

Синтез поляризационных светоделителей для дальнего инфракрасного диапазона спектра

Е. Н. Котликов, В. М. Андреев, Ю. А. Новикова[✉], Г. В. Терещенко

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

✉ nov-jliana@yandex.ru

Аннотация. Представлена методика и результаты синтеза поляризационных светоделителей для длинноволновой инфракрасной области спектра 8...14 мкм. В этом диапазоне начинают излучать тела с температурами около 0 °С. Кроме того, данное излучение имеет малое затухание в относительно влажной или насыщенной аэрозолями атмосфере. Поэтому он широко используется в приборах ночного видения, дальномерах и тепловизионных камерах, в том числе в мобильных системах с переменным ракурсом оптической оси по отношению к углу прихода падающей электромагнитной волны. В системах с активным подсветом для снижения влияния помехи обратного рассеяния используется поляризованное излучение и светоделители. Обзор патентов и литературы показал отсутствие готовых изделий для рассматриваемого диапазона длин волн. В настоящей статье предложены оригинальные конструкции поляризационных светоделителей и получены их спектральные оптические характеристики.

Ключевые слова: синтез оптических покрытий, функция качества, поляризационный светоделитель

Для цитирования: Синтез поляризационных светоделителей для дальнего инфракрасного диапазона спектра / Е. Н. Котликов, В. М. Андреев, Ю. А. Новикова, Г. В. Терещенко // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 3. С. 5–11. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-5-11.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Synthesis of Polarizing Beamsplitters for the Far Infrared Spectral Range

E. N. Kotlikov, V. M. Andreev, Yu. A. Novikova[✉], G. V. Tereshchenko

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
Saint Petersburg, Russia

✉ nov-jliana@yandex.ru

Abstract. The technique and results of the synthesis of polarization beam splitters for the long-wavelength infrared region of the spectrum of 8–14 microns are presented. In this range, bodies with temperatures around zero degrees Celsius begin to emit. In addition, this radiation has a low attenuation in a relatively humid or aerosol-saturated atmosphere. Therefore, it is widely used in night vision devices, rangefinders and thermal imaging cameras, including mobile systems with a variable angle of the optical axis relative to the angle of arrival of the incident electromagnetic wave. In systems with active illumination, polarized radiation and beam splitters are used to reduce the effect of backscattering interference. A review of patents and literature showed the absence of finished products for the considered wavelength range. In this paper, original designs of polarization beam splitters are proposed and their spectral optical characteristics are obtained.

Keywords: synthesis of optical coatings, quality function, polarization beam splitter

For citation: Synthesis of Polarizing Beamsplitters for the Far Infrared Spectral Range / E. N. Kotlikov, V. M. Andreev, Yu. A. Novikova, G. V. Tereshchenko // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 3. P. 5–11. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-3-5-11.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Освоение Северного морского пути и заполярных широт – одна из ключевых точек роста торговли и промышленности России. В силу труднодоступности и малой освоенности территории, а также известных проблем с частыми перебоями в каналах спутниковой связи необходимо развивать альтернативные методы передачи информации, навигации по открытым атмосферным каналам. Большие объемы данных при кратковременных сеансах связи на малые расстояния целесообразно передавать в оптическом диапазоне в длинноволновой инфракрасной области от 8 до 14 мкм, которая характеризуется малым затуханием в относительно влажной атмосфере или в условиях снежной бури. Кроме того, в этом диапазоне начинают излучать тела с температурами около 0 °С. Этот факт можно использовать для реализации тех приборов ночного видения и тепловизионных камер, которые могут быть задействованы при поисково-спасательных операциях для поиска объектов, отличающихся тепловым контрастом по отношению к фону, в том числе в системах с активным импульсным подсветом. Использование поляризованного излучения и светоделителей служат дополнительными факторами снижения помехи обратного рассеяния. Таким образом, реализация оптико-электронных систем для заполярных широт требует и разработки эффективных поляризационных светоделителей для длин волн дальнего ИК-диапазона. Обзор патентов и литературы показал отсутствие готовых изделий для рассматриваемого диапазона длин волн.

