

23 Влияние формы электродов на оптическое излучение плазмы короткодугового разряда высокого давления в ксеноне

© Н.А. Тимофеев, В.С. Сухомлинов, И.Ю. Мухараева, Ю.Э. Скобло

Санкт-Петербургский государственный университет,
198504 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: niktimof@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.01.2022 г.
В окончательной редакции 26.01.2022 г.
Принята к публикации 02.02.2022 г.

Исследован короткодуговой ксеноновый разряд высокого (сверхвысокого) давления с катодом из торированного вольфрама (это является причиной присутствия атомов тория в разрядном промежутке) в зависимости от формы поверхности электродов. На основе ранее построенной модели рассчитаны электрокинетические характеристики и оптическое излучение плазмы. Показано, что форма поверхности электродов (форма поверхности анода рассмотрена более подробно) сильно влияет прежде всего на электрическое поле в разрядном промежутке, что, в свою очередь, определяет температуру плазмы и пространственные распределения атомов тория и заряженных частиц (ионов тория и ионов ксенона). Полученное изменение электрокинетических характеристик существенным образом влияет на оптическое излучение плазмы, позволяя выбором формы поверхности электродов получать превалирование излучения в ультрафиолетовой, видимой или инфракрасной областях спектра.

Ключевые слова: короткодуговой ксеноновый разряд, высокое давление, торий, форма поверхности электродов, оптическое излучение плазмы.

DOI: 10.21883/OS.2022.05.52440.3204-21

Введение

Настоящая работа является продолжением исследований плазмы короткодугового ксенонового разряда высокого (сверхвысокого) давления [1–3], который широко используется как источник оптического излучения (ультрафиолетового (УФ), видимого, инфракрасного (ИК)), и посвящена изучению влияния формы поверхности электродов на оптические характеристики плазмы. Особенностью таких разрядов является то, что их катоды изготавливают из торированного вольфрама, и при сильном нагреве до 3500–4000 К [4–9] атомы тория могут эмитироваться в разрядный промежуток. Полученные нами ранее данные свидетельствуют о том, что этот процесс, на который ранее не обращалось внимания, действительно имеет место, и атомы тория существенно влияют на характеристики плазмы, заметно уменьшая ее температуру, кардинально меняя состав ионов вблизи катода и, как результат, влияя на оптическое излучение.

Характеристики плазмы зависят от напряженности электрического поля E . Прежде всего оно определяет нагрев (температуру) плазмы. Поверхности электродов, очевидно, являются эквипотенциальными, при этом разность потенциалов между ними равна приложенному к разряду напряжению. Короткодуговые разряды имеют, как правило, конусообразные катоды и массивные аноды, рабочая поверхность которых близка к плоской. Изменение формы поверхности анода и/или катода вызовет с необходимостью изменение пространственного распределения электрического поля в разрядном промежутке.

Например, при сохранении расстояния между электродами по оси разряда вогнутая или выпуклая рабочая поверхность анода при той же форме поверхности катода делает соответственно короче или длиннее линии напряженности электрического поля на периферии разряда. Можно утверждать, что при вогнутой форме рабочей поверхности анода линии электрического поля между электродами будут короче, и уменьшение E с удалением от оси разряда будет происходить более медленно. Температура плазмы T будет также уменьшаться медленнее, что приведет к расширению токового канала. Это означает, что ту же величину электрического тока можно обеспечить при меньшем напряжении на электродах, т. е. при меньшей напряженности электрического поля. При выпуклой форме поверхности анода картина будет обратная: напряженность электрического поля и температура на периферии разряда будут уменьшаться более резко, токовый канал будет уже, напряжение на электродах и напряженность электрического поля возрастут.

Форма поверхности катода также будет влиять на характеристики плазмы: изменение угла конуса катода приведет к изменению величины и пространственного распределения E вблизи поверхности катода, что повлечет изменение и других характеристик плазмы.

