

Gridless Ion Source Operational Parameters Influence on the Reflector Potential Value

Denis S. Manegin

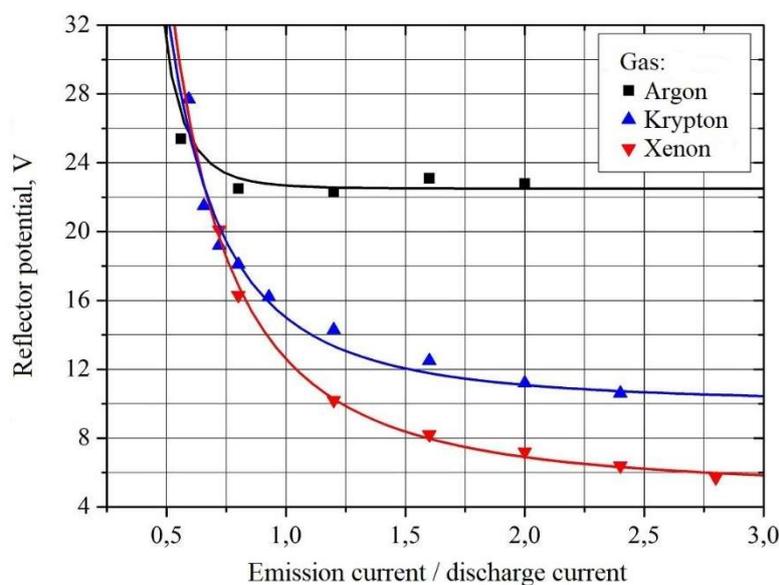
SEC "Ion Plasma Technologies", Bauman Moscow State Technical University,
Moscow, 105005, Russia

manegin@bmstu.ru

Abstract

Sputtering of the gridless ion sources (GIS) discharge chamber rear wall, called a reflector, is a serious problem of the ion assisted deposition technology. At the same time, one of the factors, closely related to the intensity of the reflector sputtering, is the electrical potential, that it acquires under the discharge conditions. In this paper the influence of the GIS operational parameters on the value of the reflector potential was investigated. It is established, that the working gas used and the ratio of the emission current from the cathode to the discharge current are of the greatest importance.

Keywords: thin films, gridless ion source, floating potential



The gridless ion source reflector potential dependences on the working gas and the ratio of the emission current from the cathode to the discharge current for the discharge current 6.25 A and discharge voltage 100 V

УДК 537.534.2

Влияние параметров работы бессеточного ионного источника на величину потенциала отражателя

Д. С. Манегин

*НОЦ «Ионно-плазменные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана,
Россия, Москва, 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, с.1*

manegin@bmstu.ru

Аннотация

Распыление задней стенки разрядной камеры бессеточных ионных источников (БИИ), называемой отражателем, является серьёзной проблемой технологии ионного ассистирования. При этом одним из факторов, тесно связанных с интенсивностью распыления отражателя, является электрический потенциал, который он приобретает в условиях горения разряда. В настоящей работе исследовалось влияние параметров работы БИИ на величину потенциала отражателя. Установлено, что наибольшее значение имеют используемый плазмообразующий газ и соотношение тока эмиссии с катода и разрядного тока.

Ключевые слова: тонкие плёнки, бессеточный ионный источник, плавающий потенциал

1. Введение

В настоящее время активное применение и совершенствование методов получения тонкоплёночных покрытий являются практически необходимыми условиями развития многих отраслей промышленности [1-3]. В частности, при изготовлении элементов оптических систем широко используется ионное ассистирование. Суть данной технологии заключается в том, что параллельно основному процессу нанесения покрытия происходит его обработка ионным пучком, что позволяет добиться улучшения многих целевых параметров, включая чистоту и адгезию [4]. При этом для получения гомогенной плёнки без физических дефектов равномерность распределения плотности ионного тока по обрабатываемой поверхности должна быть как можно большей, а энергия ионов должна составлять порядка 10^{-2} эВ [5].

С учётом этих требований оптимальным ионным источником для промышленного применения в процессах ассистирования является бессеточный ионный источник (БИИ, End-Hall) [6]. Наибольшее распространение получила конструктивная схема, в которой задняя стенка разрядной камеры БИИ, называемая отражателем, электрически изолирована от остальных элементов ионного источника. При этом в процессе работы БИИ отражатель подвергается ионному распылению. Это накладывает ограничение на его ресурс, а также приводит к появлению потока распылённого материала, направленного в сторону обрабатываемой поверхности. Содержание материала отражателя в полученном покрытии может достигать нескольких тысяч атомов на миллион атомов целевого материала, что является слишком большим загрязнением для некоторых процессов [7, 8].

Для того чтобы аналитически оценить поток распыляемого материала и ресурс отражателя, необходимо знать величину его потенциала относительно опорного электрода (как правило, заземлённого корпуса источника) в условиях горения разряда. При этом существующие расчётные модели БИИ не позволяют сделать однозначных выводов ни о величине, ни о связи потенциала отражателя с условиями работы ионного источника. Экспериментальные данные по этому вопросу также практически нигде не публиковались. По этой причине

целью настоящего исследования стало изучение влияния параметров разряда в БИИ на величину потенциала отражателя.

2. Факторы, определяющие величину потенциала отражателя

По своей сути БИИ является ускорителем с замкнутым дрейфом электронов (УДЗЭ), где для поддержания горения разряда используются скрещенные электрическое и магнитное поля. От прочих УЗДЭ его отличают коническая форма газоразрядной камеры и расходящаяся конфигурация магнитного поля. Силовые линии магнитного поля преимущественно параллельны стенкам газоразрядной камеры и проходят через отражатель (рис. 1). Для инициации и поддержания горения разряда, а также для компенсации избыточного положительного заряда в ионном пучке используется внешний термоэмиссионный катод.

