

УДК 537.533

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-86-94

## Характеристики индукционного ртутного разряда низкого давления в замкнутой трубке

О.А. Попов, Р.А. Иликеева, С.А. Шилова, И.А. Ошурков

Исследованы характеристики безэлектродных бесферритных разрядов низкого давления в замкнутых кварцевых трубках длиной 815 мм и внутренним диаметром 16,6 мм. Разряд возбуждался на частоте 13,56 МГц и мощностях плазмы 10–275 Вт в смеси паров ртути (~ 0,01 Торр) с аргоном (0,5; 1,0 и 2,0 Торр) с помощью катушки индуктивности, размещенной по внешнему периметру разрядной трубки. С увеличением мощности плазмы ВЧ-напряжение и ток катушки возрастают тем быстрее, чем ниже давление аргона. Рассчитанная в рамках трансформаторной модели индукционного разряда зависимость сопротивления плазмы от ее мощности имеет минимум, сдвигающийся с повышением давления аргона в сторону больших мощностей плазмы. Чем ниже давление аргона, тем больше возрастает с мощностью плазмы средняя по сечению плазмы напряженность ВЧ электрического поля, и тем при меньшей мощности плазмы достигается максимум зависимости разрядного тока от мощности плазмы.

*Ключевые слова:* индукционный разряд, ртутная плазма низкого давления, катушка индуктивности, трансформаторная модель.

*Для цитирования:* Попов О.А., Иликеева Р.А., Шилова С.А., Ошурков И.А. Характеристики индукционного ртутного разряда низкого давления в замкнутой трубке // Вестник МЭИ. 2022. № 2. С. 86—94. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-86-94.

## The Characteristics of Closed-Loop Inductively Coupled Low Mercury Pressure Discharge

O.A. Popov, R.A. Ilikeeva, S.A. Shilova, I.A. Oshurkov

The characteristics of inductively coupled ferrite-free low mercury pressure discharges generated in closed-loop 815-mm-long quartz tubes 16.6 mm in diameter are studied. Discharges were excited at a frequency of 13.56 MHz with plasma power ranging from 10–270 W in a mixture of mercury vapor (~0.01 Torr) and argon (0.5, 1.0 and 2.0 Torr) by means of an induction coil placed over the discharge tube wall external perimeter. With a growth of plasma power, the lower the argon pressure, the faster the growth rates of the RF voltage across the induction coil and the current through it. The plasma impedance as a function of plasma power calculated within the framework of the inductively-coupled discharge transformer model has a minimum, which shifts toward higher plasma power values with increasing the argon pressure. The lower the argon pressure the higher the RF electric field averaged over the plasma cross section, and the lower the plasma power at which the dependence of discharge current on plasma power reaches its maximum.

*Key words:* inductively-coupled discharge, low mercury pressure plasma, induction coil, transformer model.

*For citation:* Popov O.A., Ilikeeva R.A., Shilova S.A., Oshurkov I.A. The Characteristics of Closed-Loop Inductively Coupled Low Mercury Pressure Discharge. Bulletin of MPEI. 2022;2:86—94. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-2-86-94.

### Введение

Плазма безэлектродных индукционных разрядов в смесях паров ртути низкого давления и инертных газов — эффективный источник ультрафиолетового (УФ) резонансного излучения на длинах волн 185 и 254 нм, применяющийся в бактерицидных лампах для обеззараживания воды, воздуха и поверхностей [1, 2]. Благодаря отсутствию внутренних (накальных или холодных) электродов у ртутных индукционных ламп высокий срок службы (> 40 тыс. ч), они могут работать на низких давлениях инертного газа 0,1...1,0 Торр, на которых максимален КПД генерации УФ резонансно-

го излучения [3 — 7]. Это делает их серьезными конкурентами электродным ртутным УФ-лампам, работающим на более высоких давлениях инертного газа (2...3 Торр) [8].

Особый интерес представляют бесферритные индукционные источники УФ-излучения, в которых ртутная плазма возбуждается в замкнутых кварцевых разрядных трубках с помощью катушки индуктивности, размещенной по периметру (внешнему или внутреннему) трубки [5, 9]. Экспериментальные исследования ламп с замкнутыми кварцевыми разрядными трубками диаметром 16,6 мм, наполненными парами

ртути ( $\sim 10^{-2}$  Торр) и аргоном (1,0 Торр), работающими на частоте  $f = 1,7$  МГц и удельных (погонных) мощностях плазмы  $P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl} = 1,2...2,1$  Вт/см ( $P_{pl}$  — поглощенная плазмой мощность;  $\Lambda_{pl}$  — длина плазмы), описаны в [5]. КПД генерации резонансного (254 нм) УФ-излучения лампы весьма высок (65%), значительно превышает КПД генерации УФ-излучения не только электродных [8], но и индукционных бесферритных линейных УФ-ламп, работающих на частотах 1...6 МГц [4], и УФ-ламп трансформаторного типа (с магнитопроводом), функционирующих на частоте 265 кГц [3].

