

Влияние на характеристики плазмы собственного отраженного излучения газоразрядной лампы*С. В. Гавриш, Д. Н. Кугушев*

Исследовано влияние на параметры разряда в цезий – ртуть – ксеноновой парогазовой смеси возвращенного обратно в плазму собственного излучения газоразрядной лампы. Изучены трансформация спектра излучения, формирование плазменного канала при достижении квазистационарной стадии. В результате исследования самообращения резонансной линии цезия доказана определяющая роль роста давления паров плазмообразующей среды на изменение характеристик плазмы.

Ключевые слова: газоразрядная лампа, разряд, плазма, коэффициент поглощения, цезий, ртуть, ксенон, спектр, токовый импульс, самообращение, резонансная линия.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-31-38

Множество существующих сегодня оптико-электронных систем построено на использовании излучения импульсных газоразрядных ламп [1]. Плазма в данных системах служит источником мощного излучения с высоким КПД преобразования электрической мощности в лучистую энергию. При этом излучение имеет сложный спектральный состав, состоящий из непрерывной и дискретной компонент, процессы во многих случаях являются нестационарными, а в плазме имеют место эффекты неравновесности и неидеальности. Кроме этого система, в которой осуществляется генерация излучающей плазмы, представляет собой совокупность многочисленных элементов: приемника излучения (например, облучаемая поверхность), отражателя или световода, которые обеспечивают перераспределение лучистых потоков в заданных направлениях или после многочисленных отражений возвращают их обратно в плазменный столб.

Данные элементы имеют оптические характеристики, существенно зависящие от длины волны излучения, поверхности могут быть отражающими, преломляющими или поглощающими, материалы – излучающими, поглощающими или рассеивающими, отражение может иметь диффузный, зеркальный или диффузно-зеркальный характер.

В составе системы может находиться несколько пространственно разделенных источников излучения и несколько приемников. Например, оптическая система, состоящая из импульсных источников излучения с цилиндрическим и кольцевым телом свечения, расположенных в одном отражателе и облучающих друг друга [2], либо разрядный канал имеет U-образную форму, поэтому часть излучения из каждого цилиндрического участка попадает в плазменный столб, расположенный напротив [1]. Это приводит к изменению теплофизических свойств плазмообразующей среды за счет частичного поглощения собственного излучения.

Наиболее широко указанное явление изучено в разрядах инертных газов (ксенон, криптон) [3]. В силу малой оптической плотности плазмы этих веществ возврат излучения в лампу приводит к возрастанию среднего уровня температуры без существенного изменения характера температурного поля разряда.

Гавриш Сергей Викторович, нач. отдела, д.т.н.

E-mail: svgavr@list.ru

Кугушев Дмитрий Николаевич, зам. нач. лаб.

ООО «НПП «Мелитга».

Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 16/10.

Статья поступила в редакцию 03 декабря 2020 г.

© Гавриш С. В., Кугушев Д. Н., 2021

Вследствие этого увеличивается давление, проводимость, плотность тока, длительность импульса излучения, изменяется яркость разряда и ее радиальный профиль, а также происходит перераспределение энергетических потерь. Последние существенно влияют на КПД излучения и предельную энергию, ограниченную возможным разрушением разрядной трубки.

В источниках с оптически плотными разрядами (пары ртути или щелочных металлов) влияние отраженного излучения проявляется в трансформации температурного поля разряда и увеличении среднего уровня температур и температурного градиента в пристеночной области. Это обусловлено преимущественным поглощением периферийными слоями возвращаемого в разряд излучения. Таким образом, исследование изменения ха-

рактеристик разряда в парах щелочных металлов под воздействием возвращенного собственного излучения является актуальной задачей. В данной работе проводились исследования воздействия собственного отраженного излучения на параметры импульсных ламп с разрядом в парогазовой цезий – ртуть – ксеноновой смеси, ограниченной системой из двух сапфировых оболочек [4].

Теоретический аспект проблемы

Для понимания указанного явления рассмотрим рассчитанные спектральные распределения коэффициента поглощения k_λ (рис. 1) и КПД излучения (рис. 2) для плазмы высокого давления $p = 0,1$ МПа сложного состава (Cs : Hg : Xe = 5 : 1 : 1,5) при температуре $T = 4000$ К [5].

