

Характеристики излучения импульсно-периодического разряда в парах щелочных металлов

В. В. Логинов

Работа посвящена исследованию спектров излучения импульсно-периодического разряда в парах калия, рубидия и цезия. Изучено влияние условий электрического питания на спектральные и световые характеристики ламп. Выявлено, что наибольшей эффективностью в видимом диапазоне обладает импульсно-периодический разряд в парах цезия.

Ключевые слова: импульсно-периодический разряд, калий, рубидий, цезий, спектр, световая отдача.

Ссылка: Логинов В. В. // Прикладная физика. 2019. № 4. С. 24.

Reference: V. V. Loginov, Prikl. Fiz., No. 4, 24 (2019).

В настоящее время в результате обширных экспериментальных исследований сформировался важный класс импульсных источников ИК-излучения на основе разрядов в парах цезия для оптико-электронных систем [1]. Вместе с тем возможности разрядов в парах щелочных металлов отнюдь не исчерпаны указанным применением. Существует ряд задач, в которых импульсный разряд в парах цезия, калия и рубидия может быть достаточно эффективным и реализован доступными техническими средствами, например, при ламповой накачке лазеров [2] или в промышленном освещении [3].

Изучению спектрально-энергетических характеристик импульсного разряда в парах щелочных металлов в видимом диапазоне оптического спектра посвящена эта работа.

Теоретический анализ

Излучение газоразрядных ламп в видимом диапазоне спектра наиболее широко используется для уличного освещения. Среди традиционно используемых для освещения

ксеноновых, ртутных и металлогалогенных разрядных ламп наибольшей светоотдачей (СО) обладают натрий-ртутные лампы высокого давления (НЛВД). Светоотдача современных промышленных НЛВД достигает 120 лм/Вт [4], что обусловлено почти идеальным совпадением спектра излучения натриевого разряда с кривой видности глаза. Однако для практического применения в условиях офисного и комнатного освещения эти газоразрядные лампы не пригодны в силу двух существенных недостатков:

- малый индекс цветопередачи $R_a \approx 23$ [4], так как основная доля излучения сосредоточена в самообращенном резонансном дуплете D -линий (589,0 и 589,6 нм [4]);
- в состав наполнения входит ртуть, что снижает экологичность ламп.

Автором работы [5] сделана попытка изменить плазмодинамику натриевого разряда, исключив из состава наполнения ртуть и введя в плазмообразующую среду натрия пары рубидия или цезия. Несмотря на четырехкратное снижение СО, автор [5] считает перспективным использование натрий-цезий-ксенонового наполнения для ламп, работающих в импульсно-периодическом режиме электрического питания.

Однако результаты исследований [3] показывают, что в цезиевом импульсно-периодическом разряде удастся создать плазму с температурой на оси 5500–6500 К и концентраци-

Логинов Владимир Владимирович, нач. цеха.
 Филиал АО «Стелла-К».
 Россия, 124489, Москва, Зеленоград, Панфиловский
 просп., 10.
 E-mail: loginov_v@bk.ru

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2019 г.

ей электронов $n_e \sim 10^{17} - 10^{18} \text{ см}^{-3}$. 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 к существенному сдвигу порогов этих континуумов в длинно-

волновую сторону. Это приведет к возрастанию R_a .

Кроме этого, анализ диаграмм энергетического состояния атомов калия, рубидия и цезия [6] показывает, что индекс цветопередачи R_a может быть изменен за счет возбуждения высоких уровней (см. табл. 1).

Таблица 1

Длины волн излучения линий калия, рубидия и цезия

Тип перехода	Длины волн излучения линий, нм		
	K	Rb	Cs
$n^2S \rightarrow n^2S$	578,3; 691,1; 693,9; 1243,1; 1252,3	616,0; 607,1; 1325,7	635,5; 650,6; 760,9; 764,4; 1469,5; 1358,9
$n^2P \rightarrow n^2S$	344,6; 404,7; 404,4; 769,9; 764,5	421,6; 550,2; 558,7; 780,0; 794,8	387,6; 388,8; 455,5; 459,3; 852,1; 894,3
$n^2D \rightarrow n^2P$	580,2; 593,6; 1169,0; 1177,2	564,8; 572,4; 761,9; 775,9; 1475,0; 1529,0;	672,3; 697,2; 876,1; 917,2; 3010,0; 3612,7

Указанные процессы приведут к сдвигу спектра излучения в УФ-область. В то же время основная энергия по-прежнему будет сосредоточена в самообращенных резонансных линиях [4], которые коротковолновым крылом будут сдвигаться в видимую область при повышении давления паров.

