

Характеристики бесферритного индуктивного ртутного разряда низкого давления в замкнутой кварцевой трубке

П. В. Старшинов, О. А. Попов, И. В. Ирхин, В. А. Левченко, В. Н. Васина

Проведено экспериментальное исследование электрических и излучательных характеристик ртутного бесферритного индуктивного разряда в лампе, образованной замкнутой кварцевой трубкой с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 25$ мм. Разряд возбуждался на частоте $f = 1,7$ МГц в смеси паров ртути ($\sim 10^2$ мм рт. ст.) и аргона (1,0 мм рт. ст.) с помощью трехвитковой индуктивной катушки, размещенной по «внутреннему» периметру лампы длиной 500 мм и высотой 130 мм. Измерения, проведенные в интервале мощности плазмы $P_{\text{pl}} = 52\text{--}112$ Вт, показали, что ток катушки индуктивности $I_{\text{с}}$, мощность потерь в проводе катушки P_{coib} и средняя по сечению разрядной трубки напряженность ВЧ электрического поля в плазме $\bar{E}_{\text{рб}}$ минимальны, а разрядный ток лампы $I_{\text{рл}}$ и КПД генерации УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм $\eta_{\text{лам}} = \Phi_{254}/P_{\text{лам}}$ максимальны при мощности плазмы $P_{\text{pl}} = 85\text{--}90$ Вт. Поток УФ-излучения лампы Φ_{254} и КПД генерации УФ-излучения плазмы $\eta_{\text{пл}} = \Phi_{254}/P_{\text{пл}}$ возрастают практически линейно с увеличением мощности плазмы от 28 до 72 Вт и от 0,52 до 0,65 соответственно.

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, индукционный разряд, ртутная плазма низкого давления, индуктивная катушка.

Введение

Индукционные ртутные газоразрядные лампы низкого давления являются перспективным источником оптического излучения в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне длин волн [1–6]. Благодаря отсутствию внутренних электродов, они могут работать на относительно низких давлениях инертного газа 0,05–0,5 мм рт. ст., на которых достигается максимум генерации УФ-излучения ртутной плазмы на длинах волн 185 и 254 нм [3, 4, 6]. Это открывает возможность создания в широком интервале мощностей эффективных источников УФ резонансного излучения, используемого в ка-

честве бактерицидной лампы для очистки воды и воздуха.

Особый интерес представляют бесферритные индукционные источники оптического излучения, в которых ртутная плазма низкого давления возбуждается в замкнутых трубках с помощью индуктивной катушки, размещенной по периметру трубки, внешнему или внутреннему [7–9]. Такая конструкция лампы позволяет избежать применения дорогостоящих и хрупких кольцевых ферритовых магнитопроводов, снижающих надежность работы лампы и повышающих ее себестоимость.

В работах [7–9] приведены результаты экспериментальных исследований электрических и светотехнических характеристик осветительных ламп такого типа с люминофорным покрытием на внутренней (вакуумной) поверхности стенок стеклянной разрядной трубки. В то же время в доступной нам литературе отсутствуют публикации по источникам УФ резонансного излучения, использующих плазму бесферритного индукционного ртутного разряда низкого давления, возбужденного в замкнутой кварцевой трубке с помощью катушки индуктивности.

В настоящей статье приведены результаты экспериментальных исследований электрических и излучательных характеристик индукционного ртутного разряда низкого давления, возбужденного в замкнутой кварцевой разрядной трубке с

Старшинов Павел Валерьевич¹, аспирант.
 Попов Олег Алексеевич¹, профессор.
 Ирхин Игорь Вячеславович², вед. инженер.
 Левченко Владимир Александрович³, зам. зав. лаб.
 Васина Виктория Николаевна¹, студент.

¹ Московский энергетический институт.
 Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.
 E-mail: blitzzz-z@ya.ru; popovoleg445@yahoo.com

² Всероссийский электротехнический институт.
 Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 12.

³ НПО «ЛИТ».
 Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр 1.

Статья поступила в редакцию 14 июня 2018 г.

© Старшинов П. В., Попов О. А., Ирхин И. В., Левченко В. А., Васина В. Н., 2018

внутренним диаметром 25 мм с помощью катушки индуктивности, размещенной по «внутреннему» периметру трубки.