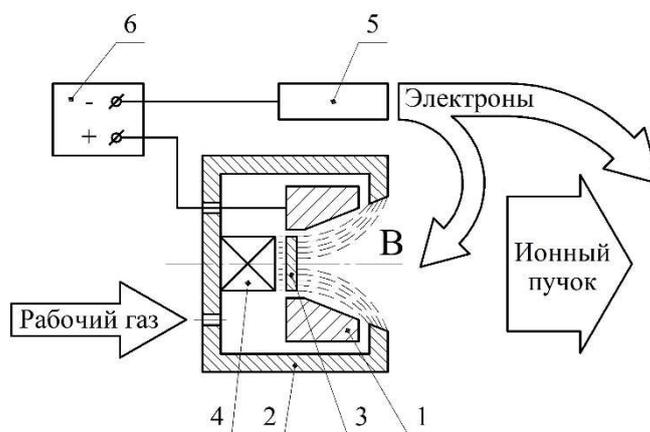


Рис. 1. Схема бессеточного ионного источника [9]:
1 – анод; 2 – магнитопровод; 3 – отражатель; 4 – магнит; 5 – катод;
6 – источник питания разряда, В – силовые линии магнитного поля

Отражатель выполняется из электропроводящих материалов, и, будучи изолированным, в условиях горения разряда приобретает плавающий потенциал. В общем случае его значение определяется из условия равенства поступающих на него ионного и электронного потоков. При этом в силу большей подвижности электронов плавающий потенциал отрицателен относительно локального потенциала плазмы. Для изотермичной плазмы при известной температуре он может быть рассчитан следующим образом [10]:

$$\varphi_{fl} = - \left(\frac{kT_e}{e} \right) \cdot \ln \sqrt{\frac{m_i}{m_e}}, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; T_e – температура электронов; e – элементарный заряд; m_i – масса иона; m_e – масса электрона.

Однако для газоразрядной камеры БИИ ситуация кардинально отличается. С одной стороны, подвижность электронов вдоль силовых линий магнитного поля существенно выше, чем поперёк, и тем более выше подвижности ионов. С учётом конфигурации магнитного поля в БИИ это должно приводить к приобретению отражателем отрицательного потенциала для выравнивания потоков. С другой стороны, в радиальном направлении поперёк силовых линий магнитного поля на электроны действует значительное электростатическое поле, тянущее их к аноду и ограничивающее подвижность в сторону задней стенки. При этом плазма в разряде БИИ неизотермична, что делает формулу (1) неприменимой. В дополнение к этому, для практического применения необходимо знать знак и величину плавающего потенциала отражателя относительно опорного электрода – как правило, земли.

В первых публикациях Г. Кауфмана, содержащих описание БИИ, говорится о том, что приобретаемый отражателем потенциал положителен относительно земли [11]. В. В. Журин в своей книге описывает его величину как равную примерно половине от разрядного напряжения и отмечает, что данная величина зависит в том числе от расстояния между отражателем и анодом [6]. При этом отношение ионного тока на отражатель к току ионов, формирующих пучок, составляет от 10^{-4} до 10^{-2} . Однако подробной информации о том, при каких условиях были получены данные значения, не приводится.

Наиболее очевидными параметрами, определяющими потенциал отражателя, являются ток и напряжение разряда. Ток разряда напрямую связан с количеством заряженных частиц в газоразрядной камере, в то время как напряжение влияет на величину и распределение потенциала плазмы. С учётом того, что плавающий потенциал определяется балансом ионного и электронного токов, а электронная компонента в периферийной области разрядной камеры замагничена, потенциал отражателя также должен зависеть от конфигурации магнитного поля и величины его индукции. Существенное влияние должен оказывать используемый рабочий газ, от которого зависит в том числе скорость генерации заряженных частиц.

Другим немаловажным фактором является наличие внешнего источника электронов – термоэмиссионного катода. Для описания его влияния на работу БИИ обычно используется величина тока эмиссии, протекающего в цепи электрического смещения катода, или его отношения к току разряда. Повышение тока эмиссии при неизменных значениях расхода рабочего газа и тока разряда приводит к падению разрядного напряжения и росту ионного тока, что иногда используется в технологии тонких плёнок [6, 12]. Таким образом, ток эмиссии с катода во многом определяет баланс потоков заряженных частиц в газоразрядной камере БИИ, что позволяет сделать вывод о его прямом влиянии на плавающий потенциал.

В существующих расчётных работах, посвящённых численному моделированию разряда в БИИ, потенциал отражателя используется скорее в качестве вспомогательной величины и подробно не рассматривается [13, 14]. В диссертации [14] приводится следующее уравнение, включающее в себя потенциал отражателя:

$$\sum A n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_e}} \cdot \exp\left(e \frac{\varphi_{ref} - \varphi_p}{kT_e}\right) = I_i, \quad (2)$$

где A – элемент поверхности отражателя; n_e – концентрация электронов; φ_{ref} – потенциал отражателя; φ_p – потенциал плазмы; I_i – ионный ток на отражатель.

Однако данное уравнение при постановке задачи, рассматриваемой в работе [14], не имеет аналитического решения. В этом случае плавающий потенциал может быть найден лишь перебором значений до тех пор, пока равенство не будет выполняться. В дополнение к этому, использование уравнения (2) возможно лишь совместно с полноценной численной моделью разряда БИИ, что делает данный метод непрактичным.

