



УДК 535.211:66.088

## ЛОКАЛЬНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ИСПАРЕНИЕ ПЛЕНОК СЛОЖНЫХ ТОПОЛОГИЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОГИРОСКОПА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Д.В. Сафронов<sup>а</sup>, П.Д. Попов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

Адрес для переписки: daniilsafronov@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 12.01.18, принята к печати 10.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-191-196

Язык статьи – русский

**Ссылка для цитирования:** Сафронов Д.В., Попов П.Д. Локальное лазерное испарение пленок сложных топологий чувствительного элемента микрогирокопа на поверхностных акустических волнах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 191–196. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-191-196

### Аннотация

Разработан метод локального лазерного испарения пленки чувствительного элемента твердотельного микрогирокопа на поверхностных акустических волнах. Осуществлен выбор конструкции чувствительного элемента микрогирокопа с использованием схемы с двойным преобразованием. Показано, что при лазерном испарении исключаются минимум три технологические операции по сравнению с методом фотолитографии. Представлены результаты исследований формирования топологий с использованием лазерной обработки. Определены параметры процесса лазерной обработки для конфигурирования топологии чувствительного элемента путем испарения тонкопленочного покрытия толщиной 400 нм, который включает в себя 350 нм алюминия и 50 нм адгезионного слоя ванадия, которые нанесены на подложку из пьезокварца. Получена амплитудно-частотная характеристика изготовленного образца. Выявлено, что экспериментальный образец обладает высокой величиной потерь, обусловленных погрешностями технологии его изготовления. Выработаны рекомендации по минимизации источников погрешностей технологии изготовления чувствительного элемента микрогирокопа на поверхностных акустических волнах при использовании метода лазерного конфигурирования.

### Ключевые слова

твердотельный микрогирокоп, поверхностная акустическая волна, лазер, топология, линия задержки

## LOCALIZED LASER VAPORIZATION OF FILMS WITH COMPLEX TOPOLOGIES FOR SURFACE ACOUSTIC WAVE MICROGYROSCOPE SENSOR

D.V. Safronov<sup>а</sup>, P.D. Popov<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

Corresponding author: daniilsafronov@gmail.com

### Article info

Received 12.01.18, accepted 10.02.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-191-196

Article in Russian

**For citation:** Safronov D.V., Popov P.D. Localized laser vaporization of films with complex topologies for surface acoustic wave microgyroscope sensor. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 2, pp. 191–196 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-191-196

### Abstract

We have developed a method for localized laser vaporization of a sensitive element film for a solid microgyroscope based on surface acoustic waves. A double-conversion scheme was chosen as a microgyroscope sensitive element configuration. It was shown that at least three technological operations are excluded at laser vaporization as compared with photolithography method. Research results on the formation of topologies with the usage of laser processing are presented. We have determined the parameters of laser processing for sensor topology configuring by means of thin-film coating evaporation with a thickness of 400 nm, which comprises 350 nm of aluminum and 50 nm of vanadium adhesive coating applied on a substrate made of quartz. The amplitude-frequency characteristic of the manufactured sample is obtained. It is revealed that the experimental sample has a high loss value caused by inaccuracies in its manufacturing technology. Recommendations were worked out for minimization of error sources in the manufacturing technology of microgyroscope sensitive element on surface acoustic waves with the use of the laser configuration method.

### Keywords

solid-state microgyroscope, surface acoustic wave, laser, topology, delay line

## Введение

Ежегодно области применения микроэлектромеханических сенсоров (МЭМС) становятся шире. Эти датчики повсеместно используются в бытовой электронике – смартфонах, ноутбуках, различных портативных устройствах. Вместе с тем можно выделить такие сферы применения (медицина, роботостроение и оборонная промышленность), где к указанным сенсорам предъявляются более жесткие требования по виброустойчивости и ударопрочности [1].

