

# НАНОМАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ

## NANOMATERIALS AND NANOTECHNOLOGIES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 538.97  
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-137-143



### ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С YBCO-ПЛЕНКАМИ

Позыгун И.С.<sup>1</sup>, Серопян Г.М.<sup>1</sup>, Сычев С.А.<sup>1</sup>, Федосов Д.В.<sup>1</sup>, Теплоухов А.А.<sup>2</sup>, Семенюк Н.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия

<sup>2</sup> Омский государственный технический университет, Омск, Россия

**Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы).** Развитие современной техники и микроэлектроники вызывает необходимость совершенствования методов получения и обработки тонкопленочных сверхпроводящих микро- и наноструктур, в том числе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO)-пленок. Это обуславливает актуальность задачи формирования сверхпроводящих пленок YBCO на подложках титаната стронция толщиной более 50 нм. **Используемые методы.** Для формирования тонкопленочных микроструктур в работе применялась многофункциональная универсальная установка лазерной литографии с твердотельным лазером Nd:YAG с длинами волн излучения 532 и 1064 нм. **Новизна.** Впервые обнаружены пороговые плотности мощности, при которых происходит плавление и фотоабляция пленки. Выявлено, что при длине волны  $\lambda = 532$  нм лазерного излучения порог лазерной абляции для YBCO-пленок толщиной от 30 до 200 нм достигается при значении плотности энергии 1,36 Дж/см<sup>2</sup>. Для YBCO-пленок толщиной 100 нм при  $\lambda = 1064$  нм лазерного воздействия порог лазерной абляции составляет 1,44 Дж/см<sup>2</sup>. Установлено, что для инфракрасного лазерного излучения тонкопленочные покрытия толщиной менее чем 40 нм становятся прозрачными, что является препятствием для создания микроструктуры на их основе. **Результат.** Определены оптимальные значения плотности энергии лазерного излучения для формирования границы фотоабляции YBCO-пленки. Обнаружены пороговые плотности энергии, при которых происходит плавление пленки. **Практическая значимость.** Пороговое значение плотности энергии для формирования качественной границы фотоабляции пленок при длине волны 532 нм оказалось равным 1,36 Дж/см<sup>2</sup>. Это указывает на то, что тонкие пленки YBCO имеют высокий коэффициент поглощения данного излучения, что делает возможным формирование микроструктур в широком диапазоне толщин.

**Ключевые слова:** сверхпроводящие структуры, лазерное воздействие, плотность энергии, YBCO-пленки, лазерная литография

© Позыгун И.С., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А., 2023

#### Для цитирования

Особенности взаимодействия наносекундного лазерного излучения с YBCO-пленками / Позыгун И.С., Серопян Г.М., Сычев С.А., Федосов Д.В., Теплоухов А.А., Семенюк Н.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 137-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-137-143>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## FEATURES OF INTERACTION BETWEEN NANOSECOND LASER RADIATION AND YBCO FILMS

Pozygun I.S.<sup>1</sup>, Seropyan G.M.<sup>1</sup>, Sychev S.A.<sup>1</sup>, Fedosov D.V.<sup>1</sup>, Teploukhov A.A.<sup>2</sup>, Semenyuk N.A.<sup>2</sup><sup>1</sup> Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia<sup>2</sup> Omsk State Technical University, Omsk, Russia

**Abstract. Problem Statement (Relevance).** The development of modern technology and microelectronics fosters the improvement of methods applied to produce and process thin-film superconducting micro- and nanostructures, including  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) films. This determines the relevance of the task of forming superconducting YBCO films on strontium titanate substrates with a thickness of over 50 nm. **Methods Applied.** To form thin-film microstructures, the authors used a multifunctional universal laser lithography unit with an Nd:YAG solid-state laser with radiation wavelengths of 532 and 1064 nm. **Originality.** The authors have first detected threshold power densities, when the film starts melting and photoablation occurs. It has been revealed that at a laser radiation wavelength of  $\lambda = 532$  nm, the threshold of laser ablation for YBCO films with a thickness of 30 to 200 nm is reached at an energy density of  $1.36 \text{ J/cm}^2$ . Regarding YBCO films with a thickness of 100 nm, the laser ablation threshold is  $1.44 \text{ J/cm}^2$  at  $\lambda = 1064$  nm of laser exposure. It has been established that in case of infrared laser radiation, thin-film coatings with a thickness of less than 40 nm become transparent, presenting an obstacle to creating a film-based microstructure. **Result.** We have determined the optimal values of the laser radiation energy density to form the qualitative YBCO film photoablation boundary, and threshold values of the laser radiation energy density that correspond to film melting. **Practical Relevance.** The detected threshold value of energy density, when a qualitative boundary of the YBCO films photoablation is formed at a laser wavelength of 532 nm, turned out to be  $1.36 \text{ J/cm}^2$ . This indicates that the YBCO thin films have a sufficiently high absorption coefficient of such radiation; therefore, this radiation can be used to form microstructures in the wide thickness range.

