

УДК 537.525:533.9.03

ВЛИЯНИЕ БАЛЛАСТНОЙ ОБЛАСТИ НА ПАРАМЕТРЫ ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА ПРИ СРЕДНИХ И ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

© 2022 г. С. А. Фадеев^{1, 2, *}, А. И. Сайфутдинов^{3, **}, Н. Ф. Кашапов^{1, 4}, А. А. Сайфутдинова³

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Институт механики и машиностроения – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, Казань, Россия

³Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева, Казань, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: fadееv.sergei@mail.ru

**E-mail: as.uav@bk.ru

Поступила в редакцию 08.07.2021 г.

После доработки 10.09.2021 г.

Принята к публикации 28.09.2021 г.

Исследовано поведение тлеющего разряда в цилиндрической трубке с присоединенной буферной балластной областью газа в диапазоне давлений от 10 до 400 Торр. Получены вольт-амперные характеристики тлеющего разряда в трубке с учетом влияния различных объемов буферной балластной области. Показано, что, варьируя объем буферной балластной области, можно изменять параметр E/N и плотность тока разряда.

DOI: 10.31857/S0040364422020041

ВВЕДЕНИЕ

Тлеющий разряд широко используется в различных областях современной науки и является основой множества практических приложений (квантовые генераторы, плазменная модификация поверхностей, тонкопленочное осаждение, биологическая дезактивация, спектрометрия и т.п.). В последние годы наблюдается резкий рост исследований тлеющего разряда при средних и высоких (вплоть до атмосферного) давлениях [1–9]. При этом свойства тлеющего разряда при таких условиях остаются мало изученными. В первую очередь это связано с трудностью экспериментальной диагностики локальных значений параметров плазмы. Зачастую о параметрах разряда приходится судить из измеренных интегральных характеристик разряда: вольт-амперной характеристики (ВАХ), оптических характеристик и т.п. [1, 3–7]. С другой стороны, при высоких давлениях возникают различные типы неустойчивостей, которые приводят к отличным от диффузной формы режимам горения разряда. В первую очередь причинами неустойчивости являются нагрев газа и изменение локальных значений концентраций нейтральных частиц в области горения разряда. Этот факт, в свою очередь, способствует изменению приведенного значения напряженности электрического поля E/N , а следовательно, и изменению транспортных характеристик электронов в плазме, констант скоростей неупругих процессов

и др. Все это может приводить к возникновению контракции [10–12].

Очевидно, что на настоящем этапе необходимо продолжить тщательное методическое экспериментальное исследование тлеющего разряда при средних и высоких давлениях. Современные работы по исследованию разрядов высокого давления проводятся, как правило, в достаточно объемных вакуумных камерах, где разряд не ограничен стенками и горит в атмосфере какого-либо газа [1, 3, 4], либо в стеклянных цилиндрических трубках [13–22]. В результате разработки и сборки экспериментальных установок на основе стеклянных трубок, как правило, существуют балластные области, основной функцией которых являются подключение устройств диагностики разряда, вакуумного поста, системы напуска газов, установка контейнеров для инъекции пылевых частиц в разрядную трубку и многое другое [13–16, 19, 23–29].

Аналогичные балластные области могут быть и в реальных устройствах, использующих в качестве рабочей среды низкотемпературную плазму. Например, в системах для отпаянных газовых лазеров, управляемых акустическими волнами, где в балластных областях установлены электроды, оптические окна, источник звуковых колебаний и др. [30, 31]. Наиболее привлекательными с практической точки зрения являются непрерывные газоразрядные CO_2 -лазеры, используемые для резки, сварки, гравировки, получения нанопорошков и