Методика синтеза светоделителей. Формирование и прием в оптико-электронных системах поляризованного излучения, распространяющегося в открытом атмосферном канале, позволяет в условиях полярного дня снизить мощность сторонней солнечной засветки. Реализация систем технического зрения с активным импульсным подсветом и определенной поляризацией увеличивает контраст и снижает помехи на изображении. Для технической реализации оптического тракта таких систем требуются светоделители для поляризованного света. Диапазон длинноволнового ИК-излучения (LWIR) выгодно отличается малое затухание в приземных слоях атмосферы, в

том числе в сложных погодных условиях [1]–[4], а также позволяет регистрировать тепловое излучение от объектов с температурой около 0 °С [5]. Применение LWIR-тепловизионных систем, работающих в заполярных широтах, позволяет проводить поисково-спасательные операции в условиях полярной ночи – или дня, но в сложных метеоусловиях.

Синтез оптических покрытий диапазона LWIR проводился с помощью программы Film Manager [6]. Это функциональное программное обеспечение (ПО), математическое ядро которого задействует численные методы для синтеза или анализа интерференционных оптических покрытий (ИП). Назначение, функционал, логика и порядок операций, реализуемых в Film Manager, подробно рассмотрены в [6].

Заложенный в программу метод синтеза ориентирован в первую очередь на минимизацию функции качества [7]. Алгоритм расчета определяет функцию качества, заданную через наборы дискретных исходных данных с размерностью L . Для ее вычисления можно использовать формулу [6]

$$F(\mathbf{X}) = \left\{ \sum_{i=1}^L w(\lambda_i) |R(\mathbf{X}, \lambda_i) - R_0(\lambda_i)|^q \right\}^{1/q},$$

где $w(\lambda_i)$ – значения весовой функции; $R(\mathbf{X}, \lambda_i)$ – набор получаемых значений коэффициента отражения R в отдельно взятых точках спектра на каждой следующей итерации процедуры синтеза; $R_0(\lambda_i)$ – заданное в выбранных дискретных точках спектра целевое значение коэффициента отражения; q – целое положительное число, определяющее характер минимизируемой функции ошибок. Если $q = 2$, то эта функция по своей сути представляет собой функцию качества, которая отвечает за степень среднеквадратичного приближения спектральной характеристики ИП к требуемой. Оператор программы имеет возможность не только визуально контролировать процесс синтеза, анализируя степень и характер приближения спектра коэффициента отражения к эталонному, но и на интервалах тех рабочих длин волн, где необходимо достичь максимального приближения, корректировать синтезируемую кривую, изменяя значения $w(\lambda_i)$.

С использованием в ПО многократно проверенного на практике матричного метода идет расчет спектральных зависимостей коэффициентов отражения R , поглощения A или пропускания T . При этом оператор при помощи ПО может визуализировать эти спектры на любой выбранной им итерации процедуры синтеза ИП и тем самым быстро принять решение об увеличении или уменьшении степени близости получаемых частотных характеристик к эталонным, заданным перед началом процедуры поиска нужной конфигурации ИП.

Необходимо отметить, что разработанное авторами ПО Film Manager может быть эффективно использовано для анализа и синтеза любых ИП в оптическом диапазоне длин волн. Не будучи кроссплатформенным решением, Film Manager при этом легко устанавливается и полноценно работает под управлением ОС MS Windows любого поколения.

В структуре ПО Film Manager заложена возможность создания связи с обширной автономной базой данных оптических констант тонких пленок в широком диапазоне спектра электромагнитного излучения. Последняя содержит значительное число известных и перспективных пленкообразующих материалов и постоянно пополняется. В этой базе для всего оптического спектрального диапазона уже учтены дисперсии показателей преломления и поглощения.

