

УДК 621.327

Влияние плазмодинамики натриевого разряда на спектральные характеристики излучения

С. В. Гавриш

Теоретически проанализированы основные направления улучшения индекса цветопередачи натриевого разряда высокого давления. Проведено сравнение спектральных характеристик натрий-ртутного столба в импульсном режиме и при работе на переменном токе. Исследовано влияние на радиационные характеристики излучения импульсных натриевых ламп повышения давления ксенона, введения в разряд рубидия и цезия.

PACS: 07.50.-e

Ключевые слова: натриевый разряд, импульс, плазма, цезий, рубидий, ксенон, спектр излучения, световая отдача, резонансные линии, D-линии натрия.

В настоящее время натриевые лампы высокого давления (НЛВД), работающие на переменном токе, нашли широкое применение только для уличного освещения [1]. В состав наполнения таких ламп, кроме натрия, входят ртуть (60—80 мас. %) и ксенон при давлении в холодном состоянии 20 мм рт. ст. Использование излучения разряда в парах Na для внутреннего освещения помещений сдерживается двумя причинами:

- малое значение индекса цветопередачи R_a , обусловленное сосредоточением основной доли энергии излучения в желто-оранжевой области спектра, что затрудняет зрительное восприятие объектов. Это связано с низкой цветовой температурой натриевых ламп $T_{\text{цв}} = 1950\text{—}2100$ К. В то время как согласно требованиям международного стандарта по освещению источник света должен иметь R_a не ниже 60—70 и $T_{\text{цв}} = 2700\text{—}3000$ К;

- низкая экологичность НЛВД, так как в состав наполнения лампы входит ртуть.

Данная работа посвящена изучению путей улучшения цветности, а именно, изменения спектрального состава излучения за счет использования импульсного режима электрического питания безртутных ламп и введения в состав наполнения других щелочных металлов.

Теоретический анализ

Спектр излучения НЛВД в видимой области состоит из самообращенных и сильно уширенных D-линий натрия (589,0 и 589,6 нм). В качестве примера на рис. 1 показано полученное в данной

работе спектральное распределение излучения серийно выпускаемой лампы OSRAM VIALOX NAV-T 400.

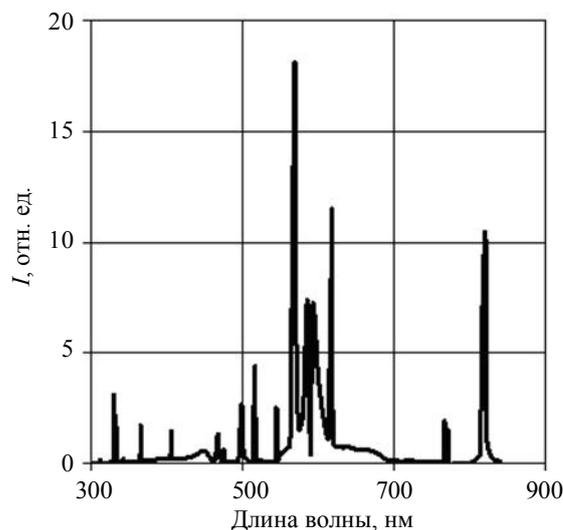


Рис. 1. Спектр излучения лампы NAV-T 400 в номинальном режиме работы

В данном случае цветовая температура составляет $T_{\text{цв}} \approx 2100$ К при координатах цветности $X \approx 0,510$; $Y \approx 0,410$ [1]. В результате этого общий индекс цветопередачи у таких ламп равен $R_a \approx 23$. Рассчитанная по методике, рассмотренной ниже, световая отдача (СО) НЛВД типа NAV-T 400 имеет величину 115 лм/Вт при номинальной мощности 400 Вт.

Согласно выводам работы [2], баланс мощности натриевого разряда распределяется на приэлектродные потери (6 %), видимое излучение (30 %), УФ- и ИК-излучение (20 %), безызлучательные тепловые потери в плазменном столбе (44 %).

