

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-873-880

УДК 621.383.522

## Расчет и оптимизация оптической схемы фотоприемного модуля спектрального диапазона 1,3–1,6 мкм

Яков Николаевич Ковач<sup>1</sup>✉, Владислав Васильевич Андриюшкин<sup>2</sup>,  
Евгений Сергеевич Колодезный<sup>3</sup>, Иннокентий Игоревич Новиков<sup>4</sup>,  
Артем Александрович Петренко<sup>5</sup>, Анна Владимировна Камарчук<sup>6</sup>,  
Станислав Станиславович Рочас<sup>7</sup>, Дмитрий Андреевич Бауман<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>1</sup> [j-n-kovach@itmo.ru](mailto:j-n-kovach@itmo.ru) ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>

<sup>2</sup> [vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

<sup>3</sup> [evgeniy\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgeniy_kolodeznyi@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

<sup>4</sup> [innokentiy.novikov@itmo.ru](mailto:innokentiy.novikov@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

<sup>5</sup> [aapetrenko@itmo.ru](mailto:aapetrenko@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7862-971X>

<sup>6</sup> [annakamarchuck@itmo.ru](mailto:annakamarchuck@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-2953-0334>

<sup>7</sup> [stanislav\\_rochas@itmo.ru](mailto:stanislav_rochas@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6519-2897>

<sup>8</sup> [dabauman@itmo.ru](mailto:dabauman@itmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Рассмотрен метод проектирования и оптимизации оптической схемы фотоприемного модуля, содержащего одномодовое оптическое волокно и полупроводниковый *p-i-n* фотодиод с активной областью InGaAs, чувствительной к оптическому излучению диапазона 1,3–1,6 мкм. Исследована проблема потерь оптической мощности при согласовании расположенных в фотоприемном модуле оптического волокна и активной области *p-i-n* фотодиода, что приводит к уменьшению спектральной фоточувствительности и внешней квантовой эффективности модуля. **Метод.** Оптимизация оптической схемы стыковки оптического волокна и *p-i-n* фотодиода выполнена с использованием программного комплекса Zemax® с применением встроенного алгоритма Левенберга–Марквардта. Выполнены численные расчеты влияния продольных и поперечных сдвигов оптического волокна на качество оптической стыковки в фотоприемном модуле и его фоточувствительность. **Основные результаты.** Предложена и оптимизирована оптическая схема фотоприемного модуля на базе стандартного металлостежкового корпуса. Определено оптимальное расстояние между элементами системы, при котором более 93 % излучения, выходящего из оптического волокна, достигает активной области *p-i-n* фотодиода. Найдена предельная чувствительность линейных микротрансляторов, необходимых для сборки фотоприемных модулей и обеспечения юстировки оптических элементов. Получена эффективность согласования оптического волокна с активной областью *p-i-n* фотодиода более 90 %. **Практическая значимость.** Результаты работы могут быть использованы при проектировании фотоприемных модулей инфракрасного диапазона. Предложенные решения найдут применение при создании фотоприемных модулей для использования в других спектральных диапазонах.

### Ключевые слова

оптическая стыковка, фотоприемный модуль, оптимизация, программный комплекс Zemax®

### Благодарности

Моделирование оптических систем и расчетов фоточувствительности выполнены при финансовой поддержке Программы создания и развития Центра компетенций НТИ по направлению «Фотоника» при государственной поддержке Фонда поддержки проектов Национальной технологической инициативы и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (договор предоставления гранта № 70-2021-00309 от 18.12.2021; договор на выполнение ОКТР № 763 от 26.04.2022); в части характеристики гетероструктур работа выполнена при финансовой поддержке программы «Приоритет 2030».

**Ссылка для цитирования:** Ковач Я.Н., Андриушкин В.В., Колодезный Е.С., Новиков И.И., Петренко А.А., Камарчук А.В., Рочас С.С., Бауман Д.А. Расчет и оптимизация оптической схемы фотоприемного модуля спектрального диапазона 1,3–1,6 мкм // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 5. С. 873–880. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-873-880

## Optimization of the optical scheme of a photodetector module operating in the spectral range of 1.3–1.6 $\mu\text{m}$

Yakov N. Kovach<sup>1✉</sup>, Vladislav V. Andryushkin<sup>2</sup>, Evgenii S. Kolodeznyi<sup>3</sup>,  
Innokenty I. Novikov<sup>4</sup>, Artem A. Petrenko<sup>5</sup>, Anna V. Kamarchuk<sup>6</sup>, Stanislav S. Rochas<sup>7</sup>,  
Dmitrii A. Bauman<sup>8</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6,7,8</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>1</sup> j-n-kovach@itmo.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>

<sup>2</sup> vvandriushkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>

<sup>3</sup> evgenii\_kolodeznyi@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>

<sup>4</sup> innokenty.novikov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>

<sup>5</sup> aapetrenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7862-971X>

<sup>6</sup> annakamarchuk@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2953-0334>

<sup>7</sup> stanislav\_rochas@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6519-2897>

<sup>8</sup> dabauman@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>

### Abstract

Optical system consisting of single-mode optical fiber and *p-i-n* photodiode semiconductor chip with InGaAs active layer was investigated. Considered photodetector module has responsivity in 1.3–1.6  $\mu\text{m}$ . The problem of optical power loss due to inaccurate matching between the optical fiber and the active medium of photodiode in photodetector modules is investigated; resolving the power loss problem will lead to an increase in the spectral photosensitivity and external quantum efficiency of the photodetector module. Optimization of optical fiber coupling with semiconductor chip was implemented in Zemax® software with built-in Levenberg–Marquardt algorithm. Also, numerical calculations of the influence of the transverse and longitudinal displacement on optical coupling efficiency in the photodetector module were carried out. The optical system of photodetector module based on standard metal can package was built in Zemax® software. Optimal distances between elements of the photodetector module were calculated, and maximum efficiency of 93.1 % optical coupling between single-mode fiber and photodiode aperture was achieved. The necessary sensitivity of linear micro translators used during the assembly of photodetector modules was determined to ensure the alignment of optical elements with coupling efficiency more than 90 %. The results of this work can be used in the design of photodetector modules. The proposed solutions can be relatively easily modified to create photodetector modules of other spectral ranges.