Таким образом, вопрос об исследовании импульсно-периодического разряда в парах чистых металлов является актуальным.

Методика исследований

Для проведения спектральных исследований были изготовлены образцы разрядных ламп с сапфировой оболочкой, имеющие следующие наполнения: 4 мг калия и 170 мм рт. ст. ксенона, 4 мг рубидия и 170 мм рт. ст. ксенона, 6 мг цезия и 170 мм рт. ст. ксенона. Размеры разрядного канала в исследуемых лампах были идентичны: диаметр 7 мм, межэлектродное расстояние 90 мм.

Импульсное питание ламп осуществлялось от источника прямоугольных импульсов напряжения с регулируемой амплитудой $U_{л} = 100 - 200 \text{ В}$ и переменной длительностью $t_{ген.}$, которая задавалась специальным генератором (см. рис. 1). Подробно данный источник электрического питания описан в работе [7]. Значения указанных параметров при каждом измерении выбирались такими, чтобы средняя мощность на лампе составляла 700 Вт. Параллельно лампе подключался блок «дежурной

дуги», обеспечивающий проводящее состояние плазмы в промежутках между каждым импульсом напряжения и сериями импульсов (рис. 1). В нашем случае использован импульсный стабилизатор тока $I_{д.д.} = 1,0 \text{ А}$ в диапазоне выходных напряжений $U_{д.д.} = 50 \div 360 \text{ В}$. Импульсы тока и напряжения регистрировались цифровым осциллографом С9-8 при помощи безиндуктивного токового шунта и делителя 1000:1 соответственно.

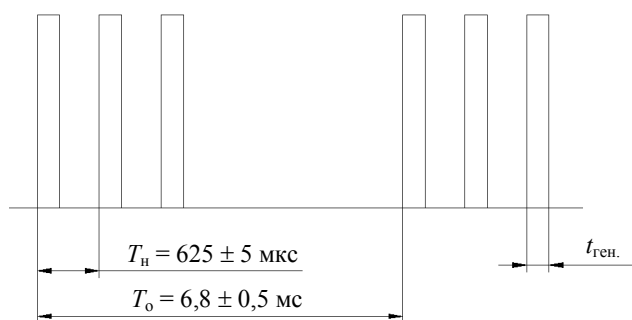


Рис. 1. Импульсно-периодическая структура импульсов напряжения. T_n – период несущей частоты импульсов; T_o – период огибающей частоты импульсов.

Спектральные измерения всех рассматриваемых в данной работе газоразрядных ламп проводились при помощи монохроматора МДР-206, сигнал с которого регистрировался фотоприемным устройством ФПУ-ФД с кремниевым фотодиодом. При исследованиях в диапазоне длин волн $\lambda = 200 \div 1100 \text{ нм}$ в монохроматоре была использована дифракционная решетка 1200 штр./мм.

Изучение энергетических характеристик излучения ламп проводилось при помощи фотометра Ф-005 в режиме измерения освещенности E . Сила света перпендикулярно оси разряда рассчитывалась по формуле $I = E \times L^2$, где L – расстояние от источника света до фотоприемника. С целью облегчения расчета все используемые в данной работе фотоприемники располагались на удалении от оси разряда 1 м, т. е. на расстоянии более 10 значений разрядного промежутка лампы. В этом случае при измерениях исследуемые источники света можно считать **точечными**.

Основной характеристикой распределения излучения в пространстве является эквивалентный телесный угол Ω , в котором распространяется весь поток источника, если бы сила излучения была одинакова по всем направлениям. Исходя из полученного в работе [7] значения эквивалентного телесного угла $\Omega = 11,01$ стерadian, производился расчет светового потока испытываемых ламп по формуле $\Phi = 11,01 \times I$, а светоотдача $Q = \Phi/P_{\text{л}}$, где $P_{\text{л}}$ – электрическая мощность.

