

621.384

## Продольный источник ионов с токовой автокомпенсацией фокусированного ионного пучка

А. А. Бизюков, А. И. Гирка, К. Н. Серeda, В. В. Слепцов, Е. В. Ромащенко

*Показано, что использование баллистической фокусировки в продольном ионном источнике холловского типа позволяет преобразовать форму ионного пучка из "эллипсоидной" в линейную и увеличить плотность тока ионного пучка на обрабатываемой поверхности. Исследовано влияние поперечного магнитного поля источника и краевых эффектов на форму пучка. Разработан плазменный нейтрализатор ионного пучка на основе дополнительного несамостоятельного газового разряда магнетронного типа с использованием эффекта "полого катода".*

PACS: 52.59.-f

*Ключевые слова:* ионный источник, сфокусированный ионный пучок, токовая нейтрализация пучка, потенциал диэлектрической мишени.

### Введение

В наукоемком производстве все большее значение приобретают вакуумно-плазменные технологии обработки поверхности. Среди них широко применяются технологии ионно-лучевой очистки, активации, травления и нанесения покрытий на поверхности рулонных и листовых материалов. К ионным источникам, применяемым для осуществления данных технологических процессов, обычно предъявляются следующие требования: источник должен формировать пучок ионов инертных и химически активных газов с энергией 0,5—2 кэВ; обеспечивать линейную протяженную зону обработки от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров; плотность тока ионного пучка должна быть достаточно большой для получения необходимой производительности; для обработки диэлектрических материалов необходимо обеспечить токовую компенсацию ионного пучка электронами, чтобы исключить накопление на обрабатываемой поверхности положительного заряда [1, 2].

Этим требованиям достаточно хорошо удовлетворяет протяженный ионный источник холловского типа — "ускоритель с анодным слоем" [3]. Несмотря на множество работ, посвященных источникам такого типа, и их массовое серийное изготовление различными производителями во всем мире, эти ионные источники обладают несколькими существенными недостатками. К таким недостаткам следует отнести, прежде всего, следующие:

- излишне сложную геометрию пучка, возникающую как следствие изначальной "эллипсоидной" формы пучка, а также приобретения ионами азимутального ускорения под действием силы Лоренца при движении в поперечном магнитном поле;
- недостаточная длительность непрерывной работы, обусловленная загрязнением разрядного промежутка продуктами распыления обрабатываемых поверхностей;
- необходимость дополнительных источников электронов для токовой компенсации ионных пучков [4].

В работе исследован продольный источник ионов типа "ускорителя с анодным слоем" [5] с баллистической фокусировкой ионного пучка и плазменной токовой автокомпенсацией. Баллистическая фокусировка ионного пучка позволяет преобразовать форму пучка из "эллипсоидной" в линейную. Это конструктивное решение дает возможность решить несколько задач:

- увеличить вдвое плотность ионного тока на обрабатываемую поверхность;
- существенно уменьшить обратный поток распыленных атомов;
- увеличить ресурс работы источника благодаря применению между источником и распыляемой поверхностью разделительной диафрагмы с узкой

**Бизюков Александр Анатольевич**, профессор.  
**Гирка Алексей Игоревич**, младший научный сотрудник.  
**Серeda Константин Николаевич**, доцент.  
 Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина.  
 Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4.  
 Тел. 38 (057) 335-37-44. E-mail: sekons@mail.ru  
**Слепцов Владимир Владимирович**, профессор.  
 Российский государственный технический университет им. К. Э. Циолковского (МАТИ).  
 Россия, Москва, Берниковская наб., 14, стр. 2.  
 Тел. (495) 915-33-27. E-mail: 08fraktal@inbox.ru  
**Ромащенко Елена Владимировна**, доцент.  
 Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля.  
 Украина, 91034, Луганск, кв. Молодежный, 20-а.  
 E-mail: romaschenko@bk.ru

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2011 г.