### Keywords

optical coupling, photodetector module, optimization, Zemax® software

### Acknowledgements

This work was supported by the Program of the Formation and Development of the NTI Center of Excellence in Photonics with the government support of the Foundation for National Technology Initiative's Project Support and the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant agreement No. 70-2021-00309 of 12.18.2021; R&D contract No. 763 of 26.04.2022) for the part of optical modeling and photoresponsivity calculation and by Priority 2030 program for the part of heterostructure characterization.

**For citation:** Kovach Y.N., Andryushkin V.V., Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Petrenko A.A., Kamarchuk A.V., Rochas S.S., Bauman D.A. Optimization of the optical scheme of a photodetector module operating in the spectral range of 1.3–1.6  $\mu\text{m}$ . *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 5, pp. 873–880 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-5-873-880

### Введение

Приборные структуры оптоэлектронных устройств требуется защищать от воздействий внешней среды, так как она оказывает значительное влияние на состояние поверхности структуры прибора, из-за чего в процессе эксплуатации могут сильно изменяться характеристики прибора. Для обеспечения защиты приборные структуры размещают в корпусах, среди которых самые распространенные — корпуса типа ТО и «Butterfly» [1, 2]. При этом во время разработки фотоприемных модулей важным вопросом является обеспечение оптической стыковки ОВ (оптического волокна) с входным окном фотоприемника: от ее качества будет зависеть итоговая спектральная фоточувствительность модуля [3].

Часто для обеспечения оптического согласования ОВ реализуют конструкцию оптоэлектронного модуля, где ОВ расположено напротив входного окна фотодиода. Однако в таком случае расстояние между ОВ и *p-i-n* фотодиодом составляет порядка 0,2–0,4 мм, что значительно меньше, чем размеры стандартного корпуса типа ТО. В таком случае для оптической стыковки со свободным распространением выходящего из ОВ излучения требуется применять кристаллодержатель.

Еще один распространенный метод оптического согласования — использование в конструкции модуля фокусирующей линзы. В работе [4] предложено разместить на торце ОВ полимерную сферическую микролинзу или применить волоконную линзу, которую возможно получить при помощи травления или

плавления конца ОВ [5]. Также используют системы с микролинзой, которую применяют как в конструкции отдельного фотоприемного модуля [6], так и в конструкции опто-электронных межсоединений на печатной плате [7].

Наиболее патентуемыми являются конструкции BOСА (Bidirectional Optical Sub-Assembly), которые содержат приемник и передатчик излучения [8–10].

В конструкциях приемников излучения с микролинзами [11–13] предложены устройства, которые обеспечивают разъемное соединение с ОВ, тогда как в настоящей работе использован фотоприемный модуль с оптическим волокном, на конце которого смонтирован разъемный коннектор типа FC/APC.

В оптоэлектронных устройствах для расчета оптического согласования применяется метод Монте-Карло, с помощью которого производят расчеты для лазерных [14, 15] и фотоприемных модулей [7, 16, 17].

Простота реализации численного моделирования позволяет оценить влияние качества оптических элементов или точности их установки на оптическое согласование в системе.

В настоящей работе рассмотрена конструкция фотоприемного модуля без использования кристаллодержателя, который может усложнить схему электрического согласования импедансов и процесс сборки. Отметим, что при применении одиночной сферической микролинзы в конструкции модуля возможно выполнить монтаж *p-i-n* фотодиода в стандартный металлостеклянный корпус типа ТО со значительно большим допуском. Возможно произвести герметизацию корпуса до операции оптической стыковки, что упрощает технологический маршрут фотоприемного модуля.

### Описание элементов оптической системы фотоприемного модуля

При описании численной модели в непоследовательном режиме программного комплекса Zemax® заданы следующие основные объекты: источник излучения с оптической мощностью 10 мВт, длиной волны

1550 нм, диаметром модового пятна 10,4 мкм и числовой апертурой 0,14<sup>1</sup>. Для описания фоточувствительной области *p-i-n* фотодиода использован квадратный детектор излучения со следующими характеристиками: размером 40 × 40 мкм и количеством пикселей 500 × 500.

Для создания качественной модели *p-i-n* фотодиода проведено исследование его гетероструктуры (см. таблицу), выращенной с помощью установки RIBER49 методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложке InP. Исследованная фотолуминесценция гетероструктуры (рис. 1, *a*) подтвердила свое высокое структурное совершенство и позволяет судить об измеренных далее спектрах отражения как истинных спектрах отражения гетероструктуры *p-i-n* фотодиода.

Для исследования спектра отражения от гетероструктуры в программном комплексе Zemax® заданы дисперсионные кривые материалов в спектральном диапазоне 1–1,6 мкм следующих материалов: In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As [18, 19], In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As [19, 20], InP [21], Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> [22] и градиентного слоя In<sub>0,53</sub>Ga<sub>0,47</sub>As-In<sub>0,52</sub>Al<sub>0,48</sub>As (таблица). Показатель преломления градиентного слоя рассчитан как среднее арифметическое значение для двух указанных материалов. Слой Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> толщиной 0,2 мкм [23] использован для уменьшения обратного отражения на границе раздела гетероструктура-воздух. На рис. 1, *b* представлены расчетные и экспериментальные спектры отражения для гетероструктуры, из которых видно, что отражение оказалось меньше, а его использование уменьшает ошибку численной модели спектра отражения *p-i-n* фотодиода в среднем на 3,51 % в спектральном диапазоне 1,3–1,6 мкм.

В качестве критерия оптической прочности часто рассматривается следующая комбинация механических и тепловых характеристик, от которых зависит нагрев *p-i-n* фотодиода при его облучении оптическим излучением [24]:

<sup>1</sup> G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable [Электронный ресурс]. 2016. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.652-201611-I/en> (дата обращения: 20.09.2021).

