

УДК 537.533

Характеристики высокочастотной 13,56 МГц бесферритной индукционной ультрафиолетовой лампы

С. А. Свитнев, О. А. Попов, В. А. Левченко

Индукционный разряд возбужден на частоте 13,56 МГц в смеси Hg (0,01 Торр) + Ar (0,1—0,7 Торр) в кварцевой трубке диаметром 38 мм и длиной 400 мм с помощью индуктивной катушки, охватывающей трубку по ее продольному периметру. Обнаружено, что максимум КПД УФ-излучения максимален, а мощность потерь в проводе катушки — минимальна при одной и той же мощности лампы, которая с уменьшением давления аргона сдвигается в сторону больших значений. Результаты расчета КПД УФ-излучения лампы находятся в хорошем согласии с экспериментом.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Ключевые слова: ультрафиолетовое излучение, индукционный разряд, ртутная плазма низкого давления, мощность потерь.

Введение

Газоразрядные безэлектродные лампы, использующие плазму индукционного разряда низкого давления в смеси паров ртути и инертного газа, являются весьма перспективными источниками оптического и, в частности, ультрафиолетового (УФ) излучения [1—6]. Их отличает большой срок службы (до 100000 часов), низкие давления инертных газов (0,05—0,5 Торр), при которых достигается максимальный КПД генерации излучения на длинах волн 184,9 и 253,7 нм, а также возможность работать на высоких мощностях 150—500 Вт. Особый интерес представляют индукционные бесферритные ртутные лампы, в которых разряд возбуждается индуктивной катушкой, охватывающей разрядную трубку по ее продольному периметру [5, 6]. Они отличаются простотой конструкции и могут использоваться в установках для обеззараживания воды и воздуха, заменяя короткоживущие газоразрядные УФ-лампы с внутренними электродами. К сожалению, немногочисленные исследования ламп такого типа проводились с трубками диаметром 50—80 мм, в то время как в современных установках по обеззара-

живанию воды используются газоразрядные лампы с трубками диаметром $D = 20—40$ мм [7].

Целью данной работы являлось экспериментальное и теоретическое исследование характеристик и эффективности высокочастотной (ВЧ) бесферритной индукционной УФ-лампы с диаметром менее 40 мм.

Экспериментальная установка и методики измерений

Цилиндрические разрядные трубки диаметром $D = 38$ мм и длиной $H = 400$ мм изготовлялись из кварцевого стекла и наполнялись смесью аргона (0,1—1,0 Торр) и паров ртути ($\sim 10^{-2}$ Торр). Индукционный разряд возбуждался двухвитковой катушкой, изготовленной из медного посеребренного провода диаметром $D_w = 1,6$ мм в лавсановой изоляции. Катушка охватывала трубку по ее продольному периметру.

Схема экспериментальной установки для возбуждения индукционного разряда и измерения электрических и излучательных характеристик лампы приведена на рис. 1. Лампа помещалась в заземленный металлический ящик размерами $2 \times 0,7 \times 0,7$ м с черными стенками. ВЧ-напряжение подавалось на ВЧ-индуктор от генератора ВЧ-мощности частотой 13,56 МГц через согласующее устройство, состоящее из переменных воздушных конденсаторов $C_1 = 5—500$ пФ и $C_2 = 5—500$ пФ. Потребляемая лампой мощность P в основном складывалась из мощности, поглощаемой плазмой индукционного разряда P_{pl} , и мощности потерь в проводе индуктивной катушки P_{ind} . (Потери мощности в компонентах согласующего устройства не превышали 0,5 Вт). ВЧ-напряжение на катушке индуктора U_{ind} измерялось с помощью цифрового широкополосного осциллографа и высоковольтного щупа.

Свитнев Сергей Александрович, ведущий инженер¹.

Попов Олег Алексеевич, профессор².

Левченко Владимир Александрович, инженер¹.

¹НПО «ЛИТ».

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

E-mail: svitnevs@yandex.ru

²Московский энергетический институт.

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

E-mail: olegpopov734@yahoo.com

Статья поступила в редакцию 29 октября 2015 г.