© Бизюков А. А., Гирка А. И., Серeda К. Н., Слепцов В. В., Ромащенко Е. В., 2011

линейной щелью, ширина которой определяется кроссовером пучка;

- обеспечить токовую компенсацию ионного пучка, создав на выходе ионного источника разрядную систему типа "полый катод" на основе разделительной диафрагмы для генерации электронов;

- применять распыляемые мишени (в том числе и диэлектрические) малых поперечных размеров с высоким коэффициентом использования материала в процессах ионно-лучевого нанесения покрытий.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Эксперименты проводились на ионном источнике холловского типа, генерирующем "эллипсоидный" пучок с большой полуосью 122,5 мм и с малой полуосью 17,5 мм. Баллистическая фокусировка пучка с фокусным расстоянием 90 мм осуществлялась наклоном разрядного промежутка анод-катод относительно плоскости источника на угол 10°. Выходная диафрагма имела ширину 16 мм. Пространство между диафрагмой и ионным источником ограничивалось металлическими стенками. Таким образом, формировалась замкнутая полость "полого катода", через которую проходил ионный пучок. На рис. 1 показана фотография ионно-лучевой системы для напыления тонких пленок с разделительной диафрагмой, нейтрализатором ионного пучка типа "полый катод" и цилиндрической распыляемой мишенью, а также эскизы ее продольного и поперечного разрезов.

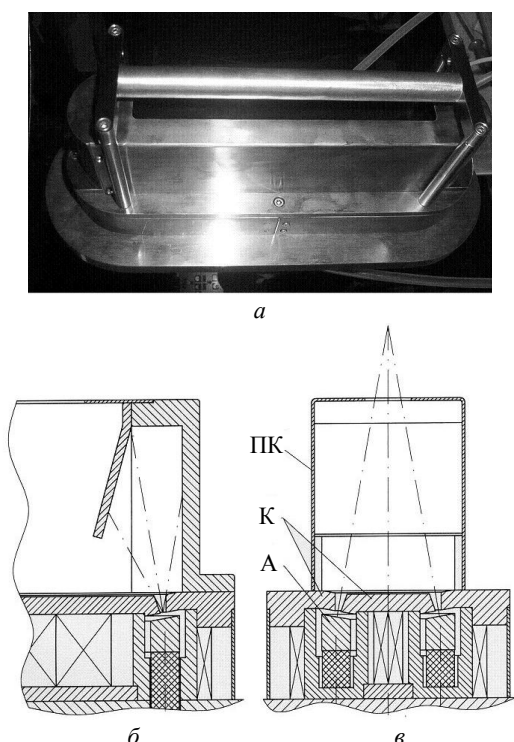


Рис. 1. Фото ионно-лучевой системы нанесения тонких пленок (а) и эскиз ее продольного (б) и поперечного (в) разреза: А — анод, К — катод, ПК — "полый катод"

Диапазон рабочих напряжений источника составлял 1—4 кВ. Магнитное поле источника создавалось с помощью постоянных магнитов, и средняя индукция магнитного поля в выходной щели источника составляет 1000 Гс. Плотность тока ионного пучка в зависимости от напряжения разряда, скорости откачки вакуумной системы и потока рабочего газа изменялась в пределах 1—20 мА/см<sup>2</sup>. Функцию распределения ионов пучка по энергиям в первом приближении можно аппроксимировать максвелловским распределением со средней энергией  $T_i$  [7]. При этом средняя энергия ионов в пучке пропорциональна ускоряющему напряжению, т. е.  $T_i = (0,3—0,4) eU \approx 300—1200$  эВ. Рабочее давление при напуске аргона в пространстве транспортировки пучка поддерживалось в пределах  $8 \cdot 10^{-3}—6 \cdot 10^{-4}$  Торр.

В экспериментах диэлектрическая распыляемая мишень моделировалась гальванически изолированным металлическим коллектором, плавающий потенциал которого измерялся электростатическим вольтметром.

Измерения распределения плотности тока пучка в области кроссовера показали, что эффект баллистической фокусировки позволяет получить ленточный ионный пучок толщиной 10 мм с повышенной плотностью тока. Вместе с тем на торцах источника наблюдалось аномальное, отличное от линейного, распределение плотности тока в виде небольших (радиусом около 20 мм) полукружностей.

Такой эффект может быть связан с влиянием поперечного магнитного поля источника на движение ионов в выходной щели [5], под действием которого вектор скорости ионов изменяет направление относительно оси баллистического движения  $z$  на угол  $\theta$ . Так как размер анодного слоя источника, где генерируются и ускоряются ионы, существенно меньше характерной протяженности области поперечного магнитного поля  $d$ , то, используя теорему Буша [6], можно получить следующее выражение для величины угла  $\theta$ :

$$\sin\theta = \int_0^d \frac{dz}{\rho_i} \approx \frac{d}{\langle \rho_i \rangle}, \quad (1)$$

где  $\rho_i = \frac{v_i}{\omega_{Bi}}$  — ларморовский радиус иона;

$\omega_{Bi} = \frac{eB(z)}{m_i c}$  — ионная циклотронная частота;

$e, m_i, v_i$  — заряд, масса и скорость иона;

$B(z)$  — индукция поперечной составляющей магнитного поля;

$\langle \rho_i \rangle$  — ларморовский радиус иона, рассчитанный по среднему поперечному магнитному полю в выходной щели ионного источника.

