

Создание эшелона мишеней лазерно-плазменной искры для источника ЭУФ излучения нанолитографа

© Т.В. Черноизюмская,¹ В.Ю. Сергеев,¹ В.В. Конторин,¹ Д.Е. Беляевский,² М.К. Буц,¹ В.Г. Капралов,¹ П.А. Карасев,¹ Д.Д. Коробко,¹ М.А. Царегородцев,¹ И.А. Шаров¹

¹Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого,
195251 Санкт-Петербург, Россия

²ООО „ТехноСистемТрейд“,
197342 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: t.chernoizyumskaaya@spbstu.ru

Поступило в Редакцию 9 августа 2025 г.

В окончательной редакции 14 ноября 2025 г.

Принято к публикации 14 ноября 2025 г.

Спроектирован, смонтирован и введен в эксплуатацию стенд, предназначенный для разработки технологии создания эшелона криогенных ксеноновых капель, которые предполагается использовать в качестве мишеней для лазерного импульса, создающего из них искру. Излучение лазерно-плазменной искры может быть использовано в качестве источника экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) излучения для нанолитографа. Экспериментально наблюдался и зафиксирован с помощью скоростной видеосъемки процесс развития неустойчивости Плато–Рэлея в струе жидкого аргона. Параметры полученного эшелона капель аргона диаметром 0.2 mm с пространственным периодом 0.5 mm могут быть перспективны для источника ЭУФ в нанолитографии.

Ключевые слова: лазерно-плазменная искра, эшелон аргоновых капель, неустойчивость Плато–Рэлея, нанолитография, источник ЭУФ.

DOI: 10.61011/JTF.2026.04.62673.206-25

Введение

Для реализации процесса нанолитографии в современном производстве микросхем с нанометровым разрешением необходимы мощные источники излучения на длине волны около 10 nm [1]. В настоящее время единственным в мире производителем оборудования для нанолитографии является компания ASML (Нидерланды). В качестве источника экстремального ультрафиолетового излучения (ЭУФ) используется плазма, образующаяся при взаимодействии лазерного излучения с атомами олова (излучение на длине волны 13.5 nm). Общая концепция промышленного литографа, подразумевающая использование олова, была принята в 2008–2009 гг. [2]. Выбор этот не является оптимальным, поскольку использование металла влечет необходимость решения проблемы осаждения паров олова на элементах оптической системы, обеспечивающей формирование рабочего потока фотонов. В настоящее время эта проблема решается с помощью комплекса специального оборудования и регулярного технического обслуживания.

Альтернативным материалом для использования в качестве источника излучения для нанолитографа является ксенон [1]. Атомы ксенона при взаимодействии с лазерным излучением образуют плазму, содержащую, в частности, многократно ионизованные ионы ксенона ($Z = 9–11$). Такие ионы способны генерировать фотоны на длине волны 11.2 nm. Эффективность преобразования (СЕ) мощности лазерного пучка накачки в рабочее

излучение в случае использования ксенона в 2–3 раза меньше, чем в случае использования олова [3]. Такое снижение эффективности имеет место, если использовать для сбора излучения плазмы Хе зеркало из того же материала (Mo/Si), из которого выполнено зеркало для сбора излучения плазмы Sn. Однако относительно недавно были разработаны зеркала на основе Be [4], имеющие максимум коэффициента отражения на длине волны вблизи 11.2 nm. Применение этих зеркал позволит получать более высокие величины СЕ источников ЭУФ на основе Хе. Использование ксенона полностью исключает загрязнение оптических элементов пленкой осажденного рабочего материала. При этом важной задачей является разработка технологии доставки ксенона в область взаимодействия с лазерным излучением. На ранних этапах развития нанолитографии использовалась инжекция ксенона в виде струи газа, истекающей из сосуда под давлением по каналу малого диаметра (капилляру). Например, усовершенствованный двухпоточковый коаксиальный капилляр описан в [5], а его более позднее применение — в [6]. Иной способ — формирование сверхзвуковой низкотемпературной струи ксенона со сравнительно медленным радиальным расширением — применялся в работах [7,8]. Известно, что СЕ прямо зависит от плотности газовой струи в области взаимодействия. Она быстро падает при удалении от выхода капилляра. Попытка приблизить область взаимодействия к выходу капилляра приводит к распылению материала

Таблица 1. Тройная точка и реологические характеристики аргона и ксенона

Параметр	Аргон	Ксенон
Давление тройной точки, кПа	69	82
Температура тройной точки (ТЗ), К	83.8	161.4
Плотность при температуре вблизи ТЗ, t/m^3	1.4	2.9
Вязкость при температуре вблизи ТЗ, Pa·s	$2.6 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент поверхностного натяжения при температуре вблизи ТЗ, N/m	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.8 \cdot 10^{-2}$

