

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-903-911

УДК 535.8; 621.383

Исследование оптических явлений в мультиспектральном матричном фотоприемнике на основе кремния

Вера Леонидовна Жбанова¹✉, Юрий Борисович Парвлюсов²

¹ Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация

² Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Российская Федерация

¹ Vera-zhbanova@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

² parvulusov@miiigaik.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7219-652X>

Аннотация

Предмет исследования. Представлено исследование в области разработки и создания модернизированных мультиспектральных систем цветоделения многослойного типа, обладающих повышенным цветовым разрешением. Рассмотрены виды структур разработанных шаблонов матричных фотоприемников на основе многослойного кремния с рабочими слоями для применения в синем, зеленом, красном и инфракрасном диапазонах спектра. **Метод.** Предложена методика расчетов слоев кремния в виде оптических пленок с заданными характеристиками. Слои кремния выполняют функции как чувствительного элемента, так и фильтра определенной длины волны для выделения синего, зеленого, красного и инфракрасного диапазонов спектра. Выполнен расчет коэффициентов отражения и пропускания для выбранных длин волн при различных углах падения на сенсор. Рассчитан угол Брюстера для этих длин волн. Учтено возможное наличие поверхности сенсора микролинзы. Представлены расчеты для ячеек с четырехслойной и двухслойной структурами при различных комбинациях слоев. **Основные результаты.** Получены зависимости коэффициентов отражения и пропускания для двухслойных и четырехслойных структур полупроводниковых сенсоров для p - и s -поляризации, также для неполяризованного света. Показано, что минимальным коэффициентом отражения и максимальным коэффициентом пропускания обладает сочетание слоев красного и инфракрасного диапазонов спектра. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке многослойных мультиспектральных систем с регистрацией инфракрасного излучения. В результате возможно применение пары красного и инфракрасного спектров в качестве основы шаблона матричного фотоприемника, а слои синего и зеленого спектров как вспомогательные для построения полноцветного изображения.

Ключевые слова

фотоприемник, инфракрасный, сенсор, тонкие пленки, многослойный, кремний, потенциальная яма, отражение, пропускание

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-00012, <https://rscf.ru/project/21-79-00012/>

Ссылка для цитирования: Жбанова В.Л., Парвлюсов Ю.Б. Исследование оптических явлений в мультиспектральном матричном фотоприемнике на основе кремния // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 903–911. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-903-911

Investigation of optical phenomena in multispectral matrix photodetector based on silicon

Vera L. Zhbanova¹✉, Yuriy B. Parvulusov²

¹ The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation

² Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064, Russian Federation

¹ Vera-zhbanova@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>

² parvulusov@miigaik.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7219-652X>

Abstract

A study is presented in the field of development and creation of modernized multi-layer color separation multispectral systems with increased color resolution. The types of structures of the developed patterns of matrix photodetectors based on multilayer silicon with working layers for use in the blue, green, red and infrared spectral ranges are considered. A method for calculating silicon layers in the form of optical films with specified characteristics is proposed. The silicon layers act as both a sensing element and a specific wavelength filter to highlight the blue, green, red and infrared ranges of the spectrum. The reflection and transmission coefficients were calculated for the selected wavelengths at various angles of incidence on the sensor. The Brewster angle for these wavelengths is also calculated. The possible presence of a microlens sensor surface is taken into account. Calculations are presented for cells with four-layer and two-layer structures for various combinations of layers. The dependences of the reflection and transmission coefficients for two-layer and four-layer structures of semiconductor sensors for *p*- and *s*-polarization, also for unpolarized light, are obtained. It is shown that the combination of layers in the red and infrared ranges of the spectra has the minimum reflection coefficient and the maximum transmission coefficient. The results obtained can be used in the development of multilayer multispectral systems with registration of infrared radiation. As a result, it is possible to use a pair of red and infrared spectra as the basis of a matrix photodetector pattern, and layers of blue and green spectra as auxiliary ones for building a full-color image.

Keywords

photodetector, infrared, sensor, thin films, multilayer, silicon, potential well, reflection, transmission

Acknowledgments

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation № 21-79-00012, <https://rscf.ru/en/project/21-79-00012/>

For citation: Zhbanova V.L., Parvulusov Yu.B. Investigation of optical phenomena in multispectral matrix photodetector based on silicon. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 903–911 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-903-911

Введение

Важнейшая составляющая современных регистрирующих систем — регистрирующее устройство в виде матричного фотоприемника [1–4]. Постоянно возрастающие требования к качеству и информативности снимков могут быть обеспечены, прежде всего за счет повышения пространственного и цветового разрешений матричных фотоприемников [3].

Для получения качественного снимка современные фирмы разрабатывают фотоприемники на основе различных систем цветоделения. Особое внимание уделяется приемникам с регистрацией инфракрасного (ИК) спектра [4–8]. Например, компания Sony представила шаблон датчика изображения RGB-IR¹ (Red — красный, Green — зеленый, Blue — синий) с функцией работы в инфракрасном диапазоне (IR — инфракрасный). Отметим, что данные шаблоны имеют низкое цветовое разрешение, так как построены на основе стандартного шаблона Байера или являются его модификацией.

Большой интерес в области матричных фотоприемников представляют материалы на основе кремния [9–12]. Наиболее интересные разработки в этой области — многослойные сенсоры на основе кремния, где в каждом сенсоре регистрируется основной цвет в видимой

области спектра (зеленый, синий, красный) [13–16]. Технология TFA² (Thin Film on Application-Specific Integrated Circuit (ASIC)) представляет собой интеграцию слоя детектора из аморфного гидрогенизированного кремния (a-Si:H) на кристалл ASIC [13]. TFA не получила широкого применения из-за высокой стоимости производства. Компания Foveon предложила датчик трехслойного типа X3 [14–16], Canon³ — пятислойный сенсор, в который, кроме трех слоев в видимом спектре, введены также ультрафиолетовый и ИК. При введении дополнительных слоев появляется больше шумов, связанных со сложностью обвязки, включающей регистры, буферы, и т. д. для каждого слоя.

