

УДК 537.533

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-89-96

Исследование характеристик индукционной бесферритной ртутной лампы низкого давления с замкнутой разрядной трубкой

О.А. Попов, П.В. Старшинов, В.Н. Васина

Проведены исследования электрических и оптических характеристик бесферритной индукционной лампы низкого давления в парах ртути и аргона в замкнутой разрядной трубке с внутренним диаметром 30 мм, имевшей форму параллелепипеда длиной 500 и высотой 70 мм. Разряд возбуждался на частоте 2,0 МГц с помощью шестивитковой индуктивной катушки, изготовленной из посеребренного медного провода с малым удельным сопротивлением и расположенной на внешней поверхности замкнутой трубки по ее периметру. Внутренняя (вакуумная) поверхность разрядной трубки покрыта смесью из трех узкополосных люминофоров. Экспериментально установлено, что увеличение поглощенной плазмой разряда ВЧ-мощности от 127 до 180 Вт слабо влияет на электрические параметры индуктивной катушки, которые находятся в пределах 3,75...4,0 А (ВЧ-ток) и 800...850 В (напряжение катушки). Практически не меняется мощность потерь в проводе катушки, рассчитанный в рамках трансформаторной модели разрядный ток возрастает с увеличением мощности плазмы от 1,63 до 2,35 А, а средняя по сечению плазменного витка напряженность электрического поля не обнаруживает явной зависимости, оставаясь в пределах 0,72...0,76 В/см. Световой поток лампы возрастает с увеличением мощности плазмы от 10430 до 13500 лм, световая отдача плазмы снижается от 82 до 75 лм/Вт, а световая отдача лампы уменьшается от 70 до 67 лм/Вт.

Ключевые слова: бесферритный индукционный разряд, ртутная плазма низкого давления, индуктивная катушка, мощность потерь, световая отдача.

Для цитирования: Попов О.А., Старшинов П.В., Васина В.Н. Исследование характеристик индукционной бесферритной ртутной лампы низкого давления с замкнутой разрядной трубкой // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 89—96. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-89-96.

The Characteristics of a Ferrite-free Closed-loop Inductively-coupled Low-pressure Mercury Discharge Lamp

O.A. Popov, P.V. Starshinov, V.N. Vasina

The article presents the results from studying the electrical and optical characteristics of a ferrite-free inductively-coupled low-pressure lamp having the shape of a parallelepiped 500 mm in length and 70 mm in width, and containing a closed discharge tube with an inner diameter of 30 mm. The discharge was excited at a frequency of 2.0 MHz in a mixture of mercury vapor and argon by means of a six-turn inductive coil made of silver-plated copper wire with a low resistivity and arranged on the closed tube outer surface over its perimeter. The tube wall inner (vacuum) surface was coated with a mixture of three line-emission phosphors. It has been found by experiment that increasing the high-frequency power absorbed by the discharge plasma from 127 to 180 W has a minor effect on the inductive coil electrical parameters, which are in the range of 3.75–4.0 A (the high-frequency current) and 800–850 V (the coil voltage). The power losses in the coil wire remain almost unchanged; the discharge current calculated within the framework of the transformer model increases with increasing the plasma power from 1.63 to 2.35 A, and the electric field strength averaged over the plasma turn section does not show any explicit dependence and remains within the range 0.72–0.76 V/cm. The lamp luminous flux increases with increasing the plasma power from 10430 to 13500 lm, whereas the plasma and lamp efficacies decrease from 82 to 75 LPW and from 70 to 67 LPW, respectively.

Key words: ferrite-free inductive discharge, low-pressure mercury plasma, induction coil, loss power, luminous efficacy.

For citation: Popov O.A., Starshinov P.V., Vasina V.N. The Characteristics of a Ferrite-free Closed-loop Inductively-coupled Low-pressure Mercury Discharge Lamp. MPEI Vestnik. 2018;4:89—96. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-4-89-96.

Введение

Индукционные источники оптического излучения на основе индукционного разряда трансформаторного типа, часто называемые лампами трансформаторного типа (ЛТТ), работающие в парах ртути низкого давления на частотах 100...1000 кГц и мощностях от 50 до 500 Вт, имеют отличные технические и эксплуатационные параметры. Коэффициент полезного действия (КПД) генерации ультрафиолетового излучения в ЛТТ

достигает 50 %, а световая отдача люминесцентной лампы, использующей узкополосные люминофоры, превышает 100 лм/В [1 — 7]. Срок службы ламп трансформаторного типа значительно выше срока ламп с внутренними электродами и превышает 60 000 ч непрерывной работы. Благодаря таким характеристикам ЛТТ низкого давления стали серьезным конкурентом ртутным и натриевым лампам высокого давления, применяемым для наружного освещения. Однако ЛТТ, использующие в качестве трансформатора кольцевой

ферромагнитный сердечник (магнитопрод), имеют существенный недостаток — высокие требования к качеству стыкующихся полированных поверхностей двух половинок магнитопровода. В результате значительно поднимается себестоимость, снижается надежность работы и увеличивается разброс параметров. В связи с этим представляется актуальным создание и разработка бесферритных индукционных ламп с замкнутой разрядной трубкой, обладающих всеми достоинствами ЛТТ, но лишенных ее недостатков [8, 9].

