

УДК 537.52, 621.387

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-1-39–47

И.Ю. Мухареева, В.С. Сухомлинов, Н.А. Тимофеев, Д.В. Михайлов, А.А. Смирнова

Пространственные характеристики короткодугового разряда в ксеноне высокого давления

Санкт-Петербургский государственный университет; 199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская набережная, 7–9; niktimof@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования (моделирования) пространственных характеристик короткодугового ксенонового разряда высокого давления, который широко используется в качестве источника оптического излучения (источника света). Моделирование проведено с учетом испарения материала катода – тория (данные источники света обычно имеют вольфрамовые катоды с примесью тория) в разрядный промежуток. Для решения задачи написаны и решены пять уравнений для основных характеристик плазмы – напряженности электрического поля, температуры плазмы, концентрации атомов тория, ионов тория и ксенона. Рассмотрен случай реальной геометрии разряда, для которого оказывается удобным использование эллипсоидальных координат. Данное представление сразу позволяет получить пространственное распределение напряженности электрического поля в эллипсоидальных координатах, которое, в свою очередь, позволяет найти все остальные характеристики, прежде всего – температуру плазмы. Получены пространственные (радиальные) распределения напряженности электрического поля, температуры плазмы, концентрации атомов тория и плотности ионов тория и ксенона для типичных условий ксеноновых короткодуговых источников света. Чрезвычайно интересный результат получен для радиального распределения концентрации атомов тория вблизи катода, которое характеризуется максимумом, что, на первый взгляд, труднообъяснимо. Данный эффект интерпретируется с помощью физических соображений и привлечения геометрической картины испарения тория с поверхности катода. Полученные данные важны для оптимизации оптических, светотехнических и энергетических характеристик источников света на основе дуговых разрядов в инертных газах. Полученные результаты могут быть также полезны для исследования сильнооточных дуговых разрядов высокого давления, имеющих электроды с легкоионизируемой добавкой (торий, редкоземельные элементы и др.).

Ключевые слова: *короткодуговой разряд, ксенон, высокое давление, торированный катод, пространственные распределения характеристик.*

Разряды высокого (сверхвысокого) давления в инертных газах широко используются в качестве источников оптического излучения (источников света). Их особенностью является то, что они дают спектр излучения, максимально близкий к солнечному, и что источник света является практически точечным. Наилучшими в этом отношении характеристиками обладает дуговой ксеноновый разряд, который вряд ли может быть замещен другими источниками света, в том числе светодиодными, активно внедряемыми в последнее время в практику освещения.

Короткодуговые разряды высокого давления в инертных газах изучены достаточно хорошо [2]. Это касается главным образом интегральных характеристик дуговых разрядов в инертных газах. Однако ряд вопросов остается неисследованным.

Высокие плотности тока и сильный нагрев электродов, прежде всего катода, могут вызывать испарение атомов материала электродов в объем плазмы. Эти атомы, как правило, имеют более низкую энергию ионизации по сравнению с атомами инертного газа, поэтому могут влиять на плазменные процессы, и прежде всего на ионизационный баланс. Обычно ксеноновые источники света (ксеноновые лампы высокого давления) имеют вольфрамовые катоды с примесью нескольких процентов тория (2–5 %) для облегчения эмиссии электронов [1]. Атомы тория обладают существенно более низкой энергией ионизации (6.3 эВ) по сравнению с атомами ксенона (12.1 эВ), поэтому их присутствие в плазме, безусловно, будет влиять на процессы ионизации и процессы генерации излучения (рекомбинационно-тормозное излучение, линейчатое излучение атомов тория). Данные измерений и расчетов температуры поверхности катода дают величины от 2500 до 4000 К [11]. Заметим здесь, что большинство этих данных получены для аргонового разряда атмосферного давления. Наиболее интересный, с нашей точки зрения, результат был получен в работе 12, в которой для короткодугового ксенонового разряда с вольфрамовым катодом, допированным 2 % TiO_2 , была получена температура катода 3631 К. Оценки, основанные на температурной зависимости давления насыщенных паров тория над жидкой фазой 13, показывают, что температура катода ≥ 3600 К может обеспечить концентрацию атомов тория вблизи катода $\geq 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Можно полагать, что этого достаточно для сильного влияния на плазму, поскольку данная концентрация сравнима с ожидаемой плотностью электронов в плазме [14].

