

УДК 537.533

Влияние электростатического экрана на зажигание емкостного и индукционного разрядов низкого давления

О. А. Попов*, А. Е. Атаев

Приведены результаты экспериментального исследования влияния электростатического экрана на характеристики зажигания емкостного и индукционного разрядов низкого давления в смеси паров ртути давлением $7,5 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. и инертного газа (аргона) давлением 0,3 мм рт. ст. Разряд зажигался на частоте $f = 13,56$ МГц в каплеобразной колбе ($ID_b = 105$ мм, $H_b = 118$ мм), имеющей на своей оси цилиндрическую полость ($OD_{cav} = 36$ мм, $H_{cav} = 65$ мм), в которой размещалась индуктивная катушка с числом витков $N = 6, 8$ и 11 . Установлено, что для уменьшения емкостной связи между индуктивной катушкой и плазмой индукционного разряда и предотвращения формирования между плазмой и стенкой полости постоянного электрического поля, ускоряющего ионы к стенке полости, катушка должна быть размещена «внутри» электростатического экрана на расстоянии от его верхней кромки не менее, чем на 5 мм. Обнаружено, что применение экрана повысило напряжение зажигания емкостного разряда до значений, превышающих напряжение зажигания индукционного разряда. Предложен и апробирован способ разделения областей зажигания емкостного и индукционного разрядов, обеспечивающий низкое напряжение зажигания емкостного разряда без ухудшения технических и эксплуатационных параметров индукционной лампы с электростатическим экраном. Разработана и апробирована конструкция индукционной лампы с электростатическим экраном с щелями, в которой емкостной разряд зажигается в расположенной на оси колбы горловине ($d = 15$ мм) при значительно меньших напряжениях, чем индукционный разряд. Экспериментально установлено, что световой поток индукционной лампы с электростатическим экраном, с восемью или более продольными щелями, составляет 95% и выше от светового потока лампы в отсутствии экрана.

Ключевые слова: индукционный разряд низкого давления, емкостной разряд, индуктивная катушка, электростатический экран.

Известно, что в области пространственного заряда между плазмой индукционного разряда и стенкой разрядной камеры, к которой примыкают находящиеся под разным потенциалом витки индуктивной катушки, возникает высокочастотное (ВЧ) потенциальное («емкостное») электрическое поле [1, 2]. Потенциальное («емкостное») ВЧ-напряжение между витками индук-

тивной катушки складывается из падения напряжения на плазме U_{cap} , в зазоре между витком катушки и стенкой разрядной камеры U_{gap} , в диэлектрической (стеклянной, кварцевой) стенке камеры U_{wall} , в слое пространственного заряда, формирующегося между плазмой и стенкой полости U_{sh} [1 — 3].

ВЧ-напряжение в слое пространственного заряда U_{sh} «выпрямляется» на нелинейном комплексном сопротивлении (импедансе) слоя, что приводит к фор-

* olegpopov734@yahoo.com

мированию в нем постоянной составляющей напряжения U_{dc} , величина которого порядка величины U_{sh} и может составлять несколько десятков вольт [1, 2, 4, 5]. Положительные ионы, переходящие в процессе амбиполярной диффузии из плазмы в слой пространственного заряда, ускоряются в постоянном электрическом поле слоя E_{dc} в направлении стенок разрядной камеры. Бомбардировка стенок ионами с энергией в несколько десятков эВ ведет к разрушению люминофорного покрытия (в люминесцентных лампах) на стенках камеры, либо декристаллизации кварца (в бактерицидных лампах), что сокращает срок службы лампы. Добавим, что возникновение в колбе «паразитного» емкостного разряда со значительной мощностью, затрачиваемой на ускорение ионов в слоях пространственного заряда, снижает долю мощности, идущую на генерацию плазмы индукционного разряда, снижая КПД генерации плазмы и, следовательно, КПД генерации оптического излучения плазмы.