**Keywords:** superconducting structures, laser exposure, energy density, YBCO films, laser lithography

**For citation**

Pozygun I.S., Seropyan G.M., Sychev S.A., Fedosov D.V., Teploukhov A.A., Semenyuk N.A. Features of Interaction between Nanosecond Laser Radiation and YBCO Films. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 137-143. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-137-143>

**Введение**

Несмотря на интенсивные исследования по взаимодействию лазерного излучения с тонкими пленками различных материалов, в литературе мало работ по взаимодействию импульсного лазерного излучения с YBCO-пленками. При прямом воздействии наносекундного лазерного излучения на сверхпроводящие тонкие пленки YBCO происходит фотоабляция материала пленки, в результате чего формируется необходимая топология для изготовления сверхпроводящих пленочных датчиков [1-4]. Преимущество метода лазерной литографии связано с тем, что исключается химическая обработка поверхности пленки. Известны химические методы формирования заданной топологии структур, но они имеют существенный недостаток, заключающийся в плохом контроле ухода формируемой структуры («подтравы»), что снижает выход годных образцов [5].

Известны также методы ионного травления пленок, которые способны обеспечить необходимый размер элементов структуры, но которые вызывают деградацию сверхпроводящего состо-

яния пленок при бомбардировке ионным пучком [6, 7]. Для формирования топологии используется ионная имплантация [8, 9], но несоблюдение оптимальных режимов технологии может привести к деградации сверхпроводящих свойств тонких пленок после имплантации [10, 11]. Лазерная литография позволяет исключить химическое воздействие и ионную бомбардировку, что является ее несомненным достоинством. Несмотря на интенсивные исследования по взаимодействию лазерного излучения с тонкими пленками различных материалов, в литературе практически нет публикаций, отражающих вопросы структурирования сверхпроводящих тонкопленочных покрытий на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  методом лазерной литографии.

**Методы и материалы**

Применяемая в работе лазерная установка для формирования пленочных микроструктур состоит из твердотельного импульсного лазера, системы управления энергией лазерного излучения, системы фокусировки, двухкоординатного столика для перемещения облучаемого образца

пленки относительно лазерного луча и формирования тонкопленочного рисунка, электронного микроконтроллерного блока управления двигателями. Схема установки, применяемая для воздействия лазером на тонкие YBCO-пленки показана на **рис. 1**.

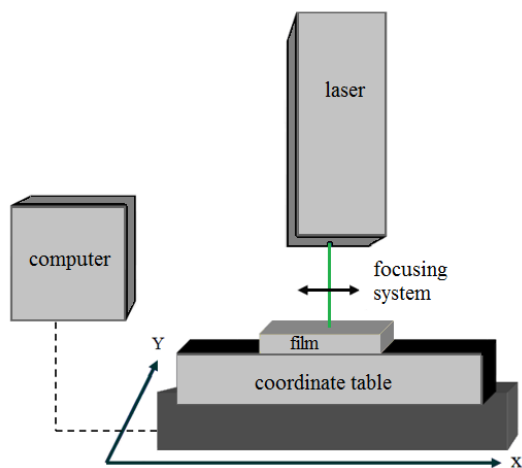


Рис. 1. Установка для облучения тонких YBCO-пленок  
Fig. 1. The unit used for irradiation of thin YBCO films

В работе использовалось лазерное излучение с длинами волн 532 и 1064 нм, а длительность импульса составляла 16 нс. Сверхпроводящие пленки облучались одиночными импульсами с разными энергиями в импульсе. Компьютерное управление лазером позволяет производить удаление материала YBCO-пленки без применения различных масок. Исследование поверхности пленок проводилось с применением атомно-силовой (SOLVERPRO) и оптической (МИИ-4) микроскопии.

