

ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТЬ УРОВНЕЙ Ar VIII В ПЛАЗМЕ БЫСТРОГО КОНИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

П. С. Анциферов*, Л. А. Дорохин, К. Н. Кошелев

*Институт спектроскопии Российской академии наук
108840, Троицк, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 29 марта 2022 г.,
после переработки 29 марта 2022 г.
Принята к публикации 5 мая 2022 г.

Быстрый разряд (скорость нарастания тока $\sim 10^{12}$ А/с) через диэлектрическую полость, заполненную рабочим газом, приводит к образованию ударной волны, которая сходится от внутренней стенки разрядной полости к оси разряда. Специфика кумуляции такой ударной волны в конической полости обеспечивает пространственный контакт горячей плазмы и холодного рабочего газа (аргона в настоящей работе), что приводит к эффективной перезарядке ионов Ar IX, возникающих в горячей области, на нейтральных атомах аргона. В работе демонстрируется наличие стимулированного излучения на переходах $3p-9d$ в Ar VIII (длина волны 10.78 нм). Такой вывод делается на основе изучения зависимости интенсивности линии от числа последовательно соединенных конических разрядных полостей. Результат может представлять интерес для разработки новых источников EUV-излучения.

DOI: 10.31857/S0044451022090188

EDN: EMDOTT

1. ВВЕДЕНИЕ

Быстрые разряды в цилиндрической полости (капиллярные разряды) привлекли к себе внимание в связи с задачей создания лазеров в мягком рентгеновском диапазоне [1–4]. В условиях нарастания разрядного тока со скоростью порядка 10^{12} А/с происходит скинирование разрядного тока на внутренней стенке цилиндрической разрядной полости и образование сходящейся к оси разряда ударной волны [5]. В возникающей в результате кумуляции неравновесной плазме появляется инверсная заселенность перехода $3s-3p$ в неоподобном аргоне за счет столкновительных переходов из основного состояния. В процессе движения фронта ударной волны разрядный ток «отстает» от нее и в течение некоторого времени остается сконцентрированным у внутренней стенки капилляра вследствие скин-эффекта [5]. Это приводит к отсутствию магнитогидродинамических неустойчивостей в возникающей горячей плазме, что дает возможность получить практически идеальный столбик плазмы диа-

метром 0.2 мм и длиной до 200 мм [3, 4]. Пространственное распределение горячей плазмы, возникающей в момент кумуляции сходящейся к оси разряда ударной волне, определяется геометрией внутренней стенки разрядной полости. Так, используя периодически профилированную внутреннюю стенку цилиндрической поверхности, можно получить плазму с пространственной модуляцией плотности вдоль оси разряда [6], а в случае быстрого разряда в полости, имеющей форму сферического сегмента, можно получить сферическую плазму [7].

Особенностью генерации плазмы в конической разрядной полости является видимое движение вдоль оси разряда точки кумуляции ударной волны, см. рис. 1. В работах [8, 9] это явление было исследовано с использованием аргона при давлении 80 Па в качестве рабочего газа. В EUV-спектрах (Extreme Ultra Violet) излучения такой плазмы наблюдается линия с длиной волны 10.78 нм, интенсивность которой сравнима с полной интенсивностью спектра в EUV-области, см. рис. 2 (спектрограмма рис. 2 получена в представляемых экспериментах, см. ниже). Линия 10.78 нм возникает в промежутке времени $\sim 20-70$ нс от момента начала разряда. С помощью пространственно разрешенных спектров было показано, что эта спектральная линия излучается компактной

* E-mail: ants@isan.troitsk.ru

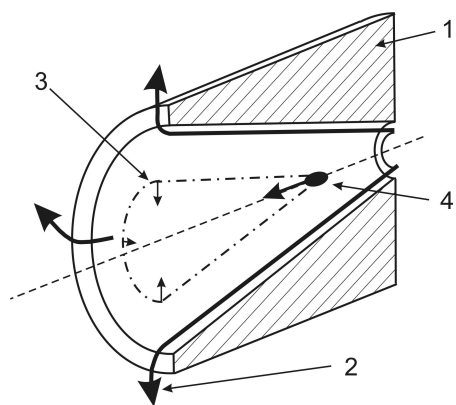


Рис. 1. Быстрый конический разряд: 1 — коническая разрядная полость, 2 — разрядный ток, 3 — фронт ударной волны, 4 — горячая плазма в точке кумуляции ударной волны

