

УДК 537.533

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-87-97

## Электрические и излучательные характеристики индуктивных бесферритных ртутных УФ-ламп в замкнутых трубках

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

Проведено экспериментальное исследование электрических и излучательных характеристик бесферритных индукционных ультрафиолетовых (УФ) ламп, в которых разряд возбуждался в замкнутой трубке с помощью трехвитковой индуктивной катушки, размещенной по внутреннему периметру трубки. Разряд возбуждался в смеси паров ртути (0,01 мм рт. ст.) и аргона (1,0 мм рт. ст.) на частоте 1,7 МГц при мощности лампы 90...160 Вт. Установлено, что в лампе с разрядной трубкой диаметром 25 мм зависимости мощности потерь в проводе катушки и напряженности ВЧ электрического поля в плазме от мощности лампы имеют минимум, а аналогичные зависимости разрядного тока лампы и КПД генерации УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм — максимум. Поток УФ-излучения лампы возрастает с увеличением мощности лампы от 28 до 72 Вт, а КПД генерации УФ-излучения плазмы монотонно растет от 52 до 65%. Уменьшение диаметра трубки до 16 мм повышает напряженность ВЧ электрического поля в плазме и мощность потерь в проводе катушки, но практически не влияет на величину потока и КПД генерации УФ-излучения лампы и плазмы.

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

*Для цитирования:* Старшинов П.В., Попов О.А., Ирхин И.В., Васина В.Н., Левченко В.А. Электрические и излучательные характеристики индуктивных бесферритных ртутных УФ-ламп в замкнутых трубках // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 87—97. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-87-97.

## Electric and Radiation Characteristics of Ferrite-free Closed-loop Inductively-coupled Mercury Discharge UV-lamps

P.V. Starshinov, O.A. Popov, I.V. Irkhin, V.N. Vasina, V.A. Levchenko

Electric and radiation characteristics of ultraviolet (UV) radiation (254 nm) sources employing ferrite-free inductively-coupled discharge excited in the closed-loop quartz tube with a help of a 3-turn induction coil disposed along the tube “inner” perimeter were experimentally studied. The inductive discharge was excited in the mixture of mercury vapor (~ 0,01 torr) and argon (1,0 torr) at a frequency of 1,7 MHz and RF power of 90-160 W. It was experimentally shown that in the lamp with discharge tube of 25 mm in diam., induction coil power losses and plasma RF electric field dependencies on lamp power had minima while discharge current and lamp UV radiation generation efficiency dependencies on lamp power had maxima. UV radiation flux grew with lamp power from 28 to 72 W while plasma UV radiation generation efficiency grew from 52 to 65%. The decrease of discharge tube diameter to 16 mm caused the increase of coil power losses and plasma RF electric field but did not affect UV radiation flux and lamp and plasma UV radiation generation efficiencies.

*Key words:* ultraviolet radiation, inductively-coupled closed-loop discharge, low pressure mercury plasma, induction coil.

*For citation:* Starshinov P.V., Popov O.A., Irkhin I.V., Vasina V.N., Levchenko V.A. Electric and Radiation Characteristics of Ferrite-free Closed-loop Inductively-coupled Mercury Discharge UV-lamps. Bulletin of MPEI. 2019;3:87—97. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-87-97.

## Введение

Плазма индукционных ртутных разрядных ламп низкого давления ( $\sim 10^{-2}$  мм рт. ст.) — эффективный источник ультрафиолетового (УФ) резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм, используемого как в люминесцентных осветительных лампах [1 — 4], так и в бактерицидных лампах, применяемых для обеззараживания и очистки воды и воздуха [5, 6]. Благодаря отсутствию внутренних электродов лампы могут работать на относительно низких давлениях буферного инертного газа ( $p_{\text{ин.}}$  = 0,05...0,5 мм рт. ст.), на которых достигается максимум генерации УФ резонансного излучения ртутной плазмы низкого давления [7, 8].

Начиная с конца XX в. на светотехническом рынке индукционных разрядных источников оптического (видимого и УФ) излучения доминируют лампы трансформаторного типа (ЛТТ) с кольцевыми ферритовыми магнитопроводами [1 — 5]. Весьма перспективными представляются и бесферритные индукционные источники оптического излучения, в которых ртутная плазма возбуждается в замкнутых (стеклянных либо кварцевых) разрядных трубках с помощью индуктивной катушки, размещенной по внешнему или внутреннему периметрам трубки [9 — 11]. Подобная конструкция позволяет избежать применения дорогостоящих и хрупких магнитопроводов, снижающих надежность работы лампы и повышающих ее себестоимость. С практической точки зрения большой интерес представляют индукционные УФ-лампы с замкнутыми кварцевыми трубками диаметром 16 и 25 мм, используемыми в электродных УФ-лампах, поскольку они могут без существенной модификации оборудования заменить электродные лампы U-образной формы.

В работах [9 — 11] приведены результаты исследований электрических и светотехнических характеристик осветительных ламп подобного типа с люминофорным покрытием на внутренней (вакуумной) поверхности стенок замкнутой стеклянной разрядной трубки. В то же время, отсутствуют публикации по источникам УФ-излучения, в которых использовалась бы плазма бесферритных индукционных ртутных ламп низкого давления с замкнутыми кварцевыми трубками.

Приведены результаты экспериментальных исследований электрических и излучательных характеристик УФ бесферритных индукционных ртутных ламп низкого давления с замкнутой кварцевой разрядной трубкой с внутренним диаметром 16 и 25 мм, в которой плазма возбуждена с помощью индуктивной катушки, размещенной по внутреннему периметру лампы.

## Экспериментальная установка и методики измерений

Индукционный разряд зажигали на частоте  $f = 1,7$  МГц в замкнутой кварцевой трубке со стенками толщиной 1,5 мм и внутренним диаметром  $d_{i1} = 25$  мм,  $d_{i2} = 16$  мм. Лампы имели форму вытянутого эллипса длиной

$L$  (500 и 375 мм), шириной  $H_1$  (130 и 120 мм) и расстоянием между длинными трубками  $H_2$  (80 и 75 мм) (рис. 1). Длина плазменного витка, определяемая как длина осевой линии замкнутой трубки, равна  $\Lambda_{p/1} = 1040$  мм и  $\Lambda_{p/2} = 815$  мм. ВЧ-напряжение подавалось от генератора ВЧ-мощности на трехвитковую индуктивную катушку длиной  $l_1 = 315$  мм и  $l_2 = 330$  мм, изготовленную из медного провода диаметром  $d_w = 2,4$  мм, и погонным сопротивлением  $\rho_w = 8 \cdot 10^{-4}$  Ом/см, размещенную по внутреннему периметру лампы. Давление паров ртути в разрядной трубке поддерживали оптимальным  $p_{\text{Hg}} \sim 0,007$  мм рт. ст. (по максимальному выходу УФ резонансного излучения атомов ртути на длине волны 254 нм) температурой ртутно-индиевой амальгамы ( $T_{\text{амл}} = 62...75$  °С), размещенной на стенке разрядной трубки (см. рис. 1). Давление буферного газа (аргон) в разрядной трубке — 1,0 мм рт. ст. ( $d_{i1} = 25$  мм) и 0,7 мм рт. ст. ( $d_{i2} = 16$  мм).

Измерения потока УФ резонансного излучения на длине волны 254 нм проводили с помощью радиометра ПЛ1700 и фотометрической головки SED240/W с косинусной угловой характеристикой по методике, изложенной в [7]. Лампу размещали в черном заземленном металлическом корпусе с черным экраном в плоскости, перпендикулярной плоскости лампы. В корпусе (в плоскости лампы) была вырезана щель шириной 30 мм. 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 излучения. Поток УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм рассчитывали по формуле [7]:

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

где  $L$  — длина лампы;  $h = \ell + d$  — расстояние от лампы до ПИ;  $i$  — фототок ПИ;  $S$  — интегральная чувствительность ПИ;  $\Delta$  — ширина щели.