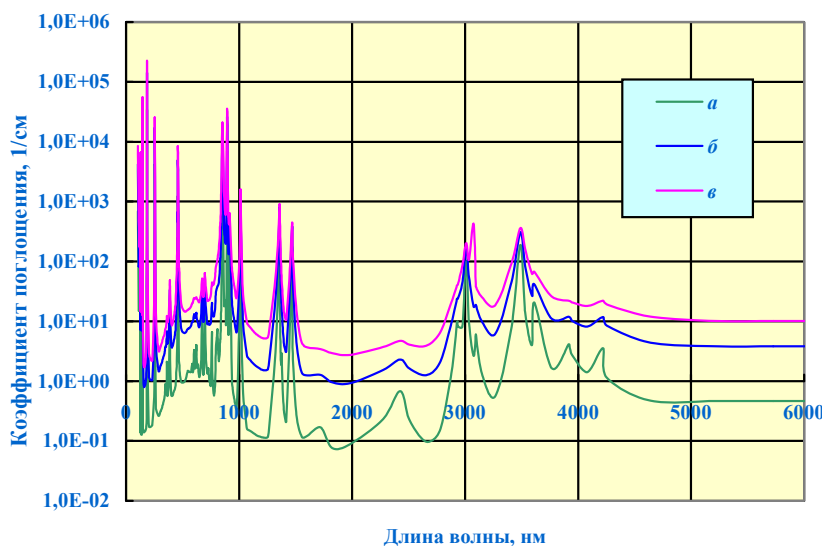


Рис. 1. Коэффициент поглощения плазмы Cs-Hg-Xe. Температура плазмы $T = 4000$ К. Соотношение компонент Cs-Hg: 1-1,5. Давление: а — $p = 0,1$ МПа; б — $0,5$ МПа; в — 1 МПа.

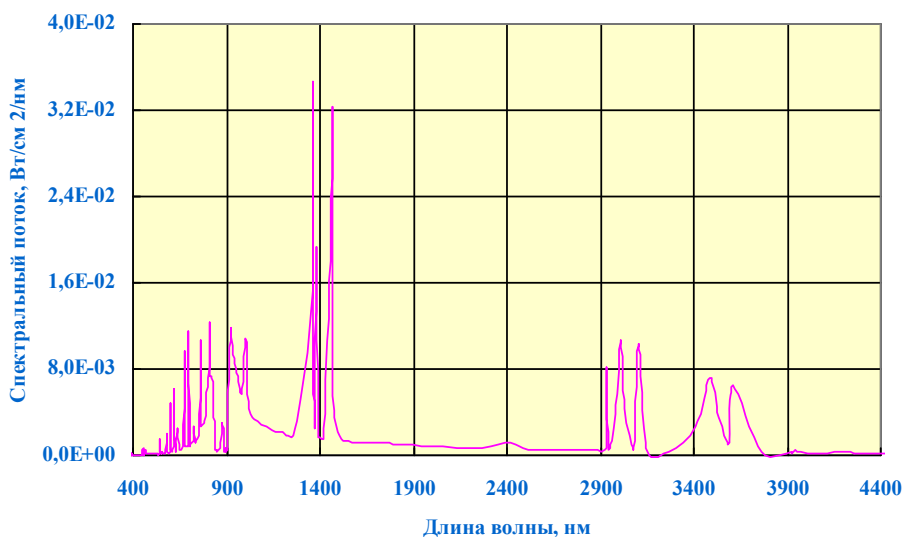


Рис. 2. Спектральное распределение излучения разряда газоразрядной лампы с радиусом плазменного канала $0,55$ см, при токе $I = 300$ А, частоте следования импульсов 450 Гц и средней удельной мощности $P_{\text{cp}} = 430$ Вт/см и соотношении компонент Cs-Hg-Xe: 5-1-1,5.

Метод расчета коэффициента поглощения цезий – ртуть – ксеноновой плазмы подробно рассмотрен в работе [5]. Основными радиационными процессами, учитываемыми при вычислениях и определяющими оптические свойства многокомпонентной атомарной плазмы, являются: фотоионизация атомов и ионов, торможение электронов в полях нейтралов и ионов, дискретные переходы связанных электронов. Суммарный коэффициент поглощения зависит от длины волны излучения, температуры и давления плазмы (в случае локального термодинамического равновесия) или от длины волны, концентрации частиц, температур электронов и тяжелых частиц, а также их распределения по уровням энергии (в случае неравновесной плазмы). При его вычислении проводится суммирование вкладов перечисленных процессов.