При этом в желто-оранжевой области спектра (560—610 нм) сосредоточено 70 % видимого излучения. Очевидно, что для улучшения цветовых

Гавриш Сергей Викторович, начальник НПК.
ЗАО «СКБ "ЗЕНИТ"».
Россия, 124460, Москва, Зеленоград, Панфиловский проспект, 10.
E-mail: svgavr@list.ru

Статья поступила в редакцию 21 октября 2010 г.

характеристик ламп необходимо добиваться увеличения энергии излучения в сине-зеленой и красной областях спектра.

Усовершенствование качественных характеристик излучения НЛВД (R_a и $T_{цв}$) может быть достигнуто следующими способами [1]:

- увеличением давления паров основных компонентов (натрия, ртути);
- повышением давления инертного газа (ксенона);
- увеличением диаметра разрядной трубки;
- нанесением на внешнюю колбу различных люминофорных и интерференционных покрытий;
- импульсным питанием НЛВД;
- введением в разряд различных добавок.

В данной работе внимание будет акцентировано на рассмотрении влияния импульсного режима питания ламп на теплофизические процессы в многокомпонентной (Na—Xe; Na—Rb—Xe; Na—Cs—Xe) плазме и, следовательно, на спектральные характеристики излучения разрядного столба.

Питание НЛВД импульсным током повышенной частоты не требует изменения конструкции и технологии изготовления ламп и поэтому является скорее аппаратным способом улучшения качества цветопередачи. В этом случае наблюдается рост мощности излучения в сине-зеленой части спектра и появляются слабые линии ртути. При этом интенсивность D-линий натрия заметно падает по абсолютной величине. Это объясняется увеличением степени ионизации Na за счет роста тока и, как следствие, повышением осевой температуры разряда T_o . Расчетные оценки, проведенные в [3], показывают, что возрастание степени ионизации с 6 % при $T_o = 4200$ К до 34 % при $T_o = 5400$ К существенно снижает концентрацию нейтральных атомов, излучающих D-линии. Понятно, что осевая температура и, соответственно, значение цветовой температуры зависят от частоты, скважности и формы импульсов тока [4].

Одним из наиболее часто применяемых в настоящее время многими зарубежными фирмами способов улучшения цветопередачи НЛВД является повышение давления ксенона в разрядной трубке лампы. В этом случае, кроме улучшения цветопередачи на 5—10 %, увеличивается световая отдача лампы. Это объясняется уменьшением теплопроводности плазмы, трансформацией температурного профиля разряда, связанного с ростом осевой температуры [3]. Интересной особенностью этого способа является то, что при увеличении давления ксенона примерно в 20 раз $T_{цв}$ остается практически неизменной. Зажигание НЛВД с повышенным давлением ксенона ($U_3 = 10—15$ кВ) обычно обеспечивается с помощью специальной

схемы или вспомогательными электродами, проводящими полосами и т. п. [1].

Для улучшения качества цветопередачи натриевых ламп можно в разряд дополнительно вводить вещества, которые подобно Na имеют низкий уровень возбуждения. Однако используемые элементы должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- линии излучения добавки должны лежать в сине-зеленой и красной областях спектра;
- интересующие нас линии должны иметь низкие потенциалы возбуждения;
- давление паров металла-добавки при рабочих температурах должно быть достаточным для получения необходимой интенсивности интересующих линий;
- введение новых веществ в разряд не должно приводить к значительному снижению давления паров Na;
- количество вводимой добавки должно быть минимальным;
- инертность по отношению к материалам оболочки и электродных узлов;
- стабильность электрических и световых параметров ламп с добавками во времени;
- технологичность при изготовлении и дозировке.

В наибольшей степени перечисленным требованиям удовлетворяют щелочные металлы K, Rb, Cs. Введение двух последних в натриевый разряд предпочтительнее, так как они, имея атомные веса, соответственно, 85,5 и 132,9, обладают низкими потерями на теплопроводность. При высоком давлении пара p_n рубидий и цезий могут заменить ртуть как буферный газ, несмотря на то, что резонансные линии у Rb (780/789 нм) и Cs (859/894 нм) лежат в ИК-области. Однако давление паров у этих металлов значительно выше, чем у Na, и при очень высоких p_n резонансные линии в значительной мере поглощаются, и ИК-составляющую возможно довести до исчезновения. При этом возникает большое число полос молекулярного излучения, что приводит к улучшению цветопередачи.

