

# Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм

В. А. ЛЕВЧЕНКО, О. А. ПОПОВ, С. А. СВИТНЕВ, П. В. СТАРШИНОВ<sup>1</sup>

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ» и ООО ПК «ЛИТ», Москва

## Аннотация

Проведены экспериментальные исследования электрических и излучательных характеристик лампы трансформаторного типа с замкнутой разрядной трубкой внутреннего диаметра 16,6 мм, работающей в смеси паров ртути (7 Торр) и инертных газов (0,1–1,0 Торр) на частоте 265 кГц при мощности плазмы разряда 180 Вт. Установлено, что максимальные значения энергетического КПД в линии ртути 254 нм и напряжённости ВЧ электрического поля в плазме и минимальные значения разрядного тока лампы соответствуют давлению инертных газов 0,3 Торр. Расчёты разрядного тока по трансформаторной модели индукционного разряда показали хорошее согласие с результатами эксперимента.

**Ключевые слова:** индукционный разряд, ртутная плазма НД, УФ излучение, ВЧ, напряжённость электрического поля.

## 1. Введение

Индукционные ртутные разрядные лампы НД трансформаторного типа (ЛТТ) являются одним из перспективных источников видимого и УФ излучений [1–3]. Благодаря отсутствию внутренних электродов ЛТТ могут работать при относительно низких давлениях инертного газа, 0,05–0,5 Торр, соответствующих максимально эффективной генерации ртутного излучения в линиях 185 и 254 нм [4]. Это открывает возможность создания самых разных по мощности эффективных источников УФ резонансного излучения, используемых для очистки воды и воздуха. Большинство исследований по ЛТТ касались создания долговечных (60–100 тыс. ч) и энергоэффективных ( $\geq 100$  лм/Вт) люминесцентных ЛТТ с низкой мощностью нагрузкой на стенки стеклянной трубки, покрытых люминофором, что требовало относительно большого диаметра разрядных трубок, 50–70 мм [2, 4, 5]. Исследований же по ЛТТ с разрядными трубками меньшего диаметра, 15–25 мм, более эффективных в плане создания бактерицидных ламп, до представляемой ниже работы авторов практически не было.

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений

Индукционный разряд зажигался на частоте  $f = 265$  кГц в замкнутой кварцевой трубке наружного и внутреннего диаметров 19 и 16,6 мм соответственно. Длина лампы  $L = 492$  мм и длина плазменного витка, определяемая как длина оси разрядной трубки,  $A_{пл} = 815$  мм. ВЧ индуктор представлял собой два параллельно соединённых коль-

цевых ферромагнитных сердечника (магнитопровода) сечением  $2 \text{ см}^2$  каждый, симметрично размещённых на замкнутой разрядной трубке. Каждая из двух, соединённых параллельно катушек индуктивности (каждая по 16 витков) охватывала «свой» магнитопровод. Давление паров ртути в разрядной трубке поддерживалось оптимальным (по максимуму энергетического КПД разрядной части лампы в линии 254 нм  $\eta_{e,254}$ ), 0,006–0,008 Торр температурой ртутно-индиевой амальгамы, размещённой на стенке трубки. В качестве буферного газа использовались криптон, аргон и смеси аргона с неоном (30%Ne + 70%Ar и пеннинговская смесь 60%Ne + 40%Ar); давление буферного газа (или смеси газов)  $p_{u.г.}$  варьировалось от 0,1 до 1,0 Торр. Измерения проводились при постоянной мощности плазмы  $P_{пл} = 180$  Вт.

Схема установки приведена на рис. 1. Электрические измерения выполнялось с помощью цифрового осциллографа *Tektronix TDS640A*. Для измерения удельного потока излучения в линии ртути 254 нм использовался радиометр *IL1700* компании *InternationalLightTechnologies* с фотометрической головкой *SED240/W* с косинусной угловой характеристикой. Лампа размещалась в чёрном заземлённом металлическом коробе на неподвижной стойке с чёрным экраном в плоскости разрядной трубки. В коробе имелась щель шириной 20 мм для измерения вышеуказанного удельного потока излучения лампы [3]. Расстояние от приёмника излучения (ПИ) до щели составляло 150 см и от щели до лампы – 10 см. Размеры выбирались исходя из того, что на поверхности ПИ должна обеспечиваться достаточная для точных измерений облучённость,

