

В. И. Донин

**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК
НЕПРЕРЫВНОГО ДАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Представлен новый дуговой источник мощного непрерывного дальнего вакуумного ультрафиолетового излучения, созданный на основе сильноточной плазмы пониженного давления, которая ранее использовалась в качестве активной среды ионных аргоновых лазеров со сроком службы порядка 1000 ч.

Ключевые слова: ВУФ-излучение, дуговой разряд, возбуждение ионных уровней.

В настоящее время коротковолновые источники излучения являются объектом интенсивных исследований для специалистов многих стран. Более того, для разработки технологии изготовления изделий микро- и нанoeлектроники (проекционной литографии), а также светозероэрозийных, радиационных технологий обработки материалов (в том числе с созданием регулярной нанометровой структуры) и др. требуются коротковолновые источники, способные работать в близких к промышленным условиям.

Традиционно для генерации непрерывного дальнего вакуумного ультрафиолетового (ВУФ) излучения используется синхротронное излучение и газоразрядные источники с камерами дифференциальной откачки для вывода излучения [1, 2], которые не получили широкого

распространения из-за их громоздкости, низкой эффективности, высокой стоимости и малой площади выходного излучения. В последнее время дальнее ВУФ-излучение получают, используя лазеры на свободных электронах [3], высшие гармоники излучения мощных короткоимпульсных лазеров [4], плазменные лазеры на линиях многозарядных ионов [5], спонтанное излучение многозарядных ионов из короткоимпульсной плазмы [6, 7]. Однако из-за указанных выше недостатков они также не используются в промышленности, например, малоиндуктивный разряд в капилляре с ксеноном обеспечивает эффективность на уровне ~ 0,03 % и среднюю мощность спонтанного излучения ~ 10 мВт при сроке службы капилляра около 30 мин [6].

В настоящей статье представлен новый дуговой источник мощного непрерывного дальнего ВУФ-излучения [8], созданный на основе сильноточной плазмы пониженного давления, которая ранее использовалась в качестве активной среды ионных аргоновых лазеров со сроком службы порядка 1000 ч [9, 10]. Плазма создавалась продольным дуговым разрядом постоянного тока в секционированных трубках длиной $l \approx 0,4-4$ м, диаметром $d \approx 1-40$ мм при плотности тока от 40 до 4000 А/см².

Схема отдельной секции трубки и расположение облучаемых образцов в разряде иллюстрируются рис. 1, где O_1O_2 — продольная ось разряда (область разряда показана точками), l — устройство вывода излучения, 2 — облучаемый образец, 3 — держатель образца. Облучаемые образцы располагаются в боковых (по отношению к оси O_1O_2) отверстиях, по площади сечения сравнимых с сечением разряда. Используется наиболее мощное излучение резонансных линий ионов, которое не поглощается наполняющим газом пониженного давления. В модельном эксперименте при $d = 40$ мм общая площадь облучаемой поверхности образцов составляла до 65 % от всей боковой поверхности столба разряда: $0,65\pi dl$.