В настоящей работе потенциал отражателя БИИ изучался экспериментально. При этом основной упор был сделан на его зависимость от тока и напряжения разряда, а также от эмиссии с катода и используемого рабочего газа. Факторы, затрагивающие конструкцию ионного источника, такие как величина индукции магнитного поля и расстояние от отражателя до анода, не рассматривались.

3. Материалы и методика эксперимента

Исследования проводились для бессеточного ионного источника БИИ-10отр, разработанного в МГТУ им. Н.Э. Баумана и рассчитанного на токи разряда до 10 А с максимальной мощностью 3.0 кВт [15]. Отражатель ионного источника был изготовлен из нержавеющей стали. Магнитное поле задавалось постоянными магнитами и в ходе исследования не менялось. Величина осевой составляющей индукции магнитного поля над центром отражателя составляла 4×10^{-2} Тл. Корпус БИИ был заземлён.

БИИ работал совместно с газопроточным термоэмиссионным катодом (рис. 2). Катод крепился к корпусу БИИ через керамические изоляторы и в ходе экспериментов находился под отрицательным потенциалом смещения. Питание основного разряда (G1) и смещения катода (G2) осуществлялось совмещённым блоком APEL-IS-6DC-450-End-Hall производства ООО «Прикладная электроника». К отражателю со стороны, не контактирующей с плазмой, был приварен провод с термостойкой изоляцией. Провод был выведен вовне и подключён к мультиметру Fluke 107 (V3), что позволило измерять потенциал отражателя без внесения возмущений в область горения разряда. Для отслеживания баланса заряженных частиц в пучке напротив БИИ был размещён изолированный электрод. Приобретаемый им плавающий потенциал измерялся с помощью мультиметра Fluke 17B (V4).

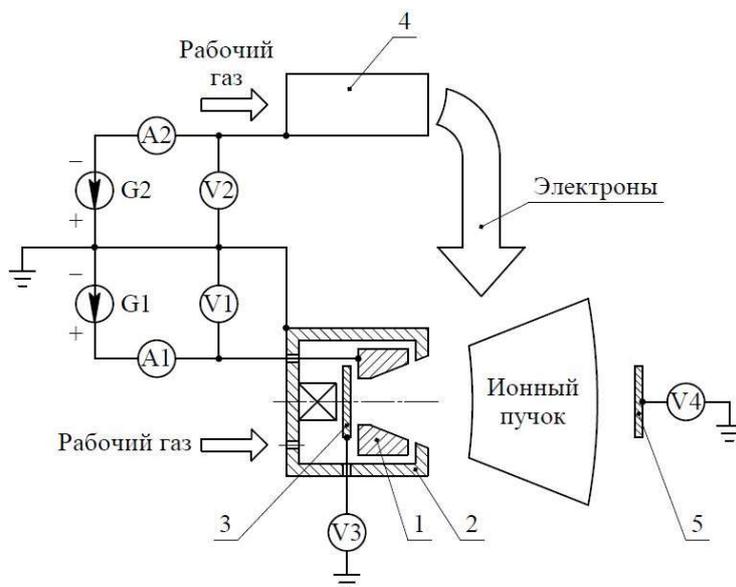


Рис. 2. Схема эксперимента:

- 1 – анод БИИ; 2 – магнитопровод БИИ; 3 – отражатель; 4 – катод;
5 – изолированный электрод; G1 – источник питания разряда;
G2 – источник смещения катода

Одним из преимуществ бессеточных ионных источников является возможность работы с практически любыми плазмообразующими газами. Поэтому отдельный интерес представляла зависимость приобретаемого отражателем потенциала от рабочего газа. В мировой практике использования БИИ наибольшее распространение получили аргон [6, 16, 17] и кислород [18–20]. Однако, для кислорода свойственно образование в ходе горения разряда отрицательных ионов и нескольких вариаций положительных ионов в силу его молекулярной природы. Для упрощения первичного исследования факторов, влияющих на потенциал отражателя, в настоящей работе в качестве плазмообразующих были выбраны одноатомные и инертные газы аргон, криптон и ксенон (рис. 3).

4. Результаты и обсуждение

В ходе экспериментов потенциал отражателя неизменно оставался положительным относительно земли, даже в тех случаях, когда плавающий потенциал пучка становился отрицательным. Основным параметром, определяющим величину потенциала отражателя, оказалось отношение тока эмиссии с катода к току разряда ξ

$$\xi = \frac{I_{em}}{I_d}, \quad (3)$$

где I_{em} – ток эмиссии с катода; I_d – разрядный ток.