При расчете k_λ нами в работе [5] учитывались как отдельные спектральные линии, так и непрерывный фон. Особенно тщательно проработан контур резонансных линий Cs в ближней инфракрасной области (894,3 и 852,1 нм), так как последние во многом определяют энергетику разряда и выход излучения. Расчет КПД излучения Cs-Hg-Xe плазмы для указанных характеристик производился в результате реализации математической модели [5], построенной в приближении локального термодинамического равновесия. Модель включала уравнения сохранения энергии, неразрывности, переноса излучения в плазме, сохранения массы в замкнутом объеме, закона Ома, уравнения внешней электрической цепи, уравнения энергии (теплопроводности) для многослойной системы: две оболочки и зазор между ними, заполненный газом.

Из приведенных на рис. 2 данных следует, что основная доля излучения импульсной цезиевой лампы сосредоточена в спектральной области до $\lambda = 2$ мкм. При этом коэффициент поглощения Cs-Hg-Xe плазмы в этой спектральной области имеет линейчатый характер. На фоне непрерывного спектрального распределения k_λ (рис. 1) наблюдаются максимумы поглощения при длинах волн: 103,6; 129,6; 147,0; 185,0; 253,7; 387,5; 458,5; 851,1; 896,1; 1012,4; 1360,2; 1469,5 нм. При этом k_λ меняется в диапазоне от 1 до 10^5 см⁻¹. Следовательно, из сопоставления рисунков 1 и 2 следует, что незначительная доля возвращен-

ного в плазму излучения будет достигать центра оси и повышать его температуру.

С другой стороны, коэффициент поглощения k_λ при длине волны более 2 мкм (рис. 1) достаточно высок, что приводит к росту безызлучательных (теплопроводностью) потерь. По этой причине излучение в среднем ИК-диапазоне испускается из кольцевого слоя, близкого к поверхности разрядной трубки. Возвращенное излучение с длиной волны более 2 мкм только усилит тепловые потери и, следовательно, можно ожидать рост температуры оболочки $T_{об}$ и незначительное повышение температуры приповерхностного слоя.

В итоге в различных спектральных интервалах характер поглощения излучения меняется от чисто поверхностного до сугубо объемного (определяется еще и размерами разрядного канала). При этом изменяются теплофизические характеристики разряда и температурное поле разряда.

В то же время наличие у лампы двух оболочек [4] может способствовать как трансформации температурного поля плазмы за счет отражения выходящего излучения обратно в разряд от их внутренней поверхности, так и снижать эффект воздействия отражающей системы путем отражения с наружных плоскостей колб.

Необходимо отметить еще один важный момент, связанный с повышением $T_{об}$. Согласно [6] при увеличении температуры сапфира наблюдается сдвиг УФ-границы пропускания в длинноволновую область. Аналогично длинноволновый предел прозрачности смещается в сторону коротковолнового диапазона.

Методика эксперимента

Для проверки сделанных теоретических предположений были изготовлены импульсные лампы с двумя сапфировыми оболочками. Разрядные трубки (горелки) с диаметром плазменного канала 7 мм и межэлектродным расстоянием 90 мм имели следующий состав наполнения: 12 мг Cs, 9 мг Hg, 70 мм рт.ст. Хе.

При проведении спектральных исследований в интервале длин волн 300–1000 нм нами был использован дифракционный монохроматор МДР-23, выходной световой сигнал с которого регистрировался последовательно

двумя фотоэлектронными умножителями ФЭУ-38 и ФЭУ-62. Исследование характеристик излучения проводилось посредством фотометра Ф-005. Изучаемые спектральные диапазоны выделялись при помощи комбинации оптических цветных стекол (ГОСТ 9411-91) с известной областью прозрачности.