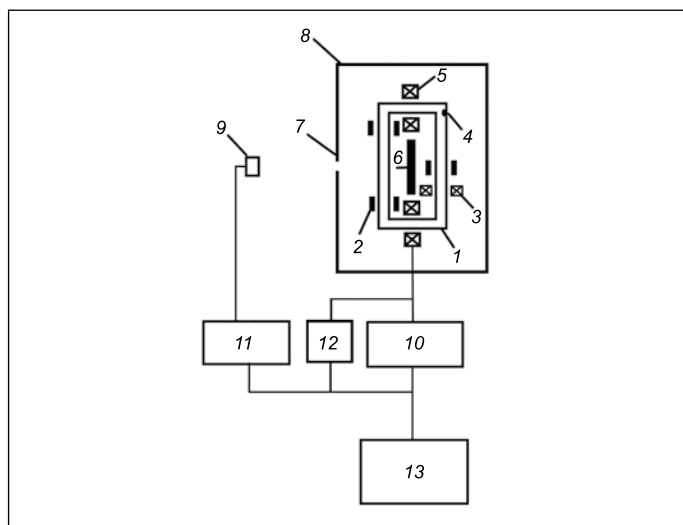


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – разрядная трубка, 2 – держатель, 3 – трансформатор тока, 4 – амальгама, 5 – индуктор, 6 – экран, 7 – щель, 8 – короб, 9 – приёмник излучения, 10 – ЭПРА, 11 – радиометр, 12 – цифровой осциллограф, 13 – ПК

<sup>1</sup> E-mail: blitzzz-z@ya.ru

а выделяемый щелью участок лампы можно считать точечным источником.

Формула для расчёта полного потока излучения лампы в линии 254 нм  $\Phi_{e,254}$  имеет вид [3]

$$\Phi_{e,254} = \frac{\pi^2 \cdot h \cdot d \cdot i \cdot L}{\Delta \cdot S},$$

где  $L$  – длина лампы;  $h$  – расстояние от лампы до датчика;  $i$  – фототок ПИ;  $S$  – интегральная чувствительность датчика;  $d$  – расстояние от щели до ПИ;  $\Delta$  – ширина щели.

Измерение разрядного тока  $I_{nl}$  осуществлялось с помощью трансформатора тока. Для измерения ВЧ напряжения на плазменном витке  $U_{nl}$  использовался виток провода, размещённый по внешнему периметру замкнутой разрядной трубки.

### 3. Результаты экспериментальных исследований

#### 3.1. Напряжённость ВЧ электрического поля плазмы

На рис. 2 приведена зависимость напряжённости ВЧ электрического поля в плазменном витке  $E$  от давления аргона и давления смеси 30%Ne+70%Ar. Расчёт  $E$  проводился по формуле

$$E = U_{nl} / \Delta_{nl},$$

где  $\Delta_{nl} = 81,5$  см – длина плазменного витка.

С повышением  $p_{u,z}$   $E$  вначале растёт, а затем падает, обнаруживая максимум при  $p_{u,z} = 0,2-0,3$  Торр. Такая зависимость  $E$  от  $p_{u,z}$  характерна для низкотемпературной плазмы НД в инертных газах и парах ртути и соответствует известному соотношению, связывающему  $E$  с температурой электронов  $T_e$ ,  $p_{u,z}$  и долей энергии, теряемой средним электроном между двумя соударениями (упругими и неупругими)  $\chi$  [6]:

$$E = 1,5 \cdot T_e \cdot \chi^{1/2} / \lambda_e,$$

где  $\lambda_e$  – средняя длина пробега электрона.

С одной стороны, повышение  $p_{u,z}$  уменьшает  $\lambda_e$ , что повышает  $E$ , а, с другой, рост  $p_{u,z}$  ведёт к снижению  $T_e$  и, следовательно,  $E$ . И на всё это накладывается сложная зависимость  $\chi$  от  $p_{u,z}$ . В результате зависимость  $E$  от  $p_{u,z}$  имеет максимум, положение которого с увеличением атомного веса инертного газа сдвигается в сторону низких  $p_{u,z}$ , и это увеличение снижает  $E$  (рис. 2). Так, в ЛТТ со смесью паров ртути с криптоном при  $p_{u,z}$  1,0 и 0,5 Торр  $E$ , соответственно, равнялась 0,48 и 0,55 В/см.

Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными для трубчатых ламп с такими же конструктивными параметрами, но с внутренними электродами и работающими на частоте 50 Гц [7].