Для устранения (или уменьшения) негативных последствий возникновения паразитного емкостного разряда между индуктивной катушкой и стенкой разрядной камеры (колбы, трубки), к которой примыкают витки катушки, размещается заземленный электростатический экран (щит Фарадея), уменьшающий емкостную связь между витками катушки и плазмой индукционного разряда, возбужденного ВЧ-током катушки [1, 2]. С физической точки зрения, введение заземленного металлического экрана препятствует проникновению в область между плазмой и стенкой разрядной колбы ВЧ потенциальных («емкостных») электрических полей.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния электростатического экрана на характеристики зажигания емкостного и индукционного ВЧ-разрядов и на светотехнические характеристики индукционных люминесцентных ламп с колбой и полостью, в которой размещена индуктивная катушка, выполняющая роль ВЧ-индуктора.

Параметры ВЧ-индуктора с электростатическим экраном

Электростатический экран, препятствующий проникновению потенциального ВЧ-поля в область колбы, где формируется индукционная плазма, был размещен между индуктивной катушкой и стенками полости, к которым примыкает катушка (рис. 1). Поскольку экран располагается вблизи катушки, то через его поверхность проходит магнитный поток, создаваемый током катушки I_c . Поток магнитной индукции B_{fer} , перпендикулярный плоскости экрана, возбуждает в нем вихревое электрическое поле E_{Far} , вызывающее в экране замкнутые азимутальные вихревые токи I_{Far} , которые генерируют собственное магнитное поле Φ_{Far} , направленное против магнитного поля индуктора Φ_L , умень-

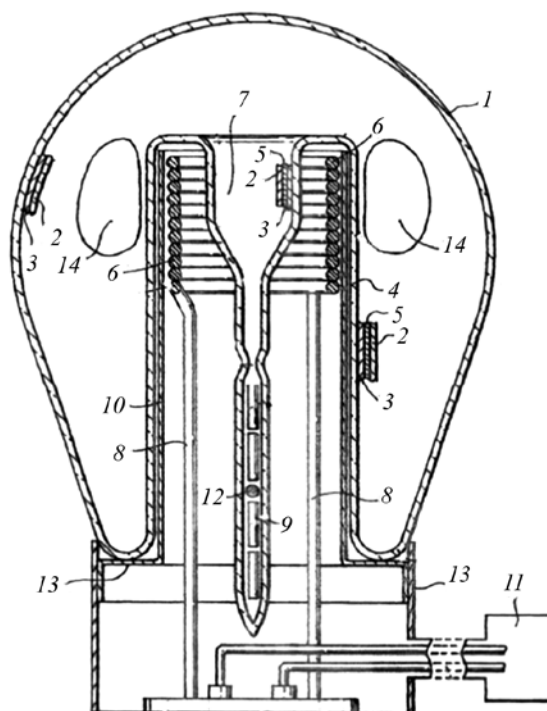


Рис. 1. Схема индукционной лампы с колбой и полостью с широкой горловиной:

1 — колба; 2 — люминофорный слой; 3 — защитное покрытие; 4 — полость; 5 — отражающее видимое излучение покрытие; 6 — витки катушки; 7 — горловина; 8 — вводы катушки; 9 — штенгель; 10 — экран; 11 — источник питания; 12 — амальгама; 13 — база лампы; 14 — тороидальный плазменный виток

шая, таким образом, проходящий сквозь плазму магнитный поток:

$$\Phi_{pl} = \Phi_L - \Phi_{Far}$$

С трансформаторной точки зрения, введение электростатического экрана между индуктивной катушкой и плазмой приводит к тому, что индуктивность катушки L_c уменьшается на величину пропорциональную индуктивности экрана L_{Far} :

$$L_{eq} = L_c - CL_{Far},$$

где C — безразмерный коэффициент трансформации,

$$C = (\omega M_{c-F} / Z_{Far})^2.$$

Здесь M_{c-F} — взаимная индуктивность ВЧ-индуктора и экрана,

$$M_{c-F} = k_{c-F} (L_c L_{Far})^{1/2},$$

где $\omega = 2\pi f$ — круговая частота ВЧ-поля; k_{c-F} — коэффициент связи ВЧ контура и экрана;

$$Z_{Far} = [R_{Far}^2 + (\omega L_{Far})^2]^{1/2},$$

R_{Far} — активное сопротивление экрана.