стенок капилляра и его разрушению [3], так как при образовании лазерной искры выделяется значительное количество энергии. При размещении зоны взаимодействия лазерного излучения с веществом газовой струи на безопасном расстоянии от выхода капилляра эффективность лазерно-плазменной генерации излучения заметно снижается. Это вызывает необходимость разработки метода получения струи, при котором материал находится в конденсированном состоянии с существенно увеличенной плотностью. Таким образом, необходима разработка технологии доставки ксенона в конденсированном состоянии в достаточно удаленную от сопла и стенок область для последующего зажигания лазерной искры. В настоящее время ведутся активные разработки систем для подачи струй различного состава в источники лазерно-плазменного излучения [9]. Представляется, что для источника ЭУФ для нанолитографа предпочтительно использовать эшелоны мишеней, а не сплошную часть струи, поскольку это сможет решить проблему роста давления в области первого зеркала из-за осколков (debris), образующихся при взаимодействии непрерывной струи с лазерным излучением [3]. Ранее делались попытки создания систем инжекции струй сжиженных благородных газов небольшого диаметра $10\text{--}20\ \mu\text{m}$ [3] и исследования СЕ таких источников излучения. Однако малые теплоемкость и теплопроводность столь тонкого капилляра затрудняют обеспечение стабильного температурного режима, необходимого для удержания инжектируемого материала в жидком состоянии.

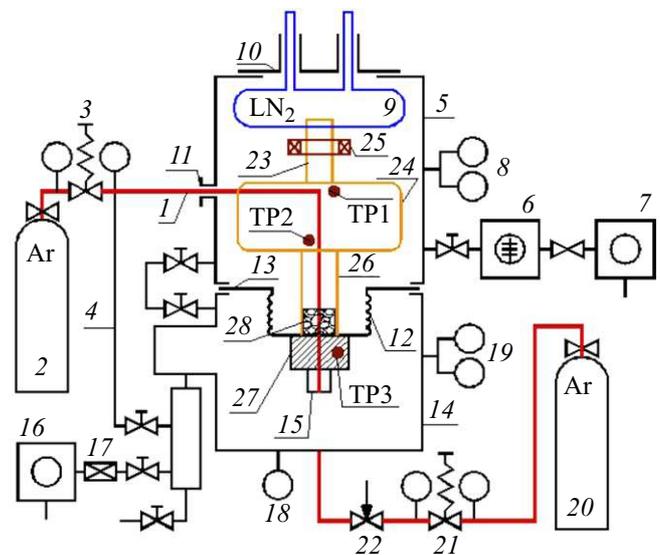
Целью настоящей работы было экспериментальное исследование процесса инжекции струи сжиженного аргона диаметром около $100\ \mu\text{m}$ в замкнутый объем с контролируемым давлением паров инжектируемого вещества. Применение аргона для отработки технологических процессов практичнее, поскольку он является более доступным и дешевым материалом. Переход к ксенону не должен вызвать технологических проблем, так как реологические характеристики аргона и ксенона

близки, как указано в табл. 1. Более высокая температура тройной точки ксенона по сравнению с аргоном облегчит процесс захлаживания.

В настоящей работе изучались параметры газовой и тепловой системы для получения стабильной струи сжиженного аргона и особенности развития неустойчивости Плато–Рэлея, приводящей к образованию эшелона аргоновых капель.

1. Описание экспериментальной установки

Схема разработанного экспериментального стенда представлена на рис. 1. Аргон под давлением подается в магистраль 1 из баллона 2 через редуктор 3. Давление в магистрали аргона контролируется выходным манометром редуктора. Предусмотрена возможность откачки магистрали аргона по байпасной линии 4. Камера криостата 5 откачивается с помощью турбомолекулярного насоса 6 и форвакуумного насоса 7. Давление в камере криостата контролируется датчиком 8. Заливной азотный криостат 9 закрепляется в камере криостата 5 с помощью теплоизолирующего фланца 10. Магистраль аргона вводится в камеру 5 через фланец 11 с грибовидным уплотнением. Сильфонный термовакуумный барьер 12 устанавливается с помощью фланца на отверстие в переборке 13, разделяющей камеру криостата и камеру формирования струи 14 (КФ). Магистраль аргона 1 сообщает с КФ через капилляр 15. КФ откачивается форвакуумным насосом 16. Скорость откачки может регулироваться с помощью дроссельного клапана 17. Давление в КФ контролируется мановакуумметром 18 (измерение давления вблизи тройной точки Ar) и датчиком 19 (измерение среднего и низкого давления). Допол-

**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда для получения струи жидкого аргона. (Пояснения в тексте.)

нительно предусмотрена возможность напуска аргона в КФ из баллона 20 через редуктор 21 и натекатель 22.

Криостат 9 с помощью хладопровода 23 приводится в тепловой контакт с теплообменником-ожижителем 24.

Конструктивно теплообменник-ожижитель представляет собой массивную герметичную медную емкость с развитой системой внутренних каналов, находящуюся в прямом тепловом контакте с хладопроводом криостата, погруженным в жидкий азот. Вся система размещена в вакуумном объеме для исключения паразитных теплопритоков.