Перед началом синтеза оператором выбираются и задаются: требуемый диапазон частот (спектральный интервал), геометрическая структура покрытия в которой определено число слоев, их оптическая толщина, материал тонкой пленки, а в случае новых, перспективных пленкообразующих материалов – данные в виде наборов показателей преломления (для выбранного для процедуры синтеза частотного интервала). Определяется кроме этого диапазон перебора значений показателей преломления и шага поиска, позволяющий последовательно проходить этапы грубого, среднего и точного приближения синтезируемого светоделиителя к эталонному.

Процедура синтеза, вычисление спектров могут быть реализованы при углах прихода волны не только вдоль оптической оси – по нормали к покрытию, – но и под углом. При наклонном падении вычисляются спектры для электромагнитных волн с любым заданным типом поляризации.

Учитывая выбор LWIR-диапазона для поиска структуры светоделиителя кроме материалов для тон-

ких пленок необходимо выбрать и материал, наиболее подходящий для изготовления подложки. Учитывая хорошую механическую прочность, а также высокое оптическое качество на длинах волн от 1 до 15 мкм, для реализации подложки выбран ZnSe.

Опыт наших исследований показал [8], что селенид цинка (ZnSe) – это прекрасный выбор в качестве подложки для оптического интерференционного покрытия по нескольким причинам. Во-первых, ZnSe обладает широким спектральным интервалом прозрачности, который охватывает инфракрасный и видимый свет, что делает его идеальным материалом для синтеза оптических изделий различного назначения. Так, покрытия на основе ZnSe могут быть использованы для производства комплектующих лазерной техники, спектроскопии или фотоники. Ключевое преимущество ZnSe в том, что он обладает высокой прочностью и твердостью, что делает его устойчивым к царапинам и другим повреждениям, позволяя обеспечить долговечность и стабильность интерференционных покрытий. Это важно и в процессе эксплуатации, поскольку покрытия на основе ZnSe могут быть легко очищены и обслужены без риска повреждения. Еще одним преимуществом ZnSe служит его химическая устойчивость, что делает его устойчивым к коррозии и окислению. Последнее обеспечивает стабильность покрытий на основе ZnSe при эксплуатации в различных условиях окружающей среды. Наконец, ZnSe имеет высокий коэффициент преломления, что позволяет создавать более тонкие и эффективные интерференционные покрытия с высокой оптической прозрачностью и минимальными потерями света. Таким образом, использование ZnSe в качестве подложки для интерференционных покрытий оправдано его уникальными оптическими свойствами, прочностью и химической устойчивостью, кроме того он хорошо зарекомендовал себя в случаях, когда в качестве пленкообразующих материалов выступают Ge, PbTe, ZnSe, PbF₂ и др. [9].

В оптических системах используются в проходящем наклонном свете плоскопараллельные пластины, которые поляризуют проходящее излучение. В дальнейшем речь будет идти о пластинах из селенида цинка. На рис. 1–3 представлены спектры проходящего излучения через пластину из селенида цинка толщиной 0.5 мм, с учетом его поляризуемости для разных поляризаций. Угол падения 45°. Поглощение не показано, так как при такой толщине пластины оно составляет менее 1 % для всех длин волн (λ – длина волны, мкм).

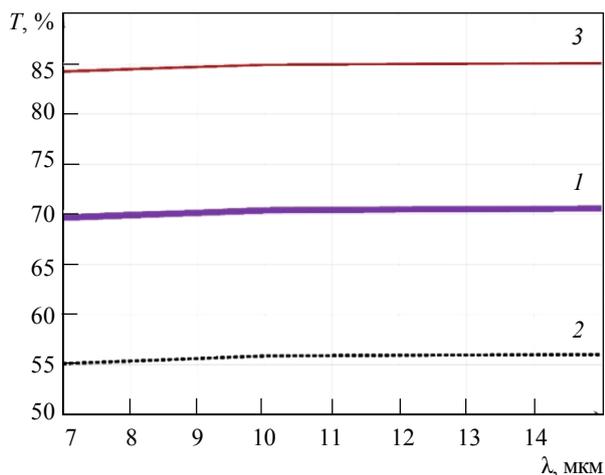


Рис. 1. Зависимость пропускания излучения T от длины волны λ через плоскополяризованную пластину из селенида цинка. Угол падения излучения – 45° :

1 – неполяризованное излучение;
2 – p -поляризация; 3 – s -поляризация

Fig. 1. Dependence of the transmission of radiation T on the wavelength λ through a plane-polarized zinc selenide plate. The angle of incidence of the radiation is 45 degrees:

1 – unpolarized radiation; 2 – p -polarization;
3 – s -polarization

Из рис. 1 видно, что проходящее неполяризованное излучение испытывает частичную поляризацию. Это необходимо учитывать для анализа пропускания.