Поскольку частота, на которой в [5] возбуждали индукционный разряд ( $f = 1,7$  МГц), не входит в разрешенный диапазон ВЧ-частот ( $f = 2,65...13,56$  МГц), то целесообразно изучить бесферритные индукционные лампы в замкнутых трубках на разрешенных частотах, начав с самой высокой из них —  $f = 13,56$  МГц. Желательно расширить интервал давлений инертного газа (аргона) до  $p_{Ar} = 0,5...2,0$  Торр, в котором ожидаются максимальные КПД генерации УФ-излучения ртутной плазмы на длине волны 254 нм [3 — 5]. С научной точки зрения представляют интерес исследования параметров плазмы бесферритных индукционных ламп в замкнутых трубках, определяющих КПД генерации УФ резонансного излучения, в частности, разрядного тока  $I_{pl}$ , сопротивления плазмы  $R_{pl}$  и усредненной по сечению разрядной трубки напряженности ВЧ электрического поля в плазме  $\bar{E}_{pl}$ .

### Экспериментальная установка и методики измерений

Индукционный разряд зажигали на частоте  $f = 13,56$  МГц в замкнутой кварцевой трубке с внутренним диаметром  $d = 16,6$  мм и длиной замкнутой осевой линии  $\Lambda_t = \Lambda_{pl} = 815$  мм (рис. 1). Лампа имела форму вытянутого кольца длиной 375 мм с расстоянием между длинными параллельными участками разрядной трубки — 82 мм. Одновитковую катушку индуктивности

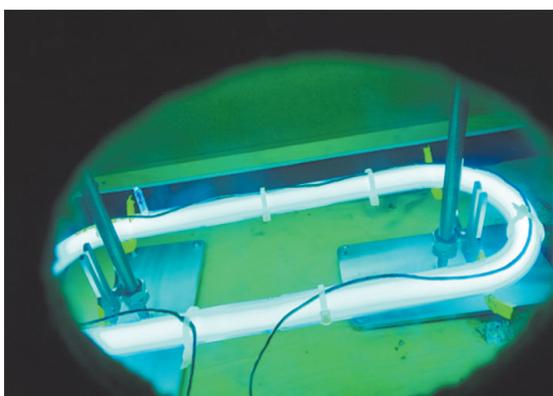


Рис. 1. Индукционный ртутный разряд низкого давления в бесферритной замкнутой кварцевой трубке с катушкой индуктивности

( $L_c = 1,0$  мкГн), выполненную из многожильного провода (литцедрата) диаметром  $d_w = 1,5$  мм и погонным сопротивлением  $\rho_w = 1,4 \cdot 10^{-4}$  Ом/см, размещали по внешнему периметру лампы (см. рис. 1). Давление паров ртути в разрядной трубке выбрано оптимальным (максимальный поток УФ-излучения) и поддерживалось температурой ртутно-индиевой амальгамы  $T_{amig} = 70...100$  °С, распределенной по внутренней (вакуумной) поверхности стенки разрядной трубки. Давление буферного газа (аргона) —  $p_{Ar} = 0,5; 1,0$  и  $2,0$  Торр.

ВЧ-напряжение подавали на катушку индуктивности от генератора ВЧ-мощности, работающего на частоте 13,56 МГц в диапазоне мощностей  $P = 2...400$  Вт. Потребляемая лампой мощность  $P$  складывалась из мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда  $P_{pl}$  и мощности потерь в проводе катушки индуктивности  $P_c$ , устанавливаемой экспериментально методом замещения в отсутствие в лампе разряда [4, 9]. Потери мощности в конденсаторах согласующего устройства, включенного между ВЧ-генератором и катушкой индуктивности, не превышали 1...2 Вт. Мощность электромагнитного излучения, рассеиваемая катушкой, принята ничтожно малой  $P_{эм} \ll P_c$  [4, 9]. ВЧ-напряжение  $U_c$  и ВЧ-ток  $I_c$  катушки измеряли с помощью высоковольтного щупа, трансформатора тока и четырехканального осциллографа.

Моделирование и расчет параметров плазмы проводили с использованием трансформаторной модели индукционного разряда низкого давления, экспериментальных данных ВЧ-напряжения и тока катушки и поглощенной плазмой мощности [9, 10].

### Результаты исследований и их обсуждение

При подаче на катушку индуктивности ВЧ-напряжения  $U_c \sim 100...150$  В в разрядной трубке в месте расположения высоковольтного конца катушки зажигали емкостной разряд мощностью  $P_{cap} = 3...10$  Вт. Последующее повышение ВЧ-напряжения на катушке вело к возникновению индукционного разряда с плазмой, заполняющей объем замкнутой трубки в виде ярко светящегося, однородного по длине трубки плазменного витка (см. рис. 1). Исследование зажигания индукционного разряда, как и совместного горения емкостного и индукционного разрядов, не входит в задачи настоящей работы. Отметим лишь, что на начальной стадии формирования разряда и на малых уровнях мощности значительная часть мощности емкостного разряда идет на ускорение ионов ртути в пристеночном слое в месте расположения провода катушки. Об этом свидетельствует темная полоса на внутренней стороне разрядной трубки в месте расположения провода, предположительно образованная имплантированными в кварцевую стенку разрядной трубки ионами ртути, ускоренными в пристеночном (фактически, в приэлектродном) слое до весьма высоких показателей энергии  $W \sim 0,3eU_c$  [11, 12].

