04

Измерение конверсионной эффективности лазерно-плазменного источника для ЭУФ литографии на длине волны 11.2 nm с различными соплами

© В.Е. Гусева, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало

Институт физики микроструктур РАН,
607680 Нижний Новгород, Россия
e-mail: perekalov@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 15 июня 2026 г.
В окончательной редакции 15 июня 2026 г.
Принято к публикации 15 июня 2026 г.

Описаны результаты измерения конверсионной эффективности для лазерно-плазменного источника ЭУФ излучения с газоструйной мишенью. Для формирования мишени использовалось истечение Xe струи в вакуум через конусные сопла, оснащенные импульсным клапаном. Формирование плазмы осуществлялось за счет сфокусированного излучения Nd:YAG-лазера с длительностью импульса 5.2 ns и энергией импульса 0.7 J. Плотность мощности излучения в области взаимодействия с мишенью составляла 10^{13} W/cm^2. Измерение конверсионной эффективности источника проводилось в 2% спектральной полосе на длине волны 11.2 nm для ряда сопел длиной 5 mm с различными диаметрами критического сечения и углами раскрыва конуса. Установлено, что вид зависимости конверсионной эффективности от давления газа для сопел с разным диаметром критического сечения различен. Для сопел с разным углом раскрыва конуса зависимости подобны и отличаются только по величине конверсионной эффективности. Наибольшая конверсионная эффективность зарегистрирована для сопла с диаметром критического сечения 250 μm, угол 7°, и составила 2.5%.

Ключевые слова: лазерная плазма, ЭУФ излучение, газоструйные мишени, конверсионная эффективность.

DOI: 10.61011/JTF.2026.09.63488.220-26

Введение

Источник экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения — один из ключевых элементов, необходимых для создания ЭУФ литографических машин. В связи с успехами в синтезе отражающих многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) на основе Be с коэффициентами отражения, превышающими 70% [1–4], была предложена идея организовать литографический процесс на длине волны 11.2 nm. Для такого процесса в качестве источника ЭУФ излучения предлагается использовать лазерную плазму, генерируемую импульсным лазерным излучением в газовой струе Xe. Как показано в работе [5], такой подход может позволить достичь производительности литографа на уровне производительности, достигнутой на литографе с длиной волны 13.5 nm, в котором используется мишень на основе олова. При этом переход к мишени из инертного ксенона позволит существенно снизить загрязнение оптических элементов литографической машины продуктами разрушения мишени.

Наиболее важная характеристика источника ЭУФ излучения, разрабатываемого для использования в литографических машинах, — высокая конверсионная эффективность ($CE_{2\pi,2\%}$, CE), которая представляет собой отношение энергии, излучаемой ионами плазмы в 2% спектральную полосу в окрестности рабочей длины волны источника в телесный угол 2π sr, к энергии лазерного импульса. Исследованиям, направленным на измерение значения CE лазерно-плазменного источника с газовой мишенью Xe и оптимизацию источника, посвящено достаточно большое количество статей российских [6–9] и зарубежных [10–14] авторов. Зарегистрированные значения CE составляют от полупроцента до нескольких процентов, при этом на длине волны 11.2 nm наблюдается более высокая конверсионная эффективность источника по сравнению с 13.5 nm. Наиболее высокая конверсионная эффективность на длине волны 11.2 nm зарегистрирована в работе [7] и составляет 3.8%, также авторы отмечают, что при изученных ими экспериментальных условиях CE на длине волны 11.2 nm превышает CE на длине волны 13.5 nm практически в 10 раз. Большинство авторов исследований работало с лазерными системами с невысокой частотой следования импульсов (10 Hz и менее), как следствие, средняя мощность лазерного излучения составляла около 10 W. Как видно, средняя по времени мощность ЭУФ излучения на длине волны 11.2 nm составляет не более 0.5 W. Использование низкочастотных систем возбуждения и формирования струи-мишени связано с необходимостью поддержания низкого уровня остаточного давления в вакуумной камере установки (порядка 10^{-3} Torr) для того чтобы избежать поглощения излучения с длиной волны 11.2 nm остаточным ксеноном [15]. Для этого системы подачи рабочего газа в вакуумную камеру оснащаются импульсными клапанами, которые могут

работать только при сравнительно низких частотах. В высокопроизводительных ЭУФ литографах необходим источник с высокой средней мощностью ЭУФ излучения, для чего наиболее оптимально использовать высокочастотные лазерные системы (1–10 kHz). Данное условие приводит к необходимости использовать сопла постоянного истечения (без импульсного клапана).

