

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-1-9

УДК 621.373.8: 620.1.08

Исследование силиконовой пленки, осажденной на поверхность кварцевого стекла под действием лазерного излучения

Андрей Вячеславович Беликов¹, Иван Сергеевич Клочков²✉,
Иван Владимирович Алексеев³, Сергей Анатольевич Капралов⁴

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^{2,3} АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация

⁴ АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Великий Новгород, 173003, Российская Федерация

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8733-4860>

² Vany-nov13@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>

³ El.magio@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4368-9309>

⁴ kapralov_sa@npksp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3393-4948>

Аннотация

Предмет исследования. Исследованы структура, оптические и эксплуатационные свойства силиконовой пленки, нанесенной на поверхность кварцевого стекла в результате действия лазерного излучения на летучие компоненты, которые выделяются из образца силиконовой резины в замкнутом объеме. **Метод.** Исследование выполнено в рамках лазерного многопараметрического метода с помощью оригинальной установки, в состав которой входит твердотельный неодимовый лазер с длиной волны 1064 нм и параметрами лазерного импульса: энергией — 105 мДж, длительностью 11–14 нс и частотой следования 10 Гц. В эксперименте на выходе лазерного излучателя расположена герметичная тест-кювета, внутри которой размещен образец силиконовой резины. При прохождении лазерного излучения через внутренний объем тест-кюветы происходит взаимодействие летучих компонентов, выделенных из образца, с лазерным излучением. В результате процесса лазерно-индуцированного осаждения на оптических элементах тест-кюветы образуются зоны осаждения. Топология зон осаждения определена с помощью профилометра. Сравнение структурного состава исходного образца с продуктами осаждения выполнено с использованием сканирующего электронного микроскопа. **Основные результаты.** Получены зависимости коэффициентов площади зоны осаждения и ослабления от температуры и количества лазерных импульсов. Исследованы элементный состав, цвет, устойчивость к действию растворителя и толщина зон осаждения. Установлено, что с ростом температуры и количества лазерных импульсов коэффициенты площади и ослабления зон осаждения увеличиваются, цвет не изменяется, а устойчивость к действию растворителя возрастает. С ростом температуры зона осаждения, первоначально состоящая из микрофрагментов, становится сплошной, а с ростом количества лазерных импульсов ее толщина увеличивается. Толщина зоны осаждения неравномерно распределена относительно центра. **Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть применены при разработке содержащих силикон биочипов для диагностики и терапии состояния здоровья человека.

Ключевые слова

лазерный многопараметрический метод, герметичный объем, тест-кювета, коэффициент ослабления, зона осаждения, силиконовая резина

Ссылка для цитирования: Беликов А.В., Клочков И.С., Алексеев И.В., Капралов С.А. Исследование силиконовой пленки, осажденной на поверхность кварцевого стекла под действием лазерного излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 1. С. 1–9. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-1-9

A study of a silicone film deposited on quartz glass under laser radiation

Andrey V. Belikov¹, Ivan S. Klochkov²✉, Ivan V. Alekseev³, Sergey A. Kapralov⁴

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^{2,3} Joint Stock Company "Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Saint Petersburg, 190020, Russian Federation

⁴ Joint Stock Company "Research and Production Corporation "Precision Systems and Instruments", Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8733-4860>

² Vany-nov13@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>

³ El.magio@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4368-9309>

⁴ kapralov_sa@npksp.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3393-4948>

Abstract

The paper studies the structure, optical and operational properties of a silicone film deposited on the surface of quartz glass as a result of the action of laser radiation on volatile substances released from a silicone rubber sample in a closed volume. The research was carried out within the framework of the laser multiparameter method and using an original setup, which includes a solid-state neodymium laser with a wavelength of 1064 nm, and laser pulse parameters: energy of 105 mJ, a duration of 11–14 ns, a repetition rate of 10 Hz. A sealed test-cuvette is placed at the output of the laser. A silicone rubber sample is placed inside the test-cuvette. When laser radiation passes through the test-cuvette, volatile substances that are released from the sample over time interact with the laser radiation and create deposition zones on the optical elements of the test-cuvette, which affect the optical characteristics of these optical elements. The topology of the deposition zones was studied using a profilometer. The structural composition of the original silicone rubber and the deposition zone was determined using a scanning electron microscope. The main results show the dependences of the coefficients of the area and attenuation of the deposition zone on the temperature and the number of laser pulses. The elemental composition, color, resistance to the action of the solvent, and the thickness of the deposition zones have been investigated. It was found that with an increase in the temperature and the number of laser pulses, the area and attenuation coefficients of the deposition zones increase, the color does not change, and the resistance to the action of the solvent increases. With an increase in temperature, the deposition zone, initially consisting of micro-fragments, becomes continuous, and with an increase in the number of laser pulses, its thickness increases. The thickness of the deposition zone is unevenly distributed along its diameter. The results obtained can be applied in the development of silicone-containing biochips for health diagnostics and therapy.

Keywords

laser multiparameter method, sealed volume, test-cuvette, attenuation, deposition zone, silicone rubber

For citation: Belikov A.V., Klochkov I.S., Alekseev I.V., Kapralov S.A. A study of a silicone film deposited on quartz glass under laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 1–9 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-1-9

Введение

В настоящее время полимерные носители широко используются в составе биочипов и биосенсоров в различных биомедицинских приложениях, таких как диагностика, адресная доставка лекарственных средств [1], репродуктивная [2] и регенеративная [3, 4] медицина, антибактериальная [5] и противораковая [6, 7] терапия, тканевая инженерия [8, 9], применяются для контроля экспрессии генов клеточных культур [10] и прочее. Существует широкий спектр систем адресной доставки биологически активных веществ (БАВ), таких как полимерные или липосомальные микрокапсулы, полимерные пленки, позволяющие контролируемо высвобождать инкапсулированные в них агенты посредством лазерного, электрического, магнитного, ультразвукового или биохимического воздействий [11–13].

