

Ультрафиолетовая лампа барьерного разряда на молекулах ОН

Э.А.Соснин, М.В.Ерофеев, С.М.Авдеев, А.Н.Панченко,
В.А.Панарин, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко, Д.В.Шитц

Экспериментально исследованы энергетические и спектральные характеристики барьерного разряда в смеси аргона с гидроксидом ОН. Создана отпаянная лампа с максимумом излучения на $\lambda = 309.2$ нм, площадью излучающей поверхности ~ 700 см² и плотностью средней мощности 1.5 мВт/см². Полная средняя мощность лампы составляет 1.1 Вт.

Ключевые слова: барьерный разряд, молекулы ОН.

1. Газовые смеси, содержащие буферный газ (Ar, Ne, Хе) и легкоионизируемую добавку (Hg, Cd, Zn, Na, Rb, Cu, Tl), широко используются в современных источниках оптического излучения низкого и среднего давления [1].

Давно замечено, что при возбуждении инертного газа, содержащего примеси воды, в спектре появляется $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ -полоса излучения гидроксила ОН с максимумом на $\lambda \sim 309$ нм [2, 3]. Известно, что наличие воды может приводить к срыву генерации, например, ХеСl-лазера. Однако в случае источника некогерентного излучения этот неблагоприятный фактор можно обратить в достоинство и создать источник оптического излучения, в котором в качестве легкоионизируемой добавки выступает вода. По данным [3] при возбуждении инертных газов пучком электронов полоса на $\lambda \sim 309$ нм имела наибольшую интенсивность в аргоне.

Авторами работ [4–7] были изучены тлеющий разряд и ВЧ разряд низкого давления (до 30 Тор) в смеси гидроксила ОН и буферных газов и найдены условия, когда в спектре разряда доминирует излучение молекулы ОН ($A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ -полоса), а излучение инертного газа в диапазоне 200–700 нм почти полностью подавлено. Такая ситуация возможна благодаря тому, что потенциалы ионизации и возбуждения радикалов ОН заметно ниже соответствующих потенциалов атомов инертных газов.

Однако в указанном цикле работ остался неосвещенным ряд вопросов, существенных с точки зрения создания ламп нового типа. А именно, не были определены энергетические характеристики излучения $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ -полосы радикала ОН, эффективность излучения и ресурсные характеристики лампы, не представлена структура полосы излучения гидроксила. Цель данной работы – восполнение указанных пробелов и создание отпаянных ламп с высокими энергетическими характеристиками.

В отличие от [4–7], для возбуждения рабочей смеси мы использовали барьерный разряд (БР). Это разряд, протекание тока в котором ограничено, по крайней мере,

одним слоем диэлектрика, а характерные размеры электродов существенно превышают межэлектродный промежуток. Такой разряд обладает большой параметрической гибкостью: при варьировании внешних параметров БР – напряжения (от сотен вольт до киловольт), давления рабочей смеси p (от долей торра до 10^3 Тор), толщины разрядного промежутка d (в интервале 1–10 мм) – можно менять параметр E/n (от 1 до 500 Тд), где E – напряженность поля, n – концентрация газа. При этом характерные параметры плазмы БР могут варьироваться в широких диапазонах: средняя электронная температура от 1 до 10 эВ, степень ионизации от 10^{-4} до ~ 1 , а концентрация электронов от 10^{11} до 10^{15} см⁻³. Внешне БР представляет собой (в зависимости от давления) либо однородный разряд, либо хаотически расположенные микроразряды (филаменты), длительность протекания тока в которых не превышает нескольких десятков наносекунд [8, 9]. Кроме того, в лампах с двумя диэлектрическими барьерами исключен контакт между электродом и рабочей смесью, что позволяет обеспечивать большие сроки службы устройства [10].

В связи с этим в целом БР представляется интересным кандидатом на получение эффективного излучения радикалов ОН.