В 2001 г. был предложен бесферритный тип индукционной лампы, возбужденной на частотах $f = 0,1...20$ МГц током индуктивной катушки, изготовленной из провода с малыми удельными потерями мощности и размещенной по внешнему или внутреннему периметрам замкнутой разрядной трубки [10, 11]. Протекающий по виткам катушки ВЧ-ток I_c генерирует в разрядной трубке магнитное поле H , возбуждающее в ней высокочастотное электрическое поле E , параллельное току в катушке. По достижении напряженности ВЧ-поля величины E_{ind} , определяемой давлением рабочей смеси и диаметром разрядной трубки, в лампе возникает индукционный разряд с током I_{pr} , параллельным току катушки I_c . Разряд представляет собой замкнутый плазменный виток (шнур), по внешнему виду напоминающий плазменный виток лампы трансформаторного типа. Однако, в отличие от ЛТТ, где напряженность ВЧ-поля E_{pl} однородна по сечению плазменного витка, в бесферритной лампе напряженность ВЧ-поля радиально и азимутально неоднородна. Она имеет максимум в месте расположения провода катушки и уменьшается по сечению плазмы индукционного разряда [12 — 14]. На низких давлениях рабочей смеси, где длина релаксации электронов по энергиям λ_e^* значительно превышает характерный размер плазмы (в нашем случае, внутренний диаметр трубки d_i), пространственная неоднородность ВЧ-поля не влияет на процессы переноса в плазме и на ионизационный и энергетический балансы заряженных частиц.

Известно несколько работ, где приводятся электрические и излучательные характеристики бесферритных ламп с замкнутой разрядной трубкой, в которой индукционный разряд возбуждается с помощью индуктивной катушки, расположенной внутри эллипса (круга, параллелепипеда), образованного замкнутой разрядной трубкой [10, 11]. Исследования индукционных ламп с индуктивной катушкой, размещенной по «внешнему» периметру замкнутой разрядной трубки, авторам неизвестны.

Экспериментальная установка и методики измерений

Объект исследования — индукционный разряд, возбужденный на частоте $f = 2,0$ МГц и мощности лампы $P_l = 150...200$ Вт в смеси паров ртути ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.) и аргона ($p_{Ar} = 0,1$ мм рт. ст.) в замкнутой цилиндрической

стеклянной трубке с внутренним диаметром $d_i = 30$ мм. Лампа имеет форму, близкую к параллелепипеду, длиной $L = 500$ мм и высотой $H_1 = 70$ мм. Расстояние между двумя горизонтальными разрядными трубками $H_2 = 6$ мм (рис. 1). На внутреннюю (вакуумную) поверхность разрядной трубки нанесена смесь из трех узкополосных люминофоров (красного, зеленого и синего) с цветовой температурой $T_{цв} = 3100$ К и общим индексом цветопередачи $R_a = 80$. Разряд возбуждается с помощью шестивитковой индуктивной катушки, размещенной на атмосферной стороне замкнутой трубки, охватывая ее по внешнему периметру. Витки катушки изготовлены из посеребренного медного провода диаметром 1,6 мм с погонным сопротивлением $\rho_w = 2,25 \cdot 10^{-3}$ Ом/см на частоте 2 МГц и рабочей температурой катушки $T_w = 40...50$ °С. Давление паров ртути в разрядной трубке — оптимально (максимальная световая отдача плазмы) и контролируется температурой амальгамы (Bi-In-Hg), размещенной в штенгеле трубки.

Структурная схема питания лампы и измерения ее характеристик приведена на рис. 2. Синусоидальное напряжение малой мощности (< 1 Вт) на частоте $f = 2,0$ МГц подается с задающего генератора (PM 5193, Philips) на широкополосный (0,1...30 МГц) усилитель мощностью до 500 Вт (А-300, ENI). От усилителя мощности ВЧ-напряжение передается на направленный ответвитель (С5100, Werlatone), соединенный с измерителем поступающей P_{for} и отраженной P_{ref} мощностей (NAPZ8, Rhode-Schwartz). Проходящая мощность $P_{tr} = P_{for} - P_{ref}$ складывается из мощности P_{pl} поглощенного плазмой индукционного разряда, мощности потерь в проводе индуктивной катушки P_{coil} и мощности P_{cap} , теряемой в керамических конденсаторах согласующего устройства (контура) C_{ser} и C_{sh} .