В контексте задач модификации подложек биочипов и биосенсоров, клеточных подложек, поверхности медицинских имплантов перспективными носителями БАВ являются полимерные трехмерные микроструктурированные пленки. Пленки могут изготавливаться как методами последовательной адсорбции, так и методами микролитографии, что позволяет варьировать их физико-химические свойства [14, 15]. Полимерные носители, к которым можно отнести силиконовые плен-

ки, позволяют герметично инкапсулировать низко- и высокомолекулярные водорастворимые БАВ в пленке. В результате достигается возможность равномерно распределять БАВ по поверхности пленки в виде небольших одинаковых кластеров, которые возможно активировать как поодиночке, так и целыми группами, с помощью лазерного излучения, при локальной таргетной терапии. Вместе с тем поиск новых технологий создания полимерных пленок, расширение температурного диапазона их использования, управление адгезией таких пленок с поверхностью подложки, в том числе из кварцевого стекла, используемого в биосовместимых сенсорах, является актуальной задачей.

Постановка задачи

В процессе эксплуатации лазерных изделий в результате конденсации на поверхности оптических элементов летучих веществ под воздействием лазерного излучения формируются зоны осаждения [16–21]. В герметичном объеме лазерного излучателя формирование зон осаждения приводит к деградации оптических элементов и узлов, что негативно сказывается на выходных параметрах излучателя и может привести к выходу прибора из строя. Процесс осаждения с ростом температуры может ускоряться [22]. Вместе с тем

реализуемый при формировании зон осаждения в лазерных излучателях процесс, при размещении на пути лазерного излучения герметичной кюветы, содержащей образец силиконовой резины и образец кварцевого стекла, может быть применен для создания на поверхности кварцевого стекла полимерных, в том числе силиконовых пленок, которые могут быть использованы в составе биочипов и биосенсоров.

Существуют различные методы исследования продуктов осаждения. Наиболее часто для этих целей проводят дегазацию в вакуумной камере, содержащей исследуемый образец материала. Чтобы определить наличие продуктов газовой выделения, производят взвешивание образца материала до и после дегазации. На основе полученных измерений делают выводы о присутствии в материале продуктов осаждения (летучих веществ), о потере массы или газовой выделении. Состав и природу продуктов осаждения определяют с помощью спектрофотометров [23] или электронного просвечивающего микроскопа, работающего в режиме электронографа [24]. Данные методы позволяют прецизионно определить состав осажденных веществ, а также вес продуктов осаждения с точностью до одного микрограмма. Недостатками этих методов являются значительное количество времени, которое требуется для исследования, и высокие затраты при их реализации.

Известен лазерный многопараметрический (ЛМП) метод, в рамках которого исследуются оптические, геометрические, цветовые параметры зон осаждения и их стойкость к действию растворителей [16]. В отличие от вакуумных методов, ЛМП метод обладает такими преимуществами как простота и высокая скорость измерений. ЛМП метод разработан и успешно применяется в организации АО «НПК «СПП» (Санкт-Петербург, Россия) при контроле материалов и элементов, используемых в герметичном объеме лазерных излучателей. В рамках данного метода выполнен анализ параметров зоны осаждения, таких как коэффициент площади осаждения, цвет, устойчивость к действию растворителей и коэффициент ослабления, прошедшего через нее излучения [16].

При поиске новых технологий создания силиконовых пленок для биомедицинских применений актуально исследование возможности создания и изучение свойств зон осаждения, формируемых на поверхностях оптических элементов, размещенных на пути распространения лазерного излучения.

Задача исследования состоит в получении новых научных данных о возможности создания и свойствах силиконовых пленок, формируемых на поверхности кварцевого стекла в результате действия лазерного излучения на летучие компоненты, выделяющиеся из образца силиконовой резины в замкнутом объеме. При решении этой задачи в рамках ЛМП метода исследуются: коэффициенты ослабления и площади осаждения, устойчивость к действию растворителей и цвет силиконовых пленок, а также определяется состав и толщина пленок методами электронной микроскопии и контактной профилометрии.

Материалы и методы

В эксперименте использован образец силиконовой резины: современная монолитная силиконовая резина марки EL SST (Silicone Engineering, Англия). Создана экспериментальная установка, реализующая ЛМП метод (рис. 1). В состав установки входят: 1 — поглотитель лазерного излучения; 2 — приемная головка измерителя энергии Gentec QE25LP-S-MB-DO (Gentec Electro-Optics, Inc, Канада); 3 — термостол Магистр C20T1 (ООО НТЦ «Магистр-С», Россия); 4 — тест-кювета; 5 — YAG:Nd лазерный излучатель (АО «НПК «СПП», Россия).

Силиконовая резина получается путем вулканизации эластомера (на основе соединения кремния) и органики¹. По внешнему виду она неотличима от резины, изготовленной на основе каучука. Технические параметры таких изделий закладываются при выборе состава компонентов еще на стадии разработки (рецепта). В зависимости от свойств органического заместителя, который может быть представлен метильными, винильными, фенильными или другими группами и его структуры, силиконовая резина может приобретать различные физические свойства. Таким образом, производитель может, подобрав состав компонентов, изготовить силиконовую резину с уникальными свойствами и характеристиками. Силиконовая резина¹ обладает высокой прочностью и эластичностью, вследствие чего может применяться в широком температурном диапазоне от -60°C до $+280^{\circ}\text{C}$, устойчива к ультрафиолетовому излучению и имеет высокую огнестойкость. Также

¹ ГОСТ Р 57399-2017. Прокладки и детали из резины на основе силикона. Технические требования. Введ. 01.01.2018. М.: Стандартинформ, 2017. 11 с.

