

Источник жесткого ультрафиолетового излучения на основе ЭЦР разряда

А. В. Водопьянов¹⁾, С. В. Голубев, Д. А. Мансфельд, А. Г. Николаев⁺, К. П. Савкин⁺, Н. Н. Салашенко*, Н. И. Чхало*, Г. Ю. Юшков⁺

Институт прикладной физики РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия

⁺Институт сильноточной электроники Сибирского отд. РАН, 634055 Томск, Россия

**Институт физики микроструктур РАН, 603950 Нижний Новгород, Россия*

Поступила в редакцию 12 мая 2008 г.

После переработки 16 июня 2008 г.

Обсуждается источник жесткого (экстремального) ультрафиолетового излучения на основе разряда низкого давления, поддерживаемого в магнитной ловушке мощным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса. В таком разряде эффективно образуются и возбуждаются многозарядные ионы (использовались ионы олова, инжектируемые в ловушку из вакуумно-дугового разряда), линейчатое излучение которых лежит в требуемом диапазоне длин волн. В предварительных экспериментах мощность излучения с длиной волны 13,5 нм в полосе $\pm 1\%$ достигала 50 Вт с к.п.д. преобразования поглощенного в плазме СВЧ излучения в жесткий ультрафиолет на уровне 1%.

PACS: 07.85.Fv, 41.50.+h, 52.50.Dg, 52.50.Sw

В настоящее время в мире ведутся интенсивные исследования, направленные на создание источника излучения для проекционной литографии высокого разрешения с длиной волны 13,5 нм. В наиболее эффективных источниках излучения используется линейчатое излучение многозарядных ионов олова (более 100 линий излучения ионов олова с зарядом от +6 до +11 попадают в указанный диапазон). В основном, для получения такой плазмы используются установки с мощными лазерами или с различного типа пинчами (см., например, [1–6]). Наряду с ощутимым прогрессом в этом направлении у разрабатываемых схем есть ряд недостатков, которые не позволяют считать проблему создания источника экстремального ультрафиолета решенной. Прежде всего отметим проблемы, связанные с ресурсом работы источника, с загрязнением элементов оптической системы распыляемыми веществами, с бомбардировкой поверхности зеркал быстрыми ионами. Поиски новых источников жесткого ультрафиолета остаются актуальными в настоящее время.

В настоящей работе в качестве источника жесткого ультрафиолетового излучения предлагается использовать разряд низкого давления в парах олова, поддерживаемого в магнитной ловушке мощным электромагнитным излучением миллиметро-

вого диапазона длин волн в условиях электронно-циклотронного резонанса.

Метод получения многозарядных ионов металлов, эффективность которого продемонстрирована в работах [7–10], заключается в следующем. В прямую магнитную ловушку с помощью вакуумно-дугового источника инжектируется плазма паров олова. За время пролета плазмы магнитной ловушки нагреваемые СВЧ излучением электроны производят дополнительную ионизацию и заряд ионов повышается – образуются ионы, линии излучения которых лежат в диапазоне жесткого ультрафиолета. Использование миллиметрового излучения и миниатюрных вакуумно-дуговых плазмогенераторов позволяет получать источники со сравнительно малыми размерами (поперечные размеры излучающей области ~ 1 мм) с достаточно высокой плотностью плазмы (до 10^{14} см⁻³), что делает описанный метод весьма привлекательным для создания почти точечного источника жесткого ультрафиолета. Отметим, что в ранних работах [11, 12] в ЭЦР разряде большого объема (на уровне 500 см³) удалось добиться высокой эффективности преобразования СВЧ излучения в жесткий ультрафиолет – до 10% энергии СВЧ излучения преобразовывалось в излучение в диапазоне от 7 до 15 нм.

Эксперименты проводились на установке, схема которой приведена на рис.1. Простая осесимметрич-

¹⁾e-mail: avod@appl.sci-nnov.ru

ная магнитная ловушка (пробкотрон) создавалась током, протекающим через катушки 3. Длина ловушки составляла 26 см, максимальное магнитное поле в пробке 4 Тл, длительность импульса тока 5 мс.

