УДК 537.533; 537.563.2

Д.Б. Золотухин, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс, А.В. Тюньков, Ю.Г. Юшков

Особенности генерации пучковой плазмы в изолированной металлической полости в форвакуумной области давлений

Представлены экспериментальные данные по измерению параметров плазмы, образованной в металлической полости ускоренным до энергий порядка единиц кэВ электронным пучком, который генерировался плазменным источником в форвакуумной области давлений (1–10 Па). Показано, что в случае изолированной металлической полости концентрация и температура пучковой плазмы выше, чем в заземленной полости или при свободном распространении электронного пучка. Результаты экспериментов свидетельствуют в пользу предположения о том, что основной механизм, обуславливающий более высокие параметры плазмы в изолированной полости, связан с дополнительным энерго вкладом вторичных электронов с ее внутренней поверхности.

Ключевые слова: пучковая плазма, изолированная полость, плазменный источник электронов, форвакуумная область давлений.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-42-45

Генерация плотной однородной плазмы в диэлектрической полости привлекательна для технологических процессов стерилизации внутренних поверхностей стеклянных и пластиковых сосудов, для чего обычно используются различные разновидности безэлектродного высокочастотного [1] или барьерного разрядов [2], реализуемых при повышенных давлениях, в том числе и при атмосферном давлении. Альтернативой вышеупомянутым разрядным системам может быть создание стерилизующей плазмы в диэлектрической полости при инжекции в нее ускоренного до энергий в несколько килоэлектронвольт электронного пучка, создающего плазму в результате ионизации газа. Сама возможность получения пучковой плазмы при инжекции пучка в диэлектрическую полость во многом связана с появлением и совершенствованием форвакуумных источников электронов с плазменным катодом [3–9], надежно работающих при довольно высоких давлениях (порядка единиц и десятков паскаль) даже химически активных газов (таких, как кислород). К преимуществам электронно-пучкового синтеза плазмы следует отнести значительную простоту и эффективность, более широкий спектр возможностей управления параметрами плазмы, а также нетребовательность к качеству вакуума.

Ранее авторами работы [3] было показано, что параметры пучковой плазмы в диэлектрической полости (плотность плазмы n и температура электронов T_e) примерно в два раза выше соответствующих параметров плазмы, генерируемой в условиях свободного распространения электронного пучка, при прочих равных параметрах эксперимента.

Численное моделирование генерации плазмы [4] показало, что повышенную концентрацию и температуру электронов, характерные для плазмы внутри диэлектрической или металлической полости, можно объяснить дополнительным энерго вкладом в плазму эмитированных из внутренней поверхности вторичных электронов.

Цель настоящей работы заключалась в дальнейшем экспериментальном исследовании факторов,

способствующих повышению параметров плазмы, генерируемой в полости.

Техника и методика эксперимента

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Источник электронов, функционирующий в постоянном режиме [6] на основе тлеющего разряда с полым катодом, генерировал электронный пучок с током $I_b = 10\text{--}40\text{ мА}$ и энергией U_a до 10 кэВ. Вакуумная камера 2 откачивалась спиральным форвакуумным насосом до предельного давления около 1 Па, а затем напуском рабочего газа (воздуха) давление устанавливалось в диапазоне (2–10 Па). Электронный пучок 3 диаметром 4–6 мм распространялся в камере, ионизовал газ, инжектировался в металлическую полость, представляющую собой тонкостенный стакан с массивным дном, внутренним диаметром 4 см и длиной 20 см, и создавал внутри нее пучковую плазму 6. Стенки 4 полости были электрически соединены с ее дном 5 или могли быть удалены.