Таким образом, в данной работе необходимо рассмотреть возможность исправления цветности излучения разряда путем использования импульсного режима работы и введения в состав наполнения ламп Cs и Rb.

Методика исследований

Спектральные измерения всех рассматриваемых в данной работе разрядных ламп проводились на дифракционном монохроматоре МДР-23, выходной световой сигнал с которого преобразовыв-

вался в электрический с помощью фотоэлектронных умножителей ФЭУ-100 (диапазон длин волн 200—500 нм) и ФЭУ-62 (400—1000 нм) и регистрировался цифровым осциллографом С9-8. Излучение лампы проецировалось на входную щель монохроматора кварцевой линзой ($f = 360$ мм), расположенной на удалении двойного фокусного расстояния. Это позволяло получать изображение разрядного канала на входе монохроматора в истинных размерах.

Импульсы тока и напряжения регистрировались цифровым осциллографом С9-8 с помощью безындуктивного токового шунта и делителя 1000:1, соответственно.

Световые измерения проводились посредством фотометра Ф-005 в режиме измерения освещенности E . Сила света источника I перпендикулярно оси разряда рассчитывалась по известной формуле $I = EL^2$, где L — расстояние от источника света до фотоприемника. Для облегчения расчета все используемые в данной работе фотоприемники располагались на удалении 1 м от оси разряда, 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. Значения Ω в видимом диапазоне рассчитывались по полученным индикатрисам методом зональных телесных углов [5] с шагом линейного угла 10° по формуле

$$\Omega = 4\pi \sin \Delta\theta \sum_{\Delta\theta}^{\pi-\Delta\theta} f(\theta) \sin \theta,$$

где $f(\theta)$ — текущее значение индикатрисы для угла θ , отн. ед.

По полученным индикатрисам в видимом диапазоне был рассчитан эквивалентный телесный угол излучения исследуемых ламп — $\Omega = 11,01$ ср. Таким образом, световой поток испытываемых ламп равен $\Phi = 11,01 \cdot I$, а светоотдача $Q = \Phi/P_{л}$, где $P_{л}$ — электрическая мощность.

Индекс цветопередачи характеризует влияние спектрального состава излучения источника на зрительное восприятие цветности объектов по сравнению с восприятием их при освещении эталонным источником. Методика расчета R_a весьма сложна [6]. На данном этапе исследований она может быть заменена сравнением мощности излучения серийно выпускаемой НЛВД и экспериментальных ламп в нескольких специально выделен-

ных спектральных диапазонах $\Delta\lambda$. В работе разбиение видимого диапазона производилось посредством интерференционных фильтров, коэффициенты пропускания которых приведены на рис. 2.

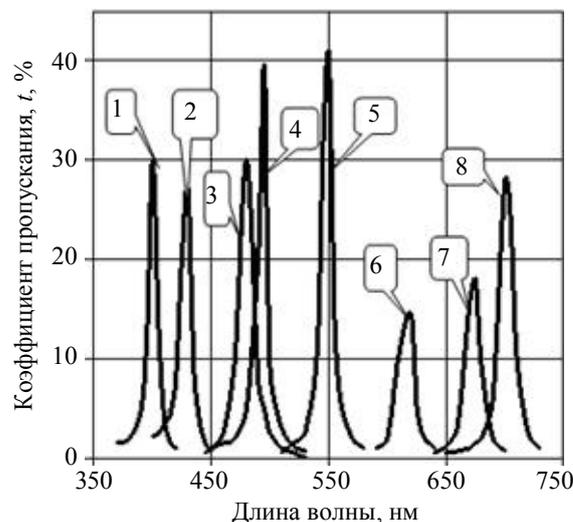


Рис. 2. Спектры пропускания интерференционных фильтров с максимумом при $\lambda = 400$ (1); 430 (2); 480 (3); 495 (4); 550 (5); 620 (6); 680 (7); 700 (8) нм

Импульсное питание ламп осуществлялось от источника питания прямоугольными импульсами напряжения с регулируемой амплитудой и длительностью. 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.

