

Индукционная УФ лампа на основе ртутного разряда НД в замкнутой бесферритной трубке

П.В. СТАРШИНОВ¹, О.А. ПОПОВ¹, И.В. ИРХИН², В.А. ЛЕВЧЕНКО³,
В.Н. ВАСИНА¹

¹ ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ», ² ФГУП «ВЭИ», ³ НПО «ЛИТ», Москва
E-mail: popovoleg445@yahoo.com

Аннотация

Проведено экспериментальное исследование характеристик бесферритной индукционной УФ лампы длиной 500 мм и шириной 130 мм, образованной замкнутой разрядной кварцевой трубкой с внутренним диаметром 25 мм. Индукционный разряд возбуждался на частоте 1,7 МГц в интервале мощности разрядной плазмы P_{pl} 52–112 Вт в смеси паров ртути ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.) и аргона (1,0 мм рт. ст.) с помощью 3-витковой катушки индуктивности, размещённой по «внутреннему» периметру замкнутой трубки. С ростом P_{pl} : а) мощность потерь в проводе катушки вначале снижалась от 37 до 22 Вт ($P_{pl} = 84$ Вт), а затем росла до 44 Вт; 2) поток УФ излучения лампы в ртутной линии 254 нм монотонно рос от 28 до 72 Вт; 3) энергетический КПД лампы в линии 254 нм вначале возрастал от 31 до 48,5 % ($P_{pl} = 84$ Вт), а затем немного спадал – до 46 %; 4) энергетический КПД разрядной плазмы в линии 254 нм монотонно рос от 53 до 65 %.

Ключевые слова: УФ излучение, индукционный разряд, замкнутая трубка, ртутная лампа, разрядная плазма НД, катушка индуктивности.

Введение

Индукционные ртутные лампы НД – перспективные источники УФ излучения [1–4]. Благодаря отсутствию внутренних электродов они могут работать при относительно низких давлениях инертного газа (0,05–0,5 мм рт. ст.), обеспечивающих максимум энергетического КПД разрядной плазмы (η_{pl}) в резонансных линиях ртути 185 и 254 нм [3, 4]. Это открывает возможность создания в широком интервале мощностей эффективных источников УФ резонансного излучения, используемого для очистки воды, воздуха и др.

Особый интерес представляют бесферритные индукционные лампы, в которых ВЧ ртутная плазма возбуждается в замкнутых трубках с помощью катушки индуктивности, размещённой по периметру трубки, внешнему или внутреннему [5]. Такая конструкция позволяет обходиться без кольцевых ферромагнитных магнитопроводов, снижающих надёжность работы лампы и повышающих её себестоимость. Известны исследования характеристик бесферритных индукционных люминесцентных осветительных ламп со стеклянными замкнутыми разрядными трубками относительно большого диаметра, 35–70 мм, [5–7]. Однако авторы не нашли публикаций по бесферритным индукционным ртутным лампам НД с замкнутыми кварцевыми трубками как источникам УФ излучения.

Рис. 1. Схематический эскиз бесферритной индукционной лампы с замкнутой разрядной трубкой: 1 – разрядная трубка; 2 – катушка индуктивности; 3 – амальгама; ВЧ – высокочастотное напряжение

