

Электрические характеристики ВЧ-индуктора и плазмы бесферритного индукционного ртутного разряда в замкнутой трубке малого диаметра

*П. В. Старшинов, О. А. Попов, Д. А. Буреева, Р. А. Иликеева, И. В. Ирхин,
В. А. Левченко, И. А. Ошурков*

Проведено исследование электрических характеристик плазмы и ВЧ-индуктора бесферритных индукционных разрядов в лампах длиной 375 мм и шириной 120 мм, образованных замкнутой кварцевой трубкой с внутренним диаметром 16,6 мм. Разряд возбуждался на частоте 1,7 МГц и мощностях 90–170 Вт в смеси паров ртути давлением 7×10^{-3} мм рт. ст. с инертным газом (Ar, 30 % Ne + 70 % Ar) давлением 0,7 и 1,0 мм рт. ст. с помощью изготовленной из литцендрата ($\rho_w = 1,4 \times 10^{-4}$ Ом/см) 3-витковой катушки индуктивности, размещенной по периметру разрядной трубки. Установлено, что с увеличением мощности плазмы ВЧ-напряжение и ток катушки, мощность потерь в ней и средняя по сечению трубки напряженность электрического ВЧ-поля в плазме уменьшаются, а разрядный ток лампы возрастает. Понижение давления инертного газа уменьшает разрядный ток лампы и повышает ВЧ-напряжение и ток катушки, мощность потерь в ней и напряженность электрического поля в плазме.

Ключевые слова: индукционный бесферритный разряд, ртутная плазма, катушка индуктивности, мощность потерь, напряженность электрического ВЧ-поля, разрядный ток.

Ссылка: Старшинов П. В., Попов О. А., Буреева Д. А., Иликеева Р. А., Ирхин И. В., Левченко В. А., Ошурков И. А. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 5.

Reference: P. V. Starshinov, O. A. Popov, D. A. Bureeva, R. A. Ilikeeva, I. V. Irkhin, V. A. Levchenko, and I. A. Oshurkov, Prikl. Fiz., No. 5, 5 (2019).

Введение

Индукционные разрядные ртутные лампы низкого давления ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.) являются перспективными источниками ультрафиолетового (УФ) резонансного (185 и 254 нм) излучения [1–6]. Благодаря отсутствию внутренних электродов, срок их службы значительно выше, чем электродных, а возможность

работать на относительно низких давлениях инертного (буферного) газа 0,1–1,0 мм рт. ст. позволяет достигать большего, чем в электродных лампах КПД генерации УФ резонансного излучения [3, 4, 6].

Особый интерес представляют бесферритные индукционные источники УФ-излучения, в которых плазма возбуждается в лампах

Старшинов Павел Валерьевич¹, аспирант.

Попов Олег Алексеевич¹, профессор.

Буреева Дарья Александровна¹, студент.

Иликеева Римма Анваровна¹, аспирант.

Ирхин Игорь Вячеславович², в.н.с.

Левченко Владимир Александрович³, зам. зав. лабораторией.

Ошурков Илья Анатольевич¹, ассистент.

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.

E-mail: terahertz@gmail.com

³ НПО «ЛИТ».

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатая, 44, стр. 1.

E-mail: mscoff@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2019 г.

© Старшинов П. В., Попов О. А., Буреева Д. А., Иликеева Р. А., Ирхин И. В., Левченко В. А., Ошурков И. А., 2019

с замкнутыми трубками с помощью катушки индуктивности, размещенной по периметру трубки [6–9]. Отсутствие ферритовых магнитопроводов повышает надежность работы таких ламп и снижает их себестоимость.

В работе [6] приведены результаты экспериментальных исследований электрических и излучательных характеристик источника УФ-излучения (254 нм), использующего плазму бесферритного ртутного индукционного разряда в замкнутой кварцевой трубке с внутренним диаметром, $d_{inn} = 25$ мм. Разряд возбуждался на частоте $f = 1,7$ МГц и мощности плазмы $P_{pl} = 52–112$ Вт в смеси паров ртути ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.) и аргона (1,0 мм рт. ст.) с помощью трехвитковой катушки индуктивности, размещенной по «внутреннему» периметру трубки. На удельных мощностях плазмы $P_1 = 0,8–1,1$ Вт/см в [6] были получены высокие КПД генерации УФ-излучения плазмы $\eta_{pl} = \Phi_{254}/P_{pl} = 60–66$ %. Однако из-за относительно высокого удельного сопротивления провода катушки ($\rho_w = 8 \times 10^{-4}$ Ом/см) мощность потерь в ней оказалась высокой $P_{coil} = 25–45$ Вт. Соответственно КПД генерации УФ-излучения лампы $\eta_{lamp} = \Phi_{254}/P_{lamp} = \Phi_{254}/(P_{lamp} + P_{coil})$ оказался значительно меньшим (45–50 %), чем η_{pl} и лишь незначительно превышавшим КПД электродных УФ-ламп [10].