Результаты измерений ВЧ-напряжения на катушке индуктивности  $U_c$  ламп с давлением аргона 0,5; 1,0 и 2,0 Торр даны в качестве функций мощности плазмы  $P_{pl}$  на рис. 2. Из данных рис. 2. следует, что при  $P_{pl} = 20...75$  Вт ВЧ-напряжение на катушке растет с мощностью плазмы, при  $P_{pl} = 75...100$  Вт оно незначительно уменьшается, а, начиная с 100...130 Вт, монотонно возрастает, достигая на  $P_{pl} = 270$  Вт высоких значений  $U_c = 850$  В. Чем ниже давление аргона, тем быстрее растет с мощностью плазмы ВЧ-напряжение на катушке индуктивности.

Аналогичный характер носит зависимость ВЧ-тока катушки  $I_c$  от мощности плазмы, увеличивающегося от 1,7...1,8 ( $P_{pl} = 125...130$  Вт) до 2,4...2,5 А ( $P_{pl} = 270$  Вт) (рис. 3). Из графиков рис. 2 и 3 видно, что двукратное увеличение мощности плазмы (от 125 до 250 Вт) слабо влияет на комплексное сопротивление (импеданс) катушки индуктивности, нагруженной плазмой  $Z_1 = U_c/I_c$ , уменьшающееся всего на 6...8%.

Сопротивление плазменного витка  $R_{pl}$  рассчитывали в рамках трансформаторной модели индукционного разряда (при допущении  $\omega L_{ind} < 0,3 R_{pl}$ , справедливом при удельных (погонных) мощностях плазмы  $P_1 < 3$  Вт/см) по формуле [9]:

$$R_{pl} = (\omega M)^2 I_c^2 / P_{pl}^2$$

где  $\omega$  — круговая частота ВЧ-поля,  $\omega = 2\pi f = 85,2 \cdot 10^6$  с<sup>-1</sup>;  $M$  — взаимная индуктивность плазменного витка и катушки индуктивности,  $M = k(L_c L_{ind})^{1/2}$ ;  $L_{ind}$  — геометрическая индуктивность плазменного витка [13, 14],  $L_{ind} = 0,5$  мкГн;  $\omega L_{ind}$  — индуктивное сопротивление плазменного витка;  $k$  — коэффициент связи плазменного витка с катушкой индуктивности [9, 13],  $k = 0,9$ .

Результаты расчетов  $R_{pl}$ , сделанных для трех давлений аргона, представлены в виде функций  $P_{pl}$  на рис. 4. На малых мощностях плазмы сопротивление плазменного витка уменьшается с ростом  $P_{pl}$  и достигает минимального значения  $R_{pl,min} = 40...42$  Ом на мощности плазмы  $P_{pl,m}$ , возрастающей с повышением давления аргона от 155 Вт ( $p_{Ar} = 0,5$  Торр) до 220 Вт ( $p_{Ar} = 2,0$  Торр). Чем ниже давление аргона, тем больше с увеличением мощности плазмы растет сопротивление плазменного витка.

Ток индукционного разряда  $I_{pl}$ , посчитан в рамках трансформаторной модели индукционного разряда [9, 13]

$$I_{pl} = P_{pl} / \omega M I_c$$

и изображен на рис. 5 в виде функции мощности плазмы  $P_{pl}$ . В данном случае на относительно малых мощностях плазмы  $P_{pl} = 60...150$  Вт  $I_{pl}$  монотонно возрастает с увеличением  $P_{pl}$  от 0,66 ( $P_{pl} = 60$  Вт) до 1,6 А

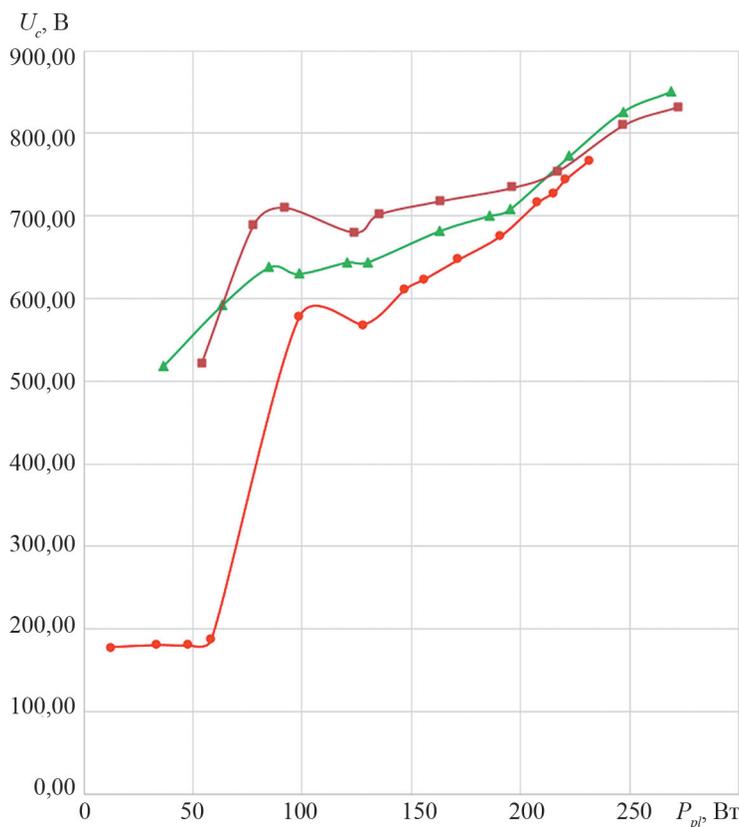


Рис. 2. Зависимости ВЧ-напряжения на катушке индуктивности  $U_c$  от мощности плазмы  $P_{pl}$ :