Синтез поляризационных светоделителей в диапазоне 7...15 мкм. Рассмотрим этапы создания структуры, обеспечивающей создание покрытия, осуществляющего пропускание около 50 % и отражение во всем указанном диапазоне спектра.

Анализ покрытий показал, что создание широкодиапазонного поляризационного светоделительного покрытия неосуществимо, поэтому процедура синтеза требуемых покрытий на практике состоит из нескольких последовательно реализуемых этапов.

На первом этапе за счет выбора пленок с требуемым показателем преломления синтезированы покрытия, показатели которых пока еще не соответствуют тем, которые будут получены при применении реальных пленок. Это первое приближение к эталонному светоделителю. Оптическая структура на базе ИП имела вид, представленный в табл. 1, где контрольная длина волны $\lambda_0 = 1$ мкм:

На рис. 2 приведены спектры пропускания этой структуры в диапазоне 7...15 мкм, в качестве подложки используется ZnSe (селенид цинка). Поляризованное излучение направлено под углом 45° по плоскости падения. Из рис. 2 видно, что для поляризованного и неполяризованного излучения пропускание 50 ± 15 %.

Табл. 1. Структура пятислойного интерференционного покрытия
Tab. 1. Structure of the five-layer interference coating

Номер слоя	Коэффициент преломления n	Толщина $\lambda_0/4$
1	1.914118	1.379295
2	1.992500	1.001423
3	3.833035	1.601261
4	1.516491	0.860875
5	1.403217	1.356286

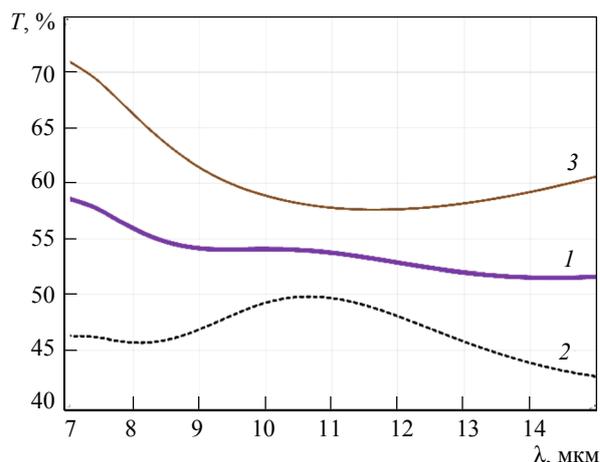


Рис. 2. Спектры пропускания синтезированной структуры: 1 – неполяризованное излучение; 2 – p -поляризация; 3 – s -поляризация

Fig. 2. Transmission spectra of the synthesized structure: 1 – unpolarized radiation; 2 – p -polarization; 3 – s -polarization

На следующем этапе пленки с произвольными значениями показателей преломления заменялись на пленки с близкими значениями показателя преломления [10], [11] и синтезировалось покрытие для нахождения заданных толщин с новыми пленками: Ge, PbF_2 , ZnSe. Структура синтезированного покрытия приведена в табл. 2, где контрольная длина волны $\lambda_0 = 1$ мкм.

Табл. 2. Результаты моделирования
Tab. 2. Experimental results

Номер слоя	Материал	Толщина $\lambda_0/4$
1	ZnSe	2.310238
2	Ge	1.522376
3	PbF_2	2.459850

Результаты синтеза для разных поляризаций приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что пропускание всех поляризаций в дальнем ИК-диапазоне спектра составляет 50 ± 15 %. В этом случае искажение спектра минимально.