Большинство концепций построения МЭМС предполагают наличие чувствительного элемента (ЧЭ) в виде инерционных масс, закрепленных на упругих подвесах (торсионах) [2], что является ограничивающим фактором применения указанных устройств на высокодинамичных объектах. Перспективным направлением является использование микрогироскопов (МГ) на поверхностных акустических волнах (ПАВ), в основе которых лежит молекулярная кинетика твердого тела [3–13]. На сегодняшний день такие датчики активно разрабатываются как в России, так и за рубежом. При этом технология изготовления чувствительного гироскопа на ПАВ имеет свою специфику, обусловленную необходимостью изготовления сложной топологии. Традиционные методы формирования сложной топологии основаны на применении фотолитографии. Этот метод создания топологий достаточно трудоемок и не обладает универсальностью, так как предполагает большое количество операций и требует изготовления специальных фотошаблонов под каждый конкретный рисунок. В качестве альтернативного метода создания топологии в настоящей работе предлагается исследовать метод локального лазерного испарения. Его суть заключается в том, что при помощи лазерного излучения, которое позиционируется на плоскости, можно создавать рисунки любой сложности на заранее металлизированных пластинах из пьезоматериала. Такой подход обладает универсальностью и не требует проектирования и изготовления фотошаблонов при изменении геометрии топологии.

Целью настоящей работы является исследование и разработка технологии изготовления чувствительного элемента МГ на ПАВ методом локального лазерного испарения. Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие описываемые далее задачи:

- выбрать схему ЧЭ МГ на ПАВ;
- разработать метод лазерного конфигурирования топологий ЧЭ МГ.

### Выбор схемы построения МГ на ПАВ

Рассмотрим пример конструкции ЧЭ МГ на ПАВ. На рис. 1 показана схема ЧЭ МГ с двойным преобразованием [14].

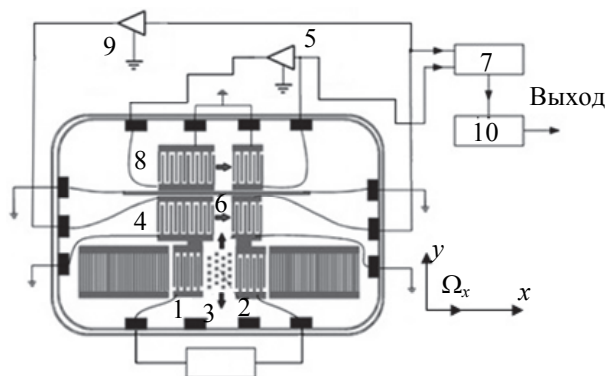


Рис. 1. Схема чувствительного элемента микрогироскопа на поверхностных акустических волнах с двойным преобразованием

Согласно рис. 1, в резонаторе 1 при помощи генератора, управляемого напряжением 11, возбуждается стоячая волна, на пути которой размещается матрица навесных элементов 2. При наличии вращения возбуждается вторичная волна 3, амплитуда которой пропорциональна значению угловой скорости  $\Omega_x$ . Осуществляется первичное преобразование измеряемой угловой скорости в информативный параметр – амплитуду вторичной ПАВ. Далее вторичная волна проходит через преобразующую линию задержки 4, которая вместе с усилителем 5 формирует автогенератор на частоте, близкой к частоте резонатора 1. В области пересечения вторичной волны 3 с волной 6, бегущей в линии задержки 4, происходит их интерференция, что инициирует изменение фазовой скорости бегущей волны 6 и, как следствие, вызывает сдвиг частоты соответствующего автогенератора. Следовательно, вторичным преобразованием является трансформация амплитуды индуцированной волны 3 в вариации частоты автономного осциллятора. Сигнал с его выхода поступает на смеситель 7, где перемножается с выходным сигналом автогенератора, образованного реперной линией задержки (ЛЗ) 8 и усилителем 9. Таким образом, на выходе 10 фиксируется разность частот двух автогенераторов  $\Delta f$ , которая пропорциональна действующей угловой скорости  $\Omega_x$ .

Практическая реализация описанной схемы методом фотолитографии оказалась экономически нецелесообразной, так как изготовление специальных фотошаблонов для одного опытного образца по расчетным данным составила около полугода. Изменение геометрии рисунка на поверхности образца потребовала бы повторной процедуры изготовления специальных масок.