Суммарная погрешность измерений потока излучения на длине волны 254 нм  $\Phi_{254}$  определялась систематической и случайной погрешностями и составляла  $\pm 1,5\%$ .

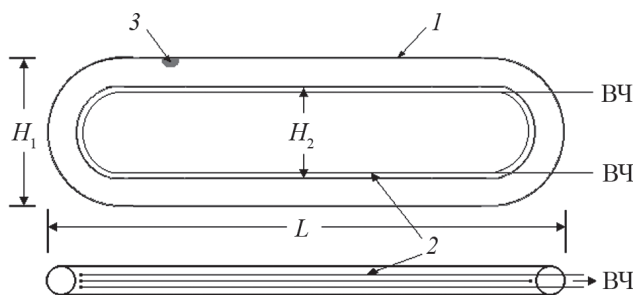


Рис. 1. Эскиз бесферритной индукционной лампы с замкнутой разрядной трубкой:

1 — разрядная трубка; 2 — индуктивная катушка; Нг — амальгама; ВЧ — высокочастотное напряжение

Мощность комплекта (источник питания и лампа)  $P_k$  складывалась из мощности потерь в ВЧ-генераторе  $P_{gen}$  и мощности лампы  $P_{lamp}$ , состоящей из мощности потерь в проводе индуктивной катушки  $P_{coil}$  и мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда  $P_{pl}$ . Коэффициент полезного действия (КПД) генератора  $\eta_{gen} = 1 - (P_{gen}/P_k)$ , работающего на частоте 1...5 МГц, составлял 90%, тогда мощность лампы рассчитывали, как  $P_{lamp} = 0,9P_k$ . ВЧ-напряжение  $U_c$  и ток катушки  $I_c$  измеряли с помощью высоковольтного щупа, трансформатора тока и четырехканального осциллографа. Мощность потерь в проводе катушки  $P_{coil}$  определяли в отсутствии в лампе разряда методом замещения [12, 13]. Мощность, поглощаемая плазмой, равна  $P_{pl} = P_{lamp} - P_{coil}$ .

### Результаты измерений и их обсуждение

#### Мощность потерь в проводе индуктивной катушки

На рисунке 2 приведены зависимости мощности потерь в проводе катушки обеих ламп  $P_{coil1}$  и  $P_{coil2}$  от мощности лампы  $P_{lamp}$ . Видно, что в разрядной трубке с большими габаритами ( $\Lambda_{pl1} = 1040$  мм;  $d_{t1} = 25$  мм)  $P_{coil1}$  уменьшается от 38 Вт ( $P_{lamp} = 91$  Вт) до своего минимального значения 22 Вт при  $P_{lamp.min} = 105$  Вт, а затем возрастает до 45 Вт ( $P_{lamp} = 152$  Вт). Мощность потерь в проводе катушки лампы меньших габаритов ( $\Lambda_{pl2} = 815$  мм;  $d_{t2} = 16$  мм)  $P_{coil2}$  на малых значениях  $P_{lamp}$  значительно выше, чем  $P_{coil1}$ , и уменьшается с ростом  $P_{lamp}$  от 68 Вт ( $P_{lamp} = 91$  Вт) до 39 Вт ( $P_{lamp} = 98$  Вт), а на больших мощностях лампы вплоть до  $P_{lamp} = 142$  Вт практически остается неизменной  $P_{coil2} = 40...41$  Вт.

КПД индуктивной катушки лампы с трубкой диаметром 25 мм  $\eta_{coil1} = 1 - (P_{coil1}/P_{lamp})$  возрастает с увели-

чением мощности лампы от 58 ( $P_{lamp} = 91$  Вт) до 79% ( $P_{lamp.min} = 105$  Вт), а затем снижается до 71% ( $P_{lamp} = 156$  Вт) (рис. 3). КПД катушки лампы с трубкой диаметром 16 мм  $\eta_{coil2}$  на малых мощностях лампы резко возрастает от 26 ( $P_{lamp} = 91$  Вт) до 61% ( $P_{lamp} = 98$  Вт), а затем медленно растет с увеличением мощности лампы до 72% ( $P_{lamp} = 142$  Вт).

Для объяснения экспериментальных зависимостей  $P_{coil}$  и  $\eta_{coil}$  от  $P_{lamp}$ , а также причины повышения  $P_{coil}$  с уменьшением диаметра разрядной трубки использована трансформаторная модель индукционного разряда низкого давления, связывающая электрические параметры индуктивной катушки с параметрами плазмы индукционного разряда [9, 12]. На относительно низких частотах ВЧ-поля  $f < 10$  МГц и не очень высоких плотностях плазмы  $n_e < 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, при которых можно пренебречь индуктивной составляющей ВЧ-напряжения на плазменном витке  $U_{ind} = I_{pl}\omega L_{ind}$ , выражение для мощности потерь в проводе индуктивной катушки бесферритной лампы имеет вид [9]:

$$P_{coil} = I_c^2 R_{coil} = (\Lambda_{pl} \bar{E}_a / \omega M)^2 R_{coil}, \quad (1)$$

где  $\Lambda_{pl}$  — длина плазменного витка;  $\omega = 2\pi f$  — круговая частота ВЧ-поля;  $\bar{E}_a$  — средняя по сечению плазменного витка активная составляющая напряженности ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl} (\bar{E}_a = \bar{E}_{pl})$ ;  $R_{coil}$  — активное сопротивление провода катушки;  $M$  — взаимная индуктивность катушки и плазменного витка [9, 11]:

$$M = k(L_{coil} L_{ind})^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь  $k = S_{coil}/S_{pl}$  — коэффициент связи между катушкой и плазменным витком;  $S_{coil}$ ,  $S_{pl}$  — площади, охватываемые витками катушки и плазменным витком;

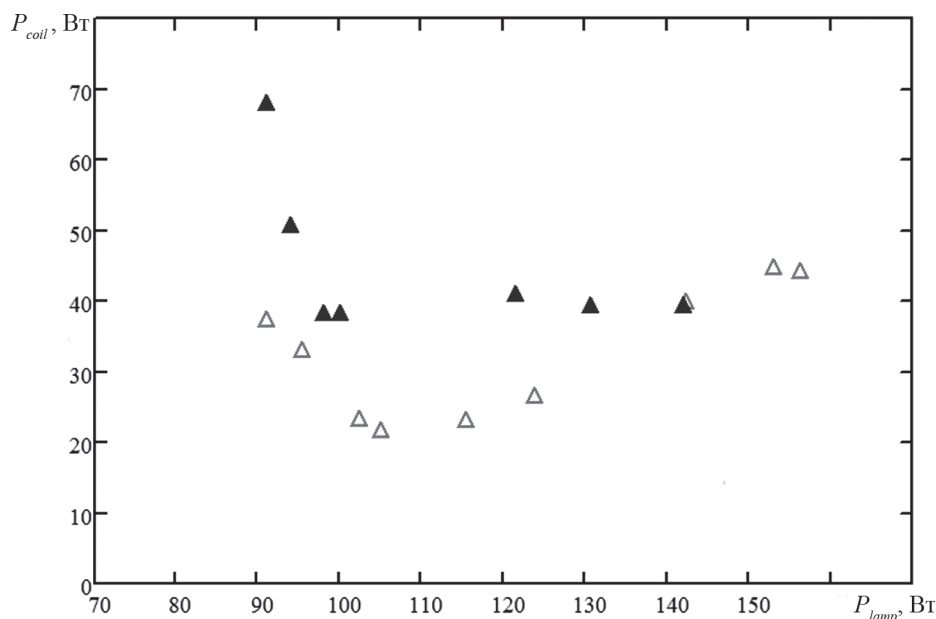


Рис. 2. Зависимость мощности потерь в проводе катушки  $P_{coil}$  от мощности лампы  $P_{lamp}$ :

