

07;09;12

## Эффективный источник света на индуктивном бесферритном разряде на частотах 300–3000 kHz

© О.А. Попов

Panasonic Electric Works of America,  
01801 Woburn, Massachusetts, USA  
e-mail: popovs@comcast.net

(Поступило в Редакцию 2 августа 2006 г. В окончательной редакции 1 декабря 2006 г.)

Стеклянные цилиндрические трубки диаметром 5–7 см и длиной 30–50 см использованы в качестве разрядных трубок для безэлектродных люминесцентных ламп, использующих индуктивный разряд на частотах 300–3000 kHz и мощностях 50–300 W. Трубки были наполнены парами ртути и инертным газом (аргоном, 0.1 mm Hg); их стенки покрыты с вакуумной стороны люминофором и защитным покрытием. Индуктивная катушка (5–14 витков), изготовленная из многожильного провода с низким удельным сопротивлением, охватывает разрядную трубку в продольном направлении, образуя контур возбуждения разряда. Благодаря высокой добротности катушки,  $Q_c = 400$ , потери мощности в ней на частотах свыше 400 kHz были 4–5 W, а КПД лампы  $\eta = 0.95–0.96$ . Световая отдача лампы,  $\epsilon$ , росла с частотой возбуждения разряда, достигая на частоте 530 kHz и мощности 150 W значений  $\epsilon = 83–84 \text{ lm/W}$ .

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

### Введение

Безэлектродные люминесцентные источники света, использующие для генерации плазмы индуктивный разряд, находят в последние годы широкое применение для комнатного освещения (компактные лампы [1–3]) и для освещения улиц, парков, тоннелей, производственных помещений, стадионов и т.д. [4–9]. Безэлектродные лампы привлекают покупателя своей высокой светоотдачей, равной, а в некоторых случаях превышающей светоотдачу люминесцентных ламп, использующих нити накала. Но главное достоинство безэлектродных индуктивных люминесцентных ламп — их долговечность: от 30 000 h (компактные индуктивные источники света) до 60 000 h.

Однако известные в настоящее время безэлектродные индуктивные люминесцентные источники света имеют ряд недостатков, и главный из них — высокая себестоимость, складывающаяся из себестоимости трех основных компонентов индуктивных источников света:

- разрядной колбы;
- возбуждающего индуктивный разряд контура — катушки и ферритового сердечника с охлаждающим устройством;
- пускорегулирующего аппарата (ПРА).

Понижение цены любого из этих трех компонентов делает источник более конкурентноспособным в борьбе за рынок с „традиционными“ линейными люминесцентными лампами и лампами нити накала. Поэтому одним из главных направлений в поисках новых типов безэлектродных люминесцентных ламп — разработка более простых и дешевых компонентов источника света.

В настоящей работе предлагается простой в конструкции и дешевый в изготовлении безэлектродный и бесферритный люминесцентный источник света, использующий индуктивный разряд в широком диапазоне частот

$f = 300–3000 \text{ kHz}$  и мощностей  $P = 100–300 \text{ W}$ . В качестве разрядной камеры использовалась стеклянная цилиндрическая трубка, наполненная смесью инертного газа и ртутных паров. Индуктивный разряд зажигается и поддерживается в трубке с помощью индуктивной катушки, изготовленной из провода с низким удельным сопротивлением и размещенной по периметру разрядной трубки.

### Конструкция лампы и экспериментальная установка

Схематический чертеж лампы приведен на рис. 1 [10,11]. Индуктивный разряд зажигался в цилиндрических стеклянных трубках диаметром  $D = 5$  и 7 см и длиной  $H = 30, 40$  и 50 см. Холодная точка, температура которой контролирует давление паров ртути в трубке ( $p = 6 \times 10^{-3} \text{ mm Hg}$ ), находилась в откатном отростке. Давление буферного инертного газа (аргон),  $p = 0.1 \text{ mm Hg}$ . На вакуумную (внутреннюю) поверхность стенок трубки были нанесены защитное и люминофорное покрытия. Индуктивная катушка, состоящая из нескольких витков, размещалась

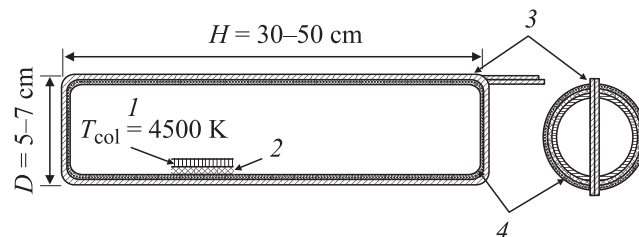


Рис. 1. Схема лампы с индуктивной катушкой: 1 — люминофор; 2 — защитное покрытие; 3 — индуктивная катушка; 4 — разрядная трубка.

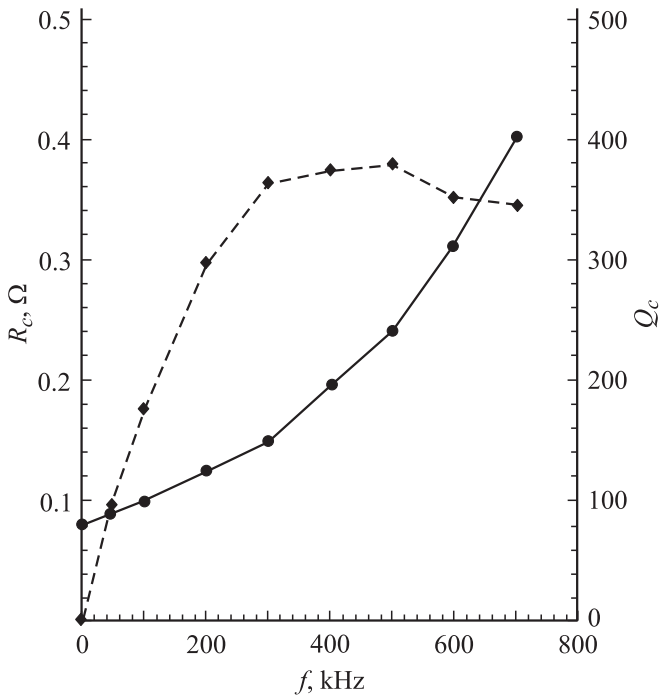


Рис. 2. Добротность  $Q_c$  (—◆—), и сопротивление,  $R_c$  (—●—), индуктивной катушки как функции частоты,  $f$ , индуктивность,  $L_c = 29 \mu\text{H}$ .

