

04;07

## **Особенности формирования непрерывного спектра излучения в видимой области в условиях импульсно-периодического разряда в цезии**

© Ф.Г. Бакшт, В.Б. Каплан, В.Ф. Лапшин, А.М. Марциновский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Петербургский государственный университет путей сообщения,  
Санкт-Петербург  
E-mail: baksh@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 18 июня 2009 г.

Экспериментально прослежен процесс формирования непрерывного спектра излучения импульсного разряда высокого давления ( $P \leq 1 \text{ atm}$ ) в цезии при увеличении вкладываемой мощности. Получено хорошее совпадение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов. Обсуждаются физические механизмы, лежащие в основе наблюдаемого явления. Показано, что при возрастании амплитуды импульса тока от 15 до 80 А происходит переход от линейчатого спектра излучения к непрерывному. При этом световая эффективность разряда в трубке радиусом 2.5 mm возрастает от 15 до 85 lm/W, а индекс цветопередачи возрастает от 86 до 98.

PACS: 52.80.Mg

Оптические явления, наблюдаемые в припороговой области рекомбинационных континуумов, исследовались ранее в плазме водорода и ксенона в работах [1–4]. Интерес к формированию спектра в припороговой области в плазме импульсно-периодического разряда (ИПР) в цезии связан с возможностью его использования для создания эффективного экологически чистого источника света [5,6].

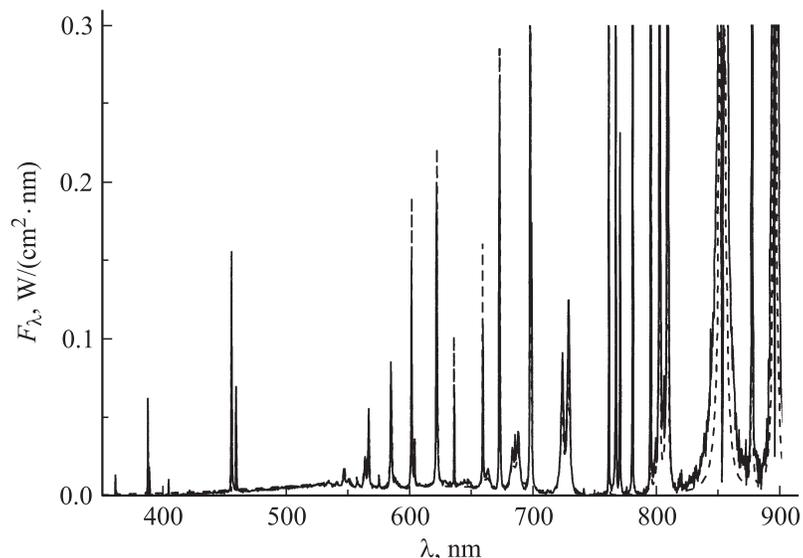
В предыдущих работах [7–9] была построена теория ИПР высокого давления в парах цезия, основанная на уравнениях двухтемпературной многокомпонентной радиационной газовой динамики, включающая в себя решение уравнения переноса излучения.

В настоящей работе исследован процесс преобразования линейчатого спектра излучения такого разряда в континуум при увеличении амплитуды и длительности импульса тока. При исследовании использовалась специально разработанная лампа [10]. Лампа включает в себя сапфировую горелку с внутренним радиусом 2.5 mm, помещенную во внешнюю вакуумированную кварцевую колбу. В горелке используется традиционная для натриевых ламп конструкция электродов. В качестве поджигающего газа использовался ксенон. Расстояние между электродами составляет 55 mm. В работе рассматривается установившийся режим горения лампы. В таком режиме слабоионизованное состояние плазмы между импульсами поддерживается с помощью небольшого постоянного тока  $I_0 = 0.2$  А. Через слабоионизованную плазму периодически, с частотой  $\nu = 900$  Hz, пропускается импульс тока треугольной формы с амплитудой  $I_{\max} = 17.5\text{--}80$  А и продолжительностью  $t_p = 17\text{--}45$   $\mu$ s.

На рис. 1–3 приведены результаты измерений спектра излучения разряда в момент времени  $t = 0.95t_p$ . Там же пунктиром приведены результаты теоретических расчетов радиального спектрального потока энергии  $F(\lambda)$ , выходящего с поверхности столба плазмы в этот момент времени. Поскольку экспериментальные результаты получены в относительных единицах, то при сравнении с теорией [9] их значения нормировались таким образом, чтобы теория и эксперимент совпадали при  $\lambda = 490$  nm.