Цель данной работы – нахождение пространственных распределений характеристик плазмы (напряженности электрического поля E , температуры плазмы T , концентраций атомов тория N_{Th} и концентраций ионов тория N_{Th}^+ и ксенона N_{Xe}^+) на основе модели плазмы короткодугового ксенонового разряда высокого давления ($p \sim (10–20)$ атм.) в реальной геометрии и с учетом эмиссии атомов тория в объем плазмы. Данные результаты важны для оптимизации оптических, светотехнических и энергетических характеристик источников света на основе дуговых разрядов в инертных газах, а также для исследования других сильноточных дуговых разрядов с электродами, содержащими легкоионизируемые добавки (торий, редкоземельные элементы и др.).

Главным предположением моделирования является предположение о локальном термодинамическом равновесии, что вполне обосновано [2]. Геометрия разряда такова, что для описания пространственных распределений характеристик плазмы удобно использовать эллипсоидальную систему координат (вытянутый эллипсоид вращения) [15]. В таком представлении поверхность катода можно сопоставить с близкой к нему поверхностью τ_0 , а поверхность анода – с поверхностью τ_L . Можно ожидать, что все поверхности $\tau = \text{const}$ будут также эквипотенциальными. Линии, перпендикулярные поверхностям τ , определяют линии напряженности электрического поля и, очевидно, линии электрического тока. На рис. 2 приведена структура короткодугового разряда с заостренным катодом и плоским анодом. На рисунке также нанесена сетка декартовых координат. Расчет проводился для реальной короткодуговой ксеноновой лампы мощностью 250 Вт, расстоянием между электродами 0.3 см, разрядным током ~ 10 А, давлением ксенона в холодной лампе 20 атм. (концентрация атомов ксенона на оси горящего разряда $\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$).

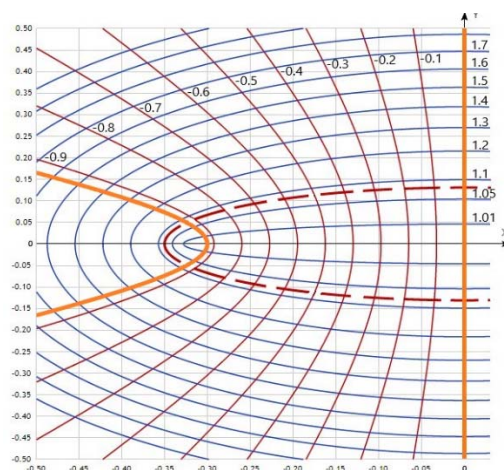


Рис. 1. Геометрия короткодугового ксенонового разряда, наложенная на эллипсоидальные координаты. Толстая линия слева соответствует поверхности катода ($\tau_0 = 0.924$), справа – поверхности анода ($\tau_L = 0$). Толстая пунктирная линия обозначает границу токового канала, определяемую радиусом зоны эмиссии электронов на поверхности катода. На рисунке также приведена декартова сетка координат

Для определения характеристик плазмы (температуры плазмы T , напряженности электрического поля E , концентрации атомов тория N_{Th} в разрядном промежутке и концентраций ионов тория N_{Th}^+ и ксенона N_{Xe}^+) были написаны и решены пять уравнений: два уравнения Саха для концентраций ионов тория и ксенона, уравнение баланса энергии, уравнение баланса для концентраций атомов и ионов тория и уравнение тока через плазму. Начальными условиями задачи являются давление ксенона в холодной лампе, разрядный ток, расстояние между электродами и концентрация атомов тория на поверхности катода, которая соответствует температуре острия катода (в расчетах эта величина варьируется). Расчеты основаны на модели, описанной в [16] для плоского одномерного случая и развитой для случая реальной геометрии короткодугового разряда.