Экспериментальная установка и методики измерений

Индукционный разряд зажигался в замкнутой кварцевой трубке с внутренним диаметром $d_{\text{вн}} = 25$ мм. Лампа имела форму вытянутого параллелепипеда длиной $L = 500$ мм и шириной $H_1 = 130$ мм (см. рис. 1). ВЧ-напряжение подавалось от генератора ВЧ-мощности частотой $f = 1,7$ МГц на трехвитковую катушку индуктивности, изготовленную из медного провода диаметром $d_w = 2,5$ мм и размещенную по «внутреннему» периметру лампы. Давление паров ртути в разрядной трубке поддерживалось оптимальным (0,007–0,01 мм рт. ст.) по максимальному выходу УФ-излучения ртути на длине волны 254 нм, температурой ртутно-индиевой амальгамы (4% Hg), помещенной на внутренней поверхности стенки трубки. Давление буферного газа (Ar) – 1,0 мм рт. ст.

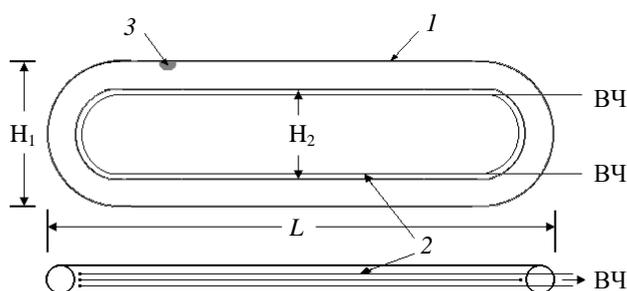


Рис. 1. Схематический эскиз бесферритной индуктивной лампы с замкнутой разрядной трубкой: 1 – разрядная трубка; 2 – катушка индуктивности; 3 – амальгама.

Измерения потока УФ резонансного излучения Φ_{254} на длине волны $\lambda = 254$ нм проводились с помощью радиометра IL1700 и фотометрической головки SED240/W с косинусной угловой характеристикой [4]. Лампа размещалась в чёрном заземлённом металлическом коробе с чёрным экраном в плоскости, перпендикулярной плоскости лампы. В коробе имелась щель шириной 30 мм в плоскости лампы. Расстояние от приемника излучения (ПИ) до щели $d = 150$ см, а от щели до лампы $\ell = 10$ см, что позволяло «вырезаемый» щелью участок лампы считать точечным источником [4]. Поток УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм рассчитывался по формуле из работы [4]:

$$\Phi_{254} = \frac{\pi^2 h d i L}{\Delta s}$$

где L – длина лампы; $h = \ell + d$ – расстояние от лампы до ПИ; i – фототок ПИ; s – интегральная чувствительность ПИ; Δs – ширина щели.

Суммарная погрешность измерений потока излучения Φ_{254} на длине волны 254 нм определялась систематической и случайной погрешностями и составляла +/- 1,5 %.

Мощность комплекта (источник питания + лампа), P_k , складывалась из мощности потерь в ВЧ-генераторе P_{gen} и мощности лампы P_{lamp} , состоящей из мощности потерь в проводе катушки P_{coil} и мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда P_{pl} . КПД генератора мощности, работающего на частоте $f = 1-5$ МГц, составлял $\eta_{gen} = 1 - (P_{gen}/P_k) = 0,9$. В работе измерялись потребляемая комплектом мощность P_k и мощность потерь в проводе катушки P_{coil} , определяемая в отсутствии разряда (метод замещения). Поскольку КПД ВЧ-генератора $\eta_{gen} = 0,9$, то мощность лампы определялась как $P_{lamp} = 0,9 P_k$. Мощность плазмы рассчитывалась как $P_{pl} = P_{lamp} - P_{coil}$. ВЧ-напряжение U_c и ток катушки I_c измерялись с помощью высоковольтного щупа, трансформатора тока и 4-канального осциллографа.

Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости ВЧ-напряжения и тока катушки индуктивности, U_c и I_c , от мощности лампы, P_{lamp} . Видно что U_c круто падает с увеличением P_{lamp} от 400 В ($P_{lamp} = 92$ Вт) до 270 В ($P_{lamp} = 110$ Вт), а далее незначительно снижается до 250 В ($P_{lamp} = 156$ Вт). Ток катушки, I_c , на относительно малых мощностях лампы уменьшается с ростом мощности от 12 А ($P_{lamp} = 92$ Вт) до своего минимального значения 9 А ($P_{lamp} = 110$ Вт, $P_{pl} = 90$ Вт), а затем возрастает до 13 А. Зависимость мощности потерь в проводе катушки $P_{coil} = I_c^2 R_w$ (здесь $R_w = 0,3$ Ом – активное сопротивление провода катушки на частоте 1,7 МГц) от мощности лампы также имеет минимум при $P_{lamp} = 110$ Вт, снижаясь от 37 до 20 Вт, а затем возрастая до 45 Вт (см. рис. 3). Соответственно, КПД катушки $\eta_{coil} = 1 - (P_{coil}/P_{lamp})$ на относительно малых мощностях лампы «быстро» растет с увеличением мощности лампы от 58 до 80 %, а на больших мощностях лампы «медленно» снижается до 70 % (рис. 3).

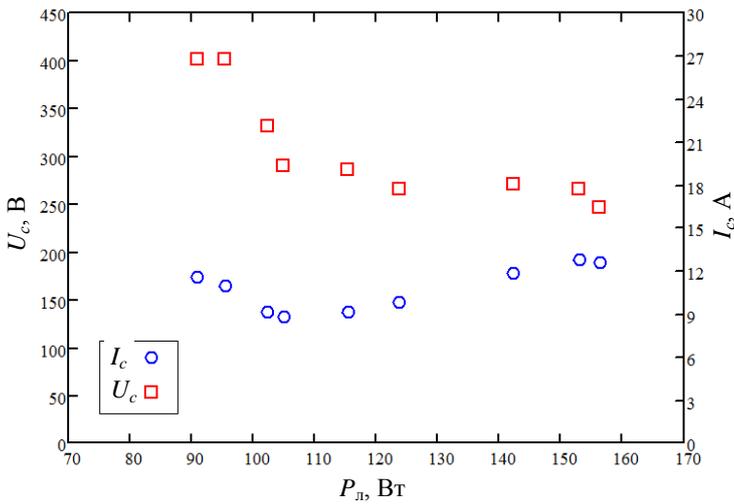


Рис. 2. Зависимости ВЧ-напряжения и тока катушки индуктивности U_c и I_c от мощности лампы P_{lamp}

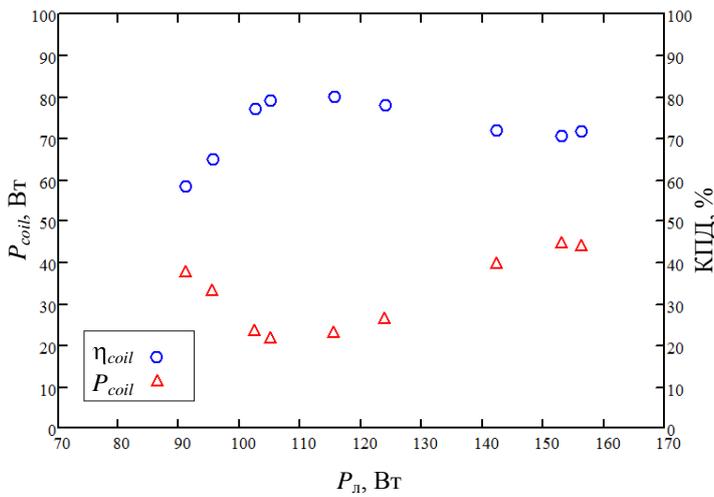


Рис. 3. Зависимости мощности потерь в проводе катушки P_{coil} и КПД катушки η_{coil} от мощности лампы P_{lamp}

Уменьшение мощности потерь в проводе катушки, P_{coil} , с ростом мощности лампы, P_{lamp} (фактически, плазмы, т. е. $P_{pl} = P_{lamp} - P_{coil}$) наблюдалось как в бесферритных индукционных лампах [3, 5, 7], так и в лампах с магнитным усилением [2, 4, 10]. Оно связано со ступенчатой ионизацией атомов ртути в плазме индукционного разряда, приводящей к снижению напряженности ВЧ электрического поля в плазме, E_{pl} , а с ней и ВЧ-напряжения на плазменном витке $U_{pl} = \bar{E}_{pl} \Lambda_{pl}$ (здесь Λ_{pl} — длина плазменного витка). В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда, уменьшение U_{pl} влечет за собой снижение ВЧ-напряжения и тока катушки U_c и I_c [7], а, следовательно, и уменьшение мощности потерь в проводе катушки P_{coil} .