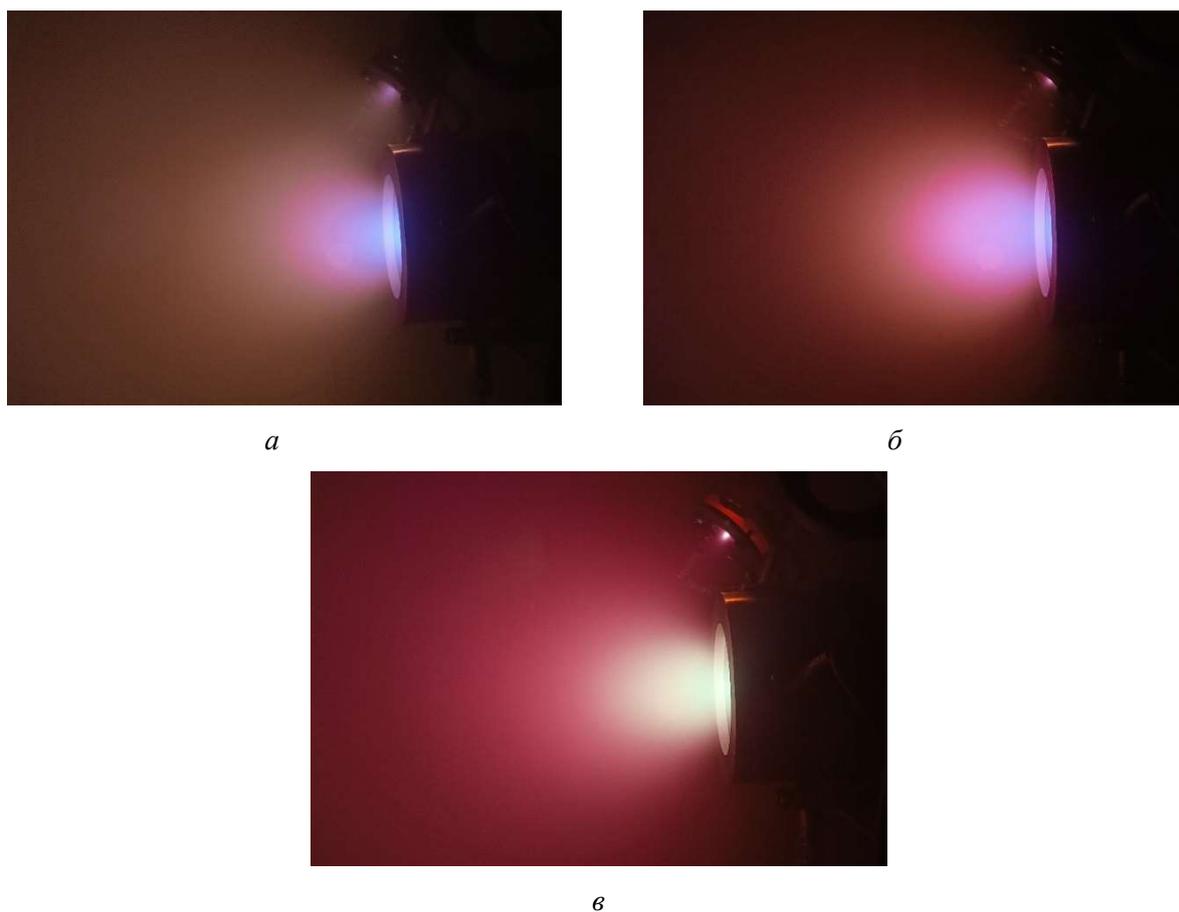


Рис. 3. Работа бессеточного ионного источника при токе разряда 7.5 А и напряжении 150 В на аргоне (а), криптоне (б) и ксеноне (в)

На рис. 4 приведены графики зависимостей потенциала отражателя от ξ при напряжении 100 В. Точки соответствуют экспериментальным данным, линии – аппроксимирующим кривым. Потенциал отражателя убывал с ростом ξ , при этом скорость его изменения (первая производная) соответственно снижалась. При токах эмиссии, в несколько раз превышающих ток разряда, потенциал отражателя менялся слабо. Для каждого из газов также можно было выделить характерное значение ξ , при котором величина разрядного тока практически не влияла на потенциал отражателя: $\xi = 0.6$ для аргона, $\xi = 0.8$ для криптона и $\xi = 1.0$ для ксенона. При меньших значениях ξ зависимость от тока разряда носила неоднозначный характер, при больших – повышение тока разряда стабильно приводило к росту потенциала отражателя на $1 \div 2$ В.

Похожая картина наблюдалась и при изменении разрядного напряжения – при некотором значении ξ потенциал отражателя практически не зависел от напряжения (рис. 5). Например, при токе разряда 7.5 А для аргона данная величина составляла $\xi = 1.2 \div 1.5$, для криптона $\xi = 0.9$, для ксенона $\xi = 1.0$. Особенно ярко этот эффект был выражен для криптона и ксенона: при $\xi = 0.8 \div 0.9$ и $\xi = 1.0$ ни разрядное напряжение, ни непосредственно разрядный ток не оказывали существенного влияния на потенциал отражателя. Его величина в этом случае зависела исключительно от используемого газа и составляла около 18.0 В для криптона и 12.5 В для ксенона. При этом в случае, если отношение ξ было меньше указанных значений, увеличение разрядного напряжения приводило к росту потенциала отражателя вплоть до нескольких вольт. В случае, когда отношение ξ превышало указанные значения, характер зависимости был строго обратным – увеличение разрядного напряжения приводило к небольшому, не превышавшему одного вольта, падению потенциала отражателя. Следует отметить, что для аргона данные закономерности не были столь явными.