Ранее авторами настоящей работы был разработан, изготовлен и запущен в эксплуатацию исследовательский стенд для изучения характеристик мощных лазерно-плазменных источников (ЛПИ) ЭУФ излучения. Стенд оснащен мощной откачной системой, что позволяет поддерживать низкий уровень остаточного давления в вакуумной камере и оборудован рядом диагностических приборов, позволяющих проводить комплексное исследование характеристик источника ЭУФ излучения. Настоящая работа посвящена измерениям конверсионной эффективности ЛПИ на длине волны 11.2 nm, достигаемой при формировании ксеноновой струи-мишени коническими сверхзвуковыми соплами с различными углами раскрыва и диаметрами критического сечения.

1. Описание исследовательского стенда и постановки эксперимента

Экспериментальная часть работы проводилась на стенде для изучения характеристик мощных лазерно-плазменных источников ЭУФ излучения, подробно описанном в [16]. Схематично устройство стенда показано на рис. 1.

Работа стенда происходит следующим образом: излучение Nd:YAG-лазера *1* фокусируется с помощью трехлинзового объектива *2* в газовую мишень, находящуюся внутри вакуумной камеры. Первая линза объектива — рассеивающая, имеет сферическую плоско-вогнутую форму. Ее диаметр составляет 25.4 mm, радиус кривизны сферической поверхности — 79.5 mm, фокусное расстояние $f = 150$ mm. Вторая линза — собирающая, имеет сферическую плоско-выпуклую форму. Диаметр линзы 50.8 mm, радиус кривизны сферической поверхности — 234 mm, фокусное расстояние $f = 450$ mm. Рассеивающая и собирающая линзы были расположены на расстоянии 300 mm друг от друга так, чтобы обеспечить параллельность пучка, выходящего после собирающей линзы. При этом после прохождения двух линз диаметр лазерного пучка увеличивается с 10 до 38 mm. Третья линза — фокусирующая, имеет сферическую плоско-выпуклую форму, диаметр линзы составляет 50.8 mm, радиус кривизны сферической поверхности — 257 mm, фокусное расстояние $f = 500$ mm. На поверхности всех трех линз нанесено просветляющее покрытие на длину волны 1064 nm. Использование трехлинзового объектива необходимо для того чтобы уменьшить поперечный размер пятна фокусировки лазерного излучения. В области взаимодействия лазерного излучения с мишенью формируется лазерная искра *3*. Часть энергии лазерного импульса, не взаимодействовавшая с плазмой, выходит из объема вакуумной камеры. При этом пучок имеет диаметр значительно больший, чем размер чувствительного элемента калориметра, поэтому прошедший пучок фокусируется линзой *4*, после чего небольшая часть излучения отражается от плоскопараллельной пластины из кварцевого стекла *5* и попадает на измеритель мощности *6*. Измеритель мощности расположен так, чтобы чувствительный элемент оказался вне фокуса лазерного излучения. Это нужно, чтобы избежать повреждения чувствительного элемента, но при этом смещение от точки фокусировки не должно быть слишком большим. Основная часть пучка, прошедшая через плоскопараллельную пластину, попадает в металлическую заглушку *7*.