© Свитнев С. А., Попов О. А., Левченко В. А., 2015

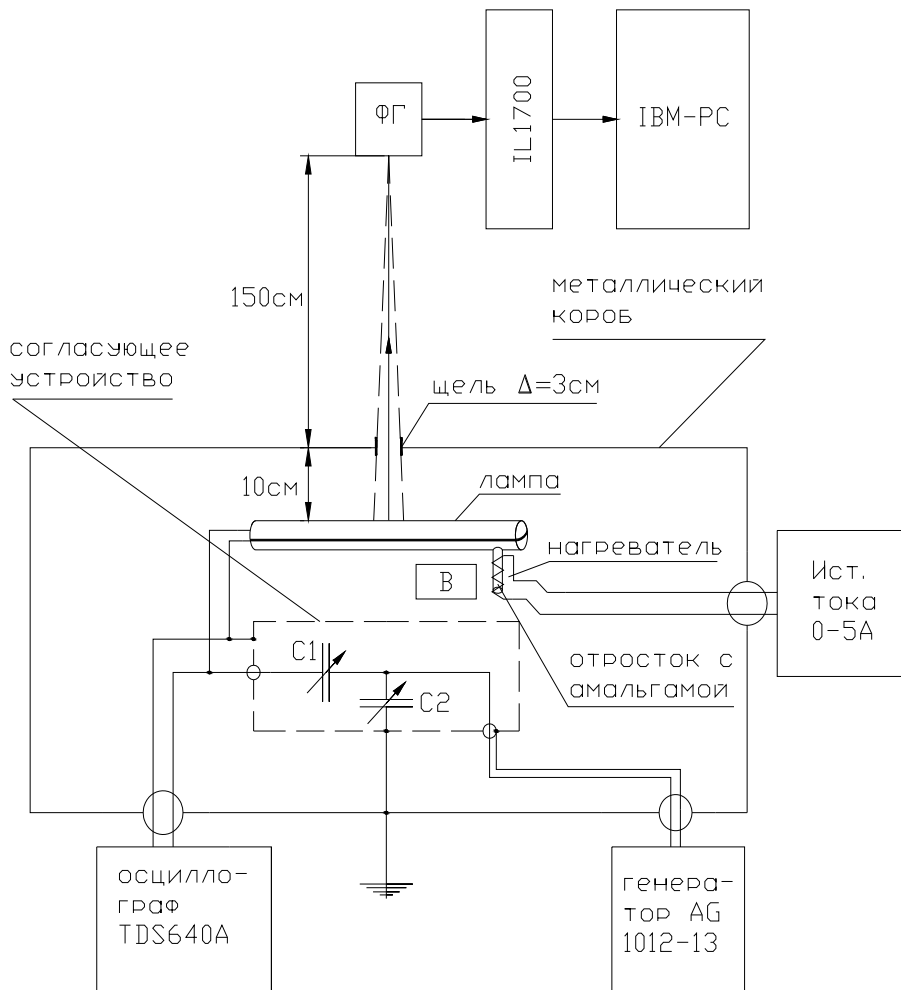


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Измерения мощности потока УФ-излучения на длине волны 253,7 нм проводились при оптимальном давлении (т. е. при максимальном выходе УФ-излучения) паров ртути. Это давление определялось температурой расположенной в штенгеле ртутно-индиевой амальгамы (4 % ртути), которая регулировалась нагревательным элементом и потоком воздуха охлаждающего вентилятора. Давление аргона в лампе варьировалось от 0,1 до 0,7 Торр.

Радиометр IL1700 подключался к персональному компьютеру, на экран которого выводился в режиме on-line график зависимости мощности УФ-излучения от мощности лампы. Продольное распределение интенсивности УФ-излучения лампы ($p_{Ar} = 0,1$ Торр, $P = 200$ Вт), измеренное с использованием дополнительной щели шириной 5 мм, показало, что излучение распределено вдоль оси лампы весьма равномерно. Расчет полного потока УФ-излучения лампы F_{254} проводился с учетом его продольной однородности и допущения косинусного распределения интенсивности УФ-излучения (т. н. ламбертовский излучатель) и равномерного распределения интенсивности УФ-излучения в плоскости, перпендикулярной оси лампы. Погрешность оптических измерений составляла +/- 5 %.

