04

Демпфированный вакуумный разряд как вариант источника ЭУФ излучения для литографии

© Л.В. Степанов,[1,2] П.С. Анциферов,[1,2] Н.Д. Матюхин[1,3]

[1] Институт спектроскопии РАН,
108840 Троицк, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики,
109028 Москва, Россия
[3] Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия
e-mail: lvstepanov@edu.hse.ru

Поступило в Редакцию 17 декабря 2024 г.
В окончательной редакции 21 февраля 2025 г.
Принято к публикации 27 февраля 2025 г.

Описана установка для получения демпфированного вакуумного разряда с пиковым током 18 kA и длительностью меньше 1 μs. В таком разряде реализуется ранее обнаруженное явление возникновения многозарядных ионов в вакуумном разряде в условиях отсутствия пинчевания на стадии формирования разрядного столба плазмы. Основная идея заключается в быстром прекращении разрядного тока после этой стадии, что может позволить реализовать разрядный источник излучения с низким уровнем эрозии электродов. Управление током разряда осуществляется с помощью демпфирования разрядного контура путем включения в его цепь балластного сопротивления. Тестовые измерения показали возникновение многозарядных ионов железа (до Fe VIII) на временах 100–200 ns от начала разряда. Была изучена зависимость динамики развития разряда и интенсивности его излучения в диапазоне экстремального ультрафиолета от расстояния между электродами. Продемонстрировано возникновение излучения с длиной волны 13.5 nm при использовании в разряде анода из олова.

Ключевые слова: электрические разряды, экстремально ультрафиолетовое излучение, экстремально ультрафиолетовые спектры, многозарядные ионы.

DOI: 10.61011/JTF.2025.07.60651.463-24

Введение

В связи с востребованностью источников излучения экстремального ультрафиолета (ЭУФ $\lambda = 8-25$ nm) для приложений в ЭУФ литографии [1–3], представляет интерес исследование возможностей вакуумных электрических разрядов, техническая реализация которых более проста и дешева, чем создание лазерной плазмы. Изучение таких разрядов с помощью регистраторов ЭУФ излучения на микроканальных пластинах (МКП), обладающих временным (~ 10 ns) и пространственным ($\sim 50\,\mu$m) разрешением, позволило обнаружить ряд свойств вакуумного разряда интересных с точки зрения приложений [4,5]. В настоящей работе описывается вариант источника ЭУФ излучения, разработанный на основе результатов работы [5].

В работе [5] изучалось ЭУФ излучение плазмы вакуумной искры силой тока 50 kA (основная емкость 3 μF, рабочее напряжение 12 kV). Существенным моментом явилось использование методики одновременной регистрации пространственного распределения плазмы и спектрограмм ее ЭУФ излучения с помощью МКП регистраторов (схема измерений приведена на рис. 1). Основным результатом работы явилось обнаружение возникновения ионов железа Fe VII в процессе формирования разрядного столба плазмы на начальном этапе развития разряда (200–300 ns от начала разрядного тока), когда изначально приложенное к разрядному промежутку напряжение в 12 kV не успевает полностью упасть, и составляет величину ~ 5 kV, при этом ток разряда достигает значения несколько килоампер. Пинчевание плазмы в этот момент отсутствует. Необходимая для получения ионов Fe VII энергия электронов (> 100 eV) может быть ими получена в результате ускорения в приложенном к плазме поле (явление убегания электронов).

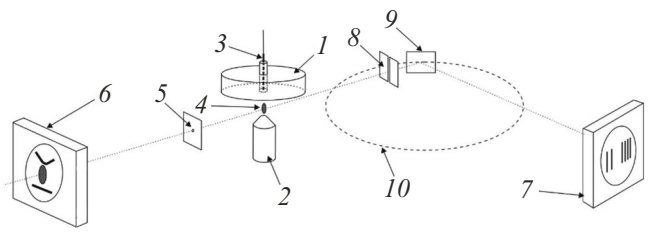


Рис. 1. Схема эксперимента с одновременной регистрацией обскурограмм и спектрограмм разряда: *1* — катод, *2* — анод, *3* — триггерный электрод, *4* — разрядная плазма, *5* — камера-обскура, *6* — МКП детектор камеры-обскуры, *7* — МКП детектор спектрометра, *8* — входная щель спектрометра, *9* — дифракционная решетка спектрометра, *10* — окружность Роуланда.