«Замедление» снижения мощности потерь в проводе катушки и последующее ее возрастание с увеличением мощности плазмы связано, возможно, со скин-эффектом, возникающим в плазме индукционного разряда высокой плотности, возбужденного на частотах в сотни килогерц и выше [10, 12]. Следствием скин-эффекта становится

«выталкивание» ВЧ электрического поля из центральной области трубки к ее стенкам и сужение сечения токопроводящего слоя плазмы. В результате повышается сопротивление плазмы, уменьшается ток разряда I_{pl} и возрастает средняя по сечению трубки напряженность ВЧ электрического поля в плазме \bar{E}_{pl} [13, 14]. В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда, увеличение \bar{E}_{pl} вызывает рост тока катушки I_c , и, следовательно, мощности потерь в проводе катушки $P_{coil} = I_c^2 R_w$ [4, 7].

На рис. 4 приведены рассчитанные в рамках модели [4] зависимости напряженности ВЧ электрического поля в плазме \bar{E}_{pl} и разрядного тока I_{pl} от мощности плазмы P_{pl} . Обе зависимости немонотонны: \bar{E}_{pl} минимальна (0,7 В/см) при $P_{pl} = 85$ Вт ($P_{lamp} = 105$ Вт), а I_{pl} максимальна (12 А) при $P_{pl} = 90$ Вт ($P_{lamp} = 110$ Вт). Видно что обе зависимости хорошо коррелируют с экспериментальной зависимостью мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы (см. рис. 3).

Очевидно, что немонотонная (с минимумом при $P_{lamp} \approx 110$ Вт) зависимость P_{coil} от P_{lamp} влияет

на величину потока УФ-излучения лампы на длине волны $\lambda = 254$ нм, Φ_{254} , и на характер ее зависимости от мощности лампы, становящейся более «пологой» на $P_{pl} > 85$ Вт. В то же время, как следует из приведенной на рис. 5 зависимости Φ_{254} от мощности плазмы, поток УФ-излучения лампы монотонно (практически линейно) возрастает от 28 Вт ($P_{pl} = 52$ Вт) до 72 Вт ($P_{pl} = 112$ Вт). На рис. 5 приведены зависимости энергетической эффективности (КПД генерации УФ-излучения)

лампы $\eta_{lamp} = \Phi_{254}/P_{lamp}$ и плазмы $\eta_{pl} = \Phi_{254}/P_{pl}$ от мощности плазмы P_{pl} . (Здесь уместно отметить, что $\eta_{lamp} = \eta_{coil} \eta_{pl}$). Видно, что η_{lamp} возрастает от 32 % ($P_{pl} = 52$ Вт) до своего максимального значения 48 % ($P_{pl} = 84-90$ Вт), а затем незначительно снижается до 46 % ($P_{pl} = 112$ Вт). Совпадение минимума и максимума в зависимостях P_{coil} и η_{lamp} от мощности плазмы свидетельствует о влиянии P_{coil} на η_{lamp} .

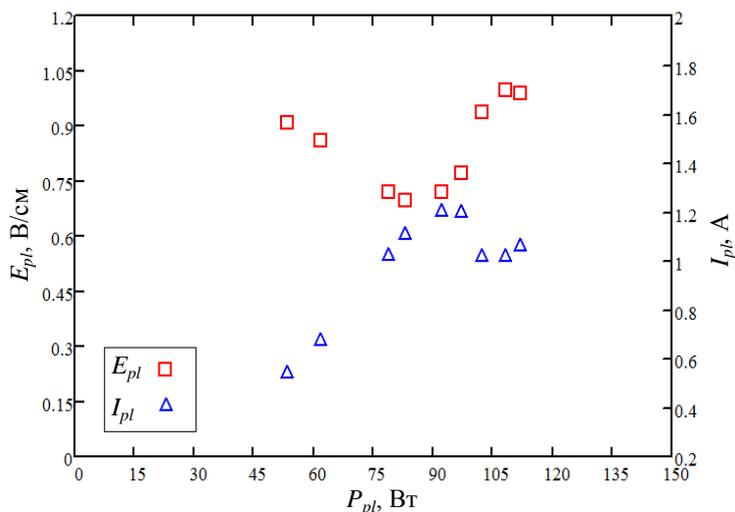


Рис. 4. Зависимости разрядного тока лампы I_{pl} и средней по сечению плазмы напряженности ВЧ электрического поля \bar{E}_{pl} от мощности плазмы P_{pl} .