2. Конструкция лампы показана на рис.1. Колба 1 изготовлена из двух коаксиально расположенных трубок кварца марки КУ-1 длиной 11 см с диаметрами 2.2 и 4.6 см. Внешний электрод 2 имел форму спирали и пропуска-

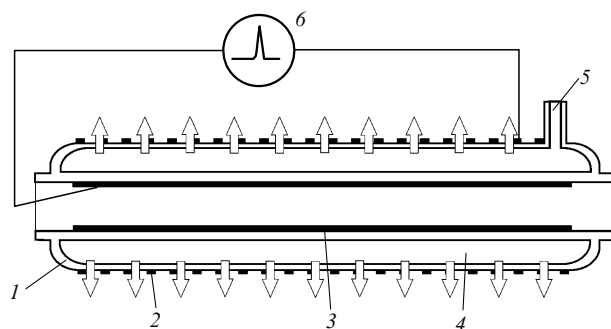


Рис.1. Конструкция ОН-лампы:

1 – колба; 2 – перфорированный электрод; 3 – сплошной электрод; 4 – разрядный промежуток; 5 – патрубок для замены рабочих смесей; 6 – генератор. Стрелками показано направление выхода излучения.

Э.А.Соснин, М.В.Ерофеев, С.М.Авдеев, А.Н.Панченко, В.А.Панарин, В.С.Скакун, В.Ф.Тарасенко, Д.В.Шитц. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3; e-mail: badik@loi.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 8 июня 2006 г.

ние более 95 %. Сплошной электрод 3 изготовлен из алюминиево-магниево-вольфрамовой фольги. Возбуждение газовой среды в промежутке 4 осуществлялось при подаче на электроды импульсного напряжения в форме меандра с амплитудой до 5 кВ и длительностью 1.5 мкс. Частота следования импульсов могла варьироваться от 26 до 96 кГц. Вводимая в плазму мощность зависела от амплитуды и частоты следования импульсов напряжения и при максимальной частоте достигала 70 Вт. Разряд, сформированный в промежутке 4, мог иметь как диффузную, так и филаментарную форму.

Мощность излучения лампы в абсолютных единицах определялась фотоприемником С8026 (Hamamatsu Photonics KK) с фотоприемной головкой Н8025-222. Спектр излучения разряда и его временной ход регистрировались спектрометром высокого разрешения HR4000 (Ocean Optics B.V.). Вводимая мощность находилась из осциллограмм импульсов напряжения и тока по методике работы [11]. Эти осциллограммы регистрировались осциллографом TDS 224 (Textronics Inc.) с помощью токового шунта и делителя напряжения. Давление паров воды на входе 5 контролировалось датчиком влажности ННН-4000 (Honeywell Int. Inc.).

3. В экспериментах варьировались давления аргона и паров воды и измерялись мощность излучения, вводимая в разряд мощности и спектры излучения. Верхняя граница используемых давлений ограничивалась повышением напряжения пробоя разрядного промежутка при повышенных давлениях.

Как и в [5], добавка гидроксила к инертному газу приводит к подавлению излучения инертного газа, и в диапазоне 200–680 нм преобладает излучение А–Х-полосы $\cdot\text{OH}$. Согласно [12] в спектре может также наблюдаться В–А-переход (269.6 нм), однако во всех изученных нами условиях этот переход зарегистрирован не был.

На рис.2 приведен детализированный спектр А–Х-полосы $\cdot\text{OH}$, в котором оказалось возможным отождествить ряд сильных линий. По виду спектр (максимумы и относительные интенсивности линий) близок к спектру, полученному в пламени, содержащем горячий газ, кислород и водород ($T = 3000$ К) [2], к спектру лампы Бальмера ($T \sim 1200$ К) с небольшими добавками воды в колбу [13] и к численно рассчитанному спектру $A^2\Sigma \rightarrow X^2\Pi$ -полосы радикала $\cdot\text{OH}$ [13].

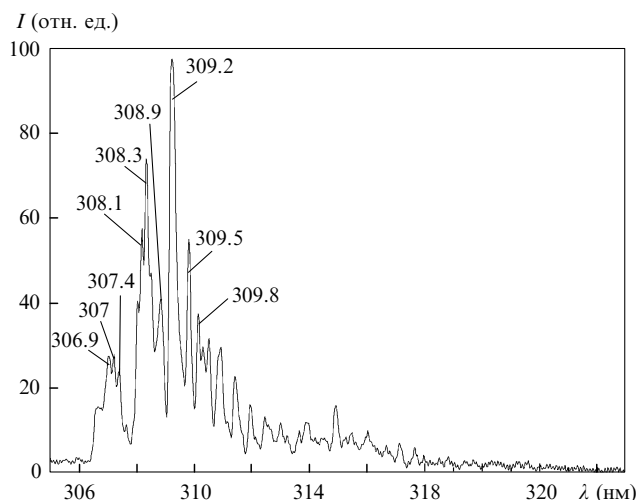


Рис.2. Спектр излучения А–Х-полосы ОН-лампы при давлениях паров воды ~ 1 Торр и аргона 300 Торр.