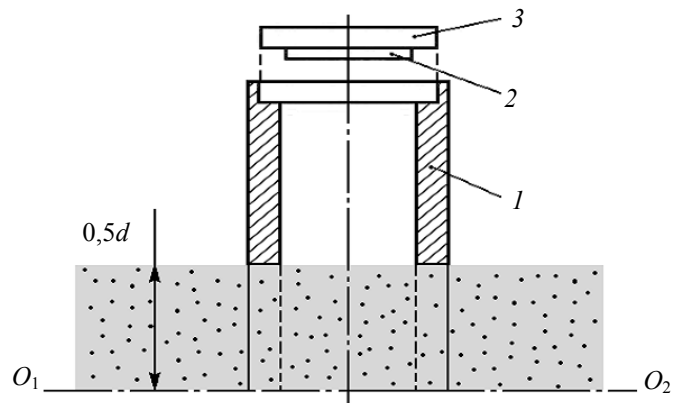


Рис. 1

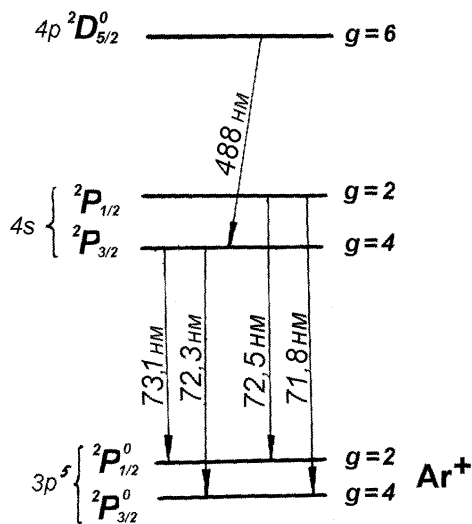


Рис. 2

Используется наиболее мощное излучение резонансных линий ионов, которое не поглощается наполняющим газом пониженного давления. В модельном эксперименте при $d = 40$ мм общая площадь облучаемой поверхности образцов составляла до 65 % от всей боковой поверхности столба разряда: $0,65\pi dl$.

Поскольку плазма аргоновых лазеров достаточно хорошо изучена, произведем оценку энергетических характеристик резонансного ВУФ-излучения на ионах Ar^+ . На рис. 2 приведена схема рабочих уровней. Резонансное излучение реабсорбировано, и для непосредственных абсолютных измерений интенсивности требуется специальная вакуумная аппаратура. Однако для лазерных переходов (например, с длиной волны $\lambda = 488$ нм) заселенность нижнего рабочего (резонансного) уровня более просто оценить по измеренным значениям заселенности верхнего уровня и коэффициенту поглощения

k_0 , см⁻¹ (или усиления G_0) в центре доплеровски уширенной рабочей линии:

$$k_0 = -G_0 = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \frac{\lambda^2 A_{mn}}{\Delta\nu_D} \frac{g_m}{4\pi} \left(\frac{N_n}{g_n} - \frac{N_m}{g_m} \right), \quad (1)$$

где A_{mn} — вероятность радиационного перехода с верхнего уровня m на нижний n (с⁻¹), $\Delta\nu_D$ — ширина линии (с⁻¹), N_m и N_n — заселенность рабочих уровней (см⁻³), g_m и g_n — их статистический вес.

Зависимость измеренной интегральной по сечению разряда заселенности верхнего уровня N_m линии $\lambda = 488$ нм в трубке диаметром $d = 11$ мм от тока J разряда при различных значениях давления наполнения p представлена на рис. 3 (кривая 1 — $p = 0,3$, 2 — $p = 0,65$, 3 — $p = 1$ мм рт. ст.) [9, 11]. При зажигании разряда давление, близкое к давлению наполнения, устанавливается только в приэлектродных частях (колбах), а вблизи стенок разрядного канала трубки давление в 3—5 раз ниже. Последнее обстоятельство позволяет пренебречь поглощением бокового ВУФ-излучения за счет фотоионизации при использовании аргона (сечения ионизации которого велики — порядка $3,5 \cdot 10^{-17}$ см²), поскольку расстояние от столба разряда до подложки ≈ 2 см. При этом расстоянии резонансное излучение атомных линий Ar (85—100 нм) будет полностью резонансно поглощаться). Используя измеренные значения G_0 и формулу (1), можно определить, что заселенность нижнего уровня также достигает насыщения, но при увеличении J резко спадает. Соответственно максимум мощности генерации на рабочем переходе несколько смещен к большим значениям тока (для кривой 3 он отмечен жирной