Перспективным направлением при изготовлении ЧЭ МГ на ПАВ является использование современных гибких технологических процессов, которые позволят вносить изменения в текущий процесс производства без существенных временных и финансовых затрат. Этими достоинствами обладает метод лазерного нанесения топологии [15]. Рассмотрим подробнее принцип лазерного конфигурирования топологии.

### Исследование и разработка метода лазерного конфигурирования топологии ЧЭ МГ

Для проведения экспериментальных исследований по созданию сложных топологий на поверхности ЧЭ МГ на ПАВ использовались пластинки из пьезокварца ST-среза с габаритными размерами  $55 \times 19 \times 1$  мм с нанесенным тонкопленочным покрытием алюминия толщиной 350 нм и подслоем ванадия толщиной 50 нм для улучшения адгезии металлизированного слоя к подложке.

Создание поверхностной топологии осуществлялось путем локального лазерного испарения с использованием в качестве оборудования системы прецизионной лазерной маркировки (СПЛМ) «Мини-Маркер 2», основные характеристики которой представлены в таблице [14].

Средняя выходная мощность лазера	20 Вт
Длина волны лазерного излучения	1064 мкм
Частота работы лазера	20 кГц (20000 имп./с )
Минимальная толщина линии	20 мкм
Скорость перемещения луча	Регулируемая
Программно-аппаратное разрешение	2,5 мкм (в зависимости от объектива)

Таблица. Характеристики СПЛМ «МиниМаркер 2»

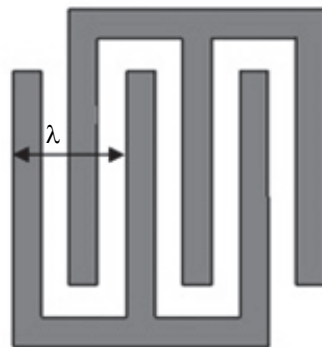


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь

На рис. 2 представлена топология встречно-штыревого преобразователя (ВШП) – основного фрагмента топологии ЧЭ МГ на ПАВ. Согласно рис. 2, длина акустической волны  $\lambda$ , равная межцентровому расстоянию двух ближайших синфазных штырей ВШП, при проведении экспериментов составила 200 мкм, при этом ее частота была определена по формуле

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{3158}{200 \cdot 10^{-6}} = 15,79 \text{ МГц},$$

где  $f$ ,  $v$ ,  $\lambda$  – частота, скорость распространения и длина ПАВ соответственно.

В конфигурации использовалось 18 пар электродов, поэтому полоса пропускания  $\Delta f$  составила

$$\Delta f = \frac{f}{N} = \frac{15,79}{18} = 0,88 \text{ МГц},$$

где  $N$  – количество пар электродов.

Следующий этап исследований был связан с расчетом режимов лазерной обработки для создания наиболее качественной топологии рисунка. Для этого необходимо было рассчитать режимы лазерного излучения, позволяющие полностью испарить слой металла, не повредив кварцевую подложку. Как показано в работе [4], количество отводимого тепла тем меньше, чем меньше длительность импульса лазерного излучения. Максимально возможная длительность импульса, обеспечивающая минимальный теплоотвод, определяется следующим соотношением [16]:

$$\tau \leq \frac{\pi}{4} \left( \frac{\rho_1 C_1}{\rho_2 C_2} \right)^2 \frac{h^2}{a^2}, \quad (1)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности;  $C$  – теплоемкость;  $\rho$  – плотность;  $h$  – толщина слоя; индексы «1» относится к пленке, «2» – к подложке.

Согласно формуле (1), для напыленного слоя алюминия суммарной толщиной 400 нм, нанесенного на подложку из кварца, величина  $\tau$  составит 20 нс. Зная длительность импульса, можно найти плотность мощности лазерного излучения, необходимую для достижения металлической пленкой температуры испарения [4]:

$$T = \frac{q_0 A_1 t}{\rho_1 C_1 h}, \quad (2)$$

где  $A_1$  – поглощательная способность пленки;  $t$  – время;  $q_0$  – плотность мощности падающего излучения, значение которого составило 0,022 Вт/мкм<sup>2</sup>. Отсюда мощность лазерного излучения составит

$$P_0 = q \pi d_0^2 / 4, \quad (3)$$

где  $d_0$  – диаметр пятна в фокусе. Исходя из формульных зависимостей (2) и (3), мощность, используемая в эксперименте, составила 7 Вт.