С практической точки зрения, большой интерес представляет исследование возможности создания высокоэффективных бесферритных индукционных амальгамных разрядных источников УФ-излучения с замкнутой трубкой меньшего диаметра ($d_{inn} = 16,6$ мм), способных заменить короткоживущие электродные УФ-лампы с трубками такого же диаметра, работающие на частотах 60–80 кГц [10]. Это и являлось целью данной работы.

Экспериментальная установка и методики измерений

В работе исследовались безэлектродные индукционные бесферритные ртутные лампы длиной 375 мм и шириной 120 мм с замкнутыми кварцевыми разрядными трубками с внутренним диаметром $d_{inn} = 16,6$ мм и замкнутой осевой линией длиной $L_{pl} = 815$ мм. Лампы работали на частоте разрядного тока

$f = 1,7$ МГц в диапазоне мощностей плазмы $P_{pl} = 90–170$ Вт. В качестве буферного газа использовались аргон и смесь неона с аргонном (30 % Ne + 70 % Ar) при давлении 0,7 и 1,0 мм рт. ст. 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 разрядной трубки. Замкнутый индукционный разряд возбуждался в трубке с помощью катушки индуктивности (3 витка), изготовленной из многожильного провода (литцендрат, $\rho_w = 1,4 \times 10^{-4}$ Ом/см, суммарное сечение жил $S_w = 1,35$ мм²), размещенной по внешнему периметру разрядной трубки (см. рис. 1).

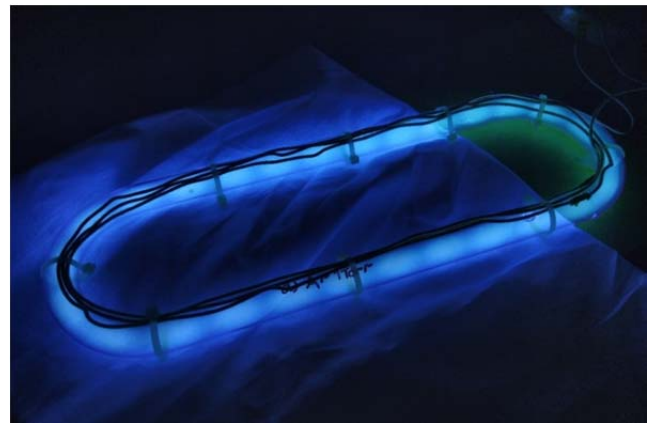


Рис. 1. Фотография разрядной трубки с катушкой индуктивности.

Мощность комплекта (источник питания + лампа) P_k складывалась из мощности потерь в ВЧ-генераторе P_{gen} и потребляемой лампой мощности P_{lamp} , состоящей из мощности потерь в проводе катушки P_{coil} и мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда P_{pl} . КПД генератора ВЧ-мощности, работающего на частоте $f = 1–5$ МГц, определялся как $\eta_{gen} = 1 - (P_{gen}/P_k) = P_{pl}/P_k = 0,9$. В работе измерялись потребляемая комплектом мощность P_k , а мощность потерь в проводе катушки P_{coil} измерялась в отсутствие индукционного разряда методом замещения [6, 9]. Поглощаемая плазмой ВЧ-мощность рассчитывалась как $P_{pl} = P_{lamp} - P_{coil}$. ВЧ-ток в катушке индуктивности I_c измерялся с помощью трансформатора тока, ВЧ-напряжение на ка-

тушке U_c – с помощью высоковольтного делителя напряжения. Энергетический поток УФ-излучения Φ_{254} на длине волны 254 нм определялся с помощью контактного фотодатчика, откалиброванного по лампе с трубкой такого же диаметра, но с известным энергетическим потоком УФ-излучения, измеренным по методу Кайтца [6].