С энергетической точки зрения, вихревые токи в экране I_{Far} вызывают в нем потери мощности P_{Far} . Уменьшение проходящего сквозь плазму индукционного разряда магнитного потока Φ_{pl} на величину Φ_{Far} приводит к снижению возбуждаемому им в колбе замкнутого ВЧ-напряжения U_{pl} . Для повышения ВЧ-напряжения на плазме до требуемой величины следует увеличить магнитный поток Φ_{pl} , чего можно добиться, повысив ВЧ-напряжение на индуктивной катушке U_c . Однако, увеличение U_c вызывает увеличение ВЧ-тока в катушке I_c , а с ним мощности потерь в проводе катушке $P_{coil} = I_c^2 R_c$. Следовательно, возрастает мощность потерь в ВЧ-индукторе P_c , складываемая из двух составляющих:

$$P_c = P_{coil} + P_{Far}$$

и снижается его КПД:

$$\eta_c = 1 - (P_{coil} + P_{Far})/P.$$

Таким образом, введение электростатического экрана ухудшает электрические и энергетические характеристики индукционного разряда, как источника плазмы и генерируемого плазмой оптического излучения. В частности, снижается эквивалентная индуктивность ВЧ-индуктора (катушки с экраном), а с ней добротность индуктора; ухудшается КПД индуктора из-за потерь мощности в экране; возрастают ВЧ-напряжение, ток и мощность катушки, требуемые для зажигания емкостного разряда и индукционного разрядов; из-за увеличения тока катушки в проводе катушки возрастают потери мощности, в том числе и в стационарном режиме работы индукционного разряда, что в итоге приводит к уменьшению доли мощности, поглощаемой плазмой разряда.

Весьма эффективным и распространенным способом, существенно снижающим мощность потерь в электростатическом экране (а значит, и в ВЧ-индукторе), считается «прорезание» в нем продольных щелей в плоскости, перпендикулярной вихревым токам, вызывающим потери в экране. Из алюминия были изготовлены полые цилиндрические электростатические экраны со стенкой толщиной 2 мм и с продольными щелями шириной 1 мм каждая, параллельными магнитным силовым линиям и перпендикулярными направлению вихревых токов в экране. Были проведены измерения в интервале частот ВЧ-поля $f = 1 - 8$ МГц добротностей Q_c ВЧ-индукторов с катушками с числом витков $N = 6$ ($L_c = 1,25$ мкГн), $N = 11$ ($L_c = 2,7$ мкГн) и $N = 26$ ($L_c = 7$ мкГн) с заземленным электростатическим экраном и без него. Приведенные на рис. 2 результаты измерений показывают, что во всем диапазоне частот добротности ВЧ-индукторов с экраном и без него растут с увеличением f . И хотя добротность катушки с электростатическим экраном в 1,7 — 1,8 раз меньше, чем добротность катушки без экрана, видно, что

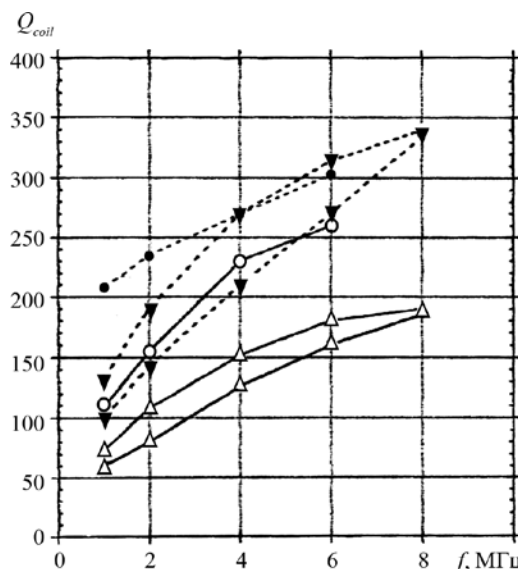


Рис. 2. Зависимость добротности катушки Q_{coil} от частоты ВЧ-поля f :

