

Исследование параметров работы бессеточных ионных источников

© Д.С. Манегин, В.Д. Соколов, С.О. Шилов, Е.В. Воробьев,
С.В. Серушкин, С.Г. Ивахненко

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Проведены исследования влияния расхода рабочего газа и индукции магнитного поля на стабильность работы и разрядные характеристики бессеточных источников ионов низких энергий с расходящимся ионным пучком. Испытаны три типоразмера ионных источников с номинальными токами разряда 5 А, 10 А и 15 А, магнитные системы которых выполнены на основе постоянных магнитов, причем их количество изменялось для получения различных значений индукции магнитного поля. Для каждого типоразмера ионных источников были проработаны конфигурации с отражателем под плавающим потенциалом и под потенциалом анода. Получены вольт-амперные характеристики бессеточных ионных источников для различных значений расхода рабочего газа и индукции магнитного поля в газоразрядной камере. Определены рабочие диапазоны расходов газа, выбраны оптимальные значения индукции магнитного поля для каждого из сочетаний типоразмера и потенциала отражателя.

Ключевые слова: тонкие пленки, ионное ассистирование, ионное травление, ионный источник, ионный пучок, вольт-амперная характеристика

Введение. Один из ключевых элементов систем ассистированного нанесения тонкопленочных покрытий — источник ионов низких энергий [1]. Ограничение энергии ионного пучка, находящейся, как правило, в диапазоне 50...300 В, обусловлено балансом скоростей роста и травления покрытия. В то же время важно обеспечить большой угол расхождения пучка, для того чтобы обрабатывать как можно большее количество изделий за один раз. По совокупности указанных требований предпочтительным типом ионного источника для подобных систем традиционно является ускоритель типа End-Hall [2], также называемый бессеточным ионным источником (БИИ).

Известен ряд зарубежных разработчиков и производителей БИИ, таких как Kaufman & Robinson [3], Veeco [4], Telemark/Saintech [5], Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР) [6], не считая создателей экспериментальных моделей [7]. Однако в России пока еще подобных разработок практически не появилось. Поэтому коллективом научно-образовательного центра (НОЦ) «Ионно-плазменные технологии» МГТУ им. Н.Э. Баумана, имеющим опыт в разработке и исследованиях ионных источников [8, 9], были спроектированы и изготовлены БИИ трех типоразмеров.

Цель данной работы — представить подтверждение правильности основных конструкторских решений и оптимизации рабочих парамет-

ров сконструированных БИИ. Для этого были проведены испытания, в ходе которых исследовалось влияние расхода газа и индукции магнитного поля \bar{B} на разрядные характеристики и стабильность работы источников.

Принцип работы БИИ. В основе БИИ лежат те же принципы, что и в классических ускорителях с замкнутым дрейфом электронов (УЗДЭ), таких как, например, ускорители с анодным слоем (УАС), стационарные плазменные двигатели (СПД) и т. д. [10]. Схема работы ускорителя проиллюстрирована на рис. 1.

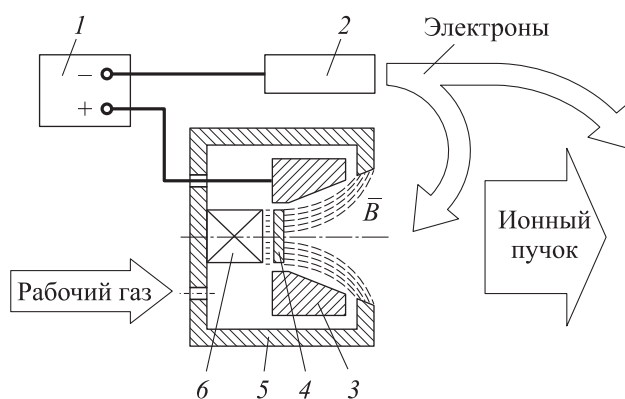


Рис. 1. Схема работы БИИ:

1 — источник питания разряда; 2 — катод-нейтрализатор; 3 — анод;
4 — отражатель; 5 — магнитопровод; 6 — магнит

В полость газоразрядной камеры, образованную анодом 3, подается рабочий газ. Магнитная система, включающая магнит 6 и магнитопровод 5, формирует расходящееся магнитное поле. Катод-нейтрализатор (КН) 2, выполненный в виде нити накала из термоэмиссионного материала или отдельного газоразрядного устройства, эмитирует электроны в полость газоразрядной камеры. Электроны удерживаются магнитным полем и ионизуют рабочий газ. Полученная ионная компонента ускоряется создаваемой источником питания 1 разностью потенциалов, формируя пучок, а КН нейтрализует объемный положительный заряд, что позволяет избежать запирающего пучка.