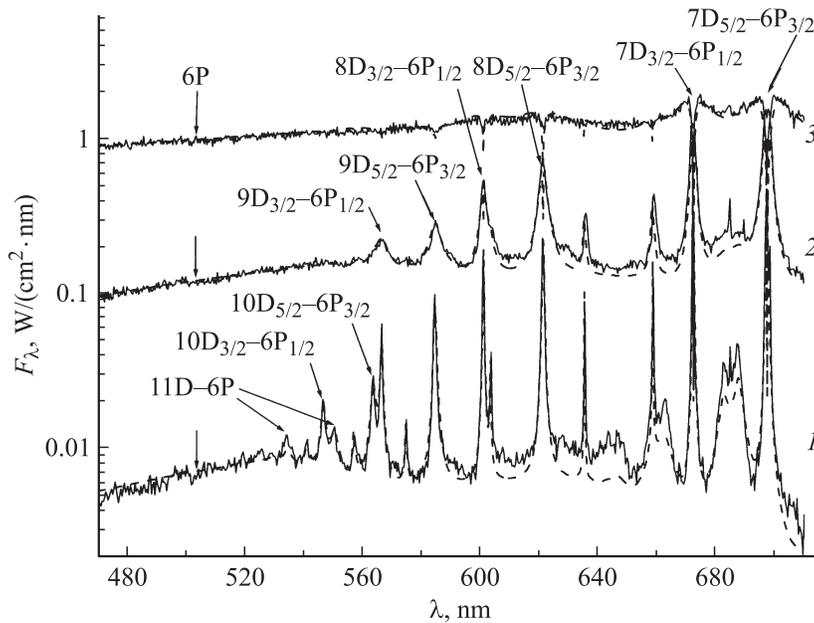
Рис. 1 соответствует импульсу тока амплитудой  $I_{\max} = 17.5$  А и длительностью  $t_p = 17$   $\mu$ s. Средняя мощность  $N$ , вкладываемая на единицу длины дуги, составляет при этом  $N = 3.7$  W/cm. В этом случае, как видно из рисунка, ИПР в цезии имеет линейчатый спектр излучения. Расчеты показывают, что полное давление плазмы в момент времени  $t = 0.95t_p$  равно  $P(t) = 20$  Torr и температура плазмы на оси разряда  $T_e(0, t) = 4500$  К. Плазма разряда является в этих условиях оптически прозрачной для большей части излучения и не может служить эффективным источником света. Световая отдача составляет величину  $\eta = 14.5$  lm/W при индексе цветопередачи  $R_a = 86$ .

Увеличение амплитуды и длительности импульса тока и соответственно увеличение средней мощности, вкладываемой в разряд, приводят к разогреву горелки, увеличению температуры и концентрации цезиевой плазмы в разряде. На рис. 2 показано, как изменяется при этом спектр излучения разряда вблизи порога 6P фоторекомбинационного



**Рис. 1.** Видимый спектр излучения ИПР в цезии в момент времени  $t/t_p = 0.95$ : сплошная линия — эксперимент, пунктир — расчет. Параметры разряда:  $I_{\max} = 17.5$  А,  $t_p = 17$   $\mu$ s,  $\nu = 900$  Hz,  $N = 3.7$  W/cm, полное давление плазмы  $P(t) = 20$  Торг, температура электронов на оси  $T_e(0, t) = 4500$  К.

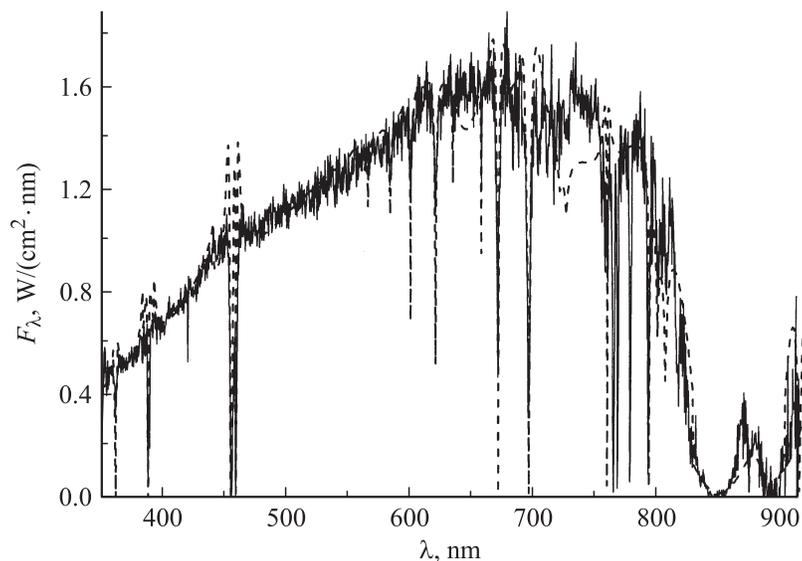
континуума. Результаты измерений соответствуют значениям мощности  $N = 3.7$  W/cm (кривая 1),  $N = 14$  W/cm (кривая 2) и  $N = 80$  W/cm (кривая 3). Температура стенок трубки в рабочей зоне имеет значения, соответственно равные 780, 900, 1200 К. Как видно из рисунка, с возрастанием мощности линейчатый спектр излучения трансформируется в сплошной. На рис. 2 отдельно указаны линии спектральной серии 6P-nD, сходящейся к порогу континуума. Хорошо видно, что в спектральной серии 6P-nD реализуются только те высоковозбужденные состояния, для которых значения главного квантового числа  $n \leq n_{\max}$ . Значение  $n_{\max}$  уменьшается с увеличением давления и температуры плазмы от  $n_{\max} = 11$  до  $n_{\max} = 7$  (см. кривые 1–3 соответственно). Отметим, что аналогичное явление имеет место и вблизи порога 5D континуума (длина волны, соответствующая порогу, равна  $\lambda_{th} = 594$  nm). Однако