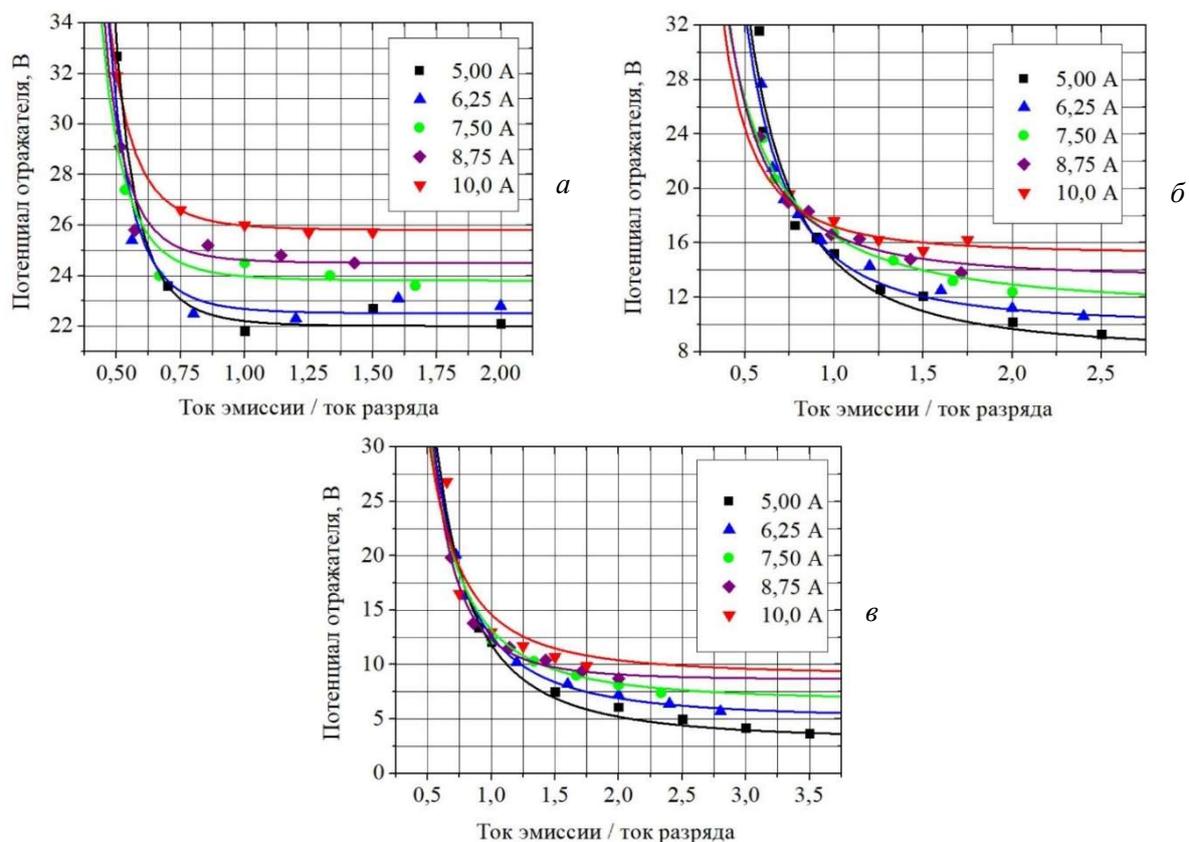


Рис. 4. Графики зависимости потенциала отражателя от параметра ζ при напряжении 100 В и различных токах разряда для аргона (*a*), криптона (*б*) и ксенона (*в*)

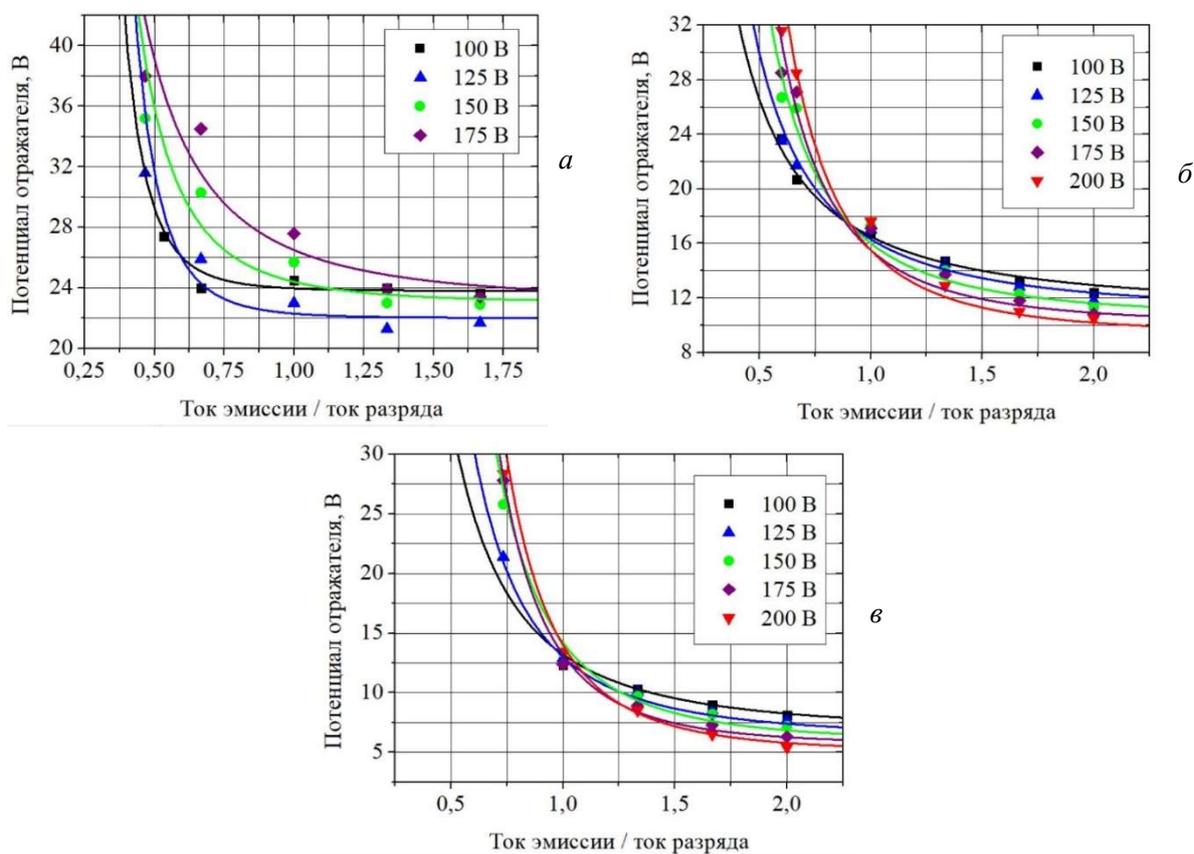


Рис. 5. Графики зависимости потенциала отражателя от параметра ζ при токе разряда 7,5 А и различных напряжениях для аргона (*a*), криптона (*б*) и ксенона (*в*)