Рассмотрим, чем отличаются БИИ от других УЗДЭ. Во-первых, анодом, выполненным в форме усеченного конуса, и расходящимся магнитным полем, что в совокупности обеспечивает большой угол расхождения ионного пучка. Причем анод может иметь и более сложную форму с изменяющимся углом расхождения конуса, повторяя в первом приближении топологию силовых линий магнитного поля, что минимизирует пересечение силовыми линиями поверхности анода и преждевременный сток электронов из области горения разряда. Во-вторых, БИИ отличается наличием в полости газоразрядной камеры

отражателя 4 (см. рис. 1). Применяются две конструктивные схемы реализации данного элемента, различающиеся по его функциям и влиянию на конечные параметры ионного источника. Чаще всего отражатель выполняется изолированным от анода, и в процессе горения разряда он находится под воздействием небольшого отрицательного плавающего потенциала (см. рис. 1). При этом электроны, покидающие газоразрядную камеру в сторону от среза, отражаются обратно в область ионизации, что в итоге способствует повышению плотности генерируемого ионного тока. Однако это приводит к распылению отражателя ионами разряда и его постепенному износу. В конструктивной схеме, представленной далее на рис. 2, отражатель находится под потенциалом анода и фактически является его частью. В таком случае не происходит распыления отражателя, но увеличивается тепловая нагрузка вследствие прямого поступления «сквозного» электронного тока на небольшую область отражателя у оси, а плотность ионного тока снижается.

Материалы и методы. Для испытаний были спроектированы и изготовлены БИИ трех типоразмеров: с номинальными значениями токов разряда 5 А, 10 А и 15 А. При этом каждая из моделей была выполнена как с плавающим отражателем, так и с отражателем, находящимся под анодным потенциалом. Посредством установки различных постоянных магнитов также изменялась величина индукции магнитного поля источника. Индукция магнитного поля измерялась гауссметром AlphaLab GM2 в непосредственной близости от центральной точки отражателя в осевом направлении.

Все испытания проводили на вакуумном стенде НОЦ «Ионно-плазменные технологии». Основой стенда служила цилиндрическая вакуумная камера диаметром 0,7 м и длиной 0,7 м. Вакуумная система установки была выполнена по байпасной схеме с турбомолекулярным насосом в качестве основного средства откачки.

Во время испытаний БИИ работал в паре с газоразрядным термоэмиссионным катодом-нейтрализатором. Для обоих устройств в качестве рабочего газа использовался аргон, управление расходом газа осуществлялось двумя независимыми регуляторами расхода газа (РРГ). При этом расход газа в ионный источник изменялся в пределах $1,69 \cdot 10^{-3} \dots 0,17 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. В катод-нейтрализатор, как правило, подавался постоянный расход $1,69 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. БИИ был установлен внутри вакуумной камеры на фланце, а КН закреплен на кронштейне к корпусу БИИ.

Схема испытаний с отражателем БИИ, находящимся под потенциалом анода, представлена на рис. 2. Схема испытаний с отражателем под плавающим потенциалом отличалась лишь отсутствием контакта между отражателем и анодом. Источник питания G_4 поддерживал

протекание постоянного тока через эмиттер I , обеспечивая его прогрев и условия для начала термоэмиссии. Источник G_3 подавал повышенное напряжение между поджигающим электродом 3 и корпусом КН 2 , зажигая разряд в полости КН и повышая генерацию электронов. Источник G_1 обеспечивал питание разряда в скрещенных полях с рабочим напряжением до 300 В и работал в режиме стабилизации тока. Источник G_2 регулировал потенциал смещения КН относительно БИИ, поддерживая суммарный ток электронов с КН равным току основного разряда. Источники G_1 – G_4 входили в состав блока APEL-IS-6DC-450-End-Hall, специально изготовленного компанией ООО «Прикладная электроника» для проведения данных испытаний. Измерения значений напряжения и тока разряда проводили с помощью поверенных приборов V и A соответственно серии Щ01П производства ОАО «Электроприбор».