Принцип работы основан на поверхностной конденсации газообразного аргона, подаваемого под давлением в каналы теплообменника, охлаждаемого до температуры ниже точки фазового перехода. Выходное отверстие (игла-дрессель) позволяет создать необходимое рабочее давление в зоне конденсации для эффективной теплопередачи и повышения температуры конденсации. Игла охлаждается как контактным способом, так и за счет адиабатического падения давления (эффект Джоуля-Томсона). Таким образом достигается комбинированный процесс охлаждения аргона, конденсация в теплообменнике и дополнительное охлаждение за счет дроссельного эффекта.

Гидравлическое сопротивление канала теплообменника пренебрежимо мало по сравнению с гидравлическим сопротивлением капилляра, так как площадь сечения канала теплообменника на шесть порядков превышает площадь сечения капилляра, через который инжектируется жидкость.

Компенсирующий нагреватель 25 предназначен для управления температурой теплообменника-ожижителя. На выходе из теплообменника 24 жидкий аргон по трубке 26 подается в капилляр 15, закрепленный в патроне 27. В качестве капилляра инъекции жидкого аргона использовалась игла калибра 32G TW длиной 23 mm. Толщина иглы 235 μm , диаметр канала иглы 104 μm .

Температура теплообменника контролируется термодатчиком TP1 в точке вблизи входа магистрали аргона и термодатчиком TP2 в точке вблизи выхода магистрали аргона. Для измерения температуры применялись резистивные термодатчики HEL-705 в режиме измерения сопротивления. Погрешность измерения составляет 1 К.

Для соединения трубки отвода жидкого аргона от ожижителя 26 с капилляром 15 использовался стандартный фитинг Ну-Lok CWC-8M-4P и специально спроектированный и изготовленный для решения данной задачи патрон 27 с уплотнением из индия. В патрон по оригинальной технологии интегрирован термодатчик TP3 (резистивный термодатчик HEL-705).

Для фильтрации жидкого аргона от твердотельных примесей на входе в капилляр, в соответствии с рекомендацией, приведенной в [10], использовался материал 28 фильтра аналитического ФПП-15.

В качестве термовакuumного барьера использован сильфон ГОСТ 22388-90 исп.1 28-8-0.16 в составе специ-

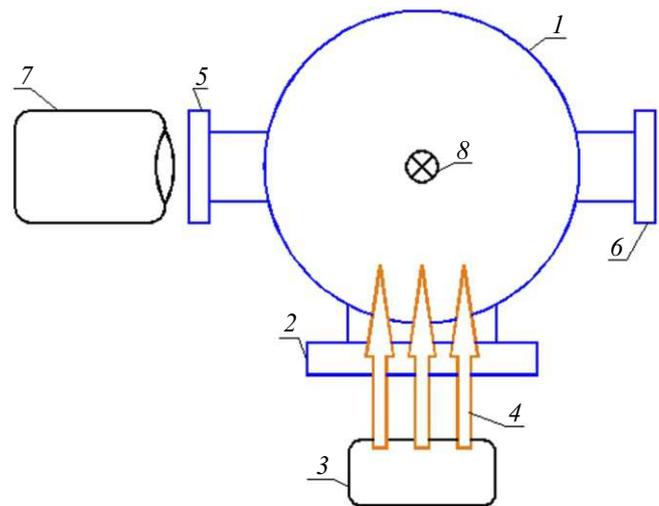


Рис. 2. Схема видеосъемки формирования струи и эшелона капли аргона. Вид сверху: 1 — КФ, 2 — окно для освещения, 3 — прожектор, 4 — поток света, 5 — окно для скоростной видеосъемки, 6 — окно-фон (также использовалось для фотосъемки без временного разрешения), 7 — скоростная видеокамера, 8 — струя.

ально спроектированного и изготовленного для решения данной задачи узла.

Схема фото- и видеосъемки представлена на рис. 2. Скоростная видеосъемка струи производилась с помощью монохромной видеокамеры Phantom Miro M110 с размером пикселя 20 μm и динамическим диапазоном 12 bit. Использовался макрообъектив с фокусным расстоянием 100 mm и относительным отверстием f/2.8. Съемка аргоновой струи производилась при частоте следования кадров 1600 Hz, что соответствует периоду следования кадров 625 μs . Экспозиция составляла 2 μs . Смещения струи и капель за время экспозиции были заведомо много меньше их размеров. Длительность одной видеозаписи при указанных выше настройках составляет примерно 1.3 s.