Для решения данной проблемы в настоящей работе предложена система на основе двухслойной матрицы с функцией регистрации ИК диапазона [17, 18]. Новизна разработки заключается в объединении технологии многослойного сенсора и пространственного цветоделения, по аналогии с шаблонами Байера. В итоге разработанный шаблон будет состоять из трех видов ячеек, но, в отличие от шаблона RGB-IR, будет возмож-

² [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.epfl.ch/labs/pvlab/research/thin_film_electronics/ (дата обращения: 14.04.2022).

³ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.dailycameranews.com/2014/06/canon-5-layer-foveon-like-sensor/> (дата обращения: 14.04.2022).

¹ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ovt.com/purecel-pixel-tech/rgb-ir-technology/faqs> (дата обращения: 14.04.2022).

ность ввести слой регистрации ИК излучения. Засчет уменьшения слоев, в отличие от технологий Foveon X3 и Canon, будет уменьшена обвязка пиксела, и, соответственно, уменьшены шумы матрицы. В результате разнесения слоев видимого диапазона получены три вида сенсора со следующими комбинациями: В и IR, G и IR, R и IR. Эти сенсоры могут быть разнесены в пространстве по шаблону Байера RGBG, либо по любой другой его модификации [17]. Подобная разработка позволит регистрировать как видимое, так и ИК излучение. Следует понимать, что в сравнении с Foveon X3 пространственное разрешение для видимого излучения уменьшится, однако уменьшатся и шумы в самой матрице (из-за применения только двух слоев), что положительно отразится на достоверности выходной информации.

Для выявления сильных и слабых сторон разработки, проведем исследование оптических явлений в шаблонах. Выполним расчеты и сравнения коэффициентов отражения и пропускания для четырехслойного сенсора (BGR + IR) и разработанных двухслойных сенсоров с одинаковыми параметрами слоев. В работе [19] приведено доказательство положительного влияния разнесения слоев для видимого спектра излучения.

Цель работы — исследование оптических явлений в мультиспектральном матричном фотоприемнике на основе кремния. Поставлены следующие задачи: определить коэффициенты отражения и пропускания для четырехслойного сенсора (BGR + IR) и двухслойных сенсоров (B + IR, G + IR, R + IR); провести сравнение исследованных шаблонов по оптическим явлениям в сенсорах.

Аналитическое описание оптических явлений в многослойном сенсоре

Так как для деления излучения на составляющие G, B, R, IR используются дисперсные свойства кремния, поэтому исследуем преломление света на границах этих слоев [15]. Для наиболее полной оценки рассмотрим дисперсию, которая возникает при прохождении света через светочувствительные слои. Преломление оптической системы постоянно при освещении монохроматическим светом; для сложносоставного света учтем зависимость коэффициента преломления вещества от длины волны. При падении на поверхность сенсора, свет несет в себе синюю, зеленую, красную и ИК составляющие. При ИК излучении скорость распространения в среде максимальная, а степень преломления лучей минимальная. При ультрафиолетовом излучении степень преломления лучей максимальная [20].

Соответственно, дойдя до первого, В-слоя, синий луч будет преломлен больше, и не выйдет за пределы своего слоя. Также «зеленая» составляющая будет преломляться сильнее «красной», и попадать в G-слой. Подобное будет происходить с R и IR составляющими излучения. Кроме того, при изменении пористости кремния появится дополнительная дисперсия, которая наиболее заметна в темно-синей части спектра; однако данное несоответствие в линиях не существенно. В связи с этим в дальнейших расчетах дисперсия не будет

учтена. Рассмотрим отражение и поглощение на слоях матрицы.

Глубина залегания потенциальной ямы в датчике Foveon X3 [14]: $h_R = 2$ нм, $h_G = 0,6$ нм, $h_B = 0,2$ нм, при сравнении характеристик из работы [20], получим длины волн 580 нм, 475 нм и 420 нм. Расхождение с классическими длинами волн, например по Д.К. Максвеллу (красный 630 нм, зеленый 528 нм, синий 457 нм), можно объяснить введением примесей в кремний для получения p - n перехода, что приводит в дальнейшем к сдвигу спектральных характеристик. В результате было принято решение для слоев видимого излучения взять глубину залегания как и в Foveon X3, а для ИК слоя выбрать глубину 9 мкм, что соответствует длине волны 770 нм и является началом среднего ИК спектра.

В программе, написанной на языке программирования C# и учитывающей значения показателя преломления в зависимости от глубины залегания потенциальной ямы в кремнии [20], найдем углы преломления и оптические коэффициенты. Программа основана на расчетах по формулам Френеля. Найдем коэффициенты отражения (R_p) и пропускания (R_s) поляризованных волн в плоскости падения и перпендикулярной плоскости падения. Выражения коэффициентов имеют вид [20]:

$$\begin{cases} R_p = \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha_0 - \alpha_1)}{\operatorname{tg}^2(\alpha_0 + \alpha_1)}, \\ R_s = \frac{\sin^2(\alpha_0 - \alpha_1)}{\sin^2(\alpha_0 + \alpha_1)} \end{cases}, \quad (1)$$

где α_0, α_1 — углы падающего и преломленного лучей.

При этом получим, что:

— при нормальном падении света на вещество ($\alpha_0 = 0$):

$$R_p = R_s = \left(\frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1} \right)^2, \quad (2)$$

где n_0, n_1 — показатели преломления среды падающего и преломленного лучей;

— при падении света под углом $\pi/2$ имеем: $R_p = R_s = 1$.

На основании (1) и (2) учтем, что направление распространения отраженной и преломленной волн происходит перпендикулярно друг другу. Из закона преломления получим значение угла Брюстера:

$$\operatorname{tg}_{\alpha_{\text{Бр}}} = n_1/n_0. \quad (3)$$

При этом показатели преломления найдем в зависимости от глубины залегания потенциальной ямы в кремнии по зависимости, представленной в источнике [21].