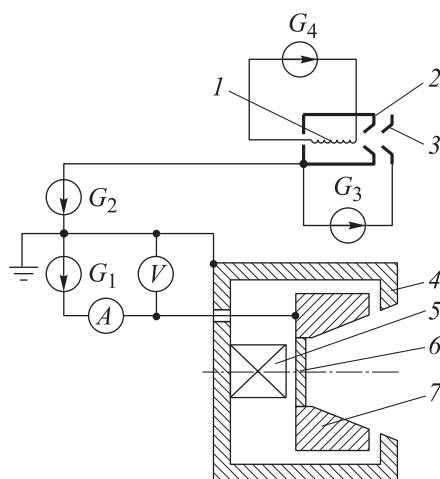


Рис. 2. Схема испытаний БИИ:

1 — эмиттер; 2 — корпус КН; 3 — поджигающий электрод;
 4 — магнитопровод; 5 — магнит; 6 — отражатель; 7 — анод;
 G_1 — источник питания разряда; G_2 — источник питания смещения КН; G_3 — источник питания поджигающего электрода; G_4 — источник питания накала

Кратко конфигурации испытываемых источников обозначались как БИИ- $N(K)$, где N — номинальное значение тока (5 А, 10 А или 15 А), а K — потенциал отражателя (А — анодный, П — плавающий).

Результаты испытаний. Были получены вольт-амперные характеристики (ВАХ) БИИ для различных значений расхода аргона Q и величины индукции магнитного поля B . Типичный вид семейства ВАХ, снятый для БИИ с номинальным значением тока 15 А с анодным потенциалом, представлен на рис. 3. Для всех значений индукции магнитного поля с возрастанием расхода рабочего газа снижалось

влияние расхода на достигаемое разрядное напряжение (и, следовательно, среднюю энергию частиц пучка). Это можно оценить по увеличивающейся крутизне ВАХ (см. рис. 3). Поэтому в данной части эксперимента не применялись расходы выше $0,12 \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