Будем полагать, что σ -компонента напряженности электрического поля E_σ много меньше τ -компоненты E_τ и близка к нулю ($E_\tau \gg E_\sigma \approx 0$), что следует из физических соображений. Очевидно, что ϕ -компонента напряженности поля E_ϕ равна нулю ($E_\phi = 0$) в силу цилиндрической симметрии. Уравнение Максвелла $\text{rot} \vec{E} = 0$ при сделанных предположениях позволяет найти выражение для τ -компоненты напряженности электрического поля $E_\tau(\sigma, \tau)$ в зависимости от обеих координат σ, τ :

$$E_\tau(\sigma, \tau) = E(\tau)[(1 - \tau^2)/(\sigma^2 - \tau^2)]^{1/2}, \quad (1)$$

где $E(\tau)$ является функцией только одной координаты τ и представляет собой значение поля на оси разряда ($\sigma = 1$). Выражение (1) определяет пространственное распределение напряженности электрического поля и как следствие – пространственные распределения других характеристик плазмы, прежде всего температуры. Характеристики плазмы на оси разряда были получены ранее [17].

Результаты расчетов приведены на рис. 4. На рис. 2 представлена радиальная зависимость напряженности электрического поля E при двух концентрациях атомов тория $N_{Th}^0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (а) и $N_{Th}^0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (б) на поверхности катода и в трех точках по длине разряда – около катода ($x = 0.293 \text{ см}$ (а), $x = 0.281 \text{ см}$ (б)), в точке равенства концентраций ионов ($x = 0.263 \text{ см}$ (а), $x = 0.231 \text{ см}$ (б)) и около анода ($x = 0.175 \text{ см}$ (а), x

$= 0.131$ см (б)). Для удобства интерпретации результаты приведены в декартовых координатах (y – радиальная координата). Видно, что характерная «полуширина» полученных радиальных распределений практически одинакова для всех трех точек и составляет примерно 0.10 см для концентрации атомов тория $N_{\text{Th}}^0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и 0.15 см для $N_{\text{Th}}^0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Рост концентрации атомов тория увеличивает «полуширину» напряженности поля, что связано с более глубоким проникновением электрического поля в разряд при увеличении N_{Th}^0 .

