

# Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 537.52

## Расчет оптических свойств цезиевой плазмы в условиях импульсно-периодического разряда

Ф. Г. Бакшт, В. Ф. Лапшин

*Представлены расчеты спектра излучения, индекса цветопередачи  $R_a$ , цветовой температуры  $T_c$  и координат цветности  $X_c, Y_c$  излучения цезиевой плазмы в условиях, характерных для импульсно-периодического разряда в цезии. Рассмотрены диапазоны давлений плазмы 30—1500 Торр и температуры на оси 3200—6000 К. Показано, что величина индекса цветопередачи  $R_a > 90$  во всем исследованном диапазоне параметров плазмы. Цветовая температура излучения плазмы изменяется в широком диапазоне 2300—5500 К. Координаты цветности излучения цезиевой плазмы близки к значениям  $X_c, Y_c$  черного тела.*

PACS: 52.80.Mg

*Ключевые слова:* низкотемпературная плазма, спектр излучения, газовый разряд, цезий, цветопередача, координаты цветности.

### Введение

Оптические свойства цезиевой плазмы представляют интерес в связи с тем, что, с одной стороны, благодаря низкому потенциалу ионизации атома цезия (3,89 эВ) такую плазму можно получать с наименьшими затратами энергии, с другой — в связи с тем, что излучаемые этой плазмой наиболее интенсивные рекомбинационные 6P- и 5D-континуумы лежат в видимой области спектра и это открывает возможность использования цезиевой плазмы в источниках света.

Один из способов создания излучающей плазмы цезия состоит в применении с этой целью импульсно-периодического разряда (ИПР) среднего и высокого давлений ( $p = 30—1500$  Торр) [1]. Такой разряд реализуется в керамической трубке из  $Al_2O_3$  с внутренним радиусом  $R \sim 2—3$  мм. При этом в трубке с помощью дежурного разряда с током  $\sim 0,5$  А поддерживается слабоионизованное состояние плазмы, через которую периодически,

с частотой  $\sim 1000$  Гц, пропускается импульс тока заданной формы амплитудой  $\sim 10—100$  А. Продолжительность импульсов составляет  $\sim 0,1$  от периода тока.

Теоретическому и экспериментальному исследованию таких разрядов посвящены работы [2—9]. В частности, в [3] показано, что аксиально-симметричный столб цезиевой плазмы ИПР находится в состоянии локального термодинамического равновесия (ЛТР), когда выполнены соотношения Саха—Больцмана. Численное моделирование ИПР [5, 6] показало, что после прохождения импульса тока в ИПР формируется столб излучающей плазмы с плавным профилем температуры  $T(r)$  в большей части объема разряда. В узкой пристеночной области (в области пристеночных пограничных слоев) имеет место резкое снижение температуры. Температуры электронов и тяжелой компоненты плазмы всюду, кроме этой пристеночной области, одинаковы. Вблизи стенок температура тяжелой компоненты плазмы заметно ниже температуры электронов [6]. В этой же относительно холодной области плазмы, где  $T \leq 2000$  К, имеет место и нарушение ЛТР в плазме.

Здесь нужно отметить, что холодная плазма вблизи стенок трубки эффективно поглощает излучение только в окрестности резонансных линий цезия (852,1 и 894,6 нм). Видимое излучение проходит эту область плазмы практически без поглощения. Поэтому ниже, при расчете спектра види-

---

**Бакшт Федор Григорьевич**, главный научный сотрудник.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН.  
Россия, 194021, С.-Петербург, Политехническая ул., 26.  
Тел. (812) 515-19-69. E-mail: baksht@mail.ioffe.ru

**Лапшин Владимир Федорович**, доцент.

Петербургский государственный университет путей сообщения.  
Россия, 190031, С.-Петербург, Московский пр., 9.

Статья поступила в редакцию 20 сентября 2011 г.

