04

Экспериментальный стенд для изучения характеристик мощных лазерно-плазменных источников ЭУФ излучения

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

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

Поступило в Редакцию 29 мая 2025 г.
В окончательной редакции 29 мая 2025 г.
Принято к публикации 29 мая 2025 г.

Описана конструкция и характеристики стенда для изучения мощных лазерно-плазменных источников экстремального ультрафиолетового излучения. Для формирования лазерной искры использован импульсный Nd : YAG-лазер с длительностью импульса 5.2 ns, энергией импульса до 0.7 J и частотой повторения импульсов 10 Hz. В качестве мишени использована сверхзвуковая газовая струя Xe, формируемая с помощью конусного сопла, оснащенного импульсным клапаном. Диаметр критического сечения сопла 500 μm, длина 5 mm, полуугол раскрыва конуса 4.5°. Для изучения лазерно-плазменных источников с высокой мощностью спланировано оснащение стенда конусными соплами с диаметром критического сечения 200 – 300 μm без импульсного клапана и лазерной системой, с частотой повторения импульсов 1 kHz и выше. Высокопроизводительная откачная система суммарной мощностью 9000 l/s позволяет поддерживать высокий уровень вакуума и проводить исследования в условиях, приближенных к условиям работы источников излучения для проектируемых литографов нового поколения.

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

DOI: 10.61011/JTF.2025.09.61223.70-25

Введение

В связи со значительным прогрессом в технологии напыления многослойных рентгеновских зеркал (МРЗ) и синтезом Be-содержащих зеркал с высокими (на уровне 72 %) коэффициентами отражения на длине волны вблизи 11.2 nm [1–3] была высказана идея о возможности создания экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) литографа нового поколения. В данном литографе предполагается использовать лазерно-плазменный источник (ЛПИ) ЭУФ излучения с газоструйной мишенью Xe. При использовании в качестве мишени инертного Xe возможна разработка „чистого“ источника излучения, что позволит решить одну из ключевых проблем источников с мишенями на основе олова — загрязнения оптических элементов продуктами разрушения мишени и при этом получить высокую мощность излучения в ЭУФ диапазоне. При этом, как показано в работе [4], производительность литографа с ЛПИ на основе Xe-мишени, на длине волны 11.2 nm может быть на уровне производительности, достигнутой на литографе с длиной волны 13.5 nm с использованием оловянной мишени.

К настоящему моменту ЛПИ с газоструйной мишенью Xe исследованы в достаточно большом количестве работ [5–7]. Также измерена конверсионная эффективность (CE) такого источника на длинах волн 11.2 и 13.5 nm [8–11]. Большая часть исследований была выполнена с использованием недорогих лабораторных лазерных систем, характеризующихся сравнительно большой энергией импульса порядка 1 J, и частотой повторения импульсов порядка 10 Hz. Источники излучения на основе подобных лазеров с невысокой средней по времени мощностью излучения разрабатываются и применяются в установках для диагностики масок, метрологии и др. [12,13].

Для создания высокопроизводительного ЭУФ литографа необходим источник излучения с высокой средней мощностью. Для ЛПИ наиболее оптимальный путь увеличения мощности источника — в использовании лазерных систем с высокой частотой повторения импульсов выше 1 kHz. В таком режиме работы формирование газоструйной мишени в вакуумном объеме возможно только с помощью сопел с непрерывным истечением газа (без импульсного клапана). Расходы газа при этом будут достаточно большие, поэтому для достижения низкого уровня остаточного давления в вакуумной камере (не выше 10^{-3} Torr) необходимо оснащать источник мощной откачной системой. При худших вакуумных условиях эффективная мощность ЛПИ будет снижена из-за поглощения ЭУФ излучения остаточным ксеноном в вакуумной камере [5].

В настоящей работе описаны конструкция, принципы работы и характеристики исследовательского стенда для изучения характеристик мощных лазерно-плазменных источников ЭУФ излучения. Данный стенд оснащен мощной откачной системой, что позволяет проводить исследования в экспериментальных условиях, прибли-

женных к условиям работы источника излучения в проектируемой литографической машине нового поколения. В настоящей работе описаны первые результаты измерений конверсионной эффективности ЛПИ с газоструйной мишенью Xe, полученные на данном стенде.

1. Конструкция и характеристики стенда

Принципиальная схема исследовательского стенда изображена на рис. 1, фотография стенда на рис. 2. Формирование газоструйной мишени осуществляется за счет сверхзвукового истечения газовой струи в объем вакуумной камеры через конусное сопло. Для формирования плазменного облака используется излучение лазера *1*. Излучение лазера, работающего в импульсном режиме, проходит через трехлинзовый фокусирующий объектив, состоящий из рассеивающей *2* и собирающей *3* линз и длиннофокусной линзы *4*. При работе источника точка фокуса оптической системы расположена в газовой струе, что приводит к ионизации атомов газа и формированию плазменного облака и лазерной искры *6*. Система диагностики ЭУФ излучения в настоящий момент состоит из трех основных инструментов: двухзеркальный монохроматор *7*, зеркальный спектрометр *8*, изображающая система *9*. Все используемые рентгеновские зеркала изготовлены на основе Mo/Be-структуры и оптимизированы для работы на длине волны 11.2 nm.

