

**Динамика формирования плазменного канала после зажигания разряда
в цезий–ртуть–ксеноновых импульсных лампах***С. В. Гавриш*

Исследованы спектральные характеристики излучения импульсного разряда в цезий–ртуть–ксеноновой смеси при формировании плазменного канала с момента зажигания до выхода в номинальный режим работы импульсной лампы. Показано, что по мере наращивания электрической мощности разряда спектральные линии излучения паров ртути изменяют свою интенсивность, а линии цезия самообращаются. Выявлено, что интенсивность спектральных линий в разных областях плазменного канала отличается в связи с наличием продольных градиентов температуры.

Ключевые слова: импульсный разряд, плазменный канал, спектральная линия, ртуть, цезий, самообращение линий, температура, концентрация атомов, давление паров.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-25-31

Введение

Механизм формирования плазменного канала при прохождении импульса тока в установившемся (номинальном) режиме работы импульсной цезий–ртуть–ксеноновой лампы с сапфировой оболочкой нами подробно рассмотрен в публикации [1]. В то же время теплофизический процесс заполнения разрядного объема указанной плазмообразующей средой с момента зажигания газоразрядной лампы до выхода в ее номинальный режим работы требует отдельного рассмотрения. Актуальность таких исследований обусловлена несколькими причинами.

Во-первых, в момент зажигания все металлические компоненты, входящие в состав наполнения, сконденсированы в холодной зоне лампы (чаще всего за катодом) и мгновенное введение в разряд номинальной мощности $P_{\text{ном}}$, приведет к сильноточному разряду в пусковом газе (ксеноне) с малым электри-

ческим сопротивлением и высокой теплопроводностью ксеноновой плазмы. В результате, возникающий термоудар по внутренней поверхности разрядной оболочки неизбежно приведет к ее разрушению. Во избежание указанного эффекта нами применяется метод плавного повышения электрической мощности с некоторой экспериментально установленной минимальной величины (примерно $(0,3-0,5)P_{\text{ном}}$), позволяющей поддерживать устойчивое горение плазменного канала [2].

Во-вторых, сконденсировавшиеся в заэлектродной области металлы образуют сплав цезия со ртутью (амальгаму), поэтому при нагреве лампы испарение и, как следствие, давление компонентов плазмообразующей среды в разряде определяется, согласно закону Рауля, активностью металлов и температурой амальгамы. Следовательно, по мере нагрева холодной зоны заполнение цезием и ртутью разрядного объема будет различным вплоть до выхода лампы в номинальный режим работы. Данное явление может приводить к явлению катафореза [3], и на границе раздела паров металлов будет происходить локальный перегрев оболочки, приводящий также к ее разрушению.

В-третьих, концентрация атомов цезия в разряде определяет интенсивность излучения,

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.
E-mail: svgavr@list.ru
ООО «НПП «Мелитта».
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

Статья поступила в редакцию 26 июля 2021 г.

прежде всего в ИК-области спектра, что является важной эксплуатационной характеристикой импульсных газоразрядных ламп для специальных оптико-электронных систем [4]. Чем быстрее будет достигнута оптимальная величина давления паров цезия, тем короче время готовности импульсного источника ИК-излучения к обеспечению своих функциональных параметров.

Учитывая вышесказанное, в данной работе рассматриваются спектральные характеристики излучения импульсного разряда в цезий–ртуть–ксеноновой смеси при формировании плазменного канала с момента зажигания до выхода в номинальный режим работы импульсной лампы.

Методика эксперимента

Методология исследования построена на анализе спектральных характеристик излучения из выделенной диафрагмой малой области плазменного канала.

Теоретический аспект предложенной методики

Из работы [5] следует, что при отсутствии вторичных процессов лучистый поток спектральной линии с единицы длины столба пропорционален числу возбуждающих соударений z :

$$F = hvz = hvcn_0 N_e e^{-\frac{eU_k}{kT_e}}, \quad (1)$$

где N_e – количество электронов на единицу длины столба; n_0 – концентрация нормальных атомов; U_k – потенциал возбуждения спектральной линии; e – заряд электрона; k – константа Больцмана; hv – энергия кванта; c – константа, T_e – электронная температура.

