

Исследование оптических свойств импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии

Ф. Г. Бакиш, В. Б. Каплан, В. Ф. Лапшин, А. М. Марциновский
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

С. В. Гавриш
ЗАО «СКБ "Зенит"», Москва, Россия

Приведены результаты теоретического и экспериментального исследований спектра видимого излучения импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии. Сравнение результатов расчетов с экспериментом показало хорошее совпадение расчетных и экспериментальных спектров разряда и подтвердило предсказанную ранее теоретически возможность реализации разряда, являющегося эффективным источником света с рекомбинационным механизмом излучения. Рассмотрены механизмы формирования сплошного спектра излучения разряда.

PACS: 52.80.Mg

Ключевые слова: оптические свойства, разряд, высокое давление, цезий, излучение.

Введение

Исследование импульсно-периодического излучающего разряда (ИПР) высокого давления в парах цезия представляет интерес в связи с возможностью его использования для создания эффективного экологически чистого источника света [1, 2]. Как показали теоретические исследования [3, 4], в таком разряде удастся создать плазму с высокой концентрацией электронов $n_e \sim 10^{17} \div$

$\div 10^{18}$ см⁻³ и температурой на оси 5500—6500 К. 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 и не были достигнуты: 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 не превышала $\eta = 46$ лм/Вт.

В настоящей работе приводятся экспериментальные результаты, подтверждающие теоретически предсказанную [1, 5, 8] возможность создания эффективного источника света ($\eta > 80$ лм/Вт) 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.

Экспериментальная установка

Для проведения исследования разряда была создана лампа, позволяющая получить в ней высокое давление паров цезия. Лампа (рис. 1) включает в себя внешнюю вакуумированную кварцевую колбу диаметром 15 мм и закрепленную в ней горелку из монокристаллического оксида алюминия Al_2O_3 (сапфира) длиной 115 мм с внутренним радиусом $R = 2,5$ мм и толщиной стенок 1,5 мм.

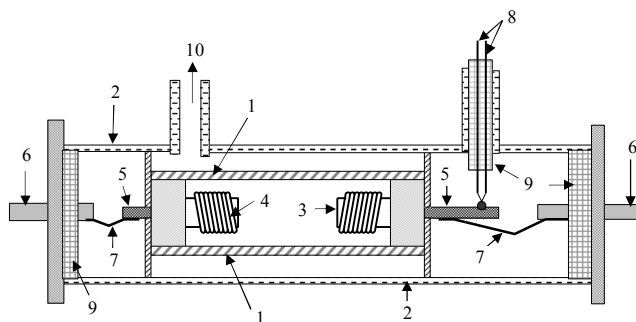


Рис. 1. Схематическое изображение горелки в кварцевой трубке:

1 — трубка из монокристалла сапфира; 2 — защитная кварцевая трубка; 3 — стержень электрода; 4 — навитая биспираль; 5 — токовыводы в виде ниобиевых трубок; 6 — токовыводящие стержни; 7 — теплопроводящие мостики из фольговых полосок; 8 — термопарные проволоочки; 9 — резиновые уплотнения токовыводов; 10 — направление откачки

Кварцевая колба во время работы лампы откачивалась до давления $\sim 10^{-3}$ Торр. В горелку с помощью стеклокерамического припоя впаяны электродные узлы. Для электродов использована традиционная для натриевых ламп высокого давления конструкция в виде цельного цилиндрического стержня с навитой на него биспиралью. В качестве материала биспирали и стержня выбран неактивированный вольфрам марки ВА, так как при высоких давлениях цезия его адсорбция на вольфраме обеспечивает высокую эмиссию луче,

чем любые активирующие добавки. Межэлектродное расстояние составляет 55 мм. Горелка имеет трубчатые токовыводы, выполненные из ниобиевого сплава, имеющего коэффициент температурного расширения такой же, как у сапфира. Диаметр ниобиевых трубок составляет 3 мм, толщина стенок 0,3 мм.

Горелка в процессе изготовления откачивалась и заполнялась ксеноном при давлении 20 Торр 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 P_{sat} вблизи наиболее холодной точки в запаянной ниобиевой трубке. Для измерения ее температуры в кварцевую колбу введена термопара.