Освещение производилось при помощи светодиодного прожектора, создающего в области струи освещенность $2 \cdot 10^5 \text{ lx}$ с низким уровнем пульсаций. Струя и начало эшелона капель располагаются на фоне оптического окна с противоположной стороны КФ от окна видеосъемки, что позволяет иметь низкую засветку фона от прожектора.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На начальном этапе эксперимента была разработана методика получения стабильной струи жидкого аргона. Получение жидкого состояния аргона выше температуры тройной точки $T_{\text{Ar},\text{triple}} = 83.8 \text{ K}$ возможно при давлениях выше давления тройной точки

$P_{Ar, triple} = 68.9 \text{ kPa}$. В силу того, что контроль температуры и давления непосредственно в области формирования жидкой фазы технически затруднен, была разработана процедура получения необходимых значений по результатам измерений имеющихся датчиков.

Перед началом эксперимента объем камеры криостата откачивался до давления $1.3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}$. Объем КФ откачивался до давления $2.6 \cdot 10^{-1} \text{ Pa}$ с одновременной откачкой магистрали аргона. По достижении заданных параметров вакуума, криостат заливался жидким азотом. Время выхода на режим составляло 45 min. Температура во время захлаживания контролировалась по термодатчикам TP1 и TP2. В силу особенности конструкции, температура патрона и капилляра на данном этапе стабилизировалась на уровне 140 K. Для захлаживания патрона с капилляром и трубки отвода сжиженного аргона от теплообменника при достижении на термодатчике TP2 температуры 86 K производился напуск аргона в линию подачи под давлением $P_{Ar} = 2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Захлаживание капилляра производилось при постоянной откачке КФ. Давление в КФ при этом устанавливалось на уровне 80 Pa.

Через некоторое время после подачи аргона в теплообменник, когда показания термодатчика TP3 опускались ниже 100 K, при давлении 80 Pa в КФ на кончике иглы наблюдались пульсации газопаровой смеси в виде широкого спрея с переходом в твердую фазу. В случаях, когда камера формирования оставалась откачанной до давления 80 Pa при достижении показания TP3 ниже 100 K в течение 10 min и более, происходило замерзание аргона в объеме теплообменника, выход аргона из иглы полностью прекращался, и система переставала реагировать на изменения давления в камере формирования. Возврат в рабочий режим осуществлялся с помощью прогрева компенсирующим нагревателем при мощности 40 W. Время отогрева составляло 20 min.

Для того чтобы избежать этого эффекта и получить стабильную генерацию струи, при показаниях термодатчика TP3 ниже 90 K производился перевод КФ в рабочий режим с давлением 80 kPa. Данная величина давления выбрана исходя из технической возможности поддержания минимального стабильного давления выше значения $P_{Ar, triple}$ посредством регулировки сечения магистрали откачки дроссельным клапаном 17 при контроле по мановакуумметру 18. Также мог производиться напуск аргона в КФ из баллона 20 через редуктор 21 и натекагель 22. После перевода КФ в рабочий режим происходил резкий переход на выход из капилляра жидкого аргона с пульсациями струи, переходящими в спрей. При увеличении давления в магистрали аргона до $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ струя в течение 1 min стабилизировалась и далее оставалась стабильной в течение всего времени проведения видеофиксации ($> 30 \text{ min}$).

Измерения температуры патрона иглы термодатчиком TP3 показали, что при возникновении потока жидкости через капилляр температура патрона уменьшается на величину 12 K в течение 10 s. Это свидетельствует о

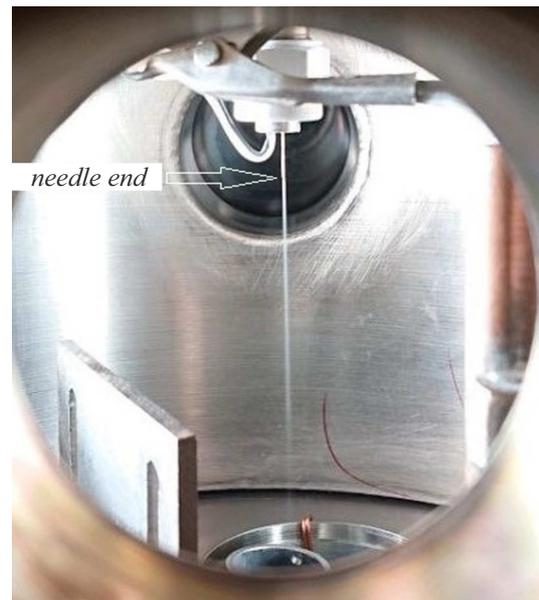


Рис. 3. Струя жидкого аргона, зафиксированная с помощью фотокамеры низкого временного разрешения.

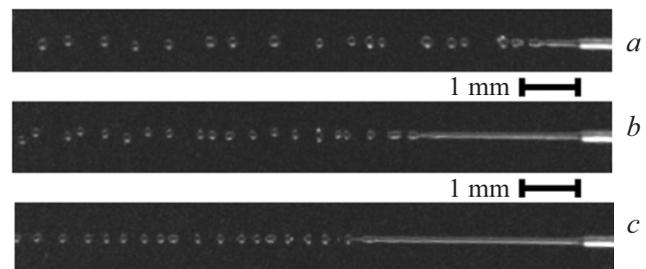


Рис. 4. Формирование эшелона капель из струи аргона вследствие развития неустойчивости Плато–Релея при различных давлениях в магистрали аргона: *a* — $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, *b* — $5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, *c* — $6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Снято с помощью высокоскоростной видеокамеры.

