

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

## BRIEF PAPERS

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-613-617

УДК 535.241.13

### Исследование модулятора двулучепреломления на основе ниобата лития

Ида Леонидовна Кубланова<sup>1</sup>✉, Владимир Андреевич Шулепов<sup>2</sup>,  
 Станислав Михайлович Аксарин<sup>3</sup>, Андрей Владимирович Куликов<sup>4</sup>,  
 Владимир Евгеньевич Стригалева<sup>5</sup>

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

<sup>1</sup> [cubeida@yandex.ru](mailto:cubeida@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>

<sup>2</sup> [shulepov\\_vladimir@mail.ru](mailto:shulepov_vladimir@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

<sup>3</sup> [staksar@gmail.com](mailto:staksar@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7482-3072>

<sup>4</sup> [a.kulikov86@gmail.com](mailto:a.kulikov86@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>

<sup>5</sup> [vstrglv@mail.ru](mailto:vstrglv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

#### Аннотация

Исследован модулятор двулучепреломления на *X*-срезе ниобата лития с канальным волноводом, выполненным по технологии диффузии титана. Волновое напряжение модулятора зависит от условий выращивания и обработки кристалла ниобата лития, от технологии формирования волновода. Допуск по определению длины электродов и зазора между ними составляет не менее 1 %. В связи с этим расчетные значения волнового напряжения могут значительно отличаться, а для практического применения требуется экспериментальное измерение волнового напряжения. Представлено экспериментальное уточнение значения волнового напряжения модулятора и выполнено сравнение значения с теоретическим. В эксперименте волновое напряжение определялось с использованием сканирующего интерферометра Майкельсона. Показано, что экспериментально измеренное значение волнового напряжения расходится с расчетным более чем на 26 %. Данная разница связана с допущением, что вектор электрического поля внутри кристалла направлен перпендикулярно к оси распространения оптического излучения, а величина напряженности электрического поля не изменяется по глубине кристалла. При этом интегралы перекрытия обыкновенной и необыкновенной волн равны. В реальных модуляторах с канальным волноводом, сформированным по технологии диффузии титана, эти допущения не выполняются. Показатель преломления ниобата лития и электрооптический коэффициент могут отличаться у разных образцов кристаллов в зависимости от условий их выращивания, обработки и технологии формирования волновода. Результаты работы могут найти применение в сфере интерферометрических измерительных устройств, в которых используется модулятор двулучепреломления, так как значение волнового напряжения необходимо для проектирования управляющей электроники.

#### Ключевые слова

модулятор двулучепреломления, ниобат лития, диффузия титана, волновое напряжение, сканирующий интерферометр Майкельсона

**Ссылка для цитирования:** Кубланова И.Л., Шулепов В.А., Аксарин С.М., Куликов А.В., Стригалева В.Е. Исследование модулятора двулучепреломления на основе ниобата лития // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 4. С. 613–617. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-613-617

### The study of the birefringence modulator based on lithium niobate

Ida L. Kublanova<sup>1</sup>✉, Vladimir A. Shulepov<sup>2</sup>, Stanislav M. Aksarin<sup>3</sup>,  
 Andrey V. Kulikov<sup>4</sup>, Vladimir E. Strigaleva<sup>5</sup>

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

<sup>1</sup> [cubeida@yandex.ru](mailto:cubeida@yandex.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>

<sup>2</sup> [shulepov\\_vladimir@mail.ru](mailto:shulepov_vladimir@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>

<sup>3</sup> [staksar@gmail.com](mailto:staksar@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7482-3072>

<sup>4</sup> [a.kulikov86@gmail.com](mailto:a.kulikov86@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>

<sup>5</sup> [vstrglv@mail.ru](mailto:vstrglv@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>

© Кубланова И.Л., Шулепов В.А., Аксарин С.М., Куликов А.В., Стригалева В.Е., 2021