по периметру разрядной трубки в ее продольном направлении, образуя возбуждающий разряд контур. Протекающий по виткам индуктивной катушки ВЧ-ток,  $I_c$ , индуцирует в разрядной трубке электрическое поле,  $E$ , которое создает в трубке, вдоль ее стенок, индуктивный разряд, образующий вторичную обмотку воздушного трансформатора.

Катушки были изготовлены из многожильных проводов с 108 и 435 жилами (каждая жила калибра № 10), имеющих на частотах  $f = 100\text{--}1000$  kHz низкое удельное сопротивление,  $\rho < 10^{-3} \Omega/\text{cm}$  [7,12]. Число витков катушки,  $N$ , варьировалось от 4 до 14. На рис. 2 представлены как функции частоты  $f = \omega/2\pi$  две характеристики индуктивной катушки: добротность, определяемая как  $Q_c = \omega L_c / R_c$ , и активное сопротивление. Катушка имеет 8 витков, изготовлена из провода с 435 жилами и уложена по периметру разрядной трубки диаметром 7 см и длиной 30 см. Как видно из рис. 2, сопротивление катушки растет с частотой быстрее, чем линейно. Соответственно зависимость добротности катушки от частоты имеет максимум,  $Q_c = 380$ , который лежит на частоте 500 kHz.

Увеличение количества витков катушки приводит к квадратичному возрастанию индуктивности катушки  $L_c \sim N^2$ . Поскольку активное сопротивление катушки растет линейно с увеличением длины провода (числа витков), то добротность контура растет линейно с  $N$ . Например, изготовленные из провода с 435 жилами две катушки с различным числом витков,  $N = 5$  и 8, имеют на частотах 400–500 kHz соответственно  $Q_c = 260$

и 395. Уменьшение количества жил в проводе в 4 раза, от 435 к 108, ведет к 4-кратному увеличению его удельного сопротивления,  $r$ , и сопротивления провода и соответственно к такому же уменьшению добротности индуктивной катушки. Это проиллюстрировано рис. 3, где представлены добротность и активное сопротивление катушки, имеющей 10 витков и изготовленной из провода с 108 жилами. Катушка размещена на трубке диаметром 7 и длиной 40 см. Как видно из рис. 3, на частоте 400 kHz  $R_c = 0.9 \Omega$ , что в 4.5 раза выше, чем сопротивление катушки, изготовленной из 435 жил и размещенной на той же разрядной трубке (рис. 2). Добротность катушки, сделанной из провода с 108 жилами, на частоте 400 kHz упала лишь в 1.92 раза ( $Q_c = 200$ ), поскольку из-за большего числа витков,  $N = 10$ , и большей длины трубки,  $H = 40$  см, ее индуктивность,  $L_c = 69 \mu\text{H}$ , возросла в  $(40/30)(10/8)^2 = 2.1$  раза.

Питание лампы осуществлялось с помощью схемы, представленной на рис. 4 [12,13]. Синусоидальный сигнал подавался с задающего генератора (Philips PM 5193) на широкополосный усилитель (ENI A-300), а оттуда — на направленный ответвитель (Werlatone C5100), соединенный с измерителем мощности (Boonton RF4300). Усиленный сигнал подавался на настраивающий контур  $L$ -типа, составленный из тонкопленочных и керамических конденсаторов, а затем — на индуктивную катушку исследуемой лампы.

Напряжение и ток индуктивной катушки,  $V_c$  и  $I_c$ , измерялись с помощью высоковольтного зонда, трансформатора тока (Pearson 411) и осциллографа (HP 54503 A). Измерения показали, что потери мощности в настраивающем  $L$ -контуре даже в момент зажигания были значительно меньше, чем потери в индуктивной катушке, а в

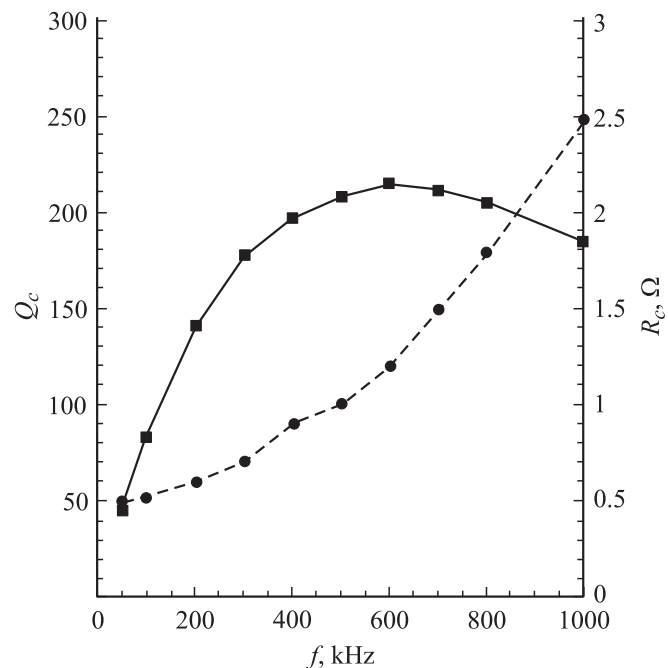
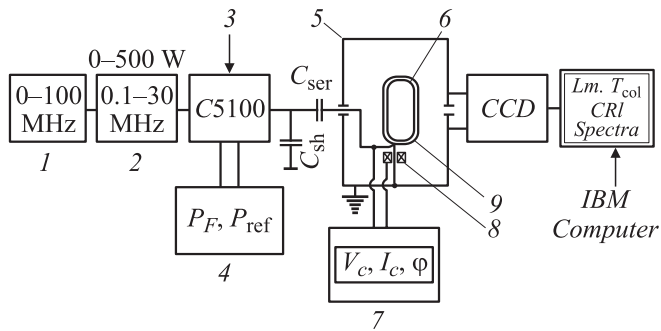


Рис. 3. Добротность (—■—) и сопротивление (—●—) катушки.