существенном влиянии потока жидкости на тепловой баланс патрона и капилляра.

На рис. 3 представлено фото струи жидкого аргона, полученное с экспозицией 33 ms при следующих параметрах инъекции: давление в магистрали аргона $4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$, давление в КФ 80 kPa, температура на патроне иглы 88 K. Видно формирование устойчивой струи аргона длиной $\cong 100 \text{ mm}$.

На рис. 4 показаны мгновенные фотографии струи, снятые с временем экспозиции 2 μs . Наблюдается четкая картина распада непрерывной струи на эшелон из отдельных капель. Распад происходит на некотором расстоянии L_{jet} от конца капилляра, из которого истекает струя, вследствие развития неустойчивости Плато–Релея. Величина указанного расстояния увеличивается с повышением давления в магистрали аргона.

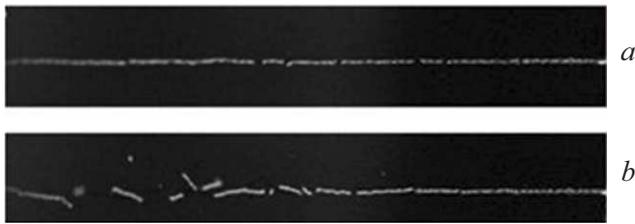


Рис. 5. Разрушение твердофазной струи аргона при пониженном давлении в КФ: *a* — $6 \cdot 10^4$ Па, *b* — $4 \cdot 10^4$ Па. Снято с помощью высокоскоростной видеокамеры.

При давлениях 40–70 кПа в КФ и $4 \cdot 10^5$ Па в линии подачи аргона переход жидкости в твердую фазу проходил прямо на выходе иглы с образованием длинной нити твердого аргона, которая начинала разламываться на расстоянии порядка 20–30 мм от конца иглы. Фотографии данного процесса представлены на рис. 5.

При дальнейшем снижении давления в КФ до 20 кПа и ниже, аргон начинал выходить из иглы в твердой фазе в виде тонких завивающихся волосков длиной примерно 20–50 мм.

Приведенные на рис. 4 фотографии позволяют непосредственно измерять геометрические характеристики струи и эшелона, используя известный наружный диаметр капилляра $235 \mu\text{m}$.

Наблюдаемые значения диаметра образующихся капель во всех случаях составляют примерно два диаметра струи. Расстояние между каплями L_{dr} , период эшелона капель и диаметр капель D_{dr} нестабильны. Для данных, показанных на рис. 4, *a–c*, соответственно наблюдаемые средние значения $\langle L_{dr} \rangle = 480, 340, 320$ и $\langle D_{dr} \rangle = 240, 220, 200 \mu\text{m}$.

Классическая модель развития неустойчивости Плато–Рэлея определяет геометрические характеристики образующегося эшелона капель следующим образом [11]:

$$L = \frac{\pi}{0.7} d \cong 4.5d, \quad (1)$$

$$D = (6.75)^{1/3} d \cong 1.9d. \quad (2)$$

Здесь d — диаметр струи (предполагается равным внутреннему диаметру капилляра $104 \mu\text{m}$), L — расстояние между каплями в эшелоне, D — диаметр капли. Выражения (1) и (2) получены в предположении отсутствия механических колебаний капилляра, из которого выходит струя. Видно, что наблюдаемые средние значения $\langle L_{dr} \rangle$ и $\langle D_{dr} \rangle$ неплохо соответствуют оценкам $L \cong 470 \mu\text{m}$ и $D \cong 200 \mu\text{m}$, сделанным с помощью выражений (1) и (2). Наблюдаемая нестабильность значений L_{dr} и D_{dr} может быть обусловлена влиянием вибраций экспериментального стенда.

Во многих случаях возможна покadroвая идентификация отдельных капель по имеющимся особенностям их размера и формы. Это позволяет определять скорость эшелона по двум близким по времени кадрам. Для

Таблица 2. Результаты статистической обработки данных скоростной видеосъемки эшелонов капель аргона: dL_{fr} , dL_{jet} — стандартное отклонение длин L_{fr} , L_{jet}

P_{Ar}	L_{fr}	dL_{fr}	L_{jet}	dL_{jet}	V_{jet}
кПа	мм	мм	мм	мм	м/с
400	0.26	0.05	1.04	0.21	0.42
500	0.38	0.05	3.09	0.16	0.61
600	0.41	0.01	4.49	0.21	0.66

статистического анализа геометрических характеристик и скорости эшелона была проведена обработка больших массивов (по 2052 кадра для каждого из трех исследованных давлений) полученных изображений с помощью специально разработанного для этой цели программного обеспечения. Скорость V_{jet} эшелона капель аргона считалась равной скорости струи и определялась как отношение сдвига эшелона L_{fr} за один кадр к периоду следования кадров. Результаты обработки представлены в табл. 2.