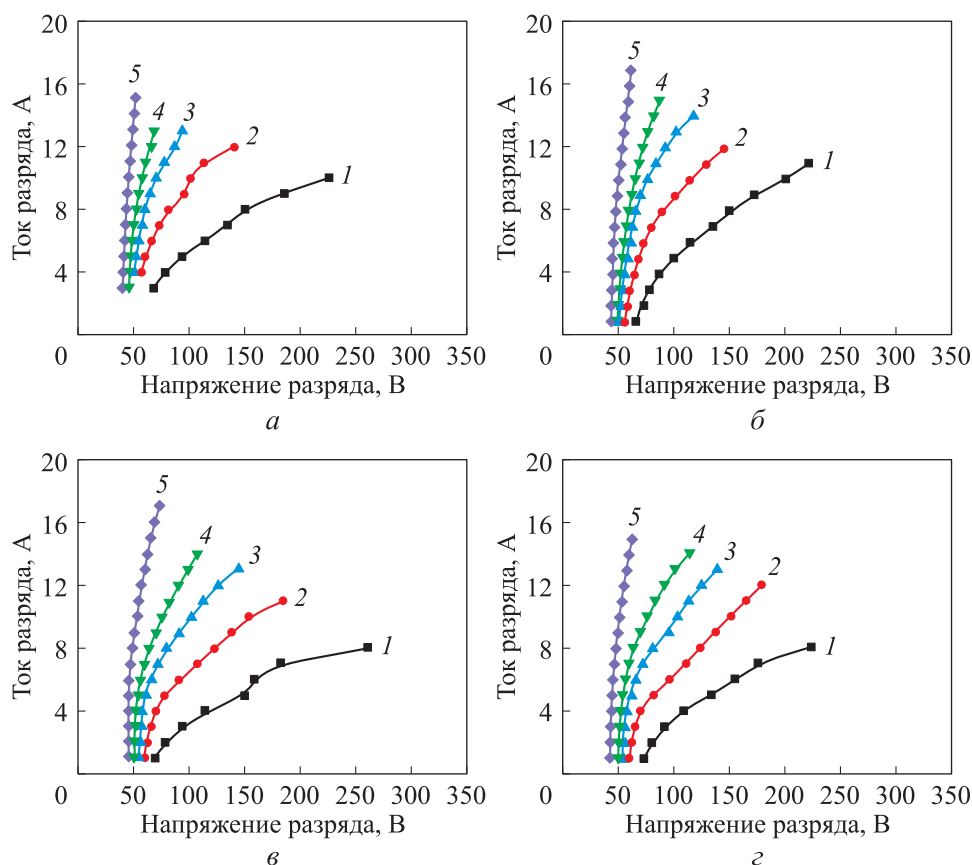


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики БИИ на 15 А с анодным потенциалом отражателя 41,0 мТл (а); 55,0 мТл (б); 127,0 мТл (в); 155,0 мТл (г) при расходе аргона Q , равном $8,45 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (1); $1,69 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (2); $2,54 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (3); $3,38 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (4); $5,92 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (5)

Кроме того, снимались показания тока разряда при различных значениях расхода газа и напряжения. Пример полученного семейства графиков приведен на рис. 4. Напряжение 50 В легко достигалось всеми конфигурациями БИИ. Для перехода на более высокие напряжения потребовалось существенно снизить расход газа. При этом важную роль начинали играть даже незначительные изменения расхода газа через катод.

Испытания прекращались при переходе источника питания в режим работы, при котором не достигалось значение уставки по току разряда, при невозможности вновь зажечь разряд после его угасания

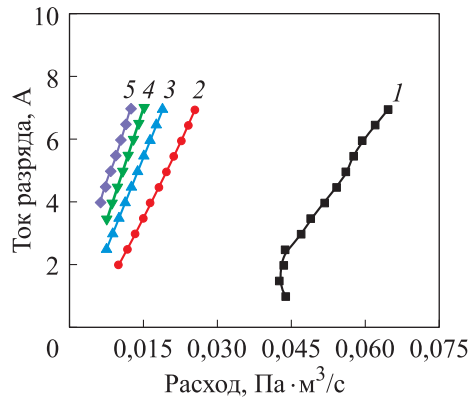


Рис. 4. Зависимости тока разряда от расхода через БИИ на 5 А с анодным потенциалом отражателя (140,0 мТл) при U_d , равном: 50 В (1); 100 В (2); 150 В (3); 200 В (4); 300 В (5)

и при визуальном наблюдении перегрева отражателя. В целом исполнения с анодным потенциалом отражателя продемонстрировали в ходе экспериментов более устойчивую работу, чем исполнения с плавающим потенциалом.

Обсуждение. На протяжении всего цикла испытаний отмечена существенная разница в расходах рабочего газа, необходимых для стабильной работы БИИ различной конфигурации. Это проиллюстрировано на рис. 5 и 6, где приведены графики зависимостей тока разряда от расхода для обеих конфигураций со схожими значениями индукции магнитного поля.

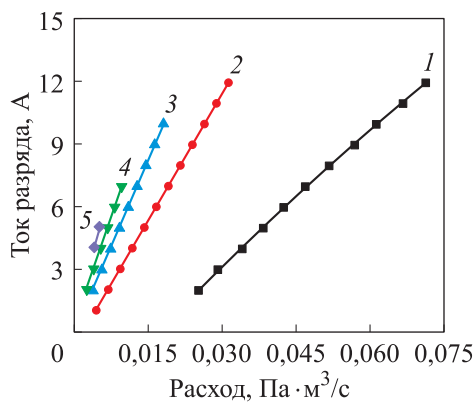


Рис. 5. Зависимость тока разряда от расхода при постоянных напряжениях для БИИ с отражателем под анодным потенциалом (42,0 мТл), с номинальным током 10 А при U_d , равном: 50 В (1); 100 В (2); 150 В (3); 200 В (4); 300 В (5)