Напряжение на индуктивной катушке U_c измеряется с помощью высоковольтного делителя напряжения, включенного между катушкой и согласующим контуром, и четырехканального осциллографа (HP 54503A, Hewlett Packard). ВЧ-ток катушки I_c замерялся с помощью трансформатора тока, напряжение с которого подавалось на вход осциллографа. Это позволило найти сдвиг фазы θ между напряжением и током катушки и,

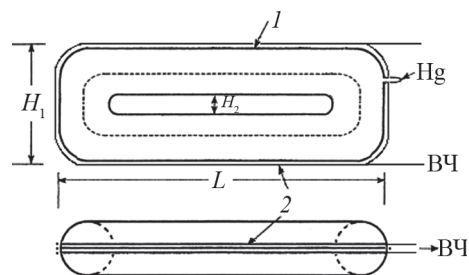


Рис. 1. Эскиз экспериментальной бесферритной индукционной лампы:

1 — разрядная трубка; 2 — витки индуктивной катушки; Hg — штенгель с амальгамой

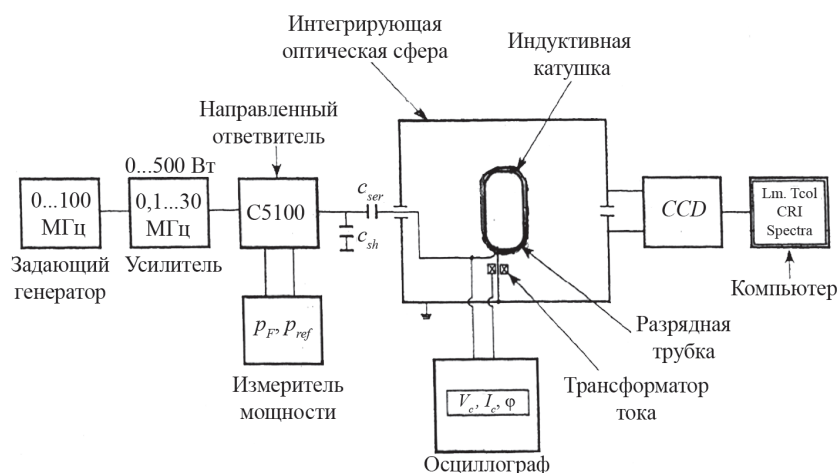


Рис. 2. Структурная схема питания индукционной лампы и измерений ее электрических и фотометрических характеристик

таким образом, рассчитать поглощаемую лампой мощность $P_{lamp} = P_{coil} + P_{pl}$. Теряемая в конденсаторах согласующего контура мощность $P_{cap} = P_{tr} - P_{lamp}$ не превышала 1 Вт. Мощность потерь в проводе катушки P_{coil} определяли при отсутствии в лампе индукционного разряда методом замещения [15].

Измерения светотехнических характеристик лампы (светового потока и спектра излучения лампы, цветовой температуры и общего индекса цветопередачи) проводили с помощью компьютеризованного фотометрического шара (рис. 2).

Уравнения трансформаторной модели индукционного разряда

В соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда, где первичной обмоткой служит индуктивная катушка, а вторичной — замкнутый плазменный виток, ВЧ-напряжение на катушке U_c связано с индуцированным в разрядной трубке ВЧ-напряжением на плазменном витке U_2 соотношением [10, 15]:

$$U_c = U_2 Z_1 / \omega M, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота ВЧ-поля; Z_1 — модуль комплексного сопротивления (импеданса) индуктивной катушки (первичной обмотки), который с учетом плазменной нагрузки имеет вид [10, 15],

$$Z_1 = [(R_{coil} + R_{pl}^r)^2 + \omega^2(L_{coil} - L_{ind}^r)^2]^{1/2}, \quad (2)$$

здесь R_{coil} — активное сопротивление провода индуктивной катушки на частоте ВЧ-тока $f = 2$ МГц, $R_{coil} = 1,56$ Ом; R_{pl}^r — внесенное в первичную цепь активное сопротивление плазменного витка R_{pl} [10, 15],

$$R_{pl}^r = R_{pl} (\omega M / Z_{pl})^2; \quad (3)$$

L_{coil} — индуктивность катушки, $L_{coil} = 17$ мкГн; L_{ind} — геометрическая индуктивность плазменного витка, равная 0,32 мкГн и рассчитываемая, как [16],

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

где $d_{pl} \approx 0,75d_t$ — диаметр сечения плазменного витка; $D_{pl} = [4(L_{pl}H_{pl})/\pi]^{1/2}$ — эквивалентный диаметр плазменного витка.

Внесенная в первичную обмотку геометрическая индуктивность плазменного витка L_{trind} равна [10, 15]:

$$L_{tr}^r = L_{ind} (\omega M / Z_{pl})^2, \quad (4)$$

где Z_{pl} — модуль импеданса плазменного витка,

$$Z_{pl} = [(R_{pl})^2 + (\omega L_{ind})^2]^{1/2}, \quad (5)$$

состоящего из активной R_{pl} и индуктивной ωL_{ind} компонентов.

Взаимная индуктивность катушки и плазменного витка M выглядит как

$$M = k(L_{coil}L_{ind})^{1/2}, \quad (6)$$

где k — коэффициент связи индуктивной катушки с плазменным витком индукционного разряда, рассчитываемый как отношение площади, охватываемой плазменным витком S_{pl}^r , к площади, охватываемой индуктивной катушкой S_{coil} [10]:

$$k = S_{pl}^r / S_{coil}. \quad (7)$$

Поскольку $S_{pl} = L_{pl}H_{pl} = 240$ см², а $S_{coil} = LH_1 = 350$ см², то $k = 0,686$. Здесь L_{pl} и H_{pl} — длина и ширина прямоугольника, образуемого замкнутым плазменным витком длиной $\Lambda_{pl} = 1040$ мм.