Таблица. Исследованная гетероструктура *p-i-n* фотодиода

Table. Examined *p-i-n* photodiode heterostructure

Назначение слоя	Материал слоя	Толщина слоя, нм	Тип полупроводника	Концентрация, см <sup>-3</sup> , и материал легирующей примеси	Показатель преломления слоя на длине волны 1550 нм
Просветляющий	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	200	—	—	3,166
Контактный	In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As	100	<i>p</i>	1·10 <sup>19</sup> , С	3,532
Градиентный	In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As-In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As	25	<i>p</i>	1·10 <sup>19</sup> , С	3,366
Барьерный	In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As	100	<i>p</i>	3·10 <sup>18</sup> , С	3,201
Поглощающий	In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As	1000	<i>i</i>	—	3,532
Окно	In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As	100	<i>n</i>	5·10 <sup>18</sup> , Si	3,201
Градиентный	In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As-In <sub>0,52</sub> Al <sub>0,48</sub> As	25	<i>n</i>	5·10 <sup>18</sup> , Si	3,366
Контактный	In <sub>0,53</sub> Ga <sub>0,47</sub> As	500	<i>n</i>	5·10 <sup>18</sup> , Si	3,532
Подложка	InP	—	—	—	3,154

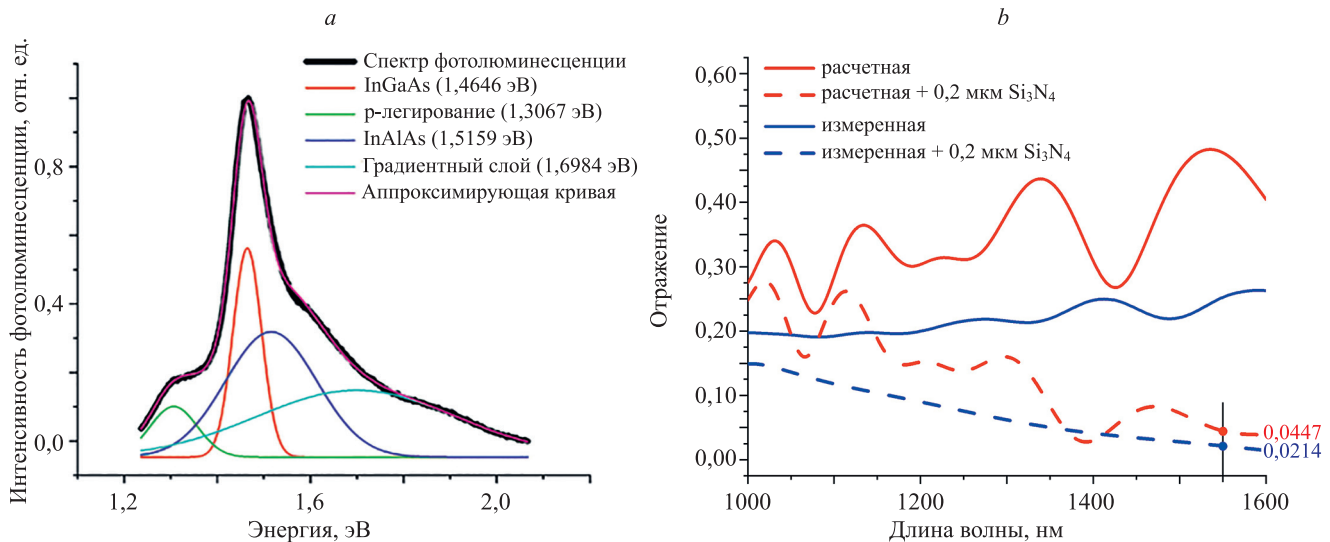


Рис. 1. Измеренный спектр фотолюминесценции (а); рассчитанные и экспериментальный спектры отражения (b)

Fig. 1. Measured photoluminescence spectrum (a); *p-i-n* heterostructure reflection spectra (b)

$$\varepsilon = \frac{\sigma_y \lambda_t}{\alpha K E}, \quad (1)$$

где  $\sigma_y$  — предел упругости;  $\lambda_t$  — теплопроводность;  $\alpha$  — коэффициент линейного расширения;  $K$  — коэффициент поглощения;  $E$  — модуль упругости.

При расчете критерия оптической прочности для InGaAs использованы следующие значения:  $\sigma_y = 5,3 \cdot 10^8$  кг/м<sup>2</sup> [25];  $\lambda_t = 5$  Вт/(К·м),  $\alpha = 5,66 \cdot 10^{-6}$  1/К,  $E = 8,5 \cdot 10^9$  кг/м<sup>2</sup> взяты из база данных института им. А. Ф. Иоффе<sup>1</sup>;  $K = 7,717 \cdot 10^5$  м<sup>-1</sup> [26]. Элементарный рассматриваемый участок активной области является квадратом со стороной 40 нм, из чего критическое значение оптической прочности (1) составляет  $4,46 \cdot 10^{13}$  Вт/м<sup>2</sup>.

Материалом микролинзы в Zemax® задан плавный кварц, который при толщине образца 10 мм пропускает 93 % излучения на длине волны 1550 нм, а величина показателя преломления при этом составляет 1,442. Выбранный радиус сферической микролинзы, равный 670 мкм, должен позволить сконструировать компактную систему, но при этом сохранить относительную легкость юстировки.

Отметим, что в Zemax® была добавлена модель стандартного металлоглазненного корпуса ТО-46, выполненная в системе автоматизированного проектирования по спецификации<sup>3</sup>. Часть корпуса, созданная

из кевлара, задана как полностью поглощающая, при этом входное окно — сапфир, показатель преломления которого равен 1,7462 [27]. На поверхности входного окна корпуса и микролинзы задан просветляющий слой MgF<sub>2</sub> толщиной 0,2 мкм.