Эта формула показывает, что при повышении концентрации n_0 происходит увеличение интенсивности лучистого потока спектральной линии.

В свою очередь, концентрация n_0 связана с давлением паров металлов в разряде p уравнением Менделеева–Клапейрона. Данное уравнение состояния идеального газа для темпера-

туры T и постоянного разрядного объема V имеет вид:

$$n_0 = \frac{p}{kT}. \quad (2)$$

В другом представлении уравнение Менделеева–Клапейрона можно записать:

$$p = \frac{m}{MV} RT, \quad (3)$$

где m – масса металла в разрядном объеме; M – молярная масса; R – универсальная газовая постоянная.

Таким образом, из сопоставления уравнений (1)–(3) можно сделать вывод, что в условиях постоянного объема V и рабочей температуры разряда T при увеличении массы металла в разряде будет наблюдаться повышение давления паров (концентрации n_0) и, следовательно, согласно уравнению (1) рост интенсивности излучения спектральной линии.

Данное заключение правомочно на начальной стадии формирования плазменного канала, когда давление паров металлов незначительно. При достижении давления примерно 10 мм рт. ст. в излучение разряда существенный вклад вносят вторичные процессы (ступенчатые возбуждение и ионизация, удары II рода, переизлучение и т. д.) [5].

По мере повышения давления газа и плотности тока возрастает число соударений и обмен энергией между электронами и атомами. Данным процессам свойственно самообращение спектральных линий и увеличение мощности излучения континуума.

Так как отношение концентраций атомов на разных уровнях зависит только от температуры, следовательно, отношение удельных лучистых потоков линий также зависит только от температуры (в нашем случае мощности). Как следует из (1), в разрядах с более высокими температурами удельные потоки линий должны быть относительно выше.

Аппаратное оснащение эксперимента

Для исследования процессов заполнения разрядного объема парами металлов использовалась экспериментальная лампа с диамет-

ром и длиной плазменного канала 7 и 90 мм (далее лампа 7/90) соответственно. Состав наполнения: 9 мг цезия, 6 мг ртути и 70 мм рт. ст. ксенона в холодном состоянии лампы. Электрическое питание лампы осуществлялось от экспериментального блока питания, особенности функционирования и основные характеристики которого подробно рассмотрены в работах [1, 2]. Регулирование электрической мощности лампы производилось варьированием длительности прямоугольного импульса напряжения с постоянной амплитудой 120 В. Важно отметить, что для стабилизации разряда применялся режим горения дежурной дуги [1, 2], величина напряжения которой является косвенной оценкой давления паров цезия в плазменном канале [6].

На рис. 1 представлена блок-схема экспериментальной установки для спектральных исследований излучения разряда.

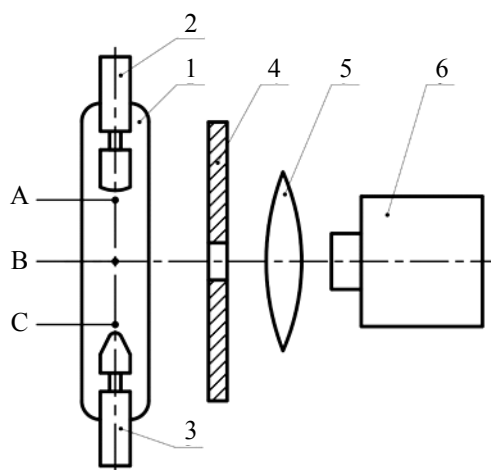


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки исследования спектральных характеристик разряда: 1 – исследуемая газоразрядная лампа; 2 – анод; 3 – катод; 4 – диафрагма; 5 – линза; 6 – спектрометр; A, B, C – центры исследуемых сегментов плазменного канала.

