УДК 621

БЕЗРТУТНЫЕ ЦЕЗИЕВЫЕ ЛАМПЫ ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАЗРЯДА (ИПР) ДЛЯ ОСВЕЩЕНИЯ

Богданов А.А.[1], Гавриш С.В.[2], Марциновский А.М.[1], Столяров И.И.[1]

[1]Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург, Российская Федерация
[2]ООО «Научно производственное предприятие «Мелитта»
Москва, Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация. Оветительные цезиевые лампы ИПР экологически безопасны, имеют высокое качество света, недороги и достаточно энергоэффективны (до 60–70 лм/Вт). Это позволит им конкурировать и с газоразрядными лампами, и со светодиодами. А для систем освещения с одновременным профилактическим УФ облучением для компенсации УФ недостаточности в высоких широтах они вне конкуренции.
Ключевые слова: цезий, импульсно-периодический разряд, светоотдача, профилактическая доза УФ.

MERCURYLTSS CESIUM LAMPS OF THE PULSE-PERIODIC DISCHFRGE

Bogdanov A.[1], Gavrish S.[2], Martsinovsky A.[1], Stolyarov I.[1]

[1]Ioffe Institute
St-Petersburg, Russian Federation
[2]Scientific and Production Enterprise "Melitta", Ltd
Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract. Cesium lighting PPD lamps are environmentally friendly, inexpensive, have a high quality of light fnd a relatively light output up to 60–70 lm/W. This allows them to compete with both gas discharge lamps and LEDs. And they are unrivaled for lighting systems with simultaneous preventive UV irradiation to compensate the UV deficiency in high latitudes.
Key words: cesium, pulse-periodic discharge, light output, prophylactic UV dose.

Адрес для переписки:Гавриш С.В., ул. Миклухо-Маклая,16/10, Москва 117997, Российская Федерация
e-mail: svgavr@list.ru

Актуальность. Создание эффективного и экологически чистого источника света, позволяющего путем прямой замены в эксплуатируемых осветительных приборах газоразрядной лампы и электронной пуско-регулирующей аппаратуры является актуальным техническим решением. При этом достижение высокой светооотдачи при максимальном индексе цветтопередачи лампы расширяет сферы применения источника света.

Особенности цезиевого ИПР. У атома Cs 6P и 5D рекомбинационные континуумы с сечением рекомбинации, на порядок превышающим таковые других щелочных атомов, создают непрерывный спектр в области при λ< 600 нм (рис. 1).

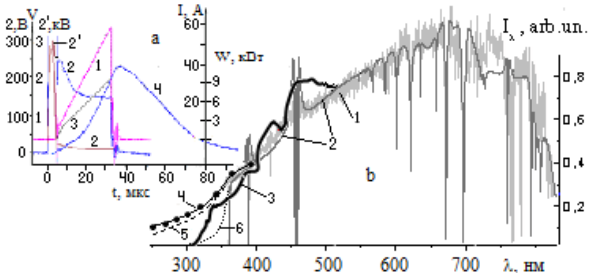

Рисунок 1 – *a* – осциллогрммы тока (*1*), напряжения (*2*, *2'*), мгновенной мошности (*3*) и освещенности (*4*) в импульсе; *b* – нормированные на λ = 550 нм снятый (*1*) и рассчитанный (*2*) спектры лампы и солнечный спектр (*3*), экстраполяция континуума в УФ область (*4*) и ее ослабление увиолевым стеклом колбы (*5*, *6*)

Это обеспечивает «солнечное» качество света с индексом цветопередачи *Ra* = 90–98. Так как скорость рекомбинации пропорциональна n^2, для высокой светоотдачи η необходима плазма с концентрацией n ~10^{17}–10^{18} см$^{-3}$, тогда почти вся видимая световая энергия выносится в континуумах, но при этом возрастает тепловая нагрузка на поверхность разрядной трубки (горелки). Нагрев оболочки горелки не позволяет достичь высокого давления паров цезия, и как слествие, значительной светоотдачи. По этой причине цезиевые осветительные лампы не получили распространения, хотя и были апробированы одновременно с НЛВД [1]. Режим ИПР за счет большой скважности импульсов тока позволяет получить нужную концентрацию в импульсе при допустимой средней мощности разряда и дает возможность реализовать преимущества цезиевого наполнения. Благодаря низкому потенциалу ионизации атома Cs (3,89 эВ) и высокой скорости ступенчатой ионизации плотная сильноионизованная плазма получается с минимальными затратами энергии. Большие сечения упругого рассеяния электронов и ионов обеспечивают низкую теплопроводность между осью разряда и стенкой горелки и достаточно высокое падение напряжения на положительном столбе без буферного газа – ртути Адсорбция атомов Cs на электродах обеспечивает термоэмиссионные токи до сотен А/см^2 без катодных пятен, важно для большого срока службы цезиевых ламп.

Начальные исследования. Первоначально в ФТИ была развита детальная теория цезиевого ИПР, показавшая что при давлениях цезия P_{Cs} порядка сотен Торр и импульсных токах в сотни А/см^2 до 95 % вложенной в разряд энергии должно выносится из плазмы излучением, что обеспечивает светоотдачу столба плазмы до 75–85 лм/Вт (60–70 лм/Вт для лампы) [2]. Но в первых экспериментальных работах были получены заметно меньшие светоотдачи,всего 45 лм/Вт [3, 4]. Для устранения наблюдаемого расхождения потребовалиись дополнительные исследования.