Таким образом, при небольших изменениях направления скорости ионов, что соответствует разрядным условиям в источнике, угол изменения направления вектора скорости определяется отношением размера области поперечного магнитного поля к среднему ларморовскому радиусу ионов. При средней энергии ионов пучка аргона  $\sim 1$  кэВ, средней индукции поперечного магнитного поля  $\sim 1000$  Гс и его протяженности  $d = 3$  см угол отклонения ионов от баллистической траектории составляет  $\theta \approx 9^\circ$ . На рис. 2 показано рассчитанное сечение пучка в торцевой части источника ионов в плоскости кроссовера с учетом этого эффекта.

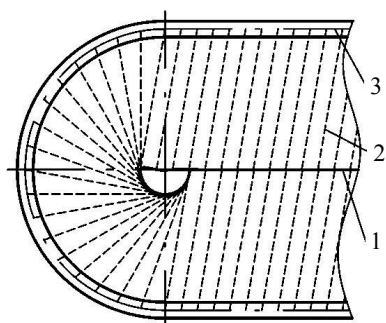


Рис. 2. Рассчитанные траектории ионов в торцевой части источника:

1 — проекция пучка в плоскости кроссовера; 2 — траектории ионов; 3 — выходная щель источника ионов

Рассчитанная форма сфокусированного ионного пучка качественно соответствует наблюдаемым в экспериментах формам распыления поверхности коллектора, помещенного в плоскость кроссовера.

Такой краевой эффект препятствует прохождению этой части пучка через диафрагму. Существует возможность существенно исправить форму пучка путем применения реверсивной магнитной фокусировки на торцах источника, как это было сделано в работах [7, 8]. Эту часть пучка можно также использовать для стимуляции разряда в "полом катоде" в целях осуществления токовой нейтрализации ионного пучка электронами.

Для устранения негативного воздействия поверхностного заряда изолированной (либо диэлектрической) мишени обычно используется токовая нейтрализация ионного пучка, которая достигается с помощью дополнительных устройств, инжектирующих электроны или отрицательные ионы в ионный пучок. В работе [9] показано, что в ускорителе с анодным слоем у выходной щели снаружи ионного источника в условиях изолированного коллектора пучка автоматически формируется дополнительный газовый разряд магнетронного типа — источник электронов, вследствие чего осуществляется токовая компенсация ионного пучка. Возбуждение данного типа разряда обусловлено геометрическими и конструктивными особенно-

стями источников данного типа. Энергия, необходимая для возбуждения дополнительного разряда, черпается из энергии ионного пучка посредством формирования положительного потенциала  $\phi_0$  на мишени и потери ионами пучка энергии  $\Delta \varepsilon_i = e\phi_0$ . В данной работе исследуется возможность увеличения степени токовой компенсации ионного пучка с помощью разряда в "полом катоде" магнетронного типа, который дополнительно возбуждается небольшой частью ионного пучка на торцах источника. На рис. 3 показана зависимость потенциала мишени от разрядного напряжения и давления газа.