Из (7) следует, что в бесферритной индукционной лампе, где площадь сечения катушки превышает площадь сечения, охватываемого плазменным витком, соотношение, связывающее коэффициент связи k с индуктивностью катушки L_{coil} и геометрической индуктивностью плазменного витка L_{ind} , имеет вид:

$$L_{ind} = kL_{coil} / N^2, \quad (8)$$

где N — число витков индуктивной катушки.

Подставив в (6) соотношение (8), получим расчетное выражение для взаимной индуктивности катушки и плазменного витка M

$$M = k^{3/2} L_{coil} / N. \quad (9)$$

Результаты эксперимента и их обсуждение

Электрические характеристики первичной цепи

Экспериментальные значения ВЧ-тока I_c и напряжения U_c на индуктивной катушке не зависят явно от мощности плазмы в исследованной области $P_{pl} = 127...180$ Вт и лежат в пределах $U_c = 800...850$ В, $I_c = 3,75...4,0$ А. Также практически не меняется с ростом мощности плазмы и мощность потерь в проводе катушки $P_{coil} = I_c^2 R_c = 22...25$ Вт (рис. 3). Коэффициент полезного действия индуктивной катушки, рассчитанный как $\eta_c = (1 - P_{coil}/P_{pl})$ и представленный на рис. 3, возрастает с увеличением мощности плазмы от 84...85 ($P_{pl} = 127...133$ Вт) до 89 % ($P_{pl} = 180$ Вт). В то же время в бесферритных лампах такого типа, работающих с такими же удельными мощностями плазмы ($P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl} = 1,2...1,7$ Вт/см), но на более низких частотах ВЧ-поля ($f = 160...560$ кГц), ВЧ-напряжение на катушке U_c и мощность потерь в ней P_{coil} заметно уменьшаются с увеличением мощности плазмы [10, 11].

Из сопоставления значений U_c и I_c следует, что в условиях эксперимента (частота ВЧ-поля $f = 2,0$ МГц и удельная мощность плазмы $P_1 = 1,2...1,7$ Вт/см) модуль импеданса первичной цепи $Z_1 = U_c/I_c$ не обнаруживает зависимости от P_{pl} и во всем интервале исследованных мощностей плазмы практически равен реактивной (индуктивной) составляющей импеданса катушки $\omega L_{coil} = 213$ Ом. Это указывает не только на высокую добротность катушки и относительно низкую величину ее активного сопротивления ($R_{coil} = 1,56$ Ом $\ll \omega L_{coil}$), но и на незначительное влияние нагрузки (плазменного витка) на импеданс первичной цепи Z_1 . Из этого следует, что внесенные в первичную цепь активное

R_{pl}^{tr} и реактивное (индуктивное) ωL_{ind}^{tr} сопротивления плазменного витка значительно меньше, чем ωL_{coil} . Из приведенных на рис. 4 зависимостей $R_{pl}^{tr} = P_{pl}/(I_c)^2$ от мощности плазмы P_{pl} видно, что R_{pl}^{tr} возрастает с увеличением P_{pl} от 8,3...8,7 Ом ($P_{pl} = 127...133$ Вт) до 12,8 Ом ($P_{pl} = 180$ Вт), но остается более, чем на порядок меньше, чем $\omega L_{coil} = 213$ Ом. Еще ниже рассчитанное по (4) внесенное в первичную цепь реактивное сопротивление плазменного витка ωL_{ind}^{tr} , возрастающее с увеличением мощности плазмы от 0,72 Ом ($P_{pl} = 127$ Вт) до 1,6 Ом ($P_{pl} = 180$ Вт).

Таким образом, при заданных конструктивных параметрах разрядной трубки и условиях ее возбуждения (частота ВЧ-поля и разрядный ток) формула (2) для модуля импеданса первичной цепи сводится к $Z_1 = \omega L_{coil}$. Соответственно, выражение (1), связывающее ВЧ-напряжение на индуктивной катушке U_c с ВЧ-напряжением плазменного витка U_2 , преобразуется с учетом формулы для взаимной индуктивности (9) в

$$U_2 = U_c k^{3/2}/N, \quad (10)$$

где k , N , U_c — экспериментально определяемые величины.

Из выражения (10) можно рассчитать ВЧ-напряжение на плазменном витке U_2 .