Рис. 1. Экспериментальная установка по изучению особенностей генерации плазмы в изолированной металлической полости: 1 – электронный источник; 2 – вакуумная камера; 3 – пучок электронов; 4, 5 – стенки и дно металлической полости; 6 – пучковая плазма; 7 – зонд Ленгмюра; 8 – ключ; 9 – схема зондовых измерений; 10 – источник напряжения на полость

С точки зрения изучения условий генерации плазмы изолированная металлическая полость явля-

ется хорошей экспериментальной моделью для изучения процессов инжекции пучка в диэлектрическую полость. Обнаруженные закономерности для случая генерации пучковой плазмы в изолированной металлической полости могут быть распространены на случай диэлектрической полости [10] в предположении подобия механизмов, ответственных за обеспечение нейтрализации заряда, приносимого пучком на поверхность упомянутых полостей. Параметры пучковой плазмы исследовались одиночным плоским зондом Ленгмюра 7, который вводился в полость через отверстие в боковой стенке полости, которое находилось на ее полувысоте. Обработка зондового сигнала и вычисление параметров плазмы осуществлялись по методике, широко представленной в литературе [11].

«Плавающий» потенциал полости U_h относительно земли измерялся вольтметром. Также в процессе эксперимента была возможность заземлять полость с использованием ключа 8. В ряде экспериментов на полость подавался отрицательный относительно заземленных стенок камеры потенциал амплитудой до 100 В от источника U_b постоянного смещения 10.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Параметры пучковой плазмы (концентрация n , температура электронов T_e , потенциал плазмы ϕ_p), созданной внутри металлической полости, и плавающий потенциал этой полости как функция давления приведены на рис. 2.

Видно, что температура электронов и модуль потенциала плазмы, а также характер зависимости этих параметров от давления отличаются для случаев полости в заземленном и изолированном состоянии. В случае заземленной полости эти параметры такие же по величине и знаку, как и в плазме, генерируемой при свободном распространении электронного пучка в камере, что может быть связано с одинаковыми условиями ухода зарядов разных знаков из пучковой плазмы в радиальном и осевом направлениях в двух упомянутых случаях (в заземленной полости и свободном пространстве), поскольку сток частиц беспрепятственный.

Однако в изолированной полости, лишенной специально выделенного канала стока заряда на землю, температура электронов и концентрация плазмы заметно выше, чем в заземленной, и эта разница резко увеличивается в области низких давлений (2–5 Па). Следует отметить, что с уменьшением давления возрастает модуль разности потенциалов плазмы в изолированной полости и плавающего потенциала изолированной полости (рис. 2, б, кривые 2 и 3). Из-за внесения пучком в полость отрицательного заряда потенциал плазмы в изолированной полости отрицателен, а его модуль возрастает с понижением давления и повышением тока и энергии пучка. Плавающий потенциал облучаемой пучком изолированной полости также отрицателен относительно земли (от –5 до –50 В), и заметно снижается с увеличением энергии пучка и понижением давления.

Рис. 2. Температура электронов T_e и концентрация плазмы n (а), а также потенциал плазмы ϕ_p и плавающий потенциал U_h изолированной полости (б), как функции давления: а) 1, 3 – полость заземлена; 2, 4 – полость изолирована; б) 1 – ϕ_p в заземленной полости; 2 – ϕ_p в изолированной полости, 3 – U_h .

Параметры эксперимента: $I_b = 25 \text{ mA}$, $U_a = 3 \text{ кВ}$

Рассмотрим поведение параметров плазмы в металлической полости в случае, когда в ее объем вносится энергия дополнительным непрерывным источником питания, с регулируемым напряжением U до 100 В (рис. 3).

Видно, что с увеличением напряжения, подаваемого на полость, температура электронов также возрастает. В отсутствие стенок, ограничивающих плазму, т.е. когда напряжение от источника подается только на дно полости, изменения параметров плазмы не происходит. Температура электронов в плазме, созданной в заземленной полости, и в случае, когда у нее удалены стенки, имеет величину порядка 0,5 эВ и, как следует из рис. 3, практически не зависит от потенциала дна. С повышением модуля U_h до 32 В T_e возрастает до 5 эВ, но при дальнейшем росте потенциала полости T_e достигает насыщения вследствие установления равенства потока тепловых электронов в объем плазмы и вне его. Рост подаваемого напряжения на полость сопровождается не только визуально наблюдаемым повышением интенсивности свечения плазмы, но и появлением в оптическом спектре дополнительных линий, характерных для возбужденных молекул азота с низким (по-

рядка 13 эВ) порогом возбуждения. Следует отметить, что такие линии не наблюдались в плазме, создаваемой в заземленной полости, и появлялись при изолировании этой полости от земли, что является дополнительным фактом, свидетельствующим о повышении параметров плазмы в изолированной полости.