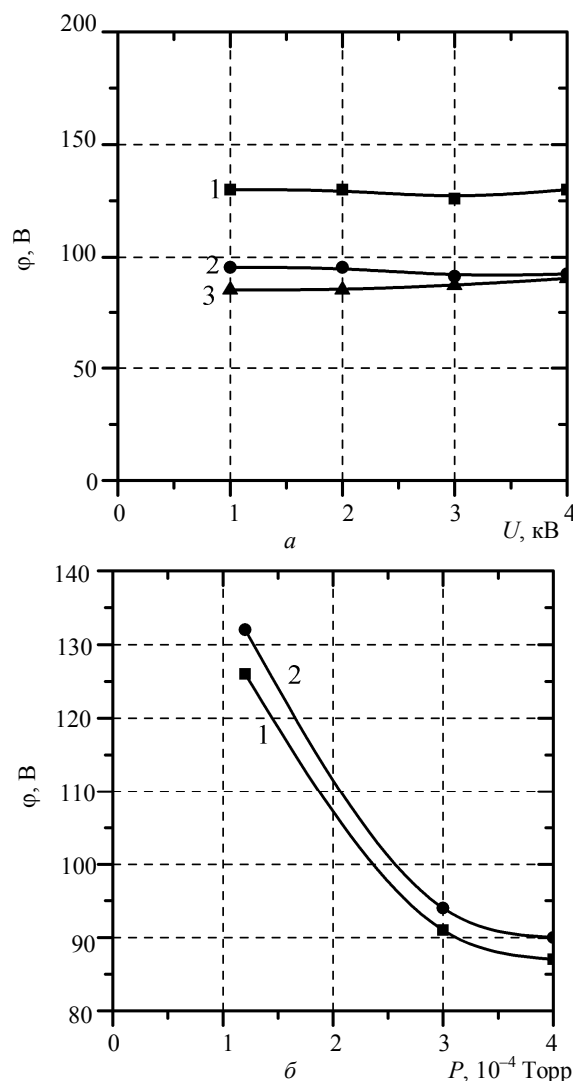


Рис. 3. Зависимость потенциала мишени от разрядного напряжения и давления газа

*a* — зависимость потенциала мишени от напряжения на аноде при различных давлениях (1 —  $p = 1,2 \cdot 10^{-4}$  Торр; 2 —  $p = 3 \cdot 10^{-4}$  Торр; 3 —  $p = 4 \cdot 10^{-4}$  Торр); *б* — зависимость потенциала мишени от давления в камере при различных напряжениях на аноде (1 —  $U = 2$  кВ, 2 —  $U = 3$  кВ)

Видно, что потенциал коллектора  $\phi_0$  в рабочем диапазоне давлений не превышает 150 В, что существенно ниже, чем в экспериментах без "полого катода" [9]. Это подтверждает эффективность

"полого катода" как генератора нейтрализующих электронов. При средней энергии пучка  $T_i \approx 1000$  эВ, что соответствует основным режимам работы источника ионов, частицы пучка практически не отражаются от коллектора и лишь сравнительно небольшая часть их энергии затрачивается на генерацию электронов.

Степень токовой компенсации ионного пучка можно оценить по величине потенциала изолированного коллектора из уравнений баланса токов и энергий заряженных частиц. Потенциал изолированного коллектора  $\varphi_0$  устанавливается автоматически таким, что обеспечивается равенство между токами электронов и ионов, приходящими на поверхность коллектора:

$$I_{es} = I_{is}, \quad I_{is} = kI_{i0} \cdot \exp(-e\varphi_0/T_i),$$

где  $I_{i0}$  — ток ионов, инжектируемых источником;

$k$  — отношение площади выходной диафрагмы к площади выходной щели ионного источника.

В ток электронов на поверхность коллектора  $I_{es}$  вносят свой вклад:

- ток вторично-эмиссионных электронов с поверхностей "полого катода" источника в результате бомбардировки как ионами пучка, отразившимися от перепада потенциала  $\varphi_0$ , так и ионами из области дополнительного разряда  $I_{ip}$  (с коэффициентом ион-электронной эмиссии  $\gamma_0$ );

- ток электронов плазмы дополнительного разряда внутри "полого катода"  $I_{ep}$ ;

- ток вторично-эмиссионных электронов ионного пучка с торцевой части поверхности "полого катода" (с коэффициентом ион-электронной эмиссии  $\gamma_1$ ).

Учитывая, что  $I_{ip} = I_{ep}$ , электронный ток на поверхность можно записать в виде:

$$I_{es} = \gamma_0 I_{i0} (1 - \exp(-e\varphi_0/T_i)) + (1 + \gamma_0) I_{ep} + \gamma_1(1 - k) I_{i0} \cdot \exp(-e\varphi_0/T_i).$$

Уравнение баланса токов на поверхности коллектора ( $I_{es} = I_{is}$ ) имеет вид:

$$kI_{i0} \exp(-e\varphi_0/T_i) = I_{i0} \gamma_0(1 - \exp(-e\varphi_0/T_i)) + \gamma_1(1 - k) I_{i0} \exp(-e\varphi_0/T_i) + I_{ep}(1 + \gamma_0). \quad (2)$$

Поскольку в наших экспериментах средняя энергия ионов пучка  $T_i = 300—1200$  эВ, а энергия ионов из области дополнительного разряда  $\varepsilon_i \approx \approx e\varphi_0 = 100—150$  эВ, то средние коэффициенты ион-электронной эмиссии  $\gamma_i \sim 0,1 - 0,3$  и  $\gamma_0 \leq 0,1$  [10, 11].