Параметры плазмы индукционного разряда

Активное сопротивление плазмы индукционного разряда R_{pl} , рассчитанное с использованием (3), (5) и приведенное на рис. 4, уменьшается с увеличением мощности плазмы от 48 ($P_{pl} = 127$ Вт) до 32 Ом ($P_{pl} = 180$ Вт). Поскольку R_{pl} на порядок превышает реактивное (индуктивное) сопротивление плазменного витка $\omega L_{ind} = 4,0$ Ом, то полное сопротивление плазмен-

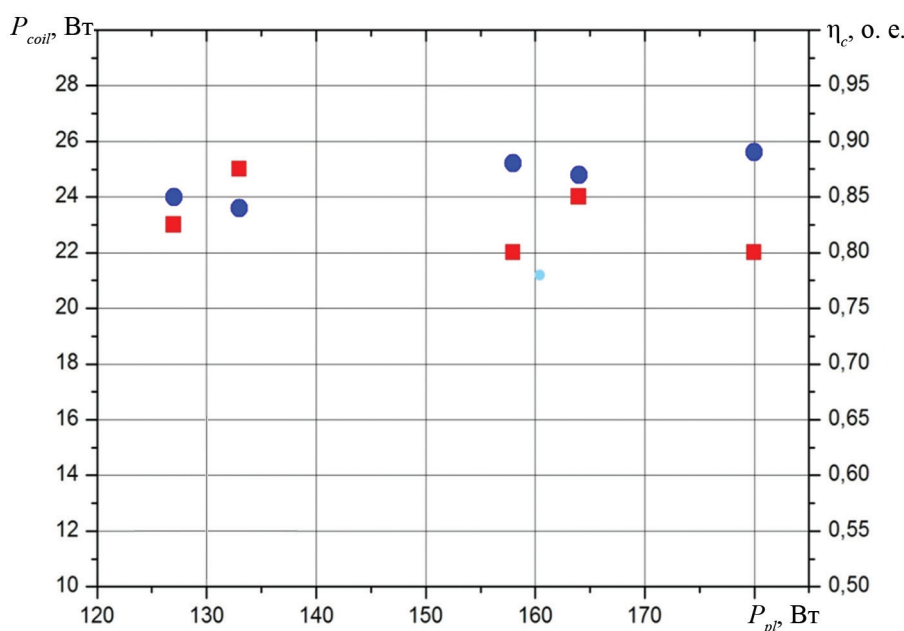


Рис. 3. Экспериментальные зависимости мощности потерь в проводе катушки P_{coil} (■) и ее КПД η_c (●) от поглощенной плазмой мощности P_{pl}

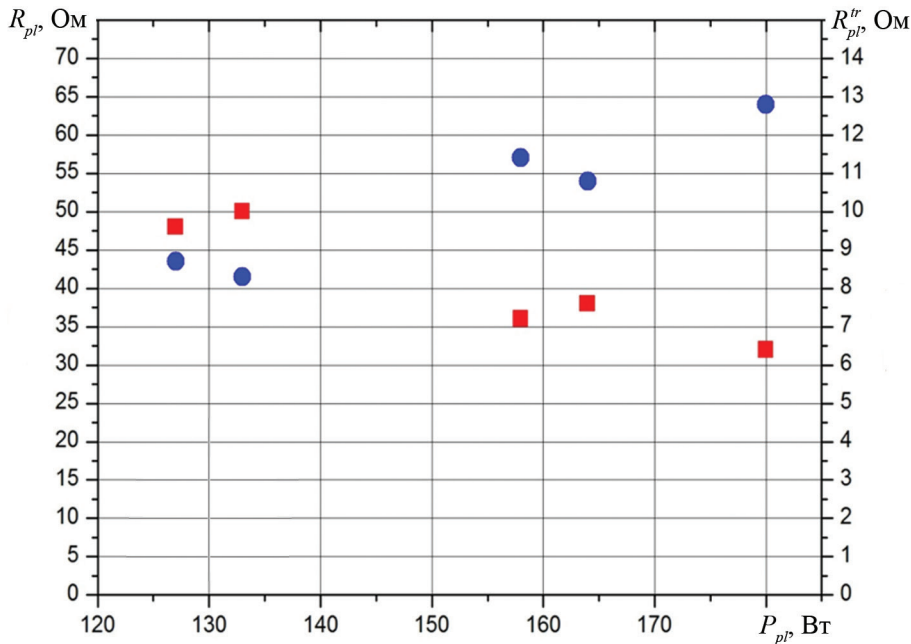


Рис. 4. Зависимости активных сопротивлений плазменного витка R_{pl} (■) и R_{pl}^r (●) от поглощенной плазмой мощности P_{pl}

ного витка (импеданс) Z_{pl} носит практически активный характер ($Z_{pl} \approx P_{pl}$), соответственно, ВЧ-напряжение на плазменном витке U_2 также активно

$$U_2 \approx U_{pl} \approx \bar{E}_{pl} \Lambda_{pl} \quad (11)$$

и находится в фазе с ВЧ-разрядным током I_{pl} [10]. В данном случае \bar{E}_{pl} — средняя по сечению плазменного витка напряженность ВЧ электрического поля [13].

Рассчитанные из (11) значения средней по сечению плазмы напряженности ВЧ электрического поля в плазме индукционного разряда \bar{E}_{pl} приведены как функции поглощенной плазмой мощности P_{pl} на рис. 5. \bar{E}_{pl} практически не меняется с ростом мощности плаз-

мы и лежит в пределах 0,72...0,76 В/см. Эти значения фактически совпадают с напряженностью ВЧ электрического поля $E_{pl} = 0,72$ В/см в плазме лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром $d_t = 16,6$ мм, работавшей при таком же давлении рабочей смеси Hg + Ar, но на большей удельной мощности плазмы $P_1 = 2,2$ Вт/см и на более низкой частоте возбуждения разряда $f = 265$ кГц [17].