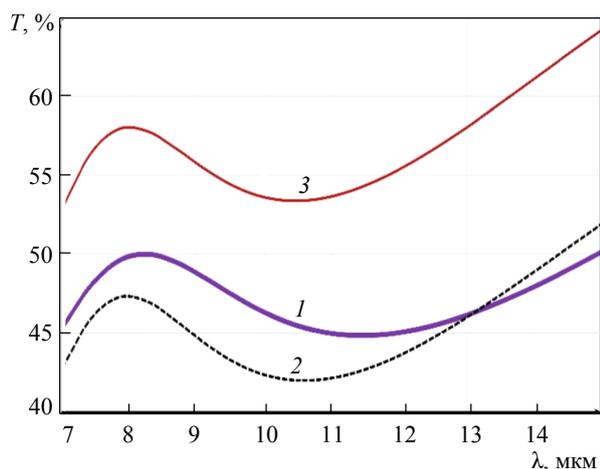


Рис. 3. Спектры пропускания T первой синтезированной структуры на основе пленок ZnSe, PbTe, PbF₂:

1 – неполяризованное излучение;
2 – p -поляризация; 3 – s -поляризация

Fig. 3. Transmission spectra T of the first synthesized structure based on ZnSe, PbTe, PbF₂ films:

1 – unpolarized radiation; 2 – p -polarization;
3 – s -polarization

В том случае, когда внутри резонатора нет элементов, задающих поляризацию лазерного излучения, например при отсутствии выходных окон внутри резонатора лазера, поляризация выходного излучения лазера может быть произвольной для фиксированной мощности выходного излучения. В этом случае нельзя фокусировать пятно лазерного излучения до минимальных размеров порядка длины волны лазерного излучения. Поэтому интерес представляет синтез покрытия при использовании в CO₂-лазерах, имеющих пропускание около 50 % для s - и p -поляризаций одновременно.

Такое покрытие было синтезировано методом, описанным ранее. В начале в области 10–11 мкм искалось решение для пропускания произвольных значений показателей преломления и толщин пленок. Точного решения этой задачи не существует, так как для разных поляризаций излучения показатели преломления пленок входят в числитель или в знаменатель матриц, описывающих одиночные слои. Вначале искалось решение для произвольных значений показателей преломления и толщин пленок для разного числа пленок на подложке из селенида цинка. Затем эти пленки заменялись реальными материалами PbF₂, ZnSe, PbTe [10], [11] и для них искались толщины и показатели преломления.

Синтезировано покрытие, структура которого приведена в табл. 3, где контрольная длина волны $\lambda_0 = 3$ мкм.

Табл. 3. Структура покрытия
Tab. 3. Coating structure

Номер слоя	Материал	Толщина $\lambda_0/4$
1	PbF ₂	0.67752
2	ZnSe	0.59496
3	PbTe	1.96157
4	ZnSe	0.60914
5	PbF ₂	2.78070

$T, A, \%$

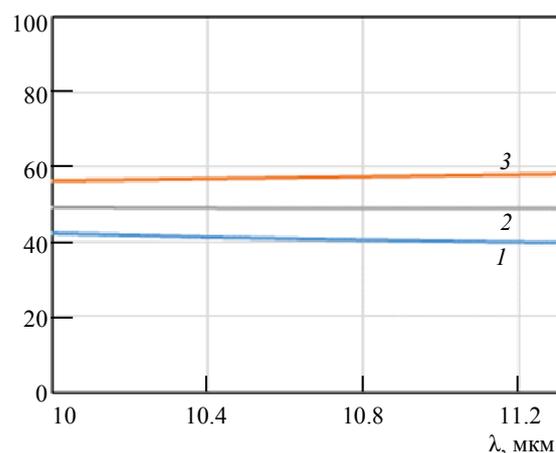


Рис. 4. Спектры пропускания покрытия с близкими спектральными характеристиками для p - и s -поляризаций излучения: 1 – поглощение; 2 – p -поляризация; 3 – s -поляризация

Fig. 4. Transmission spectra of the coating with similar spectral characteristics for p - and s -polarizations of radiation: 1 – absorption; 2 – p -polarization; 3 – s -polarization

Спектры пропускания для разных поляризаций излучения приведены на рис. 4.