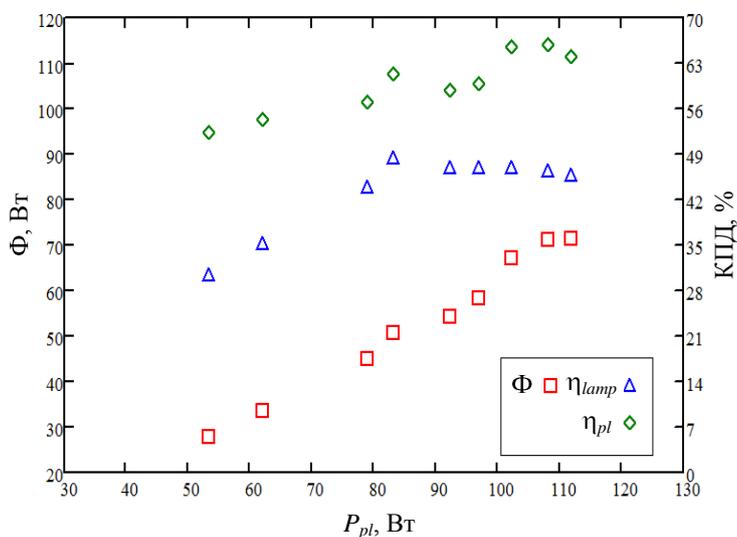


Рис. 5. Зависимости потока УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм, Φ_{254} , и КПД генерации УФ-излучения лампы и плазмы, η_{lamp} и η_{pl} , от мощности плазмы P_{pl} .

Как видно из рис. 5, КПД генерации УФ-излучения плазмы η_{pl} монотонно возрастает с увеличением мощности плазмы во всем интервале мощностей плазмы от 52 % ($P_{pl} = 52$ Вт) до 65 % ($P_{pl} = 112$ Вт) и не обнаруживает изменения характера зависимости от P_{pl} в области $P_{pl} = 80-95$ Вт, где наблюдается минимум \bar{E}_{pl} и максимум I_{pl} . Это свидетельствует об отсутствии влияния на энергетическую эффективность плазмы η_{pl} не только мощности потерь в проводе катушки, но и процессов в

плазме разряда, приводящих к росту напряженности ВЧ электрического поля в плазме и к уменьшению разрядного тока лампы (например, скин-эффекта).

Разумно предположить, что в плазме индукционного разряда низкого давления с погонной мощностью ~ 1 Вт/см и плотностью $n_e \sim 10^{12}$ см⁻³, возбужденного на частоте 1,7 МГц в трубке диаметром 2,5 см, влияние скин-эффекта на процессы генерации оптического излучения плазмы и, следова-

тельно, на КПД генерации УФ-излучения плазмы η_{pl} незначительно. Действительно при низких давлениях рабочей смеси, при которых длина релаксации энергии электронов $\lambda_e \sim 30$ см значительно превышает диаметр разрядной трубки, изменение (вследствие скин-эффекта) радиального распределения напряженности ВЧ электрического поля в плазме E_{pl} практически не влияет на функцию распределения электронов по энергиям и ее пространственное распределение. Следовательно, оно не влияет и на пространственное распределение концентраций возбужденных и заряженных частиц в плазме, а, значит, и на генерацию и поток излучения (УФ и видимого) плазмы индукционного разряда.

С прикладной точки зрения важно, что энергетические эффективности лампы и плазмы η_{lamp} и η_{pl} исследованного в настоящей работе бесферритного индукционного источника УФ-излучения в замкнутой трубке, превышают таковые в линейных бесферритных индукционных УФ-ламп, работающих с разрядными трубками такого же (или близкого) диаметра на частотах 4,0–13,56 МГц [3, 6]. Они также выше, чем η_{lamp} и η_{pl} в трубчатых электродных УФ-лампах, работающих на низких частотах $f = 20\text{--}80$ кГц [15]. Увеличения η_{pl} можно добиться, понизив давление инертного газа (аргона) до значений 0,1–0,3 мм рт. ст., при которых наблюдались максимальные КПД генерации УФ-излучения ртутной плазмы на длине волны 254 нм в лампах трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм [4].