---

© Бакшт Ф. Г., Лапшин В. Ф., 2012

мого излучения, отклонения от ЛТР (в пограничных слоях) не рассматривались, и считалось, что температуры электронов и тяжелой компоненты одинаковы во всем объеме разрядной трубки.

Как показано в [6], в зависимости от формы и амплитуды импульса тока могут быть получены значения температуры плазмы на оси в широком диапазоне  $T_0 = 3000\text{—}6500$  К. Значения температуры электронов  $T_1$  вблизи стенок трубки (в пограничных слоях) заключены при этом в интервале  $T_1 = 1600\text{—}2300$  К. В предыдущих работах [5, 6] были вычислены световые характеристики излучения цезиевой плазмы для некоторых режимов горения ИПР. Важнейшими из них являются [10]: индекс цветопередачи  $R_a$ , цветовая температура  $T_c$  и координаты цветности  $X_c, Y_c$ . Полученные результаты показали, что видимое излучение цезиевого ИПР обладает высоким качеством цветопередачи.

В данной работе выполнены расчеты спектра излучения и параметров  $R_a, T_c$  и  $X_c, Y_c$  излучения цезиевой плазмы в условиях, характерных для ИПР в широком диапазоне давлений и температур.

### Расчет спектрального потока излучения

В условиях ЛТР плазмы уравнение переноса излучения вдоль заданного направления  $\vec{\Omega}$  имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial s} I_\lambda = k'_\lambda (I_{\lambda P} - I_\lambda). \quad (1)$$

Здесь  $I_\lambda = I_\lambda(s, \vec{\Omega})$  — спектральная интенсивность излучения с длиной волны  $\lambda$ ;

$s$  — координата вдоль светового луча;

$\vec{\Omega}$  — единичный вектор в направлении распространения излучения;

$I_{\lambda P} = 2hc^2\lambda^{-5}[\exp(hc/\lambda k_B T) - 1]^{-1}$  — равновесная (планковская) спектральная интенсивность;

$T = T(r)$  — температура плазмы разряда;

$r$  — радиальная координата;

$k'_\lambda(r)$  — коэффициент поглощения плазмы с учетом свободно-свободных, связанно-свободных и связанно-связанных переходов электронов и с учетом поправки на вынужденное излучение.

Подробное описание расчета  $k'_\lambda$  в плазме ИПР в цезии приведено в [3]. Решение (1) может быть записано в виде

$$I_\lambda(s, \vec{\Omega}) = \int_{s_0}^s k'_\lambda I_{\lambda P} \exp\left(-\int_{s'}^s k'_\lambda ds''\right) ds'. \quad (2)$$

Здесь  $s_0$  — координата, соответствующая точке, лежащей на поверхности столба плазмы.

Используя (2), радиальную спектральную плотность потока энергии излучения  $F_\lambda$ , выходящего с поверхности столба плазмы, можно записать в виде

$$F_\lambda(R) = \int_{(2\pi)} (\vec{\Omega} \cdot \vec{e}_r) I_\lambda(R, \psi, \theta) d\Omega = \\ = 4 \int_0^{\pi/2} d\theta \cos\theta \int_0^{\pi/2} d\psi \cos\psi \int_0^{l_W} k'_\lambda I_{\lambda P} \exp\left(-\int_0^l k'_\lambda \frac{dl'}{\cos\psi}\right) dl. \quad (3)$$

Здесь  $\vec{e}_r$  — вектор единичной длины, задающий направление нормали к поверхности,  $R$  — радиус плазменного столба, углы  $\psi$  и  $\theta$  задают направление луча  $\vec{\Omega}$ ,  $l_W = l_W(\theta) = 2R\cos\theta$ .