Для изучения характеристик низкотемпературной плазмы использован источник питания ламп с прямоугольными импульсами подаваемого на лампу напряжения [7]. Такой способ подачи и отключения прикладываемого к лампе напряжения от мощного выпрямителя позволил сформировать крутой задний фронт токового импульса, который в этом случае зависит от скорости остывания плазмы (от состава наполнения, охлаждения лампы и т. д.), а не от переходных процессов в коммутирующем элементе. Частота импульсов тока составляла 425 Гц, длительность импульсов тока задавалась временем открытия транзисторного ключа, которое данная схема включения позволяла изменять дискретно с шагом 4 мкс. Лампа работала с дежурной дугой стабилизированного тока 1 А. При этом контролировалось напряжение дежурной дуги, величина которого позволяет косвенно оценивать давление паров в лампе [4]. Предполагалось, что при равенстве напряжения дежурной дуги в лампе, работающей в различных электрических или тепловых (с отражателем или без него) условиях, давление паров цезия одинаково. Регулирование мощности на лампе производилось путем изменения напряжения на выходе преобразователя или длительности импульсов напряжения. Лампа работала в условиях принудительного охлаждения тремя вентиляторами 2ДВО 07 через коническое сопло с диаметром выходного отверстия 50 мм. Временная зависимость тока исследовалась при помощи безиндуктивного токового шунта известного сопротивления, а импульсы напряжения снимались с делителя 1:100 цифровым осциллографом С9-8.

Для изучения параметров Cs-Hg-Xe плазмы, существенно изменяющихся под влиянием возвращенного излучения, исследования проводились в плотных цилиндрических отражателях, окружающих колбу лампы по периферии (рисунок 3). Это позволило усилить эффект воздействия возвращенного излуче-

ния. Ширина зазора между внешней оболочкой лампы и внутренней поверхностью отражателя определялась скоростью проходящего сквозь него охлаждающего воздушного потока.

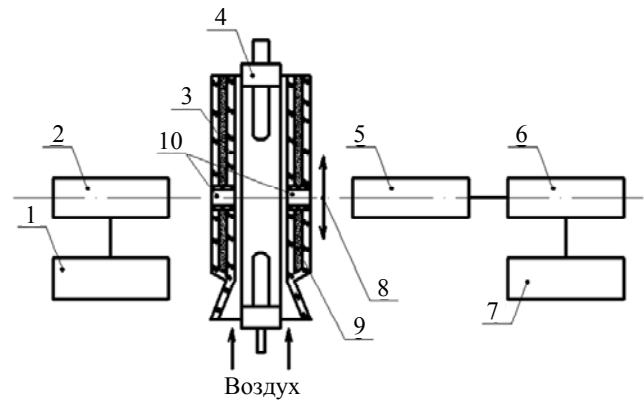


Рис. 3. Блок-схема экспериментальной установки: 1, 7 – осциллографы; 2 – фотометр Ф-005; 3 – оболочка отражающей системы; 4 – исследуемая лампа; 5 – спектрометр МДР-23; 6 – ФЭУ; 8 – кварцевая линза; 9 – отражающее вещество; 10 – выходное окно.

При исследованиях применялись отражатели двух типов:

- Зеркальные. Алюминиевая или серебряная фольга располагалась в полости между двумя коаксиальными трубками.
- Диффузные. Полость плотно заполнялась порошком окиси циркония.

В нашем случае диаметр цилиндрического отражателя значительно больше диаметра лампы, поэтому ход лучей после отражения от различных покрытий отличается. При зеркальном отражателе углы падения и углы отражения равны. В диффузном отражателе независимо от угла падения каждая точка поверхности, на которую падает луч, является ламбертовским излучателем. Следовательно, в лампу попадает только та доля фотонов, которая находится в телесном угле, образованном отражающей точкой поверхности и лампой. Поэтому для одинаковых коэффициентов отражения ρ диффузного и зеркального покрытий всегда будет наблюдаться преимущество последнего.

Независимо от типа отражателя тепловое физическое влияние на разряд отраженного излучения одинаково и определяется, прежде всего, коэффициентом поглощения плазмообразующей среды.

Важной особенностью конструкции используемых отражателей являлось расположение на одной оптической оси с фотоизмерительными устройствами 2 и 5 двух отверстий 10 (рис. 3), исключающих попадание отраженного излучения от лампы на приемник.