**Abstract**

This work investigates a lithium niobate  $X$ -cut birefringence modulator with a titanium diffusion channel waveguide. The wave voltage of the modulator depends on the growth and processing conditions of the lithium niobate crystal and on the technology of waveguide formation. The tolerance for determining the length of the electrodes and the gap between them exceeds 1 %. In this regard, the calculated values of the wave voltage can differ significantly, and an experimental measurement of the wave voltage is required for practical use. The authors present an experimental refinement for the value of the wave voltage of the modulator and perform a comparison of the value with the theoretical one. In the experiment, the wave voltage was determined using a scanning Michelson interferometer. It is shown that the experimentally measured value of the wave voltage diverges from the calculated one by more than 26 %. This difference is based on the assumption that the vector of the electric field inside the crystal is directed perpendicular to the axis of propagation of optical radiation, and the magnitude of the electric field does not change over the depth of the crystal. In this case, the overlap integrals of the ordinary and extraordinary waves are equal. In real modulators with a channel waveguide formed by titanium diffusion technology, these assumptions are not fulfilled. The refractive index of lithium niobate and the electro-optical coefficient may vary for different crystal samples, depending on the conditions of their growth, processing and waveguide formation technology. The results of the work can find application in the field of interferometric measuring devices, in which a birefringence modulator is used, since the value of the wave voltage is necessary for the design of control electronics.

**Keywords**

birefringence modulator, lithium niobate, titanium diffusion, wave voltage, scanning Michelson interferometer

**For citation:** Kublanova I.L., Shulepov V.A., Aksarin S.M., Kulikov A.V., Strigalev V.E. The study of the birefringence modulator based on lithium niobate. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 4, pp. 613–617 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-4-613-617

В современных высокоточных измерительных системах, таких как оптический лидар, оптические датчики тока и напряжения и др., применяется метод оптической интерференции [1, 2]. Для повышения точности определения значения измеряемого параметра и расширения динамического диапазона в подобных датчиках используется дополнительная фазовая модуляция между интерферирующими оптическими лучами. Важной научной задачей является создание фазомодулированной оптической несущей при минимизации привносимых фазовым модулятором шумов в информационный сигнал. Одним из вариантов решения данной задачи — замена фазового модулятора, обеспечивающего модуляцию только одного оптического луча, на модулятор двулучепреломления, обеспечивающий модуляцию набега фаз между двумя оптическими лучами, распространяющимися по одному волноводу, но в ортогональных осях анизотропии волновода [3, 4].

В настоящей работе исследован модулятор двулучепреломления, реализованный на кристалле ниобата лития, в котором методом диффузии титана [5–8] сформирован волновод. Electroды расположены по обеим сторонам от волновода на  $X$ -срезе кристалла. Основной техникий параметр модулятора двулучепреломления — волновое напряжение ( $U_{2\pi}$ ). При подаче такого электрического напряжения набег фаз между ортогональными поляризациями, распространяющимися по одному каналному волноводу, составляет  $2\pi$ . Волновое напряжение [9] представлено в виде:

$$U_{2\pi} = \frac{2\lambda d}{(n_o^2 r_{33} - n_e^2 r_{13})L}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  — центральная длина волны излучения;  $d$  — расстояние между электродами;  $n_o$  и  $n_e$  — обыкновенный и необыкновенный показатели преломления кристалла ниобата лития соответственно;  $r_{13}$  и  $r_{33}$  — электрооптические коэффициенты в ниобате лития для осей  $x$  и  $z$  при напряжении, приложенном вдоль оси  $z$ ;  $L$  — длина электродов.

Формула (1) не учитывает форму наводимого электрического поля, зависящую от расположения электродов, включает такие величины как обыкновенный и необыкновенный показатели преломления и электрооптические коэффициенты в ниобате лития, которые зависят от факторов выращивания и обработки кристалла, изготовления волновода, промежуточных слоев между кристаллом и электродами и т. д. По этой причине справочные (табличные) значения могут не вполне соответствовать показателям конкретного кристалла. Для уточнения волнового напряжения необходимо выполнить дополнительные экспериментальные исследования.