Наблюдаемый разброс измеренных значений может быть связан с наличием естественного нерегулярного фона вибраций капилляра в направлении поперек оси инъекции. Это приводит к флуктуациям амплитуды начальных колебаний поверхности струи, что вызывает появление флуктуаций времени развития неустойчивости Плато–Рэлея и соответственно длины нераспавшейся части струи, а также флуктуаций скорости струи и эшелона.

Измеренные величины скорости струи и эшелона капель аргона V_{jet} сравнивались с оценками по формуле Пуазейля для скорости струи на оси капилляра V_0 [12]:

$$V_0 = \frac{\Delta P R^2}{4bL}, \quad (3)$$

где ΔP — перепад давления на капилляре, $R = d/2 = 52 \mu\text{m}$ — внутренний радиус капилляра, b — динамическая вязкость жидкости, L — длина капилляра. Согласно [10], динамическая вязкость аргона при 90 К составляет $2.25 \cdot 10^{-4}$ Па·с, при 120 К — $1.17 \cdot 10^{-4}$ Па·с. В наших экспериментах контролировалась температура патрона, в котором крепится капилляр, через который проходит жидкий аргон. Техническая возможность непосредственно измерить температуру жидкого аргона, двигающегося внутри иглы, отсутствует, поэтому все расчеты выполнены для двух температур жидкого аргона: V_{01} для 90 К (значения, близкого к измеренной во время инъекции температуре патрона TP3 $\cong 88$ К) и V_{02} для 120 К для оценки влияния возможного нагрева аргона вследствие вязкого трения в капилляре. Длина капилляра $L = 23$ мм взята равной длине иглы. Перепад давления на капилляре ΔP вычислялся как разность между давлением в магистрали аргона

Таблица 3. Сравнение результатов эксперимента и расчетов параметров эшелона.

P_{Ar}	V_{01}	V_{02}	t_{jet}	t_{R1}	t_{R2}
кПа	м/с	м/с	мс	мс	мс
400	42	80	2.5	1.7	2.4
500	55	106	5.1	1.7	2.4
600	68	131	6.8	1.7	2.4

$P_{Ar} = [400, 500, 600]$ кПа и давлением в КФ 80 кПа. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Расчитанные по формуле (3) и приведенные в табл. 3 скорости струи V_{01} и V_{02} существенно превышают экспериментально измеренные $V_{jet} \cong 0.4-0.7$ м/с. Здесь следует отметить, что в ходе экспериментов наблюдаемый фазовый переход аргона при охлаждении в теплообменнике всегда наблюдался при адекватных измеряемых значениях давления в магистрали аргона и температуры теплообменника, что свидетельствует об отсутствии существенных потерь давления на протяжении магистрали аргона, в том числе в теплообменнике. Вероятно, для расчета ускорения струи в капилляре субмиллиметрового диаметра следует учитывать влияние фильтра и процессы, происходящие в пограничном слое жидкости у стенки капилляра [13], а также возможное увеличение гидродинамического сопротивления капилляра в результате уменьшения его эффективного диаметра из-за намерзания аргона на его стенках.

Величина времени развития неустойчивости Плато-Релея по результатам эксперимента может быть оценена как $t_{jet} = L_{jet}/V_{jet}$ и приведена в табл. 3. По модели Плато-Релея время развития неустойчивости τ_R определяется следующим образом [11,14,15]:

$$t_R = \frac{\ln(1/x)}{0.35\sqrt{8}} \sqrt{\frac{n \cdot d^3}{s}}. \quad (4)$$

Здесь d — диаметр струи, n — плотность жидкого аргона, s — коэффициент поверхностного натяжения жидкого аргона, x — амплитуда начального возмущения поверхности струи, выраженная в долях от радиуса струи. Выбор относительной амплитуды начального возмущения поверхности струи для оценок по модели Плато-Релея может быть сделан по результатам ранее выполненных экспериментальных исследований [14,15], в которых сообщается диапазон $x = 0.01 - 0.1$. В табл. 3 приведены результаты расчетов t_{R1} для 90 К и t_{R2} для 120 К со значениями плотности жидкого аргона $n_{Ar1} = 1376$ кг/м³, $n_{Ar2} = 1160$ кг/м³ и коэффициентами поверхностного натяжения s жидкого аргона $11.8 \cdot 10^{-3}$ Н/м, $4.95 \cdot 10^{-3}$ Н/м для соответствующих температур согласно [10]. Параметр x в (4) выбирался равным 0.01. Из табл. 3 видно, что оценки времени развития неустойчивости по модели Плато-Релея t_{R1} ,

Таблица 4. Оценки (5) потока аргона в эшелоне капель

P_{Ar}	V_{jet}	G_{Ar1}	G_{Ar2}
кПа	м/с	10^{19} ат/с	10^{19} ат/с
400	0.42	7.34	6.19
500	0.61	10.7	9.05
600	0.66	11.67	9.76

t_{R2} удовлетворительно совпадают с результатами эксперимента с учетом разброса экспериментальных данных, обусловленных, как отмечалось выше, наличием естественного нерегулярного фона вибраций капилляра и неопределенностями значений трудноконтролируемого параметра x .