Мощность потерь в проводе индуктивной катушки

На рис. 2 приведены экспериментальные зависимости ВЧ-напряжения на катушке ВЧ-индуктора лампы U_{ind} от мощности лампы $P = P_{pl} + P_{ind}$. Потери мощности в индукторе P_{ind} определялись по формуле работы [5]:

$$P_{ind} = \rho_w H_{ind} I_{ind}^2 = \rho_w 2N(D + H) I_{ind}^2 \quad (1)$$

где N — число витков индуктивной катушки, $H_{ind} = 2N(D + H)$ — длина двухвиткового провода катушки, D — диаметр трубки, H — длина трубки, ρ_w — погонное сопротивление провода катушки на частоте 13,56 МГц.

Видно, что зависимость U_{ind} от P имеет минимум, который с уменьшением давления аргона смещается в область больших мощностей лампы. Характер зависимости U_{ind} от P можно объяснить следующим образом. Увеличение мощности лампы P (главным образом, благодаря росту поглощаемой плазмой мощности, поскольку $P_{pl} \gg P_{ind}$) сопровождается увеличением концентрации электронов плазмы. Это вызывает возрастание роли ступенчатой ионизации в плазме, что приводит к

снижению напряженности электрического ВЧ-поля плазмы E_{pl} и ВЧ-напряжения на плазменном витке индукционного разряда $U_{pl} = E_{pl}\Lambda_{pl}$, где $\Lambda_{pl} \approx 2(H+D)$ — длина плазменного витка [5]. В соответствии с уравнениями трансформаторной модели индукционного разряда низкого давления, ВЧ-напряжение и ток катушки U_{ind} и I_{ind} увеличиваются с ростом напряженности электрического ВЧ-поля E_{pl} и увеличением множителя $(1+Q_2^2)^{1/2}$ следующим образом [8, 9]:

$$U_{ind} = NE_{pl}\Lambda_{pl}(1+Q_2^2)^{1/2} / k^{1/2} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} I_{ind} &= U_{ind} / Z_1 \approx U_{ind} / \omega L_{ind} = \\ &= NE_{pl}\Lambda_{pl}(1+Q_2^2)^{1/2} / \omega L_{ind} k^{1/2} \end{aligned} \quad (3)$$

где Z_1 — полное сопротивление первичной цепи, L_{ind} — индуктивность катушки, $Q_2 = \omega L_2 / R_{pl}$ — добротность плазменного витка, L_2 — геометрическая индуктивность плазменного витка, R_{pl} — активное сопротивление плазмы, k — коэффициент связи между индуктивной катушкой и плазменным витком, $\omega = 2\pi f$ — круговая частота ВЧ-поля.

Дальнейшее увеличение поглощаемой плазмой мощности, сопровождаемое ростом концентрации электронов, снижает ее сопротивление R_{pl} и, соответственно, повышает добротность плазменного витка Q_2 так, что $Q_2 > 0,3$. Тогда, в соответствии с (2) и (3), рост добротности плазменного

витка «замедляет» уменьшение ВЧ-тока и напряжения катушки I_{ind} и U_{ind} , а затем, после достижения минимума, положение которого определяется мощностью лампы, вызывает их возрастание (см. рис. 2). Заметим, что в соответствии с (1) увеличение тока катушки I_{ind} сопровождается возрастанием мощности потерь в проводе катушки P_{ind} .

Другая возможная причина роста U_{ind} с увеличением мощности лампы на достаточно высоких частотах связана со скин-эффектом, а именно, с вытеснением электрического ВЧ-поля плазмы к стенкам разрядной трубки, что приводит к повышению сопротивления плазмы R_{pl} . В результате растет ВЧ-напряжение на плазменном витке U_{pl} , и, в соответствии с (2) и (3), возрастают ВЧ-напряжение и ток катушки U_{ind} и I_{ind} , а с ними мощность потерь в проводе катушки P_{ind} .

Как показали экспериментальные исследования плазмы индукционного разряда в смеси паров ртути и аргона в разрядных трубках диаметром $D = 40$ — 60 мм и разрядных токах $I_{pl} > 2$ А, уменьшение давления аргона от 0,7 до 0,1 Торр повышает напряженность электрического ВЧ-поля в плазме E_{pl} [10, 11]. Тогда, в соответствии с (2) и (3), возрастают ВЧ-ток и напряжение индуктора I_{ind} и U_{ind} , а вместе с ними и мощность потерь в катушке P_{ind} . В результате уменьшение давления аргона приводит к смещению минимума в зависимости U_{ind} от мощности лампы P в сторону больших значений P , что и наблюдается в нашем эксперименте (см. рис. 2).