Исследование влияния на источник собственного отраженного излучения

Цезий-ртуть-ксеноновая горелка разрядной лампы с размерами разрядного промежутка 7/90 помещалась в кварцевую оболочку отражающей системы (рис. 3), проводились регистрация токового импульса и спектральные исследования излучения разряда. Для идентичности условий измерений вплотную к выходному отверстию устанавливался экран с отверстием, равным ему по диаметру. Это исключало попадание излучения от всей горелки на приемник. Затем без изменения режимов питания в полость устанавливалась зеркально отражающая фольга и измерения повторялись. На рисунке 4 приведено спектральное распределение излучения при работе лампы с отра-

жателем и без него при средней электрической мощности лампы 1,0 кВт.

Известно, что в стационарном разряде переменного или постоянного тока входящая в состав наполнения ртуть не влияет на спектр излучения. Это связано с более высокими потенциалами возбуждения ртути в сравнении с щелочными металлами. Из приведенных на рис. 4, а данных видно, что в случае открытой исследуемой газоразрядной лампы наблюдается серия узких спектральных линий с характеристиками, приведенными в таблице.

В частности, для открытой лампы наблюдаются интенсивные линии триплетов резкой серий ртути (404,65; 435,8 и 546,0 нм). Существенного вклада в энергетический баланс мощности излучения указанные линии не вносят, так как основная доля энергии сосредоточена в непрерывном фоне и уширенных дуплетах линий цезия (672,3–697,2; 760,9–794,4 и 807,8–807,9 нм). Самообращение резонансных линий цезия (852,11 и 894,35 нм) незначительно. Данный факт свидетельствует о достаточно низком давлении (менее 100 мм рт.ст.) паров цезия.

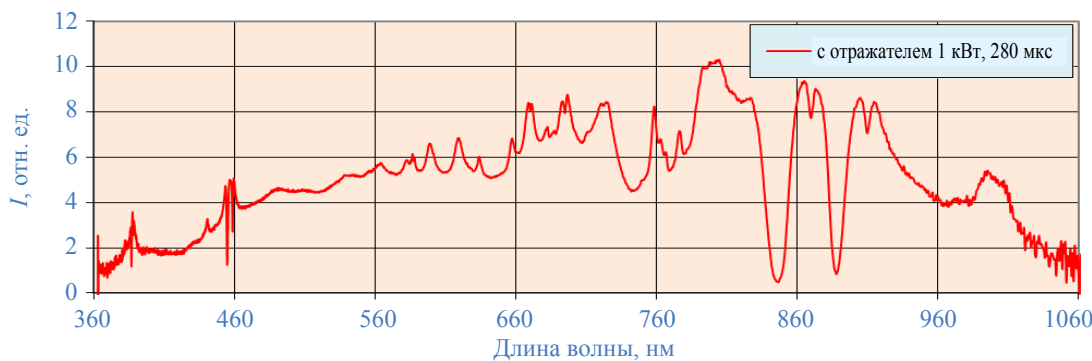


Рис. 4. Спектральное распределение излучения импульсной цезиевой лампы 7/90 при мощности 1,0 кВт с отражателем (б) и без него (а).

Таблица

Основные характеристики линий спектрального распределения излучения Cs-Hg-Xe плазмы при удельной мощности $P_{уд.} = 110 \text{ Вт/см}$

Элемент	Длины волн излучающих линий, нм	Переходы [6]	Потенциалы возбуждения излучающих уровней, эВ, [7]	Наиболее близкие полосы поглощения [5]		Вид линии
				Длина волны, нм	$k, 1/\text{см}$	
Hg	313,156	$6^3D_2 \rightarrow 6^3P_1$	8,85	315,9	$3,0 \times 10^{-1}$	Линия триплета
	365,015	$6^3D_3 \rightarrow 6^3P_2$	8,86	366,4	$4,2 \times 10^{-1}$	-/-
	365,483	$6^3D_2 \rightarrow 6^3P_2$	8,83	366,4	$4,2 \times 10^{-1}$	-/-
	404,656	$7^3S_1 \rightarrow 6^3P_0$	7,73	404,6	$4,27 \times 10^{-1}$	-/-
	407,783	$7^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$	7,9	411,5	$4,4 \times 10^{-1}$	-/-
Cs	455,526	$7^2P_{3/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$	2,7	455,5	$6,91 \times 10^2$	Самообращена
	459,316	$7^2P_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$	2,72	458,5	$2,02 \times 10^3$	-/-
	697,32	$7^2D \rightarrow 6^2P$	3,21	697,3	$2,46 \times 10^1$	-/-
	794,40	$8^2S_{1/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$	3,01	791,6	1,99	-/-
	852,11	$6^2P_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$	1,46	851,1	$3,3 \times 10^3$	-/-
	894,35	$6^2P_{1/2} \rightarrow 6^2S_{1/2}$	1,39	894,1	$1,02 \times 10^4$	-/-
	917,20	$6^2D_{5/2} \rightarrow 6^2P_{3/2}$	2,78	916,8	$1,37 \times 10^2$	-/-