Все измерения проводились по несколько раз, соответственно на всех графиках приведены в качестве доверительного интервала значения СКО (среднеквадратичные отклонения), рассчитанные для параметров ВЧ-индуктора и плазмы индукционного разряда. Необходимый для расчетов параметров плазмы коэффициент связи катушки индуктивности с плазменным витком определялся как $k = S_{coil}/S_{pl} = 0,9$, где S_{coil} и S_{pl} – площади, охватываемые катушкой и плазменным витком соответственно.

Результаты измерений и их обсуждение

На рис. 2 приведены измеренные значения ВЧ-напряжения на катушке индуктивности U_c как функции мощности лампы P_{lamp} . Видно, что увеличение потребляемой лампой (фактически, плазмой $P_{lamp} \gg P_{coil}$) ВЧ-мощности ведет к уменьшению ВЧ-напряжения на катушке. Например, в лампе, где буферным газом является аргон с давлением 1,0 мм рт. ст., напряжение на катушке уменьшается от 600 В ($P_{lamp} = 100$ Вт) до 400 В ($P_{lamp} = 150$ Вт). Уменьшение давления и атомного веса инертного газа (добавка «легкого» неона к «тяжелому» аргону) вызывает повышение (на 10–20 %) ВЧ-напряжения на катушке индуктивности во всем интервале исследованных мощностей лампы. Результаты измерения ВЧ-тока катушки, I_c , приведенные на рис. 3, показывают, что характер зависимости I_c от P_{lamp} близок к зависимости U_c от P_{lamp} , поскольку импеданс первичной цепи $Z_1 = U_c/I_c$ незначительно уменьшается с ростом мощности лампы от 41–45 Ом ($P_{lamp} = 90$ Вт) до 38–42 Ом ($P_{lamp} = 140–150$ Вт), а на больших мощностях лампы практически не меняется.

Измеренная методом замещения, мощность потерь в проводе катушки P_{coil} была весьма близка к рассчитываемой как $P_{coil} = I_c^2 R_{coil}$, где $R_{coil} = 0,041$ Ом – активное сопро-

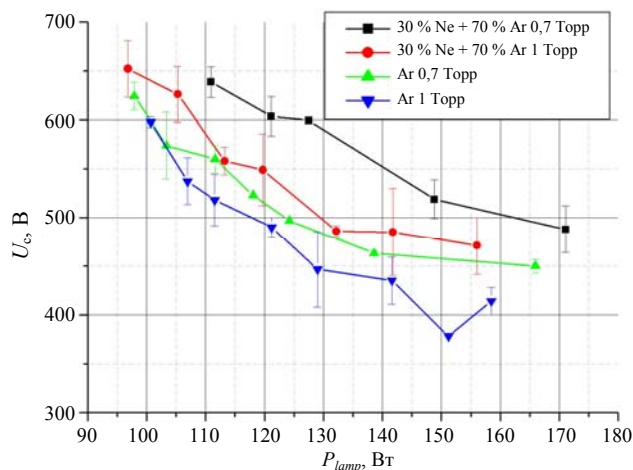


Рис. 2. Зависимость ВЧ-напряжения на катушке U_c от мощности лампы P_{lamp}

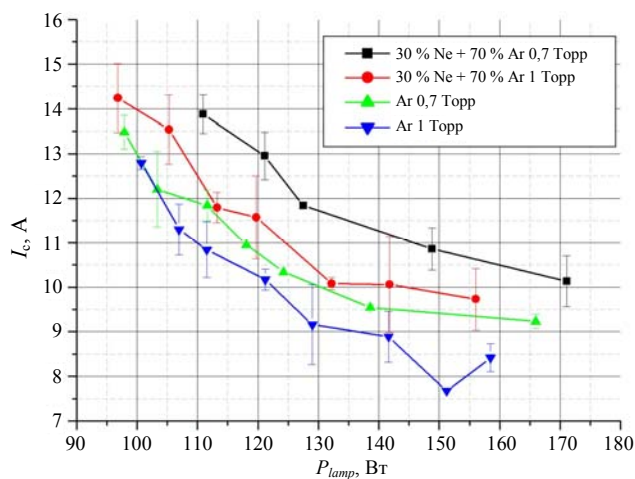


Рис. 3. Зависимость ВЧ-тока в катушке, I_c от мощности лампы P_{lamp}

тивление провода катушки. Приведенные на рис. 4 измеренные значения P_{coil} как функции мощности лампы уменьшаются от 7–9 Вт ($P_{lamp} = 95–100$ Вт) до 3–4 Вт ($P_{lamp} = 140–150$ Вт), а на больших мощностях лампы (плазмы) практически не меняются. Из рис. 4 также следует, что уменьшение давления и атомного веса инертного газа незначительно повышает мощность потерь в проводе катушки. С практической точки зрения важно, что при одинаковой мощности плазмы мощность потерь в катушке индуктивности, изготовленной из литцендрата, значительно ниже, чем в катушке, изготовленной из медного провода такого же сечения и использованной в лампе с такими же конструктивными параметрами [11].