$\Delta$  —  $P_{coil1}$  ( $d_{t1} = 25$  мм);  $\blacktriangle$  —  $P_{coil2}$  ( $d_{t2} = 16$  мм)

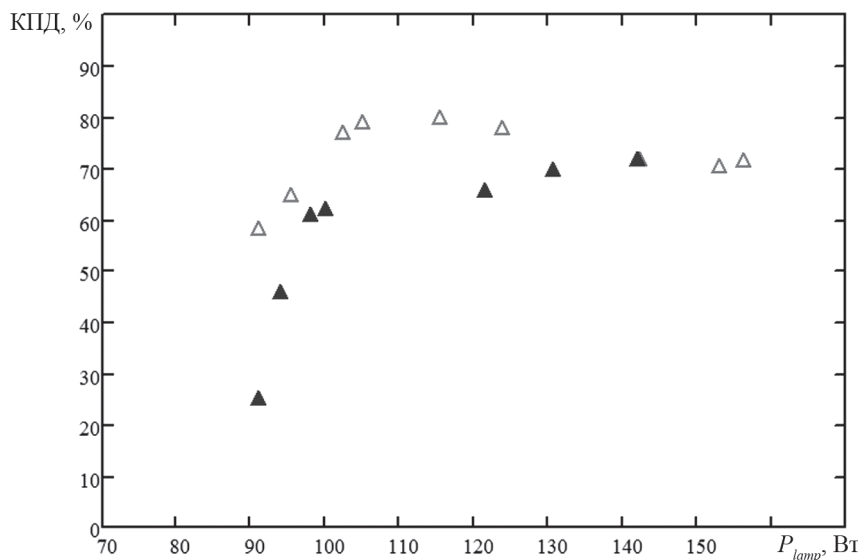


Рис. 3. Зависимость КПД катушки  $\eta_{coil}$  от мощности лампы  $P_{lamp}$ :

$\Delta$  —  $\eta_{coil1}$  ( $d_1 = 25$  мм);  $\blacktriangle$  —  $\eta_{coil2}$  ( $d_2 = 16$  мм)

$L_{coil}$  — индуктивность катушки;  $L_{ind}$  — геометрическая индуктивность плазменного витка [11, 14],

$$L_{ind} = 2\pi D_{pl} \{ \ln(4D_{pl}/0,39\pi d_{pl}) - 1,75 \} 10^{-9}, \quad (3)$$

где  $d_{pl} \approx 0,75d_t$  — диаметр сечения плазменного витка;  $D_{pl}$  — эквивалентный диаметр плазменного витка [11],

$$D_{pl} = [4(LH_2)/\pi]^{1/2}, \quad (4)$$

где  $L$  — длина лампы;  $H_2$  — расстояние между длинными трубками лампы.

Как следует из (2), при неизменных конструктивных параметрах катушки ( $L_{coil}$ ,  $R_{coil}$ ,  $S_{coil}$ ), разрядной трубки ( $d_p$ ,  $S_{pl}$ ,  $\Lambda_{pl}$ ) и частоты возбуждения разряда  $f$  мощность потерь в проводе катушки  $P_{coil}$  определяется напряженностью ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl}$  и взаимной индуктивностью катушки и плазменного витка  $M$ . При допущении независимости  $k$  и  $L_{ind}$  от мощности плазмы взаимная индуктивность  $M$  не зависит от  $P_{pl}$ , а зависимость мощности потерь в проводе катушки  $P_{coil}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$  определяется зависимостью напряженности ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl}$  от  $P_{pl}$ .

#### Параметры плазмы индукционного разряда

В рамках трансформаторной модели индукционного разряда низкого давления с помощью (1) — (4) рассчитаны усредненные по сечению трубки напряженности ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl} = \bar{E}_a$  в двух лампах с разрядными трубками диаметром 25 и 16 мм. Поскольку длины ламп и, следовательно, плазменных витков различны ( $\Lambda_{pl1} = 1040$  мм;  $\Lambda_{pl2} = 815$  мм), то  $\bar{E}_{pl}$  в плазме трубок разного диаметра целесообразно сравнивать при одной и той же погонной мощности плазмы  $P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl}$  (рис. 4). Видно, что при относительно малых погонных мощностях усредненная напряженность ВЧ электрического поля в плазме лампы с

трубкой диаметром 25 мм  $\bar{E}_{pl1}$  уменьшается от 0,91 В/см ( $P_1 = 0,5$  Вт/см) до своего минимального значения 0,7 В/см при  $P_1 = 0,75$  Вт/см, а затем возрастает до 1,0 В/см ( $P_1 = 1,06$  Вт/см). Напряженность ВЧ электрического поля в плазме трубки меньшего диаметра 16 мм  $\bar{E}_{pl2}$  при малых  $P_1$  существенно выше (на 60...80%), чем в трубке большего диаметра. С увеличением погонной мощности плазмы  $\bar{E}_{pl2}$  уменьшается от 1,75 В/см ( $P_1 = 0,28$  Вт/см) до 1,3 В/см ( $P_1 = 0,75$  Вт/см), а на больших погонных мощностях вплоть до  $P_1 = 1,26$  Вт/см она практически не меняется.

Уменьшение напряженности ВЧ электрического поля в плазме с ростом погонной мощности плазмы (фактически плотности плазмы) характерно для слабоионизованной низкотемпературной плазмы низкого давления и связано с изменением механизма ионизации атомов ртути — от прямой к ступенчатой [15 — 18]. Возрастание с увеличением мощности плазмы мощности потерь в проводе индуктивной катушки лампы с трубкой диаметром 25 мм  $P_{coil1}$ , наблюдаемое экспериментально, при погонных мощностях плазмы  $P_1 > 0,75$  Вт/см возможно связано со скин-эффектом, проявляющимся в плазме ВЧ индукционного разряда достаточно высокой плотности  $n_e > 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, возбужденного на частотах ВЧ-поля  $f > 500$  кГц [19 — 25]. В результате скин-эффекта ВЧ электрическое поле выталкивается из центральной области сечения и прижимается к стенкам разрядной трубки в месте расположения провода катушки (рис. 5) [23]. Это приводит к сужению токопроводящего слоя плазмы, увеличению его активного сопротивления  $R_{pl}$  и снижению разрядного тока  $I_{pl}$ , а в результате — к возрастанию средней по сечению трубки напряженности ВЧ электрического поля  $\bar{E}_{pl}$  и ВЧ-напряжения на плазменном витке  $U_{pl} = \bar{E}_{pl} \Lambda_{pl}$ . В соответствии с трансформаторной мо-