Экспериментальная лампа располагалась вертикально с катодом внизу. Исследование спектров излучения производилось в трех зонах плазменного канала (см. рис. 1), а именно, у анода 2 (точка A), в центре разрядного промежутка (точка B) и у катода 3 (точка C). Исследуемый сегмент плазменного канала выделялся специальной диафрагмой 4 с диаметром отверстия $d = 7$ мм, равным диаметру разрядного столба. Линза 5 позволяла сфокусировать излучение на входную щель спектрометра.

Для регистрации спектров в УФ- (185–390 нм) и в видимом (380–680 нм) диапазонах оптического спектра нами применялся двухканальный спектрометр S 150-2-3648 с цифровым выходом на персональный компьютер. Важной особенностью вертикально-симметричной оптической схемы спектрометра является возможность получить высокое качество изображения на плоском поле, что позволило использовать основные типы фотоэлектрических линеек и матриц для одновременной регистрации спектра в широком диапазоне длин волн.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования проводились сопоставлением визуального наблюдения процессов, происходящих в разрядном объеме, и спектрометрических исследований сегментов плазменного канала.

Визуальные наблюдения

После зажигания исследуемой лампы 7/90 напряжение дежурной дуги $U_{дд}$ составило ~ 20 В при токе $I_{дд} = 1,0$ А. При этом мощность, выделяемая в лампе, не обеспечивает испарения цезия и ртути. В этот момент в разрядной трубке наблюдается плазменный канал ксенона диаметром 3 мм белого цвета, соединяющий анод и закатодную область. Разряд равномерно охватывает сферическую поверхность анода, в то время как в закатодной области наблюдается блуждающая привязка к поверхности конденсированной пленки цезия. Учитывая, что работа выхода у цезия на вольфраме ($\phi = 1,63$ эВ) ниже, чем у торированного вольфрама ($\phi = 2,64$ эВ) [7], используемого в качестве материала катода, привязка разряда происходит именно в закатодной области.

По мере повышения мощности на лампе до 300 Вт (через ~ 45 с) разрядный канал изменяет цвет на сине-голубой и наблюдается появление запаха озона, что свидетельствует о выходе ртути в разряд. При этом напряжение дежурной дуги возрастает на 10–20 В. Учитывая тот факт, что лампа при исследованиях располагалась вертикально, то при мощности ~ 600 Вт (~ 90 с) происходит скатывание капель цезия за катод с поверхности разрядной

трубки в приэлектродной зоне. В области катода наблюдается появление сиреневого ореола паров цезия, который плавно заполняет весь разрядный промежуток при возрастании мощности до $P_{\text{л}} \sim 1,0$ кВт (~ 150 с). При этом в закатодной области наблюдается кипение и всплески капель цезия, которые при мощности 1,2 кВт (~ 200 с) полностью исчезают. Как следует из работы [6], напряжение дежурной дуги пропорционально давлению паров щелочных металлов, поэтому с этого момента наблюдается рост $U_{\text{дл}}$ при стабилизации после достижения мощности $\sim 1,9 \div 2,0$ кВт (~ 300 с), что соответствует переходу к разряду в насыщенных парах.

Спектральные исследования

Полученные результаты представлены на рис. 2 и 3. Из приведенных на рис. 2 спектров излучения можно сделать следующие заключения:

- давление паров цезия и ртути при электрической мощности разряда 600 Вт незначительно, так как наблюдаемые спектральные линии практически не уширены [5, 8];

- наблюдается градиент температур по длине плазменного канала, о чем свидетельствует различная интенсивность ртутных и цезиевых спектральных линий в центре (рис. 2, б) и в приэлектродных областях (рис. 2, а и 2, в).

Наблюдаемая картина спектрального распределения излучения разряда в цезий–ртуть–ксеноновой смеси (рис. 2) объясняется следующими доводами. Энергетический поток линий определяется концентрацией атомов, возбужденных до верхнего уровня каждой спектральной линии и вероятностью перехода для данной линии, которая является атомной константой. Как следует из таблицы, наибольшей интенсивностью излучения должны обладать цезиевые линии с потенциалами возбуждения 2,7 и 2,72 эВ, что и наблюдается в таблице и на рис. 2, а и 2, в.