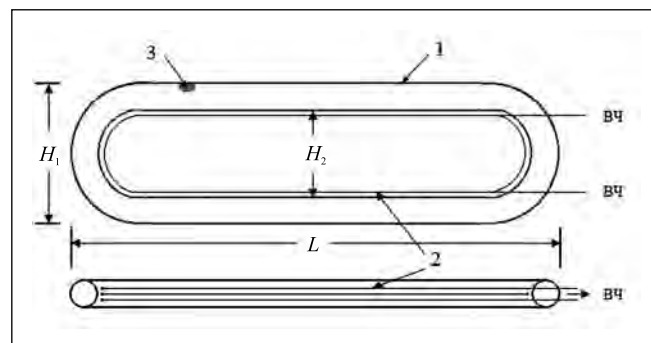
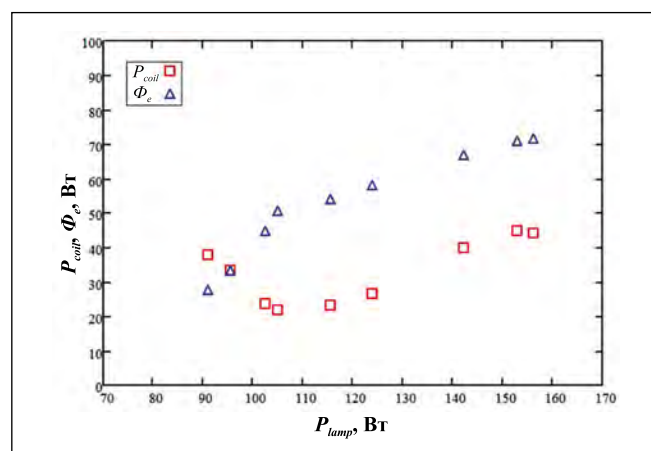


Рис. 2. Экспериментальные зависимости мощности потерь в проводе катушки P_{coil} и потока излучения лампы в линии 254 нм Φ_e от мощности лампы P_{lamp}



Ниже приводятся результаты собственных экспериментальных исследований характеристик УФ бесферритной индукционной ртутной лампы с замкнутой кварцевой разрядной трубкой (колбой) внутреннего диаметра 25 мм, в которой плазма возбуждается катушкой индуктивности, размещённой по «внутреннему» периметру лампы.

Экспериментальная установка и методики измерений

Индукционный разряд зажигался на частоте f 1,7 МГц в замкнутой кварцевой трубке со стенками толщиной 1,5 мм и с внутренним диаметром 25 мм. Лампа имела форму вытянутого кольца длиной L 500 мм и шириной H_1 130 мм с расстоянием между длинными параллельными участками разрядной трубки H_2 75 мм и длиной замкнутой осевой линии L_{pl} 1060 мм (рис 1). ВЧ индуктор состоял из 3-витковой катушки индуктивности из медного провода диаметром 2,5 мм с удельным погонным сопротивлением $8 \cdot 10^{-4}$ Ом/см, размещённой по «внутреннему» периметру лампы. Давление паров ртути в разрядной трубке поддерживалось оптимальным (по максимуму потока излучения лампы в линии 254 нм Φ_e) температурой

ртутно-индиевой амальгамы, размещённой на стенке трубки. Давление буферного газа Ar – 1,0 мм рт. ст.

Измерения Φ_e проводились с помощью радиометра IL1700 и фотометрической головки SED240/W с косинусной угловой характеристикой [2]. Измерения проводились при мощности комплекта P_k , равной 102–165 Вт и суммирующей: а) мощность потерь в ВЧ генераторе P_g ; б) мощность лампы P_{lamp} , включающую в себя мощность потерь в проводе катушки индуктивности P_{coil} и мощность плазмы индукционного разряда P_{pl} ¹. Лампа размещалась в чёрном заземлённом металлическом коробе с чёрным экраном в плоскости, перпендикулярной «плоскости» лампы. В коробе имелась щель шириной Δ 30 мм в «плоскости» лампы. Расстояние от приёмника излучения (ПИ) до щели $d = 150$ см, а расстояние от щели до лампы $\ell = 10$ см, что позволяло «вырезаемый» щелью участок лампы считать точечным источником [3]. Φ_e рассчитывался согласно [2, 3]:

$$\Phi_e = \pi^2 \cdot h \cdot d \cdot i \cdot L / (\Delta \cdot S), \quad (1)$$

где $h = \ell + d$ – расстояние от лампы до ПИ, i – фототок ПИ, S – интегральная чувствительность ПИ.

Значение КПД генератора мощности η_g , определяемого как $\eta_g = 1 - (P_g/P_k)$, при работе на частоте f 1,7 МГц равнялось 0,9, а значение P_{coil} находилось методом замещения в отсутствие в лампе разряда [5, 8].