Откачка объема вакуумной камеры осуществляется тремя турбомолекулярными насосами производительностью 3000 l/s каждый. За счет использования высокопроизводительной откачной системы на данном стенде возможно достижение низкого уровня остаточного давления в камере, не хуже 10^{-3} Torr при формировании мишени за счет конусных сопел постоянного истечения с диаметром критического сечения $d_{\text{cr}} = 200-300\,\mu$m и длиной $L = 5-15$ mm, без использования импульсного клапана. Такой режим работы позволяет изучать характеристики ЛПИ в условиях, приближенных к условиям работы проектируемой литографической машины нового поколения (использование лазерных систем с частотой повторения импульсов 1 kHz и выше).

Рис. 2. Фотография экспериментального стенда.

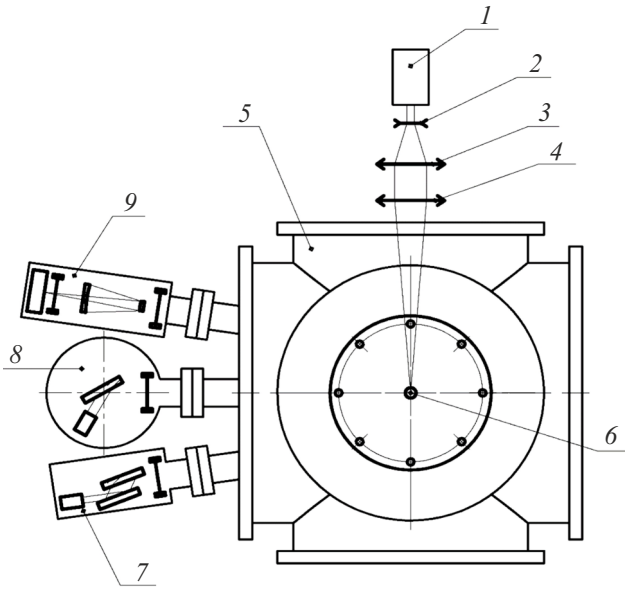

Рис. 1. Схема экспериментального стенда: *1* — Nd : YAG-лазер, *2* — рассеивающая линза, *3* — собирающая линза, *4* — длиннофокусная линза, *5* — вакуумная камера, *6* — лазерная искра, *7* — двухзеркальный монохроматор, *8* — зеркальный спектрометр, *9* — ЭУФ изображающая система.

В настоящее время в завершающей стадии находится разработка ионного спектрометра, позволяющего исследовать пространственное распределение потоков ионов и спектр по энергиям [14], и малогабаритный высокоразрешающий спектрограф [15].

1.1. Лазерно-оптическая система

В настоящее время основным элементом лазерно-оптической системы стенда является Nd : YAG-лазер с длительностью импульса 5.2 ns и энергией импульса до 0.7 J и частотой повторения импульсов 10 Hz. Диаметр пучка на выходе из лазера составляет 10 mm. Работа лазера и импульсного клапана сопла синхронизированы с помощью задающего генератора.

На оптическом пути лазерный пучок проходит через трехлинзовый фокусирующий объектив (рис. 3). Объектив состоит из расширителя пучка, представляющего собой рассеивающую и собирающую линзы, изготовленные из стекла BK-7, при этом диаметр пучка увеличивается с 10 до 38 mm. Рассеивающая линза — сферическая плоско-вогнутая. Ее диаметр составляет 25.4 mm, радиус кривизны сферической поверхности — 79.5 mm, фокусное расстояние $f = -150$ mm. Собирающая линза — сферическая плоско-выпуклая. Диаметр линзы 50.8 mm, радиус кривизны сферической поверхности 234 mm, фо-

кусное 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. Затем расширенный параллельный пучок диаметром 38 mm фокусируется длиннофокусной линзой, также изготовленной из стекла BK-7. Данная линза является плосковыпуклой, диаметр составляет 50.8 mm, радиус кривизны сферической поверхности 257 mm, фокусное расстояние $f = 500$ mm. На поверхности всех трех линзы нанесено просветляющее покрытие на длину волны 1064 nm с целью уменьшить отражение лазерного излучения от поверхностей линз и соответственно увеличить энергию излучения, доходящего до мишени. Фокусирующая линза размещена на линейном трансляторе, позволяющем перемещать ее в пределах $+-20$ mm от номинального положения. Таким образом, можно облучать газоструйную мишень как остро сфокусированным, так и расфокусированным пучком.

Перед проведением основных экспериментов проводилось измерение размеров пятна фокусировки лазерного излучения, получаемого с помощью трехлинзового объектива. Для проведения измерений размера пятна в области вблизи фокуса размещался детектор излучения. В качестве детектора использовалась ПЗС камера BMR-1400HM-U с размером пикселя 6.45 μm. ПЗС камера была размещена на линейном трансляторе, позволяющем перемещать камеру вдоль фокусной системы в пределах $+-10$ mm от номинального положения, точность позиционирования не хуже 0.05 mm. Лазерное излучение ослаблялось с помощью специальных фильтров перед входом в объектив и после фокусирующей линзы. Фильтры необходимы, чтобы на несколько порядков снизить мощность падающего лазерного излучения и предотвратить разрушение чувствительного элемента детектора. По результатам измерений получена зависимость размера лазерного луча от положения ПЗС камеры, показанная на рис. 4.