Сверхпроводящие пленки  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  были выращены методом лазерной абляции на монокристаллических подложках  $SrTiO_3$  (100) при температуре 830°C в атмосфере кислорода при давлении в камере 50-100 Па. Для напыления пленок использовалось лазерное излучение с длиной волны  $\lambda = 532$  нм с плотностью мощности излучения  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>. Длительность импульса лазерного излучения составила  $\tau = 16$  нс при частоте следования импульсов  $\nu = 10$  Гц. Выращенные пленки толщиной 100 нм имели следующие сверхпроводящие параметры: критический ток –  $10^6$  А/см<sup>2</sup>, критическая температура 90-92 К, ширина сверхпроводящего перехода – 0,8-1,0 К. Скорость роста пленок при выбранных параметрах лазерного излучения и условий в напылительной камере составляла 40 нанометров в минуту, а толщина пленок задавалась временем напыления. Толщина пленки определя-

лась атомно-силовым микроскопом на предварительно сформированной ступеньке.

## Результаты и обсуждение

Эксперименты по взаимодействию YBCO-пленок толщиной более 50 нм с лазерным излучением с длиной волны 1064 нм показали возможность изготовления сверхпроводящих микроструктур. Пленки толщиной менее 40 нм становятся прозрачными для инфракрасного излучения, что существенно затрудняет формирование микроструктур. Порог фотоабляции для YBCO-пленок толщиной около 100 нм достигается при значении плотности энергии 1,44 Дж/см<sup>2</sup>. Пороговая плотность энергии падает с ростом толщины пленки из-за возрастания поглощенной энергии излучения.

На **рис. 2** и **3** представлены микрофотографии YBCO-пленок толщиной 50 и 200 нм соответственно после облучения лазером различной плотности энергии с длиной волны  $\lambda = 532$  нм.

Экспериментально обнаруженный порог плотности энергии формирования качественной границы для YBCO-пленок толщиной 30-200 нм при длине волны 532 нм составляет около 1,36 Дж/см<sup>2</sup>. Это объясняется тем, что в этом диапазоне толщин пленка имеет высокий коэффициент поглощения излучения. Значение 7,68 Дж/см<sup>2</sup> является верхним пределом при фотоабляции YBCO-пленок, выращенных на  $SrTiO_3$ . При превышении указанной плотности энергии в монокристалле титаната стронция возникают упругие напряжения, приводящие к разрушению подложки [12].

На **рис. 4** показана профилограмма границы фотоабляции YBCO-пленки.

Толщина пленки составляла примерно 180 нм, а плотность энергии лазерного излучения 2,24 Дж/см<sup>2</sup>. Достаточно резкая граница травления позволяет изготавливать тонкопленочные сверхпроводящие микромостики и иные микроструктуры.

На **рис. 5** представлена микрофотография облученной YBCO-пленки при плотности энергии 64 мДж/см<sup>2</sup>.

Результаты облучения YBCO-пленок толщиной 100 нм лазерным излучением 532 нм показали, что плотность энергии менее 64 мДж/см<sup>2</sup> приводит к нагреву пленки без образования расплава. В правой части рисунка – облученный участок пленки, а в левой – не облученный.

При плотности энергии 192 мДж/см<sup>2</sup> наблюдается плавление пленки, как показано на **рис. 6**. В правой части рисунка в области облучения поверхность пленки приобретает рельефный вид, характерный для расплавленного материала. При плотности энергии выше 240 мДж/см<sup>2</sup> начинается фотоабляция пленки.

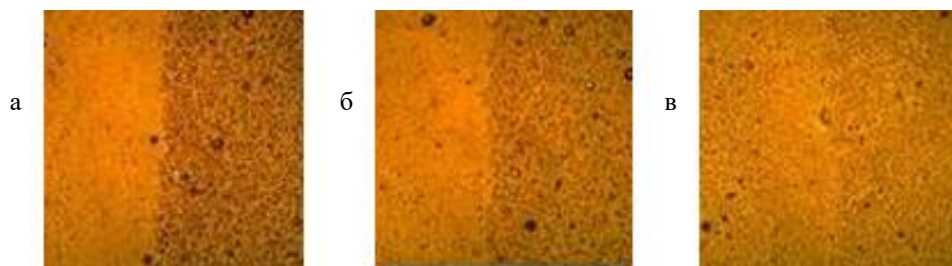


Рис. 2. Микрофотографии YBCO-пленок толщиной 50 нм: а – импульсная энергия 80 мДж, плотность энергии 1,76 Дж/см<sup>2</sup>; б – импульсная энергия 60 мДж, плотность энергии 1,33 Дж/см<sup>2</sup>; в – импульсная энергия 40 мДж, плотность энергии 0,88 Дж/см<sup>2</sup>