Этот механизм возможен, если электрическое поле, приложенное к плазме, составляет величину порядка критического (ускорение электрона на длине свободного пробега дает прирост кинетической энергии порядка средней тепловой). Оценки, сделанные в [5], показывают, что приложенное к разрядной плазме электрическое поле ($\sim 10^4$ V/cm) будет критическим, если электронная плотность не превышает величину $\sim 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$. Такие значения электронной плотности вполне реальны на начальном этапе формирования разряда.

В настоящей работе описывается вариант ЭУФ источника на основе излучения плазмы вакуумного разряда, в котором используется вышеописанное явление. Основная идея заключается в прерывании разрядного тока спустя несколько сотен наносекунд после начала разряда, когда излучение многозарядных ионов исчезает. При этом ожидается существенное уменьшение суммарной эрозии электродов по сравнению с разрядным контуром, описанным в работе [5]. Эта эрозия является причиной загрязнения оптических элементов, что является одним из основных недостатков разрядных источников ЭУФ излучения. Самым простым способом создания такого разряда является введение затухания в разрядный контур. Ниже дается описание электрической схемы такого разряда и приводятся результаты тестовых измерений.

1. Описание разрядного контура

Полная электрическая схема разрядного контура приведена на рис. 2. Основной разрядный контур включает емкостный накопитель на основе малоиндуктивного конденсатора КПИМ-50-0.15 (электрическая емкость $C_0 = 0.15\,\mu$F, индуктивность $L = 10$ nH). Эта емкость существенно уменьшена по сравнению с использованной в работе [5] ($3\,\mu$F). Рабочее напряжение в настоящих экспериментах составляло величину $U_0 = 12$ kV. Полная конструктивная индуктивность L_0, измеренная по периоду колебаний тока ($T = 1.7\,\mu$s), составила $L_0 = 91$ nH.

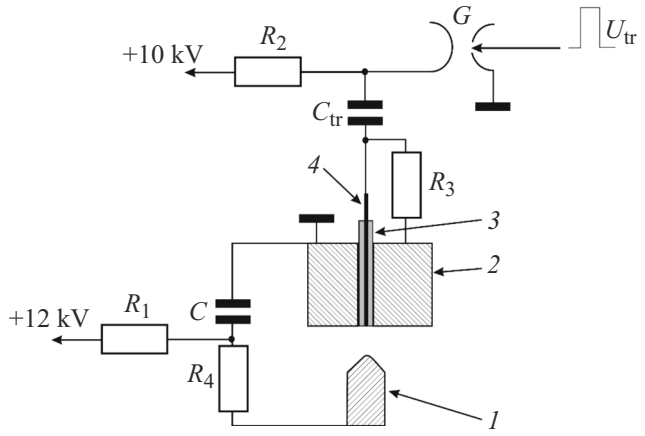


Рис. 2. Электрическая схема разрядного контура: *1* — анод, *2* — катод, *3* — изолятор триггерного электрода, *4* — триггерный электрод, *G* — разрядник триггерного контура РУ-62.

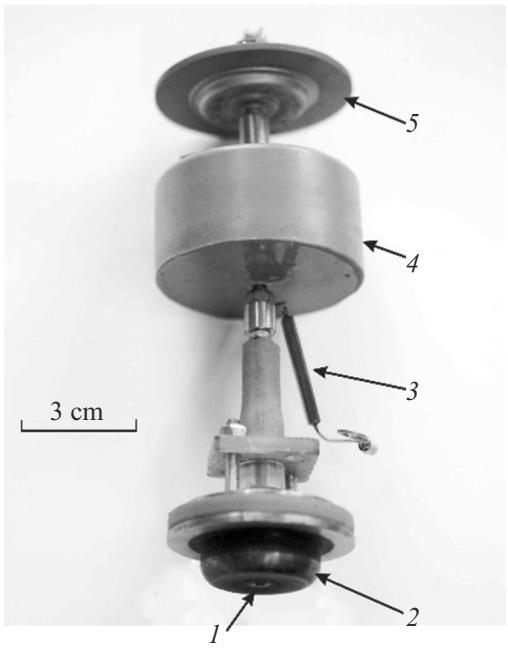


Рис. 3. Конструкция катодного узла: *1* — отверстие триггерного электрода, *2* — катод, *3* — заземляющий резистор R_3, *4* — конденсатор К15-4, *5* — разрядник РУ-62.