Из рисунка видно, что отклонение в пропускании этих поляризаций от 50 % составляет около ± 10 %, что достаточно для качественной фокусировки этого излучения. Такое покрытие было изготовлено нами и показало пропускание для разных поляризаций с разницей 10 %. Для измерения пропускания под углом 45° для всех поляризаций использовался CO₂-лазер ЛГ-74, его выходное излучение было линейно-поляризованным за счет использования окон, поставленных под углом Брюстера внутри резонатора. Реально разница в пропускании разных поляризаций была менее 10 %.

Заключение. Существует необходимость применения оптико-электронных систем в заполярных широтах, связанная с развитием Северного морского пути. Поскольку они предназначены для работы в открытом атмосферном канале связи, то наилучшие энергетические параметры или тепловой контраст в тепловизорах или приборах ночного видения достигаются в дальнем ИК-диапазоне от 8 до 12 мкм, что требует разработки соответствующих светоделителей.

На базе предложенного метода синтеза светоделиителей с использованием новых тонкопленочных материалов PbTe, PbF₂, ZnSe, Ge найдены оригинальные конструкции многослойных покрытий для инфракрасной области спектра в активно осваиваемом в оптико-электронных системах диапазоне LWIR. Определены их спектральные оптические характеристики, доказывающие эффективность предложенных решений. Для мощных систем дальнего действия (на базе CO₂-

лазера) синтезирован поляризационный светоделиитель, отличающийся высокой стабильностью заданного коэффициента пропускания в относительно широкой полосе частот вокруг резонансной частоты лазера 10.6 мкм. Это позволяет использовать предложенное техническое решение в том числе для скоростных мобильных систем с возможным существенным доплеровским смещением частоты сигнала.

Список литературы

1. Кулакова Н. А., Насыров А. Р., Несмелова И. М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журн. 2010. Т. 77, № 5. С. 34–40.
2. Яковлев О. Тепловидение и его применение в системах охраны и обеспечения безопасности // Алгоритм безопасности. 2008. № 3. С. 76–78.
3. Козлов С. Д., Насыров А. Р., Нигматуллина Н. Г. Вариообъективы для тепловизионных приборов наблюдения // Оптический журн. 2017. Т. 84, № 3. С. 53–56.
4. Long-wave infrared (10- μ m) free-space optical communication system / A. Pavelchek, R. Trissel, J. Plante, S. Umbrasas // Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engin. 2004. Vol. 5160. P. 247–252. doi: 10.1117/12.504940.
5. Accetta J. S., Shumaker D. L. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook: Electro-optical systems design, analysis, and testing. Michigan: Infrared Information Analysis Center (IRIA), 1993. 376 p.
6. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Коваленко И. И. Программа синтеза и анализа интерференционных покрытий Film Manager // Информационно-управляющие системы. 2015. Т. 76, № 3. С. 51–59.
7. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980. 520 с.
8. Piegari A., Flory F. R. Optical thin films and coatings. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. 860 p.
9. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Tereshchenko G. V. The study of variations in refractive indices of ZnSe single crystals in the range of 1.5-27 microns // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. 2020. Vol. 919. P. 22033. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/919/2/022033> (дата обращения 21.08.2023).
10. Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Юрковец Е. В. Метод определения оптических констант пленок на поглощающих подложках // Оптический журн. 2018. Т. 85, № 10. С. 64–69.
11. Тропин А. Н. Пленкообразующие материалы для тонкослойных оптических покрытий: новые задачи и перспективы (обзор) // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4, № 2. С. 206–211.