Энергия пучка затрачивается на ионизацию газа в "полом катоде", ускорение ионов, плазменных и вторичноэмиссионных электронов. Математически это можно записать в виде уравнения баланса энергии:

$$e\varphi I_{is} = \varepsilon^* I_{ep} + e\varphi \alpha_i \cdot I_{ip} + e\varphi \alpha_e \cdot I_{es}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon^*$  — энергетическая цена иона в разряде;  $\alpha_i$  и  $\alpha_e$  — коэффициенты, определяющие среднюю энергию ионов и электронов, выходящих из области дополнительного разряда к коллектору и стенкам полого катода.

Величины  $\alpha_i$  и  $\alpha_e$  определяются локализацией зоны ионизации в разряде внутри "полого катода", который представляет собой тлеющий разряд в поперечном магнитном поле магнетронного типа [2]. При увеличении давления зона генерации заряженных частиц перемещается в более высоковольтную область относительно приложенного потенциала. При этом величина  $\alpha_i$  увеличивается (растет средняя энергия ионов), а  $\alpha_e$  уменьшается, причем  $\alpha_i + \alpha_e \approx 1$ . Это соответствует переходу разряда из высоковольтного режима тлеющего разряда в поперечном магнитном поле, для которого  $\alpha_i \approx 0,3$ , в магнетронный, для которого  $\alpha_i \approx 0,8$ . Коэффициенты  $\alpha_i$  и  $\alpha_e$  были определены по энергетическим спектрам ионов и электронов, измеренным в работе [12].

Совместное решение уравнения баланса токов (2) и энергий (3) позволяет получить уравнение для равновесного потенциала изолированного коллектора в таком виде:

$$\gamma_0 \cdot e \frac{e\varphi_0}{T_i} = \frac{\varepsilon^* (k + \gamma_0 - \gamma_1 + k\gamma_1) + \alpha_i e\varphi_0 (1 - k)(\gamma_0 - \gamma_1)}{\varepsilon^* + \alpha_i e\varphi_0}. \quad (4)$$

Уравнение (4) решается численно, результаты численного расчета зависимостей  $\varphi$  от различных значений параметров ионного источника приведены на рис. 4.

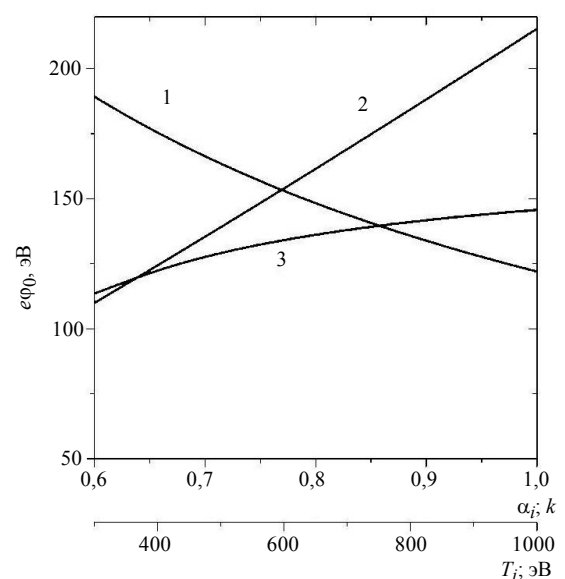


Рис. 4. Зависимость плавающего потенциала мишени  $\varphi_0$  от параметров ионно-лучевой системы:

1 —  $e\varphi_0(\alpha_i)$  при  $\varepsilon^* = 26$  эВ,  $k = 0,67$ ,  $T_i = 1$  кэВ,  $\gamma_0 = 0,1$ ,  $\gamma_1 = 0,15$ ;  
 2 —  $e\varphi_0(k)$  при  $\varepsilon^* = 26$  эВ,  $\alpha_i = 0,95$ ,  $T_i = 1$  кэВ,  $\gamma_0 = 0,1$ ,  $\gamma_1 = 0,15$ ;  
 3 —  $e\varphi_0(T_i)$  при  $\varepsilon^* = 26$  эВ,  $k = 0,67$ ,  $\alpha_i = 0,95$ ,  $\gamma_0 = 0,1$

Результаты расчетов качественно совпадают с результатами измерений плавающего потенциала коллектора, а предложенная феноменологическая модель описания генерации электронов позволяет предсказать степень токовой компенсации ионного пучка при использовании в ионном источнике плазменного источника электронов типа "полый катод". При определенных значениях параметров системы можно добиться практически полной токовой компенсации ионного пучка ( $e\phi_0 \ll T_i$ ).