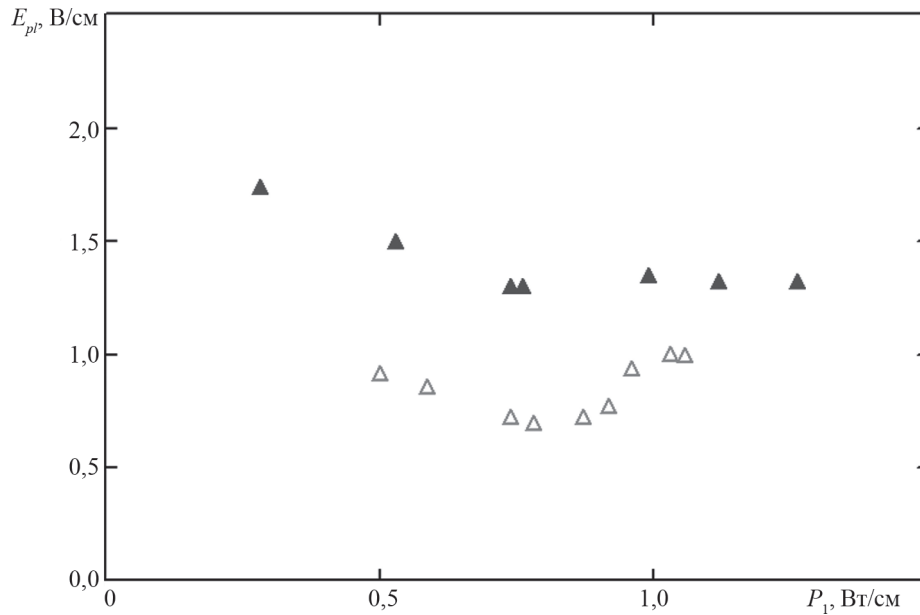


Рис. 4. Зависимость средней по сечению плазмы напряженности ВЧ электрического поля  $\bar{E}_{pl}$  от погонной мощности плазмы  $P_1$ :  
 $\Delta$  —  $E_{pl1}$  ( $d_{t1} = 25$  мм);  $\blacktriangle$  —  $E_{pl2}$  ( $d_{t2} = 16$  мм)

Модуль напряженности электрического поля, отн. ед.

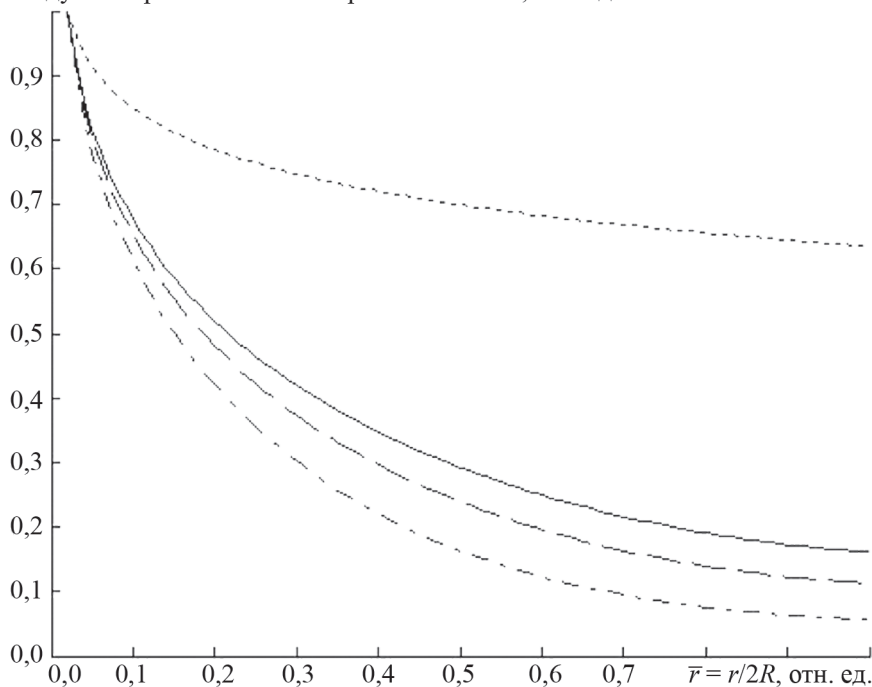


Рис. 5. Относительное распределение модуля напряженности электрического поля по сечению разрядной трубки,  $E(r)/E(0)$  от  $(r/2R)$ :

$f = 1,7$  МГц;  $d_t = 50$  мм;  $p_{Hg} = 0,006$  мм рт. ст.;  $p_{Ar} = 0,2$  мм рт. ст.;  $n_e(r)$  — бesselовское распределение концентрации электронов;  $I_{pl}$  — разрядный ток 0 (---), 2 (—), 4 (— —), 8 (— · —) А [23]

делью индукционного разряда увеличение  $U_{pl}$  вызывает повышение ВЧ-напряжения и тока индуктивной катушки  $U_c$  и  $I_c = U_{pl}\omega M$  и, следовательно, мощности потерь в проводе катушки  $P_{coil} = I_c^2 R_{coil}$  (см. рис. 2).

Уменьшение диаметра трубки с 25 до 16 мм вызывает повышение средней по сечению трубки на-

пряженности ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl}$ . Это является особенностью плазмы низкого давления, где доминирующим (практически единственным) механизмом гибели заряженных частиц считается их рекомбинация на стенках разрядной трубки [15, 16]. С увеличением  $\bar{E}_{pl}$  пропорционально возрастает ВЧ-

напряжение на плазменном витке  $U_{pl}$ , а с ним и мощность потерь в проводе катушки  $P_{coil}$  (см. рис. 2).

Поскольку в плазме лампы с разрядной трубкой меньшего диаметра ( $d_{r2} = 16$  мм) напряженность ВЧ электрического поля выше, чем в плазме трубки большего диаметра (25 мм), то в ней ниже разрядный ток и плотность плазмы, а, следовательно, и слабее выражен скин-эффект. О слабости (или даже отсутствии) скин-эффекта в плазме лампы с трубкой малого диаметра  $d_{r2} = 16$  мм свидетельствует уменьшение  $P_{coil2}$  с ростом  $P_{lamp}$  (фактически  $P_{pl}$ ), наблюдаемое при всех исследованных в работе мощностях лампы, и отсутствие явно выраженного минимума в зависимости  $P_{coil2}$  от  $P_{lamp}$  ( $P_{pl}$ ). Как показали исследования индукционных бесферритных линейных ламп с трубками различного диаметра (от 40 до 70 мм), уменьшение диаметра разрядной трубки сдвигает минимум в зависимости мощности потерь в катушке  $P_{coil}$  от мощности плазмы в область больших мощностей лампы (плазмы) [26].

Рассчитанные в рамках трансформаторной модели индукционного разряда низкого давления зависимости разрядного тока  $I_{pl}$  от погонной мощности плазмы  $P_1$  для ламп с трубками диаметром 25 и 16 мм показаны на рис. 6. Видно, что разрядный ток в лампе с трубкой большего диаметра (25 мм)  $I_{pl1}$  заметно превышает ток в лампе с трубкой меньшего диаметра (16 мм)  $I_{pl2}$  и возрастает с увеличением  $P_1$  быстрее, чем  $I_{pl2}$ . Начиная с  $P_1 = 0,75...0,77$  Вт/см скорость возрастания  $I_{pl1}$  резко снижается, а сам ток достигает максимума 1,25 А ( $P_1 = 0,85$  Вт/см), а затем уменьшается до 1,0...1,1 А ( $P_1 = 0,95...1,05$  Вт/см). Таким образом, зависимость  $I_{pl1}$  от  $P_1$  хорошо коррелирует с экспериментальной зави-

симостью  $P_{coil1}$  от  $P_{pl}$  и может служить подтверждением проявления скин-эффекта.

В то же время зависимость разрядного тока лампы меньших размеров  $I_{pl2}$  от погонной мощности  $P_1$  не обнаруживает проявления скин-эффекта (уменьшения разрядного тока), а ток  $I_{pl2}$  практически линейно возрастает с увеличением  $P_1$  во всем интервале исследованных мощностей лампы. Оценки показывают, что скин-эффект и связанное с ним уменьшение разрядного тока  $I_{pl2}$  в лампе с разрядной трубкой диаметром 16 мм следует ожидать при погонных мощностях плазмы  $P_1 \geq 1,5$  Вт/см.