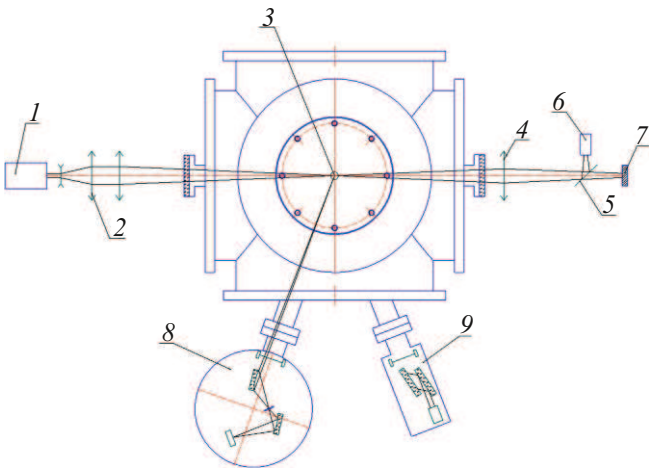

Рис. 1. Схема устройства экспериментального стенда: *1* — Nd:YAG-лазер, *2* — трехлинзовый фокусирующий объектив, *3* — лазерная искра, *4* — фокусирующая линза, *5* — кварцевое стекло, *6* — калориметр ИМО-2, *7* — металлическая заглушка, *8* — решеточный спектрограф, *9* — двухзеркальный измеритель мощности ЭУФ излучения.

ЭУФ излучение лазерной искры детектируется с помощью решеточного спектрографа *8*, и двухзеркального измерителя мощности ЭУФ излучения *9*. Решеточный спектрограф [17] позволяет регистрировать спектр излучения плазмы в диапазоне длин волн 3–25 nm с разрешением 0.05 nm. Основными оптическими элементами спектрографа являются дифракционная решетка с переменной частотой штрихов и фокусирующее сферическое зеркало. Регистрация излучения, прошедшего через оптические элементы прибора, осуществляется с помощью КМОП матрицы с размером пикселя 6.5 μm. Решения, реализованные в конструкции спектрографа, позволяют получить хорошее спектральное разрешение и высокую светосилу прибора. Регистрация спектра ЭУФ излучения источника в диапазоне 3–25 nm обычно занимает от 1 до 10 s. Работа полосового измерителя мощности ЭУФ излучения [18] основана на брэгговском отражении излучения от МРЗ, при этом отражение происходит от двух последовательно расположенных зеркал, что позволяет выделять более узкую спектральную полосу. Для

данного прибора был синтезирован комплект из двух Mo/Si-зеркал и Zr/Ru-пленочного фильтра, необходимый для проведения измерений в полосе 11.2 nm ± 1 %. Все оптические элементы приборы, а также детектор излучения, прокалиброваны на лабораторных рефлектометрах и синхротроне. Измеритель мощности регистрирует излучение лазерной искры в малом телесном угле порядка 10^{-5} sr. Таким образом, зная величину сигнала, регистрируемого детектором, можно вычислить энергию, которую излучает лазерная искра в 2 % спектральную полосу вблизи 11.2 nm в телесный угол 2π. При расчете предполагается, что распределение интенсивности ЭУФ излучения лазерной искры по углам изотропно:

$$E_{2\%} = \frac{2\pi \cdot \alpha V}{\gamma \delta T^2 R}.$$

где V — сигнал детектора, [V], α — чувствительность усилителя, δ — чувствительность детектора, R — коэффициент отражения многослойного зеркала, T — коэффициент пропускания пленочного фильтра, γ — телесный угол, в котором измеритель мощности регистрирует излучение.

После вычисления энергии, излучаемой лазерной искрой проводится расчет значения коэффициента конверсии: $\mathrm{CE} = (E_{2\%}/E_{las}) \cdot 100$.

Формирование мишени осуществляется при подаче газа в вакуумный объем через конические сопла, оснащенные импульсным клапаном. Для подачи газа на вход в сопло под давлением до 25 bar была проведена модернизация системы подачи газа. Мощная система вакуумной откачки из трех турбомолекулярных насосов суммарной производительностью порядка 10 000 l/s позволяет поддерживать остаточное давление в вакуумной камере на уровне 10^{-3} Torr. Формирование плазменного облака в мишени осуществляется с помощью сфокусированного излучения Nd:YAG-лазера, работающего в импульсном режиме. Энергия лазерного импульса 0.7 J, длительность — 5.2 ns. Диаметр перетяжки лазерного пучка после фокусировки составляет 25 μm (по FWHM).