К сожалению, нам не удалось найти работы, в которых приводились результаты влияния поверхности электродов на характеристики короткодуговых разрядов высокого давления в инертных газах. Мы нашли только несколько патентов, касающихся модификации рабочей

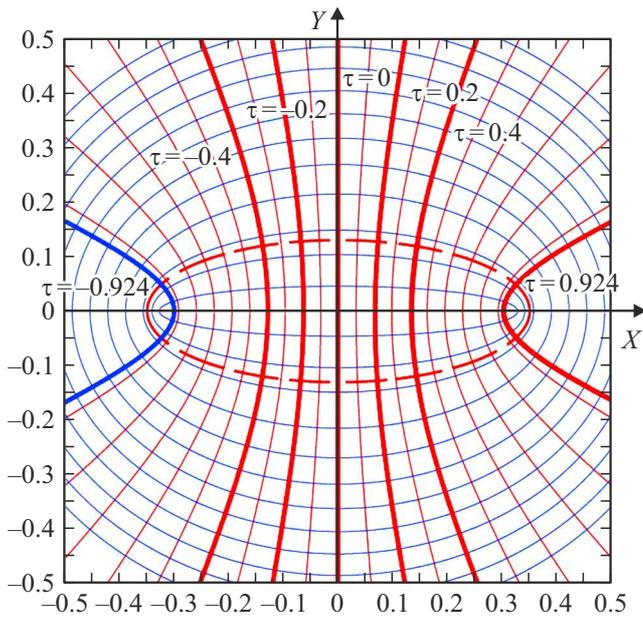


Рис. 1. Геометрия короткодугового разряда, представленная в эллипсоидальных координатах. Жирными линиями выделены поверхности электродов при $\tau = -0.924, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.924$. Значения $\tau = -0.924$ и 0.924 соответствуют выбранным нами поверхностям катода и анода соответственно. Жирная штриховая линия обозначает границы канала тока при заданном радиусе эмиссии электронов и атомов тория с поверхности катода [3]. На рисунке приведена также сетка декартовых координат.

поверхности анода с целью уменьшения нагрузки на единицу поверхности или для стабилизации работы газового разряда.

В патентах [10–13] описаны конструкции анода, имеющего соосную с анодом выемку в виде диска определенного диаметра и глубины или выемку, близкую к сферической форме. За счет увеличения эффективной рабочей поверхности анода, рассеивающей энергетическую нагрузку, уменьшается температура центральной части и распыление материала анода, что снижает скорость почернения внутренней поверхности колбы разрядной лампы. Это позволяет увеличить срок службы лампы при требуемом уровне освещенности и стандартной яркости.

Настоящая работа посвящена изучению влияния формы поверхности электродов на оптическое излучение плазмы. Рассмотрены аноды вогнутой и выпуклой формы и катоды с разными углами конуса. Исследование основывается на модели плазмы [3], учитывающей эмиссию атомов тория в разрядный промежуток. Использование эллипсоидальных координат [3,14], которые достаточно адекватно описывают геометрию исследуемого короткодугового разряда, позволяет легко выбирать поверхности электродов требуемой формы.

Результаты расчета, дискуссия

В системе эллипсоидальных координат (σ, τ — эллипсы и гиперболы соответственно) поверхности электродов — катода и анода совпадают с заданными поверхностями гипербол τ , близкими к реальным поверхностям электродов. Эти поверхности связаны также с решением задачи [3] и легко могут варьироваться. Геометрия разряда, поверхности электродов и границы токового канала показаны на рис. 1. Жирными линиями выделены поверхности электродов при $\tau = -0.924, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.924$. Значения $\tau = -0.924$ и 0.924 соответствуют выбранным нами поверхностям катода и анода соответственно. Жирная штриховая линия обозначает границы канала тока при заданном радиусе эмиссии электронов и атомов тория с поверхности катода [3]. Для рассмотрения нами выбрана отрицательная полуплоскость эллипсоидальных координат, что не принципиально в силу симметричности задачи относительно плоскости $\tau = 0$. На рисунке приведена также сетка декартовых координат для более наглядного представления геометрии задачи. Рассмотрены шесть вариантов поверхности анода ($\tau_L = -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.924$) и два варианта поверхности катода ($\tau_0 = 0.924, 0.850$). Случай $\tau_L = 0.924$ соответствует поверхности анода, симметричной поверхности катода с $\tau_0 = -0.924$, относительно $\tau = 0$. Он интересен тем, что вблизи анода атомы тория практически отсутствуют, и плазма формируется процессами с участием атомов и ионов ксенона, что позволяет наглядно сравнивать плазму чисто ксенонового разряда и плазму с присутствием атомов тория.