Близкое к критическому затухание (обеспечивающее эффективное прерывание разрядного тока) достигается с помощью включения в разрядный контур активного сопротивления $R_4 = 0.7\,\Omega$. Номиналы резисторов на рис. 2: $R_1 = 800\,\Omega$, $R_2 = 300\,\mathrm{k}\Omega$, $R_3 = 15\,\mathrm{k}\Omega$. Сопротивление R_4 собрано из 30 соединенных параллельно резисторов ТВО-05 номиналом $22\,\Omega$.

Разряд инициируется с помощью триггерного электрода *4* (рис. 2), на который подается импульс напряжения отрицательной полярности -10 kV. Триггерный разрядный контур состоит из конденсатора К15-4 с емкостью $C_{tr} = 4.7$ nF и разрядника РУ-62. Для уменьшения индуктивности контура поджига разряда конденсатор, триггерный разрядник G и катод были собраны в виде единого узла, без соединительных кабелей (в работе [5] триггерный импульс подавался на электрод *4* через отрезок кабеля сопротивлением $50\,\Omega$ и длиной 1.5 m). На рис. 3 представлен катодный узел со снятым коаксильным обратным токопроводом. Такая конструкция позволяет при существенном уменьшении энергии в триггерном контуре и снижении уровня эрозии катодного электрода (в работе [5] величина C_{tr} составляла 50 nF) увеличить скорость поступления триггерной плазмы на начальной стадии разряда.

Анодный электрод имел диаметр 3 mm, расстояние анод–катод варьировалось в процессе эксперимента от 1 до 5 mm. Угол при вершине конуса анодного электрода — 90°, радиус закругления 0.2 mm. Материал электродов — железо. Остаточное давление в разрядной камере — 10^{-2} Pa. Разрядный ток измерялся с помощью

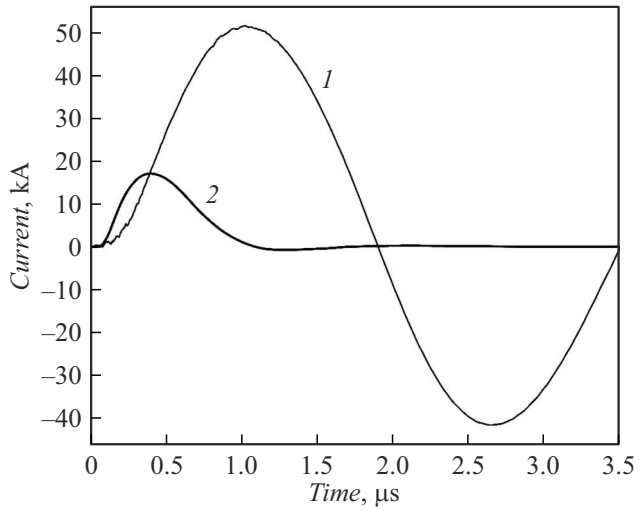


Рис. 4. Разрядный ток: *1* — кривая тока разряда без демпфирующего сопротивления [5], *2* — кривая тока демпфированного разряда (настоящая работа).