Размещение газоразрядной лампы в отражающую систему изменяет общую картину спектрального распределения излучения разряда. Практически все тонкие линии исчезают, энергия континуума возрастает минимум вдвое. Данное явление связано с ростом давления паров p_n цезия и ртути, а также с увеличением коэффициента поглощения плазмы (рис. 1 и таблица).

Для достижения идентичной токовой нагрузки (удельной мощности) нам пришлось увеличить длительность импульса напряжения с 116 до 280 мкс. Как следует из рис. 5 квазистационарная стадия (максимум тока) достигается значительно позже в случае работы газоразрядной лампы в отражателе.

Это явление обусловлено возрастающими безызлучательными потерями и затратами на термическую ионизацию плазмообразующей среды в условиях возрастания давления паров цезия. В квазистационарной стадии развития разряда происходит тепловое расширение плазменного канала без изменения электрических интегральных параметров плазмы (плотности тока, напряженности электрического поля, проводимости и т. д.).

Основной причиной такого поведения плазмы может быть только рост давления. На рисунке 6 подробно рассмотрен участок спек-

тра около самообращенной резонансной линии цезия 852,11 нм. В настоящее время все исходит из предположения, что уширение и самообращение линии 852,11 определяется резонансным взаимодействием атомов цезия. Согласно теории при таком уширении контур спектральной линии описывается дисперсионной кривой, симметричной относительно центра линии. Расстояние между максимумами после самообращения линии пропорционально концентрации возмущающих атомов, т. е. давлению паров цезия.

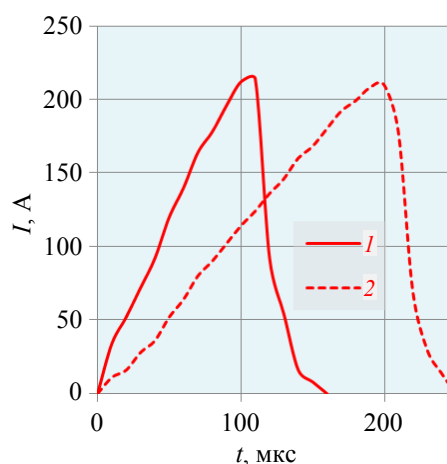


Рис. 5. Осциллограммы тока импульсной лампы с разрядом в Cs-Hg-Xe смеси, работающей в открытом виде (1) и в отражателе (2).

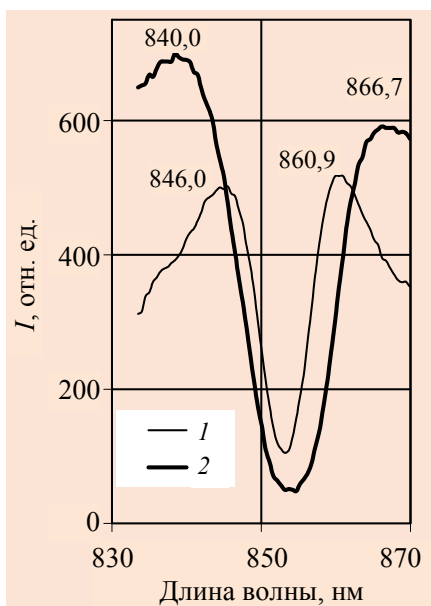


Рис. 6. Спектр самообращенной линии цезия 852,11 нм при работе лампы в открытом виде (1) и в отражателе (2).