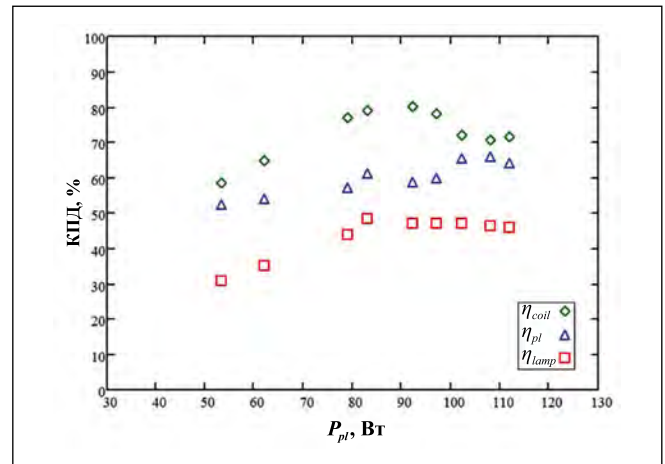
Результаты измерений и их обсуждение

Как видно из экспериментальных зависимостей P_{coil} и Φ_e от P_{lamp} (рис. 2), с ростом P_{lamp} : а) P_{coil} уменьшается от 39 Вт ($P_{lamp} = 92$ Вт) до своего минимума в 22 Вт ($P_{lamp, min} = 105$ Вт), а затем возрастает до 44 Вт ($P_{lamp} = 156$ Вт); б) Φ_e «быстро» растёт от 28 Вт ($P_{lamp} = 92$ Вт, $P_{pl} = 53$ Вт) до 45 Вт ($P_{lamp, min} = 105$ Вт, $P_{pl, min} = 84$ Вт), а затем «медленно» – до 72 Вт ($P_{lamp} = 156$ Вт). При этом обе зависимости хорошо коррелируют друг с другом.

Как видно из трёх других экспериментальных зависимостей (рис. 3),

¹ При $f < 10$ МГц мощностью электромагнитного излучения, рассеиваемой катушкой, можно пренебречь.

Рис. 3. Зависимости КПД катушки индуктивности η_{coil} и энергетических КПД лампы (η_{lamp}) и разрядной плазмы (η_{pl}) в линии 254 нм от мощности плазмы P_{pl} .



с ростом P_{pl} : а) энергетический КПД лампы в линии 254 нм η_{lamp} ($\eta_{lamp} = \Phi_e/P_{lamp}$) возрастает от 32 % ($P_{pl} = 53$ Вт) до 46 % ($P_{pl} = 84$ Вт), а затем незначительно снижается – до 44 % ($P_{pl} = 112$ Вт); б) η_{pl} ($\eta_{pl} \approx \Phi_e/P_{pl}$)² практически линейно возрастает от 52 до 66 %; в) КПД катушки индуктивности η_{coil} ($\eta_{coil} = 1 - P_{coil}/P_{lamp}$) возрастает от 59 % ($P_{pl} = 53$ Вт) до 81 % ($P_{pl} = 84$ Вт) и затем спадает до 71 % ($P_{pl} = 112$ Вт). Попутно отметим, что $\eta_{lamp} = \eta_{coil} \cdot \eta_{pl}$.

Рост P_{coil} с ростом P_{pl} и сопровождающий его спад η_{coil} и η_{lamp} видимо, связаны со скин-эффектом в ВЧ индукционном разряде (достаточно высокой плотности) на частотах в сотни кГц и выше [9]. Скин-эффект характеризуется «выталкиванием» ВЧ электрического поля из области плотной плазмы (вблизи оси трубки) и «прижиманием» его к стенкам разрядной трубки, где расположен провод катушки и максимальна напряжённость ВЧ электрического поля [10]. В результате повышается средняя по сечению разрядной трубки напряжённость ВЧ электрического поля \vec{E}_{pl} , растёт ВЧ напряжение на плазменном витке U_{pl} ($U_{pl} = \vec{E}_{pl} \cdot A_{pl}$) и, в соответствии с трансформаторной моделью индукционного разряда, возрастают ВЧ напряжение и ток катушки индуктивности I_{coil} ; а, следовательно, и P_{coil} ($P_{coil} = (I_{coil})^2 \cdot R_w$), где R_w – сопротивление катушки.