Параллельно лампе подключался блок "дежурной дуги", обеспечивающий проводящее состояние плазмы в промежутках между силовыми импульсами тока. В нашем случае использован импульсный стабилизатор тока ($I_{дд} = 1,0$ А) в диапазоне выходных напряжений $U_{дд} = 50—360$ В.

В наших экспериментах выход в номинальный режим работы импульсной натриевой лампы производился путем плавного повышения электрической мощности. Это связано со следующими обстоятельствами. Сразу после зажигания лампы разряд происходит в инертном газе, заполняющем горелку при низком давлении. Поэтому в момент зажигания сопротивление плазмы мало и, если сразу подать на лампу номинальную электрическую мощность от источника питания, происходит значительный перегрев внутренней сапфировой оболочки, что часто приводит к разрушению лампы.

Экспериментальные результаты

Импульсный разряд в парах натрия с ртутью

Для исследования процессов в натриевой плазме при работе в импульсном режиме серийная лампа NAV-T 400 была подключена к экспериментальному блоку электрического питания. В экспериментах на натриевый источник света подавались прямоугольные импульсы напряжения $U = 200$ В длительностью $t = 280$ мкс при частоте следования токовых импульсов 425 Гц. В промежутках между импульсами поддерживался проводящий канал постоянного тока в 1 А (режим "дежурной дуги").

Полученная осциллограмма тока (рис. 3, кривая 1) показала, что в течение 100 мкс наблюдается параболическое повышение тока с 1 до 10 А, переходящее в нарастание до 44 А по линейному закону. Этот факт свидетельствует о том, что в течение 100 мкс происходит расширение разряда по радиусу, сосредоточенного у оси канала дежурной дуги. Столь медленное формирование плазменного столба обусловлено безызлучательными потерями энергии электронами на теплопроводность. В результате этого происходит рост температуры оболочки, о чем свидетельствует интенсивность свечения разрядной трубки в момент выключения лампы. Следовательно, в процессе работы лампы увеличиваются температура самой холодной точки и давления паров в разряде. Этот факт подтверждается повышенным напряжением дежурной дуги $U_{\text{дд}} = 135$ В, которое, согласно данным [7], является определяющей характеристикой давления паров. Дальнейший ход кривой тока обусловлен термической ионизацией, приводящей к повышению концентрации электронов.

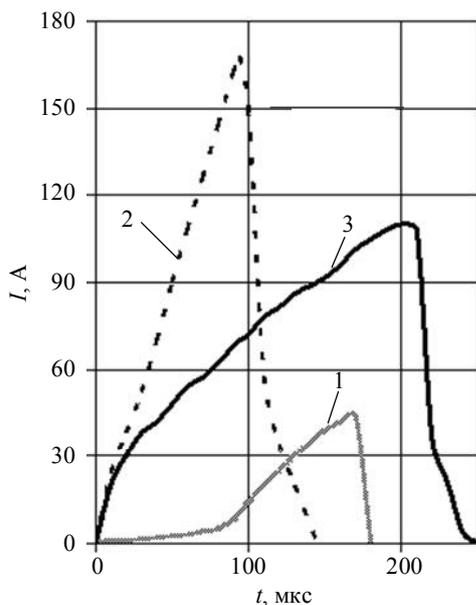


Рис. 3. Осциллограммы импульса тока лампы NAV-T 400 (1) и экспериментальной натрий-ксеноновой лампы в режимах 1 (2) и 2 (3)

Увеличение давления наполнения приводит к трансформации спектра излучения натриевого разряда (см. рис. 1 и рис. 4). Как и предполагалось, при импульсном питании в спектре Na—Hg разряда виден существенный рост излучения в синезеленой части спектра, обусловленный появлением линий ртути 365,5 нм ($6^3D—6^3P$ переход [1]); 404,7 и 435,7 нм ($7^3S—6^3P$), 577,0 и 579,0 нм ($6^3D—6^1P$). У натриевых излучательных переходов наблюдаются снижение интенсивности D-линий и рост мощности свечения с более высокоэнергетических уровней 616,0 и 820 нм.