Для проведения расчетов выражение (3) удобно преобразовать к виду

$$F_\lambda(R) = F_{\lambda P}(T_0) \cdot \varepsilon_\lambda,$$

где  $F_{\lambda P}(T_0) = \pi I_{\lambda P}(T_0)$  — равновесная планковская плотность потока излучения с поверхности черного тела с температурой  $T_0$  и

$$\varepsilon_\lambda = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} d\theta \cos\theta \int_0^{\tau_p} d\tau [G_1(\tau) + G_1(2\tau_p - \tau)] f(\tau).$$

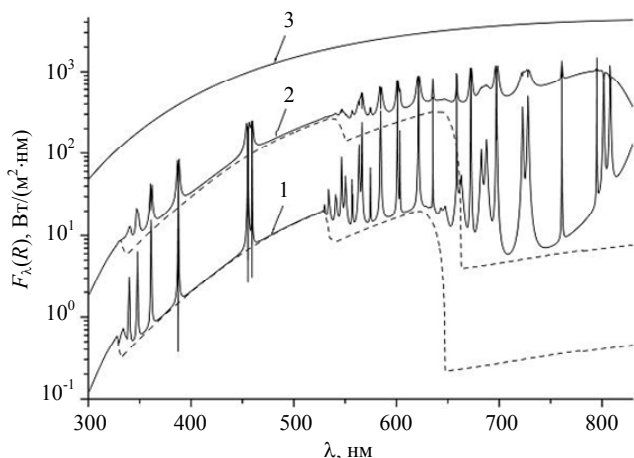
Здесь  $f(\tau) = I_{\lambda P}(\tau)/I_{\lambda P}(T_0)$ ,  $\tau_p = \int_0^{l_p} k'_\lambda dl$ ,  $l_p = l_W/2$

$$\text{и } G_1(\tau) = \int_0^{\pi/2} d\psi \cos\psi \exp\left(-\frac{\tau}{\cos\psi}\right).$$

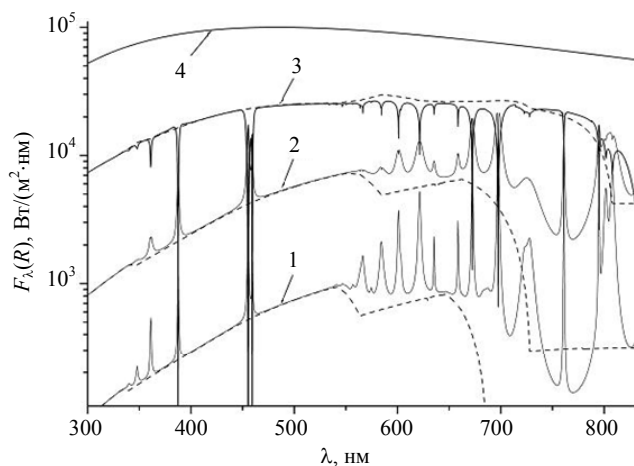
### Результаты расчетов и обсуждение

Большая часть энергии излучается в ИПР плазмой, возникающей после прохождения импульса тока через газоразрядную трубку, заполненную цезием [8]. Для моделирования оптических свойств столба такой плазмы использовались профили температуры  $T(r) = T_0 - (r/R)^a (T_0 - T_1) \times [1 - b(1-r/R)^c]$ , характерные для исследуемых режимов ИПР [6]. Все расчеты выполнены для радиуса столба плазмы  $R = 2,5$  мм, температуры плазмы вблизи стенок  $T_1 = 2000$  К и значений параметров  $a = 1,65$ ,  $b = 0,52$  и  $c = 0,46$ . Результаты расчетов спектра излучения в широком диапазоне давлений плазмы приведены на рис. 1 и 2. Пунктиром на рисунках показаны результаты расчетов

при учете только рекомбинационного механизма излучения.



