

04;07

Спектр видимого излучения импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии

© Ф.Г. Бакшт, С.В. Гавриш, В.Б. Каплан, С.В. Коротков,
В.Ф. Лапшин, А.М. Марциновский, И.И. Столяров, Д.В. Христюк

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
ОАО Специальное конструкторско-технологическое бюро „Ксенон“,
Зеленоград, Москва
Петербургский государственный университет путей сообщения,
Санкт-Петербург
E-mail: baksh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 30 июля 2008 г.

Приводятся результаты экспериментального и теоретического исследования спектра излучения импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии. Экспериментально подтвержден предсказанный ранее теоретически существенный сдвиг порогов 6P и 5D рекомбинационных континуумов в длинноволновую область спектра в плотной плазме цезия. Вследствие перекрытия континуумов образуется практически сплошной спектр излучения в видимой области. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом. В частности, показано, что исследованный разряд является безртутным эффективным источником света с индексом цветопередачи $R_a = 98$ и световой отдачей $\eta = 81 \text{ lm/W}$.

PACS: 52.80.Mg

1. Исследование импульсно-периодического разряда (ИПР) высокого давления в парах цезия связано с возможностью его использования для создания эффективного экологически чистого источника света [1,2]. В работах [3,4] было показано, что в цезиевом ИПР удастся создать плазму с температурой на оси 5500–6500 К и концентрацией электронов $n_e \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. В этих условиях снижение потенциала ионизации атома цезия и слияние, вследствие уширения, высших членов спектральных серий, сходящихся к порогам рекомбинационных 6P и 5D континуумов, должно приводить [5] к существенному сдвигу порогов этих континуумов в длинноволновую сторону. Отметим, что

спектр излучения импульсного разряда в цезии исследовался ранее в экспериментальных работах [6,7]. Однако условия, при которых возникают яркие рекомбинационные континуумы, там достигнуты не были: для излучения в континууме плазма разряда была оптически тонкой, так что роль этого излучения в балансе энергии и вклад его в световые характеристики были малосущественны. Световая эффективность разряда η не превышала 46 lm/W.

В настоящей работе приводятся первые экспериментальные результаты, подтверждающие теоретически предсказанную [1,5,8] возможность создания эффективного источника света ($\eta > 80$ lm/W) с рекомбинационным механизмом излучения на основе ИПР высокого давления в цезии. В таком разряде рекомбинационное излучение играет определяющую роль как в балансе энергии, так и в световых характеристиках излучения.

2. Для проведения исследования разряда была разработана и создана лампа, позволяющая получить в ней высокое давление паров цезия. Лампа включает в себя внешнюю вакуумированную кварцевую колбу и закрепленную в ней горелку из монокристаллического оксида алюминия Al_2O_3 (сапфира) с внутренним радиусом $R = 2.5$ mm, толщиной стенок 1.5 mm. В горелку при помощи стеклокерамического припоя впаяны электродные узлы. Для электродов использована традиционная для натриевых ламп высокого давления конструкция в виде цельного цилиндрического керна с навитой на него биспиралью. В качестве материала биспирали и керна выбран неактивированный вольфрам марки ВА, так как при высоких давлениях цезия его адсорбция на вольфраме обеспечивает высокую эмиссию лучше, чем любые активирующие добавки. Межэлектродное расстояние составляет 55 mm. Все элементы электродных узлов выполнены из ниобиевого сплава, имеющего коэффициент температурного расширения такой же, как у сапфира. Горелка в процессе изготовления откачивалась и заполнялась ксеноном при давлении 20 Torr и цезием. Роль ксенона в данном случае сводится к обеспечению первоначального пробоя газоразрядного промежутка. Заполнение цезием производилось с запасом, так, чтобы количество газообразного цезия в трубке определялось насыщающим давлением вблизи наиболее холодной точки.

Спектроскопические измерения проводились с использованием метода стробируемого интегрирования. В этом методе измерительная схема, на которую подается исследуемый периодический сигнал, откры-

вается на короткое время ($< 1 \mu\text{s}$). Сигнал усредняется с помощью накопительного конденсатора. Для оптических измерений использовался монохроматор МДР-23. Регистрация излучения в видимом диапазоне осуществлялась фотоумножителем ФЭУ-79.

В работе рассматривается установившийся режим горения ИПР разряда, когда импульс тока заданной формы периодически пропускается через плазму, поддерживаемую слаботочным дежурным разрядом. Для обеспечения пульсирующего режима питания лампы был создан генератор, способный поддерживать дежурный ток в диапазоне $I_0 = 0.1\text{--}1.0 \text{ A}$ и пропускать через разряд импульсы тока длительностью $t_p = 15\text{--}120 \mu\text{s}$, амплитудой $I_{\text{max}} = 10\text{--}150 \text{ A}$ при частоте следования импульсов в диапазоне $\nu = 500\text{--}1500 \text{ Hz}$. Средняя вкладываемая в разряд мощность могла составлять до 2500 W . Генератор обеспечивал также первоначальный пробой газоразрядного промежутка при напряжении около 2 kV .