Как следует из рис. 3, КПД индуктивной катушки в лампе с трубкой большего диаметра достигает на относительно малых мощностях плазмы более высоких значений, чем в лампе с меньшим диаметром трубки. Однако, из-за скин-эффекта, неизбежного на мегагерцовых частотах ВЧ-поля и плотностях плазмы  $n_e > 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, рост  $\eta_{coil1}$  с увеличением мощности плазмы замедляется, а его величина может даже уменьшаться. Это ставит перед разработчиками индукционных бесферритных источников УФ-излучения задачу существенного снижения мощности потерь в проводе катушки.

#### Излучательные характеристики лампы

На рисунке 7 продемонстрированы экспериментальные зависимости потоков УФ-излучения двух ламп на длине волны 254 нм:  $\Phi_+$  ( $\Lambda_{pl1} = 1040$  мм;  $d_{r1} = 25$  мм) и  $\Phi_2$  ( $\Lambda_{pl2} = 815$  мм;  $d_{r2} = 16$  мм), от мощности лампы  $P_{lamp}$ . Поток УФ-излучения лампы с большим диаметром и большей длиной  $\Phi_+$  на относительно малых мощностях лампы быстро возрастает от 28 ( $P_{lamp} = 91$  Вт) до 51 Вт ( $P_{lamp} = 105$  Вт), а на мощностях  $P_{lamp} > 105$  Вт растет с меньшей скоростью до 72 Вт

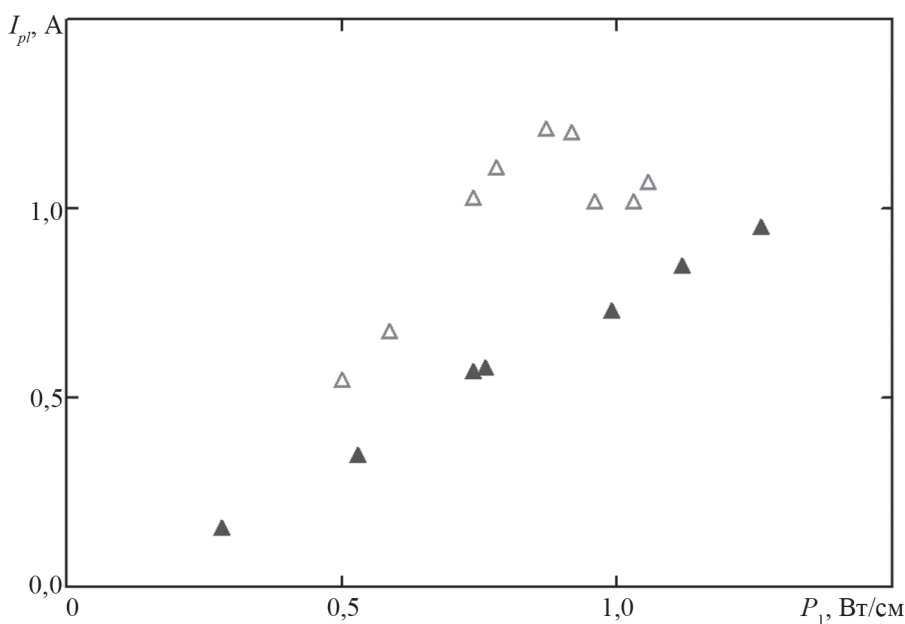


Рис. 6. Зависимость разрядного тока  $I_{pl}$  от погонной мощности плазмы  $P_1$ :

$\Delta$  —  $I_{pl1}$  ( $d_{r1} = 25$  мм);  $\blacktriangle$  —  $I_{pl2}$  ( $d_{r2} = 16$  мм)

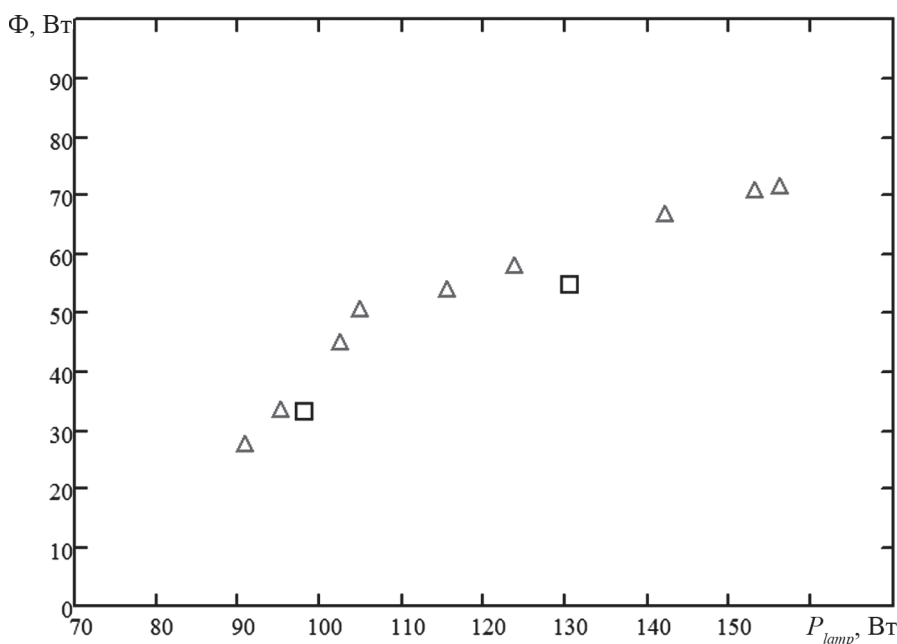


Рис. 7. Зависимость потока УФ-излучения лампы  $\Phi$  от мощности лампы  $P_{lamp}$ :  
 $\Delta$  —  $\Phi_1$  ( $d_1 = 25$  мм);  $\square$  —  $\Phi_2$  ( $d_2 = 16$  мм)

( $P_{lamp} = 156$  Вт). Следовательно, экспериментальная зависимость  $\Phi_1$  от  $P_{lamp}$  хорошо коррелирует с экспериментальной зависимостью  $P_{coil1}$  от  $P_{lamp}$ , включая совпадение мощности лампы в точке перегиба с мощностью лампы, при которой мощность потерь в проводе катушки минимальна ( $P_{lamp.min} = 105$  Вт). Поток УФ-излучения лампы с трубкой меньшего диаметра и меньшей длины  $\Phi_2$ , измеренный при двух мощностях лампы  $P_{lamp} = 98$  и  $131$  Вт на 10...15% меньше, чем  $\Phi_1$ .

Таким образом, представляется обоснованным утверждение, что скин-эффект влияет на величину потока УФ резонансного излучения лампы через мощность потерь в проводе катушки  $P_{coil}$ . Соответственно, это влияние должно проявляться и на КПД генерации УФ-излучения лампы  $\eta_{lamp} = \Phi/P_{lamp}$ , зависимость которого от мощности лампы приведена для обеих ламп на рис. 8. Видно, что КПД большей лампы  $\eta_{lamp1} = \Phi_1/P_{lamp}$  возрастает с увеличением мощности лампы от 30,5% ( $P_{lamp} = 91$  Вт) достигая максимального значения 48,5% при  $P_{lamp} = 105$  Вт, а на больших мощностях лампы незначительно снижается до 46% при  $P_{lamp} = 156$  Вт. Приведенные на рис. 8 значения КПД генерации УФ-излучения лампы с меньшими габаритами  $\eta_{lamp2} = \Phi_2/P_{lamp}$ , рассчитанные для двух измеренных значений  $\Phi_2$  и  $P_{lamp}$ , показывают, что  $\eta_{lamp2}$  на 12...15% ниже, чем  $\eta_{lamp1}$ , а его зависимость от мощности лампы имеет характер, близкий к зависимости  $\eta_{lamp1}$  от  $P_{lamp}$ .