— — 8-щелевой экран; - - - - без экрана; ∇ , Δ , \circ — 6, 11 и 26 витков

даже на относительно низкой частоте ВЧ-поля $f = 2,65$ МГц добротность индуктора с 8-щелевым экраном и с 6-витковой катушкой достаточно высока — $Q_c = 90$.

Влияние расположения экрана на зажигание емкостного разряда

Проведенные в мегагерцовом диапазоне частот исследования зажигания разрядов низкого давления в колбах с полостью показали, что в отсутствие электростатического экрана ВЧ-напряжение, ток катушки и мощность зажигания в колбе емкостного разряда — U_{cap} , I_{cap} и P_{cap} заметно ниже напряжения, тока катушки и мощности зажигания индукционного разряда U_{ind} , I_{ind} и P_{ind} [6]. Размещение между катушкой и стенками полости заземленного экрана «ухудшает» емкостную связь катушки с плазмой разряда. Поэтому, зажигание емкостного разряда в колбе происходит «с помощью» потенциальных электрических полей, проникающих в колбу «поверх» верхней кромки экрана. Действительно, чтобы уменьшить емкостную связь индуктивной катушки с плазмой индукционного разряда, катушку надо поместить «внутри» экрана так, чтобы все витки катушки находились «ниже» верхней кромки экрана. В результате, существенно увеличиваются значения электрических параметров зажигания емкостного разряда P_{cap} , U_{cap} и I_{cap} .

На рис. 3 представлены зависимости ВЧ-напряжения катушки зажигания емкостного разряда в колбе U_{cap} от расстояния Δz между верхним витком катушки и кромкой экрана (с двумя продольными щелями шириной 1 мм). Измерения проводились в колбе ($ID_b = 105$ мм, $H_b = 118$ мм) с полостью ($OD_{cav} = 36$ мм, $H_{cav} = 65$ мм) на

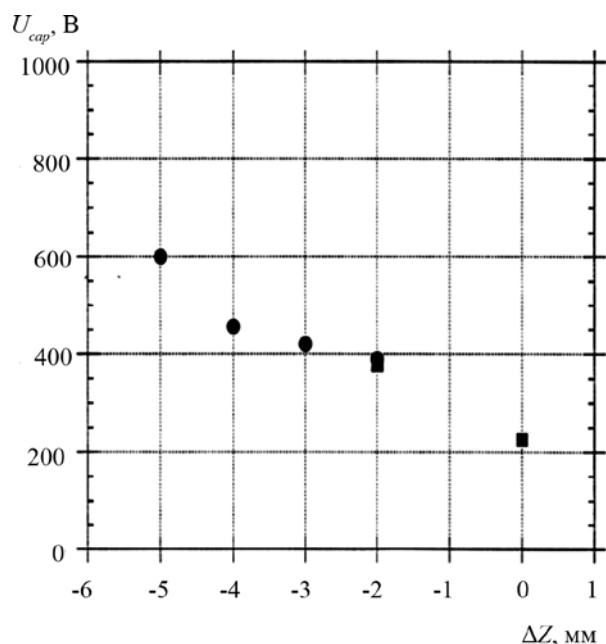


Рис. 3. Зависимость напряжения зажигания емкостного разряда U_{cap} от Δz :

экран с двумя продольными щелями; $p_{Hg} = 7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.; $p_{Ar} = 0,3$ мм рт. ст. ●, ■ — 6 и 8 витков; $f = 13,56$ МГц

