

УДК 537.533

## Влияние давления инертного газа на генерацию УФ-излучения лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой малого диаметра

В. А. Левченко, П. В. Старшинов, С. А. Свитнев, О. А. Попов, С. В. Костюченко

*Индукционный разряд трансформаторного типа с двумя симметрично размещенными на лампе ВЧ-индукторами (магнитопровод и индуктивная катушка) возбуждался на частоте 265 кГц в замкнутой кварцевой трубке с внутренним диаметром 16,6 мм в смеси паров ртути и инертных газов (0,1—1,0 Торр). Обнаружено, что минимум КПД индуктора и максимумы напряженности электрического поля в плазме и потока УФ-излучения ( $\lambda = 254$  нм) достигаются при давлениях инертных газов 0,3—0,4 Торр.*

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

*Ключевые слова:* лампа трансформаторного типа, ртутная плазма низкого давления, инертный газ, УФ-излучение, напряженность электрического поля.

### Введение

В последние годы динамично развиваются УФ-технологии обеззараживания воздуха и поверхностей. Весьма эффективными и удобными в эксплуатации являются мощные ртутные амальгамные УФ-лампы низкого давления, обеспечивающие большие удельные мощности (до 1,5 Вт/см) резонансного излучения на длине волны 254 нм [1]. Несмотря на то, что ведущие производители УФ-ламп смогли обеспечить приемлемый срок службы (до 20000 часов), повысить эффективность генерации УФ-излучения на длине волны 254 нм за счёт снижения давления буферной смеси пока не удается. Одним из способов решения этой проблемы является использование безэлектродного индукционного разряда. С точки зрения упрощения пускорегулирующей аппаратуры и необходимости работы в разрешённом частотном диапазоне, наиболее подходящими являются индукционные лампы трансформаторного типа (ЛТТ). В совре-

менных электродных амальгамных УФ-лампах применяются трубки диаметром 15—40 мм, в то время как в ЛТТ, применяемых, главным образом, для общего освещения, используются разрядные трубки значительно большего диаметра 50—70 мм [2—7]. Уменьшение диаметра разрядной трубки до 20—25 мм и понижение давления инертного газа до 0,1—0,5 Торр значительно усложнит зажигание индукционного разряда и повысит мощность потерь в магнитопроводе индуктора ЛТТ.

К сожалению, в литературе работы по экспериментальному исследованию ЛТТ низкого давления с разрядными трубками малого диаметра 15-20 мм практически отсутствуют.

Целью данной работы является исследование влияния давления инертного газа на генерацию УФ-излучения лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой малого диаметра и соответствующим электронным пускорегулирующим аппаратом (ЭПРА)

### Экспериментальная установка и методика измерений

На рис. 1 представлена обобщённая схема экспериментальной установки, которая позволяла измерять поток УФ-излучения лампы, ток и напряжение плазмы, ток и напряжение в ВЧ-индукторе, а также мощности, потребляемые плазмой, лампой (к потребляемой плазмой мощности добавлялась мощность потерь в ВЧ-индукторе) и комплектом «лампа + ЭПРА» (общая потребляемая всем устройством мощность). Объект исследования — лампа трансформаторного типа с внешним диаметром замкнутой кварцевой разрядной трубки  $d_2 = 19$  мм, внутренним  $d_1 = 16,6$  мм и длиной плазменного витка (длина осевой линии замкнутой трубки)  $L_{pl} = 815$  мм. Длина лампы —

Левченко Владимир Александрович, аспирант<sup>1,2</sup>.

Старшинов Павел Валерьевич, аспирант<sup>2,3</sup>.

Свитнев Сергей Александрович, ведущий инженер<sup>2</sup>.

Попов Олег Алексеевич, профессор<sup>3</sup>.

Костюченко Сергей Владимирович, председатель совета директоров<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Московский физико-технический институт  
Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

<sup>2</sup> НПО «ЛИТ»

Россия, 107076, Москва, ул. Краснобогатырская, 44, стр. 1.

E-mail: levchenkovl@npo.lit.ru, svitnevs@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский энергетический институт

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14.

E-mail: blitzz-z@ya.ru; olegpopov734@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2015 г.