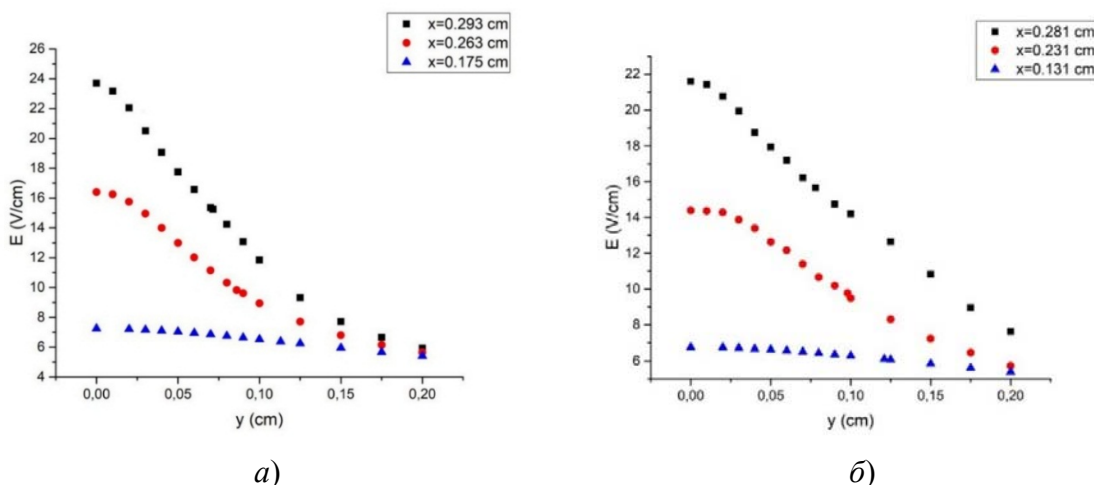


Рис. 2. Распределение напряженности электрического поля E поперек оси ксенонового разряда при двух концентрациях атомов тория $N_{\text{Th}}^0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (а) и $N_{\text{Th}}^0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (б) для трех точек на оси разряда: около катода $x = 0.281$ см, в точке равенства концентраций ионов тория и ксенона $x = 0.231$ см и около анода $x = 0.131$ см. Разрядный ток – 10 А, концентрация атомов ксенона на оси разряда $N_{\text{Xe}} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

На рис. 3 приведено пространственное распределение температуры плазмы T в тех же точках по длине разряда, что и для E . Как видно из рисунка, радиальное распределение T вблизи катода является заметно более «острым» и расширяется в сторону анода. Причина этого заключается в более сильной, чем линейная, зависимости температуры плазмы от напряженности электрического поля.

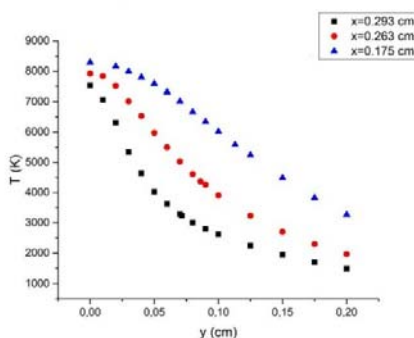
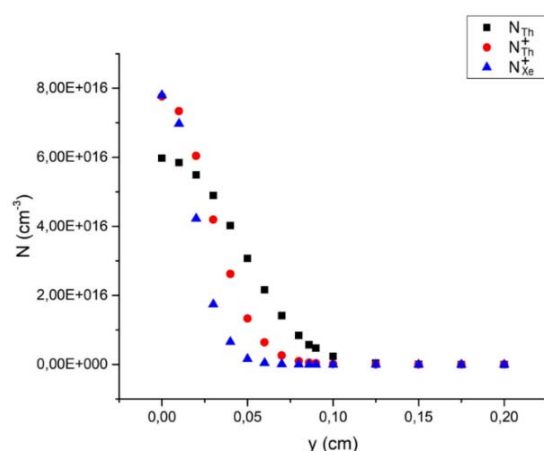
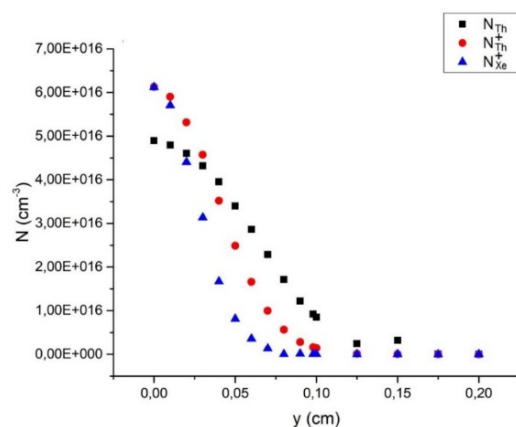


Рис. 3. Пространственное распределение температуры плазмы T в трех точках по длине разряда: около катода $x = 0.293$ см, в точке равенства концентраций ионов тория и ксенона $x = 0.263$ см, около анода $x = 0.175$ см. Разрядный ток – 10 А, концентрация атомов тория на поверхности катода $N_{\text{Th}}^0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, концентрация атомов ксенона на оси разряда $N_{\text{Xe}} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

На рис. 4 показаны радиальные распределения концентраций атомов тория и ионов тория и ксенона в точке равенства концентраций последних ($x = 0.263$ см). Концентрация атомов тория уменьшается с удалением от оси заметно медленнее, чем концентрации ионов, что вполне объяснимо сильной зависимостью концентраций ионов от температуры плазмы. При этом спад концентрации ионов ксенона сильнее в силу большего потенциала ионизации атомов ксенона по сравнению с атомами тория. Как и для напряженности поля и температуры плазмы, рост начальной концентрации атомов тория N_{Th}^0 увеличивает «полуширину» радиальных распределений концентраций. Это важно для расчета интегральных по объему излучательных характеристик разряда, что, в свою очередь, важно для оптимизации источников света на основе дуговых разрядов в инертных газах.