Таким образом, в ускорителе с анодным слоем в случае изолированного коллектора или диэлектрической мишени возникает автокомпенсация ионного пучка за счет возбуждения дополнительного несамостоятельного газового разряда вне ионного источника в области "полого катода", обеспечивающего нейтрализующий электронный ток на обрабатываемую поверхность и практически полную токовую компенсацию ионного пучка.

### Заключение

В работе показано, что использование баллистической фокусировки в продольном ионном источнике холловского типа позволяет преобразовать форму ионного пучка из "эллипсоидной" в линейную и повысить плотность тока ионного пучка на обрабатываемой поверхности. Экспериментально и теоретически исследовано влияние поперечного магнитного поля источника и краевых эффектов на форму пучка. Разработан плазменный нейтрализатор ионного пучка на основе дополнительного несамостоятельного газового разряда магнетронного типа с использованием эффекта "полого катода", который позволяет осуществить высокоэффективную токовую нейтрализацию ионного пучка электронами и применять

источник для ионно-лучевой обработки диэлектрических материалов. Построена феноменологическая модель генерации электронов, которая позволяет предсказать степень токовой компенсации ионного пучка при использовании в ионном источнике плазменного нейтрализатора, использующего эффект "полого катода", и определить оптимальные геометрические и газоразрядные параметры работы ионно-лучевой системы.

### Литература

1. *Габович М. Д.* Физика и техника плазменных источников ионов. — М.: Атомиздат, 1972.
2. *Данилин Б. С.* Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. *Морозов А. И.* Физические основы космических электрореактивных двигателей. Т. 1. Элементы динамики потоков в ЭРД. — М.: Машиностроение, 1987.
4. *Гришин С. Д., Ерофеев В. С., Жаринов А. В.* В кн.: Плазменные ускорители / Под ред. Арцимовича Л. А. — М.: Машиностроение, 1973.
5. *Гришин С. Д., Лесков Л. В., Козлов Н. П.* В кн.: Электрические ракетные двигатели. — М.: Машиностроение, 1975.
6. *Молоковский С. И., Сушков А. Д.* Интенсивные электронные и ионные пучки. — Л.: Энергия, 1972.
7. *Gutkin M., Bizyukov A., Bizyukov I., Sleptsov V., Sereda K.* United States Patent, Pub. No. US 2008/0191629 A1, Pub. Date: 08.14.2008.
8. *Bizyukov A. A., Chibisov A. D., Sereda K. N., Romaschenko E. V., Nazarov A. V.* // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика плазмы (14). 2008. № 6. С. 162.
9. *Бизюков А. А., Кашаба А. Е., Середка К. Н., Целуйко А. Ф., Юнаков Н. Н.* // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 10. С. 69.
10. *Каминский М.* Атомные и ионные столкновения на поверхности металла. — М.: Мир, 1967.
11. Физические величины: Справочник / А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. М. Братковский и др. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. С. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.
12. *Тюрюканов П. М., Никольский А. Д., Фетисов И. К., Толстой И. Н.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 10. С. 2028.

## Longitudinal ion source with a current self-compensation of the focused ion beam

*A. A. Bizyukov, A. I. Girka, K. N. Sereda*  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4 Svobody sq., Kharkiv, 61077, Ukraine  
E-mail: bizyukov@mail.ru

*V. V. Sleptsov*  
Moscow State Aviation Technological University (MATI),  
14/2 Bernikovskaya embankment, Moscow, 121552, Russia  
E-mail: 08fraktal@inbox.ru

*E. V. Romashchenko*

Volodymyr Dahl East Ukrainian National University,  
20-a Molodizhny bl., Luhansk, 91034, Ukraine  
E-mail: romaschenko@bk.ru

*In this work we introduce the ballistic focusing for the longitudinal Hall-type ion source. The focusing transforms the ion beam shape from ‘ellipsoidal’ one to linear one and increases the ion beam current density per the operating surface. The transversal magnetic field and edge effects are investigated as a factor influencing the beam shape. Charge neutralization of the ion beam is performed by plasma neutralizer, which uses supplementary semi-self-maintained magnetron-type discharge and hollow cathode effect.*

PACS: 52.59.-f

*Keywords:* ion source, focused ion beam, beam current neutralization, dielectric target potential.

Bibliography — 12 references.

*Received February 8, 2011*

\* \* \*