© Левченко В. А., Старшинов П. В., Свитнев С. А.,  
Попов О. А., Костюченко С. В., 2016

492 мм, ширина — 100 мм. Источником паров ртути являлась индиевая амальгама. В качестве буферного газа использовался криптон, аргон и смеси аргона с неонам (30 % Ne + 70 % Ar) и (60 % Ne + 40 % Ar). Давление буферного газа  $p_g$  варьировалось от 0,1 до 1,0 Торр. ВЧ-индуктор состоял из двух кольцевых магнитопроводов с общим сечением  $4 \text{ см}^2$ , симметрично размещенных на замкнутой трубке, и двух индуктивных катушек (каждая по 16 витков), охватывающих «свой» магнитопровод и соединённых параллельно.

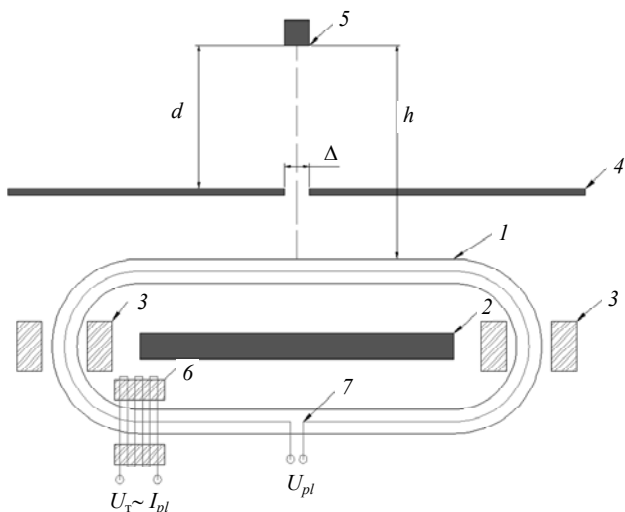


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 — разрядная трубка, 2 — экран, 3 — индуктор, 4 — короб с щелью, 5 — приёмник излучения, 6 — трансформатор тока, 7 — виток провода.

Характеристики разряда контролировались на протяжении всего времени его горения. Сразу после зажигания разряда наблюдался рост мощности потока регистрируемого УФ-излучения, который проходил через максимум (в этот момент давление паров ртути считалось оптимальным для генерации УФ-излучения с длиной волны 254 нм), а затем уменьшался. В момент достижения мощности потока УФ-излучения своего максимума регистрируемые данные записывались.

Измерение УФ-потока проводилось в приближении малых углов и допущении, что исследуемая лампа являлась ламбертовским источником оптического излучения и излучала равномерно по всей длине [1]. Лампа помещалась в чёрный металлический заземленный короб, в котором имелась щель шириной  $\Delta = 30 \text{ мм}$  и длиной 150 мм (см. рис. 1), через которую излучение лампы попадало на поверхность приёмника излучения, расположенного на расстоянии  $d = 1500 \text{ мм}$  от щели. Расстояние от лампы до фотодатчика составляло  $h = 1600 \text{ мм}$ . Чтобы избежать попадания излучения от «задней» части лампы на поверх-

ность приёмника излучения, в полость лампы устанавливался чёрный экран.

Исходя из предположения о равномерности излучения лампы по длине, излучательный поток всей лампы можно вычислить по излучению небольшого участка, вырезаемого щелью. При такой схеме измерений облучённость, создаваемая на чувствительной поверхности приёмника излучения, была пропорциональна потоку лампы [1]:

$$P_{254} = \frac{\pi^2 h d i l}{\Delta S}, \quad (1)$$

где  $l$  — осевая длина лампы;  $h$  — расстояние от лампы до датчика;  $i$  — фототок датчика;  $S$  — интегральная чувствительность датчика;  $d$  — расстояние от щели до фотоэлемента;  $\Delta$  — ширина щели.

В качестве приёмника излучения выступала «солнечнослепая» фотометрическая головка SED 240/W, чувствительная только в окрестности резонансной линии ртути  $\lambda = 254 \text{ нм}$ . Фототок приёмника излучения регистрировался цифровым радиометром IL1700, который передавал на персональный компьютер по физическому интерфейсу RS232 значения облучённости на поверхности приёмника излучения. На персональном компьютере в среде программирования LabView производился пересчёт полученных значений облучённости в УФ-поток, генерируемый исследуемой лампой.