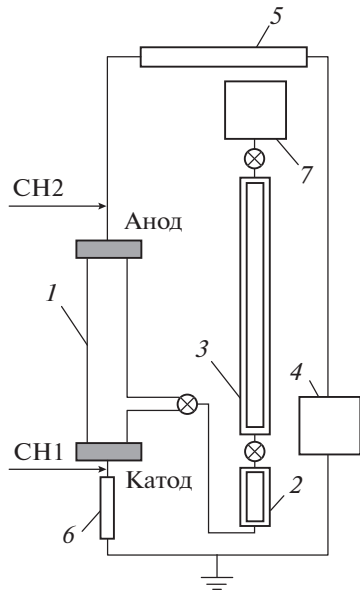


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

во многих других приложениях. В отпаянных CO_2 -лазерах обычно используется классическая схема тлеющего разряда в трубке. В трубке разряд получается более однородным в сравнении с лазерами, имеющими прямоугольную геометрию газоразрядной камеры, и качество излучения становится более высоким (предельно малая (дифракционная) расходимость излучения, высокая временная и пространственная когерентность излучения). В качестве активной среды CO_2 -лазеров используется тлеющий разряд в смеси газов CO_2 , N_2 и He , где последний может составлять до 80% [10, 32, 33]. Вследствие высокой теплопроводности гелия обеспечивается быстрый теплоотвод от активной среды, что делает разряд более устойчивым. Отпаянные газоразрядные системы, где буферным газом является гелий, используются при исследовании низкотемпературной плазмы [1, 3, 4] и плазменно-пылевых кристаллов [24–27].

В разрядах постоянного тока при средних и высоких давлениях в случае отсутствия должного охлаждения наблюдается нагрев газа, при котором существенная часть нейтральных частиц вытесняется не в пристеночные области, а в “холодные” буферные балластные области за счет большого градиента температуры. В силу справедливости уравнения состояния идеального газа при постоянстве давления увеличение температуры во всей разрядной области приведет к пропорциональному уменьшению концентрации нейтральных частиц. Это, в свою очередь, приводит к интересным особенностям горения разрядов и расширяет диапазон условий по давлению и разрядному току, существования тлеющего разряда с диффузным положительным столбом. Стоит отметить высокие показатели продольной, приведенной напря-

женности электрического поля E/N для разрядов в гелии, обеспечивающей значительный энерговклад в систему и способствующей наиболее яркому проявлению эффекта буферной балластной области.

Целью представленной работы является исследование влияния объема буферной балластной области на характеристики разряда для широкого диапазона токов (от 30 до 200 мА) и давлений (от 10 до 400 Торр).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования электрических характеристик и пространственной структуры тлеющего разряда была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Она представляет собой трубку 1 из термостойкого боросиликатного стекла (установленную вертикально) длиной 8.8 см и внутренним диаметром 2.6 см, заполненную гелием. Два плоскопараллельных электрода из меди, охлаждаемых водой, расположены на концах трубки.

На расстоянии 3.4 см от катода находится цилиндрический канал диаметром 1 см и длиной 5.7 см с объемом $0.1V_{\text{tube}}$, где V_{tube} — объем разрядной трубки. На конце канала установлен вакуумный кран, который соединяет его с буферной областью объемом $14V_{\text{tube}}$. Буферная область 2, 3 представляет собой два цилиндрических объема из диэлектрического материала, присоединенных к разрядной трубке и разделенных вакуумным краном. Таким образом, можно выделить три буферных области газа V_b , присоединенных к разрядному промежутку с объемами $0.1V_{\text{tube}}$, $0.56V_{\text{tube}}$ и $14.1V_{\text{tube}}$.

Тлеющий разряд зажигался и поддерживался источником питания постоянного тока Spellman STR30*6 (0–30 кВ) 4. Положительное напряжение подавалось на анод через балластный резистор 5, помещенный последовательно. Катод был заземлен. Источник работал в режиме контроля по току. Общее балластное сопротивление в электрической цепи 5, 6 составляло 40 кОм. Токи и напряжения на разрядном промежутке регистрировались с помощью осциллографа Rigol DSC2072A. Для измерения напряжения применялся высоковольтный щуп АСА-6039. В качестве токового шунта использовалась часть балластного сопротивления на 700 Ом 6 со стандартным щупом RP3300A. Напряжение на разряде определялось разницей показаний с каналов осциллографа CH2 и CH1. Измерения электрических характеристик разряда велись в квазистационарном режиме мягким регулированием тока в электрической цепи. При давлении p от 10 до 300 Торр и $p = 400$ Торр ВАХ снимались в течение 25 и 10 с соответственно. Давление в разрядной камере контролировалось с помощью датчика Баратрон 625D.