Из представленной на рис. 4 зависимости видно, что диаметр „перетяжки“ лазерного пучка составляет $d = 25\,\mu$m, длина перетяжки $L = 1.5$ mm. Измерение диаметра лазерного луча проводилось по усредненным за 30 импульсов изображениям лазерного пучка на уровне 0.5 от максимального значения сигнала (FWHM). Таким образом, с учетом параметров лазерного импульса плотность мощность в фокусном пятне составляет порядка 10^{13} W/cm^2.

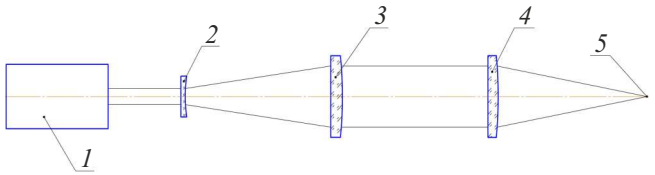

Рис. 3. Схема трехлинзового фокусирующего объектива: *1* — Nd : YAG-лазер, *2* — рассеивающая линза, *3* — собирающая линза, *4* — фокусирующая линза, *5* — точка фокуса.

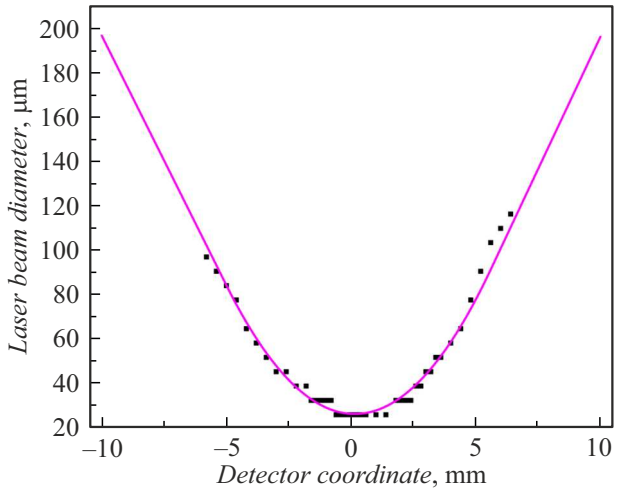

Рис. 4. Результаты измерения диаметра лазерного пучка с помощью ПЗС камеры.

В дальнейшем планируется проведение исследований характеристик ЛПИ с газоструйной мишенью Xe в зависимости от длительности лазерного импульса в пределах от десятых долей ns до нескольких десятков ns. После чего на исследовательском стенде можно будет проводить работы по изучению ЛПИ, для формирования плазмы в котором используется лазерная системой с частотой повторения импульсов 1 kHz или выше. Такие эксперименты необходимы для подробного изучения характеристик ЛПИ, разрабатываемого для ЭУФ литографа нового поколения.

1.2. Система формирования мишени

На данный момент основным элементом системы формирования мишени является конусное сверхзвуковое сопло с диаметром критического сечения $d_{\text{cr}} = 500\,\mu$m, длиной $L = 5$ mm и полууглом раствора $\alpha = 4.5°$. Сопло дополнительно оснащено импульсным клапаном на основе форсунки Bosch 0 280 158 017. Максимальное давление газа, с которым может работать данная система, составляет 25 bar. Сопло закреплено на трехкоординатной подвижке, что обеспечивает его перемещение внутри вакуумной камеры вдоль трех осей координат. Точность позиционирования сопла порядка 0.05 mm.

В перспективе на данном исследовательском стенде могут изучаться системы формирования газоструйных мишеней на основе конусных сопел с меньшим диаметром критического сечения и не оснащенные импульсным клапаном. Также возможно изучение газовых струй, формируемых капиллярами и специально профилированными соплами.

1.3. Система вакуумной откачки

Исследовательски стенд оснащен высокопроизводительной откачной системой для поддержания низкого уровня остаточного давления газа в вакуумной камере при работе источника. Поддержание низкого уровня остаточного давления в камере является принципиально важным моментом при работе ЛПИ с газоструйной мишенью Xe ввиду наличия широкой полосы поглощения у атомов Xe в ЭУФ диапазоне [5].

Основные элементы системы вакуумной откачки — три турбомолекулярных насоса (ТМН) KYKY CXF-320/3001 производительностью 3000 l/s. Таким образом, суммарная производительность откачной системы составляет порядка 9000 l/s.

На рис. 5 показаны измеренные зависимости уровня остаточного давления в вакуумной камере от давления Xe на входе в конусное сопло с $d_{\mathrm{cr}} = 500\,\mu$m при различных длительностях импульса открытия импульсного клапана сопла (переменная B на рис. 5). В данных экспериментах частота открытия клапана совпадала с частотой повторения лазерных импульсов и составляла 10 Hz. Видно, что в диапазоне давлений 2–12 bar при длительности импульса открытия сопла порядка $400\,\mu$s уровень остаточного давления в камере менее 10^{-3} Torr. Согласно табличным данным из [16], поглощение ЭУФ излучения с длиной волны 11.2 nm остаточным Xe при таких условиях в нашем исследовательском стенде (расстояние от искры до детектора ЭУФ излучения порядка 1 m) составляет не более 8 %.

Ввиду высокой стоимости Xe и его больших расходов при работе источника в будущем планируется дооснащение стенда системой рециркуляции Xe. С помощью системы рециркуляции газ, откачанный вакуумными насосами из объема камеры, будет нагнетаться в специальный баллон, а не сбрасываться в выхлопную магистраль. Это позволит в дальнейшем повторно использовать собранный газ при работе источника.