Однако на генерацию УФ излучения скин-эффект заметен не влияет, о чём свидетельствует практическая линейность зависимости $\eta_{pl}(P_{pl})$ во всём исследованном интервале P_{pl} (52–112 Вт).

² Измеряемый Φ_e меньше излучаемого плазмой, отсюда и приближительность этого равенства. – Прим. ред.

Стоит отметить, что при определении η_{lamp} не учитывалась экранировка УФ излучения витками катушки индуктивности, покрывающими 3–5 % площади поверхности разрядной трубки. В результате часть УФ излучения поглощается в катушке, и потому реальный поток УФ излучения лампы ниже измерявшегося потока Φ_e , согласно выражению (1). Соответственно этому, уточнённый $\eta_{lamp} = \eta_{coil} \cdot \eta_w \cdot \eta_{pl}$, где $\eta_w \approx 1 - (d_w/(\pi d_{tr}))$ – коэффициент экранировки разрядной трубки катушкой индуктивности, d_w – диаметр провода катушки, d_{tr} – внешний диаметр разрядной трубки.

Заключение

– Получены высокие значения η_{pl} , 60–65 %, индукционной бесферритной лампы с замкнутой разрядной трубкой диаметром 25 мм, работающей на частоте 1,7 МГц при удельных мощностях плазмы (УМП) 0,8–1,0 Вт/см. Они превышают таковые индукционных бесферритных линейных УФ ламп, работающих на частотах 1–4 МГц при УМП порядка 1 Вт/см [4], и УФ ламп трансформаторного типа, работающих при УМП 1 Вт/см на частоте 265 кГц [2, 3].

– При этом P_{coil} относительно велика, 20–50 Вт, а η_{coil} относительно невысок, 70–80 %. Однако благодаря высоким значениям η_{pl} значения η_{lamp} при УМП 0,8–1,0 В/см составляют 45–46 %, что выше, чем у бесферритных линейных индукционных УФ ламп [4, 11] и трубчатых электродных УФ ламп, работающих на частотах в 20–80 кГц (низких) [12].

– Повышения η_{pl} можно добиться, снизив давление инертного газа (Ar) до 0,2–0,3 мм рт. ст. При таких давлениях наблюдалась максимальная эф-

фактивность генерации УФ излучения ртутной плазмой в лампе трансформаторного типа с замкнутой разрядной трубкой с внутренним диаметром 16,6 мм [3].

– Повышения η_{lamp} можно добиться, повысив η_{coil} снижением P_{coil} . Для этого можно: а) использовать для изготовления катушки индуктивности провод с малым удельным погонным сопротивлением, $< 3 \cdot 10^{-4}$ Ом/см, (литцендрат) [5, 6]; б) уменьшить I_{coil} увеличением числа витков в ней до 5–6 [13]; в) повысить f до 6–9 МГц [13].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исупов М.В., Кротов С.В., Литвинцев А.Ю., Уланов И.М. Индукционная ультрафиолетовая лампа // Светотехника.– 2007.– № 5. – С. 37–40.
2. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Экспериментальные исследования электрических и оптических характеристик безэлектродной УФ лампы трансформаторного типа // Светотехника.– 2014.– № 6. – С. 39–43.
3. Левченко В.А., Попов О.А., Свитнев С.А., Старшинов П.В. Электрические и излучательные характеристики лампы трансформаторного типа с разрядной трубкой диаметром 16,6 мм // Светотехника.– 2016.– № 1. – С. 41–44.
4. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Часть 2. Излучательные характеристики плазмы // Успехи прикладной физики.– 2016.– № 4. – С. 372–384.
5. Popov O.A., Chandler R.T. Ferrite-free High Power Electrodeless Fluorescent Lamp Operated at a Frequency of 160–1000 kHz // Plasma Sources Science and Technology.– 2002. – Vol. 11. – P. 218–227.
6. Попов О.А., Никифорова В.А. Индукционный бесферритный источник света мощностью 300–400 Вт на частоте 200–400 кГц // Вестник МЭИ.– 2010.– № 2. – С. 159–164.
7. Попов О.А., Старшинов П.В., Васина В.Н. Безэлектродная бесферритная индукционная люминесцентная ртутная лампа с замкнутой разрядной трубкой // Светотехника.– 2018.– № 2. – С. 75–77.
8. Piejak R.B., Godyak V.A., Alexandrovich B.M. A Simple Analyses of an Inductive RF Dis-charge // Plasma Sources Sci. Technol.– 1992.– № 1. – P. 179–185.
9. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 591 с.
10. Никифорова В.А., Попов О.А. Пространственное распределение параметров плазмы в бесферритном разряде замкнутого типа // Вестник МЭИ.– 2010.– № 5. – С. 114–119.

11. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А. Характеристики высокочастотной 13,56 МГц бесферритной индукционной ультрафиолетовой лампы // Прикладная физика.– 2015.– № 6. – С. 92–96.

12. Ультрафиолетовые технологии в современном мире: Коллективная монография / Под ред. Ф.В. Кармазинова, С.В. Костюченко, Н.Н. Кудрявцева, С.В. Храменкова. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2012.– 391 с.

13. Свитнев С.А., Попов О.А., Левченко В.А., Старшинов П.В. Характеристики бесферритного индукционного разряда низкого давления. Часть 1. Электрические характеристики ВЧ индуктора // Успехи прикладной физики.– 2016.– № 2. – С. 139–149.



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



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



Ирхин Игорь Вячеславович, кандидат техн. наук. Ведущий инженер ФГУП «ВЭИ»



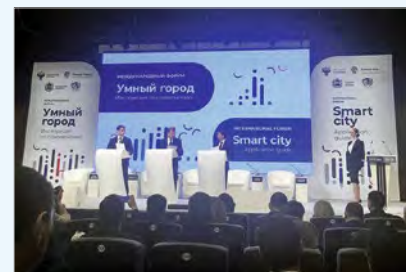
Левченко Владимир Александрович, кандидат физ.-мат. наук. Окончил МФТИ. Зам. заведующего лабораторией НПО «ЛИТ»



Васина Виктория Николаевна, студент кафедры «Светотехника» НИУ «МЭИ»

Международный форум «умных городов» в Калуге

15 марта в Калуге при поддержке Минстроя России и ООН-Хабитат завершил свою работу двухдневный Международный форум, который собрал порядка 400 участников – ведущих российских и международных экспертов в сфере цифровизации, представителей федеральных и региональных органов власти, IT-разработчиков и мэров пилотных городов проекта «Умный город». Исполнительный директор Национального центра государственно-частного партнёрства Максим Ткаченко в своём выступлении затронул вопросы взаимодействия государства и бизнеса при реализации проектов «Умных городов». Основанием для доклада, как мы поняли, стало совместное исследование АНО «Национального Центра ГЧП», Ассоциации «ЖКХ и городская среда» и LECAP при поддержке Минстроя России, целью которого стало обобщение удачных практик применения механизмов ГЧП для создания инфраструктуры «умных городов» по состоянию на ноябрь 2018 года.



М. Ткаченко предложил на рассмотрение аудитории несколько кейсов, демонстрирующих наиболее успешные механизмы реализации ГЧП, в числе которых по итогам 2018 года отметил реконструкцию и эксплуатацию систем наружного освещения в городе Волгограде.

Напомним, что Концессионное соглашение (115-ФЗ) между Администрацией Волгограда и частным партнёром ООО «Светосервис-Волгоград», входящим в состав Международной светотехнической корпорации «БЛ ГРУПП», заключено в начале 2018 года сроком на 15 лет. В рамках соглашения проводятся работы по реконструкции, капитальному ремонту и строительству новых объектов наружного освещения города.

www.bl-g.ru