### Результаты численного моделирования оптического согласования

Выполним расчет начального значения фокусного расстояния линзы по формуле для идеальной толстой линзы:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1)d}{nR_1R_2} \right], \quad (2)$$

где  $f$  — фокальное расстояние;  $n$  — показатель преломления линзы;  $R_1$  и  $R_2$  — радиусы кривизны поверхностей;  $d$  — толщина линзы.

Для рассматриваемой сферической микролинзы значение фокусного расстояния по формуле (2) равно 1,09 мм. Зададим данное значение между ОБ и активной областью фотодиода. Проведем оптимизацию фокусного расстояния между элементами системы для максимизации освещенности фотоприемной площадки. При этом в Редакторе функции качества (Merit Function Editor) использован единственный операнд NSDD и встроенный в программный комплекс Zemax® алгоритм оптимизации Левенберга–Марквардта [28].

На рис. 2 показаны оптическая система фотоприемного модуля после оптимизации и итоговая освещенность активной области фотодиода. Эффективность согласования в такой системе составила 93,1 %.

При помощи идеальной линзы возможно сфокусировать все приходящее излучение в точку, чего следует избегать при оптическом согласовании: так как может

term=4%2520PIN%2520TO46%2520package (дата обращения: 15.03.2022).

<sup>1</sup> NSM Archive — Physical properties of Gallium Indium Arsenide (GaInAs) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/GaInAs/> (дата обращения: 05.10.2021).

<sup>2</sup> Fused Silica: Fused Silica windows and lenses | Alkor Technologies [Электронный ресурс]. URL: [http://www.alkor.net/FusedSilica\\_windows\\_and\\_lenses.html](http://www.alkor.net/FusedSilica_windows_and_lenses.html) (дата обращения: 28.09.2021).

<sup>3</sup> TO-46 4 pin package || AMT8210 datasheet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=72536020a38b07c83a3f61673a84a3d0bb5b61&type=P&>



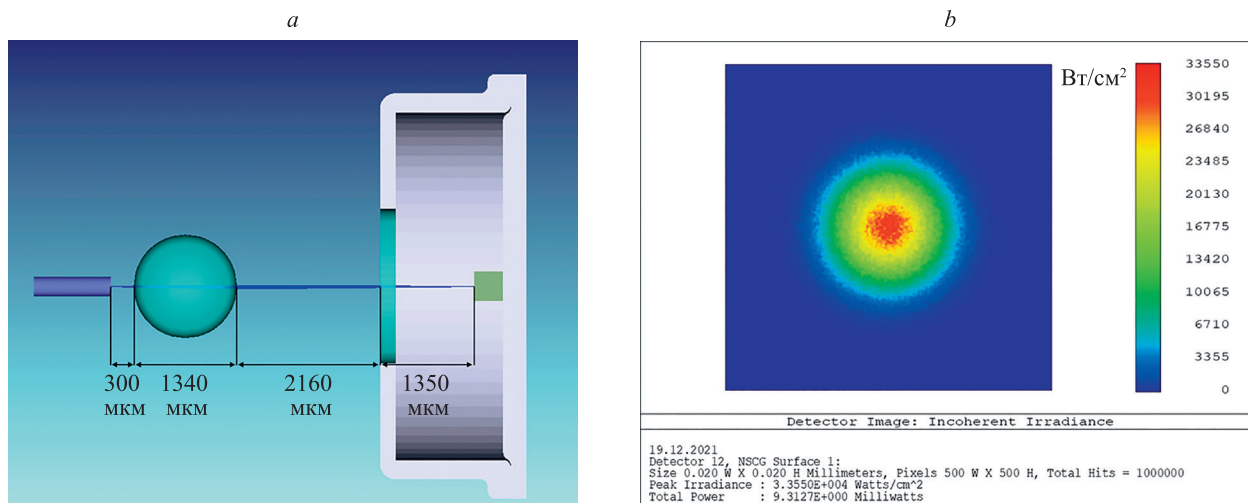


Рис. 2. Оптическая система фотоприемного модуля со сферической микролинзой (а); результирующее распределение освещенности фотодиода (b)

Fig. 2. Optical system of the photodetector module with a spherical microlens (a); resulting photodiode illumination distribution (b)

быть превышено критическое значение оптической прочности, что приведет к выходу *p-i-n* фотодиода из строя. Также при малом диаметре распределения оптического излучения освещенность активного слоя будет выше, и тогда возможна ситуация насыщения фототока [29], что в итоге означает уменьшение спектральной чувствительности фотоприемного модуля.

В предложенной конструкции фотоприемного модуля также возможно управлять диаметром освещенного участка, обеспечивая требуемый уровень оптического согласования. Отметим, что конфигурацию системы с одиночной сферической микролинзой возможно назвать универсальной для осуществления оптической стыковки ОВ и *p-i-n* фотодиода в фотоприемных модулях, которые реализованы в стандартных металлостеклянных ТО корпусах.

По выполненному расчету, который был аналогичен расчетам в работах [30, 31], монохроматическая фоточувствительность гетероструктуры (табл. 1) составила 1,126 А/Вт на длине волны 1550 нм. Тогда, учитывая рассчитанную эффективность оптического согласования, значение фоточувствительности для рассматриваемой конструкции фотоприемного модуля равна 1,047 А/Вт, что превосходит представленные на рынке аналоги.

#### Расчет влияния сдвигов оптического волокна на качество оптической стыковки

Проведем анализ влияния продольного и поперечного сдвигов ОВ на эффективность оптической стыковки в конфигурации фотоприемного модуля со сферической микролинзой. В разделе «Результаты численного моделирования оптического согласования» было описано, что при оптическом согласовании следует избегать фокусировки оптического излучения в точку (рис. 3). В связи с этим для осуществления качественной оптической стыковки ОВ с фотодиодом требуется расположить последний на таком расстоянии, где достигается наибольший размер модового пятна, но эффективность стыковки при этом отличается незначительно от максимальной.

На рис. 4 показаны результаты расчетов для продольных и поперечных сдвигов ОВ от исходного положения, полученного в ходе оптимизации оптической системы фотоприемного модуля.