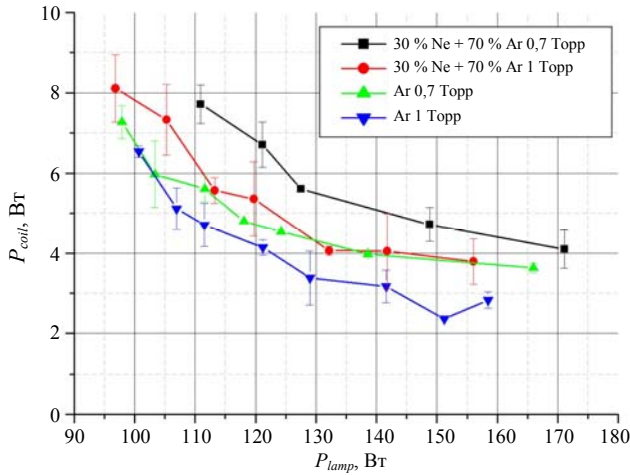


Рис. 4. Зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{coil} от мощности лампы P_{lamp} .

Уменьшение мощности потерь в проводе катушки индуктивности с ростом мощности плазмы характерно для бесферритных индукционных ламп, работающих на относительно низких частотах ВЧ-поля ($f < 10$ МГц) и плотностях плазмы $n_e < 10^{12}$ см⁻³, когда можно пренебречь индуктивным сопротивлением плазменного витка ωL_{ind} по сравнению с активным сопротивлением плазмы R_{pl} . (В трансформаторной модели индукционного разряда эти условия выражены в неравенстве $Q_{pl} < 0,3$, где $Q_{pl} = \omega L_{ind}/R_{pl}$ – добротность плазменного витка [7]). Уменьшение мощности потерь в катушке индуктивности связано с переходом от прямой ионизации атомов ртути электронами к ступенчатой, сопровождаемым снижением усредненной по сечению трубки напряженности электрического ВЧ-поля в плазме \bar{E}_{pl} , а, следовательно, уменьшением ВЧ-напряжения на плазменном витке U_{pl} [6, 7, 11]. В свою очередь, в соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда, уменьшение U_{pl} вызывает понижение ВЧ-напряжения и тока катушки U_c и I_c , а с ними – мощности потерь в проводе катушки P_{coil} [7, 11].

Из рис. 4 видно, что зависимости P_{coil} от P_{lamp} не обнаруживают в исследованном интервале мощностей лампы (фактически, плазмы) минимума и последующего возрастания мощности потерь, характерных для скин-эффекта, возникающего в плазме индукционного разряда высокой плотности ($n_e \geq 10^{12}$ см⁻³),

возбужденного на частотах в сотни кГц и выше [6, 11, 12]. Следствием скин-эффекта является «выталкивание» электрического ВЧ-поля из центральной области разрядной трубки к ее стенкам и сужение сечения токопроводящего слоя плазмы [13, 14]. Это приводит к росту активного сопротивления плазменного витка R_{pl} , уменьшению разрядного тока I_{pl} и к возрастанию средней по сечению трубки напряженности электрического ВЧ-поля в плазме \bar{E}_{pl} и, следовательно, к росту мощности потерь в проводе катушки $P_{coil} \sim \bar{E}_{pl}^2$ [11].

Рассчитанный как $\eta_{coil} = 1 - (P_{coil}/P_{lamp})$, КПД катушки индуктивности во всех исследованных в работе лампах возрастает от 91–92 % ($P_{lamp} = 95–100$ Вт) до 97–98 % ($P_{lamp} = 150–160$ Вт), что на 20–25 % выше КПД катушки индуктивности, изготовленной из одножильного медного провода такого же сечения и примененного в индукционной лампе с замкнутой разрядной трубкой диаметром 16,6 мм, работающей на частоте 1,7 МГц на тех же мощностях плазмы [11].