Измерения электрических характеристик разряда проводились с использованием цифрового многоканального осциллографа Tektronix TDS640A (входное сопротивление соответствующих измерительных каналов было установлено равным 1 МОм). Ток разряда  $I_{pl}$  измерялся с помощью трансформатора тока, а напряжение плазменного витка  $U_{pl}$  — с помощью одного витка провода, расположенного по периметру разрядной трубки. Для измерения тока индуктора в электрическую цепь последовательно с индукционными катушками был установлен резистор (1 Ом), сопротивление которого мало по сравнению с реактивным сопротивлением индуктора на рабочей частоте ( $f = 265 \text{ кГц}$ ). Напряжение на индукторе измерялось непосредственно с помощью высоковольтного щупа, подключенного к осциллографу. Мощности плазмы и лампы были получены путём перемножения мгновенных значений соответствующих сигналов (напряжения и тока) и последующим интегрированием (осциллограф Tektronix TDS640A имеет необходимые для этого встроенные функции). Общая потребляемая всем устройством мощность измерялась подключаемым между сетью питания и ЭПРА цифровым мультиметром

UT71E, имеющим функцию измерения мощности в широком диапазоне частот (до 400 кГц).

Лампа питалась с помощью ЭПРА, позволяющего регулировать частоту питающего тока и потребляемую лампой мощность. Поскольку выходной каскад ЭПРА вместе с лампой представлял собой резонансный контур, для получения высокой добротности и, как следствие, больших напряжений рабочая частота ( $f = 265$  кГц) выбиралась немного выше резонансной.

Для снижения напряжения зажигания индукционного разряда в трубке предварительно зажигался емкостной разряд, создаваемый с помощью приложенных снаружи, к стенкам разрядной

трубки двух металлических пластин, на которые подавалось ВЧ-напряжение с ВЧ-индуктора.

### Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Зависимость потока УФ-излучения лампы  $\Phi_{254}$  на длине волны  $\lambda = 254$  нм от давления буферного газа (криптон, аргон и смесь 30 % Ne + 70 % Ar) при оптимальном давлении паров ртути приведены на рис. 2. Мощность плазмы во всех случаях составила  $175 \pm 10$  Вт. Значения тока разряда  $I_{pl}$  и напряжения на плазменном витке  $U_{pl}$  представлены в таблице.

Таблица

Электрические параметры плазмы индукционной лампы

№	Наполнение лампы	Ток плазмы, $I_{pl}$ , А	Напряжение плазменного витка, $U_{pl}$ , В
1	Ar 100 % 1 Торр	2,7	59,8
2	Ar 100 % 0,5 Торр	2,8	66,4
3	Ar 100 % 0,3 Торр	2,6	68,9
4	Ar 100 % 0,1 Торр	3,0	59,1
5	Ne/Ar 30/70 % 1 Торр	3,0	65,3
6	Ne/Ar 30/70 % 0,5 Торр	2,6	71,5
7	Ne/Ar 30/70 % 0,3 Торр	2,6	72,5
8	Ne/Ar 30/70 % 0,1 Торр	2,7	69,8
9	Ne/Ar 60/40 % 1 Торр	2,6	70,9
10	Kr 100 % 1 Торр	4,6	41,3
11	Kr 100 % 0,5 Торр	4,0	47,8

Из рис. 2 видно, что поток УФ-излучения в ртутной лампе с криптоном ниже, чем в лампе с аргоном и смесью 30 % Ne + 70 % Ar, а зависимость  $\Phi_{254}$  от давления буферного газа обнаруживает в обеих смесях максимум при давлении  $p_g = 0,3$  Торр. Соответственно, при таком же давлении буферного газа достигает максимума (40 %) КПД генерации УФ-излучения плазмы  $\eta_{pl} = \Phi_{254}/P_{pl}$ .

Аналогичную зависимость от  $p_g$  и близкие значения имеют КПД генерации УФ-излучения мощных (2—5 А) электродных амальгамных УФ ламп [1]. Однако их срок службы (при давлении буферной смеси ниже 0,5 Торр) не достигает 5000 ч, в то время как срок службы безэлектродных индукционных ламп трансформаторного типа превышает 60000 ч [2, 3, 6].