**Рис. 1.** Спектральный поток энергии излучения  $F_{\lambda}(R)$  для температуры плазмы на оси  $T_0 = 3200$  К при различных значениях давления плазмы  $p$ : 1 — 67 Торр; 2 — 967 Торр; 3 —  $F_{\lambda P}(T_0)$



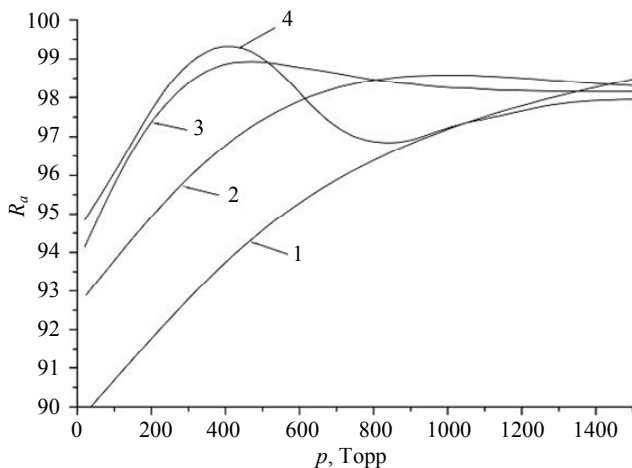
**Рис. 2.** Спектральный поток энергии излучения  $F_{\lambda}(R)$  для температуры плазмы на оси  $T_0 = 6000$  К при различных значениях давления плазмы  $p$ : 1 — 51 Торр; 2 — 188 Торр; 3 — 1094 Торр; 4 —  $F_{\lambda P}(T_0)$

Рис. 1 соответствует значению температуры плазмы на оси  $T_0 = 3200$  К. Степень ионизации плазмы  $\alpha = n_i/(n_a+n_i)$  изменяется здесь на оси столба от значения  $\alpha = 0,043$  при  $p = 67$  Торр до  $\alpha = 0,012$  при  $p = 967$  Торр. Хорошо видно, что даже в случае относительно низких значений давления и температуры, когда степень ионизации плазмы мала, большая часть энергии, излучаемой

плазмой в видимом диапазоне спектра, приходится на излучение в рекомбинационных 6P- и 5D-континуумах (длины волн, соответствующие их порогам, равны  $\lambda_{th}(6P) = 504$  нм,  $\lambda_{th}(5D) = 594$  нм). Именно это объясняет высокое качество света ( $R_a > 90$ ), излучаемого цезиевой плазмой в данных условиях.

С увеличением температуры плазмы до значений  $T_0 = 6000$  К (см. рис. 2) степень ионизации плазмы  $\alpha$  на оси столба возрастает и становится равной 0,92, 0,81 и 0,55 для значений давления 51, 188 и 1094 Торр, соответственно. В этих условиях в диапазоне длин волн 530—760 нм с ростом давления происходит переход от линейчатого спектра излучения к непрерывному. Сдвиг порога рекомбинационного 6P-континуума в длинноволновую область спектра увеличивается от значений 25 нм на рис. 1 до значений 100 нм и более на рис. 2 [6, 7]. Аналогичное явление имеет место и вблизи порога 5D-континуума. Однако 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. В результате указанного явления при давлениях  $p > 400$  Торр и температуре  $T_0 > 4500$  К происходит слияние 6P- и 5D-континуумов в один сплошной спектр. В этих условиях практически вся видимая область спектра образована яркими рекомбинационными 6P- и 5D-континуумами. Как следствие, излучаемый цезиевой плазмой свет имеет очень высокое качество: индекс цветопередачи достигает значений  $R_a = 98—99$ . Отметим, что ИПР в цезии с такими параметрами плазмы имеет достаточно высокую светоотдачу [6, 7].

Расчеты световых параметров  $R_a$ ,  $T_c$  и  $X_c, Y_c$  выполнены в соответствии с методикой [11]. Результаты расчетов индекса цветопередачи  $R_a$  излучения цезиевой плазмы в диапазоне давлений 30—1500 Торр приведены на рис. 3. Во всей исследованной области параметров плазмы значения  $R_a > 90$ . Причем, при  $p > 200$  Торр и  $T_0 > 4500$  К значения индекса цветопередачи  $R_a > 96$ . Максимальное значение  $R_a \approx 99$  достигается в диапазоне давлений плазмы  $p = 300—600$  Торр и температур на оси  $T_0 > 4500$  К. Отметим, что при достаточно высоких давлениях ( $p > 1000$  Торр) величина  $R_a$  слабо зависит от температуры плазмы, приближаясь к значению  $R_a \approx 98$ .

