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 μ s. 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 (~ 50 μ 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 3μ F, 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 $\sim 10^{16}$ 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 $U_0 = 12 \text{ kV}$. Полная конструктивная индуктивность L_0 , измеренная по периоду колебаний тока ($T = 1.7 \,\mu$ s), составила $L_0 = 91 \text{ nH}$.



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



Рис. 3. Конструкция катодного узла: 1 — отверстие тригтерного 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: $R_1 = 800 \Omega$, $R_2 = 300 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 15 \text{ k}\Omega$. Сопротивление R_4 собрано из 30 соединенных параллельно резисторов ТВО-05 номиналом 22 Ω .

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 $C_{\rm tr} = 4.7 \, {\rm nF}$ 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 Ω 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 $C_{\rm tr}$ 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} Ра. Разрядный ток измерялся с помощью



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

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:

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



1(

8



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.

10

8

2

0

Current, kA



Рис. 7. Динамика развития разряда и соответствующие спектрограммы. Задержка относительно тригтерного импульса, [ns]: a - 60, b - 100, c - 130, d - 150, e - 190. a — представлены положения электродов: I — 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, с. 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, *с* (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 тригтерного 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] ($n_e < 10^{16}$ 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 Мо-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 пs. Изображение приведено в негативе: *I* — 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

- 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