● — 0,5 Торр; ▲ — 1,0 Торр; ■ — 2,0 Торр

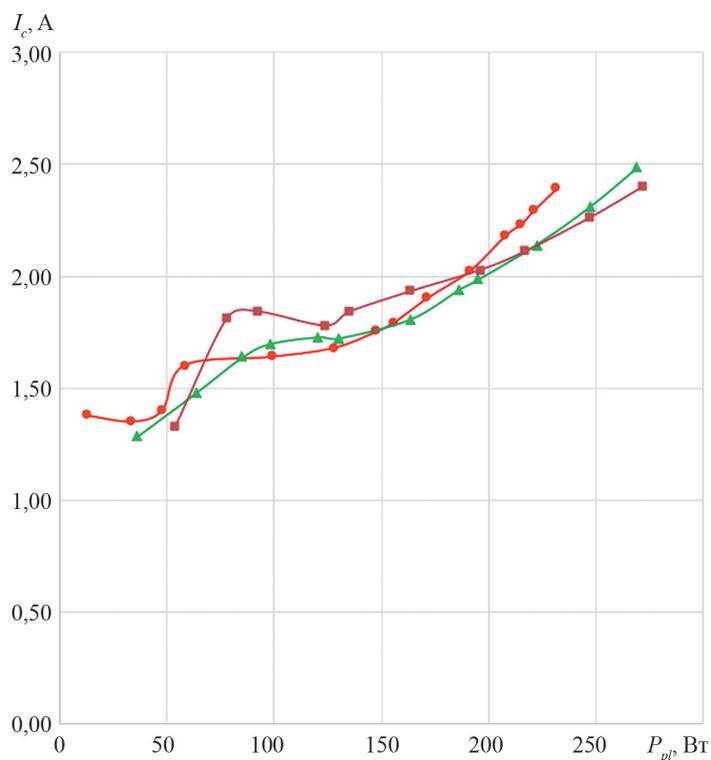


Рис. 3. Зависимости ВЧ-тока катушки индуктивности  $I_c$  от мощности плазмы  $P_{pl}$ :  
 ● — 0,5 Торр; ▲ — 1,0 Торр; ■ — 2,0 Торр



Рис. 4. Зависимости сопротивления плазменного витка  $R_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$ :  
 ● — 0,5 Торр; ▲ — 1,0 Торр; ■ — 2,0 Торр

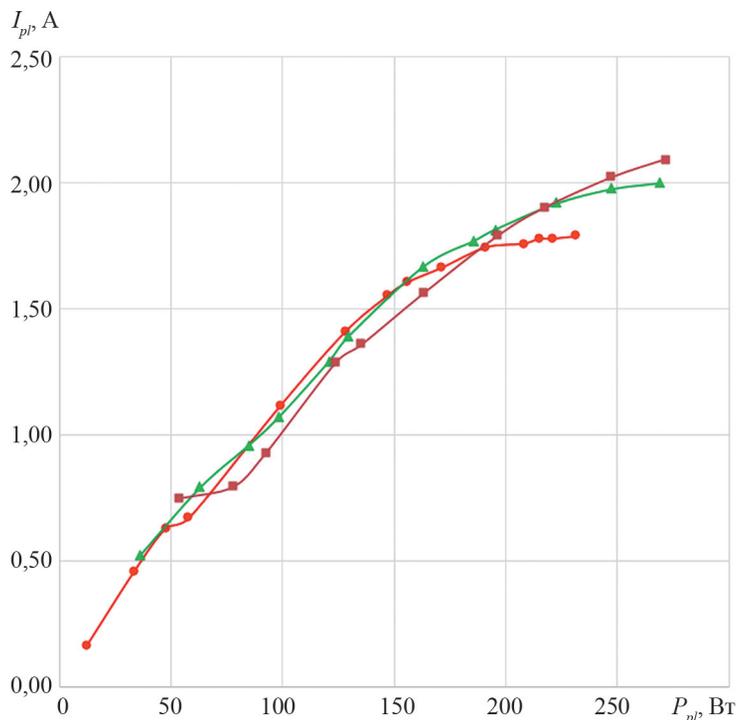


Рис. 5. Зависимость разрядного тока  $I_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$ :

● — 0,5 Торр; ▲ — 1,0 Торр; ■ — 2,0 Торр

( $P_{pl} = 150$  Вт), но, начиная с определенного значения  $P_{pl,m}$ , его рост замедляется. Чем ниже давление аргона, тем меньше  $P_{pl,m}$ : 150 Вт (0,5 Торр); 160 Вт (1,0 Торр) и 200 Вт (2,0 Торр).