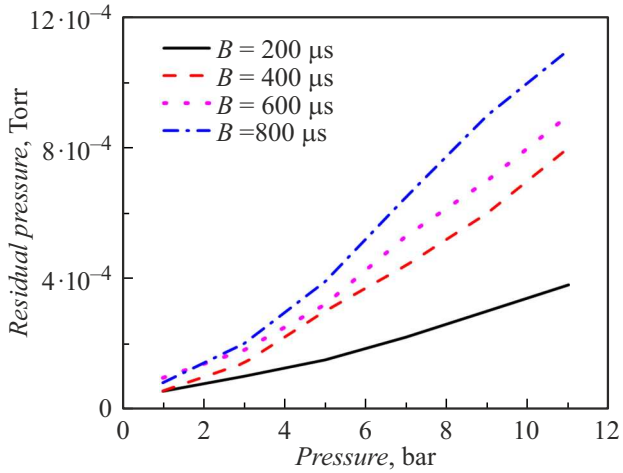

Рис. 5. Результаты измерения уровня остаточного давления в вакуумной камере в зависимости от давления газа на входе в сопло.

1.4. Система диагностики ЭУФ излучения

На данный момент в систему диагностики ЭУФ излучения входят следующие основные приборы: зеркальный спектрометр, двухзеркальный монохроматор и ЭУФ изображающая система.

Зеркальный спектрометр предназначен для регистрации эмиссионных спектров лазерной плазмы в диапазоне 3–30 nm и для измерения интенсивности излучения в абсолютных единицах. Работа прибора основана на брэгговском отражении ЭУФ излучения от многослойных рентгеновских зеркал. Полихроматичный пучок излучения лазерной плазмы падает на МРЗ под некоторым углом скольжения φ, после чего от МРЗ отражается излучение в некоторой достаточно узкой спектральной полосе $\lambda_0 \pm \Delta\lambda$. Сканирование по спектру осуществляется за счет поворота МРЗ на платформе гониометра относительно падающего излучения, при этом осуществляется синхронный поворот детектора на удвоенный угол. В качестве детектора использовались полупроводниковые диоды ФДУК-100УФ, прокалиброванные на синхротроне [17]. Работа системы детектирования рентгеновского сигнала синхронизована с работой затвора лазерной системы с помощью блока управления и синхронизации. Таким образом, производится измерение интенсивности ЭУФ излучения лазерной плазмы, соответствующей одному импульсу лазера накачки. Зарегистрированные детектором значения сигнала при каждом положении МРЗ сохраняются в текстовом файле в виде числовой таблицы. При проведении экспериментов, описанных в настоящей работе, в спектрометре было установлено МРЗ на основе Mo/Be-структуры, рабочий диапазон длин волн данного зеркала 11–18 nm. На длине волны $\lambda_0 = 11.\,2$ nm коэффициент отражения составляет $R = 0.52$, а спектральная селективность $\Delta\lambda/\lambda_0 = 0.04$. Для снижения уровня шумового сигнала использовались два Zr/Ru свободновисящих пленочных фильтра. Калибровка коэффициентов отражения многослойных зеркал и пропускание фильтров в ЭУФ диапазоне производилась на высокоразрешающем рефлектометре [18].

Более подробно конструкция, характеристики и принципы работы спектрометра описаны в [19]. Все элементы прибора прокалиброваны, что позволяет проводить измерения интенсивности излучения в абсолютных единицах. Мы оцениваем точность абсолютных измерений на уровне 15 %.

Двухзеркальный монохроматор предназначен для измерения интенсивности излучения в абсолютных единицах в узкой спектральной полосе 2 %. Работа прибора также основана на брэгговском отражении излучения от МРЗ, при этом отражение происходит от двух последовательно расположенных зеркал, что позволяет выделять более узкую спектральную полосу. Угол падения излучения на поверхность каждого из зеркал составляет 7°. При этом возможность сканирования по спектру отсутствует. Для данного прибора был синтезирован комплект Mo/Si-зеркал, коэффици-

ент отражения для двухзеркальной схемы на длине волны $\lambda_0 = 11.2$ nm составляет $R = 0.045$, спектральная селективность $\lambda/\lambda_0 = 0.02$. В качестве детектора используется фотодиод ФДУК-100УФ. Работа системы детектирования, как и для зеркального спектрометра, синхронизирована с работой затвора лазерной системы. Измеряемая интенсивность излучения плазмы на длине волны 11.2 nm соответствует одному импульсу лазера накачки. Выбранная спектральная полоса соответствует спектральной полосе оптической системы проектируемого ЭУФ литографа нового поколения. Подробное описание прибора содержится в [20].