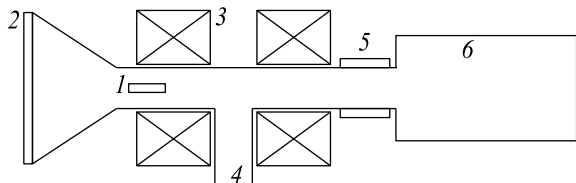


Рис.1. Схема экспериментальной установки. 1 – плазмогенератор, 2 – СВЧ окно, 3 – магнитные катушки, 4 – откачной тракт, 5 – магнитная завеса, 6 – детектор EUV либо экстрактор ионов и времяпролетный анализатор ионного спектра

Источником плазмы является вакуумно-дуговой плазмогенератор типа МЕВВА [13], конструкция которого схематично показана на рис.2. Вакуумно-

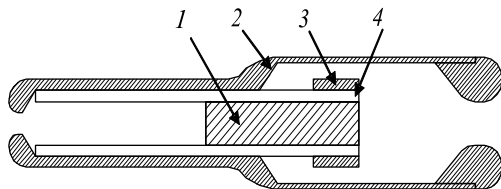


Рис.2. Схема вакуумно-дугового плазмогенератора: 1 – катод, 2 – полый анод, 3 – поджигающий электрод, 4 – керамический изолятор

дуговой разряд, инициируемый вспомогательным разрядом по поверхности диэлектрика, генерирует плазму материала катода (олова) 1, которая заполняет полый анод 2. В качестве диэлектрика использована тонкая керамическая трубка 4, которая размещается между катодом 1 и анодом вспомогательного разряда 3. При межэлектродном расстоянии вспомогательного разряда ~ 1 мм для возбуждения катодных пятен и инициирования вакуумной дуги достаточно приложения между катодом и поджигающим электродом импульса напряжения величиной 7 кВ и длительностью 10–30 мкс.

Плазмогенератор (1 на рис.1) устанавливался на оси системы вблизи одной из пробок магнитной ловушки. Источник питания генератора плазмы обеспечивал импульс тока дугового разряда длительностью ~ 100 мкс, а величина тока могла варьировать от 50 до 300 А. Для дополнительного нагрева плазмы использовалось излучение гиротрона с частотой излучения 75 ГГц, мощностью до 50 кВт, длительностью импульса 150 мкс. Разрядная вакуумная камера, помещенная внутри магнитной ловушки, имела тефлоновое окно 2, через которое излучение гиро-

трона вводилось в область разряда. Поглощение излучения в плазме приводило к значительному увеличению энергии электронов, что обеспечивало дополнительную ионизацию ионов и их эффективное возбуждение с последующим спонтанным высвечиванием. Экспериментальная установка работала в импульсном режиме с частотой следования импульсов до 1 Гц.

Для анализа ионного состава плазмы использовались двухсеточный экстрактор ионного пучка с напряжением до 20 кВ, ускоряющим ионы, и времяпролетный анализатор [14].

Измерения интенсивности свечения плазмы в EUV диапазоне проводилось с помощью абсолютно калиброванного измерителя мощности на основе двух Nb/Si многослойных зеркал, обеспечивающих спектральную полосу регистрации $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$, Zr/Si фильтра, отсекающего длинноволновое излучение, и кремниевого диода AXUV-100 (IRD, США). Чувствительность измерителя составляла 0,033 А/Вт, минимальная регистрируемая мощность излучения с длиной волны 13,5 нм (обнаружительная способность) – $3.3 \cdot 10^{-10}$ Вт. Подробнее о приборе можно узнать из [15].

Детектор располагался либо поперек оси системы, и в его поле зрения попадала средняя часть магнитной ловушки с плазмой, либо вдоль оси системы, и тогда в его поле зрения попадала вся плазма²⁾. Для исключения попадания плазмы в детектор в эксперименте использовалась “магнитная завеса”, представляющая собой систему из постоянных магнитов, создающих на пути плазменного потока магнитное поле, препятствующее попаданию плазмы в детектор (5 на рис.1).

Распределение ионов олова по кратностям ионизации без СВЧ нагрева приведено на рис.3а. Величина среднего заряда $\langle Z \rangle = 2$, максимальный заряд $Z_{\text{max}} = 3$. Магнитное поле в пробках ловушки составляло 2 Тл. Величина тока вакуумной дуги $I_{\text{arc}} = 150$ А. Отметим здесь, что распределение ионов по кратностям ионизации в вакуумно-дуговом разряде не зависит ни от величины тока вакуумной, ни от величины магнитного поля при полях свыше 1 Тл [8, 16].

СВЧ нагрев плазмы приводил к существенному сдвигу распределения ионов по кратностям ионизации в область больших зарядностей. Типичное распределение ионов по кратностям ионизации пред-

²⁾ Отметим, что в EUV диапазоне плазма с параметрами, характерными для условий эксперимента, является оптически прозрачной.