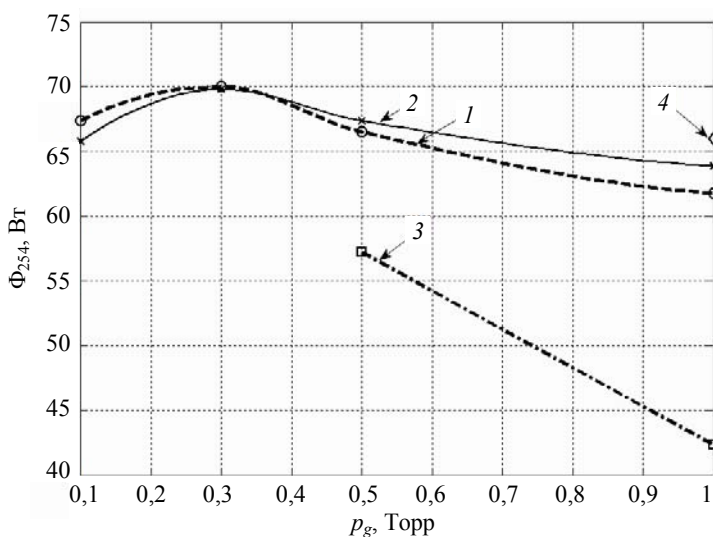


Рис. 2. Экспериментальная зависимость потока УФ-излучения  $\Phi_{254}$  от давления инертного газа  $p_g$ . Круги и пунктирная линия (1) — Ar, кресты и сплошная линия (2) — Ne/Ar 30/70 %, квадраты и штрих-пунктирная линия (3) — Kr, ромб (4) — Ne/Ar 60/40 %.

Так как эффективность генерации УФ-излучения определяется в значительной степени величиной напряженности ВЧ-электрического поля в плазме разряда  $E_{pl}$ , мы провели (при разумном допущении однородности электрического поля вдоль плазменного витка  $\Lambda_{pl}$ ) расчет напряженности поля плазмы как  $E_{pl} = U_{pl}/\Lambda_{pl}$ . Результаты расчета  $E_{pl}$  для ртутной лампы с двумя разными наполнениями — аргон и смесь неона с аргонном —

приведены в зависимости от давления буферного газа  $p_g$  на рис. 3. Видно, что  $E_{pl}$  с уменьшением давления газа от 1,0 до 0,1 Торр сначала возрастает, а затем уменьшается, достигая максимума  $E_{pl} = 0,83$  В/см (Ar) и  $E_{pl} = 0,86$  В/см (30 % Ne + 70 % Ar) при давлении буферного газа  $p_g = 0,2—0,3$  Торр, т. е. практически таком же, при котором максимален поток УФ-излучения  $\Phi_{254}$ .

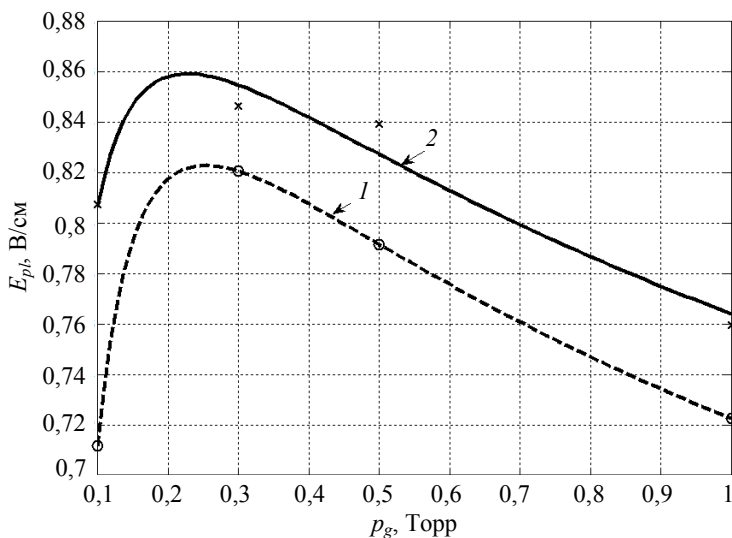


Рис. 3. Экспериментальная зависимость напряженности электрического ВЧ-поля плазмы  $E_{pl}$  от давления инертного газа  $p_g$ . Условия горения разряда как на рис. 2. Круги и пунктирная линия (1) — Ar, кресты и сплошная линия (2) — Ne/Ar 30/70 %.