Важной характеристикой мишеней при создании источника излучения в ЭУФ нанолитографе является поток атомов мишени в область иницирования лазерно-плазменной искры. В современных устройствах фирмы ASML мишени из жидкого олова размером $D_{Sn} \cong 30$ мкм подаются с частотой $f_{Sn} \cong 50$ kHz [16]. Поскольку размер каустики (фокуса) лазерного пятна больше D_{Sn} и все частицы олова участвуют в создании излучающей плазмы, можно оценить поток атомов олова G_{Sn} как

$$G_{Sn} = \frac{n_{Sn} \cdot \pi \cdot D_{Sn}^3}{6 \cdot M_{Sn}} \cdot f_{Sn} \cong 2.5 \cdot 10^{19} \text{ ат/с}.$$

Здесь $n_{Sn} \cong 6990$ кг/м³ — плотность расплавленного олова, M_{Sn} — масса атома олова.

Полученные экспериментальные данные о скорости V_{jet} и средних значениях диаметра $\langle D_{dr} \rangle$ и периода $\langle L_{dr} \rangle$ капель аргона позволяют оценить потоки атомов мишени из капилляра, которые приведены в табл. 4:

$$G_{Ar1,2} = \frac{n_{Ar}(T) \cdot \pi \cdot \langle D_{dr} \rangle^3}{6 \cdot M_{Ar}} \cdot \frac{V_{jet}}{\langle L_{dr} \rangle}, \quad (5)$$

где M_{Ar} — масса атома аргона. Расчет произведен для двух температур аргона — 90 К (G_{Ar1}) и 120 К (G_{Ar2}).

Частота подачи $V_{jet}/\langle L_{dr} \rangle = (0.6 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1})/(340 \text{ мкм}) \cong 1.8$ kHz (для $P_{Ar} = 500$ кПа) низка в силу низких значений V_{jet} . Для получения частоты 50 kHz нужно достичь скоростей $V_{jet} \cong 17$ м/с, что увеличивает значения потока $G_{Ar} \cong 3.0 \cdot 10^{21}$ ат/с. Таким образом, при увеличении диаметра мишени, нужно использовать лишь небольшую часть $G_{Sn}/G_{Ar} \cong 0.009$ атомов, поставляемых в область фокуса лазерного пятна с целью достижения максимальной эффективности источника излучения. Можно ожидать, что в предлагаемом подходе с увеличением размера мишеней для оптимизации плотности, длительности и размера излучающего на поверхности мишени плазменного облака можно будет использовать следующие параметры: энергию, длительность, размер фокуса лазерного пятна и угол наклона лазерного излучения по отношению к нормали к поверхности мишени. Кроме

того, увеличение размера мишеней в эшелоне, а значит, их инерции, может быть удобным с точки зрения снижения отклонений их траекторий, что важно для инициирования плазменной-лазерной искры. Это также снижает требования к точности позиционирования фокуса лазерного пятна на поверхности мишени во время ее движения в камере первого зеркала литографа.

С увеличением размера мишени возрастает проблема поддержания небольшого давления 0.1–1 Ра в области источника излучения ЭУФ для сохранения его малой оптической толщины с необходимостью одновременного поддержания в области капилляра давления выше давления $P_{Ar, triple}$. Для решения этой проблемы источник мишеней для промышленного нанолитографа должен состоять из нескольких ступеней [14,17] с дифференциальной независимой откачкой, как это предложено в [18].

Заключение

Создан стенд, предназначенный для исследования криогенных аргоновых капель-мишеней лазерно-плазменной искры для источника ЭУФ излучения нанолитографа.

На стенде проведены первые экспериментальные исследования процесса инжекции струи сжиженного аргона в замкнутый объем с контролируемой атмосферой. Определены параметры системы, при которых достигается стабильная инжекция жидкого аргона в виде струи. Установлено, что экспериментально измеренная скорость струи значительно ниже ожидаемой. Возможными причинами являются потери давления на фильтре и увеличение гидродинамического сопротивления капилляра в результате уменьшения его эффективного диаметра из-за замерзания аргона на его стенках.

Экспериментально наблюдался и зафиксирован с помощью скоростной видеосъемки процесс развития неустойчивости Плато–Рэля в струе жидкого аргона. Параметры полученного эшелона аргоновых капель диаметром 0.2 mm с пространственным периодом 0.5 mm могут представлять интерес для поиска рабочего режима источника ЭУФ с большими размерами капель в миллиметровом диапазоне по сравнению с рассматриваемыми до сих пор размерами 10–20 μm ксеноновых струй и капель.