Рис. 3. Температура электронов T_e (а) и концентрация плазмы n (б), созданной в металлической полости (1), и при отсутствии ее боковых стенок (2), в зависимости от напряжения смещения. Параметры: $I_b = 20$ мА, $p = 2,5$ Па, $U_a = 4$ кВ

Рисунок 3 свидетельствует о заметном влиянии самого металлического объема, содержащего плазму, на ее параметры, в случае подачи электрического потенциала на этот объем относительно земли. Дополнительной причиной может являться увеличенное время жизни горячих электронов вследствие многократной осцилляции внутри отрицательно равномерно заряженной полости, что в конечном итоге приводит не только к сохранению ими своей энергии, но и более эффективному нагреву за счет энергии, поставляемой от пучка или источника питания. Эти результаты показывают, что благодаря упомянутому выше тестовому эксперименту удалось воспроизвести эффект, свойственный пучковой

плазме в диэлектрической полости, а именно, повышенные значения параметров плазмы, что проливает свет на его механизм.

Заключение

Представленные экспериментальные результаты свидетельствуют в пользу объяснения факта повышенных значений температуры электронов и концентрации плазмы, генерируемой непрерывным электронным пучком в форвакуумной области давлений, внутри изолированной металлической или диэлектрической полости. Объяснение сводится к внесению в плазму дополнительной энергии вторичными электронами, которые эмитируются с поверхности полости и ускоряются в разности потенциалов между плазмой и внутренней поверхностью полости, поскольку, как следует из проведенного эксперимента, энергия плазменных электронов повышается за счет значительной разности потенциалов между плазмой и внутренней поверхностью полости, причем эта разность может быть сформированной как электронным пучком, так и внешним источником постоянного напряжения.

Следует подчеркнуть, что в случае заземленной полости, при наличии такого же по величине электронного потока с поверхности полости, вклад вторичных электронов в увеличение температуры электронов оказывается мал ввиду малости энергии, набираемой ими в низковольтной пристеночной разности потенциалов. Полученные результаты могут быть интересны широкому кругу специалистов, занимающихся разработкой и изготовлением различного типа плазмохимических реакторов на основе электронно-пучковой плазмы [12–17], а также представляют собой экспериментальный базис для изучения особенностей функционирования и создания нового типа целенаправленных пучково-плазменных реакторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 16-08-00183.

Литература

1. Masaoka S. Plasma sterilization of polyethylene terephthalate bottles by pulsed corona discharge at atmospheric pressure // *Biocontrol Sci.* – 2007. – Vol. 12, № 2. – PP. 59–63.
2. Kuzminova A. Etching of polymers, proteins and bacterial spores by atmospheric pressure DBD plasma in air / A. Kuzminova, T. Kretková, O. Kylián et al. // *Journal of Physics D: Applied Physics.* – 2017. – Vol. 50, №13. – P. 135201.
3. Золотухин Д.Б. Генерация пучковой плазмы форвакуумным источником электронов в объеме, ограниченном диэлектрическими стенками / Д.Б. Золотухин, В.А. Бурдовицин, Е.М. Окс // *ЖТФ.* – 2015. – Т. 85, № 5. – С. 142–144.
4. Zolotukhin D.B. Generation of uniform electron beam plasma in a dielectric flask at fore-vacuum pressures / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Plasma Sources Sci. Technol.* – 2015. – Vol. 25, № 2. – P. 015001.
5. Zolotukhin D.B. Sterilization of dielectric containers using a fore-vacuum pressure plasma-cathode electron source / D.B. Zolotukhin, V.A. Burdovitsin, E.M. Oks, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2015. – Vol. 652. – P. 012044.

6. Burdovitsin V.A. Fore-vacuum plasma-cathode electron sources / V.A. Burdovitsin, E.M. Oks // *Laser and particle beams*. – 2008. – Vol. 26, №4. – PP. 619–635.