Методика. Исследовались лампы с сапфировыми горелками (вутренний диаметр $2r = 5$ мм) и внешней вакуумированной кварцевой колбой как отпаяные, так и откачные с выводом термопары с холодной точки горелки для приближенного определения P_{Cs}. Электроды диаметром 2–2,5 мм стандартные витые из торированого W, межэлектродное расстояние $L = 55$ и 22 мм. Питание от генератора тока с максимальным напряжением 3 кВ биполярными импульсами линейно-нарастающего тока (рис. 1, *b*) длительностью $\tau = 10$–50 мкс, амплитудой $J_m = 10$–150 А и частотой $f = 100$–1500 Гц, дежурный ток до 1,5 А. Регистрировались осциллограммы напряжения, тока и освещенности перпендикулярно оси лампы на расстоянии 1м >> L, что позволяло определить энерговклад и интегральный видимый световой поток в импульсе, частоту, мощность лампы и при измеренном эффективном телесном угле лампы ($\Omega_{эф} = 11{,}2$), средний по времени полный световой поток и светоотдачу. Спектральные измерения проводились стробинтегратором.

Светоотдача. Она измерялась в зависимости от средней мощности разряда W, менявшейся за счет частоты при постоянной амплитуде импульса тока J_m (рис. 2). На рис. 2 для «длинной» горелки с термопарой приведены соответстствующие значения P_{Cs}.

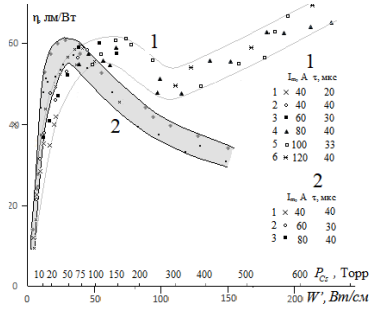

Рисунок 2 – Зависимость η(W) для ряда исследованных режимов ламп с длинной (1) и короткой (2) горелками

Видно, что амплитуда и длительность токового импульса, в согласии с теорией [5], в изученном интервале слабо влияют на светоотдачу – в отличие от P_{Cs}. Начальный быстрый рост η при малых давлениях связан с быстрым ростом концентрации на оси разряда, где плазма полностью иони-зована. Замедляет рост реабсорбця континуумов в периферийных областях, и при радиальной оптической плотности ~1 наблюдается максимум при $P_{Cs} \approx 75$–100 Торр. Это несколько меньше, чем оптимальное давление Na в НЛВД, что обусловлено, скорее всего, разным характером реабсорбции континуумного и резонансного излучения. Повидимому, по этой же причине светоотдача цезиевых ламп растет с уменьшением внутреннего диаметра горелки. Немонотонный спад зависимости η(P) для длинной горелки связан с наблюдавшейся визуально контракцией анодного столба, локализующегося при этом на стенке горелки, что резко уменьшает радиальную оптическую плотность. Это вызывает повторный рост светоотдачи с мощностью (давлением), Для короткой горелки распределенный разряд наблюдался лишь при удельных мощностях W', 5 Вт/см, для остальной кривой η(W) диаметр светящегося разрядного шнура определяется диаметром электродов, локализован по центру горелки и не касается стенок, и повторный рост светоотдачи не наблюдался.

Перспективы применения. Достигнутый уровень светоотдачи делает цезиевые лампы конкурентоспособными по отношению к газоразрядным осветительным лампам (экологическая безопасность, качество света) и даже светодиодам. Но наибольший эффект их применение должно дать при создания систем внутреннего освещения с дозированным ультрафиолетовым излучением в *A* и *B* поддиапазонах для компенсации УФ дефицита зимой в высоких широтах [6]. Оценки показывают, что близкий к солнечному рекомбинационный спектр цезиевых ламп в УФ области (рис. 1) позволит заменить в существующих системах осветительные и эритемные люминесцентные лампы (ЛЭ, ЛЭР) с уменьшением потребляемой мощности. Более того, изменение соотношения УФ и видимого света с режимом ИПР и пропусканием колбы (рис. 1, *b*) делает возможным разработку цезиевых ламп прямой замены для бытового внутреннего освещения с профилактической дозой УФ излучения.

Литература

1. Лампы на парах металла : пат. US 2971110 / K. Schmidt. – Опубл. 1959.

2. Бакшт, Ф. Г., Лапшин, В. Ф. // Усп. Прил. Физ., 2017. – Т. 5, № 6. – С. 525.

3. Plasma Sources Sci. Technol / H. Gu, [et al.]. – 2001. – Vol. 10.

4. Pichler G, Živčec V, Beuc R, MrzljakŽ, Ban T, Skenderović H, Gunther K and Liu J // Phys. Scr. – 2003. – Vol. T105. – P. 98–100.

5. Бакшт, Ф. Г., Лапшин, В. Ф., Шиман, А. С. // Светотехника, 2005. – № 3. – С. 20–22.

6. Ненахова, Е. В. УФ излучение. Вляние УФ излучения на организм человека / Е. В. Ненахова, Л. А. Николаева. – Иркутск, ИГМУ, 2020.