Следует отметить, что в индукционных лампах (как в лампах трансформаторного типа, так и в бесферритных лампах, работающих на относительно низких частотах ВЧ-поля $f = 100...400$ кГц и относительно невысоких удельных мощностях плазмы $P_1 = 1...3$ Вт/см,

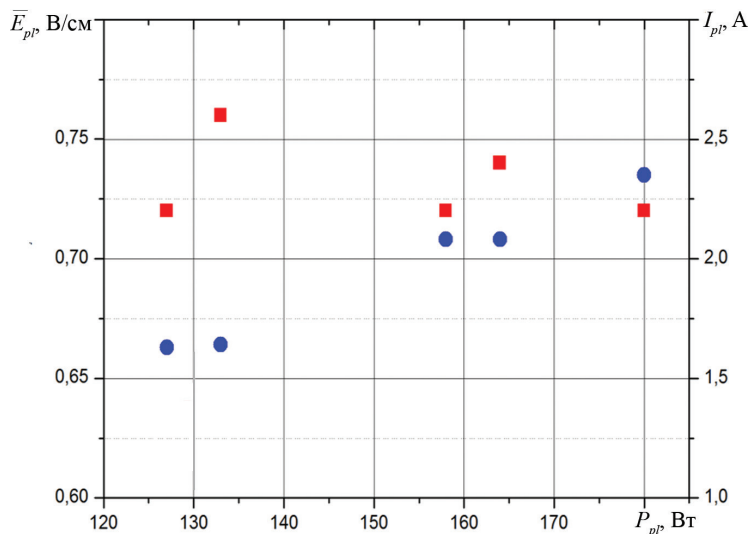


Рис. 5. Рассчитанные зависимости напряженности ВЧ электрического поля в плазме \bar{E}_{pl} (■), и разрядного тока I_{pl} (●) от поглощенной плазмой мощности P_{pl}

повышение мощности плазмы P_{pl} сопровождается заметным снижением напряженности ВЧ электрического поля E_{pl} [10, 11, 18]. В то же время, в индукционных лампах, работающих на таких же уровнях мощности, но на более высоких частотах ВЧ-поля ($f > 1$ МГц), повышение мощности плазмы P_{pl} не только не вызывает уменьшения напряженности ВЧ электрического поля, но и приводит к ее росту [4, 9].

Незначительное снижение напряженности ВЧ-поля в плазме E_{pl} и даже ее рост с увеличением мощности плазмы P_{pl} наблюдались в плазме индукционных разрядов, возбужденных на сравнительно низких частотах ВЧ-поля ($f = 200...400$ кГц) и относительно больших удельных мощностях плазмы $P_1 > 3$ Вт/см (высоких концентрациях электронов, $n_e > 10^{12}$ см⁻³) [4, 11, 18]. Рост E_{pl} с увеличением n_e , наблюдаемый в мощных индукционных разрядах ($P_{pl} = 300...500$ Вт), возбужденных на частотах в сотни кГц, может быть объяснен скин-эффектом, «прижимающим» ВЧ-поле к стенкам разрядной трубки в местах расположения витков катушки и сужения токового канала (диаметра плазменного витка). В результате возрастают сопротивление плазменного витка R_{pl} , ВЧ-напряжение на нем U_{pl} и, соответственно, напряженность поля в плазме E_{pl} [4, 19 — 22]. Чем выше частота ВЧ-поля, тем при меньшей удельной мощности плазмы P_1 (меньшей концентрации электронов n_e) проявляется скин-эффект, вызывающий рост E_{pl} и U_{pl} , а, следовательно, и ВЧ-напряжения на индуктивной катушке U_c , тока катушки I_c и мощности потерь в ней P_{coil} [4, 19].

Результаты расчета разрядного тока $I_{pl} = (P_{pl}/R_{pl})^{1/2}$, приведенного на рис. 5, показывают, что I_{pl} монотонно, практически линейно возрастает с увеличением мощности плазмы от 1,63 ($P_{pl} = 127$ Вт) до 2,35 А ($P_{pl} = 180$ Вт).

Рассчитанные значения I_{pl} хорошо согласуются с величиной разрядного тока в ЛТТ с разрядной трубкой диаметром $d_t = 16,6$ мм и длиной плазменного витка $\Lambda_{pl} = 815$ мм, работающей при мощности плазмы $P_{pl} = 180$ Вт (удельная мощность плазмы $P_1 = 2,2$ Вт/см) на частоте ВЧ-поля $f = 265$ кГц [17].

