

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. №4 (167). С.15-21.

Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. №5 (167). P.15-21.

Научная статья

УДК 539.234

doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-15-21

Развитие процесса импульсного лазерного осаждения наноразмерных структур

Александр Евгеньевич Шупенев¹, к.т.н.

Александр Григорьевич Григорьянц², д.т.н.

^{1,2} Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,
Россия, Москва

¹ ash@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0723-7492>

² Mt12@bmstu.ru, <https://orcid.org/0000-0000>

Аннотация. Представлены перспективные направления использования метода PLD: высокотемпературная сверхпроводимость, углеродные наноструктуры, термоэлектрические структуры и топологические изоляторы на основе теллурида висмута. Технологии физического осаждения тонких пленок в вакууме (PVD), такие как метод импульсного лазерного осаждения (PLD), играют важную роль в микроэлектронике и других отраслях промышленности. PLD начал активно развиваться в 1960-х гг., став мощным инструментом для создания наноразмерных пленок и высокотемпературных сверхпроводников. Одним из важнейших достижений PLD стало получение качественной пленки высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_7$, что открыло новые возможности в области сверхпроводников. Метод PLD обладает уникальным сочетанием свойств, обуславливающих высокую универсальность и широчайшие возможности для проведения исследований. Ключевой особенностью метода PLD является мощное (более 1 МВт/см²) воздействие на мишень короткими (менее 30 нс) импульсами. Метод основан на испарении мишени лазерным лучом и осаждении материала на подложку в вакуумной среде. Особенностью PLD является высокая точность контроля состава и структуры осажденных материалов, что делает его уникальным среди других методов PVD. PLD также широко используется для получения углеродных наноструктур, включая графен и алмазоподобные покрытия (DLC), которые находят применение в различных сферах, от суперконденсаторов до медицинских имплантов. Кроме того, метод PLD успешно применяется для формирования тонкопленочных термоэлектрических материалов на основе теллурида висмута, которые используются в сенсорах и системах стабилизации температуры. Высокая универсальность и эффективность PLD делают его ключевым инструментом в современных исследованиях и разработках новых материалов в микроэлектронике, квантовых технологиях и энергетике.

Ключевые слова: импульсное лазерное осаждение, тонкие пленки, алмазоподобные структуры, высокотемпературный сверхпроводник, пленочный термоэлемент, топологический изолятор

Для цитирования: Шупенев А.Е., Григорьянц А.Г. Развитие процесса импульсного лазерного осаждения наноразмерных структур // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2025. № 5 (167). С. 15–21.
doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-15-21

Development of pulsed laser deposition process in nanodimensional structures

Alexander E. Shupenev¹, PhD. Eng.

Alexander G. Grigoryants², D. Eng.

^{1,2} Moscow State Technical University named after N.E. Bauman, Russia, Moscow

¹ ash@bmstu.ru

² Mt12@bmstu.ru

Abstract. Promising directions of PLD method application are presented: high-temperature superconductivity, carbon nanostructures, thermoelectric structures and topological insulators based on bismuth telluride. Vacuum physical deposition of thin films (PVD) technologies, such as pulsed laser deposition (PLD), play an important part in microelectronics and other industries. PLD has been actively developed since the 1960s, becoming a powerful tool for creating nanoscale films and high-temperature superconductors. One of the most important achievements of PLD was the production of a high-quality film of the high-temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_7$, opening up new opportunities in the field of superconductors. The PLD method has a unique combination of properties that provide high versatility and broad research potentialities. The key feature

of the PLD method is the powerful (more than 1 MW/cm^2) impact on the target with short (less than 30 ns) pulses. The method is based on evaporation of a target by a laser beam and deposition of the material on a substrate in a vacuum environment. A special feature of PLD is the high accuracy of control of the composition and structure of deposited materials, which makes it unique among other PVD methods. PLD is also widely used to produce carbon nanostructures, including graphene and diamond-like coatings (DLCs), which find applications in various fields, from supercapacitors to medical implants. In addition, the PLD method has been successfully applied to the formation of thin-film thermoelectric materials based on bismuth telluride, which are used in sensors and temperature stabilization systems. Wide versatility and efficiency of PLD make it a key tool in modern research and development of new materials in microelectronics, quantum technologies and energy.