При  $\lambda = 1555$  нм, согласно [10],  $n_o = 2,214$ ,  $n_e = 2,238$ ,  $r_{13} = 9,6 \cdot 10^{-12}$  м/В и  $r_{33} = 30,8 \cdot 10^{-12}$  м/В, а обеспеченные изготовителем модулятора значения  $d = 20$  мкм и  $L = 40$  мм. Тогда расчетное значение волнового напряжения оказывается равным 7,84 В. Таким образом, собственное двулучепреломление, существующее и без приложенного электрического поля, составляет  $\Delta n = 0,076$ , а в присутствии внешнего электрического поля оно изменяется.

Расчет волнового напряжения выполнен для конфигурации объемного модулятора, в котором поле прикладывается строго перпендикулярно к оси распространения оптического излучения. Тогда величина напряженности электрического поля одинакова по всей глубине модулятора. В настоящей работе использован модулятор с каналным волноводом, выполненным по технологии диффузии титана, и с поверхностным расположением электродов, закрепленных на  $X$ -срезе кристалла ниобата лития. В таком модуляторе вектор электрического поля направлен по дуге, а величина напряженности электрического поля изменяется с учетом глубины кристалла и несимметричного расположения поляризационных мод относительно центра каналного волновода. Коэффициент  $U_{2\pi}$  дополнительно зависит от интеграла перекрытий каждой из поляризационных мод с электрическим полем и соотношения векторов

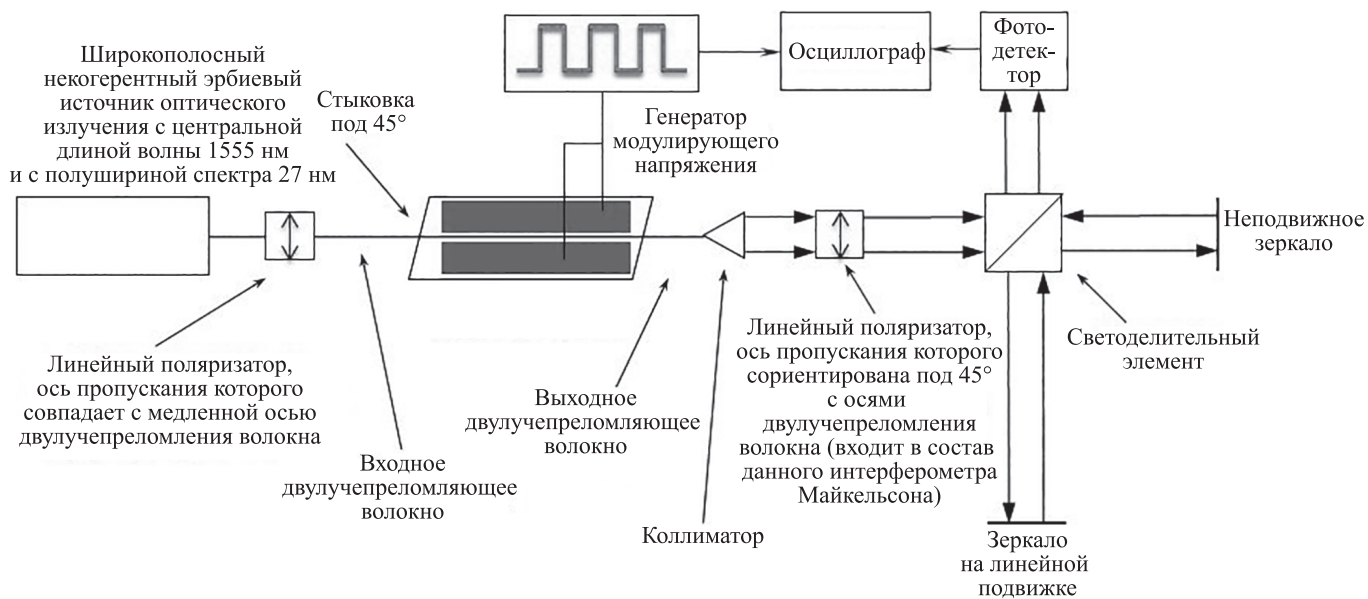


Рис. 1. Схема проведения эксперимента  
 Fig. 1. Experiment setup

электрического поля по осям кристалла в месте расположения волновода. В результате расчетное значение  $U_{2\pi}$  может отличаться от действительного, поэтому для его уточнения дополнительно выполнено экспериментальное исследование.