ЭУФ изображающая система предназначена для регистрации изображений излучающей области лазерной искры в ЭУФ диапазоне и измерения размеров излучающей области с высоким пространственным разрешением. Основным узлом изображающей системы является объектив Шварцшильда. Объектив состоит из выпуклого и вогнутого сферических зеркал. Основное преимущество схемы Шварцшильда заключается в использовании многослойной рентгеновской оптики нормального падения. Данное решение позволяет устранить сферическую аберрацию и астигматизм, характерные для рентгенооптических схем с использованием одиночных МРЗ [21–23], а также получить высокую светосилу, спектральное и пространственное разрешение. Для данного объектива был синтезирован комплект высокоотражающих МРЗ нормального падения на основе Mo/Be. Также для изображающей системы были изготовлены Mo/Be-пленочные фильтры. В качестве детектора излучения используется CMOS-матрица с массивом пикселей 2048×2048, размер одного пикселя составляет $6.5 \times 6.5\,\mu$m. Система позволяет получать изображения лазерной искры на длине волны 11.25 nm с пятикратным увеличением. Поле зрения прибора представляет собой квадрат со стороной 13.3 mm. Высокое пространственное разрешение, порядка $4\,\mu$m, позволяет не только определять размеры излучающей области с высокой точностью, но и регистрировать неоднородности пространственного распределения интенсивности ЭУФ излучения плазменного облака. Высокие коэффициенты отражения МРЗ, коэффициенты пропускания пленочных фильтров, а также чувствительность матричного детектора позволяют получать изображения лазерной искры, соответствующие одному импульсу лазера накачки. Подробно конструкция прибора, методики изготовления оптических элементов, а также первые результаты, полученные с помощью изображающей системы, описаны в [24].

Также, как отмечалось ранее, на экспериментальном стенде планируется проведение исследований ионных потоков, возникающих в процессе работы ЛПИ, исследование деградации многослойной рентгеновской оптики под воздействием ионов и продуктов разрушения сопла.

2. Первые экспериментальные результаты

Для предварительной юстировки оптической системы установки были зарегистрированы эмиссионные спектры углекислоты. В исследуемом диапазоне длин волн 11–18 nm при формировании плазменного облака в мишени углекислоты, согласно [25,26], наблюдаются узкие и достаточно яркие эмиссионные линии ионов кислорода O VI. Спектр мишени углекислоты, зарегистрированный на описанном в настоящей работе стенде после проведения необходимых юстировок оптической системы, показан на рис. 6.

Как и ожидалось, в спектре наблюдаются четыре ярко выраженных пика, соответствующие излучению ионов кислорода O VI на длинах волн 11.64, 12.98, 15, 17.3 nm. Положение максимумов пиков на спектре хорошо совпадает с табличными значениями длин волн [27].

Основные исследования, проведенные к настоящему моменту на исследовательском стенде, посвящены измерению интенсивности излучения лазерной плазмы ксенона на длине волны 11.2 nm. На рис. 7 показан зарегистрированный с помощью зеркального спектрометра спектр излучения лазерной плазмы Xe. На зарегистрированном спектре виден яркий максимум интенсивности излучения на длине волны 11.2 nm. Согласно литературе [12, 28–30], регистрируемое излучение соответствует полосе UTA. В нашем случае наблюдается смещение положения наблюдаемого максимума излучения из-за края поглощения Be, входящего в состав использованного МРЗ, на длине волны 11.1 nm. В данном эксперименте давление газа на входе в сопло составляло 8 bar. Возбуждение плазмы производилось остросфокусированным лазерным лучом, энергия импульса 0.7 J. Расстояние от точки фокуса до края сопла 0.6 mm.

Для определения оптимальных параметров работы ЛПИ были проведены исследования зависимостей конверсионной эффективности ЛПИ на длине волны

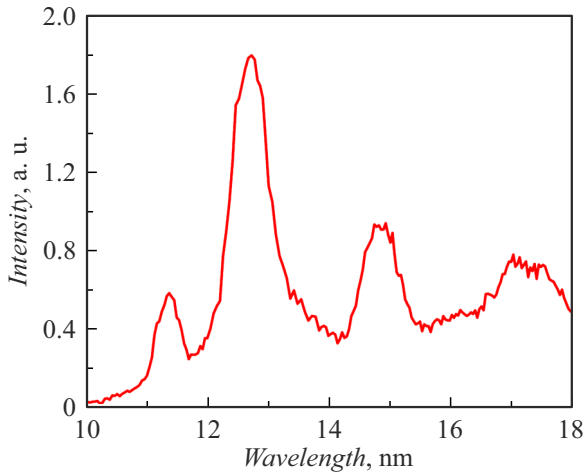

Рис. 6. Спектр излучения лазерной плазмы углекислоты, полученный с помощью зеркального спектрометра.

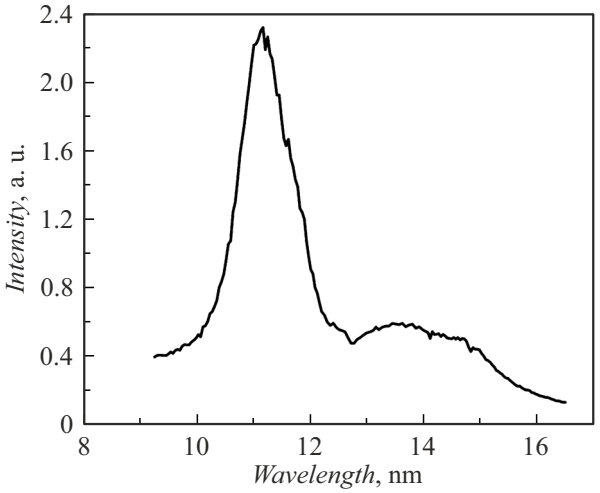

Рис. 7. Спектр излучения лазерной плазмы Xe, зарегистрированный на зеркальном спектрометре.