**Рис. 4.** Схематическая диаграмма экспериментальной установки: 1 — задающий генератор; 2 — усилитель; 3 — направленный ответвитель; 4 — измеритель мощности; 5 — интегрирующая оптическая сфера; 6 — индуктивная катушка; 7 — осциллограф; 8 — трансформатор тока; 9 — разрядная трубка.

стационарном режиме работы лампы они не превышали долей ватта. Потери мощности в индуктивной катушке,  $P_c$ , измерялись методом замещения в отсутствие плазмы и хорошо удовлетворяли соотношению  $P_c = I_c^2 R_c$ , рассчитанному с помощью экспериментальных значений тока и сопротивления катушки.

Измерения фотометрических характеристик индуктивных люминесцентных ламп проводились с использованием оптической интегрирующей сферы диаметром 1 м, выход из которой шел на компьютеризированный детектор ССД. Изменялись полный световой выход,  $\Phi$ , видимый спектр лампы, цветовая температура,  $T_{col}$ , и индекс цветопередачи,  $R_a$ . В настоящей работе представлены результаты измерения светового потока и рассчитанная по ним световая отдача,  $\epsilon = \Phi/P$ , в лампах с индуктивной катушкой, изготовленной из многожильного провода с 108 жилами и 13 витками.

## Зажигание индуктивного разряда

На рис. 5 построены зависимости напряжения и тока индуктивной катушки, изготовленной из многожильного (435 жил) провода (8 витков), от мощности лампы,  $P$ , включающей в себя мощность, поглощенную плазмой,  $P_{pl}$ , и мощность потерь в индуктивной катушке,  $P_c$ . Катушка размещена по аксиальному периметру разрядной цилиндрической трубки, диаметром 7 и длиной 30 см, заполненной парами ртути и аргоном (0.1 mm Hg). Емкостной разряд с „жидкой“ плазмой и темным пристеночным („прикатушечным“) слоем зажегся в трубке на частоте 415 kHz при мощности  $P = 10$  W,  $J_c = 4.6$  A и  $V_c = 360$  V. Дальнейшее повышение напряжения катушки сопровождалось ростом тока в ней и незначительным возрастанием плотности плазмы, в то время как потери мощности в катушке,  $P_c$ , росли, как  $(I_c)^2$ , и значительно превышали как потери мощности в пристеночных слоях (ускорение ионов в слое), так и мощность, поглощенную плазмой емкостного разряда.

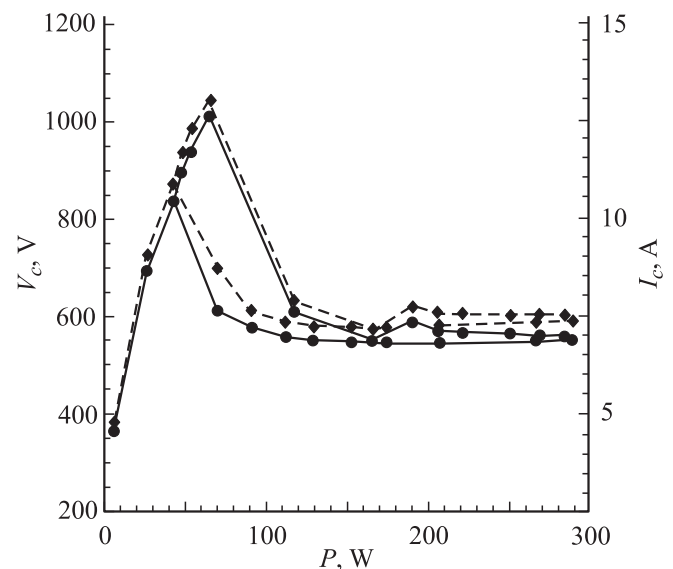
Когда напряжение и ток катушки достигали значений 1010 V и 13 A, а мощности лампы 65 W, в трубке возник индуктивный разряд. Его зажигание сопровождалось резким (в 2 раза) падением тока и напряжения катушки, потерь мощности в катушке, возникновением в трубке плотной и яркой плазмы, заметным уменьшением толщины темного пристеночного (прикатушечного) слоя и скачкообразным возрастанием мощности лампы (фактически плазмы) — от 65 до 120 W.

Также скачкообразно уменьшилось в момент зажигания индуктированное в трубке напряжение,  $V_2$ , которое можно представить как напряжение на вторичной обмотке (индуктивный разряд) воздушного трансформатора, где первичной обмоткой является индуктивная катушка. Значение  $V_2$  можно рассчитать по формуле воздушного трансформатора, измерив ток и напряжение катушки в момент зажигания индуктивного разряда [12]:

$$V_c = Z_c I_c; \quad \omega L_c I_c = V_2 N / (k)^{1/2}. \quad (1)$$

Здесь  $Z_c$  — импеданс катушки, практически равный его реактивной составляющей  $\omega L_c$  ( $R_c \ll \omega L_c$ ), а  $k$  — коэффициент связи катушки с плазмой разряда. В индуктивной плазме с воздушным трансформатором катушка/разряд, коэффициент связи,  $k = 0.5-0.6$  [12-14].