Установка для проведения экспериментального исследования представлена на рис. 1.

За основу экспериментальной установки был взят сканирующий интерферометр Майкельсона.

Если величина модулирующего электрического сигнала 1 (рис. 2) отличается от значения  $U_{2\pi}$  для исследуемого модулятора, то оптический сигнал 2 (рис. 2, а) обладает переменной составляющей на частоте модулирующего сигнала. При достижении размаха электрического сигнала значения 10,6 В переменная состав-

ляющая в сигнале с фотодетектора исчезает, так как разница фаз между интерферирующими поляризационными модами от периода к периоду модулирующего сигнала составляет  $2\pi$  (рис. 2, б).

Исследование величины волнового напряжения модулятора двулучепреломления с каналным волноводом, выполненным по технологии диффузии титана, и с поверхностным расположением электродов показало, что в настоящем образце волновое напряжение составляет 10,6 В. Можно заметить, что экспериментально измеренное значение напряжения  $U_{2\pi}$  расходится с ранее рассчитанным более чем на 26 %. Это связано с тем, что в расчете используется допущение, что вектор электрического поля внутри кристалла направлен перпендикулярно к оси распространения оптического

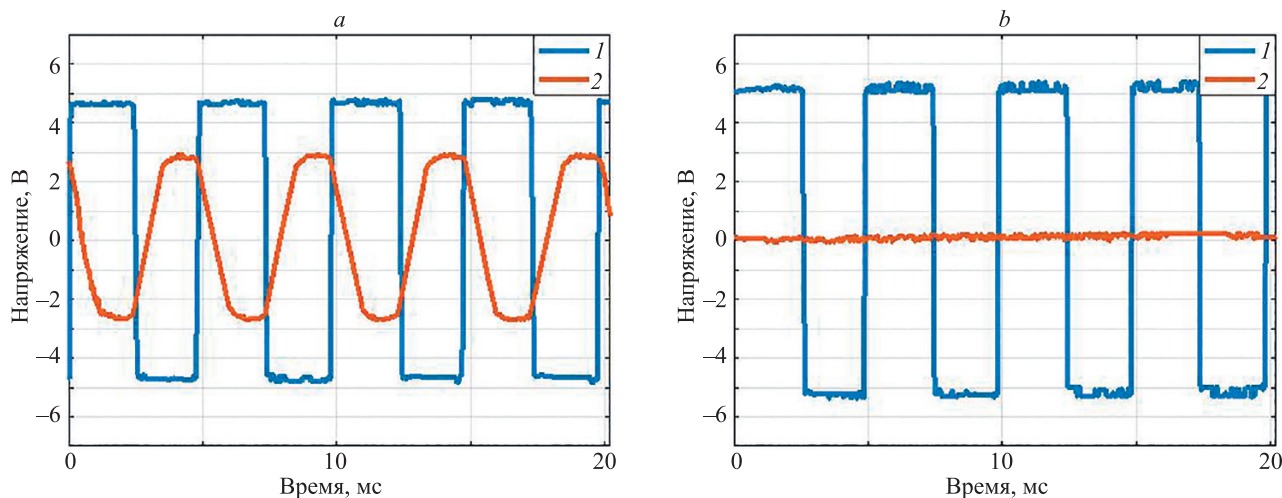


Рис. 2. Картина модуляции оптического сигнала (2) с размахом напряжения модулирующего электрического сигнала (1) меньшим  $U_{2\pi}$  (а) и равным  $U_{2\pi}$  (б)