#### 3.2. Ток плазменного витка

Разрядный ток лампы (ток плазменного витка)  $I_{nl}$  измерялся с помощью трансформатора тока, а также рассчитывался с помощью аналитических соотношений, полу-

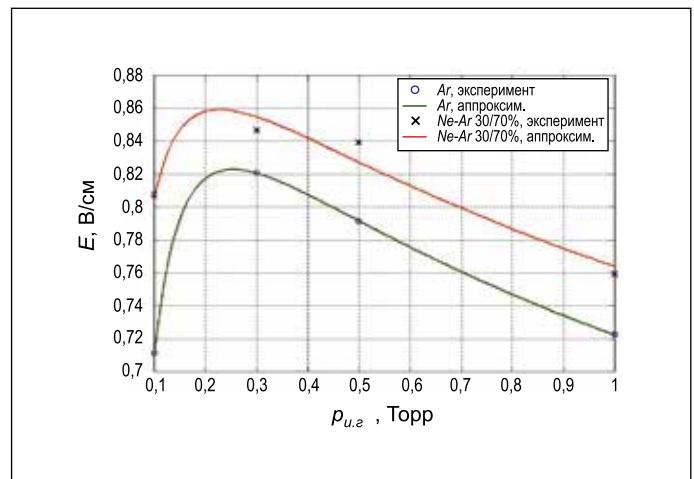


Рис. 2. Зависимость напряжённости ВЧ электрического поля плазмы  $E$  от давления инертного газа  $p_{u,z}$  при частоте разрядного тока  $f = 265$  кГц и поглощаемой плазмой мощности  $P_{nl} = 180$  Вт

ченных в рамках трансформаторной модели индукционного разряда, как [4, 5]

$$I_{nl} = \frac{P_l - P_{инд}}{U_{nl} \cos \varphi}, \quad (1)$$

$$U_{nl} = n U_{инд} / N, \quad (2)$$

где  $n$  – число параллельно включённых индукторов,  $U_{инд}$  – ВЧ напряжение на индукторе,  $N = 16$  – число витков катушки в индукторе,  $P_l$  – потребляемая лампой мощность,  $P_{инд}$  – измеренные в работе потери мощности в индукторе,  $\varphi$  – сдвиг фаз между  $U_{nl}$  и  $I_{nl}$ :

$$\cos \varphi = \frac{R_{nl}}{Z_{nl}}, \quad (3)$$

где  $R_{nl}$  и  $Z_{nl}$  – активное и полное сопротивление плазмы соответственно:

$$Z_{nl} = \sqrt{R_{nl}^2 + (\omega L_{nl})^2}, \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота тока,  $L_{nl}$  – индуктивность плазменного витка.

При этом  $Z_{nl}$  можно находить по измеренным  $U_{nl}$  и  $P_{nl}$ :

$$Z_{nl} = \frac{U_{nl}^2}{P_{nl}} = \frac{U_{nl}^2}{P_l - P_{инд}}. \quad (5)$$

$L_{nl}$  можно находить, зная взаимную индуктивность ВЧ индуктора и плазменного витка  $M$ :

$$M = k \sqrt{L_{инд} L_{nl}}, \quad (6)$$

где  $k \approx 1$  – коэффициент связи индуктора с плазменным витком,  $L_{инд} = 500 \cdot 10^{-6}$  Гн – индуктивность индуктора, а  $M$  определяется по формуле [4]

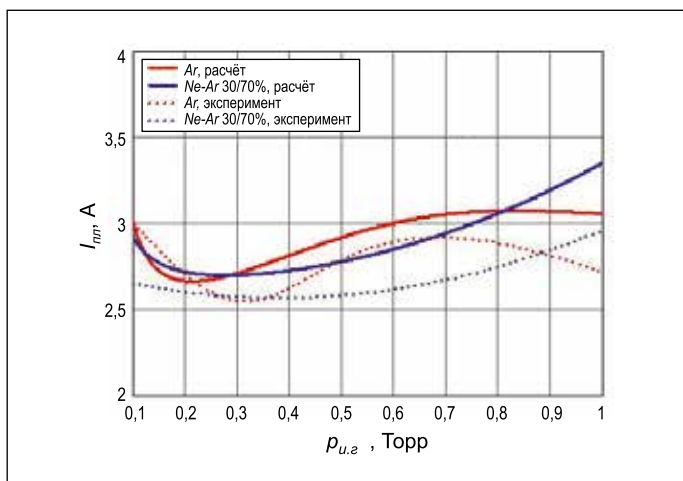


Рис. 3. Зависимости разрядного тока  $I_{nl}$  от давления инертного газа  $p_{u,z}$ . Параметры лампы – согласно рис. 2

$$M = \frac{U_{nl}}{I_{инд}\omega}, \quad (7)$$

где  $I_{инд}$  – ток в индукторе.