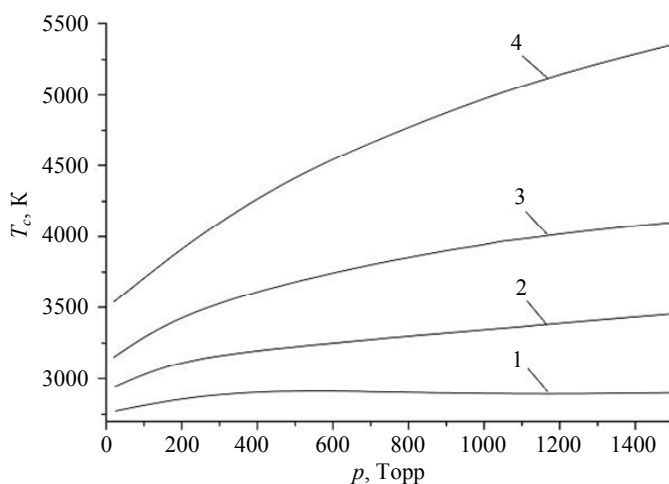


**Рис. 3.** Зависимость индекса цветопередачи  $R_a$  столба цезиевой плазмы от давления плазмы  $p$  при различных значениях температуры электронов на оси  $T_0$ : 1 — 3200 К; 2 — 3800 К; 3 — 4500 К; 4 — 6000 К

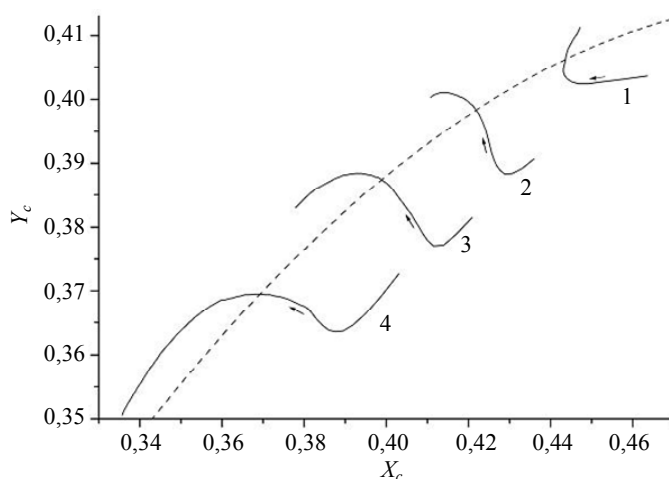
Расчеты цветовой температуры излучения  $T_c$  приведены на рис. 4. Хорошо видно, что при  $T_0 < 4500$  К цветочная температура слабо зависит от

давления плазмы  $p$ . С увеличением температуры плазмы зависимость  $T_c$  от давления становится более выраженной. Значения цветочной температуры излучения цезиевой плазмы возрастают от  $T_c \approx 2800$  К при  $T_0 = 3200$  К до  $T_c \approx 5500$  К при  $T_0 = 6000$  К и достаточно высоких давлениях.

На рис. 5 приведены результаты расчетов координат цветности  $X_c, Y_c$  излучения цезиевой плазмы в зависимости от ее давления и температуры. Стрелки около линий указывают направление перемещения точки  $X_c, Y_c$  на цветовом графике при изменении давления плазмы от 30 до 1500 Торр. Пунктирная линия соответствует цветовым координатам черного тела при разных температурах. Хорошо видно, что значения координат цветности  $X_c, Y_c$  излучения плазмы близки к значениям  $X_c, Y_c$  черного тела во всем исследованном диапазоне температур и давлений. Отметим также, что с уменьшением температуры плазмы ослабевает зависимость координат цветности от давления плазмы.