Светотехнические характеристики лампы

На рис. 6 приведены в зависимости от мощности плазмы P_{pl} световой поток лампы Φ_V и световые отдачи лампы $\eta_V = \Phi_V/P_{lamp}$ и плазменного витка $\eta_{pl} = \Phi_V/P_{pl}$. Видно, что световой поток лампы растет монотонно от 10 430 лм ($P_{pl} = 127$ Вт) до 13 500 лм ($P_{pl} = 180$ Вт), а световые отдачи медленно уменьшаются: η_V от 70 до 67 лм/Вт, а η_{pl} от 82 до 75 лм/Вт. Поскольку световые отдачи лампы и плазмы связаны соотношением $\eta_V = \eta_c \eta_{pl}$, то увеличения световой отдачи лампы следует добиваться повышением КПД индуктивной катушки η_c (снижением мощности потерь в проводе катушки P_{coil}) и увеличением КПД генерации ультрафиолетового (УФ) излучения ртутной плазмы низкого давления (повышением световой отдачи плазмы η_{pl}) [9, 10]. Уменьшения P_{coil} с 22 до 3...5 Вт (повышения КПД катушки до 97...98 %) можно достичь, используя индуктивную катушку, изготовленную из провода со значительно меньшим удельным сопротивлением $\rho_w = (3...5) \cdot 10^{-4}$ Ом/см (литцендрат) [10, 11]. Для повышения КПД генерации резонансного УФ-излучения ртутной плазмы (на длине волны 254 нм) следует оптимизировать конструктивные параметры разрядной трубки, в частности, повысить давление буферного газа. Как показали измерения, в лампе трансформаторного типа с замкнутой разрядной трубкой диаметром 16,6 мм, работавшей на частоте $f = 265$ кГц, максимальный КПД генерации УФ-излучения на длине волны 254 нм был получен при давлении аргона 0,2...0,3 мм рт. ст. [17].

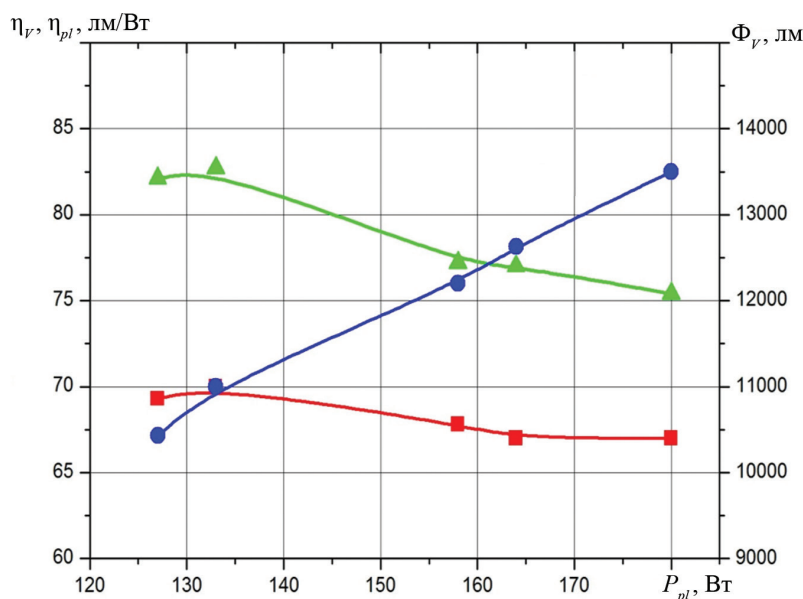


Рис. 6. Световой поток лампы Φ_V (●) и световые отдачи лампы η_V (■) и плазмы η_{pl} (▲), как функции поглощенной плазмой мощности P_{pl}

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. **Исупов М.В., Уланов И.М., Литвинцев А.Ю., Колмаков К.Н.** Экспериментальное исследование энергетических характеристик индукционного разряда трансформаторного типа в парах ртути // *Теплофизика и аэромеханика.* 2002. Т. 9. С. 151—161.
3. **Гвоздев-Карелин С.В.** Особенности и примеры применения безэлектродной люминесцентной лампы Endura фирмы Osram // *Светотехника.* 2006. № 3. С. 9—12.
4. **Попов О.А., Чандлер Р.Т.** Индуктивный источник света трансформаторного типа на частотах 150 — 400 кГц мощностью 200 — 500 Вт // *ТВТ.* 2007. № 4. С. 795—800.
5. **Pat. No. 7183717 US.** Inductively-driven Plasma Light Source.
6. **Исупов М.В., Кротов С.В., Литвинцев А.Ю., Уланов И.М.** Индукционная ультрафиолетовая лампа // *Светотехника.* 2007. № 5. С. 37—40.
7. **Godyak V.** Ferromagnetic Enhanced Inductive Plasma Sources // *J. Phys D. Appl. Phys.* 2013. V. 46. No. 28. Pp. 1—23.
8. **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.
9. **Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А.** Характеристики высокочастотной 13,56 МГц бесферритной индукционной ультрафиолетовой лампы // *Прикладная физика.* 2015. № 6. С. 92—97.
10. **Popov O.A., Chandler P.T.** Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160—1000 kHz // *Plasma Sources Sci. Tech.* 2002. V. 11. No. 2. Pp. 218—224.
11. **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.
12. **Lister G.G., Cox M.** Modeling of Inductively Coupled Discharges with Internal and External Coils // *Plasma Sources Sci. Tech.* 1992. V. 1. No. 1. Pp. 67—73.
13. **Никифорова В.А., Попов О.А.** Пространственное распределение параметров плазмы индукционного разряда в бесферритной лампе замкнутого типа // *Вестник МЭИ.* 2010. № 5. С. 111—117.
14. **Denneman J.W.** Determination of Electromagnetic Properties of Low-pressure Electrodeless Inductive Discharges // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 1990. V. 23. Pp. 293—298.
15. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge // *Plasma Sources Sci. Tech.* 1992. V. 1. No. 3. Pp. 179—185.
16. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive

Discharge // *Plasma Sources Sci. Tech.* 1997. V. 6. No. 4. Pp. 540—550.