Для создания топологии ЧЭ МГ на ПАВ использовались полученные расчетные режимы. В результате лазерного конфигурирования была получена топология, представленная на рис. 3.

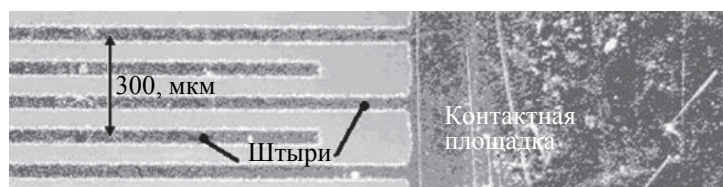


Рис. 3. Элементы встречно-штыревого преобразователя экспериментальной топологии

На рис. 3 светлая область – кварцевая подложка после испарения покрытия, более темная – напыленный слой алюминия. Из рис. 3 видно, что металлизация удалена лазером полностью. Также видно, что кромка электродов получена без дефектов. Тем не менее, визуально заметно, что расстояние между штырями больше, чем ширина штырей. Это может оказать существенное влияние на величину резонансной частоты. Для оценки вида амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) к контактным площадкам токопроводящим клеем были присоединены электроды, которые выводились на частотные разъемы. Далее схема подключалась к анализатору цепей, который в широком диапазоне позволяет проводить оценку АЧХ. Результат его работы представлен на рис. 4.

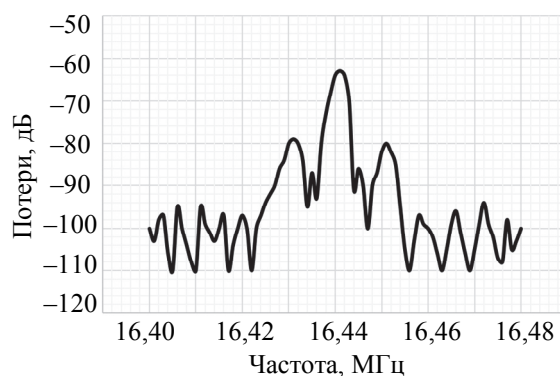


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика тестового образца

Полученная характеристика позволяет получить ряд важных выводов.

Во-первых, на АЧХ присутствуют «боковые лепестки», наличие которых, вероятнее всего, обусловлено эффектом переотражения от кромки пьезокварца. Нивелировать этот негативный эффект можно при помощи нанесения звукопоглощающего слоя по краям звукопровода.

Во-вторых, наблюдается высокая величина потерь в резонансном пике – более 60 дБ, что может быть вызвано отсутствием звукопоглощающего слоя, а также низким качеством напыления токопроводящего покрытия и наличием царапин на нем. Проблемы такого рода можно решить путем использования более качественных заготовок.

В третьих, максимум резонансного пика, который четко выделен на рис. 4, приходится на частоту 16,44 МГц, в то время как расчетная величина частоты составила 15,79 МГц. Такая разница может быть обусловлена теплоотводом в стороны, что также испаряет пленку и конфигурирует электроды преобра-

зователя уже, чем расстояние между ними. Очевидно, что в дальнейших экспериментах требуется корректировка режимов лазерного испарения путем уменьшения мощности лазерного воздействия.

### Заключение

Разработанный метод лазерного конфигурирования топологии показал свою работоспособность и эффективность при создании чувствительного элемента микрогироскопа на поверхностных акустических волнах. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности его дальнейшего развития. Благодаря предложенному методу можно в значительной степени упростить производство сложных топологий чувствительных элементов навигационных сенсоров. Вместе с этим необходимо более детальное изучение технологических погрешностей различной природы для минимизации искажений наносимых рисунков.