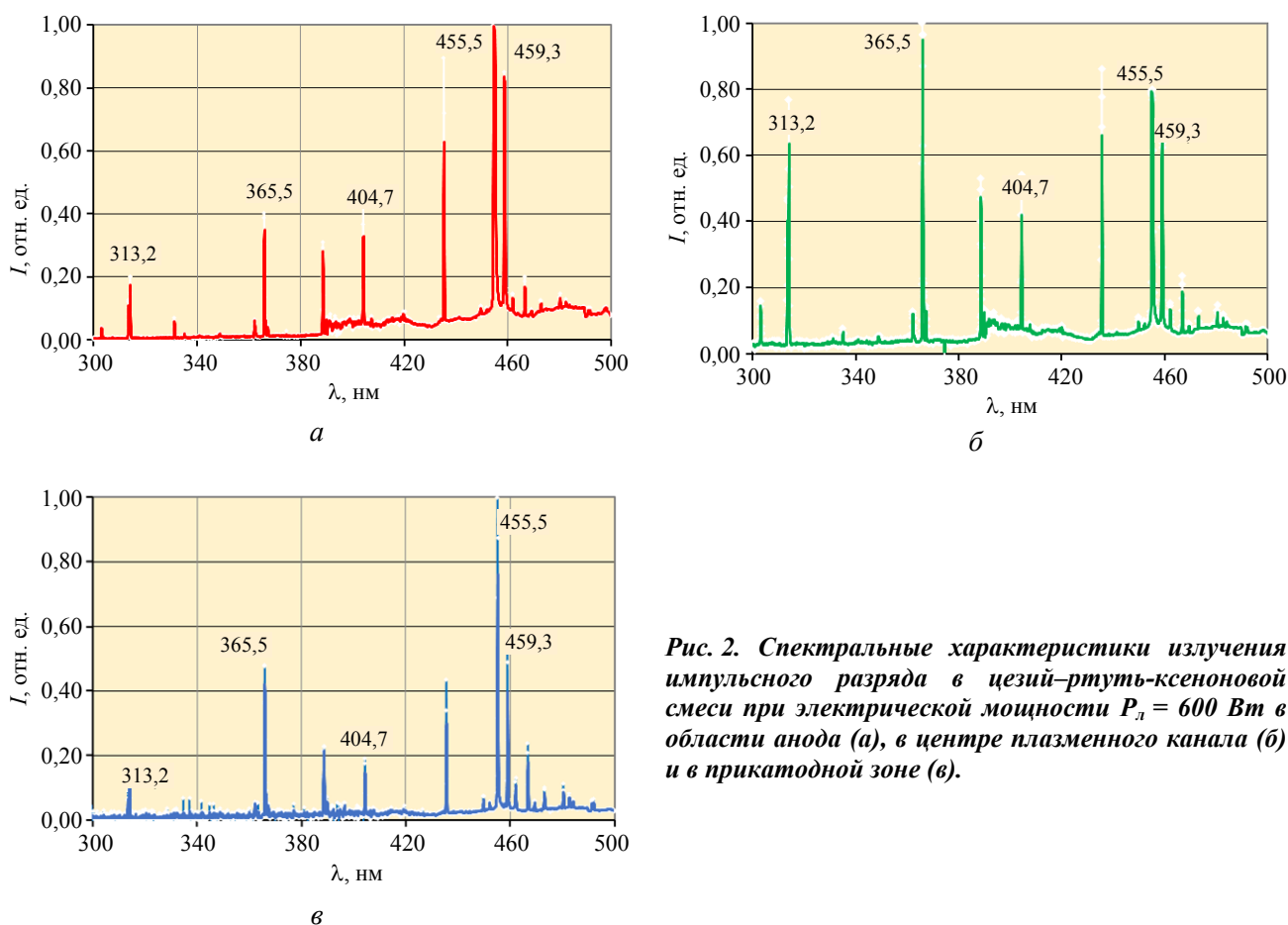


Рис. 2. Спектральные характеристики излучения импульсного разряда в цезий–ртуть–ксеноновой смеси при электрической мощности $P_{\text{л}} = 600$ Вт в области анода (а), в центре плазменного канала (б) и в прикатодной зоне (в).