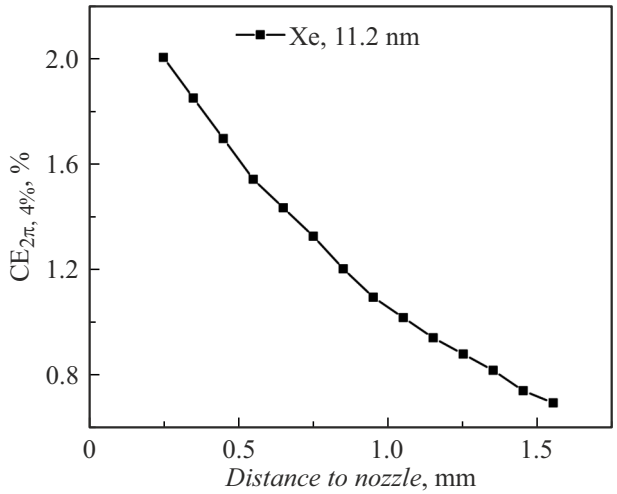

Рис. 8. Зависимость конверсионной эффективности от расстояния между точкой фокусировки лазерного излучения и торцом сопла.

11.2 nm от расстояния между точкой фокуса и краем сопла, давления газа на входе в сопло, энергии лазерного импульса и размера лазерного пучка в области взаимодействия излучения с мишенью.

На рис. 8 изображена полученная зависимость конверсионной эффективности источника при излучении в телесный угол 2π sr в спектральной полосе (11.2 ± 0.22) nm (здесь и далее называем данную полосу 4% спектральной полосой, соответствующая конверсионная эффективность $CE_{2\pi,4\%}$ от расстояния между точкой фокуса лазерного излучения и краем сопла. В этих экспериментах сопло перемещалось на подвижке вдоль собственной оси, при этом две другие координаты оставались зафиксированными. Давление газа составляло 8 bar, энергия лазерного импульса 0.7 J, при острой фокусировке лазерного луча (диаметр пучка в области взаимодействия порядка $d = 25\,\mu$m). Из-за близости края поглощения Be к рабочей длине волны 11.2 nm, а также спада интенсивности эмиссионной линии при отходе от резонансной длины волны (как можно видеть из рис. 6), спектральная полоса, регистрируемая зеркалом, меньше 4%, поэтому приведенные в настоящей работе значения $CE_{2\pi,4\%}$ необходимо считать, как его нижнюю оценку.

Из представленной зависимости видно, что при удалении точки фокуса лазерного излучения от края сопла CE значительно уменьшается. Это связано с уменьшением плотности частиц Xe в области взаимодействия мишени с лазерным излучением. По результатам данных экспериментов было выбрано базовое значение расстояния между точкой фокуса и краем сопла $z_0 = 0.6$ mm. Таким образом, область, в которой образуется лазерная плазма, была отодвинута достаточно далеко от сопла, чтобы снизить его деградацию под воздействием ионов, разлетающихся из плазменного облака. При этом значение конверсионной эффективности все еще остается достаточно высоким.

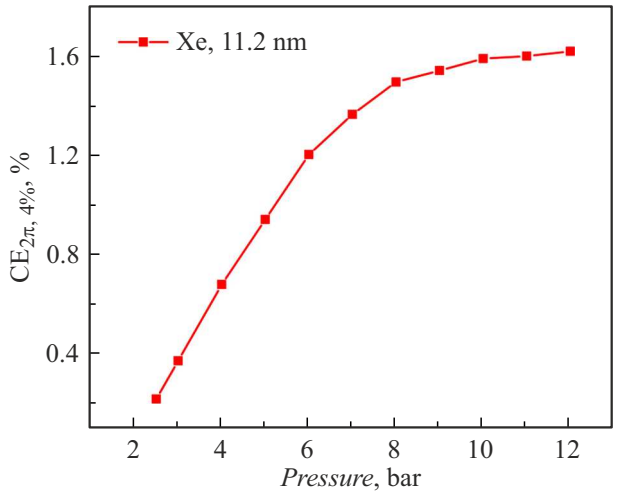

Рис. 9. Зависимость конверсионной эффективности от давления газа на входе в сопло.

На рис. 9 показана полученная зависимость CE от давления газа на входе в сопло для 4% спектральной полосы (измерения проводились зеркальном спектрометре).

В этих экспериментах энергия лазерного импульса также составляла 0.7 J, при острой фокусировке лазерного луча (диаметр пучка в области взаимодействия порядка $25\,\mu$m). Расстояние до среза сопла 0.6 mm. На зависимости видно, что при увеличении давления газа на входе в сопло CE значительно увеличивается. При давлении свыше 10 bar зависимость выходит на насыщение. При давлении 12 bar полученная конверсионная эффективность $CE_{2\pi,4\%} = 1.6\%$.

На рис. 10 изображена измеренная зависимость CE от энергии лазерного импульса. Внизу по оси абсцисс отложена полная энергия одного импульса лазера. Сверху показано соответствующее каждому из измерений значение энергии, дошедшей до области взаимодействия с мишенью.

Эксперименты проводились при давлении газа на входе в сопло 12 bar и острой фокусировке лазерного пучка. Расстояние до среза сопла составляло 0.6 mm. Как видно из показанной зависимости, при увеличении энергии лазерного импульса значение $CE_{2\pi,4\%}$ увеличивается. При увеличении энергии импульса свыше 0.4 J (в этом случае до области взаимодействия с мишенью доходит около 0.3 J/pulse) увеличение значения $CE_{2\pi,4\%}$ несколько замедляется.