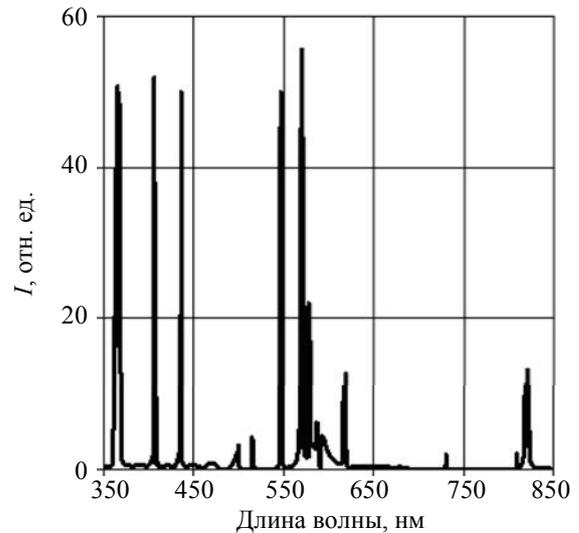


Рис. 4. Спектр излучения лампы NAV-T 400 в импульсном режиме работы при $P_{\text{д}} = 280$ Вт

Исследование безртутных натриевых ламп

Лампы, задействованные в исследовании, имели диаметр разрядного канала 7 мм, межэлектродное расстояние 60 мм (далее 7/60) и наполнение 3 мг натрия и 100 мм рт. ст. ксенона. В качестве оболочки разрядного объема использована сапфировая трубка, соединяемая с ниобиевыми электродными узлами посредством стеклокерамического цемента. Особенность разработанной конструкции — отсутствие внешней оболочки. Для защиты ниобия от окисления использованы колпачки из сплава 29НК, соединяемые с сапфиром пайкой медным припоем. Источник света работал при мощности 600 Вт в импульсно-периодическом режиме со средней частотой 425 Гц. При этом изучались два режима электрического питания:

- напряжение на лампе $U = 170$ В и время открытия транзисторного ключа $t = 92$ мкс;
- $U = 100$ В и $t = 208$ мкс.

Полученные результаты см. на рис. 3 и 5. Как следует из приведенных данных, спектральный состав импульсного натрий-ксенонового разряда существенно отличается от спектра натрий-ртутной лампы (см. рис. 1):

- в сине-голубой и ИК-областях наблюдаются интенсивные линии ксенона;
- у натриевого D-дублета 589,59/589,99 нм отсутствует самообращение;
- увеличение длительности приводит к возрастанию интенсивности отдельных линий;
- из осциллограмм импульсов тока (см. рис. 3) следует, что расчетное значение сопротивления разряда в максимуме тока (квазистационарная стадия разряда) составляет 1,05 Ом (режим 1) и 0,91 Ом (режим 2).

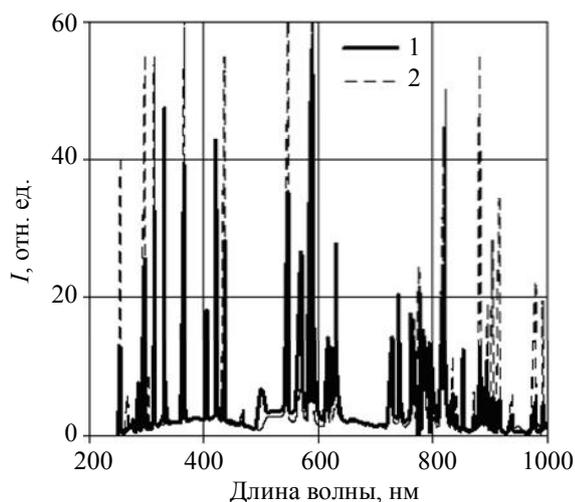


Рис. 5. Спектральное распределение излучения импульсной натриевой лампы при работе лампы в режимах 1 (1) и 2 (2)

В спектральном составе излучения Na—Xe-разряда можно выделить три группы линий:

1. Хе I: 366,9 нм (энергия возбуждения уровня 11,82 эВ); 437,5 нм (11,27 эВ); 438,5 нм (11,27 эВ); 590,4 нм (11,62 эВ); 617,8 нм (11,58 эВ); 631,8 нм (11,56 эВ); 728,5 нм (11,49 эВ); 780,0 нм (11,27 эВ).