Экспериментальные результаты

Все экспериментальные образцы разрядных ламп исследовались при мощности 700 Вт, которая устанавливалась путем варьирования амплитуды и длительности импульса напряжения $t_{\text{ген.}}$ при средней частоте следования 425 Гц. Например, если длительность уменьшалась, то напряжение на лампе поднималось до значения, при котором $P_{\text{л}}$ равнялось 700 Вт. Цель такого эксперимента заключалась в по-

пытке ввести в разряд за короткое время большую энергию, чтобы возбудить более высокие энергетические уровни щелочного металла и сдвинуть спектр в УФ-область. Учитывая тот факт, что мощные резонансные линии находятся в ИК-области (выделены жирным шрифтом в табл. 1) и в них сосредоточена значительная энергия излучения, то для исправления цветности свечения лампы такой эксперимент был оправдан.

На рис. 2 и 3 представлены полученные результаты спектральных исследований импульсно-периодического разряда в парах рублидия, калия и цезия.

Сопоставление спектрального распределения излучения импульсной рубидиевой лампы (рис. 2, а, б) при амплитуде импульса напряжения $U_{\text{л}} = 126$ В, длительности импульса $t_{\text{ген.}} = 280$ мкс (рис. 2, а) и $U_{\text{л}} = 200$ В, $t_{\text{ген.}} = 128$ мкс (рис. 2, б) не выявило существенных изменений в интенсивности линий. Во втором случае наблюдается увеличение непрерывного спектра излучения. Предположительно, это связано с повышением энергии импульса, приводящим к росту подвижности электронов и увеличению вероятности их рассеяния на атомах. Аналогичные результаты получены для импульсного разряда в парах калия ($U_{\text{л}} = 200$ В, $t_{\text{ген.}} = 104$ мкс, рис. 3, а) и цезия ($U_{\text{л}} = 200$ В, $t_{\text{ген.}} = 156$ мкс, рис. 3, б). Можно отметить, что еще большего эффекта можно достичь, увеличив амплитуду импульса напряжения в несколько раз. В наших экспериментах используемый источник электрического питания лампы не позволял обеспечить такие параметры.

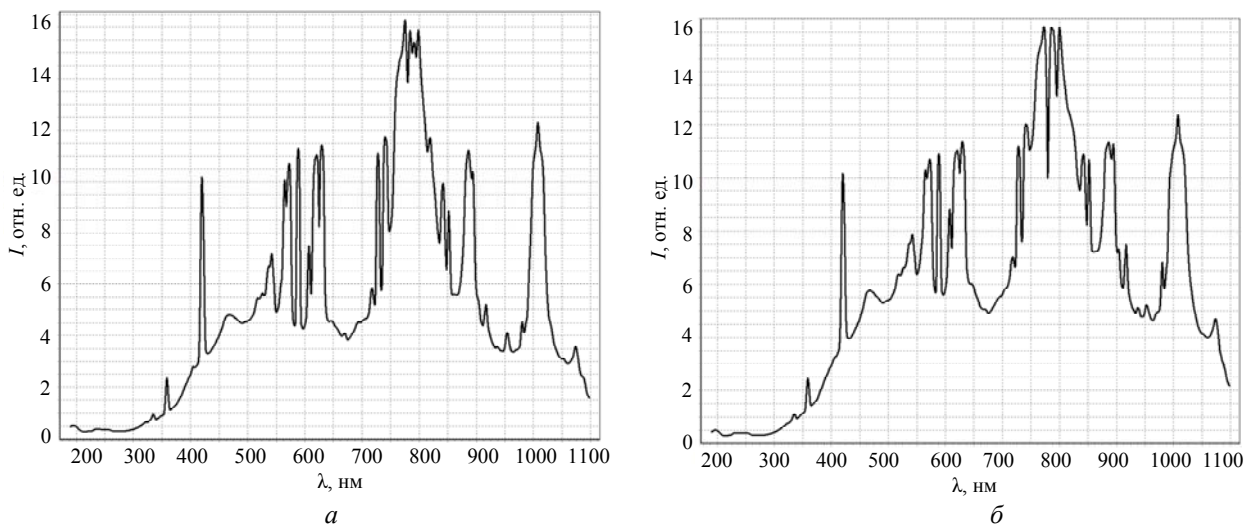


Рис. 2. Спектральное распределение излучения рубидиевой лампы при характеристиках импульса напряжения $U_{\text{л}} = 126$ В, $t_{\text{ген.}} = 280$ мкс (а) и $U_{\text{л}} = 200$ В, $t_{\text{ген.}} = 128$ мкс (б).