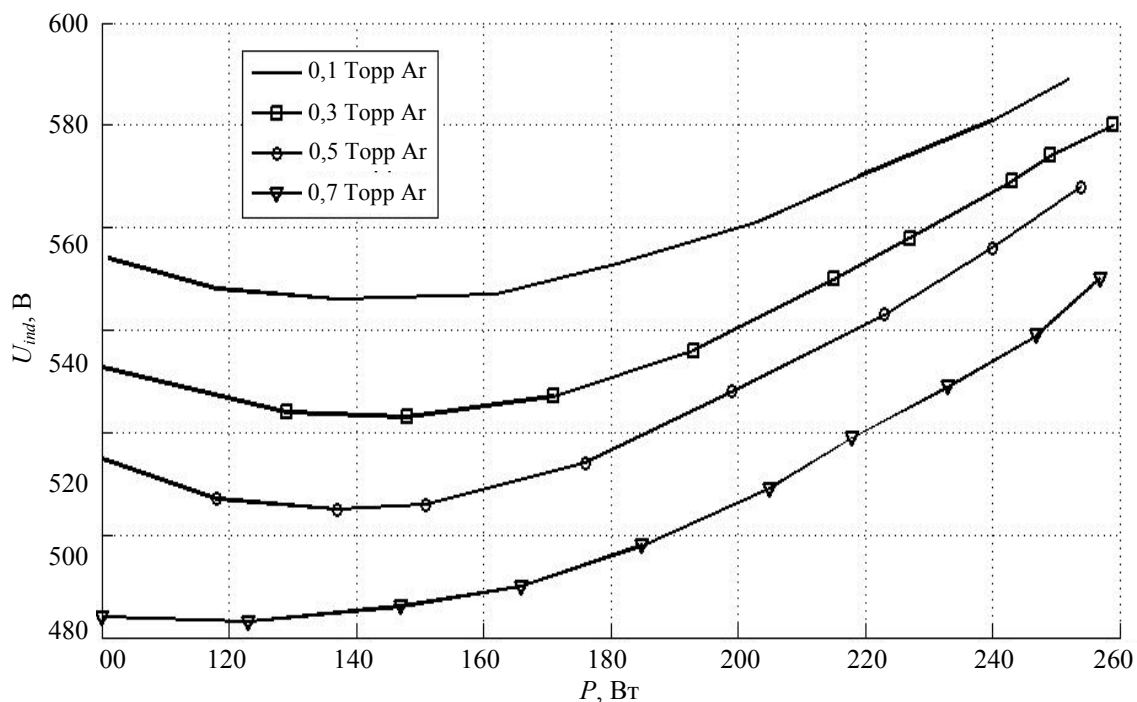


Рис. 2. Зависимость ВЧ-напряжения на индуктивной катушке U_{ind} от мощности лампы P при различных давлениях аргона. $D = 38$ мм, 2 витка, $f = 13,56$ МГц

Мощность потока и КПД УФ-излучения индукционной лампы

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости мощности потока УФ-излучения F_{254} от мощности лампы P , полученные в индукционных лампах при различных давлениях аргона. Там же приведены результаты расчетов, проведенных авторами в рамках модели индукционного разряда низкого давления [6] совместно с решением кинетического уравнения Больцмана [12] и системы уравнений баланса образования и разрушения возбужденных атомов ртути. Видно, что рассчитанные значения F_{254} находятся в удовлетворительном согласии с измеренными величинами (расхождения не превышают 12 %), хотя расчетная зависимость F_{254} от P имеет менее крутой характер, чем экспериментальная. Уменьшение давления инертного газа от 0,7 до 0,1 Торр приводит при неизменной мощности лампы P к росту мощности потока УФ-излучения F_{254} , причем характер зависимости которого от мощности плазмы P_{pl} и давления инертного газа практически такой же, как и в плазме положительного столба разряда низкого давления в трубке такого же диаметра [13, 14].