частоте 13,56 МГц в смеси паров ртути ($7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) с аргоном (0,3 мм рт. ст.) В одном случае использовалась катушка с 8 витками $L_{coil} = 1,57$ мкГн), в другом — с 6 витками ($L_{coil} = 1,25$ мкГн). Видно, что U_{cap} падает с уменьшением расстояния от 600 В ($\Delta z = 5$ мм) до 220 В ($\Delta z = 0$). Так как для уменьшения емкостной связи с плазмой катушка должна быть экранирована от области зажигания разряда, то расстояние Δz должно быть не менее 5 мм. В этом случае значения U_{cap} и I_{cap} выше значений U_{ind} и I_{ind} и возникший в колбе емкостной разряд практически мгновенно переходит в индукционный.

Зажигание емкостного и индукционного разрядов в лампе с электростатическим экраном и «горловиной»

Как отмечалось выше, введение электростатического экрана значительно повышает напряжение и ток зажигания емкостного разряда, что весьма нежелательно с точки зрения создания лампы, как источника плазмы или оптического излучения с высоким сроком службы, превышающим 50000 ч [1, 2, 6]. Чтобы снизить параметры зажигания емкостного разряда U_{cap} , I_{cap} и P_{cap} без повышения параметров зажигания индукционного разряда U_{ind} , I_{ind} и P_{ind} и без ухудшения светотехнических и эксплуатационных характеристик лампы был предложен метод разделения областей зажигания емкостного и индукционного разрядов. Эскиз индукционной лампы приведен на рис. 1. Верхняя область штенгеля

в месте его приварки к полости (горловина) была расширена до внутреннего диаметра $ID_r = 13 - 20$ мм, достаточного, чтобы в ней зажегся и поддерживался емкостной разряд, неэкранированный от индуктивной катушки. Чтобы исключить возможность зажигания емкостного разряда в колбе в области вокруг стенок полости, верхний виток индуктивной катушки располагался на 10 мм ниже верхней кромки экрана.

Как показали измерения, для зажигания емкостного разряда в неэкранированной горловине с внутренним диаметром $ID_r = 15$ мм требуется относительно невысокое ВЧ-напряжение на индуктивной катушке $U_c = U_{cap} = 350 - 400$ В. Дальнейшее увеличение напряжения на катушке сопровождается ростом мощности, потребляемой емкостным разрядом P_{cap} , которая складывается из мощности, поглощенной плазмой P_{pl} и мощности, идущей на ускорение положительных ионов в слое пространственного заряда, формируемого между стенкой полости и плазмой емкостного разряда [3, 5]. Внешними электродами емкостного разряда, возникшего в горловине, являются витки индуктивной катушки, к которым приложено ВЧ-напряжение. С увеличением поглощаемой плазмой мощности возрастает плотность плазмы, а сама плазма диффундирует из горловины в область колбы над полостью и далее, в объем колбы, достигая области у стенок полости вблизи расположения витков катушки. Когда в этой области напряженность индуцированного тока катушки азимутального ВЧ электрического поля достигает «пробивного» значения E_3 , в колбе лампы и вокруг стенок полости возникает замкнутый индукционный разряд в форме тороидального плазменного витка.

Следует отметить, что из-за относительно малого диаметра горловины (15 мм) напряженность ВЧ электрического поля, необходимая для зажигания в горловине индукционного разряда, значительно выше, чем напряженность ВЧ электрического поля зажигания индукционного разряда в колбе. Поэтому, емкостной разряд в горловине не переходит в индукционный. С ростом мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда, снижается напряженность ВЧ электрического поля E_{pl} , поддерживающего индукционный разряд, а с ней и напряжение на плазменном витке $U_{pl} = E_{pl} \Lambda_{pl}$. В итоге, падает ВЧ-напряжение на катушке $U_c = U_{pl} N / (k)^{1/2}$ [6], которое становится недостаточным для поддержания емкостного разряда в горловине. Здесь $k = S_{coil} / S_{pl}$ — коэффициент связи катушки с плазменным витком индукционного разряда, где S_{coil} , S_{pl} — площади сечения катушки и плазменного витка [6].