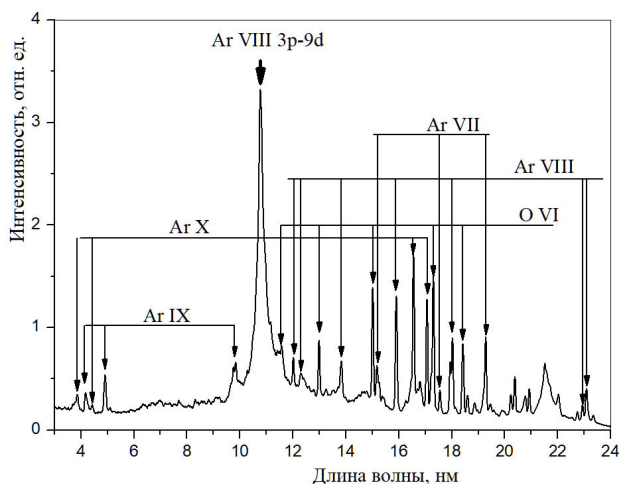


Рис. 2. EUV-спектрограмма быстрого конического разряда

областью горячей плазмы [9]. Наблюдаемая длина волны близка к длине волны перехода $3p-9d$ в ионе Ar VIII. В качестве механизма заселения

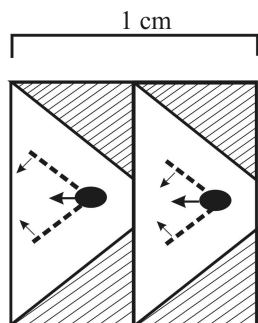


Рис. 3. Чертеж разрядной полости с двумя коническими элементами

верхнего уровня была предложена перезарядка неоподобных ионов Ar IX, возникающих в горячей области, на нейтральных возбужденных атомах аргона [8, 9]. Непрерывное во времени перемещение горячей области вдоль оси разряда может создать условия постоянного контакта горячей плазмы с холодным рабочим газом, что вызовет эффективную перезарядку. В возникающей таким образом неравновесной плазме может возникнуть инверсная заселенность уровня $9d$ иона Ar VIII относительно уровня $3p$. В настоящей работе делается попытка обнаружения такой инверсной заселенности. Основная идея описываемых экспериментов заключается в создании разрядной полости в виде нескольких последовательно соединенных конических элементов и в изучении зависимости энергии в линии 10.78 нм от их количества. На рис. 3 приведен чертеж такой разрядной полости, состоящей из двух последовательно соединенных элементов. В случае наличия инверсной заселенности можно надеяться увидеть нелинейность зависимости энергии линии от числа конических элементов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Разрядный контур построен на основе индуктивного накопителя с полупроводниковым размыкателем [10]. Разрядная полость заполнялась аргоном при давлении 80 Па. Для устойчивой генерации ударной волны требуется кондиционирование разрядной полости посредством нескольких десятков разрядов с ксеноном в качестве рабочего газа при том же давлении. Такая процедура очищает внутреннюю стенку разрядной полости от адсорбированного из атмосферы вещества. Разрядная полость отделена от диагностического объема электромеханическим затвором с временем открытия 3–10 мс. Типичная кривая разрядного тока приведена на рис. 4. Скорость нарастания разрядного тока составляла величину приблизительно $0.5 \cdot 10^{12}$ А/с.

Для получения EUV-спектров использовался QFF (quasi flat field) спектрометр скользящего падения [11]. Эффект плоского поля (поверхность фокусировки нормальна к лучу зрения) здесь достигается на обычной сферической дифракционной решетке с эквидистантными штрихами путем смещения спектральной щели внутрь окружности Роуланда. Геометрические параметры спектрометра: радиус кривизны решетки $R = 1$ м, плотность штрихов $1/d = 1200$ штр./мм, входной угол скольжения 4° , расстояние между входной щелью и цен-