Экспериментальные и теоретические зависимости КПД генерации УФ-излучения лампы на длине волны 254 нм, т. е. $\eta_e = (F_{254}/P) \cdot 100 \%$, от мощности лампы P приведены для разных условий на рис. 4. Видно, что все зависимости имеют свои максимумы, возникновение которых можно объяснить влиянием следующих факторов. Первый — немонотонная зависимость мощности потерь в проводе катушки P_{ind} от мощности лампы P , имеющая минимум при тех же мощностях лампы

($P = 100—150$ Вт), что и минимум в аналогичной зависимости КПД генерации УФ-излучения. Второй — возрастающая с ростом мощности лампы P (а значит, и плазмы P_{pl}) роль ступенчатых процессов в плазме, включая тушащие соударения резонансно-возбужденных атомов ртути с электронами плазмы, снижающих генерацию УФ-излучения [13].

Повышение давления аргона от 0,1 до 0,7 Торр сдвигает максимум в зависимости $\eta_e = (F_{254}/P) \cdot 100 \%$, в сторону меньших мощностей лампы $P = P_{ind} + P_{pl}$. Причина «сдвига» максимума та же, что и «сдвига» минимума в зависимости U_{ind} от P , а именно, уменьшение с ростом мощности плазмы P_{pl} напряженности электрического ВЧ-поля E_{pl} , а не — ВЧ-напряжения на индуктивной катушке U_{ind} и мощности потерь в проводе катушки P_{ind} .

Как видно из рис. 4, рассчитанные по модели зависимости $\eta_e = (F_{254}/P) \cdot 100 \%$ от P находятся в хорошем согласии с экспериментальными. Небольшой сдвиг максимума (10—15 Вт) в рассчитанных зависимостях в сторону меньших мощностей лампы связан, возможно, тем, что при расчете полагалось, что плазма индукционного разряда заполняет весь объем разрядной трубки. Экспериментальные исследования индукционных ламп подобного типа, проведенные в области частот ВЧ-поля $f = 0,4—14$ МГц показали, что чем выше частота ВЧ-поля и давление инертного газа, тем при меньшей мощности лампы плазма полностью заполняет разрядную трубку [5]. В условиях наших экспериментов плазма индукционного разряда, работающего при давлении аргона 0,1 Торр, заполняла весь объем трубки при $P = 190$ Вт, а при давлении аргона 0,7 Торр — при $P = 160$ Вт.

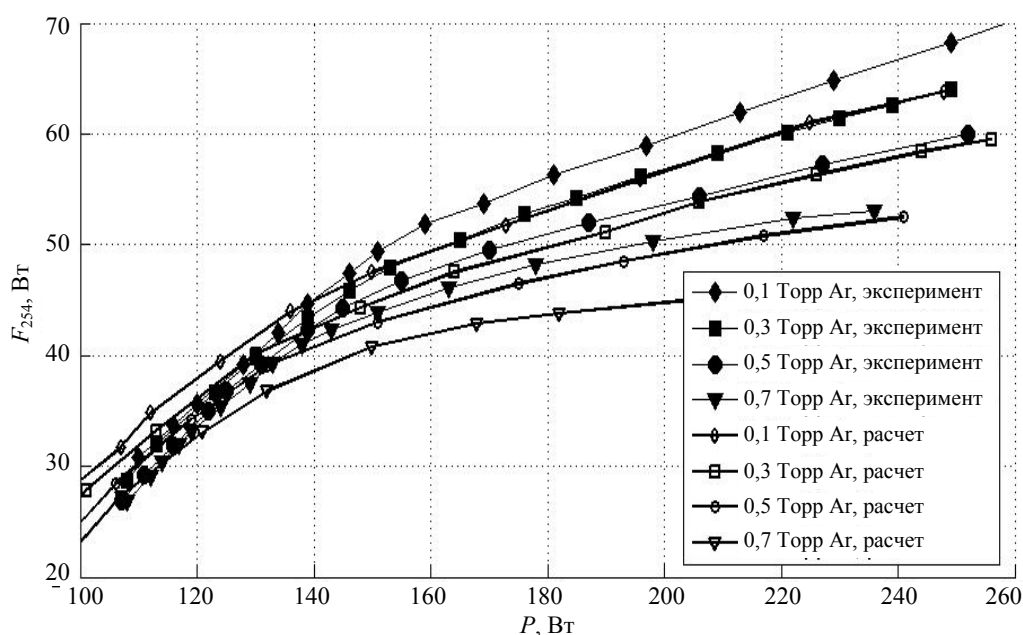


Рис. 3. Экспериментальные и расчетные зависимости мощности потока УФ-излучения лампы F_{254} от мощности лампы P . $D = 38$ мм, 2 витка, $f = 13,56$ МГц