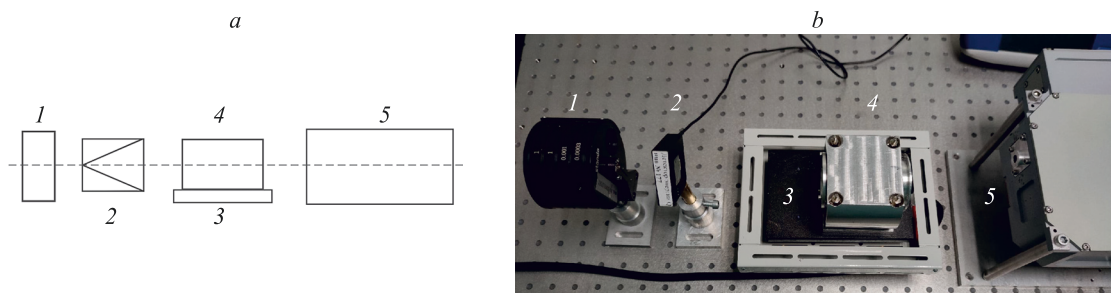


Рис. 1. Схема (a) и фото (b) установки для реализации лазерного многопараметрического метода
Fig. 1. Scheme (a) and photograph (b) of the setup for the implementation of the laser multiparameter method

данный материал не токсичен и устойчив к действию широкого круга химических веществ. Используемая в исследовании резина широко распространена и эксплуатируется при температурах от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, обладает плотностью $1,15\text{ г/см}^3$, твердостью (Шор А) 40 усл. ед. и прозрачна в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Условная прочность при растяжении составляет 7–11 МПа, удлинение при растяжении порядка 700 %. Внешний вид используемых в исследовании образцов силиконовой резины марки EL SST представлен на рис. 2. Внутренний диаметр кольцевой прокладки составил 24 мм, внешний диаметр 28 мм, толщина кольца — 2 мм, площадь поверхности кольцевой прокладки — $163,4\text{ мм}^2$.

Подробно ЛМП метод описан в работе [16]. В настоящей работе в состав установки, реализующей ЛМП метод, входит твердотельный неодимовый лазер, работающий в режиме модуляции добротности с длиной волны 1064 нм и параметрами лазерных импульсов: энергией 105 мДж, длительностью 11–14 нс и частотой следования 10 Гц. Диаметр пучка по уровню e^{-2} составил $5 \pm 0,25\text{ мм}$. Излучение многомодовое. Расходимость лазерного пучка составила $1,5 \pm 0,1\text{ мрад}$. Наклон оси лазерного пучка и его диаметр выбраны так, чтобы излучение тестирующего лазерного излучателя проходило сквозь входное и выходное стекла кюветы без виньетирования, и в кювете не возникало дополнительных источников загрязнения. На выходе лазера размещена тест-кювета, имитирующая внутреннее пространство герметичного лазерного излучателя, внутрь которой помещен образец резины марки EL SST. При прохождении лазерного излучения через пространство тест-кюветы летучие вещества, которые выделяются из образца с течением времени, взаимодействуют с лазерным излучением и образуют на оптических элементах тест-кюветы зоны осаждения. Таким образом, лазерное излучение не попадает на силиконовую резину, а взаимодействует с продуктами ее испарения. Кювета герметизирована при помощи индиевой фольги, размещенной между входным и выходным стеклом и корпусом кюветы, а также между основа-

нием кюветы, на которое помещен образец резины, и корпусом кюветы.

При исследовании ЛМП методом внутрь тест-кюветы была помещена одна кольцевая прокладка. Исследования выполнены при температурах кюветы 23, 50, 60, 70, 80, 90 и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. При каждой температуре через кювету пропускалось заранее заданное количество лазерных импульсов. Количество импульсов изменялось от 1 до 150 000, с шагом 10 000. Для каждой комбинации температуры и количества импульсов выполнено 7 реализаций, для каждой реализации использовался новый образец уплотнительной кольцевой прокладки.

В конце каждой реализации вычислен коэффициент ослабления Δk , равный отношению разницы энергий на выходе тест-кюветы в начале и в конце облучения к энергии излучения на входе тест-кюветы [16].

Выполнен анализ окна тест-кюветы на предмет наличия/отсутствия зон осаждения, поверхность кюветы была сфотографирована с помощью камеры микроскопа DCM510 5M pixels, CMOS chip (Scortek, Китай), и вычислен коэффициент площади зоны осаждения K , который рассчитан как отношение площади зоны осаждения к площади сечения лазерного пучка по уровню e^{-2} [16].

Определялась устойчивость к действию растворителя, для этого в течение 10 мин была предпринята попытка удалить зону осаждения в результате ее протирки ватным тампоном, содержащим 99,7 % этиловый спирт (АО «ЛенРеактив», Россия). В случае если зона не исчезала, то предпринималась попытка удалить ее с помощью протирки ватным тампоном, содержащим 99,8 % ацетона. Если зону осаждения удавалось убрать, то она характеризовалась как неустойчивая к растворителям, в противном случае — как устойчивая.

Цвет зон осаждения (белый или черный) после каждой реализации определялся визуально с помощью микроскопа MC-2 ZOOM (Микромед, Китай) при увеличении $10\times$.

Элементный состав силиконовой резины EL SST и зон осаждения исследован методом рентгеноструктурного анализа с помощью сканирующего электронного микроскопа Evex Mini-SEM HR-3000 (Evex Analytical Instruments Inc., USA). Исследованы два образца силиконовой резины и два образца зоны осаждения, образованных после воздействия 100 000 импульсов при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Внешний вид поверхности и толщина зоны осаждения исследованы с помощью оптического микроскопа Axio Imager (Carl Zeiss GmbH, Германия) и профилометра Hommel Tester T8000 (Hommelwerke GmbH, Германия) соответственно. Исследование было выполнено при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Первый образец зоны осаждения образован после воздействия 50 000 импульсов, а второй — 100 000 импульсов.

Результаты экспериментов обработаны в программном комплексе «StatGraphics Plus 5.0» (Statistical Graphics Corp., США). Выполнена статистическая обработка данных, которая заключалась в определении средних значений и стандартного отклонения измеренных величин.

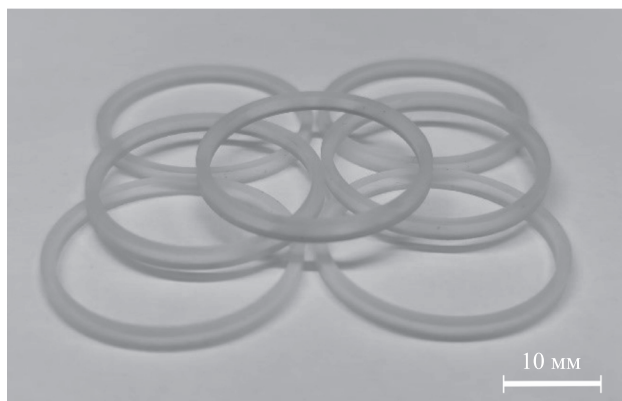


Рис. 2. Фотография образцов уплотнительных колец из силиконовой резины EL SST

Fig. 2. Photo of the samples, O-rings made of silicone rubber EL SST (Silicone Engineering, England)

Результаты и обсуждения

Характерный внешний вид зон осаждения, возникающих на поверхности кварцевого окна тест-кюветы при постоянном количестве лазерных импульсов и различной температуре представлен на рис. 3.