17. **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.

18. **Исупов М.В., Федосеев А.В., Сухинин Г.И., Уланов Г.И.** Экспериментальное и теоретическое исследование низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа // *Теплофизика и аэромеханика.* 2014. № 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-Wook 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. of Plasma.* 1999. V. 6. No. 5. Pp. 1804—1812.

22. **Александров А.Ф. и др.** 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.

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. **Isupov M.V., Ulanov I.M., Litvintsev A.Yu., Kolmakov K.N.** Eksperimental'noe issledovanie energeticheskikh harakteristik induktsionnogo razryada transformatornogo tipa v Parah Rtuti. *Teplofizika i Aeromekhanika.* 2002;9:151—161. (in Russian).
3. **Gvozdev-Karelin S.V.** Osobennosti i Primery Primeneniya Bezelektrodney Lyuminescentnoy Lampy Endura Firmy Osram. *Svetotekhnika.* 2006;3:9—12. (in Russian).
4. **Popov O.A., Chandler R.T.** Induktivnyy Istochnik Sveta Transformatornogo Tipa na Chastotah 150 — 400 kGts Moshchnost'yu 200 — 500 Vt. *TVT.* 2007;4:795—800. (in Russian).
5. **Pat. 7183717 US.** Inductively-driven Plasma Light Source.
6. **Isupov M.V., Krotov C.B., Litvintsev A.Yu., Ulanov I.M.** Induktsionnaya Ul'trafiol'etovaya Lampa. *Svetotekhnika.* 2007;5:37—40. (in Russian).
7. **Godyak V.** Ferromagnetic Enhanced Inductive Plasma Sources. *J. Phys D. Appl. Phys.* 2013;46;28:1—23.
8. **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.

9. **Svitnev S.A., Popov O.A., Levchenko V.A.** Harakteristiki Vysokochastotnoy 13,56 MGts Besferritnoy Induksionnoy Ul'traioletovoy Lampy. Prikladnaya Fizika. 2015;6:92—97. (in Russian).

10. **Popov O.A., Chandler R.T.** Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160—1000 kHz. Plasma Sources Sci. Tech. 2002;11; 2:218—224.

11. **Popov O.A., Nikiforova V.A.** Induksionnyy Besferritnyy Istochnik Sveta Moshchnost'yu 300—400 Vt na Chastote 200—400 kGts. Vestnik MPEI. 2010;2:159—164. (in Russian).

12. **Lister G.G., Cox M.** Modeling of Inductively Coupled Discharges with Internal and External Coils. Plasma Sources Sci. Tech. 1992;1; 1:67—73.

13. **Nikiforova V.A., Popov O.A.** Prostranstvennoe Raspredelenie Parametrov Plazmy Induksionnogo Razryada v Besferritnoy Lampe Zamknutogo Tipa. Vestnik MPEI. 2010;5:111—117. (in Russian).

14. **Denneman J.W.** Determination of Electromagnetic Properties of Low-pressure Electrodeless Inductive Discharge. J. Phys. D. Appl. Phys. 1990;23:293—298.

15. **Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M.** A Simple Analyses of an Inductive RF Discharge. Plasma Sources Sci. Tech. 1992;1; 3:179—185.

16. **Gudmundsson J.T., Lieberman M.A.** Magnetic Induction and Plasma Impedance in a Cylindrical Inductive Discharge. Plasma Sources Sci. Tech. 1997;6; 4:540—550.

17. **Levchenko V.A., Popov O.A., Svitnev S.A., Starshinov P.V.** Elektricheskie i Izluchatel'nye Harakteristiki Lampy Transformatornogo Tipa s Razryadnoy Trubkoy Diametrom 16,6 mm. Svetotekhnika. 2016;1:41—44. (in Russian).

18. **Isupov M.V., Fedoseev A.V., Suhinin G.I., Ulanov G.I.** Eksperimental'noe i Teoreticheskoe Issledovanie Nizkochastotnogo Induksionnogo Razryada Transformatornogo Tipa. Teplofizika i Aeromekhanika. 2014;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-Wook 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. of Plasma. 1999;6; 5:1804—1812.

22. **Aleksandrov A.F. i dr.** 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).

Сведения об авторах

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

Старшинов Павел Валерьевич — аспирант кафедры светотехники НИУ «МЭИ»

Васина Виктория Николаевна — студент НИУ «МЭИ»

Information about authors

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

Starshinov Pavel V. — Ph.D-student of Lighting Engineering Dept., NRU MPEI

Vasina Viktoriya N. — Student of NRU MPEI

Статья поступила в редакцию 12.09.2017