Fig. 2. Picture of modulation of an optical signal (2) with a voltage swing of the modulating electrical signal (1) less than  $U_{2\pi}$  (а) and equal to  $U_{2\pi}$  (б)

излучения по волноводу, а величина напряженности электрического поля не изменяется по глубине кристалла, при этом интегралы перекрытия обыкновенной и необыкновенной волны равны. При использовании в качестве модулятора двулучепреломления электрооптического кристалла с канальным волноводом, сформированным по технологии диффузии титана, и электродами на поверхности, оба этих допущения, применявшихся в

расчете, не выполняются. Кроме того, показатель преломления ниобата лития и электрооптический коэффициент могут отличаться у разных образцов кристаллов в зависимости от условий их выращивания, обработки и технологии формирования волновода, а допуск по определению длины электродов и зазора между ними составляет не менее 1 %.

### Литература

1. Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists / ed. by E. Udd, W.B. Spillman, Jr. John Wiley & Sons, 2011. 512 p.
2. Мешковский И.К., Стригалев В.Е., Тараканов С.А. Закрытая схема обработки сигнала в волоконно-оптическом датчике тока // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2010. № 1(65). С. 10–15.
3. Noguchi K. Lithium niobate modulators // *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*. 2012. P. 151–172.
4. Fang X., Demarest K., Allen C., Pelz L. A subnanosecond polarization-independent tunable filter/wavelength router using a Sagnac interferometer // *IEEE Photonics Technology Letters*. 1997. V. 9. N 11. P. 1490–1492. <https://doi.org/10.1109/68.634718>
5. Karavaev P.M., Il'ichev I.V., Agruzov P.M., Tronev A.V., Shamray A.V. Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates // *Technical Physics Letters*. 2016. V. 42. N 5. P. 513–516. <https://doi.org/10.1134/S1063785016050266>
6. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications // *Applied Physics B: Lasers & Optics*. 1998. V. 67. N 2. P. 131–150. <https://doi.org/10.1007/s003400050485>
7. Schmidt R.V., Kaminow I.P. Metal-diffused optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub> // *Applied Physics Letters*. 1974. V. 25. N 8. P. 458–460. <https://doi.org/10.1063/1.1655547>
8. Alferness R., Ramaswamy V., Korotky S., Divino M., Buhl L. Efficient single-mode fiber to titanium diffused lithium niobate waveguide coupling for  $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$  // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1982. V. 18. N 10. P. 1807–1813. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071390>
9. Пономарев Р.С. Структурная модель дрейфовых явлений в интегрально-оптических схемах на основе H<sub>x</sub>Li<sub>1-x</sub>NbO<sub>3</sub> канальных волноводов: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Пермский государственный университет. Пермь, 2014. 148 p.
10. Mercante A. Design and Fabrication of Broadband Thin-Film Lithium Niobate Phase Modulators: dissertation / University of Delaware, Department of Electrical and Computer Engineering. 2018. 120 p.

### Авторы

**Кубланова Ида Леонидовна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57205020683](https://orcid.org/0000-0002-6721-5124), <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>, [cubeida@yandex.ru](mailto:cubeida@yandex.ru)

**Шулепов Владимир Андреевич** — инженер-исследователь, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191411190](https://orcid.org/0000-0003-2168-8046), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, [shulepov\\_vladimir@mail.ru](mailto:shulepov_vladimir@mail.ru)

**Аксарин Станислав Михайлович** — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57191417852](https://orcid.org/0000-0002-7482-3072), <https://orcid.org/0000-0002-7482-3072>, [staksar@gmail.com](mailto:staksar@gmail.com)

**Куликов Андрей Владимирович** — кандидат технических наук, доцент, директор института «Высшая инженерная школа», доцент, заведующий лабораторией, заместитель директора научно-исследовательского центра, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7103154362](https://orcid.org/0000-0001-8882-7253), <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>, [a.kulikov86@gmail.com](mailto:a.kulikov86@gmail.com)