Спектроскопические измерения проводили с помощью метода стробированного интегрирования. В этом методе измерительная схема, на которую подается исследуемый периодический сигнал, открывается на короткое время (< 1 мкс). Сигнал усредняется с помощью накопительного конденсатора. Для оптических измерений использовался монохроматор МДР-23. Регистрация излучения в видимом диапазоне осуществлялась фотоумножителем ФЭУ-79.

Для импульсного питания ИПР в цезии использовался специально созданный для этой цели источник тока (генератор импульсов переменной полярности). С помощью генератора в лампе поддерживался слаботочный дежурный разряд силой тока $I_0 \sim 1$ А и обеспечивалось периодическое с частотой $\nu \sim 800 - 1400$ Гц пропускание импульсов тока длительностью $t_p \sim 15 - 120$ мкс и амплитудой до $I_{max} = 100$ А. Характерная форма импульсов тока приведена на рис. 2. Генератор обеспечивал также первоначальный пробой газоразрядного промежутка, происшедший при напряжении около 2 кВ.

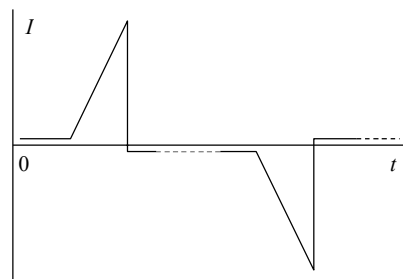


Рис. 2. Форма знакопеременного импульса тока, использованного в эксперименте

Результаты эксперимента и сравнение с теорией

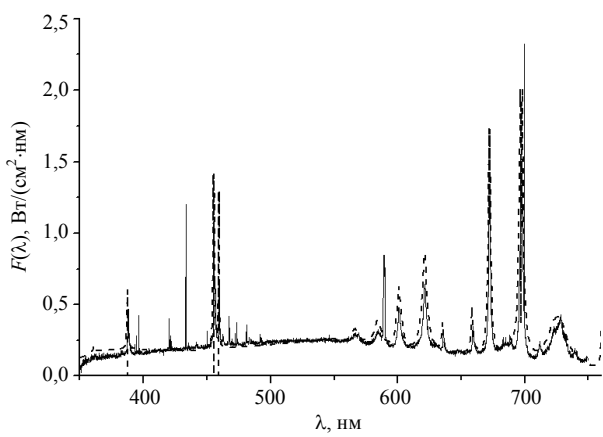
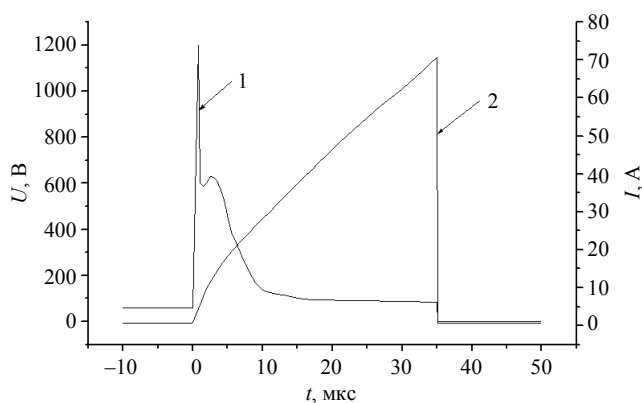
В настоящей работе приведены результаты исследования установившегося режима горения ИПР

в цезии. Форма использованного в эксперименте импульса тока и измеренное напряжение на лампе показаны на рис. 3. Частота следования импульсов составляет $\nu = 1350$ Гц. Напряжение на лампе имеет характерный для ИПР резкий максимум в начале импульса. Результаты измерения видимого спектра разряда в конце прохождения импульса тока (для момента времени $t = 34$ мкс) приведены на рис. 4, а, б, в для значений P_{sat} , равных 33 и 590 Торр.