Действительно, немонотонная зависимость  $E_{pl}$  от  $p_g$  характерна для плазмы низкого давления в парах металлов и инертных газов, равно как и в их смесях, и удовлетворительно описывается известным соотношением [8]:

$$E_{pl} \approx 1,5 T_e \chi^{1/2} / \lambda_e. \quad (2)$$

Здесь  $T_e$  — электронная температура;  $\chi$  — доля энергии, теряемая (в среднем) электроном между двумя соударениями,  $\lambda_e$  — средняя длина пробега электрона.

Поскольку с увеличением давления инертного газа  $\lambda_e$  и  $T_e$  уменьшаются, а зависимость  $\chi$  от  $p_g$  имеет сложный немонотонный характер, то зависимость  $E_{pl}$  от  $p_g$  также немонотонна и образует максимум, положение которого зависит от степени ионизации плазмы, потенциала ионизации атома и его атомного веса [8]. В плазме с более «тяжелым» газом максимальная напряженность электрического поля ниже, а максимум в зависимости  $E_{pl}$  от  $p_g$  смещен в область более низких давлений. Это видно из рис. 3, а также следует из результатов наших измерений, проведенных в ЛТТ со смесью паров ртути с криптоном, где напряженность электрического поля в плазме оказалась заметно ниже, чем в лампе со смесью неона с аргонном: 0,48 В/см (1,0 Торр) и 0,55 В/см (0,5 Торр). Отметим, что при давлениях газа  $p_g = 0,1—1,0$  Торр в плазме индукционного разряда, работающего на частоте

$f = 265$  кГц, выполняется условие постоянно-токовой аналогии  $\omega \ll v_{el}$  ( $v_{el}$  — частота упругих соударений электронов с атомами) [8].

Помимо влияния на температуру электронов  $T_e$  и, следовательно, на КПД генерации УФ-излучения плазмой ЛТТ, напряженность электрического ВЧ-поля в плазме влияет, в соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда, на мощность потерь в магнитопроводе ВЧ-индуктора  $P_{fer}$  [9]:

$$P_{ind} = P_{fer} = (22,5)^d \alpha \pi f^{(c-d)} \times (E_{pl} \Lambda_{pl})^d (ID_{fer} + L_{fer}) / (H_{fer} L_{fer})^{d-1} \quad (3)$$

где  $ID_{fer}$ ,  $L_{fer}$  и  $H_{fer}$  — соответственно внутренний диаметр, толщина стенок и высота магнитопровода; коэффициент  $\alpha$ , показатели степени  $c$  и  $d$  характеризуют материал магнитопровода и рабочую частоту лампы. В магнитопроводе, изготовленном из мягкого ферромагнетика  $Fe_2O_3:MnZn$ , работающем на частоте  $f = 100—400$  кГц, имеем  $\alpha = 0,043$ ,  $c = 1,63$ ,  $d = 2,63$  [10]. Тогда выражение (3) принимает вид [9]:

$$P_{fer} = 486 (E_{pl} \Lambda_{pl})^{2,63} (ID_{fer} + L_{fer}) / f (H_{fer} L_{fer})^{1,63}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что мощность потерь в магнитопроводе резко возрастает с увеличением на-

пряженности электрического ВЧ-поля ( $P_{fer} \sim E_{pl}^{2,63}$ ) и обратно пропорциональна рабочей частоте индукционной лампы  $f$ . Возрастание мощности потерь в магнитопроводе ведет к снижению КПД ВЧ-индуктора  $\eta_{ind}$ :

$$\eta_{ind} = 1 - P_{fer} / P. \quad (5)$$

На рис. 4 приведена рассчитанная по (5) зависимость КПД индуктора  $\eta_{ind}$  от давления инертного газа  $p_g$  в ЛТТ со смесью паров ртути с криптоном, аргоном и смесью Ne + Ar. Видно, что минимальные значения КПД ( $\eta_{ind} = 0,65$ ) приходятся примерно на те же давления газа, при которых достигаются максимальные значения потока

УФ-излучения  $\Phi_{254}$  и напряженности электрического поля в плазме  $E_{pl}$ . И чем тяжелее газ, тем выше КПД индуктора  $\eta_{ind}$  и тем при меньшем давлении газа расположен минимум зависимости  $\eta_{ind}$  от  $p_g$ . Таким образом, увеличение напряженности электрического поля, с одной стороны, повышает эффективность генерации и поток УФ-излучения  $\Phi_{254}$  плазмы индукционного разряда  $\eta_{pl}$ , а с другой стороны, увеличивает мощность потерь в магнитопроводе  $P_{fer}$  и снижает КПД индуктора  $\eta_{ind}$ . Как было экспериментально установлено [11], увеличение удельной мощности плазмы  $P_1 = P_{pl}/\Lambda_{pl}$  сдвигает максимум мощности потерь в магнитопроводе (минимум  $\eta_{ind}$ ) в сторону меньших давлений инертного газа.