Информация об авторах

Котликов Евгений Николаевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП, ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: ekotlikov45@mail.ru

Андреев Владимир Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП, ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: andreev.vm@gmail.com

Новикова Юлиана Александровна – канд. физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП, ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: nov-jliana@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2043-188X>

Терещенко Георгий Викторович – канд. физ.-мат. наук, доцент Института фундаментальной подготовки и технологических инноваций СПбГУАП, ул. Б. Морская, 67, Санкт-Петербург, 190000, Россия.

E-mail: gvter@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1252-6443>

References

1. Kulakova N. A., Nasyrov A. R., Nesmelova I. M. Sovremennye tendencii sozdaniya opticheskikh sistem dlja infrakrasnoj oblasti spektra // Opticheskij zhurn. 2010. T. 77, № 5. S. 34–40. (In Russ.).
2. Jakovlev O. Teplovidenie i ego primenenie v sistemah ohrany i obespecheniya bezopasnosti // Algoritm bezopasnosti. 2008. № 3. S. 76–78. (In Russ.).
3. Kozlov S. D., Nasyrov A. R., Nigmatullina N. G. Varioob#ektiv dlja teplovizionnyh priborov nabljudeniya // Opticheskij zhurn. 2017. T. 84, № 3. S. 53–56. (In Russ.).
4. Long-wave infrared (10- μ m) free-space optical communication system / A. Pavelchek, R. Trissel, J. Plante, S. Umbrasas // Proc. of SPIE – The Intern. Society for Optical Engin. 2004. Vol. 5160. P. 247–252. doi: 10.1117/12.504940.
5. Accetta J. S., Shumaker D. L. The infrared and electro-optical systems handbook: Electro-optical systems design, analysis, and testing. Michigan: Infrared Information Analysis Center (IRIA), 1993. 376 p.
6. Kotlikov E. N., Novikova Ju. A., Kovalenko I. I. Programma sinteza i analiza interferencionnyh pokrytij Film Manager // Informacionno-upravljajushhie sistemy. 2015. T. 76, № 3. S. 51–59. (In Russ.).
7. Vasil'ev F. P. Chislennye metody resheniya jekstremal'nyh zadach. M.: Nauka, 1980. 520 s. (In Russ.).
8. Piegari A., Flory F. R. Optical thin films and coatings. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018. 860 p.
9. Kotlikov E. N., Novikova Yu. A., Tereshchenko G. V. The study of variations in refractive indices of ZnSe single crystals in the range of 1.5–27 microns // IOP Conf. Series: Materials Sci. and Engin. 2020. Vol. 919. P. 22033. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/919/2/022033> (data obrashheniya 21.08.2023).
10. Kotlikov E. N., Novikova Ju. A., Jurkovec E. V. Metod opredeleniya opticheskikh konstant pljonok na pogloshhajushhih podlozhkah // Opticheskij zhurn. 2018. T. 85, № 10. S. 64–69. (In Russ.).
11. Tropin A. N. Plenkoobrazujushhie materialy dlja tonkoslojnyh opticheskikh pokrytij: novye zadachi i perspektivy (obzor) // Uspehi prikladnoj fiziki. 2016. T. 4, № 2. S. 206–211. (In Russ.).

Information about the authors

Evgeny N. Kotlikov – Dr Sci. (Phys.-Math.), Professor, Leading Researcher at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Bolshaya Morskaya St., 67, Saint Petersburg, 190000, Russia.
E-mail: ekotlikov45@mail.ru

Vladimir M. Andreev – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Bolshaya Morskaya St., 67, Saint Petersburg, 190000, Russia.
E-mail: andreev.vm@gmail.com

Yuliana A. Novikova – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Bolshaya Morskaya St., 67, Saint Petersburg, 190000, Russia.
E-mail: nov-jliana@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2043-188X>

Georgy V. Tereshchenko – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor at the Institute of Fundamental Training and Technological Innovations, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Bolshaya Morskaya St., 67, Saint Petersburg, 190000, Russia.
E-mail: gvter@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1252-6443>

Статья поступила в редакцию 20.11.2023; принята к публикации после рецензирования 03.02.2024; опубликована онлайн 25.03.2024.

Submitted 20.11.2023; accepted 03.02.2024; published online 25.03.2024.