### Литература

1. Лукьянов Д.П., Тихонов А.А., Филатов Ю.В., Поваляев А.Г., Шевченко С.Ю. и др. Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах // Гироскопия и навигация. 2005. № 2. С. 79–94.
2. Lao B.Y. Gyroscopic effect in surface acoustic waves // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. Boston, 1980. V. 2. P. 687–691.
3. Kurosawa M., Fukuda Y., Takasaki M., Highuchi T. A surface acoustic wave gyro sensor // Proc. Int. Solid State Sensors and Actuators Conference. Chicago, 1997. P. 863–866. doi: 10.1109/sensor.1997.635238
4. Varadan V.K., Suh W.D., Xavier P.B., Jose K.A., Varadan V.V. Design and development of a MEMS-IDT gyroscope // Smart Materials and Structures. 2000. V. 9. N 6. P. 898–905. doi: 10.1088/0964-1726/9/6/322
5. Woods R.C., Kalami H., Johnson B. Evaluation of a novel surface acoustic wave gyroscope // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 2002. V. 49. N 1. P. 136–141. doi: 10.1109/58.981391
6. Lee S.W., Rhim J.W., Park S.W., Yang S.S. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2007. V. 17. N 11. P. 2272–2279. doi: 10.1088/0960-1317/17/11/014
7. Lee S.W., Rhim J.W., Park S.W., Yang S.S. A novel micro rate sensor using a surface-acoustic-wave (SAW) delay-line oscillator // Proc. of IEEE Sensors. Atlanta, USA, 2007. P. 1156–1159. doi: 10.1109/ICSENS.2007.4388612
8. Wang W., Oh H., Lee K., Yoon S., Yang S. Enhanced sensitivity of novel surface acoustic wave microelectromechanical system-interdigital transducer gyroscope // Japanese Journal of Applied Physics. 2009. V. 48. N 6. P. 06FK091-06FK098. doi: 10.1143/JJAP.48.06FK09
9. Wang W., He S., Li H. Theoretical sensitivity evaluation of a shear-horizontal SAW based micro rate sensor // Proc. IEEE Ultrasonics Symposium. Rome, Italy, 2009. P. 1684–1687. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441914
10. Wang W., Xu F., He S., Li S., Lee K. A new micro-rate sensor based on shear horizontal surface acoustic wave gyroscopic effect // Japanese Journal of Applied Physics. 2010. V. 49. N 9. doi: 10.1143/JJAP.49.096602
11. Oh H., Wang W., Yang S., Lee K. Development of SAW based gyroscope with high shock and thermal stability // Sensors and Actuators A: Physical. 2011. V. 165. N 1. P. 8–15. doi: 10.1016/j.sna.2010.02.013
12. Oh H., Lee K., Yang S., Wang W. Enhanced sensitivity of a surface acoustic wave gyroscope using a progressive wave // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2011. V. 21. N 7. Art. 075015. doi: 10.1088/0960-1317/21/7/075015
13. Wang W., Liu J., Xie X., Liu M., He S. Development of a new surface acoustic wave based gyroscope on a X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> substrate // Sensors. 2011. V. 11. N 11. P. 10894–10906. doi: 10.3390/s111110894
14. Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В., Шевченко С.Ю. и др. Современное состояние и перспективы развития твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах // Гироскопия и навигация. 2011. № 3. С. 75–87.
15. Волков С.Ю. Новая лазерная технология GF AgieCharmilles [Электронный ресурс]. URL: <http://galika.ru/news/novaya->