2. Хе I: 881,9 нм (9,72 эВ); 895,2 нм (9,82 эВ); 916,2 нм (9,79 эВ); 979,9 нм (9,57 эВ); 992,3 нм (9,69 эВ).

3. Хе II: 297,9 нм (17,35 эВ); 405,7 нм (16,93 эВ); 421,3 нм (17,86 эВ); 590,4 нм (11,62 эВ).

Появление интенсивных линий ксенона можно объяснить повышением осевой температуры разряда до 6000 К [1]. Подтверждением данного факта является возрастание проводимости исследуемого разряда с переходом от режима 1 к режиму 2 и связанный с этим рост интенсивности линий ксенона в сине-голубой и ИК-областях.

Разряд в парах натрия с другими щелочными металлами

Еще одним способом исправления цветности натриевого разряда является введение в разряд других щелочных металлов. На рис. 6 и 7 приве-

дены спектры излучения натрий-рубидиевого и натрий-цезиевого разрядов при работе лампы в импульсно-периодическом режиме электрического питания. Испытываемые лампы имели конструктивное исполнение, рассмотренное в предыдущем разделе. Дозировка металла-добавки рассчитывалась таким образом, чтобы его давление над сплавом натрий-металл не превышало 10 мм рт. ст.

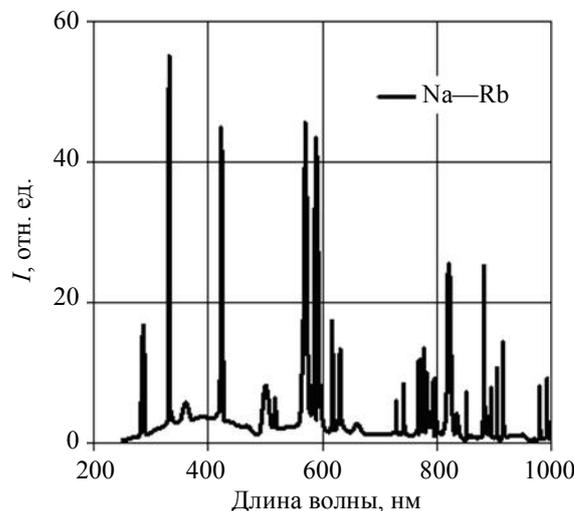


Рис. 6. Спектральное распределение излучения натриевого разряда в смеси с рубидием при электрической мощности $P_d = 700 \text{ Вт}$

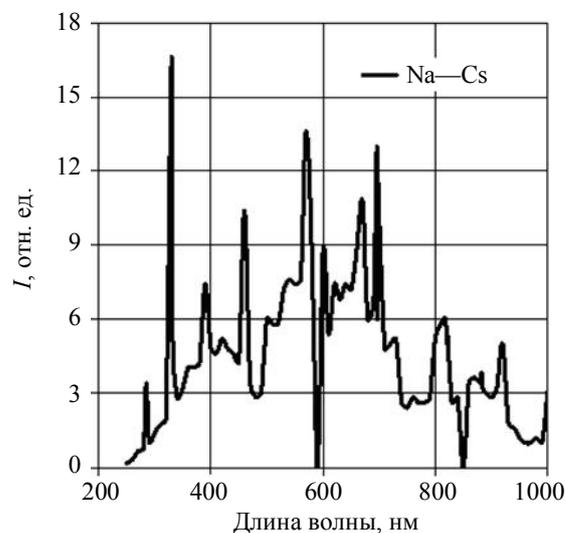


Рис. 7. Спектр излучения натриевого разряда в смеси с цезием при $P_d = 700 \text{ Вт}$

Как следует из рис. 6, введение рубидия в разряд привело к появлению нескольких линий в ИК-области. Однако характер излучения натриевого разряда остался неизменным. Основное излучение сосредоточено в D-дуплете натрия, и повысилась мощность излучения 4^2p-3^2s перехода (см. схему энергетических уровней атома натрия [1]).