Как показали наши эксперименты, напряжение на катушке в момент зажигания индуктивного разряда,  $V_3$ , не зависит от частоты разряда, но линейно растет с числом витков в катушке. В соответствии с выражением (1) напряжение на плазме,  $V_2$ , так же как  $V_c$ , не зависит от частоты возбуждения разряда, если коэффициент связи плазмы с катушкой не меняется с  $f$ . (В действительности при переходе от емкостного разряда в индуктивный коэффициент связи плазмы с катушкой слегка возрастает, но для оценочных расчетов изменением  $k$  можно пренебречь.) Подставив в (1) значение напряжения на



**Рис. 5.** Напряжение и ток катушки,  $V_c$  (—●—) и  $I_c$  (—◆—), как функции мощности лампы,  $L_c = 29 \mu\text{H}$ .

катушке в момент зажигания,  $V_c = V_s = 1010$  В, число витков в катушке,  $N = 8$  и  $k = 0.55$ , мы получим индуцированное в плазме напряжение зажигания,  $V_2 = 94$  В.

Электрическое поле зажигания индуктивного разряда,  $E_s$ , можно рассчитать для данной трубки, зная напряжение катушки при зажигании,  $V_s = 1010$  В, и количество витков в ней,  $N = 8$  [12,13]:

$$E_s = V_2/\Lambda_{pl} = V_s(k)^{1/2}/N\Lambda_{pl}. \quad (2)$$

Приняв  $\Lambda_{pl} = 2D + 2H = 74$  см (длина пути разрядного тока вдоль стенок трубки), мы получим из (2)  $E_s = 1.3$  В/см. С учетом приближенности оценки длины пути разрядного тока рассчитанное нами электрическое поле зажигания индуктивного разряда находится в удовлетворительном согласии с рассчитанными таким же методом электрическими полями зажигания индуктивного разряда,  $E_s = 0.8–1.3$  В/см, в бесферритной тороидальной замкнутой разрядной трубке, работающей на частотах 200–800 kHz, но при давлении аргона 0.2 mm Hg [12].

Отметим, что мощность лампы в момент ее зажигания,  $P_s = (I_s)^2 R_c$ , фактически равная потерям мощности в катушке  $P_c$  (вследствие малой мощности, потребляемой емкостным разрядом) и уменьшается с ростом частоты возбуждения разряда как  $P_s \sim (f)^{-1}$ . Поскольку активное сопротивление катушки растет с частотой, то ток зажигания катушки, так же как и мощность лампы, уменьшается с ростом  $f$  как  $I_s \sim (f)^{-1}$ , что наблюдалось в экспериментах.

Обратную пропорциональность частоте разряда обнаружили мощность лампы и ток катушки в индуктивных разрядах в колбах А-типа, работающих как на частотах 2–15 MHz и использующих лишь индуктивную цилиндрическую катушку [13], так и на „низких“ частотах 100–400 kHz, использующих цилиндрическую катушку с ферритовым сердечником, помещенным во внутреннюю полость [7]. Такое же уменьшение с ростом частоты разряда показали при возникновении индуктивного разряда (зажигание лампы) мощность лампы и ток индуктивной катушки в бесферритных источниках света, использующих тороидальную замкнутую газоразрядную трубку и работающих на частотах 100–600 kHz [12]. Это указывает на схожий (если не идентичный) механизм зажигания индуктивного разряда в лампах с различной формой разрядных трубок/колб и разной конструкции индуктивной катушки, независимо от того, используется или нет ферритовый сердечник.

## Электрические характеристики индуктивного разряда

Как видно из рис. 5, после скачкообразного перехода емкостного разряда к индуктивному разряду ток и напряжение катушки остаются практически неизменными во всем диапазоне мощности лампы  $P = 100–300$  W. Возникшая при  $P = 65$  W плазма индуктивного разряда

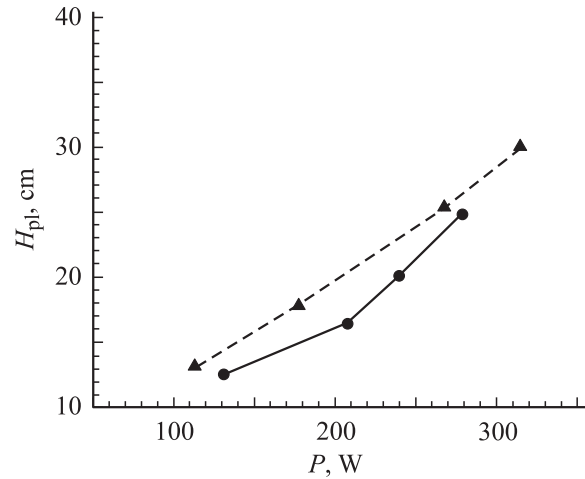


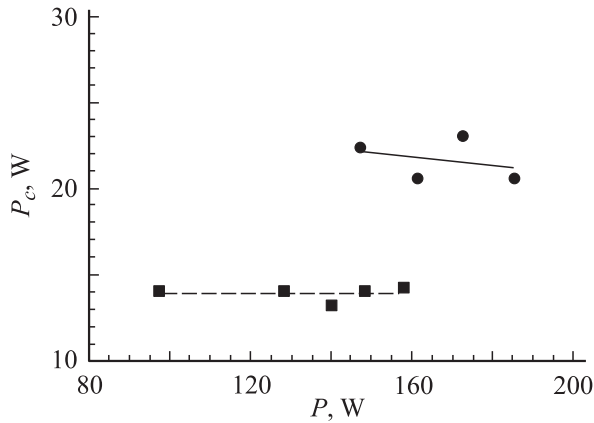
Рис. 6. Длина индуктивной плазмы как функция мощности лампы. Давление аргона — 0.1 mm Hg. Длина одной трубки — 30 (—▲—), другой — 50 см (—●—).