### References

1. Loukianov D.P., Tikhonov A.A., Filatov Yu.V., Povalyaev A.G., Shevchenko S.Yu. et al. The development and optimization of a SAW-microaccelerometer structure. Part 1. *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2005, no. 2, pp. 79–94. (In Russian)
2. Lao B.Y. Gyroscopic effect in surface acoustic waves. *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*. Boston, 1980, vol. 2, pp. 687–691.
3. Kurosawa M., Fukuda Y., Takasaki M., Highuchi T. A surface acoustic wave gyro sensor. *Proc. Int. Solid State Sensors and Actuators Conference*. Chicago, 1997, pp. 863–866. doi: 10.1109/sensor.1997.635238
4. Varadan V.K., Suh W.D., Xavier P.B., Jose K.A., Varadan V.V. Design and development of a MEMS-IDT gyroscope. *Smart Materials and Structures*, 2000, vol. 9, no. 6, pp. 898–905. doi: 10.1088/0964-1726/9/6/322
5. Woods R.C., Kalami H., Johnson B. Evaluation of a novel surface acoustic wave gyroscope. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2002, vol. 49, no. 1, pp. 136–141. doi: 10.1109/58.981391
6. Lee S.W., Rhim J.W., Park S.W., Yang S.S. A micro rate gyroscope based on the SAW gyroscopic effect. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, vol. 17, no. 11, pp. 2272–2279. doi: 10.1088/0960-1317/17/11/014
7. Lee S.W., Rhim J.W., Park S.W., Yang S.S. A novel micro rate sensor using a surface-acoustic-wave (SAW) delay-line oscillator. *Proc. of IEEE Sensors*. Atlanta, USA, 2007, pp. 1156–1159. doi: 10.1109/ICSENS.2007.4388612
8. Wang W., Oh H., Lee K., Yoon S., Yang S. Enhanced sensitivity of novel surface acoustic wave microelectromechanical system-interdigital transducer gyroscope. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, vol. 48, no. 6, pp. 06FK091-06FK098. doi: 10.1143/JJAP.48.06FK09
9. Wang W., He S., Li H. Theoretical sensitivity evaluation of a shear-horizontal SAW based micro rate sensor. *Proc. IEEE Ultrasonics Symposium*. Rome, Italy, 2009, pp. 1684–1687. doi: 10.1109/ULTSYM.2009.5441914
10. Wang W., Xu F., He S., Li S., Lee K. A new micro-rate sensor based on shear horizontal surface acoustic wave gyroscopic effect. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, no. 9. doi: 10.1143/JJAP.49.096602
11. Oh H., Wang W., Yang S., Lee K. Development of SAW based gyroscope with high shock and thermal stability. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, vol. 165, no. 1, pp. 8–15. doi: 10.1016/j.sna.2010.02.013
12. Oh H., Lee K., Yang S., Wang W. Enhanced sensitivity of a surface acoustic wave gyroscope using a progressive wave. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, vol. 21, no. 7, art. 075015. doi: 10.1088/0960-1317/21/7/075015
13. Wang W., Liu J., Xie X., Liu M., He S. Development of a new surface acoustic wave based gyroscope on a X-112°Y LiTaO<sub>3</sub> substrate. *Sensors*, 2011, vol. 11, no. 11, pp. 10894–10906. doi: 10.3390/s111110894
14. Lukyanov D.P., Filatov Yu.V., Shevchenko S.Yu. et al. State of the art and prospects for the development of SAW-based solid-state gyros. *Gyroskopiya and Navigation*, 2011, vol. 2, no. 4, pp. 214–221. doi: 10.1134/S2075108711040109

- lazernaya-tehnologiya-gf-agiesharmilles (дата обращения 25.01.2018).
16. Вейко В.П. Лазерная обработка пленочных элементов. Л.: Машиностроение, 1986. 260 с.
15. Volkov S.Yu. *New Laser Technology GF AgieCharmilles*. Available at: <http://galika.ru/news/novaya-lazernaya-tehnologiya-gf-agiesharmilles> (accessed 25.01.2018).
16. Veiko V.P. *Laser Processing of Film Elements*. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986, 260 p. (In Russian)

#### Авторы

**Сафронов Даниил Валерьевич** – аспирант, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, Scopus ID: 55441484800, ORCID ID: 0000-0003-0214-0990, daniilsafronov@gmail.com

**Попов Павел Дмитриевич** – студент, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет (ЛЭТИ), Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-9307-6041, saltybrain@yandex.ru

#### Authors

**Daniil V. Safronov** – postgraduate, Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, Scopus ID: 55441484800, ORCID ID: 0000-0003-0214-0990, daniilsafronov@gmail.com

**Pavel D. Popov** – student, Electrotechnical University “LETI”, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-9307-6041, saltybrain@yandex.ru