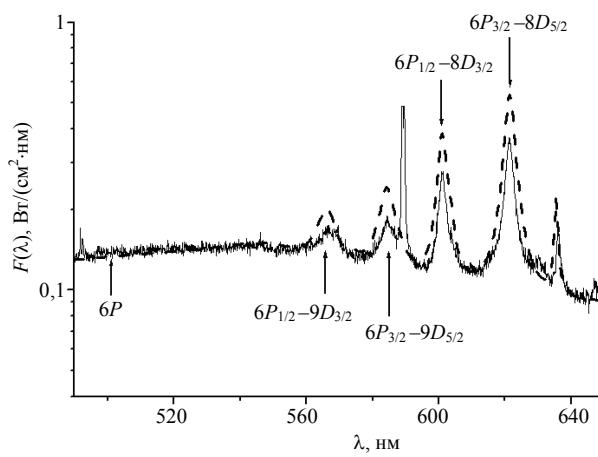
Для теоретического расчета спектра излучения разряда использовалась сформулированная ранее

[8, 9] двухтемпературная многожидкостная модель ИПР, включающая в себя уравнения непрерывности для компонент плазмы, уравнения движения с учетом проскальзывания компонент плазмы друг относительно друга, уравнения энергии для электронов и тяжелой компоненты (атомов и ионов), уравнение переноса излучения и закон Ома. Результаты вычислений спектра приведены на рис. 4 пунктиром. Для удобства сравнения теоретических и экспериментальных результатов последние были нормализованы таким образом, чтобы расчет и эксперимент совпадали при $\lambda = 510$ нм.

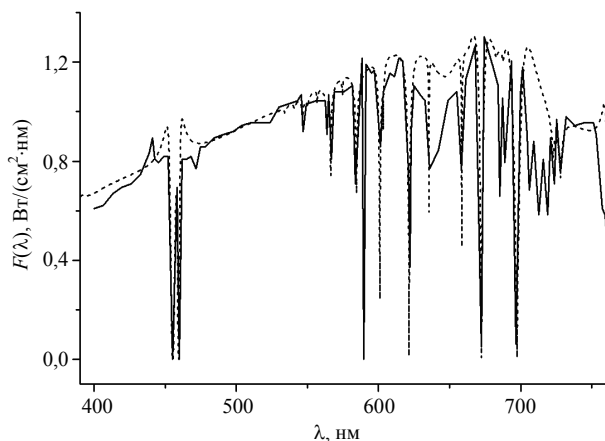
Рис. 3. Зависимость от времени тока разряда $I(t)$ и напряжения на лампе $U(t)$ (эксперимент):
1 — $U(t)$; 2 — $I(t)$



а



б



в

Рис. 4. Спектр видимого излучения ИПР в цезии в момент времени $t = 34$ мкс:

а — весь видимый спектр; б — спектр излучения вблизи порога $6P$ рекомбинационного континуума (стрелкой указано положение порога для изолированного атома); а, б — полное давление плазмы $P = 90$ Торр; в — полное давление плазмы $P = 920$ Торр; — — эксперимент, - - - - - расчет

Как было показано в [5], в плазме ИПР в цезии дебаевское снижение потенциала ионизации и слияние высших членов спектральных серий вследствие уширения должны приводить к существенному сдвигу порогов $6P$ и $5D$ континуумов Cs в длинноволновую сторону. Это хорошо подтверждается результатами измерений спектра при разных давлениях цезия. Так, в эксперименте, соответствующем $P_{sat} = 33$ Торр (см. рис. 4, а, б), плазма ИПР является оптически прозрачной. При этом полное давление плазмы в момент окончания импульса тока равно $P = 90$ Торр. Спектр разряда состоит из слабого излучения в континууме и ярких линий цезия на его фоне. На рис. 4, б показан спектр излучения разряда вблизи порога $6P$ фото-рекомбинационного континуума. Длина волны, соответствующая порогу континуума для изолированного атома, равна $\lambda_{th}(6P) = 504$ нм. Линии спектральной серии $6P-nD$, сходящиеся к порогу континуума, отдельно указаны на рисунке. Хорошо видно, что состояние $9D$ атома цезия является последним в этой серии. Состояния со значением главного квантового числа $n > 9$ не реализуются в плазме разряда. Их место занимает рекомбинационный континуум, смещенный в длинноволновую область относительно невозмущенного порога. Отметим, что хорошее совпадение расчета и эксперимента в этой области спектра подтверждает справедливость использованного в теории [5] механизма образования сплошного спектра.