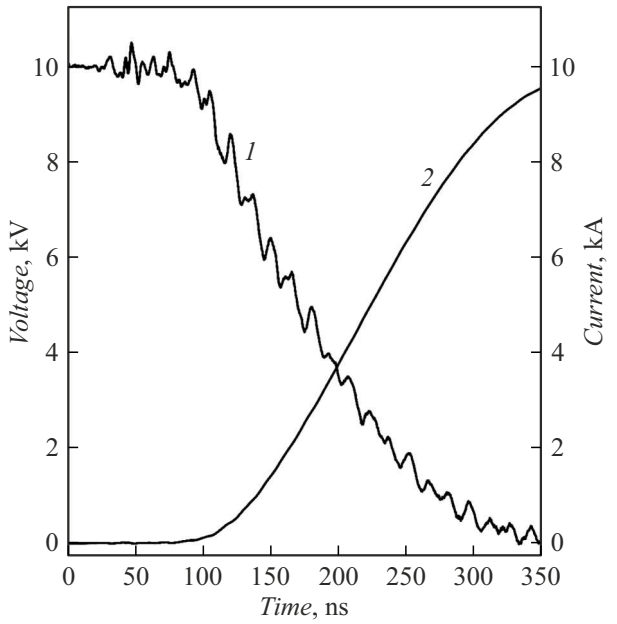


Рис. 5. Временная зависимость напряжения (*1*) на разрядном промежутке и тока (*2*) через него на начальном этапе разряда.

магнитного зонда. На рис. 4 приведены кривые тока разряда без демпфирующего сопротивления из работы [5] (кривая *1*) и описываемого в настоящей работе разряда с демпфирующим сопротивлением (кривая *2*). В случае демпфирования основная часть энергии, запасенной в конденсаторе, выделяется в балластном резисторе R_4, а не в разряде, что должно привести к снижению уровня эрозии электродов. Отсчет времени на графике рис. 4 производился от момента начала тока триггерного электрода.

Как было показано в работе [5], возникновение ЭУФ излучения на начальной стадии разряда связано с относительно медленным падением напряжения на разрядном промежутке. В настоящей работе информация об этом напряжении получена косвенным образом путем численного решения уравнения Кирхгофа для основного разрядного контура:

$$U(t) = U_0 - \frac{1}{C}\int_0^t dI(t)dt - R_4 I(t) - L_0\frac{dI(t)}{dt}. \qquad (1)$$

Значения входящих в уравнение величин приведены в начале главы, интеграл и производная от тока брались численно по экспериментальной кривой. Полученная временная зависимость напряжения на разрядном промежутке с соответствующей ей кривой тока приведена на рис. 5. Как можно видеть, напряжение падает не мгновенно, и в промежутке от 100 до 200 ns после начала разряда к разрядному промежутку приложено напряжение 4–8 kV и при этом через него протекает ток 2–4 kA. Таким образом, с помощью демпфирования удалось ограничить разряд по времени, сохранив при этом ключевые особенности его начальной стадии.

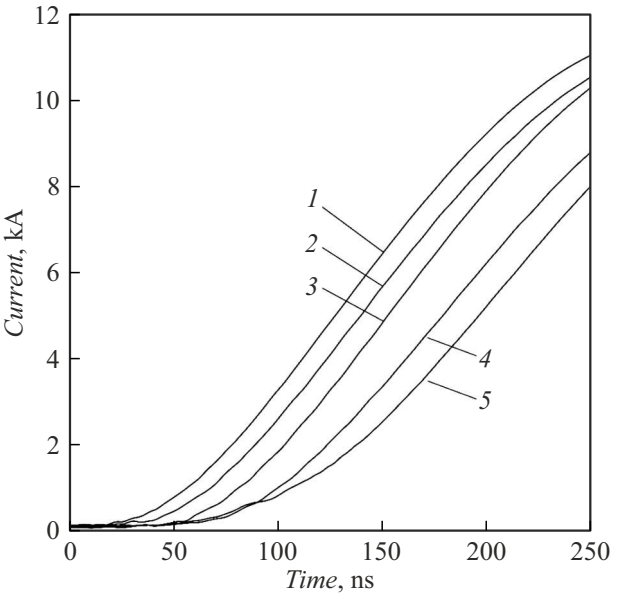


Рис. 6. Кривые тока разряда на начальном этапе развития при различных расстояниях между анодом и катодом, [mm]: *1* — 1, *2* — 2, *3* — 3, *4* — 4, *5* — 5.