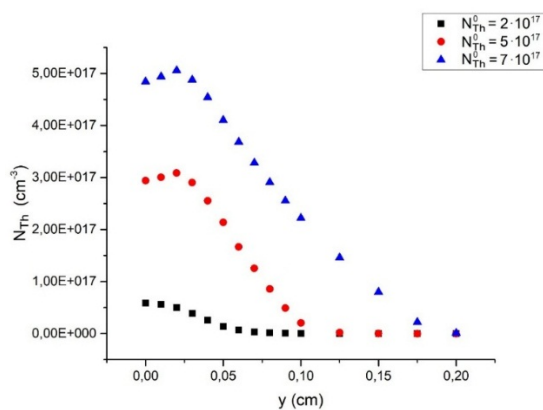


а)

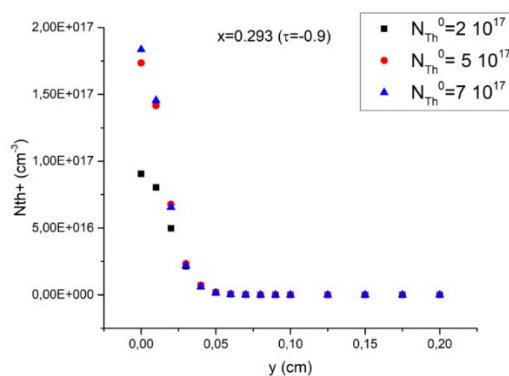


б)

Рис. 4. Пространственные распределения концентрации атомов тория N_{Th} , концентраций ионов тория N_{Th}^+ и ксенона N_{Xe}^+ при двух начальных концентрациях атомов тория на поверхности катода: $N_{Th}^0 = 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (а) и $N_{Th}^0 = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (б). Разрядный ток – 10 А, концентрация атомов ксенона на оси разряда $N_{Xe} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$



а)



б)

Рис. 5. Радиальные распределения концентраций атомов тория (а) и ионов тория (б) вблизи поверхности катода при разной начальной концентрации атомов тория N_{Th}^0 на поверхности катода. Разрядный ток – 10 А, концентрация атомов ксенона на оси разряда $N_{Xe} = 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Чрезвычайно интересный результат был получен при расчете радиального распределения концентрации атомов тория вблизи поверхности катода. На рис. 5а показано распределение N_{Th} , которое дает максимум распределения при удалении от оси разряда. Максимум распределения заметнее при больших концентрациях атомов тория. При этом в распределении плотности ионов тория максимума не наблюдается, что видно из рис. 5б, на котором приведено радиальное распределение ионов тория N_{Th}^+ в той же точке. На первый взгляд, этот результат трудно объяснить физически, однако основания для возникновения получаемого максимума N_{Th} имеются. На рис. 6 схематично показана эмиссия тория из катода. Если полагать, что основной поток атомов тория направлен перпендикулярно поверхности катода, то с острия катода поток в осевом направлении должен быть существенно меньше, чем с боковых поверхностей. Реальная эллипсоидальная геометрия несколько отличается от схематичной, но в целом, как мы полагаем, эффект останется. Если рассчитывать распределение N_{Th} поперек оси разряда в декартовых координатах, то видно, что возможно появление максимумов. При этом эффект будет уменьшаться по мере удаления от катода (сравните распределения по линиям

1, 2 и 3). Распределение ионов тория, как уже отмечалось, максимума не имеет. Причиной последней зависимости является то, что вблизи острия катода температура плазмы выше (напряженность поля, как можно заключить из соотношения (1), уменьшается при движении от оси вдоль линий 1, 2, 3), и поэтому концентрация ионов тория на оси оказывается выше, чем на периферии, даже при меньшей концентрации атомов тория.