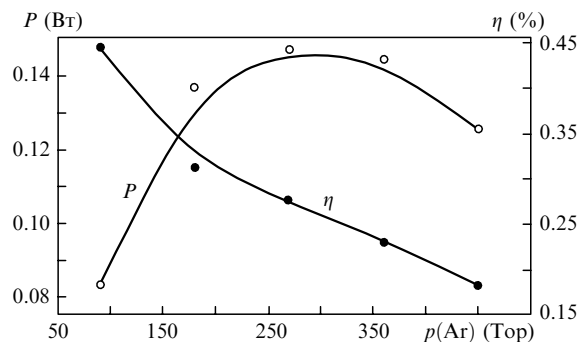


Рис.3. Средняя мощность и эффективность излучения А–Х-полосы $\cdot\text{OH}$ при различных давлениях Ar и давлении H_2O около 1.3 Торр.

Интегральная интенсивность А–Х-полосы зависела как от давления аргона (рис.3), так и от концентрации воды в рабочей смеси. Строго контролировать содержание воды при низких давлениях ($p < 0.2$ Торр) мы не могли – не позволяла точность нашего детектора влажности. Также не поддавалась регистрации какая-то часть воды, образующая на стенках и в объеме колбы комплексы воды и гидроксила $((\text{H}_2\text{O})_m, (\text{OH})_n, (\text{H}_2\text{O})_m(\text{OH})_n)$. Тем не менее с поправкой на это ограничение влияния концентрации воды на интенсивность А–Х-полосы можно сказать следующее. При давлении паров менее долей торра мощность излучения невелика, а при повышении давления до нескольких десятых торра она резко увеличивается. Дальнейшее увеличение содержания воды до нескольких торр ведет к снижению мощности излучения на 1–1.5 порядка. Последнее можно объяснить ростом самопоглощения излучения радикала $\cdot\text{OH}$, что проявляется в относительном уплощении контура А–Х-полосы при низких концентрациях гидроксила.

При низких давлениях воды (менее 0.5 Торр) и средних давлениях аргона (менее 180 Торр) разряд является диффузным и, вероятно, близким по параметрам плазмы к тлеющему и к параметрам, полученным в [5]. С повышением давления воды и/или аргона разряд полностью или частично переходит в филаментарную форму.

Таким образом, в условиях БР за счет его параметрической гибкости были получены сведения о влиянии повышенных давлений на спектральные и предельные энергетические характеристики излучения. Примечательной особенностью БР является также легкость масштабирования колб. Этот факт и полученные данные позволили нам создать отпаянную лампу с длиной рабочей зоны 55.5 см, показанную на рис.4.

Площадь излучающей поверхности и плотность средней мощности этой лампы составляли ~ 700 см² и 1.5 мВт/см² соответственно, а ее полная средняя мощность была равна 1.1 Вт. Эффективность устройства составляла 0.4 %.

Результаты первых ресурсных испытаний ОН-лампы приведены на рис.5. Видно, что за первые 10 часов (уча-

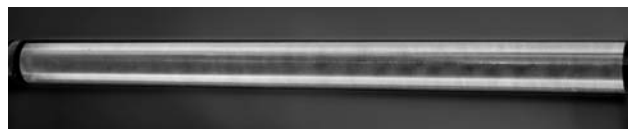


Рис.4. Фотография излучателя отпаянной ОН-лампы барьерного разряда.

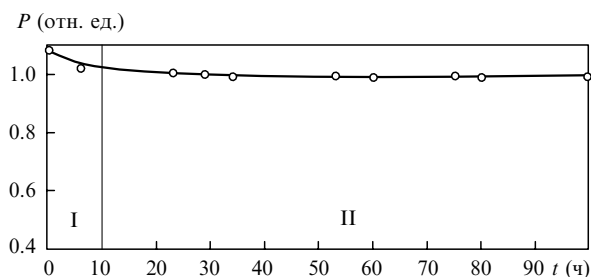


Рис.5. Ресурсная зависимость для ОН-лампы барьерного разряда ($\text{Ar}:\text{H}_2\text{O} = 270:\sim 0.2 \text{ Torr}$).