На первом этапе проводилась откачка трубки с буферными областями до давлений порядка 10^{-3} Торр с помощью форвакуумного насоса 7.

Далее в систему напускался гелий до атмосферного давления и вновь производилась откачка. Такая процедура выполнялась несколько раз. Затем снова напускался гелий до исследуемых давлений. Буферная область 2, 3 перекрывалась, и в цилиндрической трубке зажигался разряд. Снимались его ВАХ. На втором этапе восстанавливалось сообщение буферной области 2 с разрядной трубкой, снова снимались ВАХ и т.д.

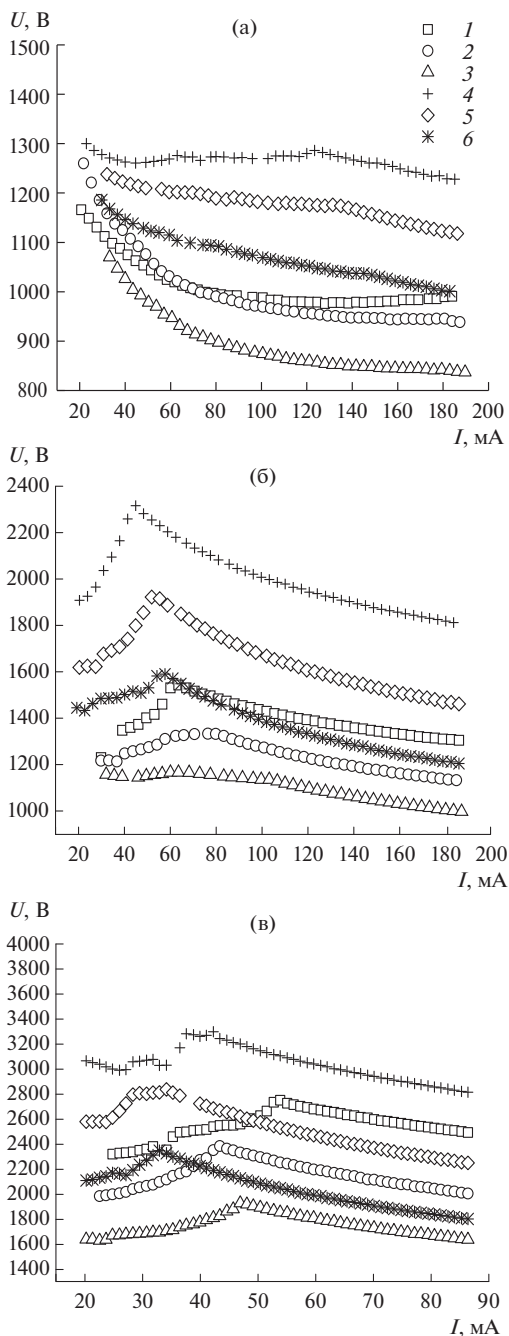


Рис. 2. ВАХ тлеющего разряда при различных объемах ББО газа: (а) – $p = 10$ Торр (1–3), 50 (4–6); (б) – 100 (1–3), 200 (4–6); (в) – 300 (1–3), 400 (4–6); 1, 4 – $V_b = 0.1V_{\text{tube}}$; 2, 5 – $0.56V_{\text{tube}}$; 3, 6 – $14.1V_{\text{tube}}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

ВАХ тлеющего разряда при разных присоединенных объемах ББО показаны на рис. 2. Электрический пробой гелия проходил при давлениях от 10 до 400 Торр. С увеличением давления газа p падение напряжения на разряде росло [1, 10]. Наблюдался нормальный тлеющий разряд, характеризующийся ростом площади токового пятна с увеличением разрядного тока, о чем косвенно может свидетельствовать факт увеличения площади свечений прикатодных областей. При давлениях от 100 Торр и выше (в пределах малых разрядных токов) на ВАХ наблюдается растущая часть, чем больше давление, тем меньше диапазон токов, в котором наблюдается растущая часть ВАХ (рис. 3). Стоит отметить, что разряд горит в нормальном режиме.