2. Экспериментальные результаты

Были проведены измерения зависимостей CE от давления ксенона на входе в сопло в диапазоне 4–12 bar для линейки сопел с диаметром критического сечения $(250 \pm 25)\,\mu$m и различным углом раскрыва конуса. Полный угол раскрыва конуса изменялся от 1.5° до 13°. Процедура наведения сфокусированного лазерного луча на сопло производилась следующим образом: сначала устанавливали расстояние между срезом сопла и точкой фокуса лазерного излучения 0.6 mm. Начало отсчета (0 mm) определялось по моменту, когда сфокусированный лазерный луч начинает попадать в край сопла. Затем для каждого давления газа проводилось смещение сопла в плоскости, перпендикулярной оси сопла, в положение, при котором регистрируется максимальное значение CE.

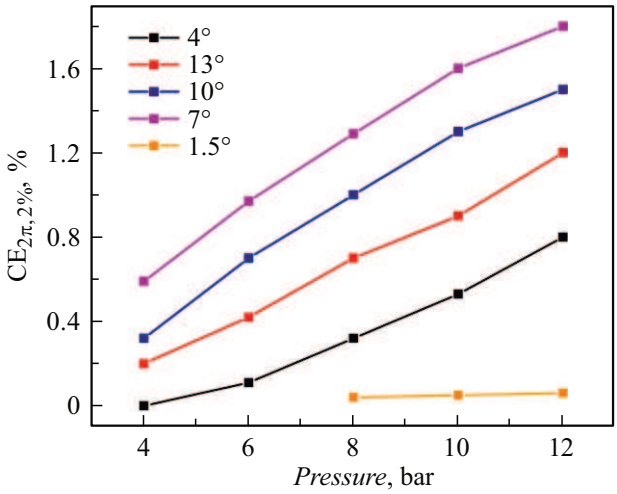

Рис. 2. Зависимости конверсионной эффективности источника от давления для линейки сопел 250 μm с разными углами раскрыва конуса.

Измеренные зависимости зарегистрированных значений CE от давления газа показаны на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что конверсионная эффективность источника, в котором для подачи газа используются конусные сопла, существенно выше, чем конверсионная эффективность источника на основе капилляра. Зависимости конверсионной эффективности от давления имеют похожий вид для сопел со всеми исследованными углами раскрыва конуса. Оптимальное значение угла раскрыва конуса, при котором зарегистрирована максимальная CE, составляет около 7°. Уровень остаточного давления в вакуумной камере во всех проведенных экспериментах не превышал $8 \cdot 10^{-4}$ Torr. Также стоит отметить, что в диапазоне давлений 4–12 bar не наблюдается выход зависимостей на насыщение, поэтому для дальнейшего увеличения CE источника имеет смысл подавать газ под более высоким давлением.

На рис. 3 показаны измеренные зависимости CE источника от давления газа для сопел с различным диаметром критического сечения. Вид представленных зависимостей качественно различается. Так, для сопла 500 μm наблюдается выход зависимости на насыщение при давлениях свыше 10 bar. Для сопла 250 μm выход зависимости на насыщение наблюдается при более высоких давлениях, около 20 bar. Для сопла 170 μm выход зависимости на насыщение в исследованном диапазоне давлений не зарегистрирован. Уровень остаточного давления в вакуумной камере для всех проведенных экспериментов не превышал 10^{-3} Torr. Различия регистрируемых величин CE при работе с соплами с различным критическим сечением, вероятно, связаны с различными плотностью и геометрическими размерами формирующихся газовых струй.