На рис. 11 показана измеренная $CE_{2\pi,4\%}$ при различных размерах лазерного пучка в области взаимодействия с мишенью. В данном эксперименте осуществлялось перемещение фокусирующей линзы вдоль фокусной оси системы, за счет этого перемещалась точка фокуса системы и изменялся размер лазерного пучка в области взаимодействия с мишенью (в области максимальной плотности газовой струи).

На показанной зависимости координата линзы, равная нулю, соответствует положению, при котором точка фокуса оптической системы расположена строго под срезом сопла (соответствующий диаметр лазерного пучка 25 μm). Таким образом, видно, что максимум $CE_{2\pi,4\%}$ наблюдается с некоторым смещением относительно „нулевого положения“. Максимум конверсионной эффективности наблюдается при взаимодействии с мишенью сходящегося лазерного пучка диаметром 60 μm. При дальнейшем увеличении диаметра лазерного пучка наблюдается уменьшение значения $CE_{2\pi,4\%}$. Также уменьшение конверсионной эффективности источника

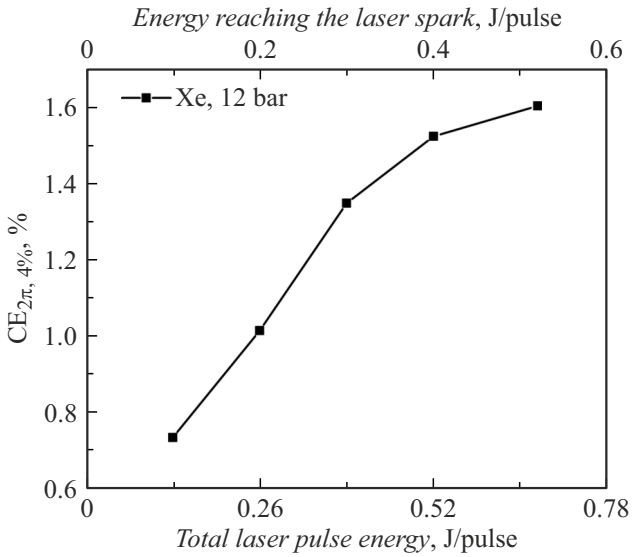

Рис. 10. Зависимость конверсионной эффективности от энергии лазерного импульса.

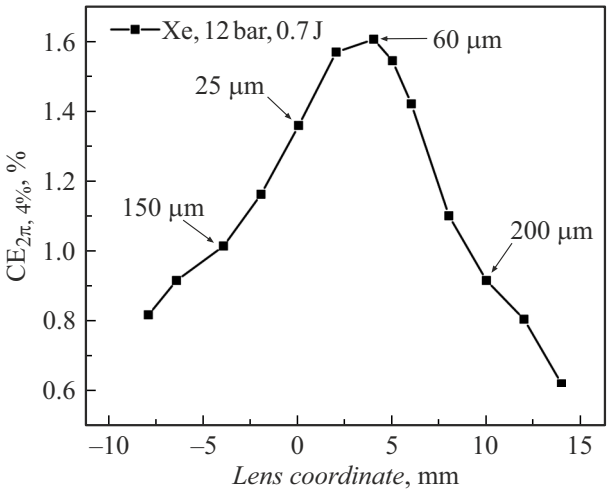

Рис. 11. Конверсионная эффективность при различных положениях фокусирующей линзы.

наблюдается и в случае взаимодействия с мишенью расходящегося лазерного пучка.

Отдельно было проведено измерение конверсионной эффективности источника с помощью двухзеркального монохроматора в 2 % спектральной полосе. Измерения проводились при оптимальном значении давления газа 12 bar, энергии лазерного импульса 0.7 J и различных расстояниях от точки фокуса лазерного излучения до края сопла. Были выбраны расстояния от края сопла $z = 0.6$, 0.4 и 0.2 mm. Таким образом, можно сказать, что за счет существенного снижения уровня остаточного давления в вакуумной камере установки и использования длиннофокусной оптической системы получено значительное увеличение конверсионной эффективности ЛПИ (на 30 %–40 %).

Заключение

В ходе работы был разработан, изготовлен и запущен в работу исследовательский стенд, позволяющий изучать характеристики мощных ЛПИ ЭУФ излучения. Основное преимущество данного стенда состоит в оснащении высокопроизводительной откачной системой. Наличие такой откачной системы позволяет получать достаточный уровень остаточного давления в вакуумной камере (не выше 10^{-3} Torr) при больших расхода рабочего газа. Как показано в работе [31], при использовании систем откачки из ТМН с суммарной производительностью порядка 9000 l/s можно достичь уровня остаточного давления газа в камере не хуже 10^{-3} Torr, при использовании конусных сопел критическим диаметром порядка 250 μm, без импульсного клапана. Таким образом, стенд позволяет проводить исследования в условиях максимально приближенных к условиям работы проектируемых литографических машин нового поколения (высокая частота повторения лазерных импульсов, свыше

1 kHz; непрерывное истечение газа через сопло, без использования импульсного клапана).

В качестве первых результатов работы описанного стенда были изучены зависимости CE ЛПИ с газоструйной мишенью Xe на длине волны 11.2 nm от расстояния между точкой фокусировки лазерного пучка и краем сопла, давления газа, энергии лазерного импульса и размера пятна фокусировки. Зарегистрированная конверсионная эффективность источника в полупространство в 4% спектральную полосу по нижней оценке достигает $CE_{2\pi,4\%} = 2\%$.