Эффективность генерации резонансного УФ-излучения плазмой индукционного разряда определяется как  $\eta_{pl} = \Phi/P_{pl}$ . Поскольку длины плазменных витков в исследуемых лампах различны ( $\Lambda_{pl1} = 1040$  мм;  $\Lambda_{pl2} = 815$  мм), то следует сравнивать эффективности плазмы ламп с трубками различного диаметра при оди-

наковой погонной мощности плазмы. Из рисунка 9 следует, что КПД генерации УФ-излучения плазмы  $\eta_{pl1}$  монотонно возрастает с увеличением погонной мощности плазмы от 52 ( $P_1 = 0,5$  Вт/см) до 65% ( $P_1 = 1,05$  Вт/см), а  $\eta_{pl1}$  от  $P_1$  не обнаруживает корреляции с зависимостями напряженности ВЧ электрического поля  $\bar{E}_{pl1}$  и разрядного тока  $I_{pl1}$  от  $P_1$ , имеющими в области  $P_1 = 0,7...0,9$  Вт/см минимум и максимум, соответственно. Это говорит об отсутствии (или незначительности влияния) скин-эффекта на процессы генерации УФ-излучения в плазме исследуемого индукционного разряда.

Действительно, в плазме индукционного разряда с концентрацией электронов  $\sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup> и электронной температурой  $\sim 1$  эВ, возбужденного на частоте 1,7 МГц в смеси паров ртути ( $10^{-2}$  мм рт. ст.) и аргона (1 мм рт. ст.) в трубках диаметром 16 и 25 мм, длина релаксации электронов по энергиям  $\lambda_e^* \sim 20...30$  см значительно превышает диаметры обеих разрядных трубок и толщину скин-слоя  $\delta \sim 2...4$  см. В этом случае вызванное скин-эффектом изменение пространственного распределения напряженности ВЧ электрического поля в плазме не влияет на функцию распределения электронов по энергиям, пространственное распределение концентрации возбужденных и заряженных частиц в плазме, на генерацию и поток излучения плазмы [16, 22, 25].

Уменьшение диаметра разрядной трубки с 25 до 16 мм слабо влияет на КПД генерации УФ-излучения плазмы. Приведенные на рис. 9 значения  $\eta_{pl2}$ , полученные экспериментально, при двух значениях погонной мощности плазмы  $P_1 = 0,74$  и  $1,12$  Вт/см незначительно (на 5 и 10%) ниже, чем  $\eta_{pl1}$  индукционной лампы

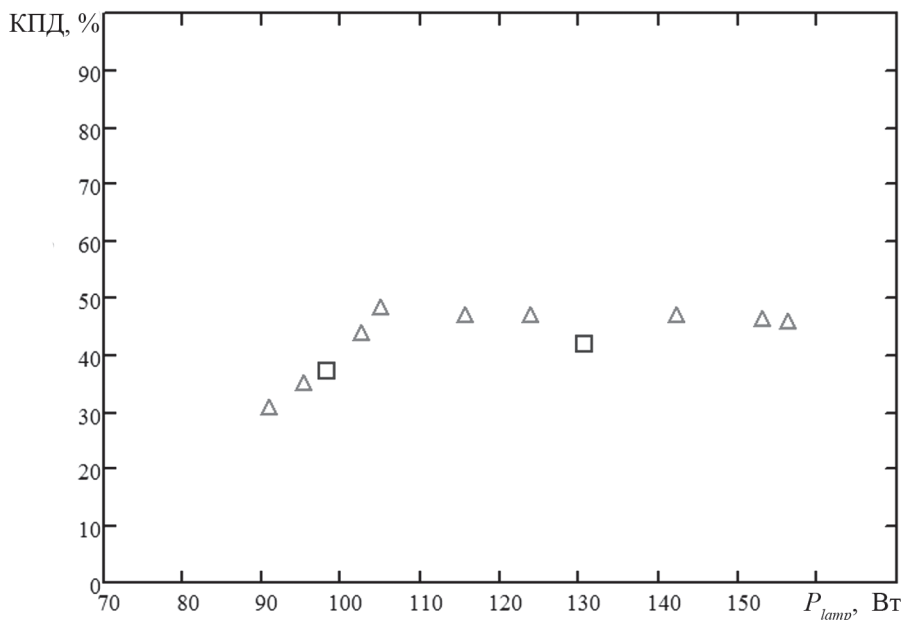


Рис. 8. Зависимость КПД генерации УФ-излучения лампы  $\eta_{lamp}$  от ее мощности  $P_{lamp}$ :  
 $\Delta$  —  $\eta_{lamp1}$  ( $d_{l1} = 25$  мм);  $\square$  —  $\eta_{lamp2}$  ( $d_{l2} = 16$  мм)

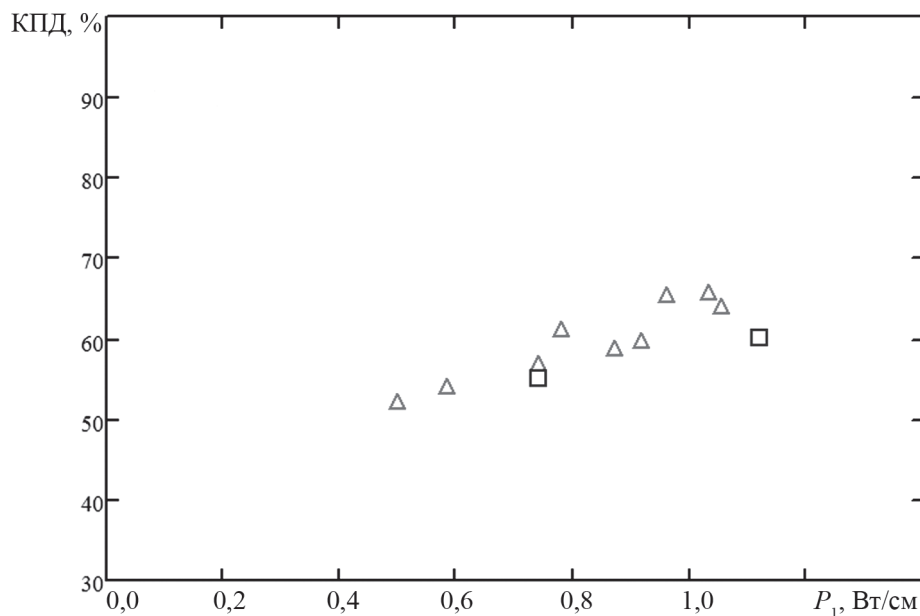


Рис. 9. Зависимость КПД генерации УФ-излучения плазмы  $\eta_{pl}$  от ее погонной мощности  $P_1$ :  
 $\Delta$  —  $\eta_{pl1}$  ( $d_{l1} = 25$  мм);  $\square$  —  $\eta_{pl2}$  ( $d_{l2} = 16$  мм)

с разрядной трубкой диаметром 25 мм. Столь близкие значения КПД генерации УФ-излучения плазмы ламп с трубками разного диаметра можно объяснить следующим. Более высокая (чем в лампе с трубкой диаметром 25 мм) напряженность ВЧ электрического поля в плазме лампы с трубкой диаметром 16 мм  $\bar{E}_{pl2}$  (см. рис. 4) и, следовательно, более высокая температура электронов  $T_{e2}$ , повышающая вероятности возбуждения уровней атома ртути  $6^3P_0$ ,  $6^3P_1$  и  $6^3P_2$ , участвующих в генерации УФ-излучения на длине волны 254 нм, компенсируется более низкой концентрацией электронов плазмы и,

соответственно, меньшим числом возбуждающих эти уровни соударений.