сток I) мощность излучения несколько падает, а затем стабилизируется (участок II). Согласно [14] первичный спад мощности в газоразрядных приборах происходит вследствие адсорбции и в большей степени – абсорбции рабочего газа (в нашем случае – воды) оболочкой кварцевой колбы. По мере накопления молекул воды и аргона внутреннее давление в каналах микропор кварцевой оболочки значительно повышается. Одновременно с абсорбцией происходит десорбция, часть газа возвращается из микропор оболочки в объем. Когда эти процессы уравновешиваются, потери воды становятся минимальными и мощность излучения лампы стабилизируется.

Можно ожидать, что с увеличением размеров ОН-ламп длительность участка I увеличится, а на участке II ресурс излучателя будет не хуже, чем у эксилламп на галогенидах инертных газов [9, 10].

В литературе указаны и другие механизмы потерь воды, а именно: 1) обмен протоном и электроном с отрывом атома кислорода от поверхности кварца; 2) реакция с образованием $\text{Si}(\text{OH})_4$ [15]; 3) образование кластеров инертный газ–вода, например $\text{Ar}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ [16]. Однако для образования $\text{Ar}_n(\text{H}_2\text{O})_m$ необходимо, чтобы средние энергии электронов составляли 15–70 эВ, что в БР реализовать сложно, а для накопления $\text{Si}(\text{OH})_4$ требуется существенно большее время, чем в проведенном нами эксперименте. Судить о роли первого механизма

можно по спектру излучения, но в наших опытах линии кислорода в спектре не наблюдались.

4. Таким образом, на основе проведенных исследований впервые создана лампа барьерного разряда на $\text{A}^2\Sigma \rightarrow \text{X}^2\Pi$ -полосе гидроксила OH с площадью $\sim 700 \text{ см}^2$ и средней мощностью 1.1 Вт. Лампа обладает потенциально высоким сроком службы благодаря применению безэлектродного разряда и представляет собой экологически безопасный вид источников оптического излучения, т. к. не содержит паров ртути и кадмия.

Работа выполнена при финансовой поддержке МНТЦ (проект № 2706).

1. Рохлин Г.Н. *Разрядные источники света* (М.: Энергоатомиздат, 1991).
2. Dieke G.H., Crosswhite H.M. *J. Quant. Spectr. Rad. Transfer*, **2**, 97 (1961).
3. Бункин Ф.В., Держиев В.И., Г.А. Месяц Г.А., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф., Шпак В.Г., Яковленко С.И. *ЖТФ*, **56**, 2240 (1986).
4. Башлов Н.Л., Вуль А.Я., Кидалов С.В., Козырев С.В., Миленин В.М., Тимофеев Н.А. Патент RU № 2074454 МКИ H01J61/12. Приоритет от 01.08.1995.
5. Вуль А.Я., Кидалов С.В., Миленин В.М., Тимофеев Н.А., Ходорковский М.А. *Письма в ЖТФ*, **25**, 10 (1999).
6. Вуль А.Я., Кидалов С.В., Миленин В.М., Тимофеев Н.А., Ходорковский М.А. *Письма в ЖТФ*, **25**, 62 (1999).
7. Миленин В.М., Тимофеев Н.А., Вуль А.Я., Кидалов С.В., Ходорковский М.А. *Письма в ЖТФ*, **26**, 63 (2000).
8. Eliasson B., Kogelschatz U. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **19**, 309 (1991).
9. Ломаев М.В., Скакун В.С., Соснин Э.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В., Ерофеев М.В. *УФН*, **173**, 201 (2003).
10. Соснин Э.А., Ерофеев М.В., Лисенко А.А., Тарасенко В.Ф., Шитц Д.В. *Оптич. ж.*, **69**, 77 (2002).
11. Ломаев М.И. *Оптика атмосферы и океана*, **14**, 1091 (2001).
12. Раддиг А.А., Смирнов Б.М. *Справочник по атомной и молекулярной физике* (М.: Атомиздат, 1980).
13. De Izarra C. *Int. J. Modern Phys. C.*, **11**, 987 (2000).
14. Каганов И.Л. *Ионные приборы* (М.: Энергия, 1972).
15. Forsdyke G.M., in *Proc. 6th Int. Symp. LS-6* (Budapest, Hungary, 1992, p. 163).
16. Zvilopulo A.N., Dolgin A.I., Khodorkovskii M.A. *Phys. Scripta*, **50**, 696 (1994).