Кроме того, было проведено измерение доли энергии лазерного импульса, прошедшей через зону взаимодей-

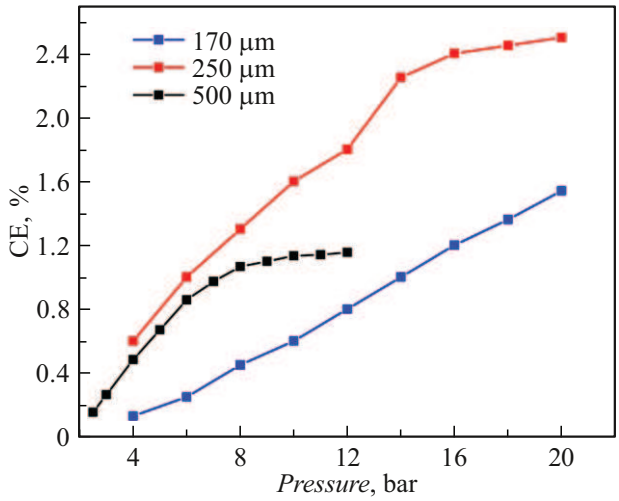

Рис. 3. Зависимости конверсионной эффективности источника от давления для сопел с различным диаметром критического сечения.

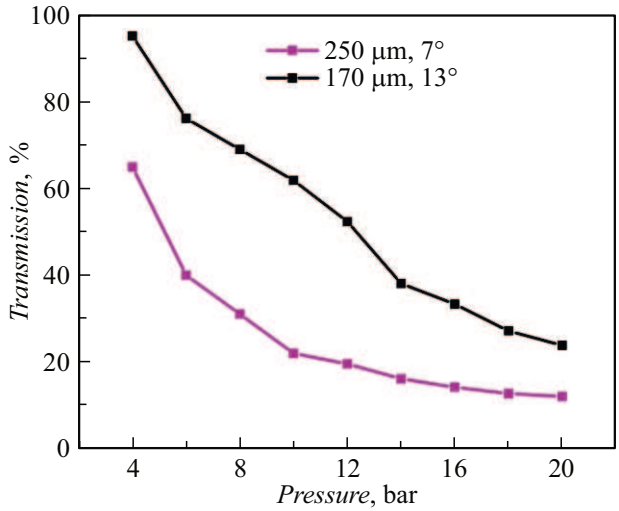

Рис. 4. Зависимости доли лазерной энергии, проходящей через лазерную плазму.

ствия пучка с мишенью, в зависимости от давления газа. Измерения производились с помощью калориметра (*6* на рис. 1). Сначала проводили измерения энергии лазерного излучения (W_0), приходящей на калориметр при выключенном клапане подачи газа (т.е. без формирования лазерной искры). Затем измеряли энергию излучения, приходящего на калориметр при формировании лазерной искры (W_1). Доля энергии лазерного излучения, прошедшая через зону взаимодействия с мишенью, вычислялась по формуле $T = (W_0/W_1) \cdot 100$.

Зависимости доли лазерной энергии, прошедшей через зону взаимодействия с мишенью, от давления газа представлены на рис. 4. По этим зависимостям можно оценить сверху величину доли лазерной энергии, поглощаемой плазменным облаком. Видно, что при формировании мишени с помощью сопла с критическим сечением 250 μm доля энергии прошедшего лазерного излучения значительно ниже при одинаковых давлениях газа на входе в сопло. Это говорит о том, что доля лазерной энергии, поглощенной мишенью, в данном случае выше, поэтому при работе с соплом 250 μm наблюдаются более высокие значения CE (рис. 3).

При формировании мишени с помощью сопла 250 μm, 7° (наиболее оптимальный с точки зрения регистрируемого значения CE случай) проводилась регистрация спектров излучения лазерной плазмы при различных давлениях. Зарегистрированные спектры изображены на рис. 5. Для удобства сравнения спектров на рис. 5, *a* интенсивности были нормированы на единицу.