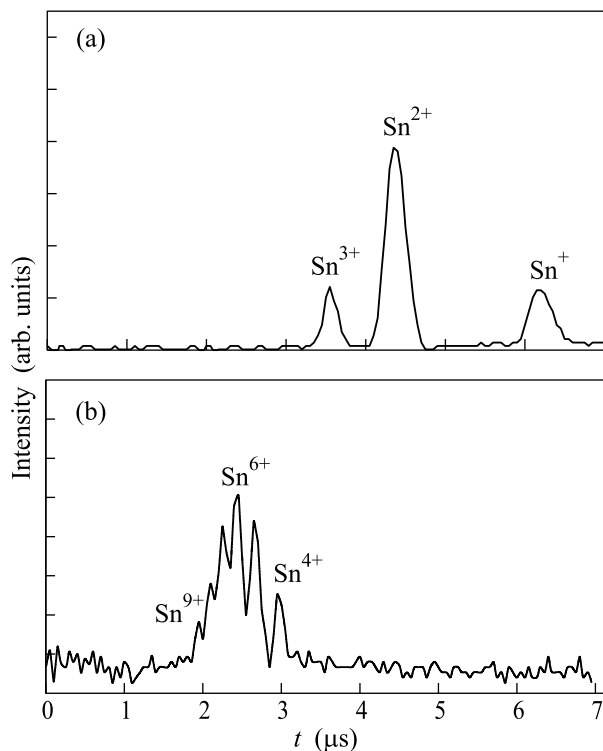


Рис.3. Распределение ионов олова плазмы вакуумно-дугового разряда по кратностям ионизации. Осциллограмма тока коллектора цилиндра Фарадея анализатора. По горизонтальной оси отложено время t в микросекундах от момента срабатывания затвора времяпролетного анализатора: (а) – без СВЧ нагрева, (б) – при нагреве плазмы микроволновым излучением

ставлено на рис.3б. Такое распределение ионов по кратностям ионизации удалось реализовать при следующих параметрах работы установки: магнитное поле в пробках 1 Тл, мощность СВЧ 50 кВт, ток вакуумной дуги 100 А.

Такое распределение ионов по кратностям ионизации не является оптимальным с точки зрения излучения в диапазоне $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$ (см., например, [17]). Но уже при таком распределении удалось зарегистрировать жесткое ультрафиолетовое излучение мощностью $\approx 2 \text{ Вт}$ в телесный угол $2\pi \text{ ср}$ в указанном спектральном диапазоне.

При увеличении напряженности магнитного поля ловушки (до 4 Тл), то есть при реализации резонансных условий нагрева электронов, интенсивность излучения плазмы в указанном диапазоне существенно возросла и достигала $\approx 25 \text{ Вт}$ в телесный угол $2\pi \text{ ср}$.

Помимо мощности ультрафиолетового излучения, для источника жесткого ультрафиолетового излучения важную роль играет размер излучающей области плазмы. Поперечный размер плазмы в наших экспе-

риментах определяется диаметром отверстия в аноде вакуумно-дугового плазмодогенератора и составляет 3 мм (отметим, что этот размер можно существенно уменьшить до размеров, определяемых диффузионными процессами в плазме – по оценкам $\sim 0.1 \text{ мм}$). Для оценки продольного размера излучающей области будем считать, что по мере движения плазмы от плазмодогенератора сквозь ловушку ионы повышают свой средний заряд от 2 до 6–8 в соответствии со значениями констант скорости ионизации соответствующих ионов. При параметрах плазмы, характерных для условий экспериментов, длина ионизации иона Sn^{6+} оказывается $\approx 5 \text{ см}$. Для оценок примем, что поперечный размер излучающей области плазмы 3 мм, а продольный – 5 см, тогда объем излучающей плазмы составляет 0.35 см^3 , а удельная мощность свечения в указанном спектральном диапазоне достигала $\approx 10 \text{ Вт/см}^3$.