При теоретическом исследовании разряда использовалась развитая в [7] модель, основанная на уравнениях двухтемпературной многокомпонентной радиационной газовой динамики, включающей в себя решение уравнения переноса излучения. При создании теории ИПР в цезии было учтено, что, при реализующихся в разряде значениях концентраций компонентов плазмы (атомов, ионов и электронов) и температуры электронов, в основном объеме плазмы устанавливается состояние частичного локального термодинамического равновесия (ЛТР). При этом концентрации электронов и атомов цезия (на различных уровнях возбуждения) связаны формулой Саха–Больцмана с температурой электронов. Описание ИПР с помощью двухтемпературной ЛТР модели с соответствующими граничными условиями позволило рассчитать параметры плазмы в импульсе и в послесвечении разряда.

3. На рис. 1–3 приведены результаты эксперимента и теоретических расчетов ИПР в цезии для $I_0 = 0.6 \text{ A}$, $I_{\text{max}} = 70 \text{ A}$, $\nu = 1250 \text{ Hz}$, $t_p = 35 \mu\text{s}$. В расчетах количество цезия на единицу длины трубки составляло $M = 0.128 \text{ mg/cm}$, что соответствует давлению насыщенных паров $P_{\text{sat}} = 615 \text{ Torr}$ у холодного конца трубки с температурой $T_{\text{cold}} = 920 \text{ K}$. На рис. 1 изображены (в отн. ед.) использованная в эксперименте и в расчетах форма импульса тока $I(t)/I_{\text{max}}$, а также полученные в расчетах значения напряженности продольного электрического поля $E_z(t)/E_{\text{max}}$, температуры электронов $T_e(0, t)/T_{\text{max}}$ и ионов $T(0, t)/T_{\text{max}}$ на оси разряда, давление плазмы $P(t)/P_{\text{max}}$. Максимальные значения величин составляют $E_{\text{max}} = 150 \text{ V/cm}$, $T_{\text{max}} = 5550 \text{ K}$

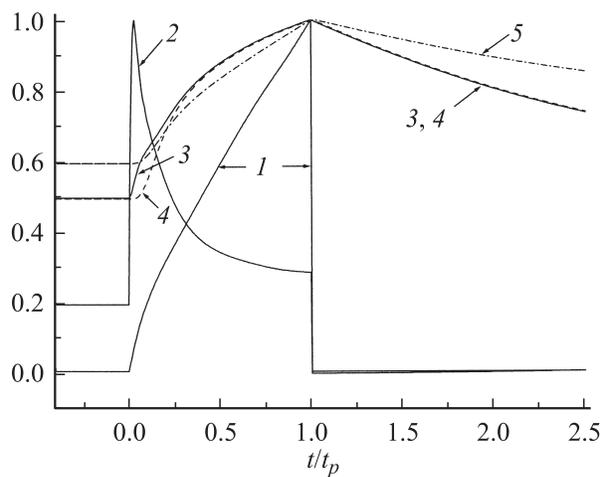


Рис. 1. Зависимость от времени основных параметров разряда: 1 — форма импульса тока $I(t)/I_{\max}$, 2 — напряженность продольного электрического поля $E_z(t)/E_{\max}$, 3 — температура электронов $T_e(0, t)/T_{\max}$, 4 — температура тяжелых частиц $T(0, t)/T_{\max}$, 5 — давление плазмы $P(t)/P_{\max}$.

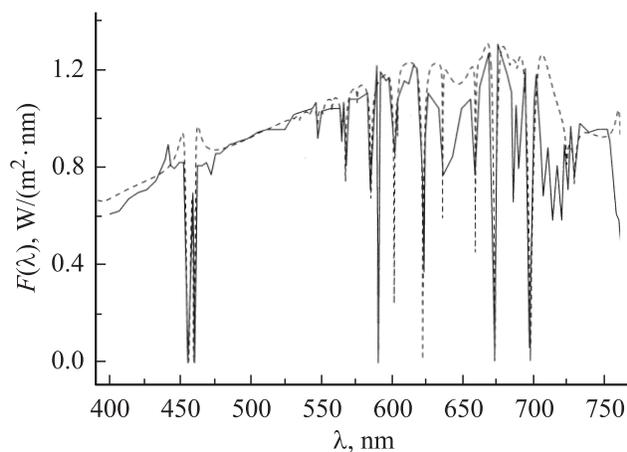


Рис. 2. Спектр излучения разряда в момент времени $t/t_p = 0.95$: сплошная линия — эксперимент, штриховая линия — расчет.