Рассчитаем коэффициент отражения естественного света:

$$R_e = \frac{1}{2}(R_p + R_s). \quad (4)$$

Получим соответственно коэффициенты пропускания прошедших волн:

$$\begin{cases} T_p = \frac{\sin 2\alpha_0 \sin 2\alpha_1}{\sin^2(\alpha_0 + \alpha_1) \cos^2(\alpha_0 - \alpha_1)} \\ T_s = \frac{\sin 2\alpha_0 \sin 2\alpha_1}{\sin^2(\alpha_0 + \alpha_1)} \end{cases}. \quad (5)$$

Найдем углы преломления для каждого слоя из зависимости:

$$\begin{aligned} \sin\alpha_0/\sin\alpha_1 &= n_1/n_0; \\ \alpha_1 &= \arcsin((n_0\sin\alpha_0)/n_1). \end{aligned} \quad (6)$$

При расчете углов значения получены в радианах, а затем переведены в градусы.

Оптические явления в сенсорах

Для наглядности прохождения света представлен четырехслойный сенсор на рис. 1, а и пара слоев В + IR (рис. 1, б).

На основе рассчитанных данных по формулам (1)–(6) построим зависимости коэффициентов отражения и пропускания от угла падения всех пар слоев. Построенные на основании расчетов зависимости для сенсора В + IR, показаны на рис. 2.

На рис. 2, а видно, что кривая R_s возрастает линейно от 0,4194 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,9999 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). Кривая R_p уменьшается от 0,4193 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) практически до нуля (при $\alpha_0 = 76^\circ$), а затем возрастает до 0,9848 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). График R_e линеен до $\alpha_0 = 71^\circ$, а затем резко возрастает до значения 0,3997 (при $\alpha_0 = 90^\circ$).

На рис. 2, б кривые на всем диапазоне: R_s возрастает, R_p убывает, R_e линейна. Основные изменения показателей относятся к верхнему слою (В), вне зависимости от «цвета». Изменения в ИК подложке наблюдаются, но не существенные. Следовательно, коэффициенты верхнего слоя, являются определяющими для системы и определяют общий коэффициент системы.

Средний коэффициент отражения для В-слоя составляет:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{2}(\rho_0 + \rho_{90}). \quad (7)$$

В результате расчета (7) получим для В-слоя 71,14 % и для IR-слоя 99,8 % от максимального коэффициента преломления.

На рис. 2, с график T_s уменьшается линейно, T_p возрастает от 0,5806 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 1,0 (при $\alpha_0 = 78^\circ$),

а затем падает до значения 0,015 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). Кривая T_e плавно возрастает до 0,600 (при $\alpha_0 = 59^\circ$) и далее уменьшается до 0,0079 (при $\alpha_0 = 90^\circ$).

На рис. 2, d график T_s падает от значения 0,9820 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,9796 (при $\alpha_0 = 90^\circ$), а T_p возрастает до 0,9842 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). T_e линейно уменьшается на всем диапазоне.

Можно сделать вывод, что коэффициент пропускания для В-слоя является основным, и оказывает влияние на общий коэффициент пропускания системы. Получим средний коэффициент пропускания для слоев:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2}(\tau_0 + \tau_{90}). \quad (8)$$

По формуле (8) получим для В- и IR-слоя в среднем 50,68 % и 99,99 % соответственно от максимального коэффициента пропускания.

Найдем коэффициенты отражения и пропускания ячейки G + IR (рис. 3). На основе рассчитанных данных по формулам (1)–(6) построим зависимости коэффициентов отражения и пропускания от угла падения для сенсора G + IR (рис. 4).

Формы кривых для пары слоев G + IR соответствуют графикам, представленным на рис. 2. На рис. 4, а видно, что кривая R_s возрастает от 0,3642 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,9991 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). R_p уменьшается от 0,3641 практически до нуля, а далее резко возрастает до 0,9867 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). График R_e проходит линейно до 0,3699 (при $\alpha_0 = 71^\circ$), а затем возрастает до 0,9929 (при $\alpha_0 = 90^\circ$).

На рис. 4, б кривые на всем диапазоне: R_s возрастает, R_p убывает, R_e линейна.

Усредненный коэффициент отражения найдем по формуле (7), который составляет для G- и IR-слоя в среднем 68,34 % и 99,74 % соответственно от максимального коэффициента преломления.

На рис. 4, с кривая T_s уменьшается линейно, T_p линеен от значения 0,6358 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,975 (при $\alpha_0 = 80^\circ$), затем уменьшается до 0,0132 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). График T_e плавно возрастает до 0,6358 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) и затем падает до 0,0070 (при $\alpha_0 = 90^\circ$).

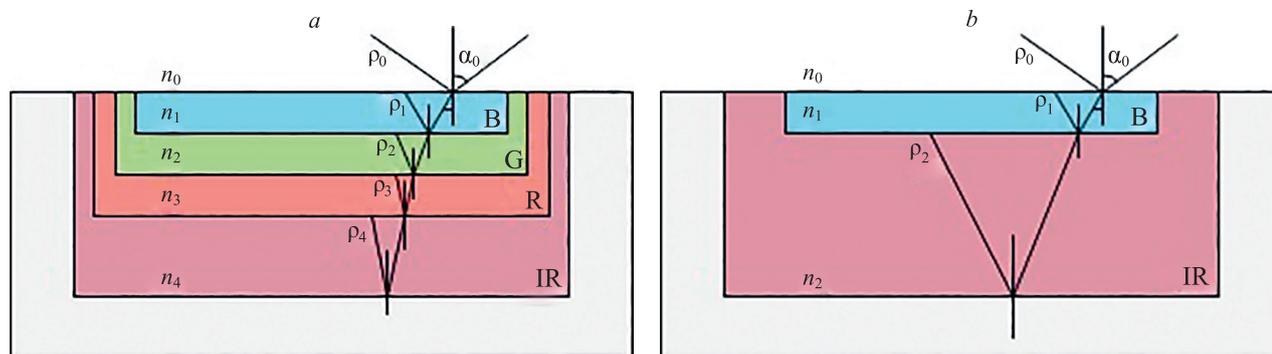


Рис. 1. Разрезы сенсоров: четырехслойный (а) и двухслойный В + IR (б).