Роль формы поверхности катода довольно очевидна: более острая форма катода увеличивает напряженность

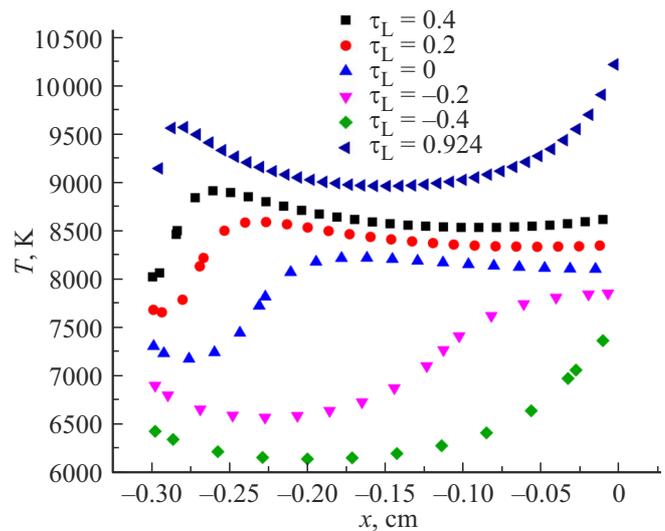


Рис. 2. Температура плазмы при различной форме поверхности анода. Условия разряда: расстояние между электродами 0.3 см, разрядный ток 10 А, концентрация атомов ксенона $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, концентрация атомов тория на поверхности катода $7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

электрического поля вблизи его поверхности, увеличивает температуру плазмы и, таким образом, влияет на ее оптические характеристики, что подтверждается проведенными нами расчетами. С точки зрения практических приложений варьирование формой катода может привести к нежелательным эффектам. Например, для более „острых“ по сравнению с используемыми катодами температура его кончика имеет более высокую температуру, и, как результат, они имеют меньший срок службы [15]. По этой причине основное внимание в настоящей работе уделено влиянию поверхности анода на оптические характеристики короткодугового ксенонового разряда высокого давления.

На рис. 2 приведен расчет температуры плазмы при различной форме рабочей поверхности анода, начиная с наиболее вогнутой ($\tau_L = -0.4$) и далее переходя к наиболее выпуклой поверхности анода при $\tau_L = +0.924$, симметричной по отношению к поверхности катода. Концентрация атомов ксенона составляла $3 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (она соответствует давлению ксенона в холодной лампе 20 atm), концентрация атомов тория на поверхности катода $7 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ [3], разрядный ток 10 А, расстояние между электродами 0.3 см. Видно, что в последнем случае температура плазмы максимальна, причем около анода ее значения ($\sim 10\,000 \text{ K}$) близки к значениям, характерным для чисто ксенонового разряда [16]. Около катода температура плазмы также достаточно высока, что связано с пространственным распределением напряженности электрического поля, которая приводит к сужению канала электрического тока [17].

Из рис. 2 также видно, что при уменьшении τ_L температура плазмы уменьшается, и вблизи катода возникает отчетливо выраженный минимум, протяженность которого и глубина растут с увеличением вогнутости поверхности анода; например, при $\tau_L = -0.4$ температура плазмы снижается до $\sim 6000\text{--}6500 \text{ K}$, и минимум температуры занимает заметную часть пространства до анода. При этом температура плазмы около анода, где свойства плазмы определяются атомами ксенона, существенно выше температуры, наблюдаемой в минимуме около катода.