**Рис. 4.** Зависимость цветочной температуры излучения  $T_c$  от давления плазмы  $p$  при различных значениях температуры электронов на оси  $T_0$ : 1 — 3200 К; 2 — 3800 К; 3 — 4500 К; 4 — 6000 К



**Рис. 5.** Зависимость цветочных координат  $X_c, Y_c$  от давления плазмы  $p$  при различных значениях температуры электронов на оси  $T_0$ : 1 — 3200 К; 2 — 3800 К; 3 — 4500 К; 4 — 6000 К

### Заключение

В данной работе рассчитаны спектр излучения и световые характеристики цезиевой плазмы в условиях, характерных для импульсно-периодического разряда среднего и высокого давлений. Показано, что во всех исследованных диапазонах давлений и температур значения индекса цветопередачи  $R_a > 90$ . Причем в диапазоне давлений плазмы 300—600 Торр достигаются значения  $R_a \approx 99$ . Координаты цветности излучения  $X_c$ ,  $Y_c$  цезиевой плазмы близки к координатам  $X_c$ ,  $Y_c$  черного тела.

Высокое качество цветопередачи цезиевой плазмы объясняется тем, что значительная часть видимого спектра излучения формируется за счет рекомбинационных 6P- и 5D-континуумов. Это относится даже к случаю относительно низких температур, когда степень ионизации плазмы мала. Полученные результаты указывают на возможность использования цезиевой плазмы импульсно-периодического разряда в качестве источника света с высоким качеством цветопередачи.

### Литература

1. Бакит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. В. 24. С. 40.
2. Gu H., Muzeroll M. E., Chamberlain J. C., Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2001. No. 10. P. 1.
3. Бакит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // ЖТФ. 2002. Т. 72. В. 7. С. 100.
4. Pichler G., Živčec V., Beuc R., Mrzljak Ž., Van T., Skenderović H., Gunther K., Liu J. // Phys. Scr. 2003. V. T105. P. 98.
5. Бакит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Прикладная физика. 2006. № 6. С. 63.
6. Бакит Ф. Г., Лапшин В. Ф. // Там же. 2008. № 6. С. 43.
7. Baksht F. G., Lapshin V. F. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. V. 41. P. 205201.
8. Бакит Ф. Г., Гавриш С. В., Каплан В. Б., Лапшин В. Ф., Марциновский А. М. // Прикладная физика. 2009. № 6. С. 83.
9. Бакит Ф. Г., Каплан В. Б., Лапшин В. Ф., Марциновский А. М. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. В. 23. С. 17.
10. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. — М.: Энергоатомиздат, 1995.
11. ГОСТ 23198-94. Лампы электрические. Методы измерения спектральных и цветовых характеристик. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 1996.

## Calculation of cesium plasma optical properties in conditions of pulse-periodical discharge

*F. G. Baksht*

Ioffe Physical-Technical Institute of the RAS.  
26 Politekhnikeskaya str., St.-Petersburg, 194021, Russia  
E-mail: baksht@mail.ioffe.ru

*V. F. Lapshin*

St.-Petersburg State Transport University.  
9 Moskovsky passage, St.-Petersburg, 190031, Russia

*The calculations of a spectrum of radiation, color rendering index  $R_a$ , correlated color temperature  $T_c$  and color coordinates  $X_c$ ,  $Y_c$  radiation of cesium plasma in conditions of pulse-periodic discharge are performed. The range of plasma pressure 30—1500 Torr and the range of temperatures on an axis 3200—6000 K are covered. Color rendering index exceeds the value 90 in all investigated range of plasma parameters. The correlated color temperature of plasma radiation is in a wide range 2300—5500 K. Color coordinates of cesium plasma radiation are close to values  $X_c$ ,  $Y_c$  of a black body.*

PACS: 52.80.Mg

*Keywords:* low temperature plasma, radiative spectrum, cesium, color rendering index, color coordinate.

Bibliography — 11 references.

Received September 20, 2011