Keywords: pulsed laser deposition, thin films, diamond-like structures, high-temperature superconductor, film thermoelectric element, topological insulator

For citation: Shupenev A.E., Grigoryants A.G. Development of pulsed laser deposition process in nanodimensional structures / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2025. № 5 (167). P. 15–21. doi: 10.30987/2223-4608-2025-5-15-21

История PLD

Технологии физического осаждения тонких пленок в вакууме (PVD) являются фундаментальными для микроэлектроники и востребованы во многих других отраслях промышленности. Интерес к процессам лазерной абляции появился в 1960-х гг. Фундаментальные исследования в данной области выделили лазерно-индуцированную плазму (LIP) в отдельное новое направление исследований. Одной из первых работ по исследованию LIP считается работа 1963 г. советских ученых Г.А. Аскарьяна и Е.М. Мороз из ФИАН им. П.Н. Лебедева [1] по расчету ударного воздействия LIP при абляции твердой мишени. В то же время были и зарубежные работы посвященные исследованию электронно-ионной структуры LIP [2 – 4]. В 1965 г. Смитом и Тёрнером был проведен первый эксперимент по PLD [5], в котором с помощью рубинового лазера были получены наноразмерные пленки из 11 различных материалов. В начале 1980 г. метод PLD пополнил ряды PVD методов получения тонких пленок: в исследованиях, проводимых в МИФИ и ИПФ РАН [6 – 8] с помощью Nd:YAG лазера были получены более 50 различных составов наноразмерных пленок для которых были определены эффективные плотности мощности лазерной обработки и перспективы их использования при изготовлении рентгеновских зеркал. Первым выдающимся результатом, показавшим уникальность возможностей метода PLD считается получение качественной пленки высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ в 1987 г. [9], что было недостижимо ни одним другим PVD методом. С тех

пор метод PLD получил особое развитие и активно используется в настоящее время в мире для решения самых современных исследовательских задач.

Устройство и достоинства процесса PLD

Типичная схема метода импульсного лазерного осаждения остается неизменной с 1960-х гг. (рис. 1.): Laser – лазерное излучение; Heater – нагреватель; VAC – вакуумная система; MFC – контроллер напуска технологических газов; PS – датчик давления; RHEED – электронная пушка ДБЭ; CAM – камера.

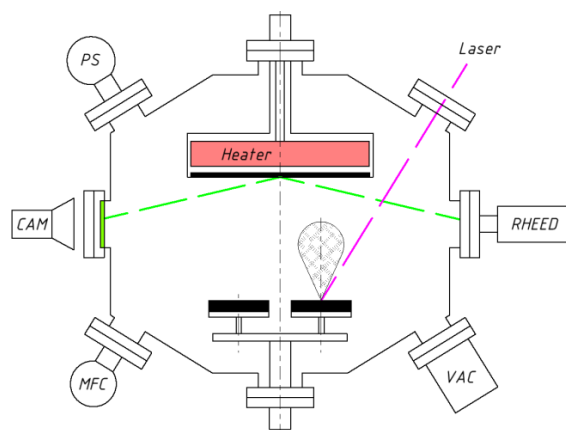


Рис. 1. Типичная схема процесса импульсного лазерного осаждения

Fig. 1. Typical scheme of the pulsed laser deposition process

Лазерный луч испаряет материал мишени, и образованная лазерно-индуцированная плазма осаждается на поверхности подложки, формируя тонкую пленку. Процесс проводится

в вакуумной камере с контролируемой атмосферой. В камере поддерживается давление от атмосферного до высокого вакуума, возможна контролируемая подача реакционных (O_2 , N_2) или инертных (N_2 , Ar) газов. Над подложкой располагается резистивный или ламповый нагреватель для обеспечения требуемой температуры подложки. Для обеспечения однородности процесса имеется ряд кинематических особенностей: вращение подложки и мишеней, вращение карусели мишеней, сканирование лазерного луча по поверхности мишени.