С падением потенциала ионизации (и с ростом атомной массы) плазмообразующего газа потенциал отражателя уменьшался (рис. 6). Его наименьшие значения, составляющие всего несколько вольт, были получены на ксеноне при высоких значениях ξ . При этом наиболее сильно потенциал отражателя зависел от параметра ξ также в случае использования ксенона. Для аргона эта зависимость была выражена наименее ярко среди рассмотренных газов. Так, например, в случае представленного на рис. 6 режима (ток разряда 6.25 А, напряжение 100 В) при возрастании ξ от 0.8 до 2.0 потенциал отражателя уменьшился на 9.1 В и 6.9 В для ксенона и криптона соответственно, практически не изменившись при работе на аргоне. Особого упоминания также заслуживает область значений параметра ξ от 0.5 до 0.75, в которой значение потенциала отражателя практически не зависело от используемого плазмообразующего газа.

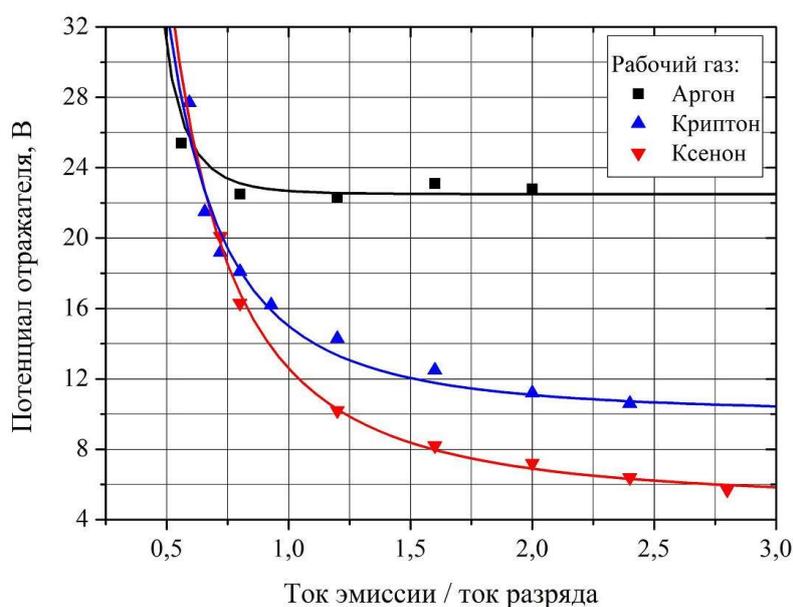


Рис. 6. Графики зависимости потенциала отражателя от параметра ξ для аргона, криптона и ксенона (ток разряда 6.25 А, напряжение 100 В)

С точки зрения практического применения одни из наиболее интересных режимов характеризовались значениями ξ около единицы. При выполнении данного условия пучок БИИ был близок к квазинейтральному, о чём свидетельствовал близкий к нулю потенциал изолированного электрода в пучке. Подобные режимы предпочтительны при обработке диэлектриков и поверхностей, чувствительных к микропробоям. Для ионного источника БИИ-10отр в этом случае отражатель приобретал потенциал, в среднем равный 26.0 В при работе на аргоне, 16.0 В при работе на криптоне и 12.5 В при работе на ксеноне.

5. Заключение

Выявлено, что отражатель бессеточных ионных источников в ходе работы приобретает положительный относительно земли потенциал, величина которого зависит от множества факторов. С точки зрения рабочих параметров наибольшее влияние оказывают отношение тока эмиссии с катода к току разряда и используемый рабочий газ. Напряжение и непосредственное значение тока разряда влияют на потенциал отражателя гораздо слабее. Их вклад существенен, если ток эмиссии с катода в несколько раз меньше значения разрядного тока. В целом область пониженных значений тока эмиссии характеризуется наибольшими значениями потенциала отражателя. Наименьшие значения потенциала отражателя, близкие к потенциалу земли, могут быть получены при работе на тяжёлых легко ионизирующихся газах с током эмиссии, в несколько раз превышающим ток разряда.

Благодарности и ссылки на гранты

Исследования проведены при выполнении госзадания на опытно-конструкторскую работу в рамках Соглашения № 075–03-2024-090 от 17.01.2024 и Дополнительного соглашения № 075–03-2024-090/6 от 21.05.2024 между Министерством науки и высшего образования и МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автор также выражает огромную благодарность коллективу НОЦ «Ионно-плазменные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана за практические советы и всестороннюю поддержку работы.