Средняя по сечению трубки напряженность ВЧ электрического поля  $\bar{E}_{pl}$  на частотах  $\omega = 2\pi f \ll \nu_{e-N}$  ( $\nu_{e-N}$  — частота упругих соударений электронов с атомами рабочей смеси), выполняемая в условиях эксперимента, практически равна ее активной составляющей  $\bar{E}_a$  и определяется в рамках трансформаторной модели индукционного разряда [9, 13]:

$$\bar{E}_{pl} \approx \bar{E}_a = \omega M I_c / \Lambda_{pl}$$

Зависимость  $\bar{E}_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$  продемонстрирована на рис. 6. Начиная с  $P_{pl} \sim 125 \dots 130$  Вт,  $\bar{E}_{pl}$  возрастает с увеличением  $P_{pl}$ . Чем ниже давление аргона, тем выше растет  $\bar{E}_{pl}$ , достигающая при  $P_{pl} = 230$  Вт ( $P_1 = 2,8$  Вт/см) значений: 1,6 ( $p_{Ar} = 0,5$  Торр), 1,47 ( $p_{Ar} = 1,0$  Торр) и 1,45 В/см ( $p_{Ar} = 2,0$  Торр), превышающих таковые в плазме ПС разряда постоянного тока [15]. Нетрудно обнаружить хорошую корреляцию рассчитанной по трансформаторной модели зависимости напряженности ВЧ электрического поля от мощности плазмы с экспериментальной зависимостью ВЧ-напряжения на катушке индуктивности  $U_c$  от  $P_{pl}$ .

Увеличение с ростом мощности плазмы  $R_{pl}$  и  $\bar{E}_{pl}$  и замедление роста  $I_{pl}$ , предположительно, связаны со скин-эффектом, существенным на частотах  $f \geq 10$  МГц, и плотностях плазмы  $n_e \geq 10^{11}$  см<sup>-3</sup> [16 — 19]. Скин-эффект проявляется в выталкивании ВЧ электричес-

кого поля из области плотной плазмы и прижимании его к стенкам разрядной трубки в месте расположения витков катушки индуктивности [16, 17, 20, 21]. В результате уменьшается сечение токопроводящего слоя плазменного витка и повышается его сопротивление  $R_{pl}$ , а вместе с этим возрастает активная составляющая ВЧ-напряжения на плазменном витке  $U_a \approx U_{pl} = \bar{E}_{pl} \Lambda_{pl}$ . В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда с увеличением  $U_{pl}$  растут ВЧ напряжение  $U_c$  и ток катушки индуктивности  $I_c$ .

Чем выше частота ВЧ-поля, тем выше радиальная и азимутальная неоднородность параметров плазмы: функции распределения электронов по энергиям, температуры и концентрации электронов, напряженности ВЧ электрического поля (17, 18, 22 — 25), и, как следствие, увеличиваются радиальная и азимутальная неоднородности генерации оптического излучения плазмы. С практической точки зрения существенно то, что сужение токопроводящего слоя плазмы повышает концентрацию электронов в слое, вследствие чего возрастает частота тушащих соударений резонансно-возбужденных атомов ртути с электронами и снижается КПД генерации резонансного УФ-излучения (254 нм) [26].

На рисунке 7 приведены вольтамперные характеристики (ВАХ), построенные по рассчитанным ВЧ-напряжениям на плазменном витке  $U_{pl} = \bar{E}_{pl} \Lambda_{pl}$  и разрядным токам  $I_{pl}$ . Видно, что, начиная с определенного значения разрядного тока  $I_{pl,m}$ , ВЧ-напряжение на плазменном витке  $U_{pl}$  круто возрастает, что, предположительно, связано со скин-эффектом. Как следует из