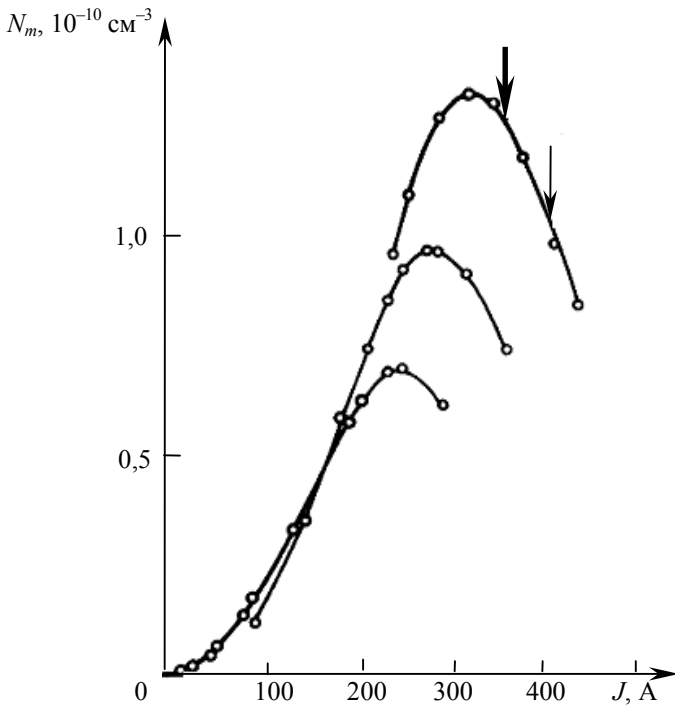


Рис. 3

стрелкой, а светлой стрелкой показано начало развития неустойчивостей в разряде). Полученная в максимуме мощности генерации заселенность N_n в 2 раза ниже N_m , а при токе до 200 А значения заселенности N_n и N_m близки. Таким образом, в рассматриваемых здесь условиях генерации значения N_n и N_m совпадают с точностью до множителя 2.

Оценим интенсивность I излучения (излучаемая мощность с 1 см³) на линии $\lambda = 72,3$ нм, пользуясь известным соотношением

$$I = F(k_0 r) A_{mn} N_m h \nu, \quad (2)$$

где N_m — заселенность верхнего (для перехода 72,3 нм) уровня, A_{mn} — вероятность спонтанного распада уровня в основное состояние, множитель $F(k_0 r)$ характеризует выход излучения ($r = d/2$), $h \nu$ — энергия кванта.

Значение $F(k_0 r)$ можно оценить по измеренной концентрации электронов $n_e = 1,5 \cdot 10^{14}$ см⁻³, которая близка к заселенности основного состояния иона. Проведенная для рассматриваемых здесь условий оценка по формуле Хольштейна [12] $F(k_0 r) = 1,6/k_0 r (\pi \ln k_0 r)^{1/2}$ с учетом радиального движения ионов [13] дает значение $F(k_0 r) \approx 0,4$. Подставив в выражение (2) численные значения ($A_{mn} = 2,5 \cdot 10^9$ с⁻¹, $N_m = 1 \cdot 10^{10}$ см⁻³), получим $I \approx 24$ Вт/см³. Учитывая, что ВУФ-излучение иона Ag^+ соответствует, по крайней мере, пяти сильным линиям в области 55—75 нм (см. например, рис. 1.37 в [1]), получим суммарную интенсивность $I_\Sigma \approx 120$ Вт/см³.

В условиях генерации расходуемая на единицу длины разряда мощность W не зависит от диаметра d и составляет $W \approx 840$ Вт/см [9, 10], поэтому легко можно оценить эффективность ВУФ-излучения ≈ 14 %. Хотя с увеличением диаметра разряда заселенность возбужденных уровней Ag^+ падает как $1/d$, значение $F(k_0 r)$ при этом не меняется. Следовательно, эффективность испускания ВУФ-излучения (за счет возрастания сечения разряда как d^2) должна увеличиваться пропорционально d .

Помимо обычного цилиндрического разряда для рассматриваемых здесь целей полезным может оказаться использование разряда „щелевого“ типа (сечение в виде прямоугольника со значительной разницей длины сторон) [14], поскольку в таком разряде значение $F(k_0r)$ будет определяться меньшей стороной.