Fig. 2. Micrographs of YBCO films with a thickness of 50 nm: а is pulsed energy of 80 mJ, energy density of 1.76 J/cm<sup>2</sup>, б is pulsed energy of 60 mJ, energy density of 1.33 J/cm<sup>2</sup>, в is pulsed energy of 40 mJ, energy density of 0.88 J/cm<sup>2</sup>

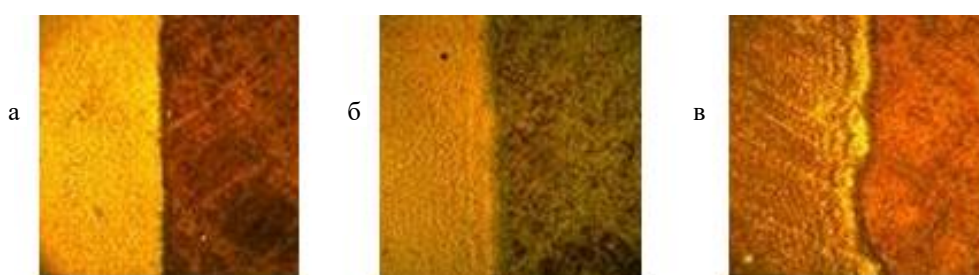


Рис. 3. Микрофотографии YBCO-пленок толщиной 200 нм: а – импульсная энергия 100 мДж, плотность энергии 2,24 Дж/см<sup>2</sup>; б – импульсная энергия 60 мДж, плотность энергии 1,34 Дж/см<sup>2</sup>; в – импульсная энергия 40 мДж, плотность энергии 0,90 Дж/см<sup>2</sup>

Fig. 3. Micrographs of YBCO films with a thickness of 200 nm: а is pulsed energy of 100 mJ, energy density of 2.24 J/cm<sup>2</sup>, б is pulsed energy of 60 mJ, energy density of 1.34 J/cm<sup>2</sup>, в is pulsed energy of 40 mJ, energy density of 0.90 J/cm<sup>2</sup>

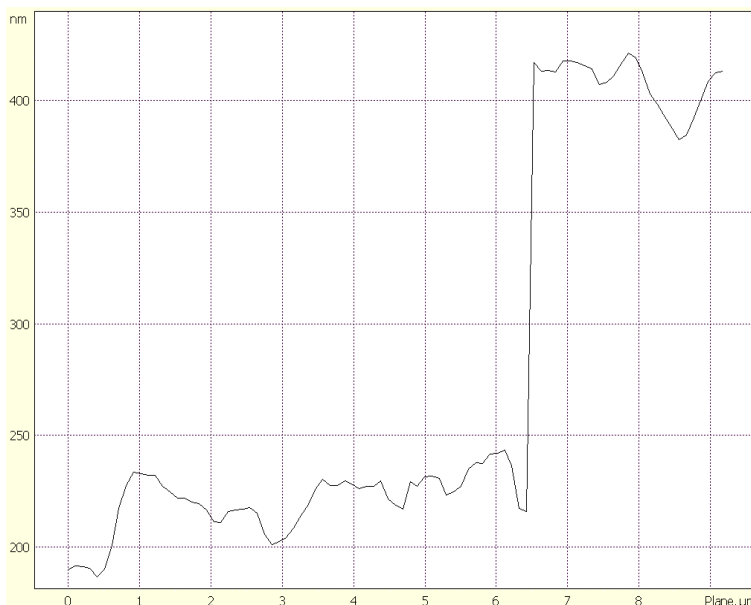


Рис. 4. Профилограмма границы фотоабляции YBCO-пленки

Fig. 4. The profilogram of the YBCO film photoablation boundary



Рис. 5. Микрофотография облученной YBCO-пленки при плотности энергии 64 мДж/см<sup>2</sup>  
 Fig. 5. The micrograph of the irradiated YBCO film at an energy density of 64 mJ/cm<sup>2</sup>