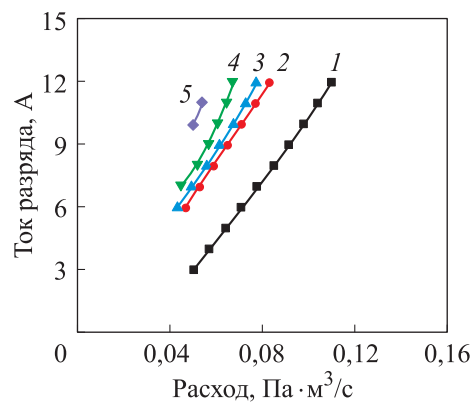


Рис. 6. Зависимость тока разряда при постоянных напряжениях для БИИ с отражателем под плавающим потенциалом (43,5 мТл) при U_d , равном: 80 В (1); 100 В (2); 120 В (3); 150 В (4); 200 В (5)

При анодном потенциале отражателя БИИ демонстрировал уверенную работу при расходах $8,45 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ и менее, причем большая часть полученных зависимостей лежит в области до $3 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$. В то же время при плавающем потенциале БИИ не удалось запустить при расходах, меньших $4 \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$, а большая часть результатов получена в диапазоне $(4 \dots 8) \cdot 10^{-2} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$.

Для разных потенциалов отражателя также существенно различаются рабочие значения индукции магнитных полей (рис. 7). Для анодного потенциала при фиксированном значении тока разряда можно выделить свойственный УЗДЭ четкий диапазон оптимальных значений индукции с точки зрения достигаемых разрядных напряжений. Например, на рис. 7, а такой диапазон составляет 80...120 мТл (аксиальная составляющая магнитного поля на поверхности отражателя на оси БИИ). Для плавающего потенциала (рис. 7, б) аналогичные характеристики были, как правило, монотонно возрастающими, оптимальные значения магнитного поля не достигались. Это связано с неустойчивостью работы БИИ с плавающим потенциалом отражателя при больших магнитных полях, из-за чего не всегда удавалось подобрать оптимальное с точки зрения выходных характеристик значение индукции.

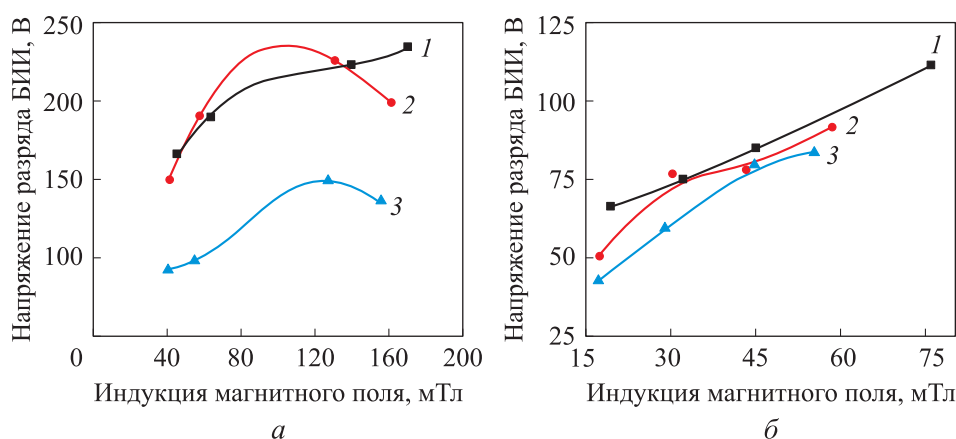


Рис. 7. Зависимости напряжения разряда БИИ с отражателем под анодным потенциалом $8,45 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (а) и с отражателем под плавающим потенциалом $6,76 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$ (б) от индукции магнитного поля при значении тока разряда 5 А:
1 — БИИ-5 (А); 2 — БИИ-10 (А); 3 — БИИ-15 (А)

Соответствующие двум критериям оптимизации работы БИИ параметры: минимальный расход рабочего газа, необходимый для достижения номинального тока БИИ, и максимальное разрядное напряжение, которого удалось добиться, сведены в табл. 1 и 2. Это отвечает наилучшим условиям ионизации и ускорения соответственно. Оранжевым цветом выделены параметры, оптимальные по первому критерию, а зеленым — по второму. При анодном потенциале отражателя оптимум по напряжению отмечается при несколько больших значениях

индукции магнитного поля, чем оптимум по току. Для плавающего потенциала отражателя в случаях с 5 А и 10 А наилучшие результаты были достигнуты при одном и том же значении индукции.