Можно ожидать, что наблюдаемые флуктуации диаметра и пространственного периода эшелона капель могут быть в будущем снижены путем увеличения скорости струи и с использованием задающего ультразвукового генератора механических колебаний капилляра.

Следующими шагами в развитии технологии должны стать эксперименты с ксеноном, создание системы доставки эшелона мишеней в область инициирования лазерно-плазменной искры и исследования эффективности источника излучения ЭУФ.

Финансирование работы

Работа поддержана ГК Росатом и Минобрнауки России в рамках федерального проекта „Технологии термоядерной энергетики“ национального проекта технологического лидерства „Новые атомные и энергетические технологии“, проект № FSEG-2025-0002 „Разработка принципов и систем управления и диагностики плазмы токамаков с помощью инжекции вещества“.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V. Bakshi (ed.). *EUV sources for lithography* (SPIE PRESS, 2006)
- [2] H. Meiling, E. Boon, N. Buzing, K. Cummings, O. Frijns, J. Galloway, M. Goethals, N. Harned, B. Hultermans, R. de Jonge, B. Kessels, P. Kurz, S. Lok, M. Lowisch, J. Mallman, B. Pierson, K. Ronse, J. Ryan, E. Smitt-Weaver, M. Tittnich, C. Wagner, A. van Dijk, J. Zimmermann. *Emerging Lithographic Technologies XII*. SPIE, **6921**, 171 (2008)
- [3] B.A.M. Hansson, H.M. Hertz. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **37**, 3233 (2004). DOI: 10.1088/0022-3727/37/23/004
- [4] 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**, 33718 (2018). DOI: 10.1364/OE.26.033718
- [5] H. Fiedorowicz, A. Bartnik, R. Jarocki, R. Rakowski, M. Szczurek. *Appl. Phys. B*, **70** (2), 305 (2000).
- [6] N.I. Chkhalo, S.A. Garakhin, A.Ya. Lopatin, A.N. Nechay, A.E. Pestov, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, N.N. Tsybin, S.Tu. *Zuev. AIP Advances*, **8** (10), 105003 (2018). DOI: 10.1063/1.5048288
- [7] S.G. Kalmykov, P.S. Butorin, M.E. Sasin. *J. Appl. Phys.*, **126**, 103301 (2019). DOI: 10.1063/1.5115785
- [8] В.Е. Гусева, А.Н. Нечай, А.А. Перекалов, Н.Н. Салашченко, Н.И. Чхало. *ЖТФ*, **92** (8), 1185 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.08.52781.72-22
- [9] V.E. Guseva, M.S. Mikhailenko, A.N. Nechai, A.A. Perekalov, N.N. Salashchenko, N. Chkhalo. *Instrum. Experiment. Techniq.*, **67**, 67 (2024). DOI: 10.1134/S002044122470012X
- [10] М.П. Малков (ред.). *Справочник по физико-техническим основам криогеники* (Энергоатомиздат, М., 1985)
- [11] В.Г. Левич. *Физико-химическая гидродинамика* (Физматлит, М., 1959)
- [12] Л. Прандтль. *Гидроаэромеханика*. [пер. со второго немецкого издания Г.А. Вольперта] (ПХД, М., Ижевск, 2002)
- [13] K.V. Sharp, R. Adrian, J.G. Santiago, J.I. Molho. *Liquid flows in microchannels* (CRC Press, 2005)
- [14] A.V. Boukharov, M. Buscher, A.S. Gerasimov, V.D. Chernetsky, P.V. Fedorets, I.N. Maryshev, A.A. Semenov, A.F. Ginevskii. *Phys. Rev. Lett.*, **100**, 174505 (2008). DOI: 10.1103/PhysRevLett.100.174505
- [15] B.A.M. Hansson, M. Berglund, O. Hemberg, H.M. Hertz. *J. Appl. Phys.*, **95**, 4432 (2004). DOI: 10.1063/1.1687037

- [16] I. Fomenkov, D. Brandt, A. Ershov. Adv. Opt. Technol., **6**, 173 (2017). DOI: 10.1515/aot 2017-0029
- [17] R.A. Costa Fraga, A. Kalinin, M. Kühnel, D.C. Hochhaus, A. Schottelius, J. Polz, M.C. Kaluza, P. Neumayer, R.E. Grisenti. Rev. Sci. Instrum., **83** (2), 025102 (2012). DOI: 10.1063/1.3681940
- [18] В.Ю. Сергеев, П.А. Карасев, Т.В. Черноизюмская, Д.Д. Коробко. *Устройство для управляемого формирования и подачи эшелона ксеноновых мишеней в камеру источника жесткого ультрафиолетового излучения* (Патент РФ № 224312, Изобретения. Полезные модели. Бюл. №9, 2024)