В подавляющем большинстве случаев используется импульсное излучение длительностью порядка десятков наносекунд или менее. Импульсный характер лазерной абляции является одной из основных особенностей, обуславливающих некоторые сильные стороны метода PLD, а именно конгруэнтный перенос материала сложного химического состава. Сложность конгруэнтного переноса многокомпонентного материала традиционными PVD методами заключается в наличии разницы парциальных давлений различных атомарных компонент, что приводит к неравномерному разлету материала (тяжелые атомы испаренного вещества вытесняют более легкие) и неоднородности свойств полученной пленки. В методе PLD испаренный материал за короткий (менее 30 нс) промежуток времени нагревается до температур плазмы порядка 10000 градусов, что нивелирует разницу парциальных давлений и приводит к равномерному распределению атомарных компонент по

сечению облака разлета. Импульсный характер обработки приводит к безынерционному процессу роста пленки (скважность осаждения слоев на порядки превышает характерные времена жизни осажденных атомов на поверхности подложки), высокой точности контроля толщины (статистически, за 1 импульс осаждается порядка 0,01 нм пленки), малому термическому влиянию на мишень.

Оптический характер воздействия на материал мишени предоставляет исключительную гибкость в условиях осаждения – возможность использования как вакуумной, так и реакционной газовой среды, возможность как высокого нагрева подложки, так и проведения холодного процесса, а также возможность добавления других методов воздействия для проведения гибридных процессов.

Стоит отметить особую структуру лазерно-индуцированной плазмы (LIP) в процессе PLD, которая не характерна для любых других PVD методов получения тонких пленок. Информация о структуре LIP в PLD получается с помощью метода зондовой диагностики и является предметом современных исследований. Из работ [10 – 12] следует, что LIP неоднородна и можно выделить 4 характерные области, показанные на рис. 2: электронная оболочка (1), быстрые ионы (2), основная ионизированная часть (3) и макрочастицы (4). Характерные скорости ионных компонент в процессе PLD, полученные из времяпролетных кривых, находятся в диапазоне от 10 до 100 км/с.

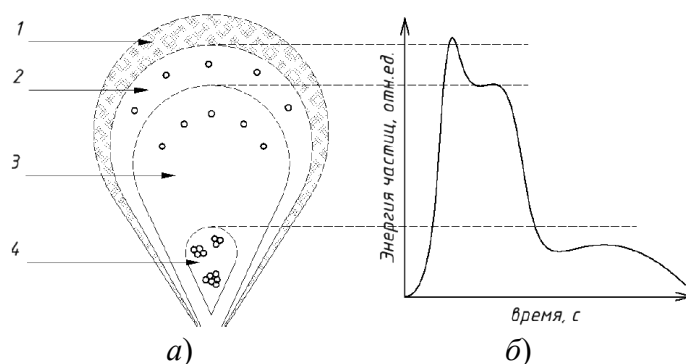


Рис. 2. Структура газо-плазменного облака в методе PLD:
а – состав газо-плазменного облака; б – времяпролетная характеристика

Fig. 2. The structure of the gas-plasma cloud in the PLD method:
а – the composition of the gas-plasma cloud; б – TOF characteristics

На кафедре МТ12 «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана метод PLD реализован на основе эксимерного KrF лазерного излучателя длиной волны 248 нм, энергией от 50 до 200 мДж, длительностью импульсов 30 нс, частотой генерации до 20 Гц. Двуступенчатая вакуумная система позволяет обеспечить вакуум не хуже 10^{-7} торр, а также подавать в камеру до 3 видов технологических газов расходом до 150 куб.см/мин. Используются до 6 мишеней размером 25 мм и одна подложка диаметром не более 100 мм. Расстояние между мишенью и подложкой изменяется в пределах от 60 до 130 мм. Температура резистивного нагревателя подложки может устанавливаться до 950 °С в общем случае и до 850 °С в среде O₂. Очистка подложек может проводиться в модуле плазменно-химической очистки мощностью до 150 Вт при частоте 13,65 МГц в среде N₂/O₂/Ar.