Литература

1. Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Марахтанов М.К. Селективные покрытия солнечных коллекторов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 5. С. 75–80.
2. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Влияние выработки катода дугового испарителя на равномерность толщины покрытия и угловое распределение продуктов эрозии // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 4. С. 1–9. DOI: 10.7463/0414.0707391
3. Искандарова И. М., Книжник А. А., Рыкова Е. А., Багатурьянц А. А., Уманский С. Я., Потапкин Б. В., Stoker M. W. Моделирование роста плёнки в процессе атомного осаждения слоёв // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2006. Т. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2006-4/articles/102/>
4. Pawlewicz W. T., Culver T. R., Chiello M. W., Zachistal J. H., Walters S. R., Allen D. A. Low-energy high-flux reactive ion assisted deposition of oxide optical coatings: performance, durability, stability and scalability // Proceedings of SPIE. Vol. 2262. Optical Thin Films IV: New Developments. San Diego, CA. 1994. Pp. 2–13. DOI: 10.1117/12.185776
5. Kaufman H. R., Harper J.M.E. Ion doses for low-energy ion-assist applications // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2004. Vol. 22, No. 1. Pp. 221–224. DOI: 10.1116/1.1633565
6. Zhurin V.V. Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2011. 326 p. DOI: 10.1002/9783527635726
7. Abromavicius G., Buzelis R., Drazdys R., Grigonis R., Melninkaitis A., Miksys D., Rakickas T., Sirutkaitis V., Skrebutenas A., Juskenas R., Selskis A., Influence of Ion-Assisted Deposition on Laser-Induced Damage Threshold and Microstructure of Optical Coatings // Proceedings of SPIE. Vol. 5991. Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2005. Boulder, CO. 2005. 7 p. DOI: 10.1117/12.638709
8. Jaeckel F. T., Kripps K. L., Morgan K. M., Zhang S., McCammon D. Fabrication of Superconducting Mo/Cu Bilayers Using Ion-Beam-Assisted e-Beam Evaporation // Journal of Low Temperature Physics. 2016. Vol. 184. Pp. 647–653. DOI: 10.1007/s10909-016-1563-3
9. Манегин Д. С., Соколов В. Д., Шилов С. О., Воробьев Е. В., Плотникова О. П., Ивахненко С. Г. Исследование ионных пучков бессеточных ионных источников с плавающим и с анодным потенциалом задней стенки разрядной камеры // Радиотехника. 2024. Т. 88, № 4. С. 158–167. DOI: 10.18127/j00338486-202404-16
10. Митчнер М., Кругер Ч. Частично ионизованные газы / Пер с англ., под ред. Иванова А.А. М.: Мир, 1976. 496 с.
11. Kaufman H. R., Robinson R. S. End-Hall Ion Source // United States Patent No. 4,862,032. Appl. No. 920,798, filed 20.10.1986. Date of patent 29.08.1989.
12. Zhurin V. V., Kaufman H. R., Kahn J. R., Hylton T. L. Biased target deposition // Journal of Vacuum Science & Technology A. 2000. Vol. 18. No. 1. Pp. 37–41. DOI: 10.1116/1.582155
13. Oudini N., Hagelaar G. J. M., Boeuf J.-P., Garrigues L. Physics and modelling of an end-Hall (gridless) ion source // Journal of Applied Physics. 2011. Vol. 109. No. 7. 11 p. DOI: 10.1063/1.3572053.

14. Oudini N. Modélisation d'une source d'ions à effet Hall pour des applications de traitement de surface: thèse ... doctorat. Toulouse. 2011. 152 p.
15. Манегин Д. С., Соколов В. Д., Плотникова О. П., Воробьев Е. В. Результаты испытаний бессточных ионных источников модифицированной конструкции // Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-28): материалы конференции. Новосибирск. 2024. С. 111–112.
16. Lackner J. M., Waldhauser W., Mahoney L. J., Davis J. Process Benefits of Wide Area, Low Energy End-Hall Ion Source for Surface Pre-Cleaning and Functional Treatment of Polymeric Substrate Materials // SVC. 52-nd Annual Technical Conference Proceedings. Santa Clara, CA. 2009. Pp. 18–24.
17. Hwangbo C. K., Cho H. J. Ion Assisted Deposition of TiO₂ Thin Films by Kaufman and Gridless Ion Sources // The Review of Laser Engineering. 1996. Vol. 24, No. 1. Pp. 103–109.
DOI: 10.2184/lsej.24.103
18. Martin P. J., Bendavid A., Swain M. V., Netterfield R. P., Kinder T. J., Sainty W. G., Drage D. Mechanical and Optical Properties of the Films of Tantalum Oxide Deposited by Ion-Assisted Deposition // Materials Research Society Symposium Proceedings. Vol. 308. Symposium M1. Thin Films: Stresses and Mechanical Properties IV. San Francisco, California. 1993. Pp. 583–588.
DOI: 10.1557/PROC-308-583
19. Fulton M. L. Application of ion-assisted deposition using a gridless end-Hall ion source for volume manufacturing of thin film optical filters // Proceedings of SPIE. Vol. 2253. Optical Interference Coatings. Grenoble. 1994. Pp. 374–393. DOI: 10.1117/12.192111
20. Gilo M., Croitoru N. Properties of TiO₂ films prepared by ion-assisted deposition using a gridless end-Hall ion source // Thin Solid Films. 1996. Vol. 283. No. 1–2. Pp. 84–89.
DOI: 10.1016/0040-6090(95)08500-9