Регистрация кривых разрядного тока показала зависимость задержки момента возникновения разрядного тока относительно триггерного импульса от расстояния между электродами (рис. 6). Увеличение задержки при больших расстояниях анод–катод связано с увеличением времени заполнения разрядного промежутка плазмой, приводящей к его закоротке. Соответствующее изменение динамики ЭУФ излучения описано ниже.

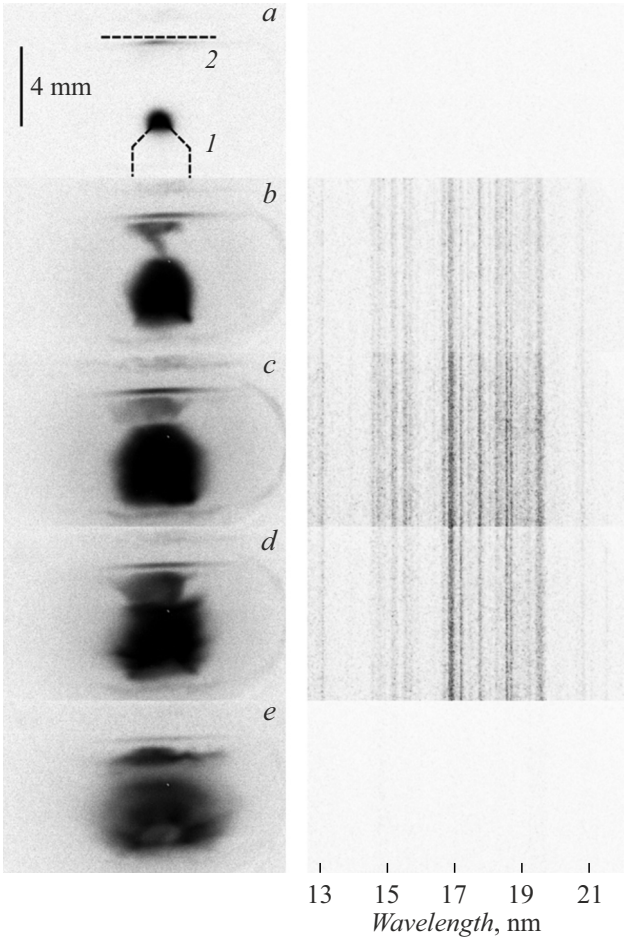


Рис. 7. Динамика развития разряда и соответствующие спектрограммы. Задержка относительно триггерного импульса, [ns]: *a* — 60, *b* — 100, *c* — 130, *d* — 150, *e* — 190. *a* — представлены положения электродов: *1* — анод, *2* — катод. Изображение приведено в негативе.

2. Тестовые измерения

В связи с изменениями, внесенными в конструкцию разрядного контура по сравнению с конструкцией установки, приведенной в [5], важным моментом настоящей работы была проверка наличия стадии с появления многозарядных ионов железа на начальном этапе разряда. Для этого был проделан ряд измерений, в которых одновременно в одном разряде регистрировались ЭУФ спектр и пространственная структура плазмы с временным разрешением (схема измерений — рис. 1).

Для изучения спектрального состава излучения разряда в работе использован спектрометр скользящего падения со смещенной щелью [6]. Его особенностью является возможность получить фокусировку спектра перпендикулярно лучу зрения, что в свою очередь позволяет использовать детекторы на микроканальных пластинах для регистрации спектра. Для достижения такого эффекта спектральная щель смещается внутрь окружности Роуланда, а плоскость регистрации перемещается при этом наружу. Геометрические параметры спектрометра: радиус решетки $R = 1$ m, плотность штрихов — 600 grooves/mm, угол скольжения 6°, расстояние от входной щели до решетки 53 mm, от решетки до плоскости регистрации — 420 mm (рис.1). Параметры были выбраны в соответствии с расчетами в работе [6]. Пространственная структура плазмы регистрировалась с помощью камеры обскуры, с диаметром отверстия 0.1 mm и геометрическим увеличением 3. В качестве системы регистрации изображений использовались регистраторы на микроканальных пластинах со временем экспозиции 20 ns. Они запускаются одновременно стробирующим импульсом, генератор которого синхронизирован с триггерным импульсом разряда. Имелась возможность плавно регулировать задержку стробирующего импульса относительно момента начала разряда. Более подробное описание схемы измерений представлено в работе [5].