Высокотемпературные сверхпроводящие материалы

Как было сказано ранее, получение ВТСП слоев можно считать самым традиционным использованием метода PLD. Высокотемпературными сверхпроводниками называются материалы, проявляющие сверхпроводящие свойства при температурах выше температуры кипения жидкого азота (-196 °С). Ярким представителем ВТСП является сверхпроводник YBCO (оксид иттрия-бария-меди), с критической температурой -180 °С при атмосферном давлении.

Имеется множество перспективных направлений использования ВТСП материалов: сверхчувствительные сенсоры магнитного поля [13], силовые линии электропередачи, быстрые самовосстанавливающиеся токовые ограничители, быстрые электронные схемы на основе эффекта Джозефсона и многие другие.

На кафедре МТ12 проведены исследования по получению высокотемпературных сверхпроводников второго поколения (ВТСП-2). ВТСП-2 представляет собой многослойную ленту, изготовленную на основе R-Ba-Cu-O (RBCO, где R – редкоземельный элемент). Она включает в себя металлическую ленту-подложку, буферные, сверхпроводящий и защитные слои. Буферные слои выполняют

несколько функций: предотвращение диффузии металла от ленты в слой сверхпроводника, согласование кристаллических решеток и коэффициентов теплового расширения, а также создают определенную структуру для эпитаксиального роста ВТСП пленки. В процессе напыления ВТСП слоя необходимо получить определенную структуру пленки и химический состав, в противном случае характеристики такой ленты окажутся на низком уровне. Так, например, при разориентации соседних зерен на величину до 10 градусов, плотность критического тока снижается на порядок величины.

Осаждение слоев ВТСП на кафедре МТ12 осуществлялось на монокристаллическую подложку SrTiO₃ эпитаксиальной полировки с кристаллографической ориентацией <100>, а также на металлическую ленту, с предварительно нанесенными буферными слоями NiW/Y₂O₃/YSZ/CeO₂. Перед процессом импульсного лазерного осаждения поверхность образцов подготавливалась в модуле плазменно-химической очистки, находящемся в едином вакуумном тракте с модулем PLD. Очистка проводилась в атмосфере 99,9% Ar при давлении $2 \cdot 10^{-1}$ торр в течение 45...60 минут, при мощности ВЧ генератора 50...75 Вт и частоте 13,65 МГц, после чего подложки без развакуумирования перемещались транспортной системой в модуль импульсного лазерного осаждения. Осаждение пленок проводилось в среде кислорода при давлении $5 \cdot 10^{-1}$ торр. Температура нагревателя выдерживалась на уровне 850 °С. Плотность энергии лазерного излучения на поверхности мишени составила 2 Дж/см², длина волны лазерного излучения 248 нм, длительность импульса 30 нс, расстояние между мишенью и подложкой равнялось 65 мм.

Элементный анализ мишени и пленки YBCO, полученной на подложке SrTiO₃ эпитаксиальной полировки с кристаллографической ориентацией <100> показал, что сложный химический состав многокомпонентной мишени переносится на подложку в процессе импульсного лазерного осаждения конгруэнтно. Рентгеноструктурный анализ пленки YBCO на металлической ленте, полученных на кафедре МТ12, показал, что пленка YBCO на металлической ленте имеет преимущественно а-ориентацию, а доля с-ориентированных зерен невелика.