ρ_0 – ρ_4 — коэффициенты отражения от слоев сред; n_0 – n_4 — показатели преломления сред

Fig. 1. Sensor sections: four-layer (a) and two-layer В + IR (b)

ρ_0 – ρ_4 — reflection coefficients from the medium; n_0 – n_4 — refractive indices of media

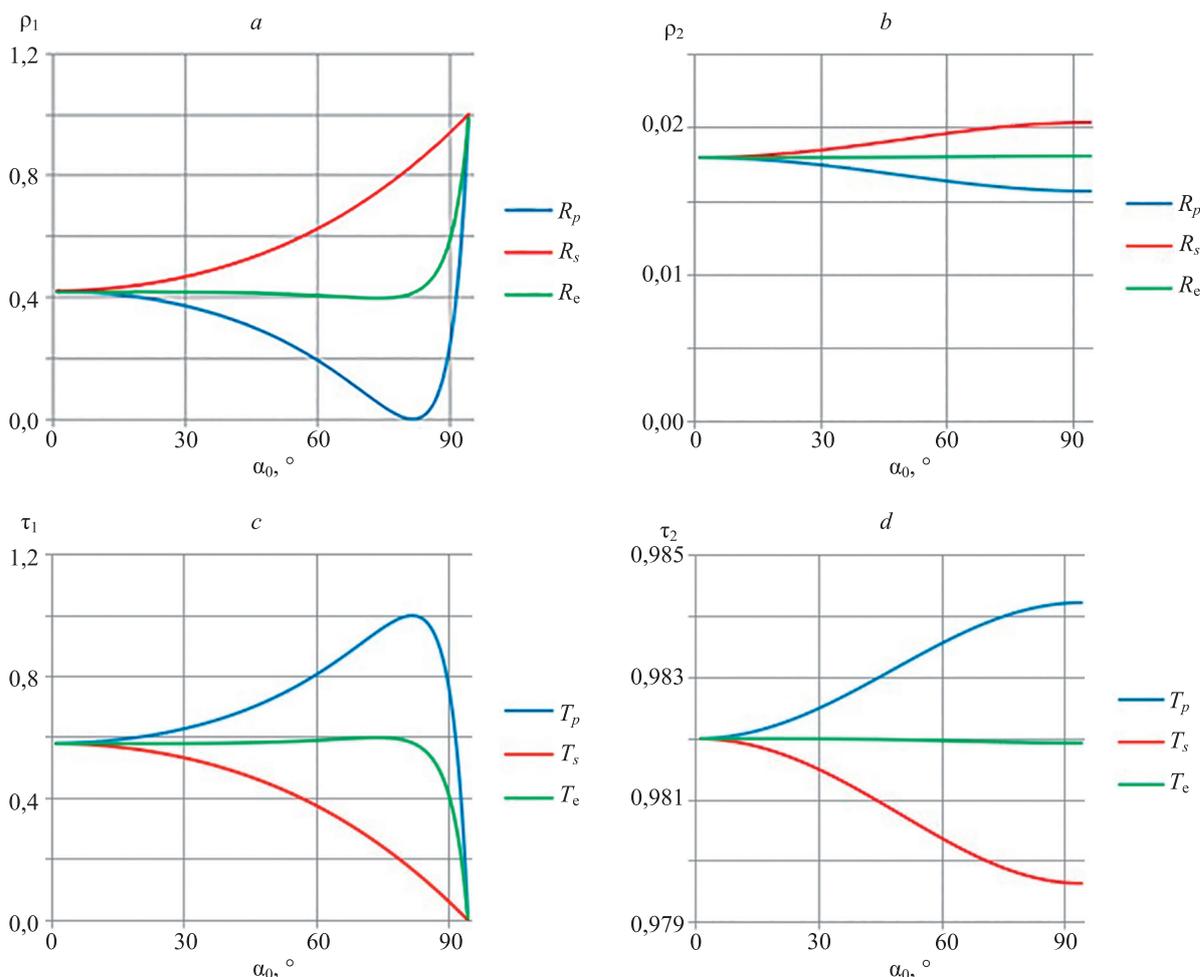


Рис. 2. Зависимости коэффициентов для сенсора В + IR: отражения ρ_1 (a) и ρ_2 (b), пропускания τ_1 (c) и τ_2 (d) от угла падения α_0
 Fig. 2. Dependence of coefficients for B + IR sensor: reflections ρ_1 (a) and ρ_2 (b), transmission τ_1 (c) and τ_2 (d) vs. the angle of incidence α_0

На рис. 4, d кривая T_s уменьшается от 0,9961 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,9955 (при $\alpha_0 = 90^\circ$), а T_p возрастает до 0,9966 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). T_e линейно падает на всем диапазоне.

Средний коэффициент пропускания для слоев найдем по формуле (8): для G-слоя 50,55 % и для IR-слоя 99,99 % от максимального коэффициента пропускания.

Рассмотрим отражение и пропускание матрицы R + IR (рис. 5).

По формулам (1)–(6) выполним расчеты и построим зависимости коэффициентов отражения и пропускания от угла падения для сенсора R + IR (рис. 6). Заметим, что формы кривых для пары слоев R + IR аналогичны графикам, показанным на рис. 2.