**Рис. 2.** Спектр излучения ИПР в цезии в момент времени  $t/t_p = 0.95$  вблизи порога 6P рекомбинационного континуума (порог континуума при  $\lambda_{th} = 504$  nm показан стрелкой): сплошная линия — эксперимент, пунктир — расчет. Параметры разряда: 1 —  $I_{\max} = 17.5$  A,  $t_p = 17 \mu\text{s}$ ,  $\nu = 900$  Hz,  $P(t) = 20$  Torr,  $T_e(0, t) = 4500$  K; 2 —  $I_{\max} = 33$  A,  $t_p = 30 \mu\text{s}$ ,  $\nu = 900$  Hz,  $P(t) = 120$  Torr,  $T_e(0, t) = 5250$  K; 3 —  $I_{\max} = 80$  A,  $t_p = 45 \mu\text{s}$ ,  $\nu = 900$  Hz,  $P(t) = 580$  Torr,  $T_e(0, t) = 5650$  K.

наблюдение слияния высших членов этой спектральной серии и замещения их континуумом затруднено из-за наложения на эту спектральную область ярких линий 6P–7D, 6P–8D и 6P–9S.

Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов. Это подтверждает справедливость механизма формирования сплошного спектра, использованного в расчетах [9]. Этот механизм предполагает, что в результате штарковского уширения и слияния высших членов спектральных серий, сходящихся к порогам 6P и 5D фоторекомбинационных континуумов, а также



**Рис. 3.** Видимый спектр излучения ИПР в цезии в момент времени  $t/t_p = 0.95$ : сплошная линия — эксперимент, пунктир — расчет. Параметры разряда:  $I_{\max} = 80$  А,  $t_p = 45$   $\mu$ s,  $\nu = 1300$  Hz,  $N = 110$  W/cm,  $P(t) = 760$  Torr,  $T_e(0, t) = 5750$  K.

дебаевского снижения потенциала ионизации атома цезия в плазме имеет место существенный сдвиг порогов 6P и 5D континуумов в длинноволновую область спектра. Как видно из рис. 3, при увеличении вкладываемой в разряд мощности до 110 W/cm смещенные континуумы сливаются и перекрывают всю видимую область спектра. В результате этого эффекта ИПР в цезии становится источником света со спектром, близким к солнечному. Световая отдача достигает значения 85 lm/W при  $R_a = 98$ .

Таким образом, в настоящей работе экспериментально исследованы особенности формирования сплошного спектра излучения в условиях импульсно-периодического разряда высокого давления в цезии. Показано, что с повышением давления и температуры плазмы происходит замещение линейчатого излучения, соответствующего переходам из высоковозбужденных состояний дискретного спектра, сплошным

излучением в рекомбинационном континууме. Результаты измерений хорошо соответствуют расчетам. Сравнение теории с экспериментом показывает, что спектр образован яркими 6P и 5D континуумами, пороги которых существенно сдвинуты в длинноволновую область.

## Список литературы

- [1] *Гаврилов В.Е.* // Оптика и спектроскопия. 1993. Т. 74. № 6. С. 1028–1036.
- [2] *Гаврилова Т.В., Аверьянов В.П., Витель И., Дьячков Л.Г., Куриленков Ю.К.* // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 82. В. 5. С. 757–764.
- [3] *Пухов А.М.* // Оптика и спектроскопия. 1997. Т. 83. В. 6. С. 903–905.
- [4] *Грязнов В.К., Денисов О.Б., Орлов Н.Ю., Фортков В.Е.* и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 12. С. 1081–1084.
- [5] *Бакиит Ф.Г., Лапшин В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 24. С. 40–45.
- [6] *Бакиит Ф.Г., Лапшин В.Ф.* // Светотехника. 2000. № 5. С. 18–20.
- [7] *Бакиит Ф.Г., Лапшин В.Ф.* // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 63–72.
- [8] *Бакиит Ф.Г., Лапшин В.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 24. С. 86–94.
- [9] *Baksht F.G., Lapshin V.F.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 205201.
- [10] *Бакиит Ф.Г., Гавриш С.В., Каплан В.Б., Коротков С.В., Лапшин В.Ф., Марциновский А.М., Столяров И.И., Христюк Д.В.* // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 55–60.