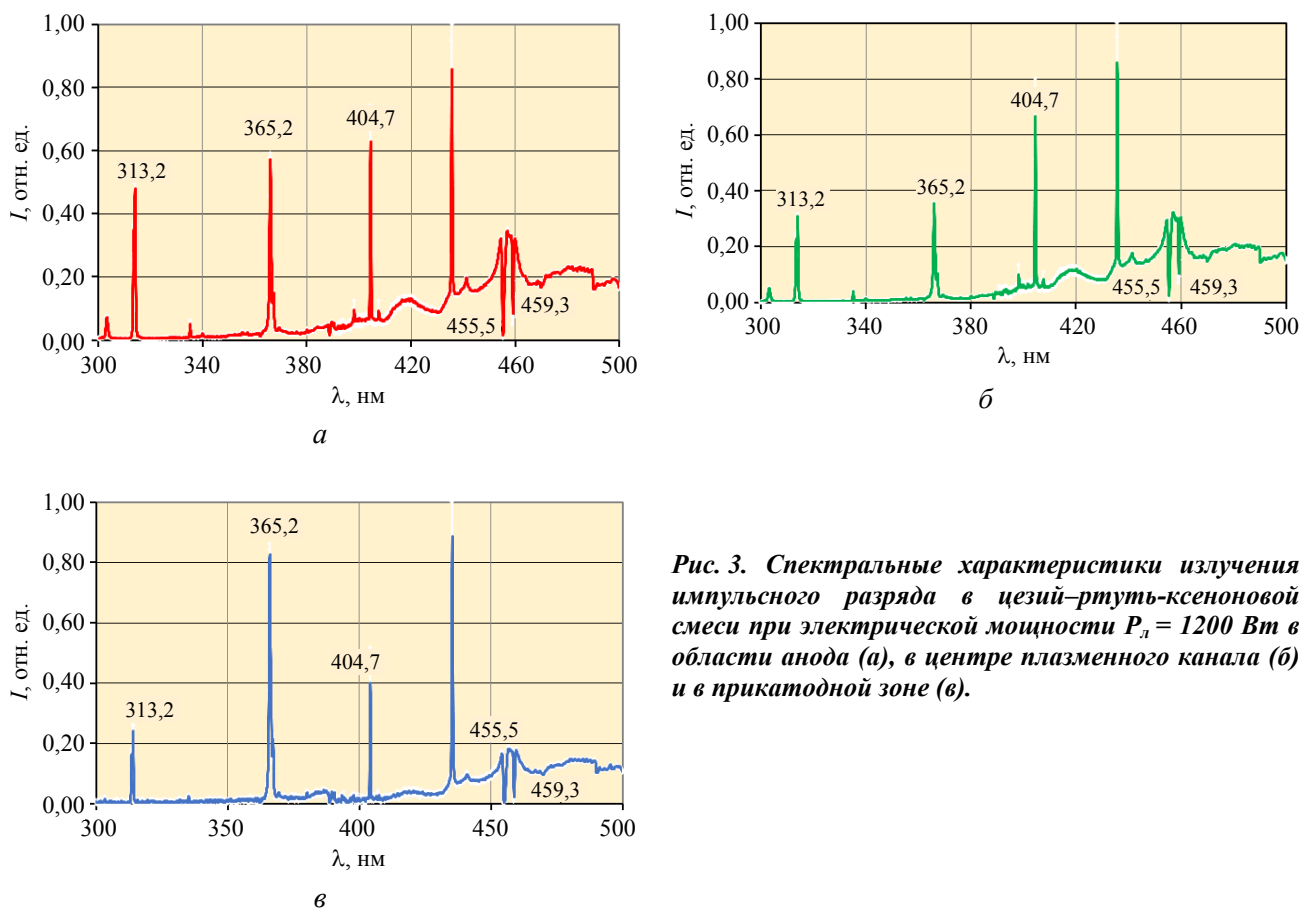


Рис. 3. Спектральные характеристики излучения импульсного разряда в цезий-ртуть-ксеноновой смеси при электрической мощности $P_{л} = 1200$ Вт в области анода (а), в центре плазменного канала (б) и в прикатодной зоне (в).