Видно, что из-за наличия фокусирующего элемента оптическая система гораздо чувствительнее к децентрировке, чем к смещению в продольном направлении к оптической оси. Исходя из полученных данных возможно судить о требуемой точности микрометровых транс-

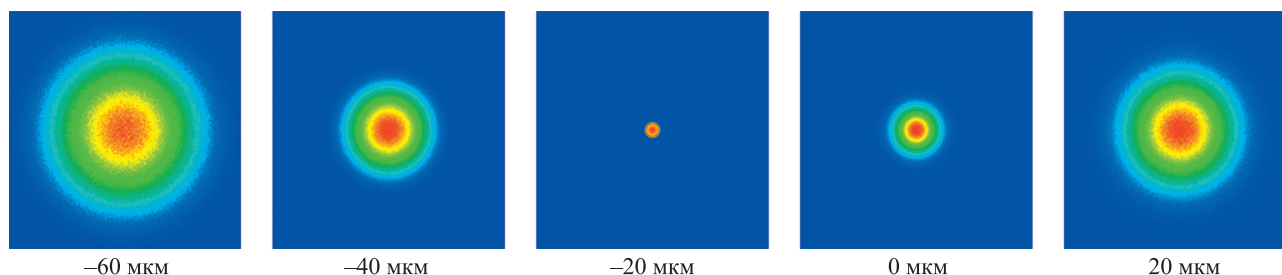


Рис. 3. Распределение освещенности фотоприемного окна *p-i-n* фотодиода при продольных сдвигах оптического волокна от положения, определенного в ходе оптимизации

Fig. 3. Illumination distribution on the crystal photoreceiving window at longitudinal shifts of the optical fiber decentering

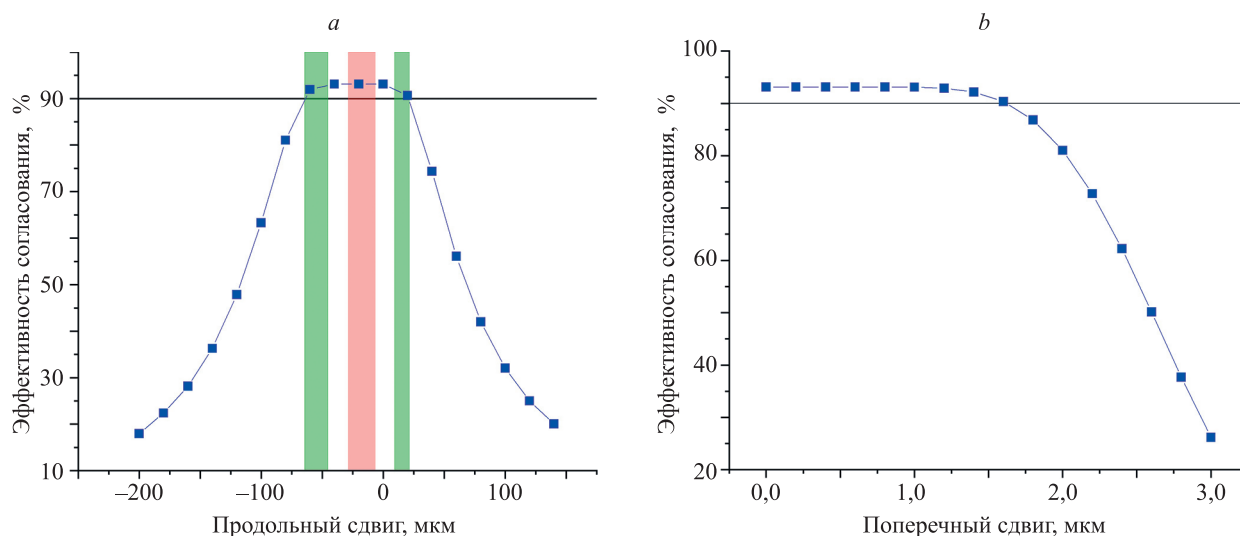


Рис. 4. Эффективность оптического согласования для продольных (а) и поперечных (б) смещений. Зеленая зона — участки, в которых диаметр модового пятна превышает 20 мкм; красная зона — участки, где превышен порог лучевой прочности; черная горизонтальная линия — эффективность согласования при децентрировке оптического волокна

Fig. 4. The efficiency of optical matching for longitudinal displacements where the green zone on the graph marks the areas in which the spot diameter exceeds 20 μm with the matching efficiency exceeding 90 %; and the red zone marks the area in which the radiation strength threshold was exceeded (a); efficiency of optical matching at optical fiber decentering (b)

ляторов для конечной юстировки оптической системы. Так, точности трансляторов равной 1 мкм оказалось достаточно, чтобы осуществить оптическую стыковку ОВ и фотодиода с диаметром апертуры 40 мкм.

### Заключение

В работе рассмотрена универсальная конструкция фотоприемного модуля, реализованная на основе стандартного металлостеклянного корпуса, которая позволяет осуществить оптическую стыковку оптического волокна с *p-i-n* фотодиодом в независимости от диаметра апертуры его активной области. Настоящая конструкция позволяет отказаться от использования кристаллодержателя и значительно снизить требования к точности посадки *p-i-n* фотодиода при его монтаже в стандартный металлостеклянный корпус.

### Литература

1. Tekin T. Review of packaging of optoelectronic, photonic, and MEMS components // *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 2011. V. 17. N 3. P. 704–719. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2011.2113171>
2. Zimmermann L., Preve G.B., Tekin T., Rosin T., Landles K. Packaging and assembly for integrated photonics — a review of the ePIXpack photonics packaging platform // *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. 2011. V. 17. N 3. P. 645–651. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2084992>
3. Fischer-Hirchert U.H.P. *Photonic Packaging Sourcebook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. 325 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25376-8>
4. Zaboub M., Guessouma A., Demaghab N.-E., Guermata A. Fabrication of polymer microlenses on single mode optical fibers for light coupling // *Optics Communications*. 2016. V. 366. P. 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.010>
5. Latry O., Ketata M., Ketata K., Debrie R. Optimization of the coupling between a tapered fibre and a p-i-n photodiode // *Journal of*

В ходе оптимизации оптической системы фотоприемного модуля достигнута эффективность согласования 93,1 % при гауссовом распределении освещенности по фоточувствительной площадке. Определено требуемое позиционирование оптического волокна в системе, при котором поддерживается высокая эффективность согласования и диаметр модового пятна более 20 мкм.