Таблица 1

Влияние индукции магнитного поля на параметры БИИ с анодным потенциалом отражателя

Конфигурация БИИ	Индукция магнитного поля на оси БИИ, мТл	Минимальный расход, при котором достигался номинальный ток, Па· м ³ /с	Максимальное достигнутое напряжение, В
БИИ-5(А)	45,5	$7,77 \cdot 10^{-3}$	243
	63,0	$8,45 \cdot 10^{-3}$	307
	140,0	$8,45 \cdot 10^{-3}$	300
	170,5	$8,45 \cdot 10^{-3}$	234
БИИ-10(А)	42,0	$1,69 \cdot 10^{-2}$	300
	57,5	$8,45 \cdot 10^{-3}$	238
	130,5	$1,69 \cdot 10^{-2}$	305
	151,0	$3,38 \cdot 10^{-2}$	300
БИИ-15(А)	41,0	$5,92 \cdot 10^{-2}$	225
	55,0	$3,38 \cdot 10^{-2}$	218
	127,0	$3,97 \cdot 10^{-2}$	260
	155,0	$5,92 \cdot 10^{-2}$	224

Таблица 2

Влияние индукции магнитного поля на параметры БИИ с плавающим потенциалом отражателя

Конфигурация БИИ	Индукция магнитного поля на оси БИИ, мТл	Минимальный расход, при котором достигался номинальный ток, Па· м ³ /с	Максимальное достигнутое напряжение, В
БИИ-5(П)	19,2	$3,34 \cdot 10^{-2}$	200
	32,0	$6,76 \cdot 10^{-2}$	100
	45,0	$5,41 \cdot 10^{-2}$	100
	76,0	$5,07 \cdot 10^{-2}$	148
БИИ-10(П)	18,2	$3,28 \cdot 10^{-2}$	300
	30,5	$3,19 \cdot 10^{-2}$	300
	43,5	$4,99 \cdot 10^{-2}$	200
	58,3	$6,76 \cdot 10^{-2}$	149
БИИ-15(П)	17,3	$2,67 \cdot 10^{-2}$	200
	29,0	$6,34 \cdot 10^{-2}$	200
	44,5	$7,52 \cdot 10^{-2}$	300
	55,1	$8,45 \cdot 10^{-2}$	148

Заключение. В ходе работы определены рабочие диапазоны расходов газа для БИИ трех типоразмеров в исполнении с отражателем под анодным (до $3 \cdot 10^{-2}$ Па \cdot м³/с) и под плавающим потенциалом ($(4 \dots 8) \cdot 10^{-2}$ Па \cdot м³/с). Среди доступных значений индукции магнитного поля определены те, при которых каждая из конфигураций БИИ работает наиболее эффективно с точки зрения ионизации рабочего газа или ускорения ионов. Отмечено, что для некоторых исполнений топология силовых линий магнитного поля могла быть неоптимальной. Так, БИИ на 5 А с плавающим потенциалом отражателя показывал результаты хуже, чем БИИ того же типоразмера с анодным потенциалом, а подобрать более подходящее магнитное поле не удавалось из-за дестабилизации разряда при повышении индукции. Возможно, имело место замыкание силовых линий магнитного поля на анод, что приводило к преждевременному стоку электронов из области горения разряда и, как следствие, нарушению условий ионизации. С другой стороны, концентрация нейтральных частиц рабочего газа в газоразрядной камере могла быть недостаточной ввиду завышенных габаритных размеров модели. Полученные результаты будут учтены при дальнейшей модернизации БИИ.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках субсидии на выполнение государственного задания № 075-03-2023-095/8 от 10 августа 2023 г.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Kahn J.R., Kaufman H.R. Low-energy ion-beam etching. *Society of Vacuum Coaters: 49th Annual Technical Conference Proceedings*. Washington, D.C. USA, April 22–27 2006, Society of Vacuum Coaters. Washington, Society of Vacuum Coaters, 2006, 4 p.
- [2] 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, 12 p. DOI: 10.1063/1.3572053
- [3] Kaufman H.R., Robinson R.S., Seddon R.I. End-Hall ion source. *Journal of Vacuum Science & Technology A* 5, 1987, vol. 5 (4), pp. 2081–2084. DOI: 10.1116/1.574924
- [4] Niederwald H., Mahoney L. Next generation end hall ion source in the optical thin film production process. *Advances in Optical Thin Films III*, 2008, vol. 7101, 10 p. DOI: 10.1117/12.797596
- [5] Willey R.R., Fortenberry K., Green C. Comparison of the behaviour of three different ion/plasma sources for optical coating processes using a direct current power supply. *64th Annual Technical Conference Proceedings*, 2021, 4 p. DOI: 10.14332/svc21.proc.0041
- [6] Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Xiubo Tian, Окоджи Д.Э., Колос В.В. Ионный источник на основе торцевого холловского ускорителя для предварительной «мягкой» очистки подложек. *Материалы IV Международной научной конференции «Проблемы взаимодействия излучения*