Следует отметить, что при измерении потока УФ-излучения не учитывалась блокировка излучающей поверхности разрядной трубки витками катушки индуктивности. Поэтому реальные значения Φ_{254} , а следовательно, и КПД генерации УФ-излучения лампы и плазмы η_{lamp} и η_{pl} ниже измеренных. С другой стороны, для уменьшения мощности потерь в проводе катушки индуктивности и, соответственно, повышения η_{lamp} необходимо оптимизировать число витков катушки, обеспечивающих ее высокую добротность. Чем выше частота возбуждения индукционного разряда, тем меньше должно быть витков катушки. Например, у бесферритного индукционного разряда с длиной плазменного витка $\Lambda_{pl} \sim 80\text{--}100$ см, возбужденного на частоте $f \sim 2$ МГц, оптимальное количество витков катушки $N = 4\text{--}6$ [2, 9]. А в той же лампе, работающей на частоте $f = 12$ МГц, оптимальное число витков $N = 2\text{--}3$ [5]. Однако увеличение частоты возбуждения разряда от 2 МГц до 12 МГц снижает КПД современных генераторов ВЧ-мощности от 90 % до 80 %.

Заключение

Приведем основные результаты исследования бесферритного индуктивного ртутного разряда низкого давления, возбужденного в замкнутой кварцевой трубке диаметром 25 мм на частоте 1,7 МГц и мощности плазмы $P_{pl} = 52\text{--}112$ Вт.

– Однородный по длине трубки индуктивный разряд поддерживался ВЧ-напряжением на катушке индуктивности, U_c , уменьшавшимся с увеличением мощности плазмы от 400 до 250 В. ВЧ-ток катушки, I_c , уменьшался с ростом мощности плазмы от 12 А ($P_{pl} = 52$ Вт) до 9 А ($P_{pl} = 90$ Вт), а затем возрастал до 13 А ($P_{pl} = 112$ Вт).

– Мощность потерь в проводе катушки, P_{coil} , снижалась с увеличением мощности плазмы от 38 Вт ($P_{pl} = 52$ Вт) до 20 Вт ($P_{pl} = 85$ Вт), а затем возрастала до 47 Вт. КПД катушки индуктивности η_{coil} увеличивался от 58 % до 80 % ($P_{pl} = 85$ Вт), а на больших мощностях плазмы снижался до 70 %.

– Поток УФ-излучения плазмы на длине волны 254 нм, Φ_{254} , возрастал монотонно во всем интервале исследуемых мощностей плазмы от 28 Вт до 72 Вт, а КПД генерации УФ-излучения плазмы, η_{pl} , незначительно увеличивался от 52 до 65 %. КПД генерации УФ-излучения лампы η_{lamp} возрастал от 32 до 48 % ($P_{pl} = 83$ Вт), а затем медленно уменьшался до 46 % ($P_{pl} = 112$ Вт).

– Рассчитанная в рамках модели индукционного разряда низкого давления средняя по сечению трубки напряженность ВЧ электрического поля в плазме, \bar{E}_{pl} , уменьшалась с ростом мощности плазмы от 0,9 В/см до своего минимального значения 0,7 В/см при $P_{pl} \approx 85$ Вт, а затем возрастала до 1,0 В/см. ВЧ-ток разряда I_{pl} возрастал с увеличением мощности плазмы от 0,53 А ($P_{pl} = 52$ Вт) до 1,2 А ($P_{pl} = 90$ Вт), а на больших мощностях плазмы снижался до 1,0 А ($P_{pl} = 112$ Вт).

ЛИТЕРАТУРА

1. Исупов М. В., Кротов С. В., Литвинцев А. Ю., Уланов И. М. // Светотехника. 2007. № 5. С. 37.
2. Левченко В. А., Попов О. А., Свитнев С. А., Старшинов П. В. // Светотехника. 2014. № 6. С. 39.
3. Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко В. А. // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 92.
4. Левченко В. А., Старшинов П. В., Свитнев С. А., Попов О. А., Костюченко С. В. // Прикладная физика. 2016. № 1. С. 66.
5. Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко, Старшинов П. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 139.
6. Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко, Старшинов П. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 4. С. 372.
7. Popov O. A., Chandler R. T. // Plasma Sources Science and Technology. 2002. Vol. 11. P. 218.

8. Попов О. А., Никифорова В. А. // Вестник МЭИ. 2010. № 2. С. 159.

9. Попов О. А., Старишинов П. В., Васина В. Н. // Светотехника. 2018. № 2. С. 75.

10. Попов О. А., Чандлер Р. Т. // Теплофизика высоких температур. 2007. № 4. С. 795.