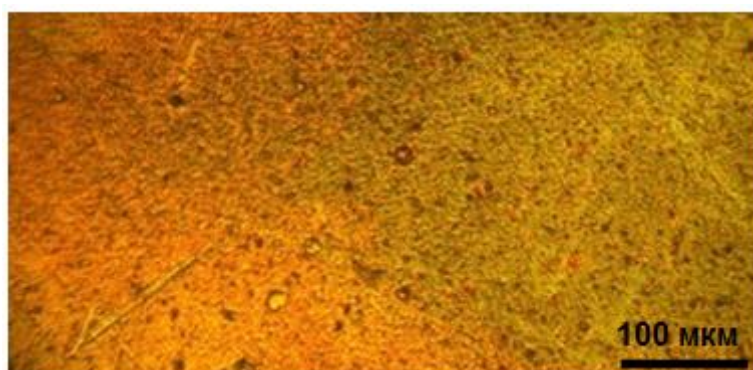


Рис. 6. Микрофотография облученной YBCO-пленки при плотности энергии 192 мДж/см<sup>2</sup>  
 Fig. 6. The micrograph of the irradiated YBCO film at an energy density of 192 mJ/cm<sup>2</sup>

Проведем оценку пороговой плотности энергии, при которой начинается плавление материала пленки. Долю поглощенной пленкой импульсной энергии можно рассчитать по формуле

$$E_p' = E_p \cdot (1 - R - T), \quad (1)$$

где  $E_p$  – импульсная энергия;  $R = 0,1$  – коэффициент отражения YBCO-пленки [13];  $T = 0,5$  – коэффициент пропускания YBCO-пленки толщиной 100 нм для  $\lambda = 532$  нм.

$$E_p' = 0,4 \cdot E_p. \quad (2)$$

Процесс поглощения пленкой энергии лазерного излучения можно считать адиабатным, поскольку длительность импульса мала  $\tau = 16$  нс. Пороговое значение поглощенной энергии, при котором пленка начинает плавиться, можно рассчитать по формуле

$$E_p' = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где  $m$  – масса облученного участка пленки;  $c = 1000$  Дж/кг·К – удельная теплоемкость YBCO-пленки [14];  $\Delta T$  – изменение температуры пленки,

$\Delta T = T_{\text{пл}} - T_0 = 1020 - 20 = 1000^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{пл}} \approx 1020^\circ\text{C}$  – температура плавления YBCO-пленки орторомбической модификации,  $T_0 = 20^\circ\text{C}$  – температура пленки до облучения).

Масса облученного участка пленки  $m = \rho \cdot s \cdot h = 1,78 \cdot 10^{-8}$  кг, где  $\rho = 6,3$  г/см<sup>3</sup> – плотность YBCO-пленки,  $h = 100$  нм – толщина пленки,  $s = 0,28$  см<sup>2</sup> – площадь лазерного пятна на пленке.

Таким образом, рассчитанное значение поглощенной энергии  $E_p' = 18$  мДж, а пороговое значение импульсной энергии, при которой пленка начинает плавиться,  $E_p = 45$  мДж. Тогда плотность энергии равна 160 мДж/см<sup>2</sup>, что хорошо согласуется с экспериментом.

### Заключение

В результате исследований взаимодействия наносекундного лазерного излучения с тонкими пленками YBCO на подложках титаната стронция обнаружены пороговые плотности энергии, при которых происходит плавление и фотоабляция YBCO-пленки.

Эксперименты показали, что взаимодействие лазерного излучения длиной волны 1064 нм с YBCO-пленками позволяет изготавливать микро- и наноструктуры на основе данных пленок. Порог фотоабляции для пленок толщиной 100 нм достигается при значении плотности энергии 1,44 Дж/см<sup>2</sup> и уменьшается с увеличением толщины пленки. Однако пленки толщиной менее 40 нм становятся проницаемыми для инфракрасного излучения, что затрудняет формирование микро-структур на их основе.

При длине волны лазерного излучения 532 нм пороговое значение плотности энергии формирования границы фотоабляции пленок толщиной 30-200 нм составило 1,36 Дж/см<sup>2</sup>. Нижний предел плотности энергии, при котором начинает проявляться граница фотоабляции, составляет 0,24 Дж/см<sup>2</sup>.