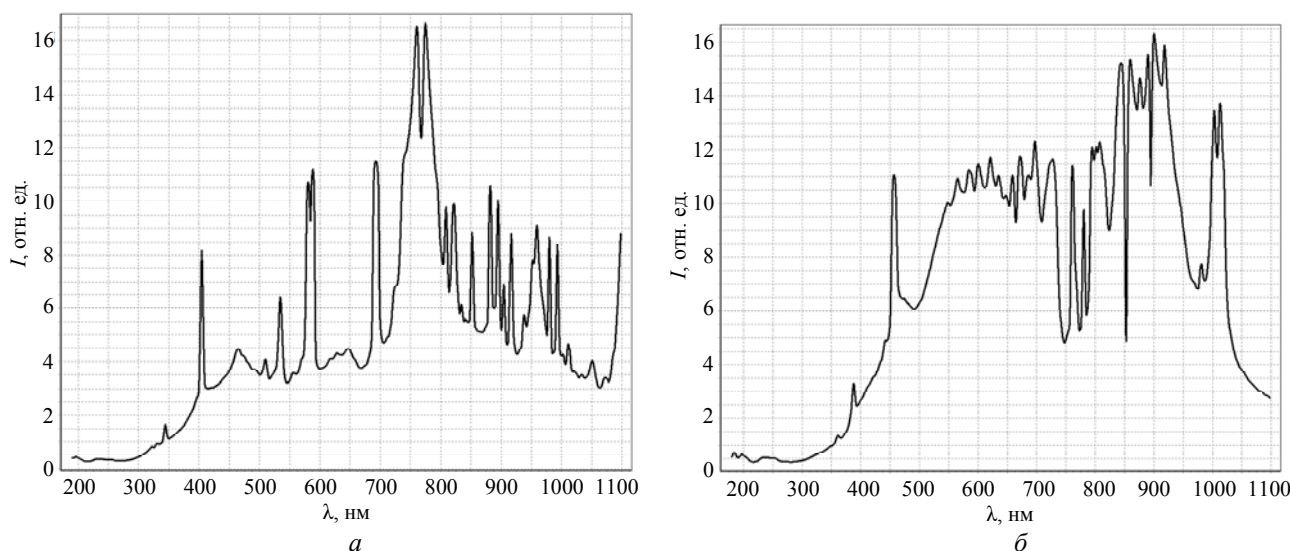


Рис. 3. Спектральное распределение излучения:

а – калиевой лампы при характеристиках импульса напряжения $U_{л} = 200 \text{ В}$, $t_{ген.} = 104 \text{ мкс}$;
б – цезиевой лампы при характеристиках импульса напряжения $U_{л} = 200 \text{ В}$, $t_{ген.} = 156 \text{ мкс}$.

Наилучшее совпадение с кривой ночной чувствительности глаза получено в случае спектрального распределения излучения импульсной цезиевой лампы при следующих импульсно-периодических режимах работы: $U_{л} = 200 \text{ В}$, $t_{ген.} = 156 \text{ мкс}$. Следовательно, в этом случае можно ожидать получение максимальной СО в сравнении с калиевой и рубидиевой лампой.

Анализ спектральных характеристик излучения исследуемых газоразрядных ламп показал, что в режиме коротких импульсов напряжения в УФ-области наблюдаются интенсивные линии у рубидия 421,6 нм, калия – 404,7 нм; цезия – 388,8 нм, что соответствует переходу $n^2P \rightarrow n^2S$. Этот результат подтвер-

ждает сделанное выше предположение о возможности возбуждения высоких энергетических уровней и повышении значений R_a .

Методика расчета индекса цветопередачи R_a достаточно сложна [8]. Ее можно заменить сравнением мощности излучения экспериментальных ламп в нескольких специально выделенных диапазонах, как предложено автором работы [5]. В наших экспериментах задача изучения R_a не стояла.