Рассчитанные в рамках трансформаторной модели индукционного разряда низкого давления [7] зависимости средней по сечению трубки напряженности электрического ВЧ-поля в плазме \bar{E}_{pl} от мощности плазмы P_{pl} приведены на рис. 5. Видно, что в лампе с аргоном (1,0 мм рт. ст.) \bar{E}_{pl} уменьшается от 2,3 В/см ($P_{pl} = 94$ Вт) до 1,5 В/см ($P_{pl} = 155$ Вт), не обнаруживая минимума. Снижение давления аргона до 0,7 мм рт. ст. повышает напряженность электрического поля (на 5–10 %), а добавление к аргону более легкого газа (неона) приводит к увеличению \bar{E}_{pl} на 10–15 %, что также характерно для плазмы низкого давления разряда постоянного тока [15].

Рассчитанные нами значения \bar{E}_{pl} оказались весьма близкими к значениям \bar{E}_{pl} , рассчитанным для индуктивных ламп с такими же конструктивными параметрами разрядной трубки, но с катушкой, изготовленной из одножильного медного провода. В то же время они значительно превышают (в 2,5 раза) значения \bar{E}_{pl} в плазме ламп с разрядной трубкой большего диаметра $d_{inn} = 25$ мм, работающих

на той же частоте (1,7 МГц) и на тех же удельных мощностях плазмы [6, 11].

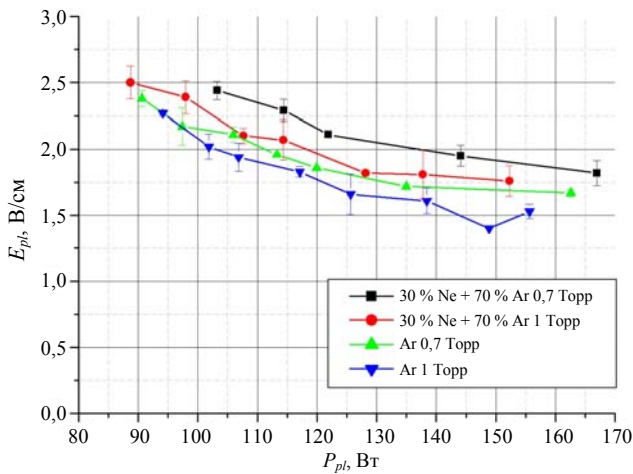


Рис. 5. Зависимость средней по сечению плазмы напряженности электрического ВЧ-поля \bar{E}_{pl} от мощности плазм, P_{pl} .

Разрядные токи лампы I_{pl} , рассчитанные в рамках трансформаторной модели индукционного разряда [7], монотонно и практически линейно возрастают с увеличением мощности плазмы (см. рис. 6). Например, в лампе с аргоном (1,0 мм рт. ст.) ток лампы возрастает от 0,5 А ($P_{pl} = 94$ Вт) до 1,25 А ($P_{pl} = 155$ Вт). Уменьшение давления аргона от 1,0 до 0,7 мм рт. ст. приводит к незначительному снижению (на 5–10 %) разрядного тока, а добавление к аргону неона уменьшает разрядный ток на 15–20 %. Отметим, что разрядные токи индукционных ламп с замкнутой трубкой диаметром 16,6 мм оказались значительно меньше (в 2–2,5 раза) разрядных токов индукционных ламп с замкнутой трубкой большего диаметра $d_{inn} = 25$ мм, работающих на частоте 1,7 МГц и на таких же мощностях плазмы [6, 11]. Соответственно, скин-эффект и связанное с ним увеличение мощности потерь в проводе катушки индуктивности в исследованных в настоящей работе лампах следует ожидать на значительно больших мощностях плазмы $P_{pl} > 200$ Вт.