11. Никифорова В. А., Попов О. А. // Вестник МЭИ. 2010. № 5. С. 114.

12. Popov O. A., Maya J. // Plasma Sources Science and Technology. 2000. Vol. 9. P. 227.

13. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.

14. Александров А. Ф., Вавилин К. В., Кралькина Е. А. и др. // Прикладная физика. 2015. № 5. С. 34.

15. Шунков Ю. Е., Попов О. А., Левченко В. А. // Вестник МЭИ. 2014. № 2. С. 71.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Characteristics of the ferrite-free low pressure mercury closed-loop inductively coupled discharge

P. V. Starshinov¹, O. A. Popov¹, I. V. Irkhin², V. A. Levchenko³, and V. N. Vasina¹

¹ Moscow Power Engineering Institute
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: blitzzz-z@ya.ru; popovoleg445@yahoo.com

² All-Russian Electrotechnical Institute
12 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: terahertz@gmail.com

³ NPO LIT
44/1 Krasnobogatyrskaya str., Moscow, 107076, Russia
E-mail: mscoff@mail.ru

Received June 14, 2018

Characteristics of the ferrite-free inductively-coupled low pressure mercury discharge excited in the closed-loop lamp made from quartz tube of 25 mm inner diameter were experimentally studied. The discharge was ignited and maintained at a frequency of 1.7 MHz and at plasma RF power of 52–112 W in the mixture of mercury vapor ($\sim 10^{-2}$ Torr) and argon (1.0 Torr) with the help of a 3-turn induction coil disposed along the closed-loop lamp inner perimeter. The explored lamp had the shape of elongated ellipsis and was of 500 cm in length and 130 cm in width. It was found that coil RF current, I_c , coil power losses, P_{coib} and plasma RF electric field, \bar{E}_{pb} , were minimal while lamp current, I_{pb} and lamp ultraviolet (254 nm wavelength) radiation efficiency, $\eta_{lamp} = \Phi_{254}/P_{lamp}$, were maximal at plasma power, $P_{pl} = 85\text{--}90$ W. Lamp UV radiation flux, Φ_{254} , and plasma UV radiation generation efficiency, $\eta_{pl} = \Phi_{254}/P_{pb}$ grew practically linearly with plasma power from 28 to 72 W, and from 52 % to 65 %, respectively.

Keywords: UV radiation, inductively coupled discharge, low pressure mercury plasma, induction coil.

REFERENCES

1. M. V. Isupov, C. B. Krotov, A. Y. Litvintsev, and I. M. Ulanov, Svetotekhnika, No. 5, 37 (2007).
2. V. A. Levchenko, O. A. Popov, S. A. Svitnev, and P. V. Starshinov, Svetotekhnika, No. 6, 39 (2014).
3. S. A. Svitnev, O. A. Popov, and V. A. Levchenko, Prikl. Fiz., No. 6, 92 (2015).
4. V. A. Levchenko, P. V. Starshinov, S. A. Svitnev, O. A. Popov, and S. V. Kostyuchenko, Prikl. Fiz., No. 1, 66 (2016).
5. S. A. Svitnev, O. A. Popov, V. A. Levchenko, and P. V. Starshinov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (2), 139 (2016).
6. S. A. Svitnev, O. A. Popov, V. A. Levchenko, P. V. Starshinov, Usp. Prikl. Fiz. **4** (4), 372 (2016).
7. O. A. Popov and R. T. Chandler, Plasma Sources Science and Technology **11**, 218 (2002).
8. O. A. Popov and V. A. Nikiforova, Vestnik MEI, No. 2, 159 (2010).
9. O. A. Popov, P. V. Starshinov, and V. N. Vasina, Svetotekhnika, No. 2, 75 (2018).
10. O. A. Popov and R. T. Chandler, High Temp., No. 4, 795 (2007).
11. V. A. Nikiforova and O. A. Popov, Vestnik MEI, No. 5, 114 (2010).
12. O. A. Popov and J. Maya, Plasma Sources Science and Technology **9**, 227 (2000).
13. Y. P. Raiser. *Gaseous Discharge Physics* (Nauka. Moscow. 1987) [in Russian].
14. A. F. Aleksandrov, K. V. Vavilin, E. A. Kralkina et al., Prikl. Fiz., No. 5, 34 (2015).
15. Yu. E. Shunkov, O. A. Popov, and V. A. Levchenko, Vestnik MEI, No. 2, 71 (2014).