Поскольку эксперименты проводились при средних и высоких давлениях, в разряде преобладают молекулярные ионы гелия [34, 35]. Следовательно, доминирующим механизмом гибели заряженных частиц в плазменном объеме положительного столба является объемная диссоциативная рекомбинация. Как известно, разряду, контролируемому объемной рекомбинацией, свойственна растущая ВАХ [10, 36]. По мере увеличения разрядного тока возникает ионизационно-перегревная неустойчивость, которая в свою очередь приводит к контракции. ВАХ разряда при этом становится падающей. Отметим, что с ростом давления увеличивается частота столкновений, и прогрев газа по мере продвижения по ВАХ происходит быстрее, уменьшая диапазон токов, при которых существует растущая ВАХ, что подтверждается экспериментальными данными на рис. 3.

При токах от 50 мА и выше для давлений от 100 до 400 Торр наблюдается падающая часть ВАХ, что свидетельствует о неустойчивом режиме горения разряда. Падающая часть ВАХ является следствием разогрева газа [10], поэтому при больших давлениях и, как следствие, мощностях, вклады-

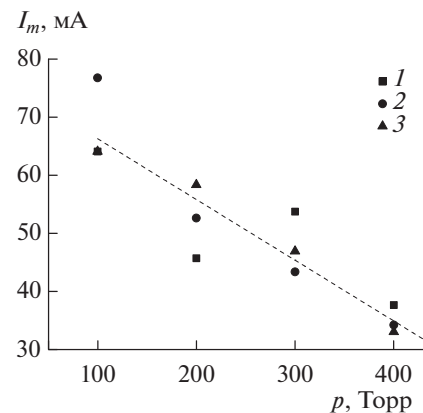


Рис. 3. Зависимость максимального тока I_m , при котором существует растущая часть ВАХ от давления: 1 – $V_b/V_{\text{tube}} = 0.1$, 2 – 0.56 , 3 – 14.1 ; штриховая линия – аппроксимация для случая $V_b = 14.1V_{\text{tube}}$.

ваемых в разряд в исследуемом диапазоне токов, падение имеет более крутой характер.

Восстановление сообщения между разрядной трубкой и ББО газа приводит к падению напряжения на разряде, визуальному увеличению ширины и радиальной однородности положительного столба (рис. 4). При этом в предположении совершенного газа увеличение объема буферной области ведет к уменьшению концентраций нейтральных частиц и, как следствие, к уменьшению напряжения горения разряда. Нейтральные частицы вытесняются в “холодную” ББО газа за счет градиента температуры, плотность нейтральной компоненты в разрядной области при этом падает. Наглядно данный процесс можно проследить на ВАХ разряда при давлении $p = 100$ Торр с объемом ББО $0.1V_{\text{tube}}$ и $p = 200$ Торр с объемом ББО $14.1V_{\text{tube}}$ (рис. 2б). ВАХ разрядов лежат в одном диапазоне напряжений и практически совпадают при давлениях, отличающихся вдвое, что свидетельствует о близких значениях параметра приведенного поля E/N для этих двух случаев. При увеличении давления наличие ББО приводит к большему снижению напряжения горения разряда, что объясняется повышением температуры в разряде и, как следствие, более эффективным вытеснением нейтральных частиц в “холодную” ББО.