Из (6) и (7) следует

$$L_{nl} = \frac{U_{nl}^2}{(I_{инд}\omega)^2 L_{инд}}, \quad (8)$$

а из (1)–(8) – расчётная формула для  $I_{nl}$ , где все параметры лампы в правой части определяются экспериментально:

$$I_{nl} = \frac{1}{\frac{nU_{инд}}{N} \sqrt{\left(\frac{1}{P_l - P_{инд}}\right)^2 + \left(\frac{1}{I_{инд}^2 \omega L_{инд}}\right)^2}} \quad (9)$$

На рис. 3 приведены результаты измерений и расчёта по выражению (9) зависимостей  $I_{nl}$  от давления  $p_{u,z}$  для двух буферных газов: аргона и смеси 30%Ne + 70%Ar. Из рис. 2 и 3 видно, что зависимости  $I_{nl}$  от  $p_{u,z}$  коррелируют с соответствующими зависимостями  $E$  от  $p_{u,z}$  и имеют минимумы при тех  $p_{u,z}$ , на которые приходится максимум зависимости  $E$  от  $p_{u,z}$ . Рассчитанные по выражению (9) зависимости  $I_{nl}$  от  $p_{u,z}$  находятся в хорошем согласии с экспериментальными зависимостями, полученными в настоящей работе: разница между измеренными и расчётными значениями  $I_{nl}$  не превышает 15%.

### 3.3. Энергетический КПД разрядной части лампы в линии 254 нм

На рис. 4. представлены экспериментальные зависимости  $\eta_{e,254}$  ( $=\Phi_{e,254} / P_{nl}$ ) от  $p_{u,z}$  аргона, криптона и смеси аргона с неоном. Видно, что максимум  $\eta_{e,254}$  приходится на  $p_{u,z}$  0,3 Торр, при котором  $E$  имеет максимум. Отметим, что в области более высоких  $p_{u,z}$   $\eta_{e,254}$  оказывается выше при более «лёгком» наполнении. Однако при более низких  $p_{u,z}$  разница в  $\eta_{e,254}$  между чистым аргоном и смесью 30% Ne + 70% Ar практически не ощутима. К сожалению, из-

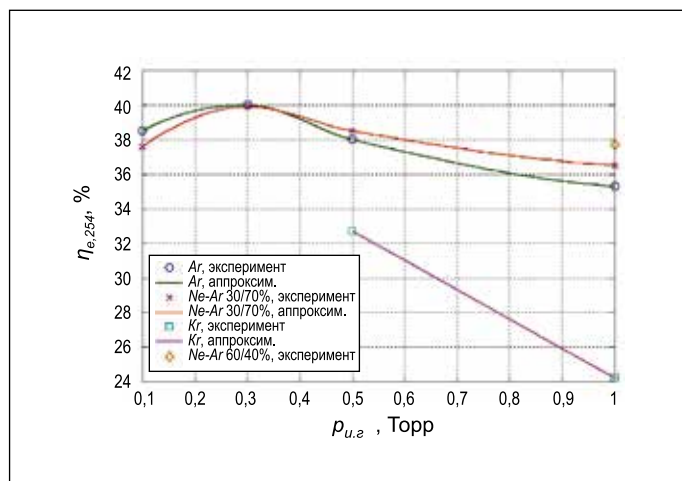


Рис. 4. Зависимость энергетического КПД разрядной части лампы в линии 254 нм  $\eta_{e,254}$  от давления инертного газа  $p_{u,z}$ . Параметры лампы – согласно рис. 2

лучательные и электрические характеристики индукционного разряда с более лёгким наполнением 60% Ne + 40% Ar были получены лишь при  $p_{u,z}$  в 1 Торр. При более низких  $p_{u,z}$  индукционный разряд не зажигался из-за чрезмерно высоких напряжённостей электрического поля, требуемых для зажигания разряда, что характерно для «лёгких» газов с высоким потенциалом ионизации [6].

Из рис. 4 следует, что при низких  $p_{u,z}$ , 0,2–0,3 Торр,  $\eta_{e,254}$  при  $\Delta_{nl} = 815$  мм достигает 40%. Как было показано в [4], увеличение  $\Delta_{nl}$  ведёт к повышению  $\eta_{e,254}$  из-за снижения плотности плазмы и частоты тушащих соударений резонансно-возбуждённых атомов ртути с электронами плазмы.