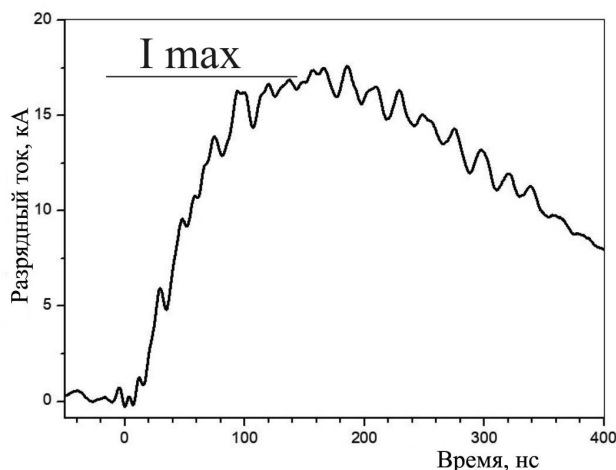


Рис. 4. Пример кривой разрядного тока

тром решетки 33 мм, расстояние от центра решетки до плоскости регистрации 320 мм. Спектрограмма, приведенная на рис. 2, получена с шириной входной щели 15 мкм. В качестве детектора излучения использовался регистратор на основе микроканальной пластины (МКП). Спектрограмма получена с экспозицией 20 нс в момент времени 50 нс после начала разрядного тока. Спектральные линии идентифицированы согласно данным [12]. Самая интенсивная линия на спектрограмме интерпретируется как результат перезарядки иона Ar IX, приводящей к заселению уровня 9d в ионе Ar VIII. Временной масштаб свечения линии 3p-9d Ar VIII составляет величину порядка нескольких десятков наносекунд, что совпадает со временем существования горячей области при кумуляции конической ударной волны [8, 9].

Энергия излучения перезарядочной спектральной линии измерялась с помощью фотодиода SXUV 100 в режиме интегрирования сигнала по времени. Перед чувствительной площадкой фотодиода была установлена выходная щелевая диафрагма для выделения излучения изучаемой линии. Эффективная ширина диафрагмы, пересчитанная в длины волн, составляла 0.15 нм. Входная щель спектрометра была увеличена с 15 мкм до 50 мкм для увеличения уровня сигнала.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 5 показаны зависимости измеренного сигнала с фотодиода SXUV 100 от числа конических элементов разрядной полости (на рис. 3 показан вариант двух конических элементов). Два графика со-

ответствуют значениям максимального разрядного тока $I_{max} = 20$ кА (график a) и $I_{max} = 16$ кА (график b). Максимум разрядного тока I_{max} (см. рис. 4) достигается уже после того, как произошло излучение линии 10.78 нм. Значение интервала ошибки на рис. 5 соответствует уровню 3σ статистического разброса измерений. Видно примерно 30-процентное увеличение измеренного сигнала для случая шестиэлементной рабочей полости по сравнению с экстраполированным линейным ростом сигнала, построенным на основании данных для двухэлементной разрядной полости. Эффект зависит от максимального разрядного тока, снижение I_{max} от 20 кА до 16 кА приводит к исчезновению нелинейного поведения интенсивности линии Ar VIII 3p-9d.

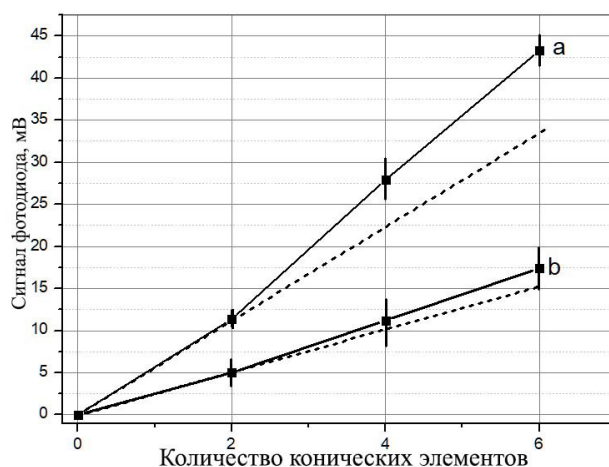


Рис. 5. Зависимости измеренной энергии излучения перехода 3p-9d Ar VIII от числа конических элементов разрядной полости: $I_{max} = 20$ кА (a), 16 кА (b)

Можно сделать оценку полной энергии, излученной в рассматриваемой спектральной линии. Используя технические данные фотодиода SXUV 100, получаем, что уровень сигнала в 40 мВ (максимальная точка кривой a на рис. 5) соответствует энергии $2.4 \cdot 10^{-9}$ Дж. Эффективный телесный угол регистрируемого излучения определяется спектральной щелью спектрометра и составляет величину $1.2 \cdot 10^{-6}$ ср. Имея в виду, что нелинейная часть полной интенсивности невелика и составляет величину порядка 30 %, можно пренебречь угловой анизотропией излучения и получить оценку полной энергии линии Ar VIII 3p-9d, излученной в 4π ср, как $W = 2 \cdot 10^{-3}$ Дж. Реальное значение может быть в 2-3 раза больше, так как в приведенной оценке не учитывается эффективность решетки.