Результаты экспериментов показали, что плавление пленки начинается при плотности энергии 0,19 Дж/см<sup>2</sup>. Расчетная оценка пороговой плотности энергии плавления тонкой YBCO-пленки дала значение 0,16 Дж/см<sup>2</sup>. Полученный результат удовлетворительно согласуется с экспериментом.

#### Список источников

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
2. Шугуров А.Р., Панин А.В. Механизмы генерации напряжений в тонких пленках и покрытиях // *Технология. Физика*. 2020. №65. С. 1881-1904.
3. José M De Teresa. Nanoscale direct-write fabrication of superconducting devices for application in quantum technologies // *Materials for Quantum Technology*. 2023, vol. 3(1), pp. 1-9.
4. Lee Y.H., Schneiderman J. Focus on SQUIDS in Biomagnetism // *Superconductor Science and Technology*. 2018, vol. 31(8), p. 080201.
5. Investigation of the Parameters of Superconducting and Insulating Elements of Structures Obtained on YBCO Films by Master Mask with Decreasing Their Size / D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A. Parafin [et. al] // *Physics of the Solid State*. 2021, vol. 63(10), pp. 1480-1484.
6. On a Possibility to Fabricate YBCO Bridges with the Perfect Surface, Critical Temperature over 88 K and Critical Current Density up to  $5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup> / D.V. Masterov, S.A. Pavlov, A. Parafin [et. al] // *Physics of the Solid State*. 2020, vol. 62(9), pp. 1562-1566.
7. Обнаружение второй гармоники фазовой зависимости сверхпроводящего тока в гетеропереходах Nb/Au/YBCO / Ф.В. Комиссинский, Г.А. Овсянникова, Е. Ильичёв и др. // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 2001. Т. 73. №7. С. 405-409.
8. High-Tc superconducting Josephson mixers for terahertz heterodyne detection / M. Malnou, C. Feuillet-Palma, C. Ulysse [et. al] // *Journal of Applied Physics*. 2014, vol. 116, pp. 074505-074505.
9. Влияние ионного облучения на электронный транспорт в тонких пленках YBCO / А.В. Антонов, Д.В. Мастеров, А.Н. Михайлов и др. // *Физика твердого тела*. 2022. Т. 64. №9. С. 1162-1168.
10. Вopilkin E.A., Vostoikov N.V., Parafin A.E. Исследование свойств края полосковой структуры из высокотемпературного сверхпроводника // *Микросистемная техника*. 2003. №4. С. 10.
11. Формирование высокотемпературных сверхпроводящих слоев на границах несверхпроводящих фаз / М.И. Петров, С.И. Попков, К.Ю. Терентьев и др. // *Письма в Журнал технической физики*. 2020. Т. 46. №20. С. 11-14.
12. Взаимодействие наносекундного лазерного излучения с поверхностью монокристаллического титаната стронция / И.С. Позыгун, Г.М. Серопян, И.Р. Султанов и др. // *Журнал технической физики*. 2017. Т. 87. №8. С. 1261-1263.
13. Оптические свойства сверхпроводящих пленок YBCO, BSCCO, TBSCO в видимой и ближней инфракрасной части спектра / С.И. Тютюнников, В.Н. Шаляпин, Н.И. Балалыкин и др. *Дубна: ОИЯИ*, 1995. 10 с.
14. Термические эффекты в аморфных слоях YBaCuO при взаимодействии с лазерным излучением высокой мощности / В.Д. Окунев, В.А. Исаев, P. Gierlowski // *Письма в Журнал технической физики*. 2005. № 14. С. 22-29.