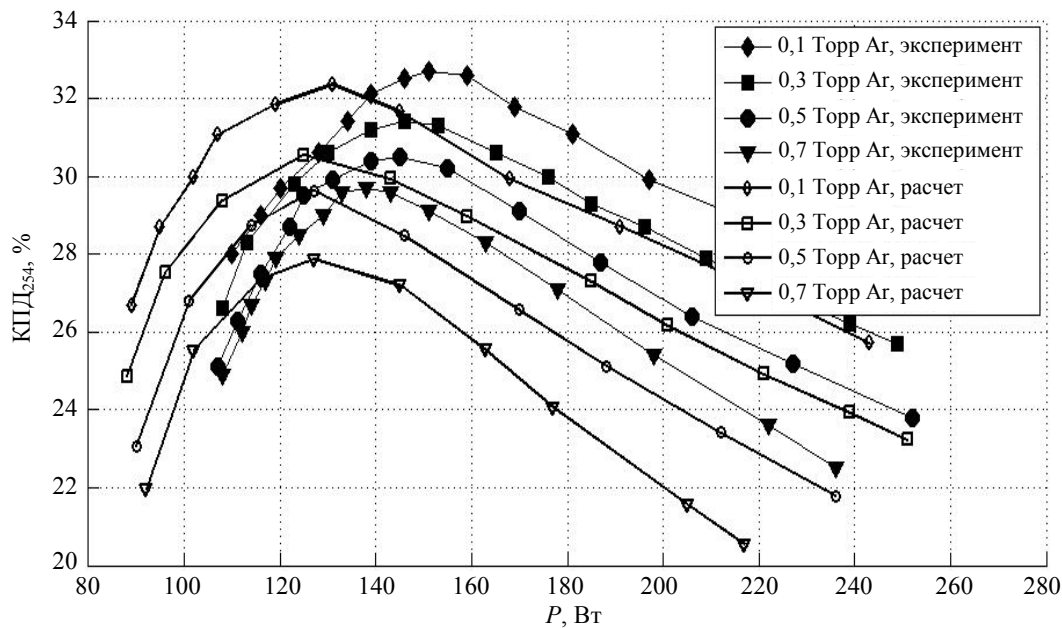


Рис. 4. Экспериментальные и теоретические зависимости КПД УФ-излучения лампы ($\eta_e = (F_{254}/P) \cdot 100$ %) от мощности лампы P . $D = 38$ мм, 2 витка, $f = 13,56$ МГц

Заключение

Приведем основные результаты исследования.

– Экспериментально установлено, что поток УФ-излучения ртутной плазмы на длине волны 254 нм возрастает с ростом мощности лампы от 100 до 260 Вт и с уменьшением давления инертного газа (аргона) от 0,7 до 0,1 Торр.

– Обнаружено, что зависимость ВЧ-напряжения на индуктивной катушке U_{ind} от мощности лампы P имеет минимум, а зависимость КПД генерации УФ-излучения $\eta_e = F_{254}/P$ от P имеет максимум при одних и тех мощностях лампы P .

– Уменьшение давления аргона от 0,7 до 0,1 Торр повышает U_{ind} и η_e , а минимум и максимум в зависимостях U_{ind} от P и η_e от P смещает в область больших мощностей лампы.