По результатам измерения освещенности посредством фотометра Ф-005 по методике, изложенной выше, были рассчитаны световой поток и световая отдача, которые имели значения, представленные в табл. 2.

Таблица 2

Световой поток и световая отдача экспериментальных ламп

Параметр	K	Rb	Cs
Световой поток, лм	24200	34100	42000
СО, лм/Вт	34,6	48,7	66,1

Как видно из табл. 2, максимальная световая отдача достигнута на экспериментальной лампе с импульсно-периодическим разрядом в парах цезия. По расчетной зависимости $p = f(\Delta\lambda)$ [7] давления p от расстояния между максимумами $\Delta\lambda$ самообращенной резонансной линии 852,1 нм ($\Delta\lambda = 14,5 \text{ нм}$) на

рис. 3, б можно определить давление паров цезия в разряде. В нашем случае оно составляет $p = 90 \div 100 \text{ мм рт. ст.}$ Увеличение p до 400 мм рт. ст. может повысить световую отдачу в 1,2 раза. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с полученными расчетно-экспериментальными данными работы [3].

Заключение

В данной работе исследовано спектральное распределение излучения импульсно-периодического разряда в парах калия, рубидия и цезия. Проанализировано влияние условий электрического питания ламп на спектральные и цветовые характеристики ламп. В результате исследований выявлено, что наибольшей эффективностью в видимом диапазоне спектра обладает излучение импульсно-периодического разряда в парах цезия при давлении паров 90÷100 мм рт. ст. и потребляемой электрической мощности 700 Вт. Световой поток и светоотдача в этих режимах эксплуатации составила 42000 лм и 66,1 лм/Вт соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.
2. Гавриш С. В., Гайдуков Е. Н., Сысоев П. В. / Тез. докл. II Международ. светотехн. конф. – Суздаль, 1995. С. 185.
3. Бакшт Ф. Г., Гавриш С. В., Каплан В. Б. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 24. С. 55.
4. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2011. № 3. С. 67.
6. Ключарев А. Н., Янсон М. Л. Элементарные процессы в плазме щелочных металлов. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
7. Гавриш С. В. Разработка и исследование импульсного источника ИК-излучения с разрядом в парах цезия: Автореф. дис. канд. тех. наук. – М., 2005.
8. Справочная книга по светотехнике / Под ред. Ю. Б. Айзенберга. 2-е изд. – М.: Энергоатомиздат, 1995.

PACS: 07.60-j

Researching of pulse-periodic discharge in alkali metals vapors

V. V. Loginov

Branch of Stella-K, JSC
10 Panfilovskii Ave., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia
E-mail: loginov_v@bk.ru

Received April 29, 2019

The present work is devoted researching of the pulse-periodic discharge spectra of potassium, rubidium and cesium vapors. Influence of lamps electric supply on spectral and light characteristics is studied. It is obtained that the most efficient in visible range is a pulse-periodic discharge in cesium vapors.

Keywords: pulse-periodic discharge, potassium, rubidium, cesium, spectrum, light efficacy.

REFERENCES

1. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, Usp. Prikl. Fiz. **6** (4), 333 (2018).
2. S. V. Gavrish, E. N. Gaidukov, and P. V. Sysoev, in *Proc. II International lighting engineering conf.* (Suzdal, 1995), p. 185.
3. F. G. Baksht, S. V. Gavrish, V. B. Kaplan, et al., Lett. Tech. Phys. **34** (24), 55 (2008).
4. G. N. Rokhlin, *Discharge sources of light* (Moscow, Energoatomizdat Publ. 1991) [in Russian].
5. S. V. Gavrish, Prikl. Fiz., No. 3, 67 (2011).
6. A. N. Klucharev and M. L. Yanson, *Elementary processes in alkali metals plasma* (Moscow, Energoatomizdat Publ. 1988) [in Russian].
7. S. V. Gavrish, *Development and research of a pulsed source of IR radiation with a discharge in cesium vapor: Author's abstract. Dis. Cand. Tech. Sciences.* (M., 2005). p. 16.
8. *Workbook on lights and engeneering.* Edited by Yu. B. Aizenberg. (Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995) [in Russian].