Аналогичное явление должно иметь место и вблизи порога $5D$ континуума, для которого $\lambda_{th}(5D) = 594$ нм. Так, последним, реализованным в спектральной серии $5D-nF$, является состояние $7F$ (длина волны, соответствующая линии $5D_{5/2} - 7F_{7/2}$, равна 684,8 нм). Однако наблюдение слияния высших членов этой спектральной серии и замещение их континуумом затруднены из-за наложения на эту спектральную область ярких линий $6P-7D$, $6P-8D$ и $6P-9S$.

Увеличение давления плазмы, как показывают вычисления [5], должно приводить к увеличению сдвига порогов $5D$ и $6P$ континуумов, а затем к их слиянию. В результате указанного эффекта практически весь видимый спектр перекрывается этими яркими континуумами.

На рис. 4, в приведены результаты измерений спектра излучения ИПР в цезии в видимой области при $P_{sat} = 590$ Торр (полное давление плазмы при $t = 34$ мкс составляет $P = 920$ Торр). Хорошо видно, что плазма разряда является оптически плотной. На фоне непрерывного излучения видны линии поглощения цезия. Результаты расчетов

достаточно хорошо соответствуют экспериментальным данным и в соответствии с [6, 8] дают для рассматриваемого режима значение световой отдачи $\eta = 89$ лм/Вт и индекса цветопередачи $R_a = 98$.

Заключение

Приведены результаты экспериментального и теоретического изучения оптических свойств импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии. Результаты измерений спектра излучения разряда в видимой области хорошо согласуются с расчетами в рамках ранее построенной модели разряда. Показано, что в плазме разряда происходит замещение высших членов спектральных серий $6P-nD$ и $5D-nF$ излучением в континууме. В результате при давлении плазмы выше атмосферного образуется практически непрерывный спектр излучения разряда в видимой области. Рассчитаны световые характеристики разряда. Показано, что исследованный разряд является эффективным источником света с непрерывным спектром излучения и высоким индексом цветопередачи.

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

Литература

1. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. Вып. 24. С. 40.
2. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Светотехника. 2000. № 5. С. 18.
3. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 24. С. 70.
4. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 63.
5. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. Вып. 7. С. 100.
6. Gu H., Muzeroll M. E., Chamberlain J. C., Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. V. 10. P. 1.
7. Pichler G., Živčec V., Beuc R., Mrzljak Ž., Ban T., Skenderović H., Günther K. and Liu J. // Physica Scripta. 2003. V. T105. P. 98.
8. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 24. С. 86.
9. Бакуит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Прикладная физика. 2008. № 6. С. 43.

Статья поступила в редакцию 13 апреля 2009 г.

Research of optical properties of the pulsed high pressure cesium discharge

F. G. Baksht, V. B. Kaplan, V. F. Lapshin, A. M. Martsinovsky

Joffe Physical-Technical Institute, 26 Polytechnic str., 194021, St. Petersburg, Russia

E-mail: baksht@mail.ioffe.ru

S. V. Gavrish

Special Design Bureau "Zenit", 8 Panfilov av., Zelenograd, 124489, Moscow, Russia

E-mail: svgavr@list.ru

In the work results of the theoretical and experimental research of the pulsed high pressure cesium discharge visible spectrum are presented. Good coincidence of results of calculations and results of measurements is received. It is shown that realisation of the radiative discharge with recombination mechanism of light emission, is possible. Mechanisms of formation of a continuous spectrum of the discharge radiation are considered.

PACS: 52.80.Mg

Keywords: optical properties, discharge, high pressure, cesium, radiation.

Бакшт Федор Григорьевич, зав. лабораторией

Каплан Владимир Борисович, науч. сотр.

Лапшин Владимир Федорович, старший науч. сотр.

Марциновский Артемий Маркович, старший науч. сотр.

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, ФТИ им. Иоффе

Тел. 8 (812) 515-91-22; факс 8 (812) 515-67-47; E-mail: baksht@mail.ioffe.ru

Гавриш Сергей Викторович, начальник лаборатории

124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский просп., д. 8, стр. 5, СКБ "Зенит"

E-mail: svgavr@list.ru