### Заключение

В бесферритной индукционной лампе с замкнутой разрядной трубкой диаметром 25 мм экспериментально обнаружен минимум в зависимостях мощности потерь в проводе индуктивной катушки  $P_{coil}$  и напряженности ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl1}$  от мощности лампы  $P_{lamp}$  (фактически плазмы  $P_{pl}$ ), объясняемый скин-эффектом.



Уменьшение диаметра разрядной трубки до 16 мм вызывает повышение  $P_{coil}$  и  $\bar{E}_{pl}$  и уменьшение разрядного тока  $I_{pl}$  и, предположительно, сдвигает минимум в зависимостях  $P_{coil2}$  и  $\bar{E}_{pl2}$  от  $P_{lamp}$  в область больших мощностей лампы (плазмы). Полученные зависимости коррелируют с таковыми линейных бесферритных индукционных УФ-ламп, работающих на близких уровнях мощности и частотах ВЧ поля  $f = 6,5 \dots 13,56$  МГц [26].

Установлено, что поток и КПД генерации УФ-излучения лампы с разрядной трубкой диаметром 25 мм  $\Phi_1$  и  $\eta_{lamp1}$  зависят от мощности потерь в проводе катушки, в то время, как КПД генерации УФ-излучения плазмы  $\eta_{pl1}$  не зависит от  $P_{coil}$ .

Энергетические эффективности генерации резонансного УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм  $\eta_{lamp1}$ ,  $\eta_{lamp2}$  и плазмы  $\eta_{pl1}$ ,  $\eta_{pl2}$  бесферритных индукционных источников УФ-излучения в лампах с замкнутыми трубками диаметром 25 и 16 мм превышают таковые линейных бесферритных индукционных УФ-ламп, работающих с разрядными трубками диаметром 32, 38 и 40 мм на частотах 9,5 и 13,56 МГц и близких уровнях мощности [8]. Они также выше КПД генерации УФ-

излучения лампы и плазмы трубчатых электродных УФ-ламп таких же диаметров, работающих на близких погонных мощностях плазмы, но на более низких частотах возбуждения 20...80 кГц [27].

Для повышения  $\eta_{lamp}$  следует снизить мощность потерь в проводе индуктивной катушки, чего можно добиться благодаря:

- применению многожильного провода (литцендрата), обладающего на частотах 300...3000 кГц низким сопротивлением [8, 9];
- увеличению числа витков индуктивной катушки [9, 26];
- повышению частоты возбуждения индукционного разряда [9, 26].

Роста  $\eta_{pl}$  можно добиться, понизив давление инертного газа (аргона, смеси аргона с неоном) 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, возбужденной на частоте 265 кГц и погонной мощности 1,5 Вт/см [7].

## Литература

1. Shaffer J., Godyak V.A. The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamp // J. Illuminating Eng. Soc. 2013. V. 28 (1). Pp. 142—148.
2. Гвоздев-Карелин С.В. Особенности и примеры применения безэлектродной люминесцентной лампы Endura фирмы Osram // Светотехника. 2006. № 3. С. 9—12.
3. Godyak V. Ferromagnetic Enhanced Inductive Plasma Sources // J. Phys. D. Appl. Phys. 2013. V. 46. Pp. 1—23.
4. Kolobov V.I., Godyak V.A. Inductively Coupled Plasmas at Low Driving Frequencies // Plasma Sources Sci. Technol. 2017. V. 26. No. 7. Pp. 075013.
5. Исупов М.В., Кротов С.В., Литвинцев А.Ю., Уланов И.М. Индукционная ультрафиолетовая лампа // Светотехника. 2007. № 5. С. 37—40.
6. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity Low-pressure Electrodeless Mercury-argon Lamp for UV Disinfection of Wastewater // J. Water and Environment Techn. 2005. V. 3. No.1. Pp. 71—76.
7. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм // Светотехника. 2016. № 1. С. 41—44.
8. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Ч. 2. Излучательные характеристики плазмы // УПФ. 2016. № 4. С. 372—384.
9. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160...1000 kHz // Plasma Sources Sci. and Techn. 2002. V. 11(2). Pp. 218—224.

## References

1. Shaffer J., Godyak V.A. The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamp. J. Illuminating Eng. Soc. 2013;28 (1):142—148.
2. Gvozdev-Karelin S.V. Osobennosti i Primery Prime-neniya Bezelektrodnoy Lyuminescentnoy Lampy Endura Firmy Osram. Svetotekhnika. 2006;3:9—12. (in Russian).
3. Godyak V. Ferromagnetic Enhanced Inductive Plasma Sources. J. Phys. D. Appl. Phys. 2013;46:1—23.
4. Kolobov V.I., Godyak V.A. Inductively Coupled Plasmas at Low Driving Frequencies. Plasma Sources Sci. Technol. 2017;26;7:075013.
5. Isupov M.V., Krotov S.V., Litvintsev A.Yu., Ulanov I.M. Induktsionnaya Ul'trafiolotovaya Lampa. Svetotekhnika. 2007;5:37—40. (in Russian).
6. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity Low-pressure Electrodeless Mercury-argon Lamp for UV Disinfection of Wastewater. J. Water and Environment Techn. 2005;3;1:71—76.
7. Levchenko V.A., Popov O.A., Svitnev S.A., Starshinov P.V. Elektricheskie i Izluchatel'nye Kharakteristiki Lampy Transformatornogo Tipa s Razryadnoy Trubkoy Diametrom 16,6 mm. Svetotekhnika. 2016;1:41—44. (in Russian).
8. Svitnev S.A., Popov O.A., Levchenko V.A., Starshinov P.V. Kharakteristiki Besferritnogo Induktsionnogo Razryada Nizkogo Davleniya. Ch. 2. Izluchatel'nye Kharakteristiki Plazmy. UPF. 2016;4:372—384. (in Russian).
9. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160...1000 kHz. Plasma Sources Sci. and Techn. 2002; 11(2):218—224.