не заполнила полностью объем трубки, но лишь ее часть с повышением мощности лампы распространялась вдоль трубки. Зависимость длины плазмы,  $H_{pl}$ , от мощности лампы построена на рис. 6 для двух разрядных трубок диаметром 7 и длиной 30 и 50 см, зажженных на частоте 450 kHz. Индуктивная катушка была изготовлена из провода с 435 жилами и имела 8 витков. Из рис. 6 видно, что длина (и соответственно объем) индуктивной плазмы, заполняющей трубку, растет монотонно (почти линейно) с мощностью лампы, причем длина разрядной трубки  $H$ , практически не влияет на длину индуктивной плазмы. На частотах 300–500 kHz и при относительно небольших мощностях лампы 100–150 W плазмой заполняется менее половины объема трубки, и лишь на мощностях  $P > 300$  W вся разрядная трубка заполнена плазмой.

Эксперименты показали, что при одной и той же мощности лампы длина и объем индуктивной плазмы и соответственно степень заполнения ею разрядной трубки возрастают с увеличением частоты разряда. Например, при мощности лампы 80 W разрядная трубка длиной 30 см полностью заполнялась индуктивной плазмой лишь на частотах выше 2 MHz.

Как видно из рис. 5, с уменьшением мощности лампы ниже 100 W потери в катушке начинают расти, о чем свидетельствует рост тока и напряжения катушки. Пройдя гистерезис, связанный с изменением в процессе горения разряда давления паров ртути (нестабильность температуры холодной точки), индуктивный разряд в трубке слабеет с уменьшением мощности лампы и полностью переходит в емкостной разряд при  $P = 45–50$  W.

Потеря мощности в катушке с 108 жилами и 13 витками показана на рис. 7 как функция мощности лампы для трубки диаметром 7 см и длиной 30 см. Видно, что потери в катушке относительно велики: 22 W (383 kHz) и 14 (530); они мало меняются с мощностью лампы, но уменьшаются с ростом частоты как  $P_c \sim (f)^{-1}$ . Рас-



**Рис. 7.** Потери мощности в индуктивной катушке как функция мощности лампы.  $L_c = 90 \mu\text{H}$ . Давление аргона  $0.1 \text{ mm Hg}$ . Частота возбуждения разряда  $383$  (—●—) и  $530 \text{ Hz}$  (■).

считанные как  $P_c = (I_c)^2 R_c$  потери мощности в катушке находятся в хорошем согласии с экспериментальными значениями  $P_c$ .

Сокращение числа витков катушки от 13 до 10 приводит при работе на той же частоте  $530 \text{ kHz}$  к росту потерь мощности в ней от 14 до 19 W. Увеличение числа витков катушки ( $N > 15$ ), хотя и ведет к уменьшению потерь в ней, нецелесообразно, по крайней мере, по двум причинам: а) из-за возрастания ВЧ-напряжения на катушке выше  $1 \text{ kV}$ , что нежелательно по ряду причин (см. ниже); б) из-за блокирования видимого света из трубки, что ведет к уменьшению светового потока и светоотдачи лампы.

Изучение параметров индуктивного разряда в диапазоне частот  $300\text{--}3000 \text{ kHz}$  в цилиндрических трубках с индуктивной катушкой, расположенной вдоль стенок трубки, тема отдельного исследования. Тем не менее представляется возможным оценить электрическое поле индуктивного разряда, когда плазма полностью заполнила трубку и соответственно длина пути разрядного тока,  $\Lambda_{\text{pl}}$ , близка к длине периметра трубки. В этом случае ошибка в выборе величины  $\Lambda_{\text{pl}}$  минимальна, а коэффициент связи между плазмой и катушкой,  $k$ , может рассматриваться как постоянный по всему периметру трубки  $k = 0.55$ .

Подставив в (2) взятые из рис. 5 экспериментальные значения  $550 \text{ V}$  и  $N = 8$ , а также  $\Lambda_{\text{pl}} = 2H + 2D = 74 \text{ cm}$  и  $k = 0.55$ , мы получили для индуктивного разряда, работающего на частоте  $415 \text{ kHz}$ , и мощности лампы  $300 \text{ W}$  (мощность плазмы,  $P_{\text{pl}} = P - P_c = 286 \text{ W}$ ) усредненное по длине разрядной трубки электрическое поле индуктивного разряда,  $E_{\text{pl}} = 0.68 \text{ V/cm}$ . Это значение на 80% превышает рассчитанное таким же методом электрическое поле в замкнутом тороидальном индуктивном разряде, горевшем в смеси паров ртути и аргона ( $0.2 \text{ mm Hg}$ ) на частотах  $160\text{--}1000 \text{ kHz}$  и мощности плазмы,  $P = 230 \text{ W}$  [12]. С учетом вдвое меньшего, чем в [12], давления аргона, а также возможной ошибки при выборе значений коэффициента связи и длины

разрядного тока, расхождение в величинах электрических полей в нашей работе и в [12] можно считать удовлетворительным.

Энергетическая эффективность лампы (КПД), рассчитанная как  $\eta = (P - P_c)/P = P_{\text{pl}}/P$  по экспериментальным данным  $P$  и  $P_c$ , взятым из рис. 7, показывает, что она на более высокой частоте  $530 \text{ kHz}$  на 6–8% превышает КПД лампы на частоте  $380 \text{ kHz}$ . Однако даже при относительно высокой мощности  $140\text{--}160 \text{ W}$  КПД на частоте  $530 \text{ kHz}$  едва превышает 0.9. Для получения более высокого КПД ( $\eta = 0.96\text{--}0.98$ ), в том числе и на более низких частотах  $200\text{--}400 \text{ kHz}$ , требуется существенное уменьшение потерь мощности в катушке. Последнего можно добиться увеличением числа витков в катушке, что нежелательно, поскольку ведет к возрастанию напряжения на катушке,  $V_c \sim N$ , как это наблюдалось в наших экспериментах и в [12,13,15]. Как было экспериментально показано в [15], высокие напряжения на индуктивной катушке,  $V_c > 500 \text{ V}$ , размещенной на поверхности разрядной трубки, существенно увеличивают постоянную составляющую напряжения, формирующуюся в слое пространственного заряда между плазмой и внешним ВЧ-электродом (проводом катушки). Это напряжение ускоряет ионы плазмы, которые, бомбардируя стенки трубки, разрушают люминофорный слой, что приводит к деградации люминофора и сокращению ресурса лампы.