Внешний вид зон осаждения зависит от температуры тест-кюветы. При температурах 23 и 50 °C зоны осаждения не наблюдаются, а при температурах 60, 70 и 80 °C зона представлена набором изолированных друг от друга микрофрагментов. При температурах 90 и 100 °C микрофрагменты образуют сплошную зону осаждения (силиконовую пленку).

Температурную динамику внешнего размера зоны осаждения характеризует коэффициент, который показывает, какую долю занимает площадь зоны осаждения относительно площади лазерного пятна. Зависимость коэффициента площади зоны осаждения K от темпе-

ратуры тест-кюветы при постоянном количестве лазерных импульсов показана на рис. 4, *a*; от количества лазерных импульсов при постоянной температуре тест-кюветы — на рис. 4, *b*.

Видно, что коэффициент площади зоны осаждения K отличен от нуля при превышении температурой тест-кюветы значения 50 °C, что связано с формированием на поверхности окна тест-кюветы микрофрагментов. С ростом температуры коэффициент K увеличивается. Темп роста K замедляется при превышении температурой значения 90 °C, что можно связать с окончанием процесса слияния микрофрагментов и началом процесса увеличения толщины зоны осаждения.

Заметим (рис. 4, *b*), что коэффициент площади зоны осаждения K медленно увеличивается первые 30 000 импульсов, после следует резкий рост до 80 000 импульсов, далее рост замедляется. Подобное поведение коэффициента K так же, как для зависимости

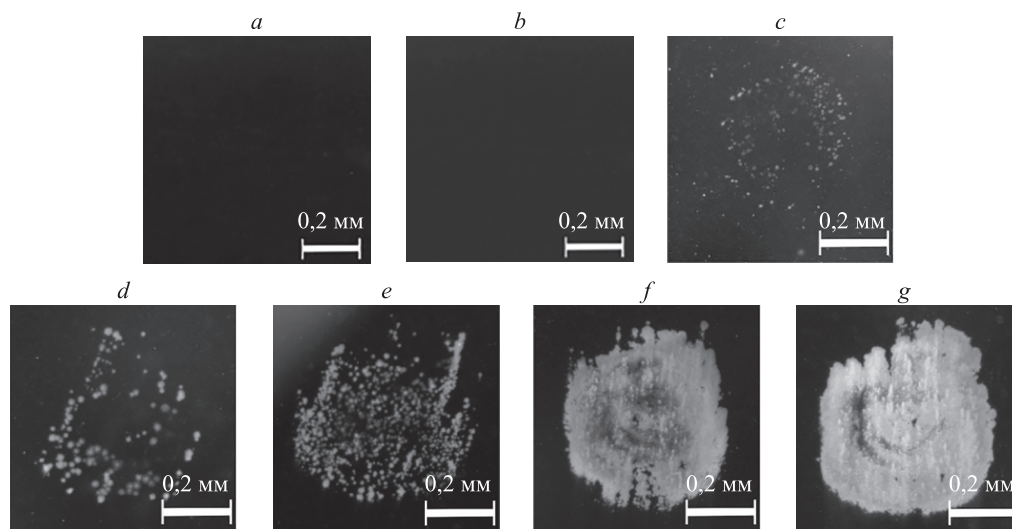


Рис. 3. Фотографии зон осаждения, возникающих на поверхности кварцевого окна тест-кюветы при 100 000 лазерных импульсов и температурах 23 °C (*a*), 50 °C (*b*), 60 °C (*c*), 70 °C (*d*), 80 °C (*e*), 90 °C (*f*) и 100 °C (*g*), силиконовая резина EL SST

Fig. 3. Photographs of deposition zones appearing on the surface of the quartz window of the test-cuvette at 100,000 laser pulses and temperatures of 23 °C (*a*), 50 °C (*b*), 60 °C (*c*), 70 °C (*d*), 80 °C (*e*), 90 °C (*f*) and 100 °C (*g*), silicone rubber EL SST (Silicone Engineering, England)

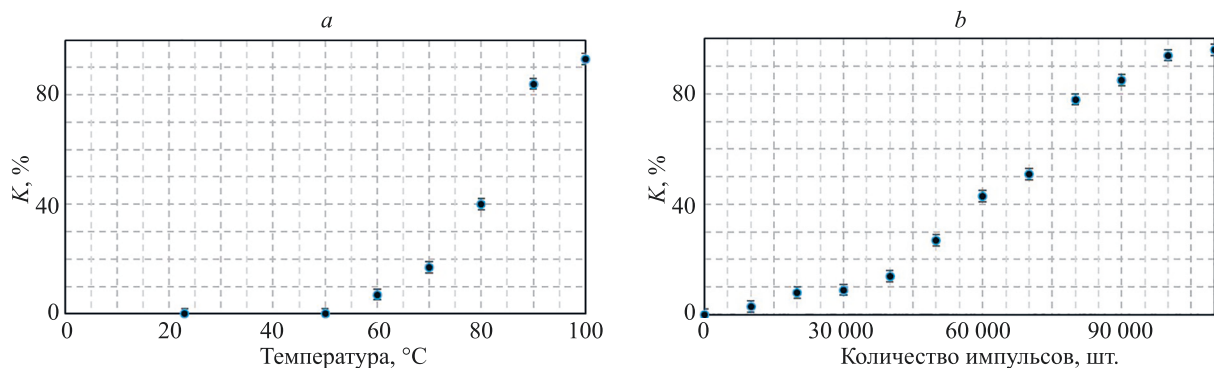


Рис. 4. Зависимость коэффициента площади зоны осаждения K от температуры тест-кюветы при 100 000 лазерных импульсов (*a*) и от количества лазерных импульсов при температуре тест-кюветы 100 °C (*b*), силиконовая резина EL SST