Из-за малых потерь в проводе катушки индуктивности исследованных в настоящей работе ламп ($P_{coil} = 4\text{--}5$ Вт), можно ожидать высоких КПД генерации УФ-излучения ламп $\eta_{lamp} = \Phi_{254}/P_{lamp}$, близких к КПД генерации УФ-излучения плазмы $\eta_{pl} = \Phi_{254}/P_{pl}$. Следует,

однако, иметь в виду, что при измерении потока УФ-излучения лампы Φ_{254} не учитывалась блокировка поверхности разрядной трубки витками катушки индуктивности, снижающая фактическую величину потока УФ-излучения лампы [6, 11]. Эффект блокировки потока излучения можно учесть введением коэффициента блокировки $\eta_w \approx 1 - (Nd_w/\pi d_{out})$, где N – количество витков катушки, d_w – диаметр провода катушки, d_{out} – внешний диаметр разрядной трубки. Тогда фактический поток УФ-излучения лампы рассчитывается как $(\Phi_{254})_{real} = \eta_w \Phi_{254}$, а КПД генерации УФ-излучения лампы как $\eta_{lamp} = \eta_{coil} \eta_w \eta_{pl}$. Откуда следует, что для повышения η_w и соответственно η_{lamp} надо уменьшать диаметр провода катушки, либо число витков в ней.

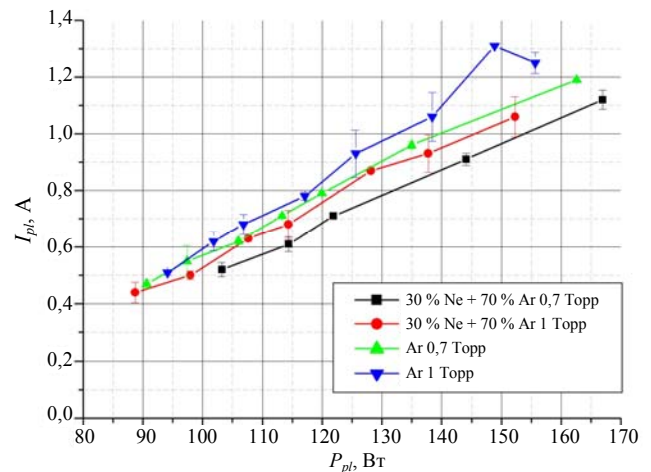


Рис. 6. Зависимость разрядного тока I_{pl} от мощности плазмы P_{pl} .

В то же время для сохранения высокой добротности катушки индуктивности и, следовательно, малых потерь мощности в ней, уменьшение числа витков катушки должно сопровождаться повышением частоты ВЧ-поля f [13]. В свою очередь, увеличение частоты ВЧ-поля без «пропорционального» уменьшения плотности плазмы вызывает скин-эффект, «выталкивающий» электрическое ВЧ-поле к стенкам разрядной трубки и повышающий среднюю по сечению напряженность этого поля \bar{E}_{pl} [13]. Увеличение \bar{E}_{pl} вызывает увеличение температуры электронов и, следовательно, возрастание энергетического потока резонансного УФ-излучения Φ_{254} и КПД его генерации в плазме η_{pl} [6, 11]. Однако повы-

шение \bar{E}_{pl} вызывает также рост мощности потерь в проводе катушки индуктивности P_{coil} , что приводит к снижению КПД генерации УФ резонансного излучения лампы $\eta_{lamp} = \Phi_{254}/P_{lamp}$ [6, 16].

Заключение

Применение катушек индуктивности, изготовленных из многожильного медного провода (литцендрата) с малым погонным сопротивлением $\rho_w = 1,4 \times 10^{-4}$ Ом/см, в бесферритных индукционных лампах с замкнутыми разрядными трубками ($d_{inn} = 16,6$ мм), работающих на частоте 1,7 МГц и мощностях плазмы $P_{pl} = 85-160$ Вт, позволяет существенно снизить мощность потерь в проводе катушки от 40–42 Вт (катушка из одножильного медного провода, $d_w = 1,5$ мм) до 4–7 Вт.

КПД катушки индуктивности увеличивается с ростом мощности плазмы от 90 % ($P_{pl} = 80$ Вт) до 97–98 % ($P_{pl} = 150-160$ Вт), не обнаруживая тенденции к уменьшению.

Применение в индукционной лампе катушки индуктивности, изготовленной из многожильного провода (литцендрата) с низким погонным сопротивлением, существенно повышает КПД генерации УФ-излучения индукционной лампы η_{lamp} и приближает его к значениям КПД генерации УФ-излучения плазмы η_{pl} .

ВЧ-напряжение и ток катушки U_c и I_c уменьшаются с ростом мощности плазмы и не достигают минимума в зависимостях U_c и I_c от P_{pl} .