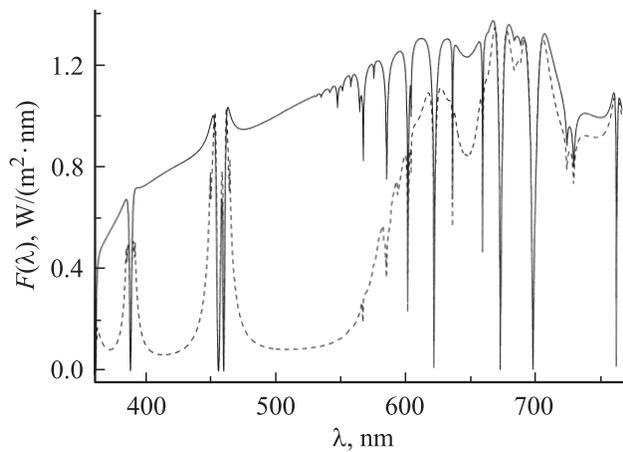


Рис. 3. Спектр излучения разряда в момент времени $t/t_p = 0.95$ (расчет). Штриховой линией показан спектр, вычисленный без учета излучения в рекомбинационном континууме.

и $P_{\max} = 1090$ Вт. Время отложено в единицах импульса t/t_p . Как видно из рисунка, при указанных параметрах разряда удается создать в импульсе плотную плазму с концентрацией $\sim 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ на оси разряда, эффективно излучающую в рекомбинационном континууме. На рис. 2 сравниваются результаты измерений и расчетные значения спектра излучения разряда для одного и того же момента времени $t/t_p = 0.95$. Поскольку экспериментальные результаты получены в относительных единицах, то их значения нормировались таким образом, чтобы теория и эксперимент совпадали при $\lambda = 510 \text{ nm}$. Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными измерениями. При этом видно, что спектр образован излучением в континууме, на фоне которого видны линии поглощения. На рис. 3 сравниваются результаты расчета полного спектра излучения разряда и спектра, полученного без учета излучения в рекомбинационном континууме (штриховая линия). Как видно из рисунка, в исследуемом ИПР в цезии основной вклад в излучение в видимой области вносит излучение в ярких 6P и 5D континуумах. Пороги континуумов для изолированного атома составляют $\lambda_{th}(6P) = 504 \text{ nm}$ и $\lambda_{th}(5D) = 594 \text{ nm}$. Видно, что в плотной плазме разряда происходит сдвиг этих порогов в длинноволновую сторону [5]. Так, в рассматриваемых условиях сдвиг порогов на оси

разряда составляет величину ~ 120 nm. В результате этого весь видимый спектр перекрывается 6P и 5D континуумами. Попутно укажем на работы [9–12], в которых рассматривались явления в припороговой области рекомбинационных континуумов в плазме водорода и ксенона. Расчет световых характеристик разряда, выполненный в соответствии с [13], дает для указанного режима горения значения общего индекса цветопередачи $R_a = 98$ и световой отдачи $\eta = 81$ lm/W.

Таким образом, в настоящей работе проведено экспериментальное и теоретическое исследование видимого спектра излучения импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии. Сравнение теории с экспериментом показывает, что спектр образован яркими 6P и 5D континуумами, пороги которых существенно сдвинуты в длинноволновую область.

Результаты работы подтверждают возможность создания на основе ИПР в цезии экологически чистого (безртутного) источника света с высоким качеством цветопередачи и большой световой отдачей.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-08-00600-а).

Список литературы

- [1] Бакшт Ф.Г., Лапшин В.Ф. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 24. С. 40–45.
- [2] Бакшт Ф.Г., Лапшин В.Ф. // Светотехника. 2000. № 5. С. 18–20.
- [3] Бакшт Ф.Г., Лапшин В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 24. С. 70–76.
- [4] Бакшт Ф.Г., Лапшин В.Ф. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 63–72.
- [5] Бакшт Ф.Г., Лапшин В.Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 7. С. 100–105.
- [6] Gu H., Muzeroll M.E., Chamberlain J.C., Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. P. 1–9.
- [7] Pichler G., Živčec V., Beuc R., Mrzljak Ž., Ban T., Skenderović H., Günther K., Liu J. // Physica Scripta. 2003. V. 105. P. 98–100.
- [8] Бакшт Ф.Г., Лапшин В.Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 24. С. 86–94.
- [9] Гаврилов В.Е. // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74. № 6. С. 1028–1036.
- [10] Гаврилова Т.В., Аверьянов В.П., Витель И., Дьячков Л.Г., Куриленков Ю.К. // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82. № 5. С. 757–764.
- [11] Пухов А.М. // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 83. № 6. С. 903–905.
- [12] Грязнов В.К., Денисов О.Б., Орлов Н.Ю., Фортвов В.Е. и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 12. С. 1081–1084.
- [13] ГОСТ 23198-94. Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик. М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996. 86 с.