Следует также добавить, что катушки, находящиеся под высоким ВЧ-напряжением и размещенные на стенках колбы, сделанной из стекла с натриевыми добавками, создают поляризацию зарядов в стекле. В результате часть ионов натрия мигрирует из стекла в объем плазмы, что приводит к загрязнению рабочего газа разрядной трубки и сокращению срока жизни лампы [16].

Из выражений (1) и (2) можно получить соотношение, удобное для анализа и расчета потерь мощности в катушке  $P_c = (I_c)^2 R_c$ , зная частоту возбуждения разряда  $\omega = 2\pi f$ , длину пути разрядного тока  $\Lambda_{\text{pl}}$ , количество витков в катушке, ее индуктивность  $L_c$  и добротность  $Q_c$ :

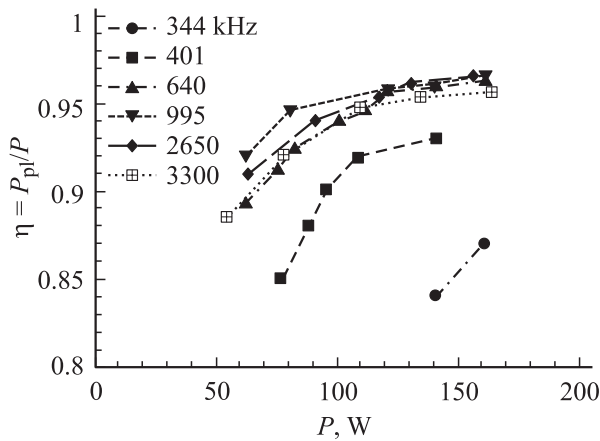
$$P_c = (I_c)^2 R_c = (E_{\text{pl}} \Lambda_{\text{pl}} N)^2 / k \omega L_c Q_c. \quad (3)$$

Для больших мощностей лампы и плазмы  $P_{\text{pl}} > 200 \text{ W}$ , когда плазма заполняет всю трубку, можно принять, что длина провода катушки  $L_w = \Lambda_{\text{pl}} N$ . Тогда для потерь мощности в катушке можно записать

$$P_c = (E_{\text{pl}} L_w)^2 / k \omega L_c Q_c. \quad (4)$$

Поскольку индуктивность катушки  $L_c \sim N^2$ , то из (4) следует, что в одной и той же разрядной трубке и на одной и той же частоте потери в катушке уменьшаются с увеличением ее добротности. При постоянной частоте и неизменном числе витков в катушке ее добротность растет за счет уменьшения сопротивления катушки, что достигается увеличением количества жил в проводе.

На рис. 8 представлены как функции мощности лампы экспериментальные значения КПД лампы, работающей на частотах от  $344 \text{ kHz}$  до  $3.3 \text{ MHz}$  и использующей 8-витковую катушку, изготовленную из провода



**Рис. 8.** КПД лампы для нескольких частот возбуждения разряда. Длина разрядной трубки 30, диаметр 5 см. Давление аргона 0.1 mm Hg.

с 435 жилами. Как видно из графика, при малых мощностях лампы (50–80 W) КПД лампы, работающей на относительно высоких частотах  $f > 400$  kHz, быстро увеличивается с ростом мощности, но затем стремится к насыщению  $\eta = 0.96–0.97$ , которого он достигает при  $P = 150–160$  W. Это более чем на 5% выше, чем КПД ламп с индуктивной катушкой, изготовленной из провода с 108 жилами.

Из рис. 8 также следует, что при постоянной мощности лампы ее КПД сначала растет с частотой возбуждения разряда, но уже при  $f = 600$  kHz стремится к насыщению.

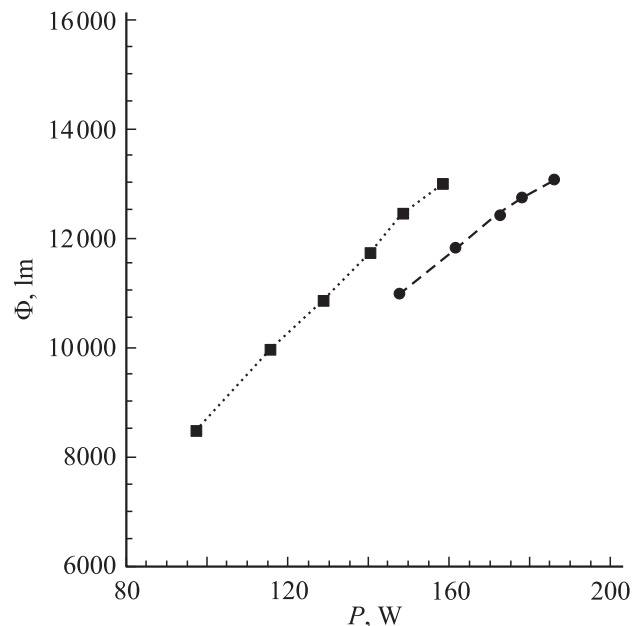
### Фотометрические характеристики лампы

На рис. 9 представлен как функция мощности лампы измеренный в интегрирующей оптической сфере световой поток люминесцентной индуктивной лампы, использующей стеклянную трубку диаметром 7 см и длиной 30 см и покрытой люминофором с цветовой температурой  $T_{col} = 4500$  K. Катушка имела 13 витков и была изготовлена из провода с 108 жилами. Измерения проводились на частоте 383 и 530 kHz в диапазоне мощности лампы от 95 до 185 W. Как видно из графиков, зависимость  $\Phi$  от  $P$  имеет для обеих частот одинаковый характер и монотонно (почти линейно) растет с мощностью. Легко видеть, что световой поток лампы, работающей на частоте 530 kHz, примерно на 8–10% выше, чем на частоте 383 kHz, что весьма близко к разнице в КПД лампы, рассчитанной для этих частот.