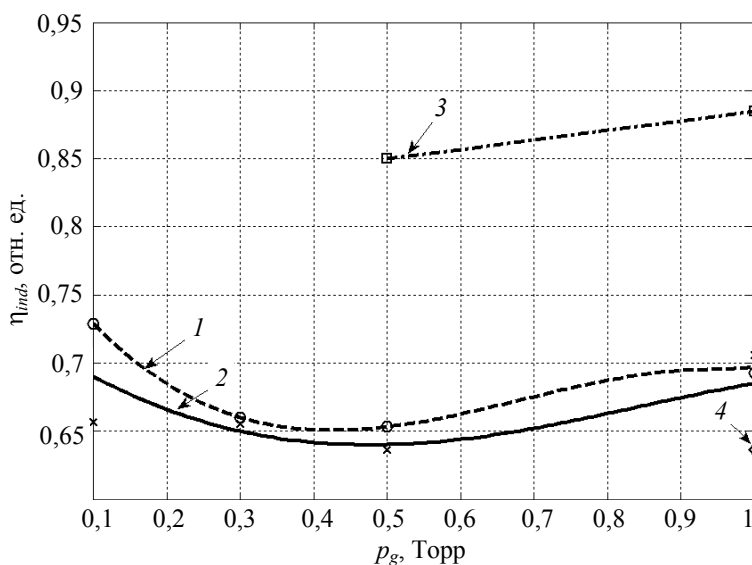


Рис. 4. Зависимость КПД индуктора лампы трансформаторного типа  $\eta_{ind}$  от давления инертного газа  $p_g$ . Условия горения разряда как на рис. 2. Круги и пунктирная линия (1) — Ar, кресты и сплошная линия (2) — Ne/Ar 30/70 %, квадраты и штрих-пунктирная линия (3) — Kr, ромб (4) — Ne/Ar 60/40 %.

Поскольку полное КПД индукционной лампы  $\eta$  есть произведение двух КПД:

$$\eta = \eta_{ind} \eta_{pl}, \quad (6)$$

то для его повышения необходимо увеличивать как КПД генерации УФ-излучения плазмы  $\eta_{pl}$ , так и КПД индуктора  $\eta_{ind}$ , т. е. уменьшать мощность потерь в магнитопроводе  $P_{fer}$ . Способы уменьшения  $P_{fer}$  без снижения  $\eta_{pl}$  можно найти в выражении (4): а) уменьшение длины плазменного витка  $\Lambda_{pl}$ ; б) увеличение площади сечения магнитопровода  $S_{fer} = H_{fer} L_{fer}$ ; с) повышение рабочей частоты лампы  $f$ . Как следует из (4) и как было подтверждено экспериментально [9], весьма эффективный способ снижения потерь в магнитопроводе — увеличение площади его сечения  $S_{fer}$ . Расчеты показывают, что увеличение сечения каждого из двух магнитопроводов до  $9 \text{ см}^2$  ( $S_{fer} = 18 \text{ см}^2$ ) повышает КПД индуктора до  $\eta_{ind} = 0,9$ .

## Заключение

Приведем основные результаты исследования влияния давления инертного газа на генерацию УФ-излучения лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой малого диаметра.

- Уменьшение диаметра разрядной трубки индукционной лампы до 16 мм приводит к повышению напряженности электрического ВЧ-поля в плазме, в результате чего увеличивается КПД генерации УФ-излучения ртутной плазмы на длине волны 254 нм, но также возрастает мощность потерь в магнитопроводе и падает КПД индуктора.

- Поток УФ-излучения лампы и напряженность электрического ВЧ-поля в плазме максимальны при давлении 0,3 Торр, весьма близком давлению 0,4—0,5 Торр, на которых минимален КПД индуктора лампы.