Введение в разряд паров цезия (см. рис. 7) привело к существенной трансформации спектрально-

го распределения излучения натриевой плазмы: наблюдается уширение самобращенных D-линий натрия, т. е. цезий выполняет функции ртути как буферного наполнения; у цезия также наблюдается реабсорбция резонансной линии, что свидетельствует о его повышенном давлении.

В результате указанных явлений наблюдается возрастание непрерывного фона на протяжении всей видимой части оптического диапазона. Это связано с повышением концентрации электронов и, соответственно, с увеличением роли механизмов рассеяния энергии на нейтральных атомах и ионах.

Изменение цветности рассмотренных разрядов представлено в таблице.

Тип разряда	Режим	СО, лм/Вт	Тип интерференционного фильтра, λ_{\max} , нм							
			400	425	480	495	550	625	675	720
Na—Hg	Переменный	115,0	49	400	137	134	1760	124	147	89
Na—Rb	Импульсно-периодический	36,7	350	360	570	580	1370	400	150	260
Na—Cs	То же	30,0	260	480	650	460	1450	590	560	780

Из таблицы следует, что введение Rb и Cs в натриевый разряд приводит к четырехкратному снижению светоотдачи и равномерному распределению мощности по видимому диапазону. Как показывают исследования [8] (проведенные при участии автора), в цезиевом импульсно-периодическом разряде удается создать плазму с температурой на оси 5500—6500 К и концентрацией 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 длинноволновую сторону. В результате этого спектр Na—Cs разряда приближается к непрерывному.

Заключение

Приведенные исследования показали, что при создании источников света на основе разряда в парах щелочных металлов исправленной цветности весьма перспективным является натриевый разряд в смеси с ксеноном при повышенном давлении и парами цезия. Однако приведенные результаты показывают только пути дальнейшего совершенствования натриевых ламп. Как уже было показано в работе [4], во всех рассмотренных случаях требуется глубокая проработка режимов электрического питания ламп, связанная с определением оптимальных значений длительности и скважности импульсов тока. Одновременно потре-

буется доработка конструкции лампы в части обеспечения эффективного соотношения давлений компонентов. В настоящее время проводятся экспериментальные работы в данном направлении.

Л и т е р а т у р а

1. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Wharmby D. O. // J. Appl. Phys. 1984. V. 17. P. 367.
3. Рохлин Г. Н. // Светотехника. 2001. № 3. С. 2.
4. Dakin J. T., Rautenberg T. H. // J. Appl. Phys. 1984. V. 56. No. 1. P. 118.
5. Сапожников Р. А. Теоретическая фотометрия. — М.: Энергия, 1977.
6. Справочная книга по светотехнике/ Под ред. Ю. Б. Айзенберга. 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат. 1995.
7. Bayha William T., Creedon John E., Schneider Sol. // IEEE-Trans. Electron Devices. 1970. V. 17. No. 8. P. 612.
8. Бакуит Ф. Г., Гавриш С. В., Лапшин В. Ф. и др. // Прикладная физика. 2009. № 4. С. 83.

Influence of plasma dynamics of a sodium discharge on the radiation spectrum

S. V. Gavrish

Special Design Office "Zenit", 8/5 Panfilov str., Zelenograd, Moscow, 124489, Russia
E-mail: svgavr@list.ru

Influence of plasma dynamics on spectral characteristics of radiation has been researched for sodium discharge bulbs.

PACS: 07.50.-e

Keywords: sodium discharge, pulse, plasma, cesium, rubidium, xenon, radiation spectrum, luminous efficiency.

Bibliography — 8 references.

Received October 21, 2010

* * *