#### References

1. Grigoryants A.G. *Osnovy lazernoy obrabotki materialov*. [Fundamentals of laser processing of materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 304 p. (In Russ.)
2. Shugurov A.R., Panin A.V. Mechanisms of stress generation in thin films and coatings *Tekhnologiya. Fizika*. [Technology. Physics]. 2020;(65):1881-1904. (In Russ.)
3. José M. De Teresa. Nanoscale direct-write fabrication of superconducting devices for application in quantum technologies. *Materials for Quantum Technology*. 2023;3(1):1-9.
4. Lee Y.H., Schneiderman J. Focus on SQUIDS in biomagnetism. *Superconductor Science and Technology*. 2018;31(8):080201.
5. Masterov D.V., Pavlov S.A., Parafin A.E. et al. Investigation of the parameters of superconducting and insulating elements of structures obtained on YBCO films by master mask with decreasing their size. *Physics of the Solid State*. 2021;63(10):1480-1484.
6. Masterov D.V., Pavlov S.A., Parafin A.E. et al. On a possibility to fabricate YBCO bridges with the perfect surface, critical temperature over 88 K and critical current density up to  $5 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>. *Physics of the Solid State*. 2020;62(9):1562-1566.
7. Komissinsky F.V., Ovsyannikova G.A., Plyichev E. et al. Detection of the second harmonic of phase dependence of superconducting current in heterojunctions Nb/Au/YBCO. *Pisma v Zhurnal eksperimentalnoy i teoreticheskoy fiziki* [JETP Letters]. 2001;73(7):361-365. (In Russ.)

8. Malnou M., Feuillet-Palma C., Ulysse C., Faini G., Febvre P., Sirena M., Olanier L., Lesueur J., Bergeal N. High-Tc superconducting Josephson mixers for terahertz heterodyne detection. *Journal of Applied Physics*. 2014;116:074505.
9. Antonov A.V., Masterov D.V., Mikhailov A.N. et al. Effect of ion irradiation on electronic transport in YBCO thin films. *Fizika tverdogo tela* [Solid State Physics]. 2022;64(9):1162-1168. (In Russ.)
10. Vopilkin E.A., Vostokov N.V., Parafin A.E. Research of the properties of the edge of a strip structure from a high-temperature superconductor. *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystems Technology]. 2003;(4):10. (In Russ.)
11. Petrov M.I., Popkov S.I., Terentyev K.Yu. et al. Forming high-temperature superconducting layers at the boundaries of non-superconducting phases. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters]. 2020;46(20):11-14. (In Russ.)
12. Pozygun I.S., Seropyan G.M., Sultanov I.R. et al. Interactions between nanosecond laser radiation and a surface of single-crystal strontium titanate. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics]. 2017; 87(8):1261-1263. (In Russ.)
13. Tyutyunnikov S.I., Shaliapin V.N., Balalykin N.I. et al. *Opticheskie svoystva sverkhprovodyashchikh plenok YBCO, BSCCO, TBCCO v vidimoy i blizhnei infrakrasnoy chasti spektra* [Optical properties of YBCO, BSCCO, TBCCO superconducting films in the visible and near infrared part of the spectrum]. Dubna: JINR, 1995, 10 p. (In Russ.)
14. Okunev V.D., Isaev V.A., Gierlowski P., Klimov A., Lewandowski S.J. Thermal effects in amorphous YBaCuO layers when interacting with high-power laser radiation. *Pisma v Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical Physics Letters]. 2005;(14):22-29. (In Russ.)

Поступила 03.04.2023; принята к публикации 27.06.2023; опубликована 25.09.2023  
Submitted 03/04/2023; revised 27/06/2023; published 25/09/23

**Позыгун Ирина Станиславовна** – старший преподаватель, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: pozygun@mail.ru. ORCID 0000-0002-2262-264X

**Серопян Геннадий Михайлович** – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: ser\_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

**Сычев Сергей Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

**Федосов Денис Викторович** – учебный мастер, Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского, Омск, Россия. Email: feden86@mail.ru. ORCID 0000-0002-5617-112X

**Теплоухов Андрей Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

**Семенюк Наталья Андреевна** – кандидат технических наук, доцент, Омский государственный технический университет, Омск, Россия. Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684

**Irina S. Pozygun** – Senior Lecturer, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: pozygun@mail.ru. ORCID 0000-0002-2262-264X

**Gennady M. Seropyan** – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: ser\_gm@mail.ru. ORCID 0000-0001-8626-2893

**Sergey A. Sychev** – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: sychev226@mail.ru. ORCID 0000-0003-3849-8927

**Denis V. Fedosov** – Training Instructor, Dostoevsky Omsk State University, Omsk, Russia. Email: feden86@mail.ru. ORCID 0000-0002-5617-112X

**Andrey A. Teploukhov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. Email: a.a.lektor@mail.ru. ORCID 0000-0002-5649-2871

**Natalya A. Semenyuk** – PhD (Eng.), Associate Professor, Omsk State Technical University, Omsk, Russia. Email: sem-natal@mail.ru. ORCID 0000-0003-0103-7684