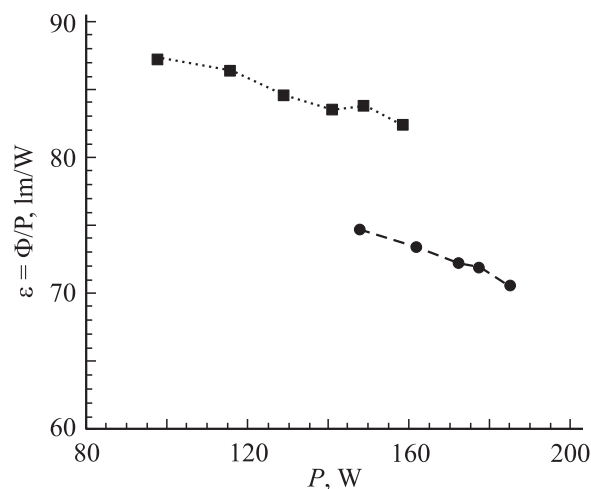
Световая отдача лампы  $\epsilon = \Phi/P$ , использующей ту же катушку и работающей на тех же частотах, показана на рис. 10 как функция мощности лампы. Сопоставление светоотдач  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$ , полученных для обеих частот, показывает, что светоотдача возрастает с увеличением  $f$ , а во всем диапазоне мощности лампы отношения

$\epsilon_1/\epsilon_2 = 1.11–1.12$  довольно близки к отношениям КПД лампы на этих же частотах,  $\eta_1/\eta_2 = 1.06–1.08$ . Это указывает на то, что частота возбуждения разряда влияет на светоотдачу лампы главным образом “через”, изменение потерь мощности в катушке.

Как видно из рис. 10, на обеих частотах светоотдача возрастает с уменьшением мощности лампы: например, на частоте 530 kHz она растет от 82 lm/W (160 W) до 87 (100). Дальнейшее уменьшение мощности лампы сопровождается возрастанием потерь мощности в катушке, приводящим к резкому падению светоотдачи. Увеличение частоты возбуждения разряда должно привести к возрастанию на этих же мощностях светоотдачи лампы из-за снижения потерь мощности в индуктивной



**Рис. 9.** Световой поток лампы  $\Phi$ . Размеры разрядной трубки и параметры индуктивной катушки, как на рис. 7.



**Рис. 10.** Светоотдача лампы  $\epsilon$ . Размеры разрядной трубки и параметры индуктивной катушки, как на рис. 7.

катушке. Однако в силу насыщения КПД лампы на частотах  $f = 1\text{--}2\text{ МГц}$  (рис. 8) не следует ожидать резкого возрастания светоотдачи лампы.

Представляет интерес определить максимальную светоотдачу лампы, каковой является „светоотдача“ плазмы индуктивного разряда, рассчитанная как светоотдача лампы без учета потерь в катушке. Плазменная светоотдача рассчитывается как [12]

$$\varepsilon_{\text{pl}} = \Phi/P_{\text{pl}} = \Phi/(P - P_c) = \varepsilon/\eta. \quad (5)$$

Подставив в (5) экспериментальные значения  $\Phi$ ,  $P$  и  $P_c$ , взятые для частоты 530 кГц и мощности лампы 140 Вт, мы получим для  $P_{\text{pl}} = 126\text{ Вт}$   $\varepsilon_{\text{pl}} = 93\text{ лм/Вт}$ . Снижение частоты разряда от 530 до 383 кГц ведет к уменьшению плазменной светоотдачи: на той же плазменной мощности ( $P_{\text{pl}} = 126\text{ Вт}$ ) она снижается до 87 лм/Вт. Уменьшение плазменной светоотдачи с частотой разряда, возможно, связано с сокращением объема трубки, занятой плазмой при уменьшении частоты возбуждения разряда.

Увеличение мощности, поглощенной плазмой, ведет к незначительному уменьшению плазменной светоотдачи: на частоте 530 кГц  $\varepsilon_{\text{pl}}$  снижается с 93 лм/Вт ( $P_{\text{pl}} = 126\text{ Вт}$ ) до 89 (146). Уменьшение  $\varepsilon_{\text{pl}}$  с ростом мощности, поглощенной плазмой, было обнаружено также в бесферритных индуктивных разрядах в замкнутых тороидальных трубках [12] и, по-видимому, связано с увеличением плотности электронов и, как следствие, с возрастанием частоты тушащих столкновений электронов с метастабильными атомами ртути.

Таким образом, индуктивный разряд в смеси паров ртути и аргона (0.1 мм рт.ст.) в цилиндрической стеклянной трубке диаметром 7 и длиной 30 см способен произвести на мощности 100–150 Вт световую отдачу, превышающую 90 лм/Вт. Чтобы достичь такой светоотдачи лампы, необходимо уменьшить потери мощности в индуктивной катушке до 3–4 Вт. Этого можно добиться либо снижением тока в катушке,  $I_c$ , либо уменьшением сопротивления провода, из которого она изготовлена. Понизить ток в катушке можно, увеличив число витков в ней, однако это сопровождается повышением напряжения на катушке,  $V_c$ , что весьма нежелательно из-за усиления бомбардировки ионами плазмы люминофорного покрытия на стенках трубки, что ведет к деградации люминофора и снижению срока жизни лампы. Другой путь сокращения потерь мощности в индуктивной катушке — понижение удельного сопротивления многожильного провода катушки, что достигается увеличением количества жил в проводе до 435 и более.