References

1. Duhopel'nikov D. V., Ivahnenko S. G., Marahtanov M. K., Selective coatings for solar collectors, *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2012, no. 5, pp. 75–80 [in Russian].
2. Duhopel'nikov D. V., Kirillov D. V., Vorob'ev E. V., Ivakhnenko S. G., The influence of cathode excavation of cathodic arc evaporator on thickness uniformity and erosion products angle distribution, *Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 4, pp. 1–9 [in Russian].
DOI: 10.7463/0414.0707391
3. Iskandarova I. M., Knizhnik A. A., Rykova E. A., Bagatur'yanc A. A., Umanskij S. Ya., Potapkin B. V., Stoker M. W., Modelling growth of the film during the atomic layer deposition, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2006, vol. 4 [in Russian]. <http://chemphys.edu.ru/issues/2006-4/articles/102/>
4. Pawlewicz W. T., Culver T. R., Chiello M. W., Zachistal J. H., Walters S. R., Allen D. A., Low-energy high-flux reactive ion assisted deposition of oxide optical coatings: performance, durability, stability and scalability, *Proceedings of SPIE. Vol. 2262. Optical Thin Films IV: New Developments*, San Diego, CA, 1994, pp. 2–13. DOI: 10.1117/12.185776
5. Kaufman H. R., Harper J. M. E., Ion doses for low-energy ion-assist applications, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2004, vol. 22, no. 1, pp. 221–224. DOI: 10.1116/1.1633565.
6. Zhurin V. V., *Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology*, Weinheim, Wiley-VCH, 2011. 326 p. DOI: 10.1002/9783527635726
7. Abromavicius G., Buzelis R., Drazdys R., Grigonis R., Melninkaitis A., Miksys D., Rakickas T., Sirutkaitis V., Skrebutenas A., Juskenas R., Selskis A., Influence of Ion-Assisted Deposition on Laser-Induced Damage Threshold and Microstructure of Optical Coatings, *Proceedings of SPIE. Vol. 5991. Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2005*, Boulder, CO, 2005, 7 p. DOI: 10.1117/12.638709

8. Jaeckel F. T., Kripps K. L., Morgan K. M., Zhang S., McCammon D., Fabrication of Superconducting Mo/Cu Bilayers Using Ion-Beam-Assisted e-Beam Evaporation, *Journal of Low Temperature Physics*, 2016, vol. 184, pp. 647–653. DOI: 10.1007/s10909-016-1563-3
9. Manegin D. S., Sokolov V. D., Shilov S. O., Vorobev E. V., Plotnikova O. P., Ivakhnenko S. G., Investigation of ion beams of the gridless ion sources with floating and anode potential of the discharge chamber rear wall, *Radiotekhnika*, 2024, vol. 88, no. 4, pp. 158–167 [in Russian]. DOI: 10.18127/j00338486-202404-16
10. Mitchner M., Kruger C. H., *Partially Ionized Gases*, Ed. by A. A. Ivanov, M.: Mir, 1976. 496 с. [in Russian].
11. Kaufman H. R., Robinson R. S., *End-Hall Ion Source*, United States Patent No. 4,862,032. Appl. No. 920,798, filed 20.10.1986. Date of patent 29.08.1989.
12. Zhurin V. V., Kaufman H. R., Kahn J. R., Hylton T. L., Biased target deposition, *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2000, vol. 18, no. 1, pp. 37–41. DOI: 10.1116/1.582155
13. Oudini N., Hagelaar G. J. M., Boeuf J.-P., Garrigues L., Physics and modelling of an end-Hall (gridless) ion source, *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, no. 7, 11 p. DOI: 10.1063/1.3572053
14. Oudini N., *Modélisation d'une source d'ions à effet Hall pour des applications de traitement de surface* (Modeling of a Hall effect ion source for surface treatment applications). Ph. Doctor's thesis, Toulouse, Toulouse III – Paul Sabatier University, 2011, 152 p.
15. Manegin D. S., Sokolov V. D., Plotnikova O. P., Vorobev E. V., Ivakhnenko S. G., Results of tests of gridless ion sources of modified design, *Twenty-eighth All-Russian scientific conference of physics students and young scientists (VNKSF-28): conference materials. Novosibirsk*, 2024, pp. 111–112 [in Russian].
16. Lackner J. M., Waldhauser W., Mahoney L. J., Davis J., Process Benefits of Wide Area, Low Energy End-Hall Ion Source for Surface Pre-Cleaning and Functional Treatment of Polymeric Substrate Materials, *SVC. 52-nd Annual Technical Conference Proceedings*, Santa Clara, CA, 2009, pp. 18–24.
17. Hwangbo C. K., Cho H. J., Ion Assisted Deposition of TiO₂ Thin Films by Kaufman and Gridless Ion Sources, *The Review of Laser Engineering*, 1996, vol. 24, no. 1, pp. 103–109. DOI: 10.2184/lsej.24.103
18. Martin P. J., Bendavid A., Swain M. V., Netterfield R. P., Kinder T. J., Sainty W. G., Drage D., Mechanical and Optical Properties of the Films of Tantalum Oxide Deposited by Ion-Assisted Deposition, *Materials Research Society Symposium Proceedings. Vol. 308. Symposium M1. Thin Films: Stresses and Mechanical Properties IV*, San Francisco, California, 1993, pp. 583–588. DOI: 10.1557/PROC-308-583
19. Fulton M. L., Application of ion-assisted deposition using a gridless end-Hall ion source for volume manufacturing of thin film optical filters, *Proceedings of SPIE. Vol. 2253. Optical Interference Coatings*, Grenoble, 1994, pp. 374–393. DOI: 10.1117/12.192111
20. Gilo M., Croitoru N., Properties of TiO₂ films prepared by ion-assisted deposition using a gridless end-Hall ion source, *Thin Solid Films*, 1996, vol. 283, no. 1–2, pp. 84–89. DOI: 10.1016/0040-6090(95)08500-9

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2025 г.