Полученное изменение температуры должно, очевидно, сильно влиять на другие характеристики плазмы. Действительно, на рис. 3 приведены концентрации атомов ксенона и ионов тория и ксенона в зависимости от формы поверхности анода. Разрядные условия совпадают с условиями рис. 2. Вогнутая рабочая поверхность анода приводит к заметному проникновению атомов тория в объем плазмы (рис. 3, *a*), присутствию ионов тория в прикатодной области (рис. 3, *b*), а также практически нулевой концентрации ионов ксенона около катода (рис. 3, *c*). Симметричная относительно катода форма анода (рис. 3, *c*) дает близкое к симметричному относительно плоскости $\tau_L = 0$ распределение плотности ионов ксенона. Это объясняется высокой температурой плазмы около катода, сравнимой с температурой вблизи

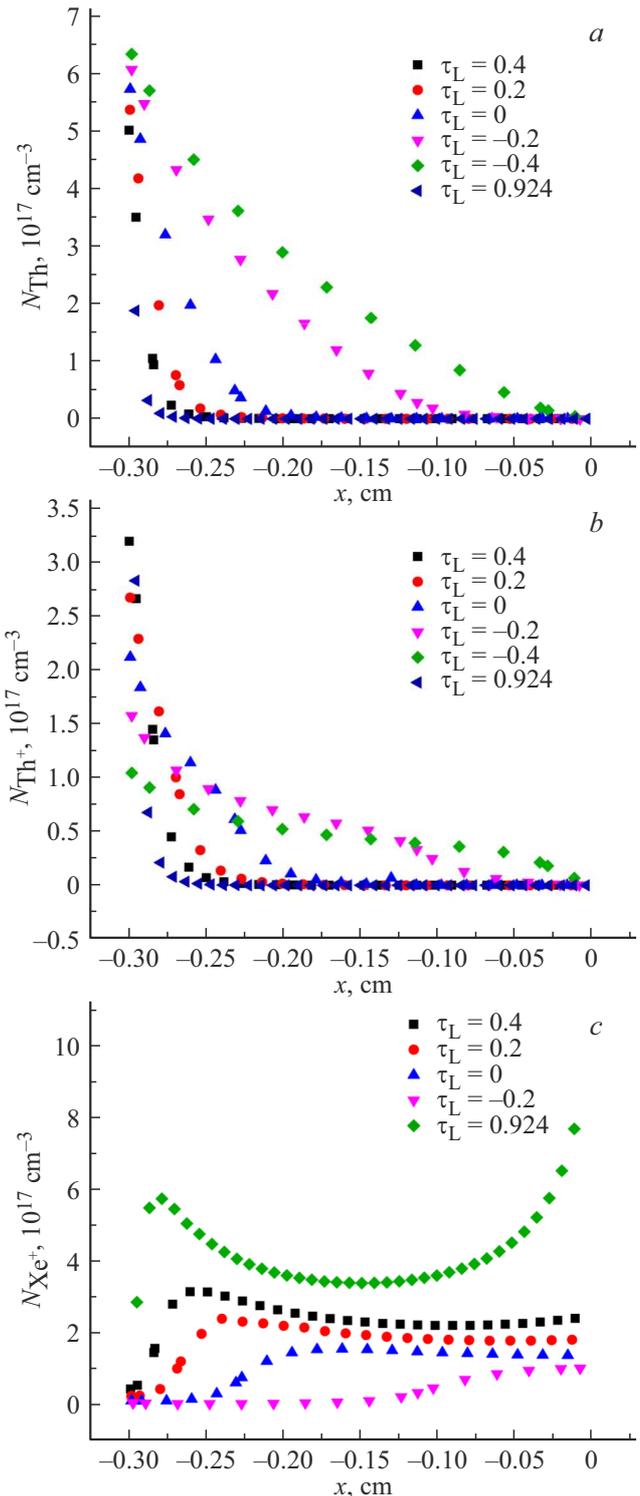


Рис. 3. Концентрация частиц плазмы: (*a*) атомов тория, (*b*) ионов тория и (*c*) ионов ксенона в зависимости от формы поверхности анода. Условия разряда аналогичны условиям рис. 2.