Представляет интерес сравнить светоотдачу обсуждаемой в статье бесферритной индуктивной лампы, работающей на частоте 530 кГц и световым потоком 10 000 лм, со светоотдачами ламп, использующих нити канала (люминесцентные) и внутренние электроды (металлогалогенные и ртутные лампы высокого давления). Как легко видеть из рис. 9, 10, световой поток в 10 000 лм индуктивной лампы, работающей на частоте 530 кГц,

достигается на мощности  $P = 115\text{ Вт}$ , что соответствует светоотдаче 87 лм/Вт. Светоотдачи стандартных люминесцентных ламп, работающих на мощности 110 Вт, лежат в пределах 85–92 лм/Вт, а светоотдачи металлогалогенных и ртутных ламп высокого давления, работающих на этой же мощности, не превышают соответственно 75 и 50 лм/Вт.

Учитывая то обстоятельство, что сроки жизни ламп с внутренними электродами и нитями накала не превышают 12 000 ч, а ресурс 50–250 Вт безэлектродных индуктивных ламп оценивается в 60 000 ч, преимущество последних очевидно, что делает мощные индуктивные лампы, в том числе и бесферритные, работающие на частотах 300–600 кГц, серьезными конкурентами „электронным“ и дуговым источникам света.

## Заключение

Подведем основные итоги нашей работы.

— Исследован индуктивный разряд на частотах 300–3000 кГц и мощностях 100–300 Вт, возбужденный в стеклянной цилиндрической трубке диаметром 5 и 7 см и длиной 30, 40 и 50 см в смеси паров ртути и аргона (0.1 мм рт.ст.). Разряд возбуждался с помощью индуктивной катушки, изготовленной из многожильного провода, имеющего низкое удельное сопротивление,  $\rho < 10^{-3}\text{ }\Omega/\text{см}$ .

— Напряжение на катушке в момент зажигания лампы (зажигание индуктивного разряда в колбе) определяется размерами трубки, электрическим полем зажигания и числом витком в катушке, но не зависит от частоты возбуждения разряда. Мощность зажигания индуктивного разряда и ток катушки уменьшаются обратно пропорционально частоте возбуждения разряда.

— Плазма индуктивного разряда распространяется по объему с ростом поглощаемой плазмой мощности. Полное заполнение трубки плазмой происходит на больших мощностях  $P > 300\text{ Вт}$ . Было обнаружено, что при фиксированной мощности лампы заполняемый плазмой объем трубки растет с увеличением частоты разрядного тока.

— Напряжение и ток катушки в стационарном индуктивном разряде не меняются с мощностью лампы во всем диапазоне мощностей ламп и частот возбуждения разряда. Рассчитанное электрическое поле разряда, усредненное по объему плазмы, находится в удовлетворительном согласии с рассчитанными таким же методом электрическими полями в индуктивных тороидальных замкнутых разрядах, работающих на тех же частотах и мощностях плазмы.

— Благодаря применению многожильного провода была достигнута высокая добротность контура индуктивных катушек  $Q_c = 300\text{--}400$  на частотах 400–600 кГц. Потери мощности в катушке уменьшались с частотой и в катушках, изготовленных из провода с 435 жилами, они снижались на частотах  $f > 600\text{ кГц}$  до  $P_c = 5\text{--}6\text{ Вт}$ .

— Низкие потери мощности в индуктивных катушках позволили добиться высокой энергетической эффективности ламп (КПД), растущей с частотой разряда и числом жил в проводе катушки, достигая 95% на частотах  $f > 600$  кГц.

— Работающий на частотах 530 кГц люминесцентный индуктивный источник света в трубке с размерами ( $D = 7$ ,  $H = 30$  см), люминофором,  $T_{\text{col}} = 4500$  К и катушкой с 108 жилами и 13 витками показал на мощностях 100–200 W хорошую светоотдачу 83–87 lm/W. Использование провода с большим количеством жил позволит добиться большего КПД источника света и светоотдачи, превышающей 90 lm/W.

— Светоотдача плазмы  $\epsilon_{\text{pl}}$  в разрядной трубке диаметром 7 см и длиной 30 см достигает на мощностях плазмы 100–140 W, 90–95 lm/W. Она возрастает с увеличением частоты разряда и падает с ростом поглощаемой плазмой мощности.

## Список литературы

- [1] Roberts V.D., El-Hamamsy S.-A., Taubert T.A., Mieskoski J.D. US Patent 5 461 284. October 24, 1995.
- [2] Popov O.A., Chandler R.T., and Maya J. // Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources. Toulouse, 2004. P. 417–418.
- [3] Arakawa T., Kawasaki M., Hashimoto K., Takahashi K., Miyazaki K., Seki K., Kurachi T., Itaya K. US Patent 6 768 254 B2. July 27, 2004.
- [4] Godvak V.A., Alexandrovich B., Piejak R.B., Statnic E. US Patent 5 834 905. November 19, 1998.
- [5] Shinomyia M., Kobayashi K., Higashikawa M., Ukegawa S., Matsuura J., and Tanigawa K. // J. of I11. Eng. Soc. 1991. Vol. 20. N 1. P. 44–49.
- [6] Schlejen J. // Proc. 6<sup>th</sup> Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources, Budapest, 1992. P. 307–315.
- [7] Popov O.A., Nandam P.K., Shapiro E.K., Maya J. US Patent 6 081 070. June 27, 2000.
- [8] Popov O.A. US Patent 6 288 490 B1. September 11, 2001.
- [9] Вонг А., Лу В., Лонг К., Чен Д., Чун Ю. // Светотехника. 2006. № 2. С. 22–25.
- [10] Popov O., Chandler R. US Patent 6 362 570 B1. March 26, 2002.
- [11] Popov O.A., Chandler R., and Maya J. // Proc. 10<sup>th</sup> Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources. Toulouse, 2004. P. 173.
- [12] Popov O.A. and Chandler R.T. // Plasma Sources Sci. Technol. 2002. Vol. 11. P. 218.
- [13] Popov O. and Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. Vol. 9. P. 227.
- [14] Piejak R., Godyak V.A., and Alexandrovich B. // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. Vol. 1. P. 179–186.
- [15] Popov O.A., Maya J., Shapiro E.K. US Patent 5 621 266. April 15, 1997.
- [16] Waymouth J.F. Private communication.