На рис. 6, a видно, что кривая R_s возрастает от 0,3447 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,9991 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). R_p уменьшается от 0,3446 практически до нуля, а далее возрастает до 0,9874 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). График R_e линейно

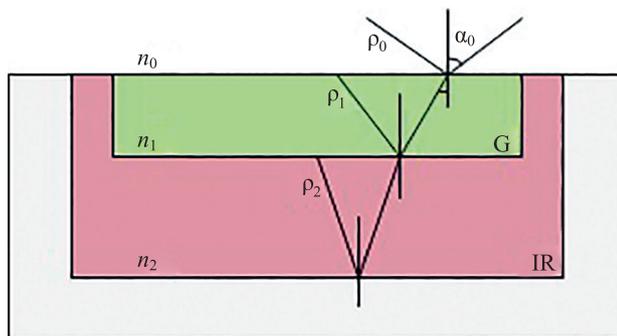


Рис. 3. Двухслойный сенсор G+IR в разрезе
 Fig. 3. Sectional view of a two-layer G+IR sensor

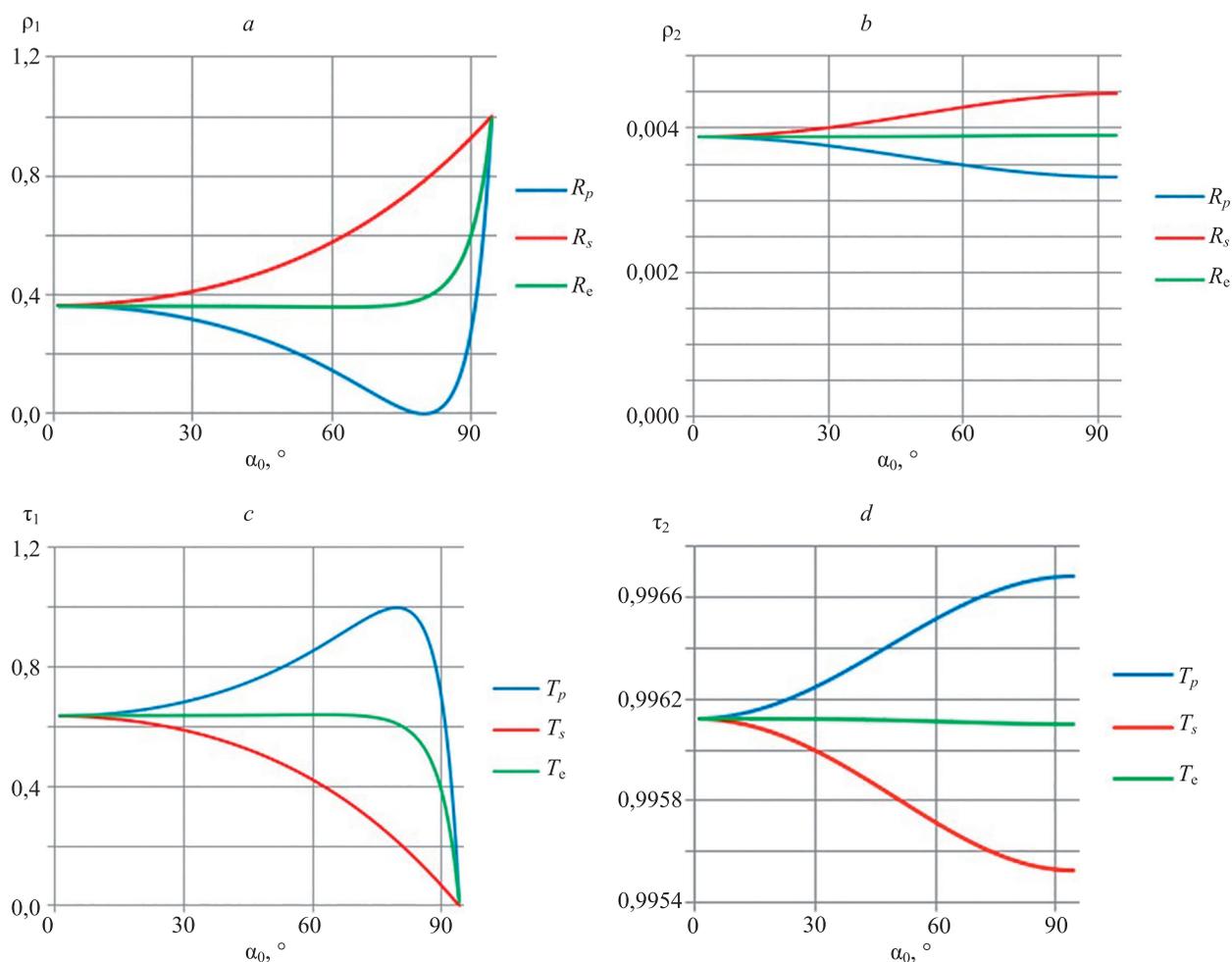


Рис. 4. Зависимости коэффициентов для сенсора G + IR: отражения ρ_1 (a) и ρ_2 (b), пропускания τ_1 (c) и τ_2 (d) от угла падения α_0
 Fig. 4. Dependence of coefficients for G + IR sensor: reflections ρ_1 (a) and ρ_2 (b), transmission τ_1 (c) and τ_2 (d) vs. the angle of incidence α_0

возрастает до 0,3573 (при $\alpha_0 = 71^\circ$), а затем возрастает до 0,9932 (при $\alpha_0 = 90^\circ$).

На рис. 6, b кривые на всем диапазоне: R_s возрастает; R_p убывает, R_e линейна.

Средний коэффициент отражения для слоев найдем по формуле (7) и составляет для R- и IR-слоя 67,35 % и 100 % соответственно от максимального коэффициента преломления.

На рис. 6, d кривая T_s практически линейно падает от значения 0,6552 (при $\alpha_0 = 1^\circ$) до 0,0008 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). График T_p линейен до 0,9997 (при $\alpha_0 = 80^\circ$), а затем падает до 0,0126 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). T_e плавно возрастает до 0,6217 (при $\alpha_0 = 75^\circ$), далее уменьшается до 0,0067 (при $\alpha_0 = 90^\circ$).