В данной работе впервые наблюдался частично-контрагированный тлеющий разряд в гелии (рис. 4б). Стационарное, частично-контрагированное состояние тлеющего разряда в аргоне и смеси $\text{Ar}-\text{N}_2$ исследовалось в работах [37–40]. В условиях данного эксперимента во всех случаях контрагированная часть разряда была привязана к катоду. При увеличении тока граница между диффузной и контрагированной частями перемещалась от катода к аноду. После формирования частично-контрагированного состояния разряд в

таком режиме мог существовать в течение длительного времени без дополнительной регулировки параметров электрической цепи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследовано поведение тлеющего разряда в цилиндрической трубке с присоединенными к ней ББО газа. Сняты ВАХ тлеющего разряда в трубке с учетом трех объемов ББО, присоединенных к газоразрядному промежутку. Показано, что, варьируя объем ББО, можно изменять приведенное электрическое поле E/N и, как следствие, все основные характеристики тлеющего разряда, включая и плотность тока. Таким образом, используя такой простой инструмент, как ББО, возможно получать тлеющий разряд в гелии с однородным диффузным положительным столбом при достаточно высоких давлениях. Очевидно, что объем ББО является важным фактором, который необходимо учитывать при исследовании разрядов высокого давления и интерпретации полученных результатов. Отметим, что в литературе до сих пор этому вопросу не было уделено должного внимания. Влияние ББО имеет асимптотический характер, поэтому при изучении разрядов и сравнении результатов исследований в установках, в которых размер вакуумной камеры много больше газоразрядного промежутка, влияние объема ББО может быть несущественно. Однако, при исследовании разрядов, ограниченных стенками камеры, например в классических газоразрядных трубках, влияние ББО необходимо учитывать.

Исследование электрических характеристик разряда выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-71-10055), программная цифровая обработка данных с осциллографа проведена в рамках государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Andrade F.J., Wetzel W.C., Chan G.C.-Y., Webb M.R., Gamez G., Ray S.J., Hiefje G.M.* A New, Versatile, Direct-Current Helium Atmospheric-Pressure Glow Discharge // *J. Anal. At. Spectrom.* 2006. V. 21. P. 1175.
2. *Reghu T., Kumar M., Biswas A.K., Kukreja L.M.* A Sensitive Arc Detection Technique for Reliable Operation of High Repetition Rate TEA CO₂ Laser // *Opt. Laser Technol.* 2011. V. 43. P. 904.
3. *Arkhipenko V.I., Kirillov A.A., Safronau Ya.A., Simonchik L.V., Zgirouski S.M.* Self-Sustained DC Atmospheric Pressure Normal Glow Discharge in Helium: from Microamps to Amps // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2009. V. 18. 045013.
4. *Arkhipenko V.I., Kirillov A.A., Safronau Ya.A., Simonchik L.V.* DC Atmospheric Pressure Glow Microdischarges in the Current Range from Microamps Up to Amperes // *Eur. Phys. J. D.* 2010. V. 60. P. 455.
5. *Акишев Ю.С., Медведев М.А., Напартович А.П., Петряков А.В., Трушкин Н.И., Шафиков А.Г.* Особенности зондовых измерений в диффузной плазме в плотных газах с сильным электрическим полем // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. С. 390.

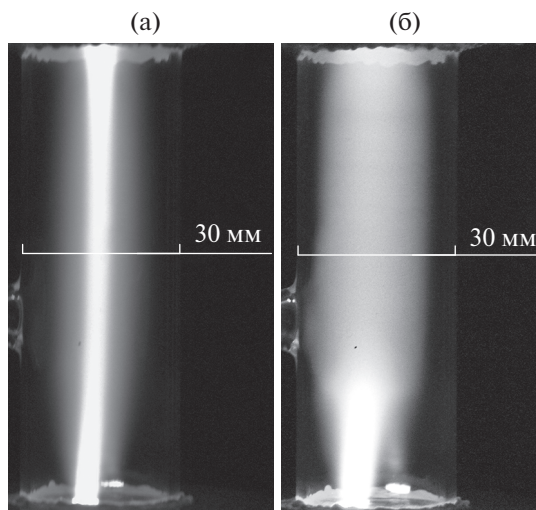


Рис. 4. Тлеющий разряд при влиянии различных объемов ББО газа ($p = 200$ Торр, $I = 40$ мА): (а) — $V_b = 0.1V_{\text{tube}}$; (б) — $14.1V_{\text{tube}}$.