анода, что приводит к превалированию плотности ионов ксенона по сравнению с концентрацией ионов тория и вблизи катода.

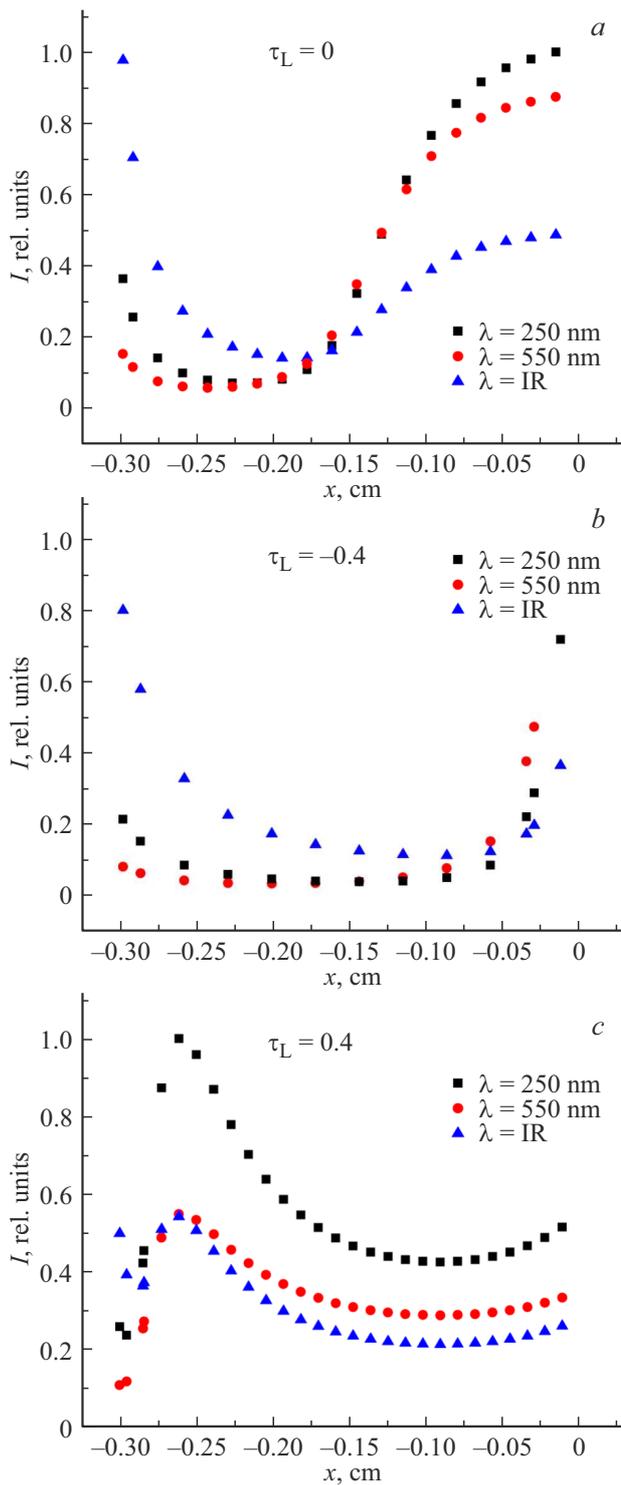


Рис. 4. Интенсивности излучения плазмы в трех спектральных интервалах: в УФ области вблизи 250 nm, в видимой области около 550 nm и в ИК области (суммарное излучение ИК линий атомов ксенона в области (800–1100) nm). Условия разряда аналогичны условиям рис. 2. *a* — плоский анод, $\tau_L = 0$, *b* — вогнутый анод, $\tau_L = -0.4$, *c* — выпуклый анод, $\tau_L = +0.4$.