7. Zolotukhin D.B. Modified quadrupole mass analyzer RGA-100 for beam plasma research in forevacuum pressure range / D.B. Zolotukhin, A.V. Tyunkov, Yu.G. Yushkov, E.M. Oks // *Rev. Sci. Instrum.* – 2015. – Vol. 86, №12. – P. 123301.

8. Бурдовитсин В.А. Опыт разработки и применения форвакуумных плазменных электронных источников / В.А. Бурдовитсин, И.Ю. Бакеев, А.А. Зенин и др. // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т.19, № 2. – С. 5–10.

9. Zolotukhin D.B. Gas-metal e-beam-produced plasma for oxide coating deposition at fore-vacuum pressures / D.B. Zolotukhin, V. A. Burdovitsin, E.M. Oks et al. // Доклады ТУСУРа. – 2016. – Т. 19, № 4. – С. 10–12.

10. Золотухин Д.Б. Особенности профиля концентрации пучковой плазмы в диэлектрической полости при повышенных энергиях пучка / Д.Б. Золотухин, А.А. Зенин // Изв. вузов. Физика. – 2016. – Т. 59, № 9/2. – С. 220–222.

11. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Атомиздат, 1968. – 286 с.

12. Vasilieva T.M. The Electron Beam Plasma treatment – the novel approach to the controllable modification of the proteins and polysaccharides bioactivity / T.M. Vasilieva, A.H. Mahir, M.N. Vasiliev // *Sensor Lett.* – 2008. – Vol. 6, № 4. – PP. 496–501.

13. Бычков В.Л. Электронно-пучковая плазма. Генерация, свойства, применение / В.Л. Бычков, М.Н. Васильев, А.С. Коротеев. – М.: Росвузнаука, 1993. – 167 с.

14. Brown I.G. The physics and Technology of Ion Sources. – Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2004. – 387 p.

15. Блейхер Г.А. Эрозия поверхности твердого тела под действием мощных пучков заряженных частиц / Г.А. Блейхер, В.П. Кривобоков. – Новосибирск: Наука, 2014. – 248 с.

16. Коваленко В.П. Электронные сгустки в нелинейном коллективном взаимодействии пучков с плазмой // Успехи физических наук. – 1983. – Т. 139, №2. – С. 223–263.

17. Ткач Ю.В. Световое индуцированное излучение плазменно-пучкового разряда / Ю.В. Ткач, Я.Б. Файнберг, Л.И. Болотин и др. // Письма в ЖЭТФ. – 1967. – № 2. – С. 956–960.

Золотухин Денис Борисович

Канд. физ.-мат. наук,

инженер-исследователь каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-69

Эл. почта: zolotukhinden@gmail.com

Бурдовитсин Виктор Алексеевич

Д-р техн. наук, профессор каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 49-17-76

Эл. почта: burdov@fet.tusur.ru

Окс Ефим Михайлович

Д-р техн. наук, зав. каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 49-17-76

Эл. почта: oks@fet.tusur.ru

Тюнков Андрей Владимирович

Канд. техн. наук, с.н.с. каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-69

Эл. почта: andrew71@sibmail.com

Юшков Юрий Георгиевич

Канд. техн. наук, с.н.с. каф. физики ТУСУРа

Тел.: (382-2) 41-33-69

Эл. почта: Yuyushkov@sibmail.com

Zolotukhin D.B., Burdovitsin V.A., Oks E.M., Tyunkov A.V., Yushkov Yu.G.

Features of generating beam plasma in isolated metallic hollow in fore-vacuum pressure range

We present the results on the measurements of parameters for beam plasma produced in the metallic hollow by accelerated electron beam from fore-vacuum plasma-cathode electron source. It is shown that the plasma parameters within isolated metallic cavity are higher than in case when the plasma is formed in grounded hollow or without it. Experimental results confirm our assumption that the main mechanism responsible for higher plasma parameters in isolated metallic hollow is related to the additional energy input by secondary electrons accelerated in sheaths.

Keywords: beam plasma, isolated hollow, plasma electron source, fore-vacuum pressure.