6. *Joh H.M., Kang H.R., Chung T.H., Kim S.J.* Electrical and Optical Characterization of Atmospheric-pressure Helium Plasma Jets Generated with a Pin Electrode: Effects of the Electrode Material, Ground Ring Electrode, and Nozzle Shape // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2014. V. 42. P. 3656.
7. *Mob K.K., Reinsberg K.-G., Broekaert J.A.C.* Study of a Direct Current Atmospheric Pressure Glow Discharge in Helium with Wet Aerosol Sample Introduction Systems // *J. Anal. At. Spectrom.* 2014. V. 29. P. 674.
8. *Сайфутдинов А.И., Файрушин И.И., Кашанов Н.Ф.* Исследование различных сценариев поведения вольт-амперных характеристик микроразрядов постоянного тока атмосферного давления // *Письма в ЖЭТФ.* 2016. Т. 104. № 3. С. 178.
9. *Войтешинок В.С., Головин А.И., Егорова Е.К., Ломакин Б.Н., Туркин А.В., Шлойдо А.И.* Экспериментальное исследование эффективности высоковольтного тлеющего разряда как источника пучка убегающих электронов // *ТВТ.* 2017. Т. 55. № 5. С. 685.
10. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. Долгопрудный: Интеллект, 2009. 734 с.
11. *Суржиков С.Т.* Физическая механика газового разряда. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 640 с.
12. *Кудрявцев А.А., Смирнов А.С., Цендин Л.Д.* Физика тлеющего разряда. СПб.: Лань, 2010. 512 с.
13. *Васильяк Л.М., Поляков Д.Н., Фортвов В.Е., Шумова В.В.* Параметры положительного столба тлеющего разряда с пылевыми частицами // *ТВТ.* 2011. Т. 49. № 5. С. 643.
14. *Volynets A.V., Lopaev D.V., Rakhimova T.V., Chukalovskiy A.A., Mankelovich Yu.A., Popov N.A., Zotovich A.I., Rakhimov A.T.* N₂ Dissociation and Kinetics of N(⁴S) Atoms in Nitrogen DC Glow Discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2018. V. 51. 364002.
15. *Golubovskii Yu., Kalanov D., Maiorov V.* Radial Structure of the Constricted Positive Column: Modeling and Experiment // *Phys. Rev. E.* 2017. V. 96. 023206.
16. *Golubovskii Yu.B., Siasko A.V., Nekuchaev V.O.* Role of Thermal Effects in Neon and Argon Constricted Discharges // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2019. V. 28. 045007.
17. *Сайфутдинов А.И., Фадеев С.А., Сайфутдинова А.А., Кашанов Н.Ф.* Влияние акустических течений на структуру контрагированного тлеющего разряда в аргоне // *Письма в ЖЭТФ.* 2015. Т. 102. № 10. С. 726.
18. *Al-Khavat Sh.* Anode Spots in Glow Discharge in Neon and Helium // *J. Appl. Spectrosc.* 1996. V. 63. P. 752.
19. *Shi X., Wang X.B., Jin W., Demokan M.S.* Investigation of Glow Discharge of Gas in Hollow-core Fibers // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 91. P. 377.
20. *Завершинский И.П., Климов А.И., Молевич Н.Е., Сулак С.С.* Акустически индуцированное формирование спиральных структур в закрученном потоке аргона в присутствии импульсно-периодического ВЧЕ-разряда // *ТВТ.* 2018. Т. 56. № 3. С. 472.
21. *Pugliese E., Meucci R., Euzzor S., Freire J.G., Gallas J.A.C.* Complex Dynamics of a DC Glow Discharge Tube: Experimental Modeling and Stability Diagrams // *Sci. Rep.* 2015. V. 5. 8447.
22. *Фадеев С.А., Сайфутдинов А.И.* Управление параметрами тлеющего разряда низкого давления в аргоне с помощью акустических течений // *Физика плазмы.* 2017. Т. 43. С. 919.
23. *Fortov V.E., Morfill G.E.* Complex and Dusty Plasmas: From Laboratory to Space. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010. 418 p.