Углеродные структуры

Первые графеновые слои были получены в 1970 году Джоном Грантом и Блэкли, а полноценно изучены в 2004 году Андреем Геймом и Константином Новосёловым, которые получили Нобелевскую премию по физике за 2010 год. Столь высокий интерес к различным структурам углерода обусловлен уникальным разнообразием образуемых структур и множеством необычных свойств, часто уникальных и превосходящих свойства других материалов [14]. На текущий день известно множество различных методов получения структур графена, в том числе массового производства углеродных нанотрубок (например, первой российской «фирмой-единорогом» OCSiAl).

Методом PLD получают графен, углеродные нанотрубки, алмазоподобные структуры. Получаемые методом PLD структуры графена перспективны для суперконденсаторов, фоточувствительных элементов, создания диодов, солнечных элементов.

Отдельный интерес представляет получение алмазоподобных углеродных DLC (diamond-like carbon) покрытий. DLC покрытия получают из обычного пиролитического графита высокой чистоты или высокоориентированного пиролитического HOPG-графита. DLC покрытия представляют собой углеродную матрицу, включающую углеродные sp^2 и алмазные sp^3 -фазы. Наличие алмазных фаз определяет особые свойства DLC покрытий, таких как высокая (до 100 ГПа) твердость, низкие износ и коэффициент трения, высокое удельное сопротивление, химическая инертность и коррозионная стойкость, большой коэффициент теплопроводности, биосовместимость. Низкий коэффициент трения и высокая твердость обусловили использование DLC-пленок в качестве защитных износостойких покрытий для режущего инструмента и оптических поверхностей.

На кафедре МТ-12 «Лазерные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н.Э. Баумана методом PLD были получены DLC покрытия с целью упрочнения внешних поверхностей оптических элементов космических летательных аппаратов. Исследования свойств образцов проводились методами рамановской спектроскопии, эллипсометрии и микроиндентирования. Образцы упрочняющих пленок

DLC, полученные нами методом PLD показали возможность значительного (примерно в 2 раза) упрочнения оптической поверхности и превосходство свойств (твердость 26 ГПа, 51 % содержание sp^3 -фазы) над образцами DLC, полученными методом вакуумно-дугового осаждения с сепарацией плазмы (твердость 15 ГПа, 13 % содержание sp^3 -фазы) [15].

Комплексные структуры на основе висмута

У данного класса материалов наблюдаются одни из наиболее высоких показателей термоэлектрической добротности при комнатном диапазоне температур. Это обуславливает их высокую востребованность на уже существующем рынке термоэлектрических преобразователей от термоэлектрических генераторов до тепловых сенсоров и систем температурной стабилизации. В области термоэлектричества можно выделить две принципиальные технологии изготовления термоэлектрического материала: традиционную объемную и пленочную. Тонкопленочные термоэлементы на основе теллурида висмута используются в радиометрии, микрокалориметрии, в газовых сенсорах, для измерения энергетических характеристик лазерного излучения, тепловых потоков, в MEMS-измерительных микросистемах, в космических аппаратах и др.

Традиционно, термопары пленочных термоэлементов изготавливались из чистых n -Bi и p -Sb, коэффициенты Зеебека которых составляют 50...70 мкВ/°С и, как следствие, эффективность которых невысокая. Использование чистых материалов, обладающих невысокой эффективностью термоэлектрического преобразования, обусловлено сложностью получения многокомпонентных тонких пленок PVD методами. На кафедре МТ12 был освоен процесс получения высокоэффективных пленок p -Bi_{0.5}Sb_{1.5}Te₃ и n -Bi₂Te_{2.7}Se_{0.3} толщиной от 10 до 1000 нм на подложках Si, Al₂O₃, AlN и гибких полиимидных подложках методом PLD. Осаждение пленок осуществлялось при температурах подложек 20...400 °С, расстояниях от мишени до подложки 70...130 мм, давлениях 10^{-7} ...1 торр защитного газа (Ar 99,99%) и плотностях энергии лазерного

излучения $1,0 \dots 2,5 \text{ Дж/см}^2$. На полиимидных подложках полученные нами пленки $p\text{-Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ и $n\text{-Bi}_2\text{Te}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ обладают высокими значениями коэффициента Зеебека 220 и 200 мкВ/К, что говорит об их высоком качестве. Данная технология легла в основу изготовления ряда сенсоров широкодиапазонных (от 350 нм до 10 мкм) измерителей оптического излучения мощностью от 100 мкВт до 15 кВт с характерной обнаружительной способностью наиболее чувствительных образцов порядка $10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} / \text{Вт}^{-1}$ [16 – 18].