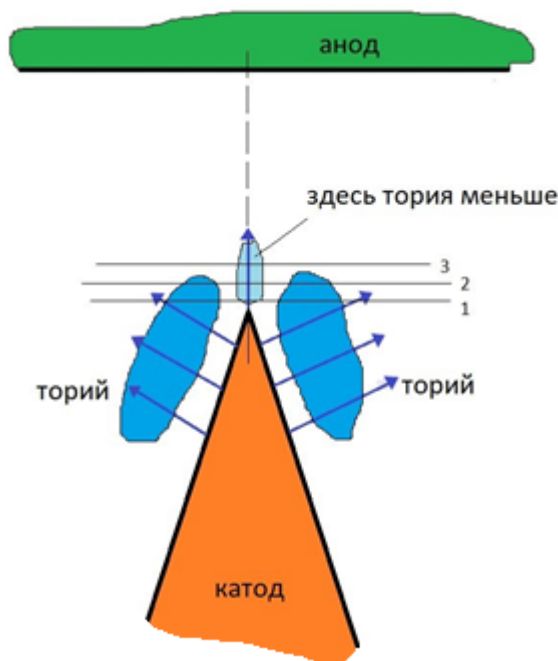


Рис. 6. К вопросу о возникновении максимума концентрации атомов тория вблизи поверхности катода

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 20-32-90055 Аспиранты, 3 сентября 2020 г.

Литература

1. Рохлин Г.Н. Разрядные источники света. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 674–696.
2. Lisnyak M., Cunha M., Bauchire J., Benilov M. Numerical modeling of high pressure arc discharges: matching LTE arc core with the electrodes // Journal of Physics D: Applied Physics. 2017. – Vol. 50, № 31. – Pp. 315203.
3. Bergner A., Scharf F.H., Kuhn G., Ruhrmann C., Hoebing T., Awakowicz P., Mentel J. Simulations of the hot core mode of arc attachment at a thoriated tungsten cathode by an emitter spot model // Plasma Sources Sci. Technol. – 2014. – Vol. 23, № 5. – Pp. 054005-054017.
4. Chittka U., Postma P., Schlager W. Electrodes for gas discharge lamps // Applied Surface Science I (surface science). – 1997. – Vol. 11. – Pp. 302–310.
5. Bouwknecht A., Nienhuis H., Schipper D.J., Tielemans P.A.W. Electrodes in discharge lamps // Philips tech. Rev. – 1975. – Vol. 35. № 11/12. – Pp. 356–359.
6. Sillero J.L., Ortega D., Munoz-Serrano E., Casado E. An experimental study of thoriated tungsten cathodes operating at different current intensities in an atmospheric plasma torch // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2010. – Vol. 43, № 18. – P. 185204.