### Выводы

- $\eta_{e,254}$  ртутных ЛТТ НД с инертным газом (или со смесью инертных газов) при давлении 0,1–0,5 Торр и рабочем токе 2,5–3,0 А достигает высоких значений: до 40%.
- $\eta_{e,254}$  и  $E$  у этих ламп немонотонно зависят от  $p_{u,z}$  с максимумом при  $p_{u,z} \approx 0,3$  Торр.
- Рассчитанная по трансформаторной модели индукционного разряда зависимость  $I_{nl}$  от  $p_{u,z}$  хорошо согласуется с соответствующей экспериментальной зависимостью.
- Результаты расчётов  $E$  хорошо согласуются с экспериментальными значениями этой величины, полученными другими авторами для положительного столба ламп-аналогов с внутренними электродами, но с такими же прочими конструктивными параметрами и при тех же разрядных токах.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультрафиолетовая технология в современном мире: Коллективная монография / Под ред. Ф.В. Карамзинова, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцева, С.В. Храменкова. – Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2012. – 391 с.
2. Исупов М. В., Кротов С. В., Литвинцев А. Ю., Уланов И. М. Индукционная ультрафиолетовая лампа // Светотехника. – 2007. – № 5. – С. 37–40.
3. Левченко В. А., Попов О. А., Свитнев С. А., Старшинов П. В. Экспериментальные исследования электрических и оп-

тических характеристик безэлектродной УФ лампы трансформаторного типа // Светотехника. – 2014. – № 6. – С. 39–43.

4. *Попов О. А.* Исследование и разработка индукционных люминесцентных источников света на частотах 100–15000 кГц / Автореф. дис... д-ра. техн. наук. – М.: Б.и., 2011. – 41 с.

5. *Исупов М. В., Федосеев А. В., Сухинин Г. И., Уланов И. М.* Экспериментальное и теоретическое исследование низкочастотного индукционного разряда трансформаторного типа // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21, № 5. – С. 681–692.

6. *Рохлин Г. Н.* Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат. 1991. – 720 с.

7. *Весельницкий И. М.* Определение оптимальных параметров и некоторые вопросы конструирования люминесцентных ламп повышенной мощности / Автореф. дис. ... к-та. техн. наук. – М.: Б.и., 1966. – 20 с.



**Левченко Владимир Александрович,**  
физик. Окончил МФТИ. Аспирант ФГБОУ ВПО «МФИГУ»



**Попов Олег Алексеевич,** доктор техн. наук. Окончил в 1965 г. МЭИ. Профессор кафедры «Светотехника» ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»



**Свиннев Сергей Александрович,** кандидат техн. наук. Окончил в 2009 г. МЭИ (ТУ). Ведущий инженер ЗАО ПК «ЛИТ»



**Старшинов Павел Валерьевич,** магистр технических наук. Окончил в 2015 г. кафедру «Светотехника» ФГОУ ВПО «НИУ «МЭИ». Аспирант этой кафедры

## Архитектурное освещение – в дар



Светотехнический холдинг *BL GROUP* сдал очередной проект, выполненный полностью на оборудовании *GALAD* и *OPORA ENGINEERING*: архитектурно-художественное освещение храма – в дар славным жителям города-героя Тула.

Для реализации проекта были использованы светильники и прожекторы *GALAD* серий ГО17–70–01, ИО-500 и ЖО07 и кронштейны *OPORA ENGINEERING*.

www.galad.ru  
18.01.2016

## BL GROUP: о диверсификации бизнеса в Азии



1 февраля этого года в городе Колката (б. Калькутта), Индия, представители компании *BL Trade India Private Limited* подписали рамочное соглашение с государственной компанией *BRIDGE & ROOF COMPANY (INDIA) LIMITED*, многопрофильным холдингом, осуществляющим широкий спектр строительного-монтажных работ на всей территории Индии и за рубежом. (Холдинг *B&R* имеет большой опыт и компетенции в сфере гражданского строительства и строительства железных дорог и в настоящий момент находится в процессе расширения бизнеса и регионов своего присутствия.) В целях решения этой масштабной задачи *B&R* и планирует привлечь компанию *BL Trade India*, представляющую на индийском рынке крупнейший в России и странах СНГ светотехнический холдинг *BL Group*, для совместной реализации проектов в сфере городского благоустройства и модернизации всех видов освещения, включая наружное и внутреннее (промышленное, офисное и жилищно-бытовое). Предполагается также совместное участие в тендерах на строительство и модернизацию объектов освещения в Индии и за рубежом.

В истории *B&R* это первое подобное соглашение, подписанное с коммерческой организацией, имеющей в уставном капитале долю иностранного участия.

www.bl-g.ru  
02.02.16