24. *Фортвов В.Е., Хранак А.Г., Хранак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.* Пылевая плазма // *УФН.* 2004. Т. 174. С. 495.
25. *Maiorov S.A., Kodanova S.K., Dosbolayev M.K., Ramazanov T.S., Golyatina R.I., Bastykova N.Kh., Utegenov A.U.* The Role of Gas Composition in Plasma-dust Structures in RF Discharge // *Phys. Plasmas.* 2015. V. 22. 033705.
26. *Karasev V.Yu., Dzlieva E.S., Pavlov S.I., Ermolenko M.A., Novikov L.A., Maiorov S.A.* The Dynamics of Dust Structures under Magnetic Field in Stratified Glow Discharge // *Contrib. Plasma Phys.* 2016. V. 56. № 3–4. P. 197.
27. *Fedoseev A.V., Salnikov M.V., Demin N.A., Sukhinin G.I., Vasiliev M.M., Petrov O.F.* Experimental and Numerical Study of a Dust Cloud Formation in the Stratified Positive Column of a DC Glow Discharge in Helium // *Phys. Plasmas.* 2018. V. 25. 083710.
28. *Golubovskii Yu., Karasev V., Kartasheva A.* Dust Particle Charging in a Stratified Glow Discharge Considering Nonlocal Electron Kinetics // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2017. V. 26. 115003.
29. *Ding Z., Kudryavtsev A.A., Saifutdinov A.I., Sysoev S.S., Yuan C., Li S., Yao J., Zhou Z.* The Influence of the Ambipolar Field on the Levitation Conditions of Dust Particles in the Positive Column of the Glow Discharge with a Change the Spatial Orientation of the Discharge Tube // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2019. V. 47. P. 4391.
30. *Aramyan A.R., Galechyan G.A., Manukyan G.V.* Gas-discharge Acoustically Induced Laser // *Laser Phys.* 2007. V. 17. № 9. P. 1129.
31. *Арамян А.Р., Галечян Г.А., Манукян Г.В.* Газовый лазер, управляемый акустической волной // *Акуст. журн.* 2008. Т. 54. № 6. С. 895.
32. *Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Сер. Б. Т. XI-4. Газовые и плазменные лазеры / Гл. ред. Фортвов В.Е., отв. ред. Яковленко С.И. М., 2005. 822 с.*
33. *McDaniel E.W.* Applied Atomic Collision Physics. V. 3. Gas Lasers / Eds. McDaniel E.W., Nighan W.L. N.Y.: Acad. Press, 1982. 469 p.
34. *Kutasi K., Hartmann P., Bano G., Donko Z.* He⁺ Molecular Ions in Helium Glow Discharges: the Effect of Bulk Electron Temperature // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2005. V. 14. S1.
35. *Sakiyama Y., Graves D.B., Stoffels E.* Influence of Electrical Properties of Treated Surface on RF-excited Plasma Needle at Atmospheric Pressure // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2008. V. 41. 095204.
36. *Kent C.* Volume Recombination, Constriction, and Volt-Ampere Characteristics of the Positive Column // *Phys. Rev.* 1962. V. 126. P. 1235.
37. *Garscadden A., Lee D.A.* Forward and Backward-wave Moving Striations in the Constricted Discharge // *Int. J. Electron.* 1966. V. 20. P. 567.
38. *Dyatko N.A., Ionikh Yu.Z., Meshchanov A.V., Napartovich A.P.* Steady-State Partially Constricted Glow Discharge // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2011. V. 39. P. 2532.
39. *Ionikh Y.Z., Dyatko N.A., Meshchanov A.V., Napartovich A.P., Petrov F.B.* Partial Constriction in a Glow Discharge in Argon with Nitrogen Admixture // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2012. V. 21. 055008.
40. *Dyatko N.A., Napartovich A.P., Ionikh Y.Z.* Influence of Nitrogen Admixture on Plasma Characteristics in a dc Argon Glow Discharge and in Afterglow // *Atoms.* 2019. V. 7. № 1. P. 13.