Applied*. 2018;10:014010-1-10 <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.014010>.
12. **Petrov M. P., Shlyagin M. G., Shalaevskiy N. O., Petrov V. M., Khomenko A. V.** Novyj mekhanizm zapisi izobrazhenij v fotorefraktivnykh kristallah. *ZHTF*. 1995; 55(11): 2247–2250.
Петров М. П., Шлягин М. Г., Шалаевский Н. О., Петров В. М., Хоменко А. В. Новый механизм записи изображений в фоторефрактивных кристаллах. *ЖТФ*. 1995; 55(11): 2247–2250.

$$\Delta n_{rad} = \frac{r_{41} n_0^3}{2\sqrt{3}} E. \quad (3)$$

The electrooptical and piezoelectric properties of these crystals have the same symmetry and are interconnected.

Illumination of the crystal surface by radiation leads to the photogeneration of electrons from the shallow traps to the conduction band resulting into a redistribution of the space charge inside the crystal. The occurrence of a space charge inside the crystal leads to its local mechanical deformations that develops an electrical voltage on the electrodes deposited on the surface (Fig. 2 c, d). We propose to use two types of electrodes. For the crystal section “a”, we propose to use electrodes in the form of interdigital transducers. The system of such electrodes must be oriented either along the x' axis or along the y' axis. For the crystal section “b”, the system of electrodes must be made in the form of a spiral.

The absolute voltage value that can be tapped off from the electrodes largely depends on the electrode design and the crystal area on which they are deposited. Our estimates show that for the crystal surface area, on which, for example, the electrodes in the form of interdigital converters are applied, the voltage value can be represented in microvolts that is sufficient for further output signal amplification and processing.

DISCUSSION

In this work, we propose to use the shallow trap in the forbidden band of crystals of the sillenite group to detect the terahertz radiation up to 100 THz. Two crystal sections were found, in which the electrooptical effect – piezoelectric effect chain can be used to convert the terahertz radiation into voltage tapped off from the electrodes. For the efficient operation of such a photodetector, it is necessary to apply an additional electric field. It is interesting to note that, depending on the applied field polarity, we will obtain a various sign of the output voltage for the same radiation incident on the photodetector. When the voltage polarity is reversed, the ellipse of optical indicatrix, marked in red in Fig. 2a rotates by 90° in a clockwise direction and becomes elongated along the x' axis. This feature makes it possible to use not just a constantly applied electric field, but a periodic alternating field. In this case, the photodetector sensitivity can be significantly improved due to the narrow-band filtering of the detected voltage, or application of the lock-in amplifier method.

Another interesting feature is demonstrated by the electrodes made in the form of a spiral. Such electrodes can be successfully applied to detect radiation in the form of optical vortices with axial symmetry. In this case, depending on the sign of the applied field E_0 , the cross-sectional radius of the optical indicatrix will be changed



13. **Lauer R. B.** Electron effective mass and conduction-band effective density and states in $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. *J. Appl. Phys.* 1974; 45(4):1794–1797.
14. **Petrov M. P., Petrov V. M., Zouboulis I. S., Xu L. P.** Two-wave and induced three-wave mixing on a thin $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ hologram. *Optics Communications.* 1997;134: 569–579. DOI: 10.1016/S0030-4018(96)00370-7.
15. **Abrahams S. C., Bernstein J. L., Svensson C.** Crystal structure and absolute piezoelectric d_{14} coefficients in laevorotatory $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$. *Journal of Chem. Phys.* 1979;71(2): 788–792.
16. **Shandarov S. M., Shmakov S. S., Burimov N. I., Syaeva O. S., Kargin Yu. F., Petrov V. M.** Detection of the Contribution of the inverse Flexoelectric Effect to the Photorefractive Response in a Bismuth Titanium Oxide Single Crystal. *JETP Letters.* 2012; 95(12):618–621. <https://doi.org/10.1134/S0021364012120144>.

АВТОРЫ

Петров В. М., д. ф. - м. н. (радиофизика), д. ф. - м. н. (оптика), проф., кафедра Общей физики-1, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия.
 ORCID: 0000-0002-8523-0336
 Лудников Г. А., студ., фак. Фотоники, Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия.
 ORCID: 0009-0004-9436-0118

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов: научная задача исследований была поставлена проф. Петровым В. М.; студент Лудников Г. А. в соответствии с поставленной задачей выполнил расчеты и провел моделирование для регистрации излучения в виде оптических вихрей, имеющих осевую симметрию. Результаты исследований были обсуждены и отражены в рукописи, которая является совместной работой.

(either $+\Delta n$ or $-\Delta n$ relative to the initial refractive index value) that will also ensure generation of an alternating signal.

In addition, such photodetectors have the significant beam-forming properties in relation to the sensitivity to incident radiation. It is obvious that only the radiation incident on the plate along the [001] or [111] axis will provide the desired interaction with the tensor of electrooptical and piezoelectric coefficients. The radiation directed at an angle to these axes will not contribute to the recorded electrical signal.

AUTHORS

Petrov V. M., Dr. of Physical and Mathematical Sciences (radiophysics), Dr. of Physical and Mathematical Sciences (optics), professor, Department of General Physics - 1, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
 ORCID: 0000-0002-8523-0336
 Ludnikov G. A., stud., Department of Photonics, National Research University ITMO, Saint-Petersburg, Russia
 ORCID: 0009-0004-9436-0118

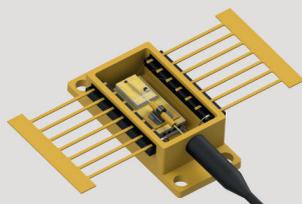
CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest: the scientific mission of the research was determined by Petrov V. M., a professor; in accordance with the mission set, student Ludnikov G. A. performed calculations and simulations to detect radiation in the form of optical vortices with axial symmetry. The study results were discussed and indicated in the manuscript being a joint paper.



ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МОДУЛИ И СБОРКИ ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ФОТОНИКИ

Разработка и изготовление изделий с термостабилизацией
 Лазеры, фотодиоды, фотоумножители, детекторы и др.



ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

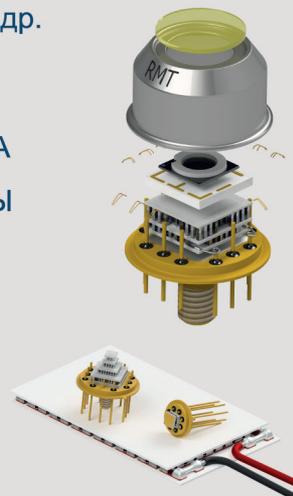
ТЕЛЕКОМ МИКРОЭЛЕКТРОНИКА ФОТОНИКА
 МЕДИЦИНА ЛИДАРЫ РФА АНАЛИЗАТОРЫ

30 лет на рынке термоэлектричества
 Мировой лидер в области производства микромодулей
 Соответствие современным стандартам качества
 Специальные квалификационные программы
 Полный цикл производства



ООО РМТ

115230, РФ, Москва, Варшавское шоссе 46
 Тел.: +7 (499)678-20-82
 Email info@rmtltd.ru



www.rmtltd.ru