- с веществом». Гомель, 9–11 ноября 2016 г., ГГУ им. Ф. Скорины. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины, 2016, с. 35–39.
- [7] Pan Y.Q., Yin Y. Diamond-like carbon films with End-Hall ion source enhanced chemical vapour deposition. *Diamond and Related Materials*, 2007, vol. 16 (2), pp. 220–224. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.05.003
- [8] Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г. Управление ионными потоками в холловских ускорителях. *Вестник Московского авиационного института*, 2017, т. 24, вып. 2, с. 24–30.
- [9] Shilov S.O., Vorob'ev E.B., Ivachnenko S.G., Manegin D.S. Influence of the acceleration channel depth on the thruster with anode layer thrust efficiency during operation on krypton. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2549 (1), 10 p. DOI: 10.1063/5.0109221
- [10] Zhurin V.V. Industrial ion sources. *Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. Weinheim, Wiley-VCH, 2012, 312 p.

Статья поступила в редакцию 20.10.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Манегин Д.С., Соколов В.Д., Шилов С.О., Воробьев Е.В., Серушкин С.В., Ивахненко С.Г. Исследование параметров работы бессеточных ионных источников. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 12.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-12-2322>

Манегин Денис Сергеевич — мл. науч. сотр. НОЦ «Ионно-плазменные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, холловские системы, двигатели космических летательных аппаратов. e-mail: manegin@bmstu.ru

Соколов Владимир Дмитриевич — инженер НОЦ «Ионно-плазменные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, холловские системы. e-mail: sokolovvd@bmstu.ru

Шилов Сергей Олегович — мл. науч. сотр. НОЦ «Ионно-плазменные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, холловские системы, двигатели космических летательных аппаратов. e-mail: s.shilov@bmstu.ru

Воробьев Евгений Валентинович — канд. техн. наук, заведующий лабораторией НОЦ «Ионно-плазменные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, холловские системы, двигатели космических летательных аппаратов. e-mail: evv@bmstu.ru

Серушкин Сергей Валерьевич — мл. науч. сотр. НОЦ «Ионно-плазменные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, термоядерный синтез. e-mail: serushkin_sv@bmstu.ru

Ивахненко Сергей Геннадьевич — канд. техн. наук, доцент, директор НОЦ «Ионно-плазменные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ионно-плазменные технологии, холловские системы, двигатели космических летательных аппаратов. e-mail: ivakhnenko@bmstu.ru

Investigation of the gridless ion sources operating parameters

© D.S. Manegin, V.D. Sokolov, S.O. Shilov, E.V. Vorobev,
S.V. Serushkin, S.G. Ivakhnenko

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The influence of the working gas flow rate and magnetic field induction on the stability of operation and discharge characteristics of low-energy gridless ion sources with a divergent ion beam has been studied. Three size models of the ion sources with rated discharge currents of 5 A, 10 A and 15 A have been tested. Magnetic systems of the sources were based on permanent magnets. The number of magnets varied to obtain different values of magnetic field induction. Configurations with a reflector under the floating potential and under the anode potential were worked out for each size. Volt-ampere characteristics of the gridless ion sources for different values of the working gas flow rate and magnetic field induction in the gas discharge chamber were obtained. The operating ranges of gas flow rates are determined; the optimal values of magnetic field induction for each of the combinations of the size and the potential of the reflector are selected.