Следует отметить, что дуговой источник [8] может применяться и в других случаях. Например, в работах [9, 15] указывалось, что в используемом здесь сильноточном разряде пониженного давления с рабочим газом Cl_2 (наполняющим) хлор находится в атомарном состоянии. Следовательно, предлагаемая конструкция может применяться для быстрого травления полупроводниковых материалов. При наполнении ее смесью водорода (при $p \approx 10\text{--}100$ мм рт. ст.) с небольшой добавкой углеродсодержащего газа она может быть использована для выращивания алмазных пленок [2, 16] на подложках с большой общей площадью.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайдель А. Н., Шрейдер Е. Я. Вакуумная спектроскопия и ее применение. М.: Наука, 1976.
2. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Т. 4. / Под ред. В. Е. Фортва. М.: Наука, 2000.
3. Ackermann W., Asova G., Ayvazyan V., Azima A., Baboi N. et al. Operation of a free-electron laser from the extreme ultraviolet to the water window // Nat. Photon. 2007. Vol. 1, N 6. P. 336—342.
4. H÷ve J., Haarlammert T., Steinbrück T., Kutzner J., Tsilimis G., Zacharias H. High-flux high harmonic soft X-ray generation up to 10 kHz repetition rate // Opt. Commun. 2006. Vol. 266, N 1. P. 261—265.
5. Виноградов А. В., Рокка Дж. Импульсно-периодический рентгеновский лазер на переходе $3p\text{--}3s$ Ne-подобного аргона в капиллярном разряде // Квант. электрон. 2003. Т. 33, вып. 1. С. 7—17.
6. Собельман И. И., Шевелько А. П., Якушев О. Ф., Найт Л. В., Турли Р. С. Интенсивный источник ВУФ излучения на основе плазмы капиллярного разряда // Квант. электрон. 2003. Т. 33, вып. 1. С. 3—6.
7. Сейсян Р. Нанолитография СБИС в экстремально дальнем вакуумном ультрафиолете // ЖТФ. 2005. Т. 75, вып. 5. С. 1—13.
8. Патент РФ № 2324255. Универсальный дуговой источник ВУФ-фотонов и химически активных частиц / В. И. Донин. Оpubл. 10.05.2008. Б.И. № 13.
9. Донин В. И. Мощные ионные газовые лазеры. Новосибирск: Наука, 1991.
10. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. XI-4 / Под ред. С. И. Яковленко. М.: Физматлит, 2005.
11. Донин В. И. Насыщение выходной мощности с током разряда в мощных аргоновых ОКГ непрерывного действия // ЖЭТФ. 1972. Т. 62, вып. 5. С. 1648—1660.
12. Holstein T. Imprisonment of resonant radiation in gases // Phys. Rev. 1951. Vol. 83, N 6. P. 1159—1168.
13. Елецкий А. В., Фрейнкман Б. Г. Функция распределения и контур линии излучения ионов в разряде низкого давления // Докл. АН СССР. 1973. Т. 210. С. 62—65.
14. Алферов Г. Н., Донин В. И., Юршин Б. Я. К вопросу об оптимальном сечении разряда постоянного тока для лазера на ионах ArII // Журн. прикл. спектроскопии. 1976. Т. 25, вып. 1. С. 40—42.
15. Донин В. И. Сильноточные дуговые катоды для непрерывных разрядов пониженного давления // II Междунар. науч.-практич. конф. „Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности“. Сб. тр. СПб, 2006. Т. 4. С. 153.
16. Спицын Б. В., Алексенко А. Е. // Современные проблемы физической химии. М.: ИФХ РАН, 2005. С. 350—368.

Сведения об авторе

Валерий Ильич Донин — д-р физ.-мат. наук; Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск; E-mail: donin@iae.nsk.su

Поступила в редакцию
12.01.09 г.