Заключение

Метод PLD обладает уникальным сочетанием свойств, обуславливающих высокую универсальность и широчайшие возможности для проведения исследований. Ключевой особенностью метода PLD является мощное (более 1 МВт/см^2) воздействие на мишень короткими (менее 30 нс) импульсами. В МГТУ им. Н.Э. Баумана метод PLD видит свое развитие в следующих направлениях:

1. Развитие в области высокотемпературных сверхпроводников: метод PLD может применяться для создания тонкопленочных высокотемпературных сверхпроводников (HTS), что может ускорить развитие квантовой вычислительной техники и сверхпроводящих силовых линий.

2. PLD перспективен для получения передовых углеродных структур, таких как графен и алмазоподобные покрытия (DLC), что откроет новые горизонты в микроэлектронике, энергетике и медицине.

3. PLD может способствовать разработке высокоэффективных тонкопленочных термоэлектрических материалов, что будет востребовано в системах энергосбережения и температурной стабилизации.

4. В перспективе метод PLD будет использоваться в производстве топологических изоляторов и других инновационных материалов, что откроет новые возможности в области фотодетектирования, сенсорных технологий и квантовой микроэлектроники.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Askar'Yan G.A., Moroz E.M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1963. Vol. 16. P. 1638.
2. Honig R.E., Woolston J.R. Laser-induced emission of electrons, ions, and neutral atoms from solid surfaces // Appl. Phys. Lett. 1963. Vol. 2, № 7. P. 138–139.
3. Lichtman D., Ready J.F. Laser Beam Induced Electron Emission // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1963. Vol. 10, № 8. P. 342–345.
4. Ready J.F. Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics, 1963. Vol. 3, № 1. P. 11–13.
5. Smith H.M., Turner A.F. Vacuum Deposited Thin Films Using a Ruby Laser // Appl. Opt. 1965. Vol. 4, № 1. P. 147.
6. Аристов В. Фокусирующие свойства профилированных многослойных рентгеновских зеркал // Письма в ЖЭТФ. № 4. 1986. С. 207–209.
7. Гаронов S. et al. Long-wave X-ray radiation mirrors // Optics communications. Elsevier, 1981. Vol. 38, № 1. P. 7–9.
8. Бояков В.М. Напыление пленок химических элементов с помощью лазера на неодимовом стекле // Квантовая электроника. № 7. 1978. С. 1582–1584.
9. Dijkkamp D. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51, № 8. P. 619–621.
10. Хайдуков Е. Зондовые исследования лазерного эрозионного факела при абляции кремния в вакууме // Журнал технической физики. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический..., № 4. 2010. С. 59–63.
11. Irimiciuc S.A. Langmuir Probe Technique for Plasma Characterization during Pulsed Laser Deposition Process // Coatings. 2021. Vol. 11, № 7. P. 762.
12. Hansen T.N., Schou J., Lunney J.G. Langmuir probe study of plasma expansion in pulsed laser ablation // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 1999. Vol. 69, № 7. P. S601–S604.
13. Drung D. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. IEEE, 2007. Vol. 17, № 2. P. 699–704.
15. Шупенев А. et al. Лазерная обработка поверхностей пластин теплообменников DLC-покрытиями // Электрометаллургия. 2021. № 5. С. 23–30.
16. Григорьянц А.Г., Мисюров А.И., Башков В.М., Шупенев А.Е., Миронов Ю.М. Анализ поверхности тонких пленок Bi_2Te_3 осажденных методом импульсной лазерной абляции // Наука и образование. 2011. № 10.