Fig. 4. The dependence of the area coefficient of the deposition zone K on the temperature of the test-cuvette at 100,000 laser pulses (*a*) and on the number of laser pulses at the temperature of the test-cuvette 100 °C (*b*), silicone rubber EL SST

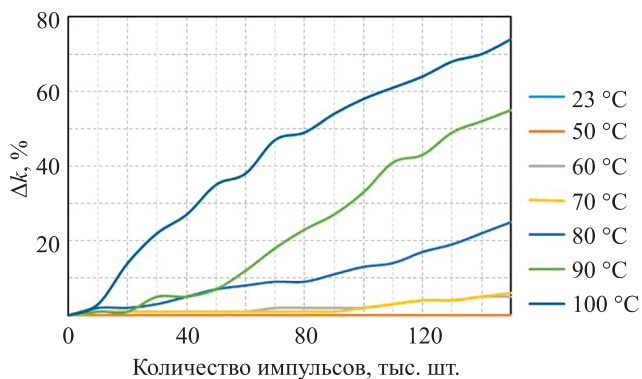


Рис. 5. Зависимости коэффициента ослабления Δk от количества лазерных импульсов при различных температурах тест-кюветы

Fig. 5. The dependences of the attenuation coefficient Δk , on the number of laser pulses at different temperatures of the test cell

K от температуры, можно связать с динамикой формирования и слиянием микрофрагментов.

Результаты измерения коэффициента ослабления Δk представлены на рис. 5.

Отметим, что с ростом температуры тест-кюветы и количества лазерных импульсов коэффициент ослабления Δk увеличивается. При постоянной температуре рост количества импульсов приводит к увеличению Δk . При постоянном количестве лазерных импульсов рост температуры тест-кюветы также приводит к увеличению коэффициента ослабления.

Возрастание значений коэффициентов K и Δk связано с ростом температуры, а также диаметра и толщины зоны осаждения, и объясняется повышением скорости выделения летучих веществ из материала образца. На величину Δk оказывает влияние количество лазерных импульсов, которое возрастает пропорционально увеличению диаметра и толщины зоны осаждения.

Увеличение толщины зоны осаждения с ростом количества лазерных импульсов подтверждается при анализе профилограмм, полученных при постоянной температуре тест-кюветы и различном количестве лазерных импульсов, представленных на рис. 6.

Можно заметить, что толщина зоны осаждения неравномерно распределена вдоль ее диаметра. При

50 000 импульсов максимальная толщина зоны осаждения достигает 2,1 мкм, а средняя — $0,54 \pm 0,33$ мкм. При 100 000 импульсов максимальная толщина зоны осаждения достигает 2,6 мкм, а средняя — $0,90 \pm 0,33$ мкм.

Результаты исследования цвета и устойчивости зон осаждения к действию растворителя представлены в таблице.

Устойчивость к действию растворителя увеличивается с ростом температуры тест-кюветы, что также связано с ростом геометрических размеров зоны осаждения и в первую очередь с ростом ее толщины.

Цвет зоны осаждения не изменяется с ростом температуры тест-кюветы, что свидетельствует о том, что ее элементный состав постоянен при изменении температуры, а меняется только диаметр и толщина зоны осаждения.

Цвет зоны осаждения очень близок к цвету исследуемого образца силиконовой резины, что очевидно связано с тем, что по элементному составу зона осаждения близка к исходному материалу и состоит из конденсированного на поверхности кварцевого окна. Данный вывод подтверждается результатами рентгеноструктурного анализа, представленными на рис. 7.

Таблица. Цвет и устойчивость к действию растворителя зон осаждения, сформированных при 100 000 лазерных импульсов и различной температуре тест-кюветы

Table. Color and solvent resistance of the deposition zones formed at 100,000 laser pulses and different temperatures of the test-cuvette

Температура, °C	Устойчивость к действию растворителей	Цвет
23	зона осаждения отсутствует	
50		
60	не устойчива	белый
70	устойчива	белый
80	устойчива	белый
90	устойчива	белый
100	устойчива	белый

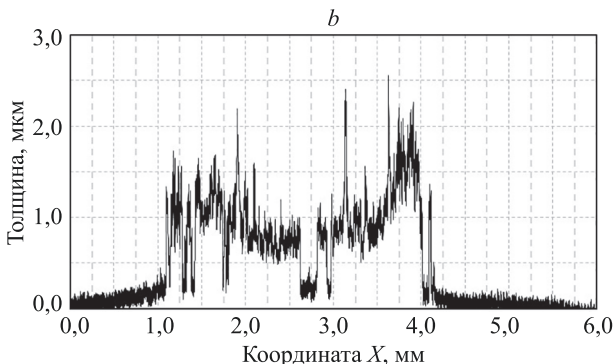
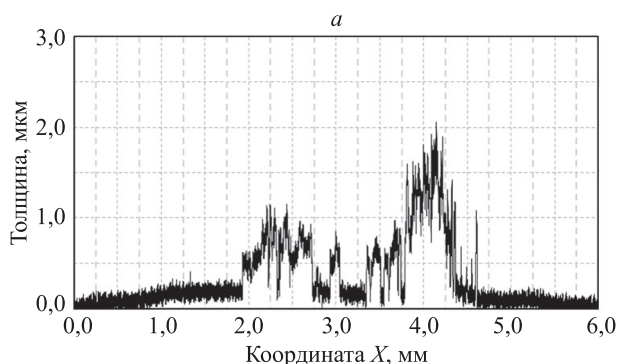


Рис. 6. Характерная профилограмма поверхности зоны осаждения, образованной при температуре 100 °C после воздействия 50 000 (a) и 100 000 лазерных импульсов (b), силиконовая резина EL SST

Fig. 6. The typical profilogram of the surface of the deposition zone formed at a temperature of 100 °C after exposure to 50,000 (a) and 100,000 laser pulses (b)