Keywords: *thin films, ion assisted deposition, ion etching, ion source, ion beam, volt-ampere characteristic*

The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of a subsidy for the implementation of state task No. 075-03-2023-095/8 dated August 10, 2023.

REFERENCES

- [1] Kahn J.R., Kaufman H.R. Low-energy ion-beam etching. *Society of Vacuum Coaters: 49th Annual Technical Conference Proceedings*. Washington, D.C., USA, April 22–27 2006, Society of Vacuum Coaters. Washington, Society of Vacuum Coaters, 2006, 4 p.
- [2] 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, 12 p. DOI: 10.1063/1.3572053
- [3] Kaufman H.R., Robinson R.S., Seddon R.I. End-Hall ion source. *Journal of Vacuum Science & Technology A* 5, 1987, vol. 5 (4), pp. 2081–2084. DOI: 10.1116/1.574924
- [4] Niederwald H., Mahoney L. Next generation end hall ion source in the optical thin film production process. *Advances in Optical Thin Films III*, 2008, vol. 7101, 10 p. DOI:10.1117/12.797596
- [5] Willey R.R., Fortenberry K., Green C. Comparison of the behaviour of three different ion/plasma sources for optical coating processes using a direct current power supply. *64th Annual Technical Conference Proceedings*, 2021, 4 p. DOI: 10.14332/svc21.proc.0041
- [6] Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Xiubo Tian, Okodzhi D.E., Koles V.V. Ion source based on the End-Hall accelerator for preliminary “soft” substrates cleaning. *IV International scientific conference “Problems of interaction of radiation with matter”*. Gomel, November 9-11 2016, Francisk Skorina Gomel State University. Gomel, Francisk Skorina Gomel State University, 2016, pp. 35–39.

- [7] Pan Y.Q., Yin Y. Diamond-like carbon films with End-Hall ion source enhanced chemical vapour deposition. *Diamond and Related Materials*, 2007, vol. 16 (2), pp. 220–224. DOI: 10.1016/j.diamond.2006.05.003
- [8] Dukhopelnikov D.V., Vorobev E.V., Ivakhnenko S.G. Ion flux control in hall accelerators. *Aerospace MAI Journal*, 2017, vol. 24 (2), pp. 24–30.
- [9] Shilov S.O., Vorob'ev E.B., Ivakhnenko S.G., Manegin D.S. Influence of the acceleration channel depth on the thruster with anode layer thrust efficiency during operation on krypton. *AIP Conference Proceedings*, 2023, vol. 2549 (1), 10 p. DOI: 10.1063/5.0109221
- [10] Zhurin V.V. Industrial ion sources. *Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. Weinheim, Wiley-VCH, 2012, 312 p.

Manegin D.S., junior researcher, SEC “Ion Plasma Technologies”, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ion plasma technologies, Hall systems, space thrusters. e-mail: manegin@bmstu.ru

Sokolov V.D., engineer, SEC “Ion Plasma Technologies”, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ion plasma technologies, Hall systems. e-mail: sokolovvd@bmstu.ru

Shilov S.O., junior researcher, SEC “Ion Plasma Technologies”, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ion plasma technologies, Hall systems, space thrusters. e-mail: s.shilov@bmstu.ru

Vorobev E.V., Ph.D. (Eng.), laboratory chief, SEC “Ion Plasma Technologies”, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ion plasma technologies, Hall systems, space thrusters. e-mail: evv@bmstu.ru

Serushkin S.V., junior researcher, SEC “Ion Plasma Technologies”, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ion plasma technologies, Hall systems, thermonuclear fusion. e-mail: serushkin_sv@bmstu.ru

Ivakhnenko S.G., Ph.D. (Eng.), Assoc. Professor, director, SEC “Ion Plasma Technologies”, Bauman Moscow State Technical University. Field of research interests: ion plasma technologies, Hall systems, space thrusters. e-mail: ivakhnenko@bmstu.ru