При помощи численного моделирования исследовано влияние продольных и поперечных сдвигов на эффективность согласования оптической схемы. Проведенные вычисления позволяют определить требуемую точность юстировки оптических элементов модуля и, следовательно, требования к микрометровым линейным трансляторам, которые используются во время сборки фотоприемного модуля: для *p-i-n* фотодиода с апертурой 40 мкм достаточным является разрешение транслятора 1 мкм.

### References

1. Tekin T. Review of packaging of optoelectronic, photonic, and MEMS component. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 704–719. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2011.2113171>
2. Zimmermann L., Preve G.B., Tekin T., Rosin T., Landles K. Packaging and assembly for integrated photonics — a review of the ePIXpack photonics packaging platform. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, vol. 17, no. 3, pp. 645–651. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2010.2084992>
3. Fischer-Hirchert U.H.P. *Photonic Packaging Sourcebook*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015, 325 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-25376-8>
4. Zaboub M., Guessouma A., Demaghab N.-E., Guermata A. Fabrication of polymer microlenses on single mode optical fibers for light coupling. *Optics Communications*, 2016, vol. 366, pp. 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.12.010>
5. Latry O., Ketata M., Ketata K., Debrie R. Optimization of the coupling between a tapered fibre and a p-i-n photodiode. *Journal of*