Таблица

Основные характеристики линий спектра излучения Cs-Hg-Xe-плазмы

Элемент	Длины волн излучающих линий, нм	Переходы [9]	Потенциалы возбуждения уровней, эВ, [10]	$P_{л} = 600$ Вт			$P_{л} = 1200$ Вт		
				A	B	C	A	B	C
Hg	313,12	$6^3D_2 \rightarrow 6^3P_1$	8,85	0,18	0,64	0,3	0,5	0,32	0,25
	365,5	$6^3D_2 \rightarrow 6^3P_2$	8,83	0,48	0,92	0,35	0,58	0,37	0,81
	404,7	$7^3S_1 \rightarrow 6^3P_0$	7,73	0,18	0,42	0,32	0,64	0,68	0,4
Cs	455,5	$7^2P_{3/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$	2,7	0,9	0,8	1,0	Самообращена		
	459,3	$7^2P_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$	2,72	0,5	0,68	0,82	Самообращена		

Примечание: А, В, С – точки исследования спектров согласно рисунку 1.

В то же время в спектре на рис. 2, б видно отличие от состава излучения у рассмотренных выше участков плазменного канала. Это связано с повышенной температурой в центре разряда, приводящей к самопоглощению линий.

Процесс самопоглощения особенно ярко проявляется при повышении мощности до 1200 Вт (рис. 3). Согласно уравнению Больцмана, концентрация атомов n_k , способных поглощать эту линию, тем выше, чем ниже потенциал возбуждения конечного уровня [8]:

$$n_k = n_0 \frac{g_k}{g_0} e^{-\frac{eV_k}{kT}} \tag{4}$$

где g_0 и g_k – статические веса основного состояния и возбужденного уровня «к».

Кроме этого, самопоглощение линии большей вероятностью перехода возрастает, так как вероятность поглощения пропорциональна вероятности излучения. Для резонансных линий самопоглощение особенно велико, так как эти линии могут поглощаться атомами

в нормальном состоянии, концентрация которых намного больше, чем возбужденных.

По указанным причинам наблюдается самопоглощение линий цезия, а не ртути. При этом возрастает непрерывный фон в области цезиевых линий. Происхождение непрерывного спектра имеет двойственную природу, связанную со следующими факторами.

- Рекомбинация положительных ионов и электронов приводит к излучению непрерывного фона, интенсивность которого пропорциональна произведению концентраций положительных ионов и электронов, т. е. $n_i \times n_e$. Так как согласно уравнению Саха [5, 8], $n_i \times n_e$ пропорционально n_0 , а интенсивность линейчатого спектра также пропорциональна n_0 , то поэтому относительная интенсивность этого компонента континуума по сравнению с интенсивностью линий не зависит от давления. Данное явление мы наблюдаем в случае ртутных линий 365,2 и 404,7 нм.

- С увеличением давления мощность излучения непрерывного спектра растет быстрее интенсивности линий, что связано с соударениями возбужденных атомов с нормальными. Вероятность этих соударений пропорциональна n_0^2 , что и объясняет, почему мощность излучения континуума с ростом давления растет быстрее интенсивности линий (см. рис. 2 и 3).

Необходимо отметить, что, как и в случае, показанном на рис. 2, концентрация атомов различна вдоль оси разряда, что связано с наличием продольного градиента температуры, который также определяет температуру самой холодной зоны лампы. Данное явление будет продолжаться до полного испарения амальгамы в холодной зоне лампы и перехода разряда в ненасыщенные пары [11].