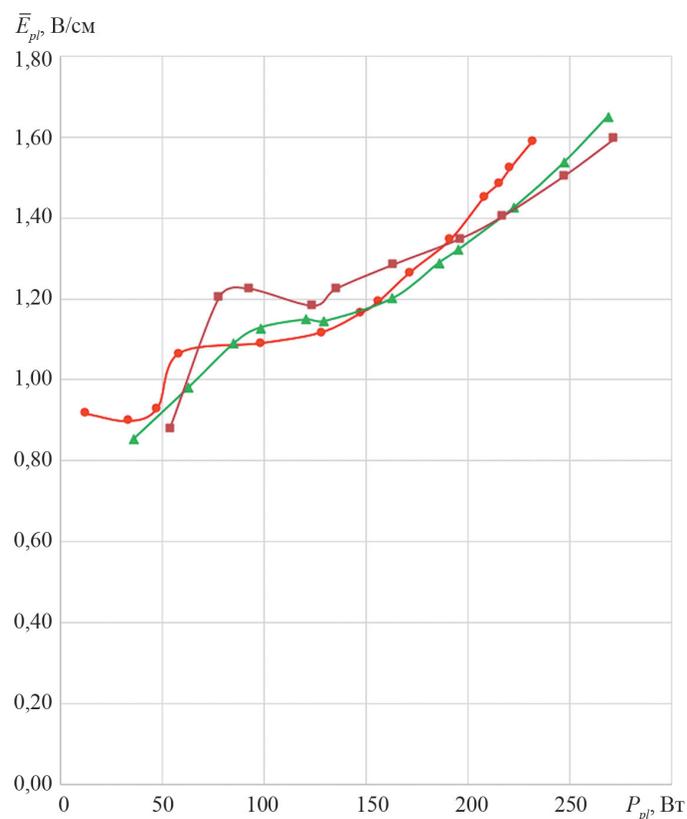


Рис. 6. Зависимости усредненной по сечению трубки напряженности ВЧ электрического поля  $\bar{E}_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$ :

● — 0,5 Торр; ▲ — 1,0 Торр; ■ — 2,0 Торр

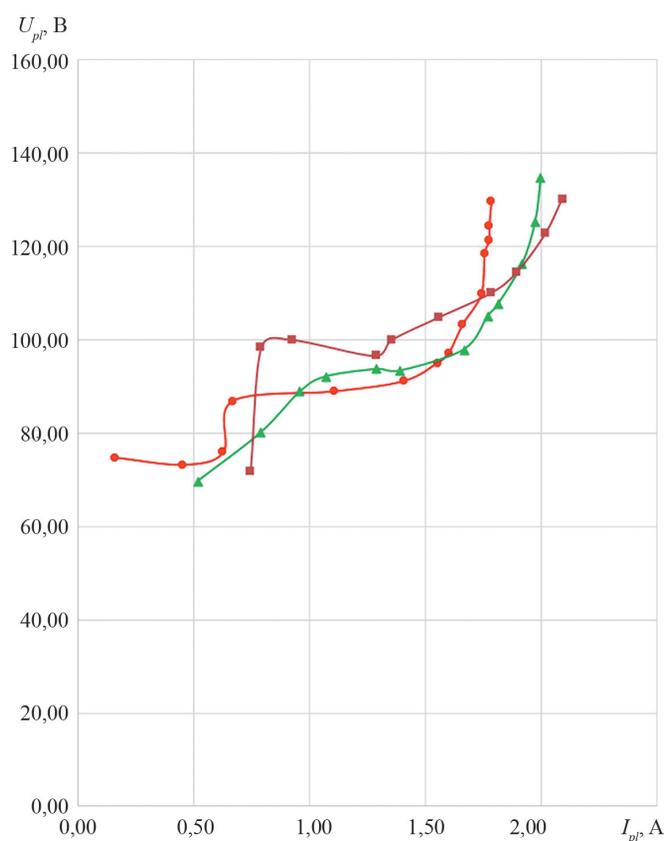


Рис. 7. Вольтамперная характеристика (ВАХ) индукционного разряда:

● — 0,5 Торр; ▲ — 1,0 Торр; ■ — 2,0 Торр

рис. 7,  $I_{pl,m}$  увеличивается с повышением давления аргона от  $\sim 1,5$  ( $p_{Ar} = 0,5$  Торр) до  $\sim 2,0$  А ( $p_{Ar} = 2,0$  Торр).

### Заключение

На мощностях плазмы  $P_{pl} > 130$  В  $U_c$  и ток катушки индуктивности  $I_c$  растут с увеличением мощности плазмы тем быстрее, чем ниже давление аргона.

Зависимость сопротивления плазменного витка  $R_{pl}$  от мощности плазмы  $P_{pl}$  имеет минимум  $R_{pl,min} = 40..42$  Ом, сдвигающийся с увеличением давления аргона в область больших мощностей плазмы.

Разрядный ток  $I_{pl}$  растет с увеличением мощности плазмы до определенной мощности  $P_{pl,m}$ , начиная с которой зависимость  $I_{pl}$  от  $P_{pl}$  становится более полой. Чем ниже давление аргона, тем меньше  $P_{pl,m}$ , и тем при

меньших мощностях плазмы разрядный ток достигает максимума.

Средняя по сечению разрядной трубки напряженность ВЧ-поля в плазме  $\bar{E}_{pl}$  возрастает на мощностях плазмы  $P_{pl} > 100$  Вт тем круче, чем ниже давление аргона, достигая при  $P_{pl} = 250$  Вт ( $P_1 = 3,1$  Вт/см) высоких для таких удельных (погонных) мощностей плазмы значений:  $1,7$  ( $p_{Ar} = 0,5$  Торр),  $1,55$  В/см ( $p_{Ar} = 1,0$  Торр) и  $1,5$  В/см ( $p_{Ar} = 2,0$  Торр).