Для оценки величины коэффициента усиления необходима информация об эффективной длине среды. EUV-обскурограммы разрядной плазмы, полученные с временным разрешением 10 нс с использованием МКП-детектора [8, 9], дают верхнюю оценку размера горячей области вдоль оси разряда $l \approx 2$ мм. В нашем случае разрядная полость содержала шесть конических сегментов и произведение kl оценивается как $kl \approx 0.3$. Отсюда вытекает оценка $k \approx 0.3$ см⁻¹. Существенное влияние на величину k должна оказывать ширина линии, которая в нашем случае довольно большая и составляет величину $\lambda/\delta\lambda \approx 50$. Возможным механизмом уширения может быть перезарядка с переносом двух электронов [13]. При этом наблюдаемый профиль является результатом переналожения массива линий вида $3pnl-9dnl$.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены результаты изучения горячей плазмы, возникающей в результате кумуляции конической ударной волны в быстром разряде. Благодаря эффективному движению точки кумуляции вдоль оси разряда, возникают условия для существования нестационарной заселенности уровней Ar VIII в плазме в течение нескольких десятков наносекунд. Пространственный контакт горячей плазмы в точке кумуляции и холодного рабочего газа (аргон 80 Па) приводит к перезарядке ионов Ar IX и возникновению инверсной заселенности между уровнями $3p$ и $9d$ иона Ar VIII. Такой вывод делается из наличия усиления на переходе $3p-9d$ иона Ar VIII с коэффициентом $k \approx 0.3$ см⁻¹. Возможное использование описываемого разряда в качестве источника EUV-излучения предполагает оптимизацию по величине разрядного тока, давлению рабочего газа и геометрическим параметрам разрядной полости (угол конуса, диаметр и длина).

Благодарности. Авторы благодарны В. М. Кривцу за техническую помощь.

Финансирование. Работа была выполнена в рамках общего бюджета Института спектроскопии Российской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. B. R. Benware, C. H. Moreno, D. J. Burd, and J. J. Rocca, *Opt. Lett.* **22**, 796 (1997).
2. B. R. Benware, C. D. Macchietto, C. H. Moreno, and J. J. Rocca, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 5804 (1998).
3. J. J. Rocca, *Rev. Sci. Instr.* **70**, 3788 (1999).
4. C. D. Macchietto, B. R. Benware, and J. J. Rocca, *Opt. Lett.* **24**, 1115 (1999).
5. Н. А. Боброва, С. В. Буланов, Т. Л. Разинкова, П. В. Сасоров, *Физика плазмы* **22**, 387 (1996).
6. P. S. Antsiferov, L. A. Dorokhin, K. N. Koshelev, and A. V. Nazarenko, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37**, 2527 (2004).
7. P. S. Antsiferov and L. A. Dorokhin, *Phys. Plasmas* **21**, 042119 (2014).
8. P. S. Antsiferov, L. A. Dorokhin, and K. N. Koshelev, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **51**, 165601 (2018).
9. P. S. Antsiferov, L. A. Dorokhin, and K. N. Koshelev, *Phys. Rev. E* **100**, 023204 (2019).
10. P. S. Antsiferov, L. A. Dorokhin, Yu. V. Sidelnikov, and K. N. Koshelev, *J. Appl. Phys.* **105**, 103305 (2009).
11. P. S. Antsiferov, L. A. Dorokhin, and P. V. Krainov, *Rev. Sci. Instr.* **87**, 053106 (2016).
12. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team (2013). *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.1), online. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2013, October 24]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
13. F. B. Rosmej, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, A. I. Manganov, I. Yu. Skobelev, T. Auguste, P. D'Oliveira, S. Hulin, P. Monot, N. E. Andreev, M. V. Chegotov, and M. E. Veisman, *J. Phys. B: Atom. Mol. Opt. Phys.* **32**, L107 (1999).