На рис. 7 приведен ряд обскурограмм и соответствующих им спектрограмм для разных моментов времени в случае расстояния анод–катод 4 mm. На начальной фазе заполнения разрядного промежутка плазмой наблюдается испарение анода под действием электронного пучка, возникающего вследствие приложения к нему высокого напряжения (рис. 7, *a*). На этом этапе разрядный ток мал (рис. 5 задержки 0–50 ns). Это явление отмечалось еще в первых работах по низкоиндуктивной вакуумной искре [7]. Излучение многозарядных ионов в этот момент отсутствует. Затем оно появляется в диапазоне задержек 70–150 ns (рис. 7, *b*–*d*), и после 200-й наносекунды исчезает (рис. 7, *e*). На рис. 8 приведена оцифрованная спектрограмма, соответствующая рис. 7, *c*. Идентификация линий проведена в соответствии с базой данных NIST [8], в спектре регистрируются линии ионов Fe VII и Fe VIII.

Также была изучена динамика ЭУФ излучения в зависимости от расстояния анод–катод. На рис. 9 приведена зависимость интегральной по спектру интенсивности от времени для разных значений расстояния между анодом и катодом. Каждый столбец гистограммы соответствует отдельному спектру с соответствующей временной задержкой. Настоящая временная зависимость средней

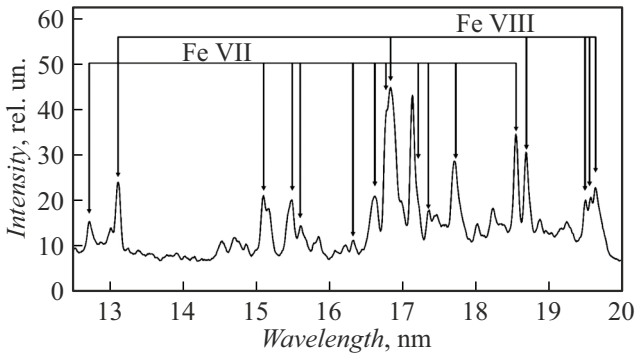


Рис. 8. Спектр, соответствующий рис. 7, *c* (130 ns). Положения линий Fe VII и Fe VIII указаны в соответствии с базой данных NIST [8].

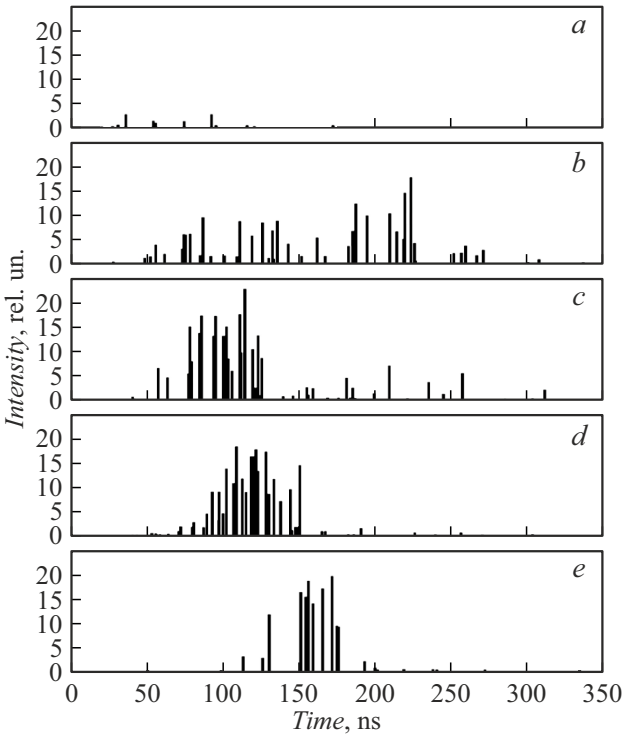


Рис. 9. Зависимость интенсивности излучения источника от времени для разных расстояний между электродами. Расстояние между анодом и катодом, [mm]: *a* — 1, *b* — 2, *c* — 3, *d* — 4, *e* — 5.