Заключение

В результате проведенных исследований показано, что по мере наращивания электрической мощности разряда в парах цезий–ртуть–ксеноновой смеси происходит трансформация спектрального распределения излучения, т. е. ртутные спектральные линии изменяют свою интенсивность, а линии цезия самообращаются. При этом интенсивность спектральных линий в разных частях плазменного канала различна. Данное явление связано с наличием продольных градиентов температуры [12], которые сохраняются после выхода в номинальный режим импульсных газоразрядных ламп с разрядом в цезий–ртуть–ксеноновой смеси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гавриш С. В. // Прикладная физика. 2020. № 2. С. 34.
2. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Жмаев В. С. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 53.
3. Шибкова Л. В., Шибков В. М. Разряд в смесях инертных газов. – М.: Физматлит, 2005.
4. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.
5. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
6. Bayha William T., Creedon John E., Schneider Sol. // IEEE-Trans. Electron Devices. 1970. Vol. 17. № 8. P. 612.
7. Добрецов Л. Н., Гамаюнова М. В. Эмиссионная электроника. – М.: Наука, 1966.
8. Ртутные лампы высокого давления / Под ред. И. М. Весельницкого, Г. Н. Рохлина. – М.: Энергия, 1971.
9. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. – М.: Гос. Из-во Физ.-мат. литературы, 1963.
10. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. Таблицы спектральных линий. – М.: Гос. Из-во Физ.-мат. литературы, 1952.
11. Gavrish S. V. // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2011. Vol. 52. № 6. P. 924.
12. Гавриш С. В., Кузусев Д. Н., Пучнина С. В. и др. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 4. С. 261.

The dynamics of the formation of a plasma channel after the ignition of a discharge in cesium-mercury-xenon pulsed lamps

S. V. Gavrish

Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

Received July 26, 2021

The paper deals with the spectral characteristics of the radiation of a pulsed discharge into a cesium – mercury – xenon mixture during the formation of a plasma channel from the moment of ignition until reaching the nominal operating mode of the flash lamp. It is shown that as the electric power of the discharge increases, the spectral emission lines of mercury vapors change their intensity, and the cesium lines self-reversal. It is revealed that the intensity of spectral lines in different regions of the plasma channel differs due to the presence of longitudinal temperature gradients.

Keywords: pulse discharge, plasma channel, spectral line, mercury, cesium, self-reversal of lines, temperature, concentration of atoms, vapor pressure.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-5-25-31

REFERENCES

1. S. V. Gavrish, Applied Physics, No. 2, 34 (2020) [in Russian].
2. S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, V. S. Zhmaev, et al., Applied Physics, No. 1, 53 (2009) [in Russian].
3. L. V. Shibkova and V. M. Shibkov, *Discharge in Mixture of Noble Gases* (Fizmatlit, Moscow, 2005) [in Russian].
4. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, Usp. Prikl. Fiz. **6** (4), 333 (2018).
5. G. N. Rokhlin, *Discharge Light Sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
6. William T. Bayha, John E. Creedon, and Sol. Schneider, IEEE-Trans. Electron Devices **17**, 612 (1970).
7. L. N. Dobretsov and M. V. Gamayunova, *Emission Electronics* (Nauka, Moscow, 1966) [in Russian].
8. *High Pressure Mercure Lamps* (Energia, Moscow, 1971) [in Russian].
9. S. E. Frish, *Optical Spectrum of Atoms* (Gos. Fiz.-Mat. Lit., 1963) [in Russian].
10. A. N. Zaidel, V. K. Prokof'ev, and S. M. Raiskii, *Tables of Spectral Lines* (Fizmatlit, Moscow, 1952) [in Russian].
11. S. V. Gavrish, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics **52**, 924 (2011).
12. S. V. Gavrish, D. N. Kugushev, S. V. Puchnina, et al., Usp. Prikl. Fiz. **8** (4), 261 (2020).