Как видно из представленных данных расстояние между максимумами «крыльев» реабсорбированной линии составляет $\Delta\lambda = 14,9$ нм для открытой лампы и $\Delta\lambda = 26,7$ нм для лампы, размещенной в отражателе. Из этих результатов следует однозначный вывод о росте давления паров компонентов плазмообразующей среды при воздействии возвращенного излучения.

Заключение

Как следует из выше изложенного, определяющим фактором является давление паров рабочей среды разряда. В свою очередь, p_n за-

висит от температуры самой холодной точки лампы. В нашем случае отражатель охватывал только разрядный промежуток горелки, поэтому утверждать, что рост температуры холодной точки производился за счет возвращенного излучения неправильно. Таким образом, единственным способом подогрева металлов является продольный градиент температуры плазменного канала, т. е. рост давления связан с повышением осевой температуры разряда. Дополнительно об этом факте свидетельствует рост континуума в спектральных характеристиках на рис. 4. Вопросы изучения осевой температуры и радиальных градиентов температуры не входил в задачи проведенных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Басов Ю. Г., Раквиашвили А. Г., Сысун В. В. Специальная светотехника. – Минск: Издательский центр БГУ, 2008.
2. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Кугушев Д. Н. и др. // Светотехника. 2011. № 1. С. 12.
3. Басов Ю. Г. // ЖПС. 1981. Т. 35. Вып. 3. С. 389.
4. Гавриш С. В., Логинов В. В., Пучнина С. В. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 4. С. 333.
5. Градов В. М., Гавриш С. В., Рудаков И. В. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Приборостроение. 2017. № 6 (117). С. 130.
6. Лингарт Ю. К., Петров В. А., Тихонова Н. А. // ТВТ. 1982. Т. 20. № 5. С. 872.
7. Гавриш С. В., Кобзарь А. И., Жмаев В. С. и др. // Прикладная физика. 2009. № 1. С. 53.
8. Фриш С. Э. Оптические спектры атомов. – М.: Гос. Из-во Физ.-мат. литературы, 1963.
9. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. Таблицы спектральных линий. – М.: Гос. Из-во Физико-теоретической литературы, 1952.

PACS: 07.50-C

Influence of self-reflected radiation on plasma characteristics gas-discharge lamp

S. V. Gavrish and D. N. Kugushev

Scientific and Production Enterprise “Melitta”, Ltd
16/10 Miklukho-Maklaya st., Moscow, 117997, Russia

Received December 03, 2020

The paper deals with the influence on the parameters of the discharge in cesium – mercury – xenon vapor-gas mixture returned back to the plasma of the self-radiation of a gas-discharge

lamp. The transformation of the radiation spectrum and the formation of a plasma channel upon reaching the quasi-stationary stage have been studied. As a result of studying the self-reversal of the resonance line of cesium, the decisive role of the increase in the vapor pressure of the plasma-forming medium on the change in the characteristics of the plasma has been proved.

Keywords: gas-discharge lamp, discharge, plasma, absorption coefficient, cesium, mercury, xenon, spectrum, current pulse, self-reversal, resonance line.

REFERENCES

1. Yu. G. Basov, A. G. Rakviashvili, and V. V. Sysun, *Special'naya Svetotekhnika* (Izdatel'skij centr BGU, Minsk, 2008).
2. S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, D. N. Kugushev, et al., *Svetotekhnika*, No. 1, 12 (2011).
3. Yu. G. Basov, *ZhPS* **35** (3), 389 (1981).
4. S. V. Gavrish, V. V. Loginov, and S. V. Puchnina, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (4), 333 (2018).
5. V. M. Gradov, S. V. Gavrish, and I. V. Rudakov, *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Priborostroenie*, No. 6 (117), 130 (2017).
6. Yu. K. Lingart, V. A. Petrov, and N. A. Tikhonova, *TVT* **20** (5), 872 (1982).
7. S. V. Gavrish, A. I. Kobzar, V. S. Zhmaev, et al., *Applied Physics*, No. 1, 53 (2009).
8. S. E. Frisch, *Optical spectra of atoms* (Gos. Izdatel'stvo Fiziko-matematicheskoy literatury, Moscow, 1963).
9. A. N. Zaidel, V. K. Prokofiev, and S. M. Raisky, *Spectral line tables* (State. publishing house of physical and theoretical literature, Moscow, 1952).