На рис. 6, c график T_s уменьшается до 0,9984 (при $\alpha_0 = 90^\circ$). T_p возрастает до значения 0,9988 (при

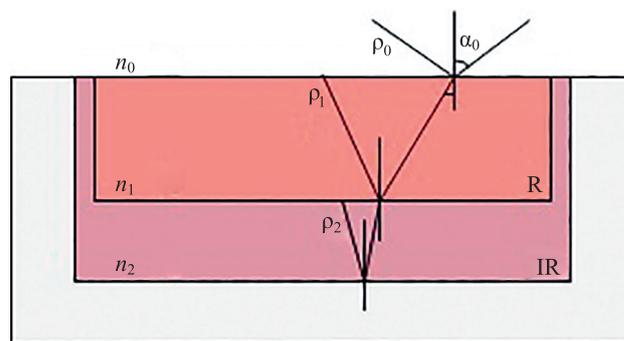


Рис. 5. Двухслойный сенсор R + IR в разрезе
 Fig. 5. Sectional view of a two-layer R + IR sensor

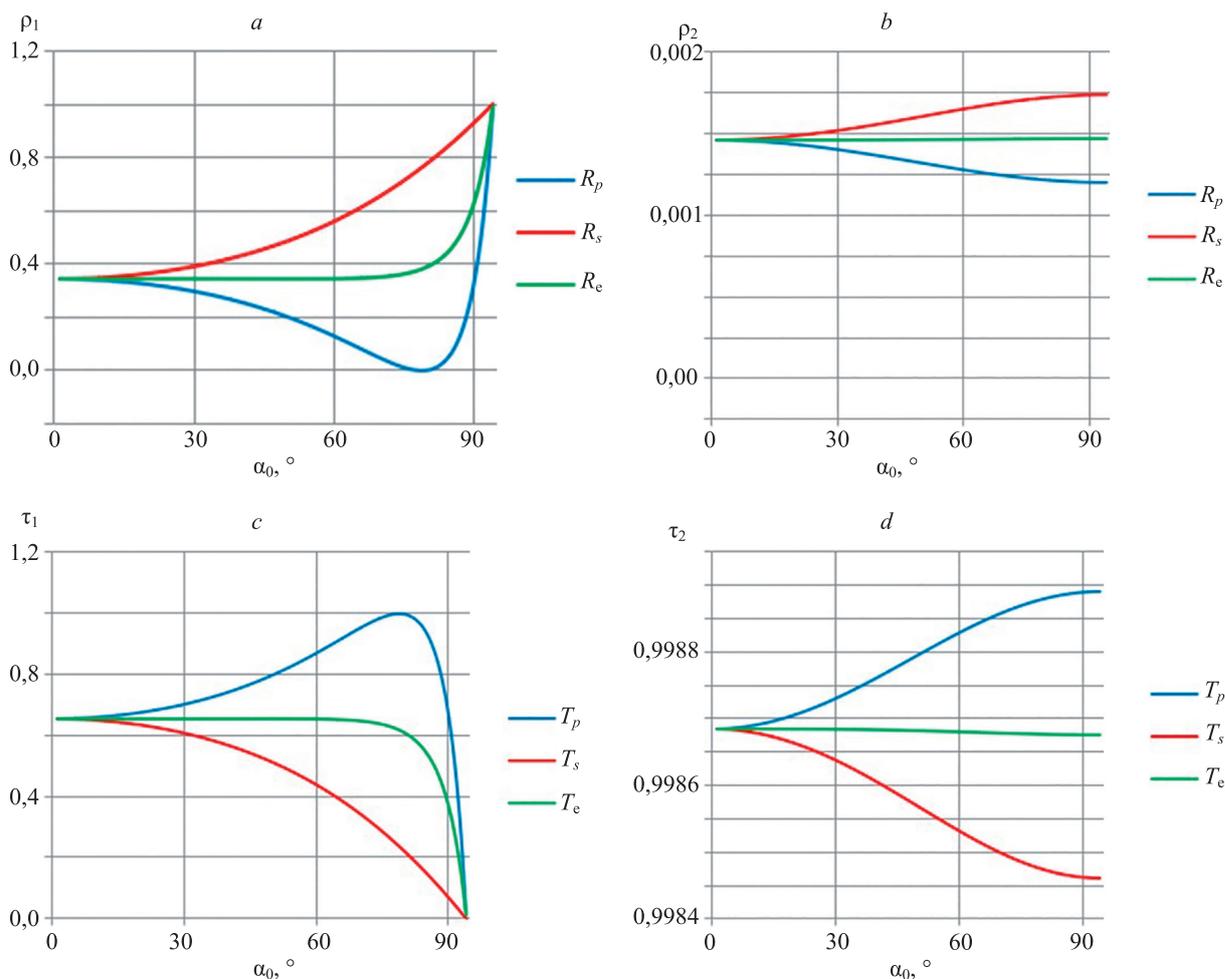


Рис. 6. Зависимости коэффициентов для сенсора R + IR: отражения ρ_1 (a) и ρ_2 (b), пропускания τ_1 (c) и τ_2 (d) от угла падения α_0
 Fig. 6. Dependence of coefficients for R + IR sensor: reflections ρ_1 (a) и ρ_2 (b), transmission τ_1 (c) и τ_2 (d) vs. the angle of incidence α_0

Таблица. Значения коэффициентов отражения и пропускания для четырехслойной и двухслойной матриц для угла падения 30°
 Table. Values of reflection and transmission coefficients for a four-layer and two-layer matrix for 30°

Коэффициент	Четырехслойный сенсор, слои				Двухслойный сенсор, слои				Соотношение, %		
	B	G	R	IR	B	G	R	IR	G	R	IR
R_p	0,366	0,295	0,276	0,249	0,366	0,311	0,292	0,261	-5,42	-5,80	-4,82
R_s	0,470	0,399	0,379	0,350	0,470	0,415	0,396	0,371	-4,01	-4,49	-6,00
R_e	0,418	0,347	0,328	0,299	0,418	0,363	0,344	0,316	-4,61	-4,88	-5,69
T_p	0,633	0,704	0,723	0,750	0,633	0,688	0,707	0,738	2,27	2,21	1,60
T_s	0,529	0,600	0,620	0,649	0,529	0,584	0,603	0,628	2,67	2,74	3,24
T_e	0,581	0,652	0,671	0,700	0,581	0,636	0,655	0,683	2,45	2,38	2,43

$\alpha_0 = 90^\circ$). Кривая T_e линейно уменьшается на всем диапазоне.