- Экспериментальные значения КПД генерации УФ-излучения на длине волны 254 нм, полученные при давлении инертного газа 0,3 Торр, со-

поставимы с таковыми мощных электродных амальгамных УФ-ламп.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке эффективных индукционных источников УФ-излучения на основе ЛТТ для прямой замены короткоживущих электродных бактерицидных ламп.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н., Храменков С. В. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. — Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2012.
2. Piejak R., Godyak V. A., Alexandrovich B. // J. Appl. Phys. 2001. Vol. 89. No. 7. P. 3590.

3. Гвоздев-Карелин С. В. // Светотехника. 2006. № 3. С. 9.
4. Попов О. А., Чандлер Р. Т. // Теплофизика высоких температур. 2007. № 4. С. 795.
5. Исупов М. В., Кротов С. В., Литвинцев А. Ю., Уланов И. М. // Светотехника. 2007. № 5. С. 37.
6. Godyak V. A. // J. of Physics D: Applied Physics. 2013. Vol. 46. No. 28. P. 283001.
7. Исупов М. В., Федосеев А. В., Сухинин Г. И., Уланов И. М. // Теплофизика и аэромеханика. 2014. Т. 21. № 5. С. 681.
8. Райзер Ю. П. Физика газового разряда. — М.: Наука, 1987.
9. Попов О. А., Атаев А. Е. // Вестник МЭИ. 2014. № 4. С. 66.
10. Ferrite Cores Catalog. — Magnetics Inc. 1997. Butler. PA.
11. Попов О. А. // Вестник МЭИ. 2013. № 3. С. 76.

## Inert gas pressure effects on the UV radiation intensity of a transformer lamp with a small diameter of the discharge tube

V. A. Levchenko<sup>1,2</sup>, P. V. Starshinov<sup>2,3</sup>, S. A. Svitnev<sup>2</sup>, O. A. Popov<sup>3</sup>, and S. V. Kostyuchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskii al, Dolgoprudny, 141700 Russia  
E-mail: mscoff@mail.ru

<sup>2</sup> LIT R&P Association  
44/1 Krasnobogatyrskaya str. Moscow, 107076, Russia  
E-mail: levchenkov1@npolit.ru, svitnevs@yandex.ru

<sup>3</sup> Moscow Power Engineering Institute  
14 Krasnokazarmennaya str. Moscow, 111250, Russia  
E-mail: olegpopov734@yahoo.com; blitzzz-z@ya.ru

Received December 2, 2015

*An inductively-coupled transformer-type discharge was excited in the mixture of mercury vapor (0.007 Torr) and inert gases (0.1—1.0 Torr) in the closed-loop cylindrical quartz tube of 16.6 mm in diameter, at a frequency of 265 kHz with the help of two induction coils and two circled ferrite cores symmetrically positioned on the tube. The minimal values of RF inductor efficiency, and the maximal values of plasma UV ( $\lambda = 254$  nm) radiation intensity and magnitudes of RF electric field were found to be at inert gas pressures of 0.3—0.4 Torr.*

**Keywords:** Inductively-coupled transformer lamp, low pressure mercury plasma, UV radiation, inert gas, RF electric field.

#### REFERENCES

1. F. V. Karmazinov, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, and S. V. Khramenkov, *Ultraviolet Technologies in the Contemporary World*. (Intellect, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
2. R. Piejak, V. A. Godyak, B. Alexandrovish, J. Appl. Phys. **89**, 3590 (2001).
3. S. V. Gvozdev-Karelin. Svetotekhnika, No. 3, 9 (2006).
4. M. V. Isupov, S. V. Krotov, A. Y. Litvintsev, and I. M. Ulanov, Svetotekhnika, No. 5, 37 (2007).
5. O. A. Popov and R. T. Chandler, High Temp. 2007. No. 4. P. 795 (2007).
6. V. A. Godyak. J. of Physics D: Applied Physics **46**, 283001 (2013).
7. M. V. Isupov, A. V. Fedoseev, G. I. Sukhinin, and M. I. Ulanov, Thermophysics and Aeromechanics **21**, 681 (2014).
8. Yu. P. Raiser, *Gaseous Discharge Physics* (Nauka. Moscow. 1987) [in Russian].
9. O. A. Popov and A. Y. Ataev, Vestnik MEI, No. 4, 66 (2014).
10. *Ferrite Cores Catalog*. (Magnetics Inc. Butler. PA. 1997).
11. O. A. Popov, Vestnik MEI, No. 3, 76 (2013).