Оценка эффективности работы ЭЦР источника жесткого ультрафиолетового излучения проводилась следующим образом. Решалась система балансных уравнений на концентрации заряженных частиц с разными зарядовыми состояниями [10]. Температура электронов подбиралась так, чтобы рассчитанное распределение ионов по зарядам и измеренное совпадали наилучшим образом. Время пролета ионами длины ловушки в расчетах принято равным 26 мкс. Константы скорости ионизации вычислялись для максвелловского распределения электронов по скоростям на основании данных [18]. Начальный средний заряд ионов в инжектируемом потоке составлял 2. Плотность плазмы задавалась током вакуумно-дугового разряда. Мощность СВЧ излучения, необходимая для поддержания плазмы с определенной температурой электронов (мощность, поглощаемая плазмой), вычислялась как сумма выносимой из ловушки через пробки энергии плазмы и затрат на ионизацию и возбуждение ионов. Излучательные потери плазмы рассчитывались с использованием усредненных констант скорости возбуждения многозарядных ионов [17].

Вычисления показали, что минимальное расхождение измеренного распределения ионов по кратностям ионизации с расчетным оказывается при температуре электронов, равной 80 эВ для нерезонансного режима и 100 эВ для резонансного. При этом в спектральном интервале $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$ интенсивность излучения 1 см^3 плазмы составляет 18 Вт в $2\pi \text{ ср}$ в нерезонансном режиме и 100 Вт в $2\pi \text{ ср}$ в резонансном. Мощность, необходимая для поддержания плазмы в резонансных условиях, по расчетам составляет $\approx 20 \text{ кВт/см}^3$.

В заключение на основании полученных данных оценим параметры ЭЦР источника жесткого ультрафиолетового излучения с накачкой современными гиротронами, работающими в непрерывном режиме. Для определенности возьмем гиротрон, производимый в НПП ГИКОМ с частотой излучения 170 ГГц, мощностью до 500 кВт (хотя для наших целей будет достаточно и 20 кВт). Использование такого гиротрона позволяет поддерживать плазму с характерными размерами $1 \times 1 \times 10$ мм со средним зарядом ионов олова, равным 9, температурой 200–300 эВ. Как показывают расчеты, такая плазма в диапазоне $13.5 \text{ нм} \pm 1\%$ будет излучать 1 кВт мощности при эффективности преобразования СВЧ излучения в жесткий ультрафиолет на уровне 5%.

Работа выполнена при поддержке гранта президента РФ (# МК-3615.2007.2) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты # 08-02-00140 и # 06-02-16438).

1. *EUV Sources for Lithography* by Vivek Bakshi SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engi 2005.
2. G. Schriever, M. Rahe, U. Stamm et. al., SPIE **4343**, 615 (2001).
3. U. Stamm, I. Ahmad, I. Balogh et. al., SPIE **5037**, 119 (2003).
4. К. Н. Кошелев, В. Е. Банин, Н. Н. Салащенко, УФН **177**, 777 (2007).
5. I. V. Fomenkov, N. R. Bowering, A. I. Ershov et. al.,

- SEMATECH EUVL Symposium*, Barcelona, Spain, 2006.
6. A. Endo, H. Hoshino, T. Ariga et. al., *SEMATECH EUVL Symposium*, Barcelona, Spain, 2006.
7. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, S. V. Razin et. al., RSI **75**, 1888 (2004).
8. А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, Д. А. Мансфельд и др., ЖТФ **75**, 101 (2005).
9. A. V. Vodopyanov, S. V. Golubev, V. I. Khizhnyak et al., High energy physics and nuclear physics **31(S1)**, 159 (2007).
10. А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, Д. А. Мансфельд и др., ПЖТФ **33(20)**, 44 (2007).
11. А. В. Водопьянов, С. В. Голубев, В. Г. Зорин и др., ПЖТФ **26(24)**, 7 (2000).
12. S. V. Golubev, Yu. Ya. Platonov, S. V. Razin, and V. G. Zorin, J. X-ray Science and Technology **6**, 244 (1996).
13. Г. А. Месяц, С. А. Баренгольц, УФН **172**, 1113 (2002).
14. V. I. Gushenets, A. G. Nikolaev, E. M. Oks et al., RSI **77**, 063301 (2006).
15. И. Г. Забродин, Б. А. Закалов, С. Ю. Зуев и др., Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования **6**, 104 (2007).
16. A. Anders and G. Yu. Yushkov, J. Appl. Phys. **91**, 4824 (2002).
17. J. White, P. Hayden, P. Dunne et al., J. Appl. Phys. **98**, 113301 (2005).
18. A. V. Philippov, V. M. Polyshev, A. A. Sadovoy et al., *E9-2002-5 Commun. Joint Inst. Nucl. Res.*, Dubna, 2002.