Оптические характеристики рассматриваемой плазмы определяются рекомбинационно-тормозными процесса-

ми с участием атомом и ионов тория и ксенона [18], а также излучением спектральных линий атомов ксенона в ИК области, из которых основные по интенсивности лежат в диапазоне (800–1100) nm [19–21]. Форма рабочей поверхности анода, как мы видим, существенно влияет на температуру и состав частиц плазмы. Следовательно, возникает возможность воздействия на эти характеристики, в том числе на оптические свойства плазмы, выбором соответствующей формы рабочей поверхности анода. Температура плазмы является определяющим фактором в процессах ионизации и возбуждения атомов. Она растет с выбором формы поверхности анода с большим τ_L , что, очевидно, будет усиливать процессы возбуждения и ионизации атомов (прежде всего атомов ксенона, поскольку их концентрация на 2–3 порядка выше концентрации атомов тория). Испарение атомов тория в разрядный объем влияет на оба фактора — температуру плазмы и состав ионов, что также будет влиять на оптические характеристики посредством участия последних в рекомбинационно-тормозных процессах.

На рис. 4 приведены интенсивности излучения плазмы в трех спектральных интервалах: в УФ области вблизи 250 nm, в видимой области около 550 nm и в ИК области (суммарное излучение ИК линий атомов ксенона в области (800–1100) nm). Условия разряда аналогичны условиям рис. 2. На рис. 4, *a* приведен случай плоского анода, $\tau_L = 0$ [3]. Видно, что вблизи катода видимое излучение превалирует над УФ и ИК излучениями, что связано со спецификой формирования рекомбинационного излучения с участием преимущественно атомов и ионов тория и сравнительно невысокой температурой плазмы. В остальной части разряда УФ и ИК излучения являются основными и определяются атомами и ионами ксенона.

Переход к вогнутому аноду, $\tau_L = -0.4$ (рис. 4, *b*), заметно увеличивает излучение в видимой области спектра, которое уже является доминирующим практически во всем разрядном промежутке, а УФ и ИК излучения оказываются „прижатыми“ к аноду. Переход к выпуклой форме анода, $\tau_L = +0.4$ (рис. 4, *c*), кардинально меняет картину. Повышение температуры плазмы и изменение состава ионов, в котором в основном объеме плазмы превалируют ионы ксенона, приводит к росту УФ и ИК излучений.

Заключение

Рассмотрено влияние формы рабочей поверхности электродов на электрокинетические и оптические характеристики плазмы. Исследование основано на модели короткодугового ксенонового разряда высокого (сверхвысокого) давления [3]. Наиболее интересным, с нашей точки зрения, результатом является возможность варьирования оптического излучения плазмы с помощью выбора соответствующей формы рабочей поверхности анода. Как показано, выбор формы поверхности ано-

да сильно влияет на температуру плазмы и ионный состав плазмы, в котором могут превалять либо ионы тория, либо ионы ксенона. При этом вогнутая поверхность анода дает более низкую температуру плазмы, преваляние ионов тория практически во всем объеме плазмы при определенных условиях и максимум излучения в видимой области спектра. Выпуклая форма анода дает более высокую температуру, интенсивное возбуждение атомов ксенона и преваляние ионов ксенона практически во всем объеме разряда. Это обеспечивает высокую интенсивность УФ и ИК излучений плазмы.

Обнаруженное явление может быть использовано при совершенствовании существующих и разработке новых источников оптического излучения высокой интенсивности с требуемым спектром излучения плазмы. Данная цель может быть достигнута без радикальной модификации конструкции источника оптического излучения.