– Расчетные зависимости мощности УФ-излучения F_{254} и КПД УФ-излучения η_e от мощности лампы P находятся в удовлетворительном согласии с экспериментальными. Расхождения расчета с экспериментом объясняются неучетом при расчете частичного заполнения разрядной трубки плазмой индукционного разряда при относительно малых мощностях лампы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wharmby D. O., El-Hamansy S.-A. / Proc. 6th Int'l Symp. Sci. Technol. Light Sources. 1992. Budapest. P. 26.
2. Schlej J. / Proc. 6th Int'l. Symp. Sci. Technol. Light Sources. 1992. Budapest. P. 307.
3. Godyak V. A., Shaffer J. / Proceedings of the 8th int'l Symp. Sci. Technol. Light Sources. 1998. Greifswald. P. 14.
4. Исупов М. В., Кротов С. В., Литвинцев А. Ю. и др. // Светотехника. 2007. № 5. С. 37.
5. Попов О. А. // ЖТФ. 2007. № 6. С. 74.
6. Попов О. А., Свитнев С. А. // Светотехника. 2010. № 3. С. 63.
7. Кармазинов Ф. В., Костюченко С. В., Кудрявцев Н. Н. и др. Ультрафиолетовые технологии в современном мире. — Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2012.
8. Piejak R. B., Godyak V. A., Alexandrovich B. M. // Plasma Sources Sci. Technol. 1992. No. 1. P. 179.
9. Popov O. A., Maya J. // Plasma Sources Sci. Technol. 2000. No. 9. P. 227.
10. Piejak. R., Godyak V. A., and Alexandrovich B. M. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. No. 7. P. 3590.
11. Godyak V. A., Piejak R., Alexandrovich B. / Proc. 9th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources. 2001. Ithaca. P. 157.
12. Свитнев С. А., Попов О. А. // Вестник МЭИ. 2012. № 3. С. 110.
13. Рохлин Г. Н. Разрядные источники света. — М.: Энергоатомиздат. 1991.
14. Калязин Ю. Ф., Кокинов А. М., Мальков М. А. // Светотехника. 2005. № 3. С. 4.

Characteristics of UV radiation plasma source excited by 13.56 MHz ferrite-free inductively-coupled discharge

S. A. Svitnev¹, O. A. Popov², and V. A. Levchenko¹

¹LIT Moscow
44/1 Krasnobogatyrskaya str., Moscow, 107076, Russia
E-mail: svitnevs@yandex.ru

²Moscow Power Engineering Institute
14 Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia
E-mail: olegpopov734@yahoo.com

Received October 29, 2015

Inductively-coupled discharge was ignited at a frequency of 13.56 MHz in the mixture of mercury vapor (0.01 Torr) and argon (0.1—0.7 Torr) in the cylindrical quartz tube of 38 mm in diameter and of 400 mm in length, with the help of the inductive coil wrapped around the tube along its axial periphery. Maximal values of lamp UV efficiency and coil power losses were found to be achieved at the same lamp power that was shifted to higher values as argon pressure increased. Results of lamp UV generation efficiency calculations were in good agreement with experimental ones.

PACS: 52.80.Yr, 52.80.Pi

Keywords: ultraviolet radiation, inductively-coupled discharge, low pressure mercury plasma, coil power losses.

REFERENCES

1. D. O. Wharmby and S.-A. El-Hamansy, in *Proc. 6th Int'l. Symp. Sci. Technol. Light Sources* (Budapest, 1992). P. 26.
2. J. Schlejten, in *Proc. 6th Int'l. Symp. Sci. Technol. Light Sources* (Budapest, 1992). P. 307.
3. V. A. Godyak and J. Shaffer, in *Proc. 8th Int'l Symp. Sci. Technol. Light Sources* (Greifswald, 1998). P. 14.
4. M. V. Isupov, S. V. Krotov, A. Y. Litvintsev, et al., *Svetotekhnika*, No. 5, 37 (2007).
5. O. A. Popov, *Tech. Phys.* **77** (6), 74 (2007).
6. O. A. Popov and S. A. Svitnev. *Svetotekhnika*, No. 3, 63 (2010).
7. F. V. Karmazinov, S. V. Kostyuchenko, N. N. Kudryavtsev, et al., *Ultraviolet Technologies in the Contemporary World* (Intellect, Dolgoprudny, 2012) [in Russian].
8. R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *Plasma Sources Sci. Technol.* **1** (3), 179 (1992).
9. O. A. Popov and J. Maya, *Plasma Sources Sci. Technol.* **9** (3), 227 (2000).
10. R. B. Piejak, V. A. Godyak, and B. M. Alexandrovich, *J. Appl. Phys.* **89** (7), 3590 (2001).
11. V. A. Godyak, R. B. Piejak R., and B. M. Alexandrovich, in *Proc. 9th Int. Symp. Sci. Technol. Light Sources* (Ithaca, 2001). P. 157.
12. S. A. Svitnev and O. A. Popov, *Vestnik MPEI*, No. 3, 110 (2012).
13. G. N. Rokhlin. *Discharge Light Sources* (Energoatomizdat, Moscow, 1991) [in Russian].
14. Y. F. Kalyazin, A. M. Kokinov, and M. A. Mal'kov, *Svetotekhnika*, No. 3, 4 (2005).

* * *