Средняя по сечению трубки напряженность электрического ВЧ-поля в плазме \bar{E}_{pl} значительно выше, чем в лампах с разрядной трубкой $d_{inn} = 25$ мм, и уменьшается с ростом мощности плазмы от 2,4–2,6 В/см ($P_{pl} = 90$ Вт) до 1,5–1,8 В/см ($P_{pl} = 160$ Вт).

ВЧ-ток лампы I_{pl} значительно ниже, чем в индуктивной лампе с разрядной трубкой большего диаметра $d_{inn} = 25$ мм, и практически линейно возрастает с увеличением мощ-

ности плазмы от 0,45–0,5 А ($P_{pl} = 90$ Вт) до 1,1–1,3 А ($P_{pl} = 160$ Вт).

Добавление к аргону более легкого газа (неона), а также понижение давления буферного газа/смеси приводит к уменьшению ВЧ-тока лампы и к увеличению ВЧ-напряжения и тока катушки, мощности потерь в ней и напряженности электрического ВЧ-поля в плазме.

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 В. А., Старшинов П. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 4. С. 372.
6. Старшинов П. В., Попов О. А., Ирхин И. В., Левченко В. А., Васина В. Н. // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 24.
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., Старшинов П. В., Васина В. Н. // Светотехника. 2018. № 2. С. 75.
10. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. (ред.). Ультрафиолетовые технологии в современном мире: Коллективная монография. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2012.
11. Старшинов П. В., Попов О. А., Ирхин И. В., Васина В. Н., Левченко В. А. // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 87.
12. Попов О. А., Чандлер Р. Т. // Теплофизика высоких температур. 2007. № 4. С. 795.
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. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
16. Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко В. А., Старшинов П. В. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 2. С. 139.

RF inductor and plasma characteristics of the ferrite-free low mercury pressure closed-loop inductively coupled discharge

*P. V. Starshinov¹, O. A. Popov¹, D. A. Bureeva¹, R. A. Ilikeeva¹, I. V. Irkhin²,
V. A. Levchenko³, and I. A. Oshurkov¹*

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

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

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

Received September 25, 2019

Electrical characteristics of RF inductors and plasmas of ferrite-free inductively-coupled low mercury pressure discharges excited in closed-loop lamps of 375 mm in length and 120 mm in width made from quartz tube of 16.6 mm inner diameter were experimentally studied. Discharges were excited at a frequency of 1.7 MHz and at plasma RF powers of 90–170 W in the mixture of mercury vapor ($\sim 7 \times 10^3$ Torr) and inert gas (Ar, 30 % Ne + 70 % Ar) at pressures of 0.7 and 1.0 Torr. The 3-turn induction coil made from Litz wire ($\rho_w = 1.4 \times 10^{-4}$ Ohm/cm) was disposed along the closed-loop lamp outer perimeter. It was experimentally found that coil power losses and RF coil current and voltage decreased as plasma power increased. The calculations have shown that plasma RF electric field decreased and lamp discharge current increased as plasma power grew. The decrease of gas pressure caused the decrease of lamp discharge current and the increase of coil power losses, RF coil current and voltage, and plasma RF electric field.

Keywords: ferrite-free inductively coupled discharge, low mercury pressure plasma, inductive coil power losses, RF electric field, RF discharge current.

REFERENCES

1. M. V. Isupov, C. B. Krotov, A. Y. Litvintsev, and I. M. Ulanov, *Svetotekhnika* **5**, 37 (2007).
2. V. A. Levchenko, O. A. Popov, S. A. Svitnev, and P. V. Starshinov, *Svetotekhnika* **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** (4), 372 (2016).
6. P. V. Starshinov, O. A. Popov, I. V. Irkhin, V. A. Levchenko, and V. A. Vasina, *Prikl. Fiz.* No. 4, 24 (2018).
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* **2**, 159 (2010).
9. O. A. Popov, P. V. Starshinov, and V. N. Vasina, *Svetotekhnika* **2**, 75 (2018).
10. F. V. Karmazinov, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, S. V. Khramenkov. *Ultraviolet Technologies in the Contemporary World*. (Intellect, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
11. P. V. Starshinov, O. A. Popov, I. V. Irkhin, V. N. Vasina, and V. A. Levchenko, *Vestnik MEI* **3**, 87 (2019).
12. O. A. Popov and R. T. Chandler, *High Temp.* **4**, 795 (2007).
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. G. N. Rokhlin, *Discharge Light Sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
16. S. A. Svitnev, O. A. Popov, V. A. Levchenko, and P. V. Starshinov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (2), 139, (2016).