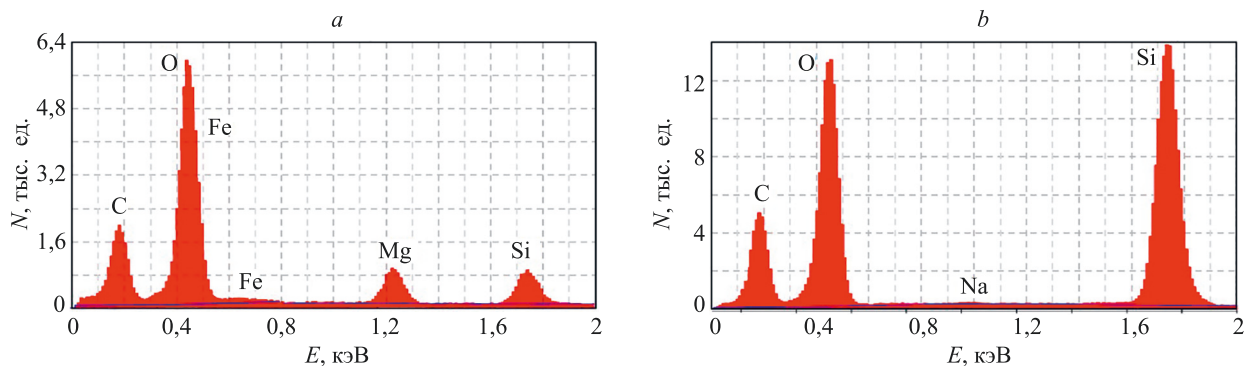


Рис. 7. Результаты рентгеноструктурного анализа образца силиконовой резины EL SST (a) и зоны осаждения, сформированной при температуре тест-кюветы 100 °C и 100 000 лазерных импульсов (b), где N — количество элементов, полученных в результате анализа, E — энергия электронов

Fig. 7. Results of X-ray diffraction analysis of a silicone rubber sample EL SST (Silicone Engineering, England) (a) and a deposition zone formed at a test cell temperature of 100 °C and 100,000 laser pulses (b), where N is the number of elements obtained as a result of the analysis, E is the electron energy

В результате исследования зоны осаждения на входном стекле тест-кюветы были обнаружены вещества, входящие в состав силиконовой резины EL SST, а именно кислород и кремний.

Закключение

Созданы и исследованы зоны осаждения, возникающие на поверхности кварцевого стекла в результате действия лазерного излучения на летучие компоненты, выделяющиеся из образца силиконовой резины EL SST (Silicone Engineering, Англия) в замкнутом объеме. Зоны осаждения исследованы в рамках лазерного многопараметрического метода. Определено, что динамика формирования зоны осаждения зависит от количества лазерных импульсов и температуры. Вычислены коэффициенты площади и ослабления зон осаждения, возникающих на поверхности оптических элементов герметичной тест-кюветы. Получена зависимость коэффициента площади зоны осаждения от температуры и количества лазерных импульсов.

Определена зависимость коэффициента ослабления от количества лазерных импульсов и температуры тест-кюветы. Исследованы элементный состав, цвет, устойчивость к действию растворителя и толщина зон осаждения. Установлено, что с ростом температуры и количества лазерных импульсов коэффициенты площади и ослабления зон осаждения увеличиваются, цвет не изменяется, а устойчивость к действию растворителя увеличивается. С ростом температуры зона осаждения, первоначально состоящая из микрофрагментов, становится сплошной, и формируется силиконовая пленка. С ростом количества лазерных импульсов ее толщина увеличивается, причем изменение количества лазерных импульсов в 2 раза, приводит к увеличению толщины пленки в 1,66 раза. Созданная силиконовая пленка может быть использована в качестве основы при проектировании биочипов и биосенсоров для размещения в ней биоактивных веществ и клеток. Возможность размещения этих активаторов в пленке нуждается в дальнейшем исследовании.

Литература

1. Kamaly N., Yameen B., Wu J., Farokhzad O.C. Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: mechanisms of controlling drug release // *Chemical Reviews*. 2016. V. 116. N 4. P. 2602–2663. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00346>
2. Barkalina N., Charalambous C., Jones C., Coward K. Nanotechnology in reproductive medicine: emerging applications of nanomaterials // *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2014. V. 10. N 5. P. e921–e938. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2014.01.001>
3. Furth M.E., Atala A., Van Dyke M.E. Smart biomaterials design for tissue engineering and regenerative medicine // *Biomaterials*. 2007. V. 28. N 34. P. 5068–5073. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.07.042>
4. Gandhi A., Paul A., Sen S.O., Kumar K.S. Studies on thermoresponsive polymers: Phase behaviour, drug delivery and biomedical applications // *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2015. V. 10. N 2. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2014.08.010>
5. Suhardi V.J., Bichara D.A., Kwok S.J.J., Freiberg A.A., Rubash H., Malchau H., Yun S.H., Muratoglu O.K., Oral E. A fully functional drug-eluting joint implant // *Nature Biomedical Engineering*. 2017. V. 1. N. 6. P. 0080. <https://doi.org/10.1038/s41551-017-0080>

References

1. Kamaly N., Yameen B., Wu J., Farokhzad O.C. Degradable controlled-release polymers and polymeric nanoparticles: mechanisms of controlling drug release. *Chemical Reviews*, 2016, vol. 116, no. 4, pp. 2602–2663. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00346>
2. Barkalina N., Charalambous C., Jones C., Coward K. Nanotechnology in reproductive medicine: emerging applications of nanomaterials. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*, 2014, vol. 10, no. 5, pp. e921–e938. <https://doi.org/10.1016/j.nano.2014.01.001>
3. Furth M.E., Atala A., Van Dyke M.E. Smart biomaterials design for tissue engineering and regenerative medicine. *Biomaterials*, 2007, vol. 28, no. 34, pp. 5068–5073. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2007.07.042>
4. Gandhi A., Paul A., Sen S.O., Kumar K.S. Studies on thermoresponsive polymers: Phase behaviour, drug delivery and biomedical applications. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2015, vol. 10, no. 2, pp. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2014.08.010>
5. Suhardi V.J., Bichara D.A., Kwok S.J.J., Freiberg A.A., Rubash H., Malchau H., Yun S.H., Muratoglu O.K., Oral E. A fully functional