7. Reinelt J., Westermeier M., Ruhrmann C., Bergner A., Awakowicz P., Mentel J. Investigating the dependence of the temperature of high-intensity discharge (HID) lamp electrodes on the operating frequency by pyrometric measurements // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2011. – Vol. 44, № 9. – P. 95204.
8. Zhu P., Lowke J. J., Morrow R. A unified theory of free burning arcs, cathode sheaths and cathodes // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1992. – Vol. 25, № 9. – P. 1221–1230.
9. Wendelstorf J., Wohlfahrt H., Simon G. Two-temperature, two-dimensional modeling of cathode hot spot formation including sheath effects – application to high pressure xenon arc lamps // Abstracts of 26th IEEE International Conference on Plasma Science (Cat. № 99CH36297). June 1999 (Corpus ID: 118162908). – Monterrey, CA, USA. – P. 240.
10. Baeva M., Uhrlandt D., Benilov M. S., and Cunha M.D. Comparing two non-equilibrium approaches to modeling of a free-burning arc // Plasma Sources Sci. Technol. – 2013. – Vol. 22. – Pp. 065017-065025.
11. Baeva M. Non-equilibrium modeling of tungsten-inert gas arcs // Plasma Chem. Plasma Process. – 2017. – Vol. 37. – Pp. 341–370.
12. Minayeva O.B., Doughty D.A. Influence of the Cathode Composition on the Performance of High Pressure Short Arc Xenon Lamps // 59th GEC Conference. – Columbus, OH, 2006.
13. Бекман И.Н. Радиохимия. Т. II: Радиоактивные элементы. – М.: Издатель Мархитин П.Ю., 2014. – С. 129–136.
14. Waymouth J.F. LTE and Near-LTE Lighting Plasmas // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1991. – Vol. 19, № 6. – P. 1003.
15. Korn A.G., Korn T.M. A guide to mathematics for scientists and engineers. – Moscow: Nauka, 1973. – 832 p.
16. Timofeev N.A., Sukhomlinov V.S., Zissis G., Mukharaeva I. Yu. Dupuis P. Simulation of an Ultrahigh-Pressure Short-Arc Xenon Discharge Plasma // Technical Physics. – 2019. – Vol. 64, № 10. – Pp. 1473–1479.
17. Тимофеев Н.А., Сухомлинов В.С., Зиссис Ж., Мухараева И.Ю., Михайлов Д.В., Мустафаев А.С., Дюпуа П., Солихов Д.К., Бородин В.С. Моделирование короткодугового ксенонового разряда сверхвысокого давления с учетом эмиссии материала катода в разрядный промежуток // Материалы XI Всероссийской конф. по физической электронике (ФЭ-2020), Махачкала, 26–29 окт. 2020 г. – Махачкала, 2020. – С. 43.

Поступила в редакцию 3 февраля 2021 г.

UDC 537.52, 621.387

DOI: 10.21779/2542-0321-2021-36-1-39-47

Spatial Characteristics of a Xenon High Pressure Discharge

I.Yu. Mukharaeva, V.S. Sukhomlinov, N.A. Timofeev, D.V. Mikhaylov, A.A. Smirnova

Saint Petersburg State University; 199034, Russia, Saint Petersburg, Universitetskaya Embankment, 7-9; niktimof@yandex.ru

Plasma spatial characteristics of a short-arc xenon discharge of high (super-high) pressure, which is widely used as a light source, are studied taking into account the evaporation of cathode material, thorium (such light sources usually have tungsten cathodes doped with thorium), into the discharge volume. To solve the problem five equations are written and resolved for the main plasma

characteristics: the strength of the electric field, plasma temperature, concentration of thorium atoms and densities of thorium and xenon ions. The consideration is carried out on the base of the model developed for the discharge of real geometry, the ellipsoidal coordinates as the most appropriate being used. This representation makes it possible to obtain straight away the spatial distribution of the electric field strength in ellipsoidal coordinates that, in turn, defines the other plasma characteristics and, first of all, the plasma temperature. The spatial distributions of the electric field strength, plasma temperature, concentration of thorium atoms and densities of thorium and xenon ions are obtained for the typical conditions of xenon short-arc lamps. The radial distribution of thorium atoms near the cathode shows a very interesting dependence with a maximum, which at first glance is rather unexpected. This fact is interpreted using physical considerations and geometric picture of the evaporation of thorium atoms from the cathode. The obtained data are important for the optimization of optical, lighting, and energetic characteristics of light sources on the base of arc discharges in rare gases. The data can also be fruitful for the study of other high current high pressure discharges with electrodes doped with some lightly ionized additives (thorium, rare earth elements etc.).

Keywords: *short-arc discharge, xenon, high pressure, thoriated cathode, volume discharge plasma characteristic distributions, modeling.*

Received 3 February 2021