10. **Попов О.А., Никифорова В.А.** Индукционный бесферритный источник света мощностью 300...400 Вт на частоте 200...400 кГц // Вестник МЭИ. 2010. № 2. С. 159—164.
11. **Попов О.А., Старшинов П.В., Васина В.Н.** Исследование характеристик индукционного бесферритного ртутного разряда низкого давления в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 89—96.
12. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge // Plasma Sources Sci. Techn. 1992. No. 1. Pp. 179—185.
13. **Rauner D., Briefi S. Fantz U.** RF Power Transfer Efficiency of Inductively Coupled Low Pressure H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> Discharges // Plasma Sources Sci. Techn. 2017. V. 26. P. 095004.
14. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge // Plasma Sources Sci. Techn. 1997. V. 6. No. 4. Pp. 540—550.
15. **Elenbaas W.** Light Sources. N.-Y.: Crane, Russak & Co, 1972.
16. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
17. **Piejak R., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** Electric Field in Inductively Coupled discharges // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. No. 7. Pp. 3590—3593.
18. **Исупов М.В., Федосеев А.В., Сухинин Г.И., Уланов И.М.** Экспериментальное и теоретическое исследование низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 5. С. 681—692.
19. **Cunge G., Crawly B., Vender D., Turner M.M.** Anomalous Skin Effect and Collisionless Power Dissipation in Inductively-coupled Discharges // J. Appl. Phys. 2000. V. 89. No. 7. Pp. 3580—3589.
20. **Hyo-Chang Lee, Seung Ju Oh, Chin-Wookn Chung.** Experimental Observation of the Skin Effect on Plasma Uniformity in Inductively Coupled Plasmas with a Radio Frequency Bias // Plasma Sources Sci. Techn. 2012. V. 21. No. 3. P. 035003.
21. **Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M.** Hot Plasma and Nonlinear Effects in Inductive Discharges // Phys. Plasma. 1999. V. 6. No. 5. Pp. 1804—1812.
22. **Александров А.Ф., Вавилин К.В., Кралькина Е.А., Неклюдова П.А., Павлов В.Б.** Исследование параметров плазмы индуктивного ВЧ-источника плазмы диаметром 46 см. Ч. I. Параметры плазмы в области скин-слоя // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 34—37.
23. **Никифорова В.А., Попов О.А.** Влияние частоты ВЧ-поля и разрядного тока на радиальное распределение параметров плазмы индукционного бесферритного разряда в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. 2012. № 1. С. 108—114.
24. **Kralkina E.A. et al.** RF Power Absorption by Plasma of a Low-pressure Inductive Discharge // Plasma Sources Sci. Techn. 2016. V. 25. P. 015016.
10. **Popov O.A., Nikiforova V.A.** Induktсионnyy besferritnyy istochnik sveta moshchnost'yu 300...400 Vt na chastote 200...400 kGts. Vestnik MEI. 2010;2:159—164. (in Russian).
11. **Popov O.A., Starshinov P.V., Vasina V.N.** Issledovanie Kharakteristik Induktсионnogo Besferritnogo Rtutnogo Razryada Nizkogo Davleniya v Zamknotoy Trubke. Vestnik MEI. 2018;4:89—96. (in Russian).
12. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge. Plasma Sources Sci. Techn. 1992;1:179—185.
13. **Rauner D., Briefi S. Fantz U.** RF Power Transfer Efficiency of Inductively Coupled Low Pressure H<sub>2</sub> and D<sub>2</sub> Discharges. Plasma Sources Sci. Techn. 2017;26:095004.
14. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge. Plasma Sources Sci. Techn. 1997;6;4:540—550.
15. **Elenbaas W.** Light Sources. N.-Y.: Crane, Russak & Co, 1972.
16. **Rayzer Yu.P.** Fizika gazovogo razryada. M.: Nauka, 1987. (in Russian).
17. **Piejak R., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** Electric Field in Inductively Coupled discharges. J. Appl. Phys. 2001;89;7:3590—3593.
18. **Isupov M.V., Fedoseev A.V., Sukhinin G.I., Ulanov I.M.** Eksperimental'noe i Teoreticheskoe Issledovanie Nizkochastotnogo Induktсионnogo Razryada Transformatornogo Tipa. Teplofizika i Aeromekhanika. 2014;21;5:681—692. (in Russian).
19. **Cunge G., Crawly B., Vender D., Turner M.M.** Anomalous Skin Effect and Collisionless Power Dissipation in Inductively-coupled Discharges. J. Appl. Phys. 2000;89;7:3580—3589.
20. **Hyo-Chang Lee, Seung Ju Oh, Chin-Wookn Chung.** Experimental Observation of the Skin Effect on Plasma Uniformity in Inductively Coupled Plasmas with a Radio Frequency Bias. Plasma Sources Sci. Techn. 2012;21;3:035003.
21. **Godyak V.A., Piejak R.B., Alexandrovich B.M.** Hot Plasma and Nonlinear Effects in Inductive Discharges. Phys. Plasma. 1999;6;5:1804—1812.
22. **Aleksandrov A.F., Vavilin K.V., Kral'kina E.A., Neklyudova P.A., Pavlov V.B.** Issledovanie Parametrov Plazmy Induktivnogo VCH-istochnika Plazmy Diametrom 46 sm. Ch. I. Parametry Plazmy v Oblasti Skin-sloya. Prikladnaya Fizika. 2013;5:34—37. (in Russian).
23. **Nikiforova V.A., Popov O.A.** Vliyanie Chastoty VCH-polya i Razryadnogo Toka na Radial'noe Raspredele-nie Parametrov Plazmy Induktсионnogo Besferritnogo Razryada v Zamknotoy Trubke. Vestnik MEI. 2012;1:108—114. (in Russian).
24. **Kralkina E.A. et al.** RF Power Absorption by Plasma of a Low-pressure Inductive Discharge. Plasma Sources Sci. Techn. 2016;25:015016.

25. **Trieschmann J., Mussenbrock T.** Kinetic Analysis of Negative Power Deposition in Inductive Low Pressure Plasmas // Plasma Sources Sci. Techn. 2017. V. 26. P. 024004.

26. **Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В.** Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Ч. 1. Электрические параметры индуктивной катушки // УПФ. 2016. № 2. С. 139—149.

27. **Костюченко С.В., Кудрявцев Н.Н., Левченко В.А., Соколов Д.В., Шунков Ю.Е.** Новая высокоэффективная газоразрядная лампа низкого давления повышенной мощности // Тезисы докл. XLI Междунар. Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород, 2014. С. 242.

25. **Trieschmann J., Mussenbrock T.** Kinetic Analysis of Negative Power Deposition in Inductive Low Pressure Plasmas. Plasma Sources Sci. Techn. 2017;26:024004.

26. **Svitnev S.A., Popov O.A., Levchenko V.A., Starshinov P.V.** Kharakteristiki Besferritnogo Induktсионnogo Razryada Nizkogo Davleniya. Ch. 1. Elektricheskie Parametry Induktivnoy Katushki. UPF. 2016;2:139—149. (in Russian).

27. **Kostyuchenko S.V., Kudryavtsev N.N., Levchenko V.A., Sokolov D.V., Shunkov Yu.E.** Novaya Vysokoeffektivnaya Gazorazryadnaya Lampa Nizkogo Davleniya Povyshennoy Moshchnosti. Tezisy Dokl. XLI Mezhdunar. Zvenigorodskoy Konf. po Fizike Plazmy i UTS. Zvenigorod, 2014:242. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

**Старшинов Павел Валерьевич** — аспирант кафедры светотехники, НИУ «МЭИ», e-mail: blitzzz-z@ya.ru

**Попов Олег Алексеевич** — доктор технических наук, профессор кафедры светотехники, НИУ «МЭИ», e-mail: popovoleg445@yahoo.com

**Ирхин Игорь Вячеславович** — кандидат технических наук, ведущий инженер Всероссийского электротехнического института — филиала Российского федерального ядерного центра — Всероссийского научно-исследовательского института технической физики им. академика Е.И. Забабахина

**Васина Виктория Николаевна** — инженер-светодизайнер компании Alfresco, г. Москва

**Левченко Владимир Александрович** — кандидат физико-математических наук, заместитель заведующего лабораторией, ООО «ЛИТ», г. Москва

#### Information about authors:

**Starshinov Pavel V.** — Ph.D.-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: blitzzz-z@ya.ru

**Popov Oleg A.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI, e-mail: popovoleg445@yahoo.com

**Irkhin Igor V.** — Ph.D. (Techn.), Leading Engineer of All-Russian Electrotechnical Institute — Branch of the Russian Federal Nuclear Center — All-Russian Scientific Research Institute of Technical Physics Academician E.I. Zababakhin

**Vasina Viktoriya N.** — Engineer-lighting designer of Company Alfresco, Moscow

**Levchenko Vladimir A.** — Ph.D. (Phys.-Math.), Deputy Head of the Laboratory of Open Company «LIT», Moscow

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 27.08.2018

**The article received to the editor:** 27.08.2018