- Physics D: Applied Physics, 1995, V. 28, N 8, P. 1562–1572. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/28/8/004>
6. Sakai K., Kawano M., Aruga H., Takagi S.-I., Kaneko S.-I., Suzuki J., Negishi M., Kondoh Y., Fukuda K.-I. Photodiode packaging technique using ball lens and offset parabolic mirror // *Journal of Lightwave Technology*, 2009, V. 27, N 17, P. 3874–3879. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2020068>
  7. Mangal N., Missinne J., Van Campenhout J., Snyder B., Van Steenberge G. Ball lens embedded through-package via to enable backside coupling between silicon photonics interposer and board-level interconnects // *Journal of Lightwave Technology*, 2020, V. 38, N 8, P. 2360–2369. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2966446>
  8. Ori T., Masuko K. Bi-directional optical module. Patent US7917036B2, 2011, P. 20.
  9. Wang K.-W., Lin C.-C., Li C.-J., Chang C., Shih T.-T., Chuang Y.-C. Wavelength division multiplexing and demultiplexing transistor outline (TO)-can assemblies for use in optical communications, and methods. Patent US9784919B2, 2017, P. 15.
  10. Baek J.-M., Park J.-W. Bidirectional optical transceiver. Patent US7281865B2, 2007, P. 13.
  11. Ball lens unit for transmitter/receiver optical sub assembly of transceiver, and apparatus and method for manufacturing the same. Patent KR100746260B1, 2007, P. 12. (in Korean)
  12. Blasingame R.W., Chen B.S., Lee J.C., Orenstein J.D., Guenter J.K. Pluggable optical optic system having a lens fiber stop. Patent US7298942B2, 2007, P. 14.
  13. Optical sub-module structure for optical fibre transceiver. Patent CN2607584Y, 2003, P. 20. (in Chinese)
  14. Lu S., Zhang F., Xu C., Duan J. Coupling efficiency of a laser diode to a single-mode fiber via a microlens on the fiber tip // *Optical Fiber Technology*, 2022, V. 68, P. 102766. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102766>
  15. Junhong Y., Linhui G., Hualing W., Huicheneng M., Hao T., Songxin G., Deyong W. Analysis influence of fiber alignment error on laser–diode fiber coupling efficiency // *Optik*, 2016, V. 127, N 6, P. 3276–3280. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.219>
  16. Ramesh R., Tiwari N., Joshi P. Design of a coupling lens assembly and study on the impact of optical misalignments and variations of lens assembly on BER of a system // *Proc. of the 2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*, 2017, P. 10–13. <https://doi.org/10.1109/ICNETS2.2017.8067886>
  17. Yang C.-C., Huang Y.-H., Peng T.-C., Wu M.-C., Ho C.-L., Hong C.-C., Liu I.-M., Tsai Y.-T. Monte Carlo ray trace simulation for micro-ball-lens-integrated high-speed InGaAs p-i-n photodiodes // *Journal of Applied Physics*, 2007, V. 101, N 3, P. 033107. <https://doi.org/10.1063/1.2432484>
  18. Engelbrecht J.A.A. An assessment of some theoretical models used for the calculation of the refractive index of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As // *Physica B: Condensed Matter*, 2018, V. 535, P. 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.05.047>
  19. Dinges H.W., Burkhard H., Lösch R., Nickel H., Schlapp W. Refractive indices of InAlAs and InGaAs/InP from 250 to 1900 nm determined by spectroscopic ellipsometry // *Applied Surface Science*, 1992, V. 54, P. 477–481. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(92\)90090-K](https://doi.org/10.1016/0169-4332(92)90090-K)
  20. Dinges H.W., Burkhard H., Lösch R., Nickel H., Schlapp W. Determination of refractive indexes of In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As on InP in the wavelength range from 250 to 1900 nm by spectroscopic ellipsometry // *Materials Science and Engineering: B*, 1993, V. 20, N 1–2, P. 180–182. [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(93\)90423-K](https://doi.org/10.1016/0921-5107(93)90423-K)
  21. Pettit G.D., Turner W.J. Refractive index of InP // *Journal of Applied Physics*, 1965, V. 36, N 6, P. 2081. <https://doi.org/10.1063/1.1714410>
  22. Luke K., Okawachi Y., Lamont M.R.E., Gaeta A.L., Lipson M. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microresonator // *Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2015, P. 7184257. [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_SI.2015.STu4I.8](https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2015.STu4I.8)
  23. Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Gladyshev A.G., Rochas S.S., Sharipo K.D., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Study of antireflection coatings for high-speed 1.3–1.55 μm InGaAs/InP PIN photodetector // *Materials Physics and Mechanics*, 2017, V. 32, N 2, P. 194–197. <https://doi.org/10.18720/MPM.3222017-11>
  24. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. М.: МИСИС, 2000. 432 с.
  6. Sakai K., Kawano M., Aruga H., Takagi S.-I., Kaneko S.-I., Suzuki J., Negishi M., Kondoh Y., Fukuda K.-I. Photodiode packaging technique using ball lens and offset parabolic mirror. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, vol. 27, no. 17, pp. 3874–3879. <https://doi.org/10.1109/JLT.2009.2020068>
  7. Mangal N., Missinne J., Van Campenhout J., Snyder B., Van Steenberge G. Ball lens embedded through-package via to enable backside coupling between silicon photonics interposer and board-level interconnects. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, vol. 38, no. 8, pp. 2360–2369. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2966446>
  8. Ori T., Masuko K. Bi-directional optical module. Patent US7917036B2, 2011, P. 20.
  9. Wang K.-W., Lin C.-C., Li C.-J., Chang C., Shih T.-T., Chuang Y.-C. Wavelength division multiplexing and demultiplexing transistor outline (TO)-can assemblies for use in optical communications, and methods. Patent US9784919B2, 2017, pp. 15.
  10. Baek J.-M., Park J.-W. Bidirectional optical transceiver. Patent US7281865B2, 2007, pp. 13.
  11. Ball lens unit for transmitter/receiver optical sub assembly of transceiver, and apparatus and method for manufacturing the same. Patent KR100746260B1, 2007, pp. 12. (in Korean)
  12. Blasingame R.W., Chen B.S., Lee J.C., Orenstein J.D., Guenter J.K. Pluggable optical optic system having a lens fiber stop. Patent US7298942B2, 2007, pp. 14.
  13. Optical sub-module structure for optical fibre transceiver. Patent CN2607584Y, 2003, pp. 20. (in Chinese)
  14. Lu S., Zhang F., Xu C., Duan J. Coupling efficiency of a laser diode to a single-mode fiber via a microlens on the fiber tip. *Optical Fiber Technology*, 2022, vol. 68, pp. 102766. <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2021.102766>
  15. Junhong Y., Linhui G., Hualing W., Huicheneng M., Hao T., Songxin G., Deyong W. Analysis influence of fiber alignment error on laser–diode fiber coupling efficiency. *Optik*, 2016, vol. 127, no. 6, pp. 3276–3280. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.11.219>
  16. Ramesh R., Tiwari N., Joshi P. Design of a coupling lens assembly and study on the impact of optical misalignments and variations of lens assembly on BER of a system. *Proc. of the 2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2)*, 2017, pp. 10–13. <https://doi.org/10.1109/ICNETS2.2017.8067886>
  17. Yang C.-C., Huang Y.-H., Peng T.-C., Wu M.-C., Ho C.-L., Hong C.-C., Liu I.-M., Tsai Y.-T. Monte Carlo ray trace simulation for micro-ball-lens-integrated high-speed InGaAs p-i-n photodiodes. *Journal of Applied Physics*, 2007, vol. 101, no. 3, pp. 033107. <https://doi.org/10.1063/1.2432484>
  18. Engelbrecht J.A.A. An assessment of some theoretical models used for the calculation of the refractive index of In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. *Physica B: Condensed Matter*, 2018, vol. 535, pp. 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2017.05.047>
  19. Dinges H.W., Burkhard H., Lösch R., Nickel H., Schlapp W. Refractive indices of InAlAs and InGaAs/InP from 250 to 1900 nm determined by spectroscopic ellipsometry. *Applied Surface Science*, 1992, vol. 54, pp. 477–481. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(92\)90090-K](https://doi.org/10.1016/0169-4332(92)90090-K)
  20. Dinges H.W., Burkhard H., Lösch R., Nickel H., Schlapp W. Determination of refractive indexes of In<sub>0.52</sub>Al<sub>0.48</sub>As on InP in the wavelength range from 250 to 1900 nm by spectroscopic ellipsometry. *Materials Science and Engineering: B*, 1993, vol. 20, no. 1–2, pp. 180–182. [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(93\)90423-K](https://doi.org/10.1016/0921-5107(93)90423-K)
  21. Pettit G.D., Turner W.J. Refractive index of InP. *Journal of Applied Physics*, 1965, vol. 36, no. 6, pp. 2081. <https://doi.org/10.1063/1.1714410>
  22. Luke K., Okawachi Y., Lamont M.R.E., Gaeta A.L., Lipson M. Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> microresonator. *Proc. of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2015, pp. 7184257. [https://doi.org/10.1364/CLEO\\_SI.2015.STu4I.8](https://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2015.STu4I.8)
  23. Kolodeznyi E.S., Novikov I.I., Gladyshev A.G., Rochas S.S., Sharipo K.D., Karachinsky L.Ya., Egorov A.Yu., Bougrov V.E. Study of antireflection coatings for high-speed 1.3–1.55 μm InGaAs/InP PIN photodetector. *Materials Physics and Mechanics*, 2017, vol. 32, no. 2, pp. 194–197. <https://doi.org/10.18720/MPM.3222017-11>
  24. Блистанов А.А. Кристаллы квантовой и нелинейной оптики. Moscow, MISIS Publ., 2000, 432 p. (in Russian)