Финансирование работы

Изготовление исследовательского стенда выполнено в рамках государственного задания FFUF-2024-0022. Проведение экспериментальных исследований выполнено при поддержке гранта РНФ № 21-72-30029-П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S. Bajt. J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films, **18** (2), 557 (2000).
[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] R. Smertin, N. Chkhalo, S. Garakhin, V. Polkovnikov, S. Zuev. Opt. Lett., **49** (13), 3690 (2024).
[4] Н.И. Чхало. Микроэлектроника, **53** (5), 375 (2024).
[5] R. de Bruijn, K. Koshelev, G. Kooijman, E.S. Toma, F. Bijkerk. J. Quant. Spectr. Radiative Transfer, **81** (1-4), 97 (2003).
[6] R. de Bruijn, K. Koshelev, F. Bijkerk. J. Phys. D: Appl. Phys., **36** (18), L88 (2003).
[7] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салащенко, Н.И. Чхало. Опт. и спектр., **129** (3), 266 (2021).
[8] S.G. Kalmykov, P.S. Butorin, M.E. Sasin. J. Appl. Phys., **126** (10), 103301 (2019).
[9] V.E. Guseva, A.N. Nechay, A.A. Perekalov, N.N. Salashchenko, N.I. Chkhalo. Appl. Phys. B, **129** (10), 155 (2023).
[10] G.D. Kubiak, L.J. Bernardez II, K.D. Krenz. Emerging Lithographic Technol. II. – SPIE, **3331**, 81 (1998).
[11] 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).
[12] E.B. Saloman. J. Phys. Chem. Reference Data, **33** (3), 765 (2004).
[13] K. Mann, J. Holburg, S. Lange, M. Müller, B. Schäfer. EUV Lithography X – SPIE, **10957**, 305 (2019).
[14] В.Е. Гусева, Д.С. Дмитриев, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, А.К. Чернышев, Н.И. Чхало. Матер. XXIX Междунар. симп. „Нанофизика и наноэлектроника“. (2025).
[15] С.С. Морозов, С.А. Гарахин, М.В. Зорина, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало, Д.Г. Реунов, М.Ю. Знаменский. Матер. XXIX Междунар. Симп. „Нанофизика и наноэлектроника“. (2025).
[16] Электронный ресурс. Режим доступа: https://henke.lbl.gov/optical_constants/
[17] П.Н. Аруев, М.М. Барышева, Б.Я. Бер, Н.В. Забродская, В.В. Забродский, А.Я. Лопатин, А.Е. Пестов, М.В. Петренко, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, В.Л. Суханов, Н.И. Чхало. Квант. электрон., **42** (10), 943 (2012).
[18] S.A. Garakhin, N.I. Chkhalo, I.A. Kas'kov, A.Ya. Lopatin, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, M.V. Svechnikov, N.N. Tsybin, I.G. Zabrodin, S.Yu. Zuev. Rev. Sci. Instrum., **91** (6), 063103 (2020).
[19] А.В. Водопьянов, С.А. Гарахин, И.Г. Забродин, С.Ю. Зуев, А.Я. Лопатин, А.Н. Нечай, А.Е. Пестов, А.А. Перекалов, Р.С. Плешков, В.Н. Полковников, Н.Н. Салащенко, Б.А. Уласевич, Н.И. Чхало. Квант. электрон., **51** (8), 700 (2021).
[20] N.I. Chkhalo, S.V. Golubev, D. Mansfeld, N.N. Salashchenko, L.A. Sjmaenok, A.V. Vodopyanov. J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, **11**, 021123 (2012).
[21] J. Holburg, M. Muller, K. Mann, S. Wieneke. J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films, **37** (3), 031303 (2019). DOI: 10.1116/1.5082906
[22] В.Е. Левашов, К.Н. Медников, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин. Квант. электрон., **36** (6), 549 (2006).
[23] В.Г. Капралов, Р. Корде, В.Е. Левашов, А.С. Пирожков, Е.Н. Рагозин. Квант. электрон., **32** (2), 149 (2002).
[24] A.A. Perekalov, V.E. Guseva, I.V. Malyshev, A.N. Nechay, A.E. Pestov, D.G. Reunov, R.M. Smertin, M.N. Toropov, N.N. Tsybin, N.I. Chkhalo. Opt. Laser Technol. принята к печати.
[25] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, M. Szczurek, H. Daido, N. Sakaya, V. Kmetik, T. Wilhein. Opt. Commun., **163** (1-3), 103 (1999).
[26] А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.И. Чхало, Н.Н. Салащенко. ЖТФ, **89** (11), 1656 (2019).
[27] R.L. Kelly, L.P. Palumbo. *Atomic and ionic emission lines below 2000 angstroms: hydrogen through krypton* (Naval Research Laboratory, Washington D.C., 1973)
[28] S. Kranzusch, K. Mann. Opt. Commun., **200** (1-6), 223 (2001).
[29] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, R. Jarocki, J. Kostecki, J. Krzywiński, J. Mikołajczyk, M. Szczurek. J. Alloys Compounds, **401** (1-2), 99 (2005).
[30] H. Tanuma, H. Ohashi, S. Fujioka, H. Nishimura, A. Sasaki, K. Nishihara. J. Phys.: Conf. Series. – IOP Publishing, **58** (1), 231 (2007).
[31] N.G. Korobeishchikov, I.V. Nikolaev, M.A. Roenko. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, **438**, 1 (2019).