В таблице приведены значения ВЧ-напряжения на индуктивной катушке, необходимые для зажигания емкостного и индуктивного разрядов (U_{cap} и U_{ind}), измеренные в лампах, работавших на частоте 13,56 МГц с 8-витковой индуктивной катушкой и с экраном с 8 щелями, каждая шириной 1 мм.

Значения ВЧ напряжения на индуктивной катушке, необходимые для зажигания емкостного и индуктивного разрядов, измеренные в лампах, работавших на частоте 13,56 МГц с 8-витковой индуктивной катушкой и с экраном с 8 щелями

Номер лампы	ID , мм	U_{cap} , В	U_{ind} , В
1–3	3	570	389
2–3	3	587	414
3–3	3	598	425
1–15	15	382	417
2–15	15	353	412

Измерения проводились с лампами двух конфигураций: со штенгелем без горловины ($OD_{шт} = 6$ мм, $ID_{шт} = 3$ мм) — три лампы (1–3; 2–3 и 3–3) и со штенгелем ($OD_{шт} = 6$ мм) и с горловиной ($ID_{г} = 15$ мм) — две лампы (1–15 и 2–15). Давление паров ртути в колбе $7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., давление криптона — 0,3 мм рт. ст.

Как следует из приведенных в таблице экспериментальных данных, расширение горловины в верхней части штенгеля от 3 до 15 мм снижает напряжение зажигания емкостного разряда U_{cap} от 570 — 600 В до 353 — 382 В. В результате U_{cap} становится ниже, чем напряжение зажигания индукционного разряда $U_{ind} = 389 — 425$ В, которое не зависит от диаметра горловины, но возрастает с увеличением числа витков катушки N и диаметра полости D_{cav} и уменьшается с увеличением диаметра разрядной колбы D_b [7].

Влияние числа щелей в электростатическом экране на световой поток лампы

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены четыре цилиндрических алюминиевых экрана толщиной 2 мм с разным числом продольных щелей (0, 1, 4 и 8), каждая шириной 1 мм. Экран располагался между индуктивной катушкой и стенками полости и приваривался к металлической основе базы лампы, которая, в свою очередь, соединялась со светильником (см. рис. 1). Такая конструкция позволила использовать щит Фарадея не только как «антиемкостной» электростатический экран, но и как конструктивный элемент лампы, охлаждающий витки индуктивной катушки и стенки полости.

Проводились измерения светового потока индукционной люминесцентной лампы с колбой каплеобразной формы ($ID_b = 110$ мм, $H_b = 118$ мм) и цилиндрической полостью ($OD_{cav} = 36$ мм, $H_{cav} = 65$ мм), в которой размещалась 11-витковая индуктивная катушка ($D_{coil} = 31$ мм, $H_{coil} = 25$ мм, $L_{coil} = 2,3$ мкГн). Внутренняя («вакуумная») поверхность стенок колбы и полости была покрыта смесью узкополосных люминофоров с цветовой температурой $T_{цв} = 3000$ К. Лампа заполнялась смесью

паров ртути ($7 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.) и аргона (0,3 мм рт. ст.) и работала в установившемся режиме при температуре окружающей среды $T_{о.с.} = 25$ °С на частоте $f = 13,56$ МГц и мощности $P = 55$ Вт.

Результаты измерений приведены на рис. 4, где световой поток лампы Φ_v построен в виде функции числа продольных щелей n . Видно, что световой поток растет, проявляя тенденцию к насыщению, с увеличением числа щелей в экране от $\Phi_v = 4260$ лм ($n = 0$) до $\Phi_v = 4730$ лм ($n = 8$), что составляет 96,5% от светового потока лампы без экрана — $\Phi_{v0} = 4900$ лм. Очевидно, что увеличение светового потока лампы (с увеличением числа щелей) связано с уменьшением мощности потерь в электростатическом экране P_{Far} и, следовательно, с увеличением мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда P_{pl} .