17. Shupenev A. Bismuth-Telluride-Based Radiation Thermopiles Prepared by Pulsed Laser Deposition // Semiconductors. 2019. Vol. 53, № 6. P. 747–751.

18. Shupenev A.E., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. On the Pulsed-Laser Deposition of Bismuth-Telluride Thin Films on Polyimide Substrates // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 3. P. 378–382.

REFERENCES

1. Askar'Yan G.A., Moroz E.M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1963. Vol. 16. P. 1638.

2. Honig R.E., Woolston J.R. Laser-induced emission of electrons, ions, and neutral atoms from solid surfaces // Appl. Phys. Lett. 1963. Vol. 2. № 7. P. 138–139.

3. Lichtman D., Ready J.F. Laser Beam Induced Electron Emission // Phys. Rev. Lett. American Physical Society, 1963. Vol. 10. № 8. P. 342–345.

4. Ready J.F. Development of plume of material vaporized by giant-pulse laser // Appl. Phys. Lett. American Institute of Physics, 1963. Vol. 3. № 1. P. 11–13.

5. Smith H.M., Turner A.F. Vacuum Deposited Thin Films Using a Ruby Laser // Appl. Opt. 1965. Vol. 4. № 1. P. 147.

6. Aristov V. Focusing properties of shaped multilayer X-ray mirrors // Letters to ZhETF. 1986. Vol. 44. no. 4. pp. 207–209.

7. Gaponov S. et al. Long-wave X-ray radiation mirrors // Optics communications. Elsevier, 1981. Vol. 38. № 1. P. 7–9.

8. Boyakov V.M. Application of polymers using a laser on a neodymium screen // Quantum Electronics. 1978, Vol. 5. no. 7. pp. 1582–1584.

9. Dijkkamp D. Preparation of Y-Ba-Cu oxide superconductor thin films using pulsed laser evaporation from high Tc bulk material // Appl. Phys. Lett. 1987. Vol. 51, № 8. P. 619–621.

10. Khaydukov E. Probe studies of laser erosion plume arising at silicon ablation in vacuum. Technical Physics. Federal State Budgetary Institution of Science of Physico-Technical. 2010, vol. 80. no. 4. pp. 59–63.

11. Irniciuc S.A. Langmuir Probe Technique for Plasma Characterization during Pulsed Laser Deposition Process // Coatings. 2021. Vol. 11, № 7. P. 762.

12. Hansen T.N., Schou J., Lunney J.G. Langmuir probe study of plasma expansion in pulsed laser ablation // Applied Physics A: Materials Science & Processing. 1999. Vol. 69, № 7. P. S601–S604.

13. Drung D. Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. IEEE, 2007. Vol. 17. № 2. P. 699–704.

14. Shupenev A. et al. Laser surface treatment of heat exchanger plates with DLC coatings // Electrometallurgy. 2021, no. 5, pp. 23–30.

15. Grigoryants A.G., Misyurov A.I., Bashkov V.M., Shupenev A.E., Mironov Yu.M. Surface analysis of Bi₂Te₃ thin films deposited by pulsed laser ablation // Science and Education. 2011. no. 10.

16. Shupenev A. Bismuth-Telluride-Based Radiation Thermopiles Prepared by Pulsed Laser Deposition // Semiconductors. 2019. Vol. 53, № 6. P. 747–751.

17. Shupenev A.E., Korshunov I.S., Grigoryants A.G. On the Pulsed-Laser Deposition of Bismuth-Telluride Thin Films on Polyimide Substrates // Semiconductors. 2020. Vol. 54, № 3. P. 378–382.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.12.2024; одобрена после рецензирования 21.02.2025; принята к публикации 10.03.2025.

The article was submitted 05.12.2024; approved after reviewing 21.02.2025; accepted for publication 10.03.2025.