На представленных спектрах виден интенсивный эмиссионный пик с максимумом интенсивности излучения в районе 10.8 nm. Регистрируемое излучение соответствует полосе UTA, также зарегистрировано излучение ионов Xe-XI на длинах волн в районе 13.5 nm, ионов Xe-X на длинах волн около 15 nm и ионов Xe-VIII в районе 17.5 nm [19–21]. Из представленных на рис. 5, *b* эмиссионных спектров видно, что при увеличении давления газа в диапазоне 8–20 bar вид спектра качественно не изменяется. Заметное увеличение интенсивности ЭУФ излучения в районе длины волны 11.2 nm при увеличении давления от 8 до 12 bar при переходе к более высоким давлениям (16 bar и выше) замедляется. Это согласуется с результатами измерений, полученными с помощью двухзеркального измерителя мощности ЭУФ излучения. При этом в более длинноволновой области спектра 13–20 nm интенсивность увеличивается быстрее (см. нормированные спектры на рис. 5, *a*), чем в области более коротких длин волн (12 nm и меньше).

Заключение

В ходе проведения работ было экспериментально установлено, что при использовании конусных сопел длиной 5 mm и диаметром критического сечения 250 μm для формирования газоструйной мишени в ЛПИ наиболее высокое значение CE на длине волны 11.2 nm достигается при использовании сопел с углом раскрыва конуса, близким к 7°.

За счет перехода к конусным соплам с диаметром критического сечения 250 μm и повышения давления газа на входе в сопло была зарегистрирована конверсионная эффективность ЛПИ CE = 2.5 %. Разница в величине CE по сравнению с работой [7], вероятно, связана с отличиями в плотности и геометрических характеристиках газовых струй-мишеней. Отличия в характеристиках струй связаны с использованием в работе [7] более длинного сопла (13 mm).

Работы по оптимизации ЛПИ с газоструйной мишенью Xe с целью увеличения конверсионной эффективности источника будут продолжены. В частности, планируется продолжение экспериментов с соплами,

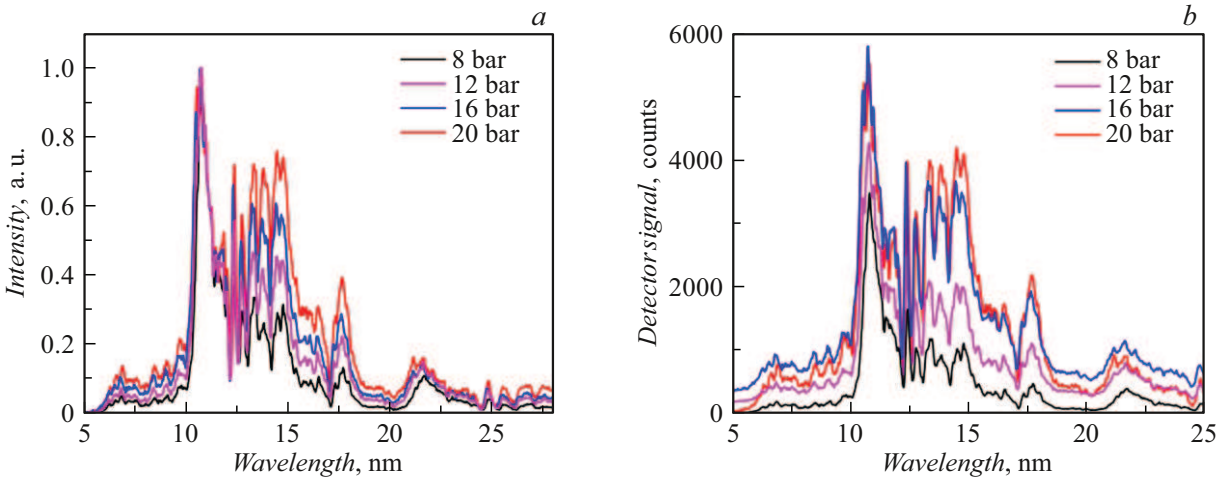

Рис. 5. Спектры излучения лазерной плазмы Xe при различных давлениях газа: *a* — спектры, нормированные на максимальную интенсивность излучения, *b* — спектры, регистрируемые детектором. Формирование мишени осуществлялось с помощью конусного сопла 250 μm, 7°.