Как следует из рис. 4, увеличение количества щелей свыше 8 не дает заметного повышения светового потока лампы. В то же время, увеличение n ухудшает теплоотвод и охлаждение компонентов ВЧ-индуктора, что приводит к росту температуры индуктивной катушки и стенок полости и, соответственно, к сокращению срока службы лампы.

Заключение

Таким образом, установлено, что для уменьшения емкостной связи между индуктивной катушкой и плазмой индукционного разряда и предотвращения формирования между плазмой и стенкой полости постоянного электрического поля, ускоряющего ионы к стенке полости, катушка должна быть размещена «внутри» электростатического экрана на расстоянии от его верхней кромки не менее, чем на 5 мм.

Предложен и апробирован метод разделения областей зажигания двух типов разрядов, обеспечивающий в лампе с электростатическим экраном низкое напряжение зажигания емкостного разряда в расширенной

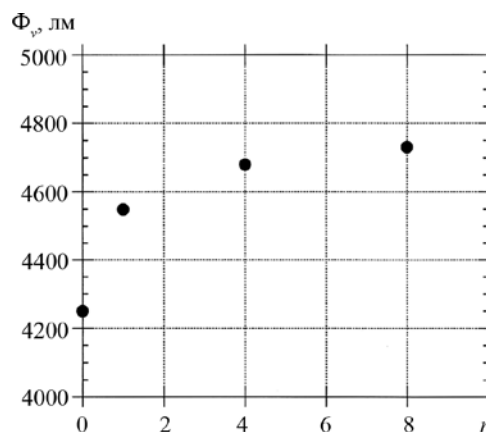


Рис. 4. Зависимость светового потока лампы Φ_v от числа щелей в экране n :

число витков $N = 11$; $p_{Hg} = 7 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.; $p_{Ar} = 0,3$ мм рт.ст.; мощность лампы $P = 55$ Вт; частота ВЧ-поля $f = 13,56$ МГц

части штенгеля без ухудшения технических и эксплуатационных параметров индукционной лампы.

Экспериментально установлено, что световой поток индукционной лампы с электростатическим экраном превышает 95% от светового потока лампы без экрана, когда количество продольных щелей в экране больше шести».

Литература

1. **Wayne L. Johnson.** Electrostatically-shielded inductively-coupled RF plasma sources: design, physics and performance // High density plasma sources / ed. by O. A. Popov. Park Ridge: Noyes Publ., 1995.

2. **Pat. 5.726.523 USA.** Electrodeless fluorescent lamp with bifilar coil and Faraday shield / Popov O., Maya J., Ravi J. // Mar. 10, 1998.

3. **Левитский С.М.** Исследование потенциала зажигания высокочастотного разряда в газе в переходной области частот и давлений // ЖТФ. 1957. № 27. С. 970 — 977.

4. **Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.** Высокочастотный емкостной разряд. М.: Наука — Физматлит, 1995.

5. **Годяк В.А., Попов О.А., Ганна А.Х.** Влияние слоев пространственного заряда у ВЧ-электродов на электродинамические характеристики ВЧ-разрядов // Радиотехника и Электроника. 1976. № 21. С. 2639 — 2641.

6. **Попов О.А., Мауа J.** Characteristics of electrodeless ferrite-free fluorescent lamp operated at frequencies of 1 — 15 MHz // Plasma Sources Sci. Tech. 2000. N. 9. P. 227 — 231.

7. **Попов О.А., Атаев А.Е.** Зажигание индукционного разряда низкого давления в смеси паров ртути и аргона на частотах 100 — 800 кГц // Вестник МЭИ. 2015. № 4. С. 67 — 74.

Статья поступила в редакцию 02.11.2015