6. Masood F. Polymeric nanoparticles for targeted drug delivery system for cancer therapy // *Materials Science and Engineering: C*. 2016. V. 60. P. 569–578. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.11.067>
7. Ulbrich K., Holá K., Šubr V., Bakandritsos A., Tuček J., Zbořil R. Targeted drug delivery with polymers and magnetic nanoparticles: covalent and noncovalent approaches, release control, and clinical studies // *Chemical Reviews*. 2016. V. 116. N 9. P. 5338–5431. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00589>
8. Soppimath K.S., Aminabhavi T.M., Kulkarni A.R., Rudzinski W.E. Biodegradable polymeric nanoparticles as drug delivery devices // *Journal of Controlled Release*. 2001. V. 70. N 1-2. P. 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(00\)00339-4](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(00)00339-4)
9. Mokhtarzadeh A., Alibakhshi A., Hejazi M., Omidi Y., Ezzati Nazhad Dolatabadi J. Bacterial-derived biopolymers: Advanced natural nanomaterials for drug delivery and tissue engineering // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2016. V. 82. P. 367–384. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.06.013>
10. Luo D., Gould D.J., Sukhorukov G.B. Local and sustained activity of doxycycline delivered with layer-by-layer microcapsules // *Biomacromolecules*. 2016. V. 17. N 4. P. 1466–1476. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00070>
11. Wang C., Zhang G., Liu G., Hu J., Liu S. Photo- and thermo-responsive multicompartment hydrogels for synergistic delivery of gemcitabine and doxorubicin // *Journal of Controlled Release*. 2017. V. 259. P. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.11.007>
12. Sukhorukov G.B., Donath E., Lichtenfeld H., Knippel E., Knippel M., Budde A., Möhwald H. Layer-by-layer self assembly of polyelectrolytes on colloidal particles // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1998. V. 137. N 1-3. P. 253–266. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00213-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00213-1)
13. Dhoot N.O., Wheatley M.A. Microencapsulated liposomes in controlled drug delivery: strategies to modulate drug release and eliminate the burst effect // *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 2003. V. 92. N 3. P. 679–689. <https://doi.org/10.1002/jps.19104>
14. Gai M., Frueh J., Kudryavtseva V.L., Mao R., Kiryukhin M.V., Sukhorukov G.B. Patterned microstructure fabrication: polyelectrolyte complexes vs polyelectrolyte multilayers // *Scientific Reports*. 2016. V. 6. P. 37000. <https://doi.org/10.1038/srep37000>
15. Gai M., Frueh J., Tao T., Petrov A.V., Shesterikov E.V., Tverdokhlebov S.I., Sukhorukov G.B. Poly(lactic acid) nano- and microchamber arrays for encapsulation of small hydrophilic molecules featuring drug release via high intensity focused ultrasound // *Nanoscale*. 2017. V. 9. N 21. P. 7063–7070. <https://doi.org/10.1039/C7NR01841J>
16. Беликов А.В., Ключков И.С., Алексеев И.В., Капралов С.А. Лазерный многопараметрический метод входного контроля монтажных элементов, используемых в объеме герметичных неодимовых лазерных излучателей // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021. Т. 21. № 2. С. 154–162. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-154-162>
17. Schneider C.W., Lippert T. Laser ablation and thin film deposition // *Springer Series in Materials Science*. 2010. V. 139. P. 89–112. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13281-0_5
18. Krebs H.-U., Weisheit M., Faupel J., Súske E., Scharf T., Fuhse C., Störmer M., Sturm K., Seibt M., Kijewski H., Nelke D., Panchenko E., Buback M. Pulsed laser deposition (PLD) — a versatile thin film technique // *Advances in Solid State Physics*. 2003. V. 43. P. 505–518. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44838-9_36
19. Dier A. Thin film deposition processes // *International Journal of Modern Physics and Applications*. 2015. V. 1. N 4. P. 193–199.
20. Wasa K., Kitabatake M., Adechi H. Thin film materials technology: Sputtering of compound materials. Walliam Andrew Inc, 2004. P. 1.
21. Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Неволин В.Н., Гнедовец А.Г. Особенности формирования тонкопленочных слоев металлооксидов в газо-сенсорной структуре Pt/WOx/SiC методом импульсного лазерного осаждения // *Перспективные материалы*. 2011. № 2. С. 5–16.
22. Кулинич С.А., Yamaki T., Miyazoe H., Yamamoto H., Terashima K. Влияние температуры подложки и скорости осаждения на начальный рост тонких пленок ниобата-танталата лития, полученных методом термальной плазмы // *Физика твердого тела*. 2006. Т. 48. № 5. С. 850–857.
23. Цаплин С.В., Болычев С.А. Исследование динамики осаждения конденсированных продуктов // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2014. Т. 14. № 3. drug-eluting joint implant. *Nature Biomedical Engineering*, 2017, vol. 1, no. 6, pp. 0080. <https://doi.org/10.1038/s41551-017-0080>
6. Masood F. Polymeric nanoparticles for targeted drug delivery system for cancer therapy. *Materials Science and Engineering: C*, 2016, vol. 60, pp. 569–578. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.11.067>
7. Ulbrich K., Holá K., Šubr V., Bakandritsos A., Tuček J., Zbořil R. Targeted drug delivery with polymers and magnetic nanoparticles: covalent and noncovalent approaches, release control, and clinical studies. *Chemical Reviews*, 2016, vol. 116, no. 9, pp. 5338–5431. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00589>
8. Soppimath K.S., Aminabhavi T.M., Kulkarni A.R., Rudzinski W.E. Biodegradable polymeric nanoparticles as drug delivery devices. *Journal of Controlled Release*, 2001, vol. 70, no. 1-2, pp. 1–20. [https://doi.org/10.1016/S0168-3659\(00\)00339-4](https://doi.org/10.1016/S0168-3659(00)00339-4)
9. Mokhtarzadeh A., Alibakhshi A., Hejazi M., Omidi Y., Ezzati Nazhad Dolatabadi J. Bacterial-derived biopolymers: Advanced natural nanomaterials for drug delivery and tissue engineering. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2016, vol. 82, pp. 367–384. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.06.013>
10. Luo D., Gould D.J., Sukhorukov G.B. Local and sustained activity of doxycycline delivered with layer-by-layer microcapsules. *Biomacromolecules*, 2016, vol. 17, no. 4, pp. 1466–1476. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.6b00070>
11. Wang C., Zhang G., Liu G., Hu J., Liu S. Photo- and thermo-responsive multicompartment hydrogels for synergistic delivery of gemcitabine and doxorubicin. *Journal of Controlled Release*, 2017, vol. 259, pp. 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2016.11.007>
12. Sukhorukov G.B., Donath E., Lichtenfeld H., Knippel E., Knippel M., Budde A., Möhwald H. Layer-by-layer self assembly of polyelectrolytes on colloidal particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 1998, vol. 137, no. 1-3, pp. 253–266. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(98\)00213-1](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(98)00213-1)
13. Dhoot N.O., Wheatley M.A. Microencapsulated liposomes in controlled drug delivery: strategies to modulate drug release and eliminate the burst effect. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2003, vol. 92, no. 3, pp. 679–689. <https://doi.org/10.1002/jps.19104>
14. Gai M., Frueh J., Kudryavtseva V.L., Mao R., Kiryukhin M.V., Sukhorukov G.B. Patterned microstructure fabrication: polyelectrolyte complexes vs polyelectrolyte multilayers. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, pp. 37000. <https://doi.org/10.1038/srep37000>
15. Gai M., Frueh J., Tao T., Petrov A.V., Shesterikov E.V., Tverdokhlebov S.I., Sukhorukov G.B. Poly(lactic acid) nano- and microchamber arrays for encapsulation of small hydrophilic molecules featuring drug release via high intensity focused ultrasound. *Nanoscale*, 2017, vol. 9, no. 21, pp. 7063–7070. <https://doi.org/10.1039/C7NR01841J>
16. Belikov A.V., Klochkov I.S., Alekseev I.V., Kapralov S.A. Laser multiparameter method for incoming inspection of the mounting elements used in the volume of sealed neodymium laser emitters. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 154–162. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-2-154-162>
17. Schneider C.W., Lippert T. Laser ablation and thin film deposition. *Springer Series in Materials Science*, 2010, vol. 139, pp. 89–112. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13281-0_5
18. Krebs H.-U., Weisheit M., Faupel J., Súske E., Scharf T., Fuhse C., Störmer M., Sturm K., Seibt M., Kijewski H., Nelke D., Panchenko E., Buback M. Pulsed laser deposition (PLD) — a versatile thin film technique. *Advances in Solid State Physics*, 2003, vol. 43, pp. 505–518. https://doi.org/10.1007/978-3-540-44838-9_36
19. Dier A. Thin film deposition processes. *International Journal of Modern Physics and Applications*, 2015, vol. 1, no. 4, pp. 193–199.
20. Wasa K., Kitabatake M., Adechi H. *Thin Film Materials Technology: Sputtering of Compound Materials*. Walliam Andrew Inc, 2004, pp. 1.
21. Fominski V.Yu., Romanov R.I., Nevolin V.N., Gnedovets A.G. Features of metal oxide thin film formation in Pt/WOx/SiC gas sensor device by pulsed laser deposition. *Perspektivnye materialy*, 2011, no. 2, pp. 5–16. (in Russian)
22. Kulninch S.A., Yamaki T., Miyazoe H., Yamamoto H., Terashima K. Effect of the substrate temperature and deposition rate on the initial growth of thin lithium niobate-tantalate films deposited from a thermal plasma. *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 5, pp. 904–911. <https://doi.org/10.1134/S1063783406050155>
23. Tsaplin S.V., Bolychev S.A. Research of the dynamics of condensed product deposition. *Vestnik of Samara University Aerospace and*