### References

1. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*. Ed. by E. Udd, W.B. Spillman, Jr. John Wiley & Sons, 2011, 512 p.
2. Meshkovskiy I., Strigalev V., Tarakanov S. The closed signal processing scheme in the fiber-optic current sensor. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2010, no. 1(65), pp. 10–15. (in Russian)
3. Noguchi K. Lithium niobate modulators. *Broadband Optical Modulators: Science, Technology, and Applications*, 2012, pp. 151–172.
4. Fang X., Demarest K., Allen C., Pelz L. A subnanosecond polarization-independent tunable filter/wavelength router using a Sagnac interferometer. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, vol. 9, no. 11, pp. 1490–1492. <https://doi.org/10.1109/68.634718>
5. Karavaev P.M., Il'ichev I.V., Agruzov P.M., Tronev A.V., Shamray A.V. Polarization separation in titanium-diffused waveguides on lithium niobate substrates. *Technical Physics Letters*, 2016, vol. 42, no. 5, pp. 513–516. <https://doi.org/10.1134/S1063785016050266>
6. Kip D. Photorefractive waveguides in oxide crystals: fabrication, properties, and applications. *Applied Physics B: Lasers & Optics*, 1998, vol. 67, no. 2, pp. 131–150. <https://doi.org/10.1007/s003400050485>
7. Schmidt R.V., Kaminow I.P. Metal-diffused optical waveguides in LiNbO<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 1974, vol. 25, no. 8, pp. 458–460. <https://doi.org/10.1063/1.1655547>
8. Alferness R., Ramaswamy V., Korotky S., Divino M., Buhl L. Efficient single-mode fiber to titanium diffused lithium niobate waveguide coupling for  $\lambda = 1.32 \mu\text{m}$ . *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1982, vol. 18, no. 10, pp. 1807–1813. <https://doi.org/10.1109/JQE.1982.1071390>
9. Ponomarev R.S. *Structural model of drift phenomena in optical microcircuit on the base of H<sub>x</sub>Li<sub>1-x</sub>NbO<sub>3</sub> channel waveguides*. Dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Perm, Perm State University, 2014, 148 p. (in Russian)
10. Mercante A. *Design and Fabrication of Broadband Thin-Film Lithium Niobate Phase Modulators*. Dissertation. University of Delaware, Department of Electrical and Computer Engineering, 2018, 120 p.

### Authors

**Ida L. Kublanova** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57205020683](https://orcid.org/0000-0002-6721-5124), <https://orcid.org/0000-0002-6721-5124>, [cubeida@yandex.ru](mailto:cubeida@yandex.ru)

**Vladimir A. Shulepov** — Research Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191411190](https://orcid.org/0000-0003-2168-8046), <https://orcid.org/0000-0003-2168-8046>, [shulepov\\_vladimir@mail.ru](mailto:shulepov_vladimir@mail.ru)

**Stanislav M. Aksarin** — PhD, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57191417852](https://orcid.org/0000-0002-7482-3072), <https://orcid.org/0000-0002-7482-3072>, [staksar@gmail.com](mailto:staksar@gmail.com)

**Andrey V. Kulikov** — PhD, Associate Professor, Director of the Institute “Higher School of Engineering”, Head of Laboratory, Deputy Director of the Research Center, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7103154362](https://orcid.org/0000-0001-8882-7253), <https://orcid.org/0000-0001-8882-7253>, [a.kulikov86@gmail.com](mailto:a.kulikov86@gmail.com)

**Стригалеv Владимир Евгеньевич** — кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235) 6603225596, <https://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, [vstrglv@mail.ru](mailto:vstrglv@mail.ru)

**Vladimir E. Strigalev** — PhD, Associate Professor, Professor, Senior Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0002-7151-9235) 6603225596, <http://orcid.org/0000-0002-7151-9235>, [vestrigalev@itmo.ru](mailto:vestrigalev@itmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 04.06.2021*  
*Одобрена после рецензирования 23.06.2021*  
*Принята к печати 23.07.2021*

*Received 04.06.2021*  
*Approved after reviewing 23.06.2021*  
*Accepted 23.07.2021*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»