имеющими различную длину, с целью определения наиболее оптимальных параметров, позволяющих получить максимальную конверсионную эффективность источника. Так, планируется проведение работ по охлаждению газовой струи-мишени, подаваемой в вакуумный объем, с целью получения более плотного потока частиц вблизи оси сопла и за счет этого получения более высокой конверсионной эффективности, а также увеличение расстояния между краем сопла и областью, где формируется лазерная плазма. Увеличение расстояния поможет снизить негативные эффекты, связанные с эрозией сопла под воздействием ионов плазмы.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.V. Svechnikov, N.I. Chkhalo, S.A. Gusev, A.N. Nechay, D.E. Pariev, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, D.A. Tatarskiy, N.N. Salashchenko, F. Schäfers, M.G. Sertsu, A. Sokolov, Y.A. Vainer, M.V. Zorina. Opt. Express, **26** (26), 33718 (2018).
[2] R.M. Smertin, N.I. Chkhalo, M.N. Drozdov, S.A. Garakhin, S.Yu. Zuev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, P.A. Yunin. Opt. Express, **30** (26), 46749 (2022).
[3] S. Bajt. J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, Films, **18** (2), 557 (2000).
[4] M. Singh, J.J.M. Braat. Appl. Opt., **39** (13), 2189 (2000).
[5] Н.И. Чхало. Микроэлектроника, **53** (5), 375 (2024).
[6] П.С. Буторин, Ю.М. Задиранов, С.Ю. Зуев, С.Г. Калмыков, В.Н. Полковников, М.Э. Сасин, Н.И. Чхало. ЖТФ, **88** (10), 1554 (2018).
[7] S.G. Kalmykov, P.S. Butorin, M.E. Sasin. J. Appl. Phys., **126** (10), 103301 (2019).
[8] V.E. Guseva, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. Appl. Phys. B, **129** (10), 155 (2023).
[9] V.E. Levashov, K.N. Mednikov, A.S. Pirozhkov, E.N. Ragozin. Quant. Electron, **36** (6), 549 (2006).
[10] R. Rakowski, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, F. De Gaufridy De Dortan, R. Jarocki, J. Kostecki, P. Wachulak. Appl. Phys. B, **101** (4), 773 (2010).
[11] J. Holburg, M. Müller, K. Mann, S. Wieneke. J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, Films, **37** (3), 031303 (2019).
[12] S. Kranzusch, K. Mann. Opt. Commun., **200** (1–6), 223 (2011).
[13] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, R. Jarocki, J. Kostecki, J. Krzywiński, J. Mikołajczyk, M. Szczurek. J. Alloys Compounds, **401** (1–2), 99 (2005).
[14] K. Mann, J. Holburg, S. Lange, M. Müller, B. Schäfer. Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography X.–SPIE, **10957**, 305 (2019).
[15] R. de Bruijn, K. Koshelev, G. Kooijman, E.S. Toma, F. Bijkerk. J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, **81** (1–4), 97 (2003).
[16] А.А. Перекалов, В.Е. Гусева, А.Н. Нечай, Н.И. Чхало, П.А. Вепрев, А.И. Артюхов. ЖТФ, **95** (5), 1639 (2025).
[17] С.С. Морозов, М.Ю. Знаменский, С.А. Гарахин, М.В. Зорина, Д.Г. Реунов, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало. ЖТФ, **95** (10), 1879 (2025).
[18] N.I. Chkhalo, S.V. Golubev, D. Mansfeld, N.N. Salashchenko, L.A. Sjmaenok, A.V. Vodopyanov. J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, **11** (2), 021123 (2012).
[19] E.B. Saloman. J. Phys. Chem. Reference Data, **33** (3), 765 (2004).
[20] *NIST Atomic Spectra Database. Gaithersburg*, https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database (2009)
[21] H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, K. Nishihara. J. Phys.: Conf. Ser., **58**, 231 (2007).