Полученные экспериментальные и теоретические зависимости параметров плазмы от ее мощности при  $P_1 \geq 1,8$  Вт/см объясняются скин-эффектом, существенным в плазме индукционных разрядов, возбужденных на частотах  $f \geq 10$  МГц и плотностях плазмы,  $n_e \geq 10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

### Литература

1. Исупов М.В., Кротов С.В., Литвинцев А.Ю., Уланов И.М. Индукционная ультрафиолетовая лампа // Светотехника. 2007. № 5. С. 37—40.
2. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity Low-pressure Electrodeless Mercury-argon Lamp for UV Disinfection of Wastewater // J. Water and Environment Technol. 2005. V. 3. No. 1. Pp. 71—76.
3. 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.
4. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Ч. 2. Излучательные характеристики плазмы // Успехи прикладной физики. 2016. № 4. С. 372—384.
5. Старшинов П.В. и др. Эффективный источник УФ излучения на основе бесферритного индуктивного ртутного разряда в замкнутой трубке малого диаметра // Светотехника. 2020. № 1. С. 56—59.
6. Левченко В.А., Василяк Л.М., Костюченко С.В., Свитнев С.А., Шаранов Е.П. Вакуумное ультрафиолетовое излучение ртутного разряда при давлении инертного газа менее 1 торр // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 3. С. 256—264.
7. Вальшин А.М., Першин С.М., Михеев Г.М. Эффективный ввод энергии в плазму разряда люминесцентной лампы с повышением светоотдачи при резонансной индуктивной накачке // Инженерная физика. 2017. № 2. С. 37—41.
8. Ультрафиолетовые технологии в современном мире / под ред. Кармазинова Ф.В., Костюченко С.В., Кудрявцева Н.Н., Храменкова С.В. Долгопрудный: Издат. дом «Интеллект», 2012.
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. Technol. 2002. V. 11. Pp. 218—227.

### References

1. Isupov M.V., Krotov S.V., Litvintsev A.Yu., Ulanov I.M. Induktionnaya Ul'trafiolotovaya Lampa. Svetotekhnika. 2007;5:37—40. (in Russian).
2. Kobayashi S., Hatano A. High-intensity Low-pressure Electrodeless Mercury-argon Lamp for UV Disinfection of Wastewater. J. Water and Environment Technol. 2005;3;1:71—76.
3. 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).
4. Svitnev S.A., Popov O.A., Levchenko V.A., Starshinov P.V. Kharakteristiki Besferritnogo Induktionnogo Razryada Nizkogo Davleniya. Ch. 2. Izluchatel'nye Kharakteristiki Plazmy. Uspekhi Prikladnoy Fiziki. 2016;4:372—384. (in Russian).
5. Starshinov P.V. i dr. Effektivnyy Istochnik UF Izlucheniya na Osnove Besferritnogo Induktivnogo Rtnutnogo Razryada v Zamknutoy Trubke Malogo Diametra. Svetotekhnika. 2020;1:56—59. (in Russian).
6. Levchenko V.A., Vasilyak L.M., Kostyuchenko S.V., Svitnev S.A., Sharanov E.P. Vakuumnoe Ul'trafiolotovo Izluchenie Rtnutnogo Razryada pri Davlenii Inertnogo Gaza Menee 1 Torr. Uspekhi Prikladnoy Fiziki. 2016;4;3:256—264. (in Russian).
7. Val'shin A.M., Pershin S.M., Mikheev G.M. Effektivnyy Vvod Energii v Plazmu Razryada Lyuminestsentnoy Lampy s Povysheniem Svetootdachi pri Rezonansnoy Induktivnoy Nakachke. Inzhenernaya Fizika. 2017;2:37—41. (in Russian).
8. Ul'trafiolotovy Tekhnologii v Sovremennom Mire. Pod Red. Karmazinova F.V., Kostyuchenko S.V., Kudryavtseva N.N., Khramenkova S.V. Dolgoprudny: Izdat. Dom «Intellect», 2012. (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. Technol. 2002;11:218—227.

10. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992. V. 1. No. 3. Pp. 179—186.
11. **Годяк В.А., Попов О.А., Ганна А.Х.** Влияние слоев пространственного заряда у ВЧ-электродов на электродинамические характеристики ВЧ-разряда // *Радиотехника и электроника.* 1976. Т. 21. С. 2639—2641.
12. **Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.** Высокочастотный емкостной разряд. М.: Наука, 1995.
13. **Попов О.А., Старшинов П.В., Иликеева Р.А., Буреева Д.А., Ирхин И.В., Левченко В.А.** Характеристики индуктора и плазмы бесферритных индукционных амальгамных ультрафиолетовых ламп с замкнутыми трубками малого диаметра // *Вестник МЭИ.* 2020. № 5. С. 98—111.
14. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1997. V. 6. No. 4. Pp. 540—550.
15. **Рохлин Г.Н.** Разрядные источники света. М.: Энергоатомиздат, 1991.
16. **Popov O.A., Maya J.** Characteristics of Electrodeless Ferrite-free Fluorescent Lamp Operated at Frequencies of 1—15 MHz // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2000. V. 9. No. 2. Pp. 227—235.
17. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
18. **Kolobov B.I., Godyak V.A.** Electron Kinetics in Low Temperature Plasmas // *Phys. Plasmas.* 2019. V. 26. P. 060601.
19. **Ding Z.F., Sun B., Huo W.G.** Characteristics of Anomalous Skin Effect and Evolution of Power Absorption Regions in a Cylindrical Radio Frequency Inductively Coupled Plasma // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. P. 063504.
20. **Cunge G., Crawly B., Vender D., Turner M.M.** Anomalous Skin Effect and Collisionless Power Dissipation in Inductively-coupled Discharges // *J. Appl. Phys.* 2001. V. 89. No. 7. Pp. 3580—3589.
21. **Hyo-Chang Lee, Seung Ju Oh, Chin-Wook Chung.** Experimental Observation of the Skin Effect on Plasma Uniformity in Inductively Coupled Plasmas with a Radio Frequency Bias // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2012. V. 21. No. 3. P. 035003.
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. **Kralkina E.A. et al.** RF Power Absorption by Plasma of a Low-pressure Inductive Discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. V. 25. P. 015016.
24. **Trieschmann J., Mussenbrock T.** Kinetic Analysis of Negative Power Deposition in Inductive Low-pressure Plasmas // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017. V. 26. P. 024004.
10. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.* 1992;1;3:179—186.
11. **Godyak V.A., Popov O.A., Ganna A.Kh.** Vliyanie Sloev Prostranstvennogo Zaryada u VCH-elektrodov na Elektrodinamicheskie Kharakteristiki VCH-razryada. *Radio-tekhnika i Elektronika.* 1976;21:2639—2641. (in Russian).
12. **Rayzer Yu.P., Shneyder M.N., Yatsenko N.A.** Vysokochastotny Emkostnoy Razryad. M.: Nauka, 1995. (in Russian).
13. **Popov O.A., Starshinov P.V., Ilikeeva R.A., Bureeva D.A., Irkhin I.V., Levchenko V.A.** Kharakteristiki Induktora i Plazmy Besferitnykh Induktsionnykh Amal'gamnykh Ul'traioletovykh Lamp s Zamknutyimi Trubkami Malogo Diametra. *Vestnik MEI.* 2020;5:98—111. (in Russian).
14. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.* 1997;6;4:540—550.
15. **Rokhlin G.N.** Razryadnye Istochniki Sveta. M.: Energoatomizdat, 1991. (in Russian).
16. **Popov O.A., Maya J.** Characteristics of Electrodeless Ferrite-free Fluorescent Lamp Operated at Frequencies of 1—15 MHz. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2000;9;2:227—235.
17. **Rayzer Yu.P.** Fizika Gazovogo Razryada. M.: Nauka, 1987. (in Russian).
18. **Kolobov B.I., Godyak V.A.** Electron Kinetics in Low Temperature Plasmas. *Phys. Plasmas.* 2019;26:060601.
19. **Ding Z.F., Sun B., Huo W.G.** Characteristics of Anomalous Skin Effect and Evolution of Power Absorption Regions in a Cylindrical Radio Frequency Inductively Coupled Plasma. *Phys. Plasmas.* 2015;22:063504.
20. **Cunge G., Crawly B., Vender D., Turner M.M.** Anomalous Skin Effect and Collisionless Power Dissipation in Inductively-coupled Discharges. *J. Appl. Phys.* 2001;89;7:3580—3589.
21. **Hyo-Chang Lee, Seung Ju Oh, Chin-Wook Chung.** Experimental Observation of the Skin Effect on Plasma Uniformity in Inductively Coupled Plasmas with a Radio Frequency Bias. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2012;21;3:035003.
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. **Kralkina E.A. et al.** RF Power Absorption by Plasma of a Low-pressure Inductive Discharge. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016;25:015016.
24. **Trieschmann J., Mussenbrock T.** Kinetic Analysis of Negative Power Deposition in Inductive Low-pressure Plasmas. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017;26:024004.

25. Неклюдова П.А., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Задириев И.И., Никонов А.М. Особенности гибридного высокочастотного разряда низкого давления // Прикладная физика и математика. 2017. № 5. С. 25—33.

26. Иликеева Р.А., Шилова С.А., Попов О.А., Левченко В.А. Индукционная бесферритная ртутная УФ-лампа низкого давления с замкнутой разрядной трубкой, работающая на частоте 13,56 МГц // Светотехника. 2022. № 1. С. 58—62.

25. Neklyudova P.A., Kral'kina E.A., Vavilin K.V., Zadiriev I.I., Nikonov A.M. Osobennosti Gibridnogo Vysokochastotnogo Razryada Nizkogo Davleniya. Prikladnaya Fizika i Matematika. 2017;5:25—33. (in Russian).

26. Piikeeva R.A., Shilova S.A., Popov O.A., Levchenko V.A. Induktsionnaya Besferritnaya Rtutnaya UF-lampa Nizkogo Davleniya s Zamknotoy Razryadnoy Trubkoy, Rabotayushchaya na Chastote 13,56 MGts. Svetotekhnika. 2022;1:58—62. (in Russian).

#### Сведения об авторах:

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

**Иликеева Римма Анваровна** — ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

**Шилова Светлана Александровна** — студент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

**Ошурков Илья Анатольевич** — ассистент кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

#### Information about authors:

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

**Piikeeva Rimma A.** — Assistant of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI

**Shilova Svetlana A.** — Student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI

**Oshurkov Ilya A.** — Assistant of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI

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

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

**Статья поступила в редакцию:** 06.09.2021

**The article received to the editor:** 06.09.2021