Усредненный коэффициент пропускания для слоев найдем по формуле (8): для R- и IR-слоя 50,51 % и 100 % соответственно от максимального коэффициента пропускания.

Сравним четырехслойные и модифицированные двухслойные матрицы. В таблице представлены значения коэффициентов рассмотренных шаблонов. В качестве примера взяты значения для угла падения 30° ,

который считается рабочим для матриц с и без микролинзы.

Заключение

Выполнено исследование оптических явлений в мультиспектральном матричном фотоприемнике на основе кремния. Полученные результаты показали, что зависимости коэффициентов от угла падения имеют нелинейный характер. Для первого и второго слоев фор-

мы кривых отличаются: для первого слоя форма кривых имеет более сложный характер, чем для второго.

При сравнении изменений четырехслойной и двухслойной систем для угла падения 30° в процентном соотношении обнаружено: с увеличением глубины залегания в кремнии в четырехслойном и в двухслойном сенсоре коэффициент отражения уменьшается, а пропускания увеличивается; изменения коэффициента отражения нелинейны для p -поляризации и увеличиваются для s -поляризации и естественного света; изменения коэффициента пропускания нелинейны для естественного света и уменьшаются для s - и p -поляризации и естественного света.

Разбиение ячеек на двухслойные привело в основном к падению пропускания и повышению отражения: для слоя G увеличен коэффициент отражения примерно на 4,7 %, коэффициент пропускания уменьшен на

2,5 %. Для слоя R коэффициент отражения также увеличен примерно на 5,1 %, коэффициент пропускания, в свою очередь, уменьшился на 2,4 %. Для слоя IR коэффициент отражения увеличен на 5,5 %, коэффициент пропускания уменьшился примерно на 2,4 %.

Наилучшей комбинацией является пара R и IR: имеет минимальный коэффициент отражения и максимальный коэффициент пропускания, что может быть положено в основу дальнейшей разработки многослойных мультиспектральных систем с регистрацией инфракрасного излучения. Таким образом, в шаблоне можно применять пару R и IR как основу матричного фотоприемника, а слои B и G как вспомогательные. Подобные системы позволят разработать матричные фотоприемники, работающие как в видимом, так и инфракрасном спектре, с нормированными показателями шума и цветового разрешения.

Литература

1. Андрианов В.П., Базаров Ю.Б., Губачев А.В., Дулин О.Н., Елгаёв А.Е., Каменев В.Г., Кузин В.М., Литвинова М.С., Лобастов С.А., Туркин В.Н., Шубин А.С. Цифровой фотохронографический регистратор для исследования быстропротекающих процессов // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54. № 5. С. 117–121. <https://doi.org/10.15372/FGV20180516>.
2. Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. М.: Университетская книга, Логос, 2007. 192 с.
3. Zhanova V.L. Features of digital colourimetry application in modern scientific research // Light & Engineering. 2021. V. 29. N 3. P. 146–158. <https://doi.org/10.33383/2021-028>
4. Айнбунд М.Р., Егоренков А.А., Пашук А.В. Особенности изображений воды, льда, снега, предметов и человека, формируемых гибридной телевизионной камерой в ближнем инфракрасном диапазоне // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21. № 5. С. 619–625. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625>
5. Nonaka Y., Yoshida D., Kitamura S., Yokota T., Hasegawa M., Ootsu K. Monocular color-IR imaging system applicable for various light environments // Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE). 2018. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326238>
6. Stotko P., Weinmann M., Klein R. Albedo estimation for real-time 3D reconstruction using RGB-D and IR data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2019. V. 150. P. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.018>
7. Siekański P., Paško S., Malowany K., Malesa M. Online correction of the mutual miscalibration of multimodal VIS-IR sensors and 3D Data on a UAV platform for surveillance applications // Remote Sensing. 2019. V. 11. N 21. P. 2469. <https://doi.org/10.3390/rs11212469>
8. Choe G., Park J., Tai Y.-W., Kweon I. Refining geometry from depth sensors using ir shading images // International Journal of Computer Vision. 2017. V. 122. N 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11263-016-0937-y>
9. Григорьев Л.В. Кремниевая фотоника. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 94 с.
10. Лизункова Д.А. Исследование электрических и оптических свойств фоточувствительных структур на наноструктурированном кремнии: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Самара, 2018. 150 с.
11. Хенкин М.В. Электрические, фотоэлектрические и оптические свойства двухфазных пленок гидрогенизированного кремния: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. М., 2015.
12. Овсяк В.Н., Сидоров Ю.Г., Васильев В.В., Шашкин В.В. Матричные фотоприемники 128×128 на основе слоев HgCdTe и многослойных гетероструктур с квантовыми ямами GaAs/