интенсивности ЭУФ излучения должна пониматься как гладкая кривая, аппроксимирующая высоту столбцов. При расстоянии 1 mm интенсивность спектров очень мала (рис. 9, *a*). При увеличении расстояния до 2 mm свечение возникает спустя примерно 75 ns после триггерного импульса и длится все время нарастания тока в разряде (рис. 9, *b*). При дальнейшем увеличении расстояния между электродами свечение становится интенсивнее, а его длительность сокращается до примерно 50 ns (рис. 9, *c*). На расстояниях между анодом и катодом 3, 4 и 5 mm характер динамики излучения сохраняется, при этом с ростом расстояния момент максимальной интенсивности излучения сдвигается со 100 до 150 ns от начала разряда (рис. 9, *c*–*e*).

3. Обсуждение

Обнаруженная в работе [5] начальная фаза развития разряда, характеризующаяся свечением многозарядных ионов, была воспроизведена в разряде с демпфированным контуром. В отличие от предыдущей реализации, когда свечение возникало после 200-й наносекунды и держалось примерно до 300-й наносекунды, в настоящей работе свечение появлялось уже после 100 ns от начала разряда. Предполагается, что это может быть связано с уменьшением индуктивности триггерного разрядного контура, что обеспечило более быстрый вброс вещества в разрядный промежуток. Реализация частотного режима работы разрядного контура требует применения системы охлаждения балластного резистора R_4.

Подробный анализ физических явлений, происходящих в разряде, не входит в рамки настоящей работы. Верхняя оценка электронной плотности, приведенная в работе [5] ($n_e < 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$), показывает, что разрядная плазма обладает относительно небольшой для сильноточных разрядов плотностью. Говорить об электронной температуре в условиях ускорения электронов в приложенном к плазме поле некорректно, из факта наблюдения многозарядных ионов железа следует, что средняя энергия электронов должна составлять величину порядка сотен eV.

В ходе работ были выполнены тестовые измерения с анодом из олова. Все электрические параметры разряда соответствовали экспериментам с анодом из железа. Динамика развития разрядного тока не претерпела заметных изменений после замены материала анода. Расстояние анод–катод составляло величину 4 mm. Обскурограмма и спектрограмма разряда с оловянным анодом приведены на рис. 10, соответствующая оцифрованная ЭУФ спектрограмма дана на рис. 11. В спектре его излучения наблюдается интенсивная группа линий в районе 13.5 nm, которая используется в технологии ЭУФ литографии. На рис. 11 указан диапазон отражения Mo–Si-многослойного зеркала, применяемого в технологических оптических схемах [9]. Для оценки

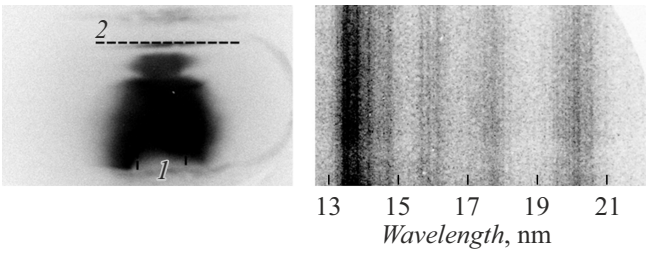


Рис. 10. Обскурограмма и соответствующая спектрограмма разряда с оловянным анодом. Время от начала разряда 120 ns. Изображение приведено в негативе: *1* — анод, *2* — катод.

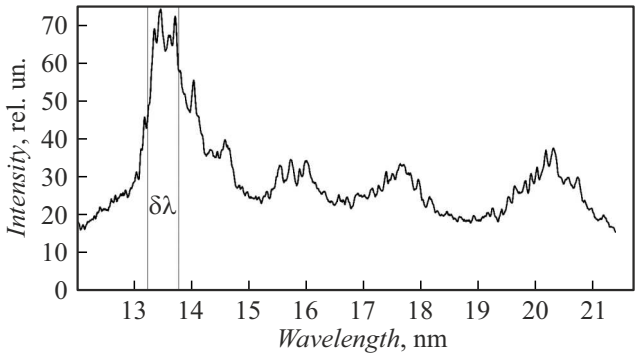


Рис. 11. Спектр, соответствующий рис. 10. $\delta\lambda$ — диапазон, используемый в ЭУФ литографии [9].