24. Пупань Л.И. Изучение структуры материалов методом электронной микроскопии: методические указания к выполнению лабораторной работы по курсу «Введение в нанотехнологии» / НТУ «Харьковский политехнический институт». Харьков, 2011. 35 с.

24. Pupan L.I. *The study of material structure by electron microscopy: guidelines for laboratory research on the course "Introduction to nanotechnologies"*. Kharkiv, Kharkiv Polytechnic Institute, 2011, 35 p. (in Russian)

Авторы

Беликов Андрей Вячеславович — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7005600018](https://orcid.org/0000-0001-8733-4860), <https://orcid.org/0000-0001-8733-4860>, volnagdg@yandex.ru

Клочков Иван Сергеевич — научный сотрудник, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация; аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57224086250](https://orcid.org/0000-0001-5461-783X), <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>, Vany-nov13@yandex.ru

Алексеев Иван Владимирович — ведущий инженер, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Санкт-Петербург, 190020, Российская Федерация, [El.magio@yandex.ru](https://orcid.org/0000-0002-4368-9309)

Капралов Сергей Анатольевич — кандидат технических наук, начальник отдела, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», Великий Новгород, 173003, Российская Федерация, [kapralov_sa@npksp.ru](https://orcid.org/0000-0002-3393-4948)

Authors

Andrey V. Belikov — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7005600018](https://orcid.org/0000-0001-8733-4860), <https://orcid.org/0000-0001-8733-4860>, volnagdg@yandex.ru

Ivan S. Klochkov — Scientific Researcher, Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Saint Petersburg, 190020, Russian Federation; PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57224086250](https://orcid.org/0000-0001-5461-783X), <https://orcid.org/0000-0001-5461-783X>, Vany-nov13@yandex.ru

Ivan V. Alekseev — Lead Engineer, Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Saint Petersburg, 190020, Russian Federation, [El.magio@yandex.ru](https://orcid.org/0000-0002-4368-9309)

Sergey A. Kapralov — PhD, Head of Section, Joint Stock Company “Research and Production Corporation “Precision Systems and Instruments”, Veliky Novgorod, 173003, Russian Federation, [kapralov_sa@npksp.ru](https://orcid.org/0000-0002-3393-4948)

Статья поступила в редакцию 05.11.2021
Одобрена после рецензирования 19.12.2021
Принята к печати 27.01.2022

Received 05.11.2021
Approved after reviewing 19.12.2021
Accepted 27.01.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»