25. Korte S., Farrer I., Beere H.E., Clegg W.J. Discontinuous yield in InGaAs thin films // *Surface and Coatings Technology*. 2008. V. 203. N 5–7. P. 713–716. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.052>
26. Kelly R.L. Program of the 1972 Annual Meeting of the Optical Society of America // *Journal of the Optical Society of America*. 1972. V. 62. N 11. P. 1336. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.001336>
27. Курташ В.А., Егоренков А.А. Исследование оптических свойств структур фотокатода InP/InGaAs/InP // *Материалы XI Ежегодной научно-технической конференции молодых специалистов «Техника и технология современной фотоэлектроники» 14–15 апреля 2020 г. Базовый научный центр АО ЦНИИ «Электрон» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.niielectron.ru/issledovanie-opticheskikh-svoystv-struktur-fotokatoda-inp-ingaas-inp/>, свободный (дата обращения: 01.09.2022).*
28. *Zemax User's Manual*. 2014. 879 p.
29. Chen S., Chen J. Optimization of absorption layer in InGaAs/InP uni-traveling carrier photodiode // *Proceedings of SPIE*. 2021. V. 11781. P. 11781E. <https://doi.org/10.1117/12.2591305>
30. Wang X.D., Hu W.D., Chen X.S., Xu J.T., Li X.Y., Lu W. Photoresponse study of visible blind GaN/AlGaIn p-i-n ultraviolet photodetector // *Optical and Quantum Electronics*. 2011. V. 42. N 11. P. 755–764. <https://doi.org/10.1007/s11082-011-9473-8>
31. Rochas S.S., Kolodeznyi E.S., Kozyreva O.A., Voropaev K.O., Sudas D.P., Novikov I.I., Egorov A.Yu. A heterostructure for resonant-cavity GaAs p-i-n photodiode with 840–860 nm wavelength // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. V. 1236. N 1. P. 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1236/1/012071>
25. Korte S., Farrer I., Beere H.E., Clegg W.J. Discontinuous yield in InGaAs thin films. *Surface and Coatings Technology*, 2008, vol. 203, no. 5–7, pp. 713–716. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.08.052>
26. Kelly R.L. Program of the 1972 Annual Meeting of the Optical Society of America. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, vol. 62, no. 11, pp. 1336. <https://doi.org/10.1364/JOSA.62.001336>
27. Kurtash V.A., Egorenkov A.A. Investigation of the optical properties of the photocathode InP/InGaAs/InP structures. *Proc. of the XI Annual Scientific and Technical Conference of Young Professionals «Modern photoelectronics technique and technology»*. Available at: <http://www.niielectron.ru/issledovanie-opticheskikh-svoystv-struktur-fotokatoda-inp-ingaas-inp/> (accessed: 01.09.2022). (in Russian)
28. *Zemax User's Manual*. 2014, 879 p.
29. Chen S., Chen J. Optimization of absorption layer in InGaAs/InP uni-traveling carrier photodiode. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11781, pp. 11781E. <https://doi.org/10.1117/12.2591305>
30. Wang X.D., Hu W.D., Chen X.S., Xu J.T., Li X.Y., Lu W. Photoresponse study of visible blind GaN/AlGaIn p-i-n ultraviolet photodetector. *Optical and Quantum Electronics*, 2011, vol. 42, no. 11, pp. 755–764. <https://doi.org/10.1007/s11082-011-9473-8>
31. Rochas S.S., Kolodeznyi E.S., Kozyreva O.A., Voropaev K.O., Sudas D.P., Novikov I.I., Egorov A.Yu. A heterostructure for resonant-cavity GaAs p-i-n photodiode with 840–860 nm wavelength. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1236, no. 1, pp. 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1236/1/012071>

#### Авторы

**Ковач Яков Николаевич** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>, [j-n-kovach@itmo.ru](mailto:j-n-kovach@itmo.ru)

**Андрюшкин Владислав Васильевич** — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>, [vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru)

**Колодезный Евгений Сергеевич** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>, [evgenii\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgenii_kolodeznyi@itmo.ru)

**Новиков Иннокентий Игоревич** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>, [innokenty.novikov@itmo.ru](mailto:innokenty.novikov@itmo.ru)

**Петренко Артем Александрович** — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7862-971X>, [aapetrenko@itmo.ru](mailto:aapetrenko@itmo.ru)

**Камарчук Анна Владимировна** — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2953-0334>, [annakamarchuck@itmo.ru](mailto:annakamarchuck@itmo.ru)

**Рочас Станислав Станиславович** — младший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-6519-2897>, [stanislav\\_rochas@itmo.ru](mailto:stanislav_rochas@itmo.ru)

**Бауман Дмитрий Андреевич** — кандидат физико-математических наук, ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>, [dabauman@itmo.ru](mailto:dabauman@itmo.ru)

#### Authors

**Yakov N. Kovach** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4858-4968>, [j-n-kovach@itmo.ru](mailto:j-n-kovach@itmo.ru)

**Vladislav V. Andriushkin** — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7471-8627>, [vvandriushkin@itmo.ru](mailto:vvandriushkin@itmo.ru)

**Evgenii S. Kolodeznyi** — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3056-8663>, [evgenii\\_kolodeznyi@itmo.ru](mailto:evgenii_kolodeznyi@itmo.ru)

**Innokenty I. Novikov** — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-1983-0242>, [innokenty.novikov@itmo.ru](mailto:innokenty.novikov@itmo.ru)

**Artem A. Petrenko** — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7862-971X>, [aapetrenko@itmo.ru](mailto:aapetrenko@itmo.ru)

**Anna V. Kamarchuk** — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2953-0334>, [annakamarchuck@itmo.ru](mailto:annakamarchuck@itmo.ru)

**Stanislav S. Rochas** — Junior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-6519-2897>, [stanislav\\_rochas@itmo.ru](mailto:stanislav_rochas@itmo.ru)

**Dmitrii A. Bauman** — PhD (Physics & Mathematics), Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-5762-5920>, [dabauman@itmo.ru](mailto:dabauman@itmo.ru)

Статья поступила в редакцию 16.06.2022

Одобрена после рецензирования 21.07.2022

Принята к печати 21.09.2022

Received 16.06.2022

Approved after reviewing 21.07.2022

Accepted 21.09.2022



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»