перспективности реальных практических приложений описываемого варианта разряда необходимо изучение эффективности преобразования энергии, а также оптимизация параметров разряда.

Заключение

Представлен демпфированный вакуумный разряд, являющийся источником ЭУФ излучения многозарядных ионов железа при отсутствии пинчевания с потенциально низким уровнем эрозии электродов. Представлены параметры электрического контура, позволяющие достичь критического режима в колебательном контуре разряда. Исследована зависимость динамики разряда от расстояния между электродами. Оптимальное расстояние для достижения максимальной интенсивности ЭУФ излучения составило величину 3–5 mm. Обнаружено, что излучение демпфированного разряда на ранней стадии развития так же как и излучение недемпфированного разряда [5] содержит линии многозарядных ионов Fe VII и Fe VIII. Продемонстрирована возможность получения излучения многозарядных ионов олова с длиной волны 13.5 nm, что может сделать актуальным предложенный вариант разряда для приложений в ЭУФ литографии. Дальнейшие планы работ, связанных с представленным видом разряда, включают моделирование физических процессов и оптимизация параметров разряда как источника излучения.

Финансирование

Работа выполнена в рамках проекта Госзадания FFUU-2025-0005.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J. Beckers, T. van de Ven, R. van der Horst, D. Astakhov, V. Banine. Appl. Sci., **9**, 2827 (2019). DOI: 10.3390/app9142827

[2] Д.Б. Абраменко, П.С. Анциферов, Д.И. Астахов, А.Ю. Виноходов, И.Ю. Вичев, Р.Р. Гаязов, А.С. Грушин, Л.А. Дорохин, В.В. Иванов, Д.А. Ким, К.Н. Кошелев, П.В. Крайнов, М.С. Кривокорытов, В.М. Кривцун, Б.В. Лакатош, А.А. Лаш, В.В. Медведев, А.Н. Рябцев, Ю.В. Сидельников, Е.П. Снегирёв, А.Д. Соломянная, М.В. Спиридонов, И.П. Цыгвинцев, О.Ф. Якушев, А.А. Якушкин. УФН, **189**, 323 (2019). DOI: 10.3367/UFNr.2018.06.038447

[3] V.Y. Banine, K.N. Koshelev, G.H.P.M. Swinkels. J. Phys. D: Appl. Phys., **44**, 253001 (2011). DOI: 10.1088/0022-3727/44/25/253001

[4] П.С. Анциферов, Л.А. Дорохин. Физика плазмы, **48** (11), 1086 (2022). DOI: 10.31857/S0367292122600492

[5] П.С. Анциферов, Л.В. Степанов, Н.Д. Матюхин. Физика плазмы, **50** (6), 701 (2024). DOI: 10.31857/S0367292124060076

[6] P.S. Antsiferov, L.A. Dorokhin, P.V. Krainov. Rev. Sci. Instrum., **87** (5), 053106 (2016). DOI: 10.1063/1.4945654

[7] T.N. Lie, R.C. Elton. Phys. Rev. A, **3**, 865 (1971). DOI: 10.1103/PhysRevA.3.865

[8] A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader. and NIST ASD Team (2023). *NIST Atomic Spectra Database* (version 5.11), [Online]. Available: https://physics.nist.gov/asd [Mon Aug. 26, 2025]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD

[9] I. Fomenkov, D. Brandt, A. Ershov, A. Schafgans, Y. Tao, G. Vaschenko, S. Rokitski, M. Kats, M. Vargas, M. Purvis, R. Rafac, B. La Fontaine, S. De Dea, A. LaForge, J. Stewart, S. Chang, M. Graham, D. Riggs, T. Taylor, M. Abraham, D. Brown. Adv. Opt. Technol., **6**,173 (2017). DOI: 10.1515/aot-2017–0029