Мы полагаем, что полученные результаты справедливы также для газовых разрядов, катоды которых допированы другими легкоионизируемыми добавками (например, активно исследуемыми в последнее время добавками с редкоземельными элементами $\text{La}_2\text{O}_3\text{-W}$, $\text{ZrO}_2\text{-W}$, $\text{CeO}_2\text{-W}$, $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-W}$ [22], Ce-W , La-W , Y-W [23]). Более того, характеристики разрядов с использованием не допированных катодов, например чистого вольфрама, также будут, по-видимому, зависеть от формы поверхности анода, но в меньшей степени.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-32-90055.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] N.A. Timofeev, V.S. Sukhomlinov, G. Zissis, I.Yu. Mukharaeva, P. Dupuis. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **47** (7), 3266–3271 (2019). DOI: 10.1109/TPS.2019.2918643
- [2] N.A. Timofeev, V.S. Sukhomlinov, G. Zissis, I.Yu. Mukharaeva, P. Dupuis. *Technical Physics*, **64**(10), 1473–1479 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219100207
- [3] N.A. Timofeev, V.S. Sukhomlinov, G. Zissis, I.Yu. Mukharaeva, D.V. Mikhaylov, A.S. Mustafaev, P. Dupuis, D.Q. Solikhov, V.S. Borodina. *IEEE Trans. Plasma Sc.*, **49** (8), 2387–2396 (2021). DOI: 10.1109/TPS.2021.3093816
- [4] J.L. Sillero, D. Ortega, E. Munoz-Serrano, E. Casado. *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** (18), 185204 (2010). DOI: 10.1088/0022-3727/43/18/185204
- [5] J. Reinelt, M. Westermeier, C. Ruhmann, A. Bergner, P. Awakowicz, J. Mentel. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44** (9), 095204 (2011). DOI:10.1088/0022-3727/44/9/095204
- [6] P. Zhu, J.J. Lowke, R. Morrow. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **25** (8), 1221–1230 (1992).
- [7] J. Wendehtorr, H. Wohlfahrt, G. Simon. *IEEE Conference Record — Abstracts. 1999 IEEE International Conference on Plasma Science. 26th IEEE International Conference.* DOI: 10.1109/PLASMA.1999.829559
- [8] M. Baeva, D. Uhrlandt, M.S. Benilov, M.D. Cunha. *Plasma Sources Sci. Technol.*, **22** (6), 065017 (2013). DOI: 10.1088/0963-0252/22/6/065017
- [9] M. Baeva. *Plasma Chem. Plasma Process*, **37** (2), 341–370 (2017). DOI: 10.1007/s11090-017-9785-y
- [10] Patent DE102010024240 A1, IPC: H01J-009/02 H01J-061/00, H01J-061/04 H01J-061/073, H01J-061/84 H01L-021/027, 2009-06-30.
- [11] Patent DE102010044259 B4, IPC: H01J-061/06, H01J-061/073, H01J-061/84 H01J-061/86, H01J-061/88 2009-09-15.
- [12] Patent JP2011065756 A, Short arc discharge lamp, H01J-061/073*, 2009-09-15.
- [13] Patent JP4337968 B2, Short arc type discharge lamp, H01J-061/073*, H01J-061/86 H01J-061/88.
- [14] А.Г. Корн, Т.М. Корн. *Справочник по математике для научных работников и инженеров.* (Наука, М., 1973).
- [15] Г.Н. Рохлин. *Разрядные источники света.* (Энергоатомиздат, М., 1991).
- [16] Э.И. Асиновский, В.А. Зейгарник. *ТВТ*, **12** (6), 1278–1291 (1974).
- [17] N. A. Timofeev, V. S. Sukhomlinov, G. Zissis, I. Yu. Mukharaeva, D.V. Mikhaylov, A.S. Mustafaev, V.S. Borodina. *IEEE Trans. Plasma Sc.*, 2022, in press.
- [18] Ю.П. Райзер. *Физика газового разряда.* (Наука, М., 1987).
- [19] D. Stull. *American Institute of Physics Handbook, Third Edition,* (D.E. Gray, Ed., McGraw Hill, New York, 1972).
- [20] M. Aymar, M. Coulombe. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, **21** (6), 537–566 (1978). DOI: 10.1016/0092-640X(78)90007-4
- [21] NIST Atomic Spectra Database Lines Form [Электронный ресурс]. URL: https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- [22] J. Haidar, A.J.D. Farmer. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **28** (10), 2089–2094 (1995). DOI: 10.1088/0022-3727/28/10/014
- [23] Zhongzhu Gu, Xiaoli Xi, Jiancan Yang, Jinjin Xu. *Fuel.*, **95**, 648–654 (2012). DOI: 10.1016/j.fuel.2011.12.051