References

1. Andrianov V.P., Dulin O.N., Kamenev V.G., Kuzin V.M., Turkin V.N., Shubin A.S., Bazarov Y.B., Gubachev A.V., Elgaenkov A.E., Litvinova M.S., Lobastov S.A. Rotating mirror digital streak camera for investigation of fast processes. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 618–623. <https://doi.org/10.1134/S0010508218050167>
2. Tarasov V.V., Yakushenkov Iu.G. *Dual- and Multiband Opto-Electronic Systems with Matrix Radiation Receivers*. Moscow, Universitetskaja kniga, Logos Publ., 2007, 192 p. (in Russian)
3. Zhanova V.L. Features of digital colourimetry application in modern scientific research. *Light & Engineering*, 2021, vol. 29, no. 3, pp. 146–158. <https://doi.org/10.33383/2021-028>
4. Ainbund M.R., Egoronkov A.A., Pashuk A.V. Features of images of water, ice, snow, objects and a human formed by a hybrid television camera in the near-infrared range. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 5, pp. 619–625. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625>
5. Nonaka Y., Yoshida D., Kitamura S., Yokota T., Hasegawa M., Ootsu K. Monocular color-IR imaging system applicable for various light environments. *Proc. of the 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2018, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2018.8326238>
6. Stotko P., Weinmann M., Klein R. Albedo estimation for real-time 3D reconstruction using RGB-D and IR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, vol. 150, pp. 213–225. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.018>
7. Siekański P., Paško S., Malowany K., Malesa M. Online correction of the mutual miscalibration of multimodal VIS-IR sensors and 3D Data on a UAV platform for surveillance applications. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11, no. 21, pp. 2469. <https://doi.org/10.3390/rs11212469>
8. Choe G., Park J., Tai Y.-W., Kweon I. Refining geometry from depth sensors using ir shading images. *International Journal of Computer Vision*, 2017, vol. 122, no. 1, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1007/s11263-016-0937-y>
9. Grigorev L.V. *Silicon Photonics*. St. Petersburg, 2016, 94 p. (in Russian)
10. Lizunkova D.A. *Electrical and optical properties investigation of photosensitive structures on nanostructured silicon*. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Samara, 2018, 150 p. (in Russian)
11. Khenkin M.V. *Electrical, photoelectric and optical properties of two-phase films of hydrogenated silicon*. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Moscow, 2015. (in Russian)
12. Ovsyuk V.N., Sidorov Yu.G., Vasil'ev V.V., Shashkin V.V. Arrays of 128×128 photodetectors based on hgcdte layers and multilayer heterostructures with GaAs/AlGaAs quantum wells. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 9, pp. 1110–1116. <https://doi.org/10.1134/1.1403577>

- AlGaAs // Физика и техника полупроводников. 2001. Т. 35. № 9. С. 1159–1166.
13. Rieve P., Walder M., Seibel K., Prima J., Mirhamed A. TFA image sensor with stability-optimized photodiode. *Patent US7701023*, 2010.
 14. Merrill R.B. Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure. *Patent US5965875*, 1999.
 15. Lyon R.F., Hubel P.M. Eyeing the Camera: into the Next Century // *IS&T Reporter “The window on imaging”*. 2002. V. 17. N 6.
 16. Gehrke R., Greiwe A. Multispectral image capturing with Foveon sensors // *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, vol. 40, no. 1/W2, pp. 151–156. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-151-2013>
 17. Zhanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatin V.A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. V. 1679. N 2. P. 022039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022039>
 18. Solomatin V.A., Parvulyusov Yu.B., Zhanova V.L. Spatial-frequency characteristics of photo matrices for colour image // *Journal of Physics: Conference Series*, 2020. V. 1679. N 2. P. 022038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022038>
 19. Парвлюсов Ю.Б., Жбанова В.Л. Моделирование хода лучей в матричном фотоприемнике с многослойной структурой // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2014. № 4. С. 108–113.
 20. Ландсберг Г.С. Оптика. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
 21. Green M.A., Keevers M. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K // *Progress in Photovoltaics*, 1995. V. 3. N 3. P. 189–192. <https://doi.org/10.1002/pip.4670030303>
 13. Rieve P., Walder M., Seibel K., Prima J., Mirhamed A. TFA image sensor with stability-optimized photodiode. *Patent US7701023*, 2010.
 14. Merrill R.B. Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure. *Patent US5965875*, 1999.
 15. Lyon R.F., Hubel P.M. Eyeing the Camera: into the Next Century. *IS&T Reporter “The window on imaging”*, 2002, vol. 17, no. 6.
 16. Gehrke R., Greiwe A. Multispectral image capturing with Foveon sensors. *ISPRS — International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2013, vol. 40, no. 1/W2, pp. 151–156. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-1-W2-151-2013>
 17. Zhanova V.L., Parvulyusov Yu.B., Solomatin V.A. Multispectral matrix silicon photodetectors with the IR range registration. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679, no. 2, pp. 022039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022039>
 18. Solomatin V.A., Parvulyusov Yu.B., Zhanova V.L. Spatial-frequency characteristics of photo matrices for colour image. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1679, no. 2, pp. 022038. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/2/022038>
 19. Parvulyusov Yu.B., Zhanova V.L. Simulation of the rays path in the matrix photodetector with a multilayer structure. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2014, vol. 4, pp. 108–113. (in Russian)
 20. Landsberg G.S. *Optics*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2003, 848 p. (in Russian)
 21. Green M.A., Keevers M. Optical properties of intrinsic silicon at 300 K. *Progress in Photovoltaics*, 1995, vol. 3, no. 3, pp. 189–192. <https://doi.org/10.1002/pip.4670030303>

Авторы

Жбанова Вера Леонидовна — кандидат технических наук, доцент, доцент, Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Смоленске, г. Смоленск, 214013, Российская Федерация, [sc 57190029669](https://orcid.org/0000-0001-7597-0675), <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>, Vera-zhbanova@yandex.ru

Парвлюсов Юрий Борисович — кандидат технических наук, профессор, заслуженный геодезист, Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, 105064, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7219-652X>, parvulyusov@miigaik.ru

Статья поступила в редакцию 23.06.2022
 Одобрена после рецензирования 12.07.2022
 Принята к печати 23.09.2022

Authors

Vera L. Zhanova — PhD, Associate Professor, Associate Professor, The Branch of National Research University “Moscow Power Engineering Institute” in Smolensk, Smolensk, 214013, Russian Federation, [sc 57190029669](https://orcid.org/0000-0001-7597-0675), <https://orcid.org/0000-0001-7597-0675>, Vera-zhbanova@yandex.ru

Yurij B. Parvulyusov — PhD, Professor, Honored Geodesist, Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, 105064, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7219-652X>, parvulyusov@miigaik.ru

Received 23.06.2022
 Approved after reviewing 12.07.2022
 Accepted 23.09.2022



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»