

## УПРАВЛЕНИЕ ФОРМОЙ ПУЧКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИОННОГО ИСТОЧНИКА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ

Д.В. Духопельников

duh@bmstu.ru

Е.В. Воробьев

С.Г. Ивахненко

ivakhnenko@bmstu.ru

Д.В. Кириллов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Показано, что эффект азимутального отклонения ионов в пучке ускорителя с замкнутым азимутальным дрейфом электронов можно использовать для управления формой ионного пучка и профилем распределения плотности ионного тока по радиусу. Изменяя профиль распределения магнитного поля вдоль оси ускорительного канала, можно управлять профилем плотности ионного тока, придавая ему как кольцевую форму, так и форму, близкую к распределению Гаусса. Предложен критерий для расчета магнитной системы, обеспечивающей наилучшую фокусировку ионного пучка. Установлено, что по известному распределению магнитного поля при оптимальной фокусировке ионного пучка можно оценить положение зоны ионизации в ускорительном канале

### Ключевые слова

*Ускоритель с анодным слоем, холловский ускоритель, фокусировка ионного пучка, ионное распыление, анодный слой, сила Лоренца*

Поступила в редакцию 16.08.2016  
© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

**Введение.** Технологические ионные источники применяют для очистки и активации поверхности изделий перед нанесением тонкопленочных покрытий, ионного ассистирования в процессе нанесения покрытия, осаждения алмазоподобных покрытий, ионно-лучевого травления и формообразования.

В современной промышленности из всего многообразия ионных источников [1] наиболее распространены электростатический сеточный ускоритель и ускоритель с азимутальным дрейфом электронов (чаще всего, выполненный по схеме ускорителя с анодным слоем). Достоинства сеточного ускорителя — независимое управление ионным током и энергией ионов в пучке, равномерное распределение по радиусу плотности ионного тока, возможность с помощью экранов корректировать форму ионного пучка [2, 3], недостаток — чрезмерная сложность конструкции и системы электропитания. Ускорители с анодным слоем удобны в эксплуатации, имеют простую конструкцию и предъявляют меньше требований к системе электропитания. В то же время недостатком ускорителей с замкнутым дрейфом электронов традиционной конструкции является неравномерное по радиусу распределение плотности ионного тока в пучке: он имеет кольцевую форму с провалом в центре.

Для технологических задач требуются различные профили ионного тока в пучке. Например, для ионной очистки и активации поверхности, где требуется максимальная зона обработки и для процесса равномерного съема материала при ионно-лучевом формообразовании подходит традиционная кольцевая форма пучка. Однако для локальной коррекции ошибок профиля поверхности оптических деталей необходим ионный пучок небольшого диаметра с гауссовым распределением плотности ионного тока по радиусу [4]. Существующие ионные источники имеют различные геометрию и размеры ускорительных каналов, удовлетворяющие требованиям конкретного технологического процесса, и следовательно, являются узкоспециализированными. В связи с этим представляет интерес разработка универсального ионного источника с азимутальным дрейфом электронов, позволяющего управлять профилем распределения ионного тока в пучке.

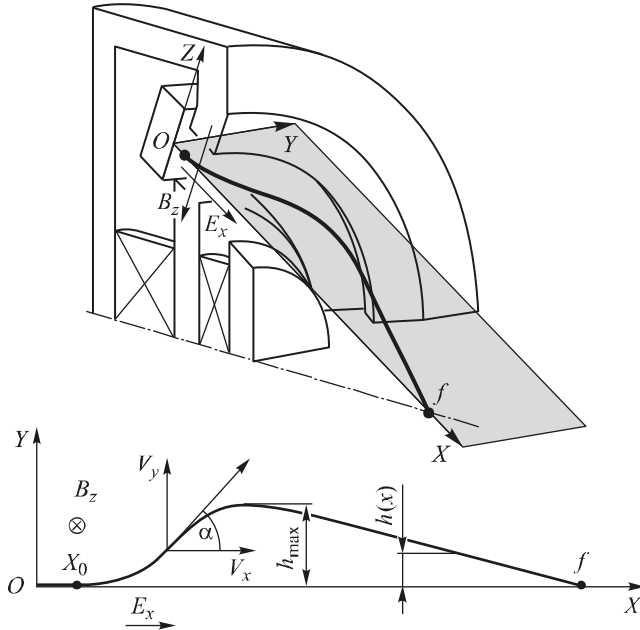
Известно, что в ускорителях с замкнутым азимутальным дрейфом электронов линии индукции магнитного поля являются электрическими эквипотенциалами, следовательно, электрические силовые линии в зоне ускорения перпендикулярны магнитным [5, 6]. Поэтому, изменяя топологию магнитного поля в ускорительном канале, можно управлять структурой электрического поля и формой ионного пучка. Проще всего реализовать этот способ за счет придания необходимой формы стенкам ускорительного канала, которые обычно являются полюсами магнитной системы, или за счет использования магнитных шунтов, изменяющих геометрию магнитного поля. Такой прием часто применяют при проектировании электрических ракетных двигателей [7, 8].

Однако описанный прием позволяет лишь ограниченно управлять формой ионного пучка. При ускорении в поперечном магнитном поле на ионы действует сила Лоренца, изменяющая траекторию их движения. Этот эффект приводит к расхождению ионного пучка в ускорителях и двигателях с анодным слоем [9] и снижению тягового КПД двигателей [10, 11]. При этом пучок принимает форму однополостного гиперболоида, что не позволяет добиться гауссова распределения плотности ионного пучка по радиусу приданием ускорительному каналу конической формы [12].

Для фокусировки ионного пучка в пятно с гауссовым распределением плотности ионного тока необходимо скорректировать траекторию ионов после того, как они покинут ускорительный канал. Так, в работах [13, 14] для этой цели предложено за срезом ионного источника устанавливать дополнительную магнитную систему, создающую магнитное поле, вектор индукции которого направлен противоположно вектору индукции в ускорительном канале. В магнитном поле дополнительной магнитной системы ион возвращается на свою первоначальную траекторию.

Изменяя параметры дополнительной магнитной системы, можно в широких пределах управлять распределением плотности ионного тока по радиусу ионного пучка. Цель настоящей работы — исследование влияния магнитного поля дополнительной магнитной системы на форму пучка холловского ускорителя с коническим каналом и распределение плотности тока по радиусу.

**Управление формой ионного пучка.** Появившись вблизи анода в коническом канале, ион ускоряется под действием электрического поля в плоскости, касательной к конусу, образующая которого совпадает с осью  $x$  канала, а вершина лежит в точке  $x = f$  на оси симметрии системы (рис. 1).



**Рис. 1.** Траектория движения иона

При движении внутри ускорительного канала на ион со стороны магнитного поля действует сила Лоренца, отклоняющая траекторию иона в направлении, перпендикулярном образующей конуса. При этом напряженность  $E$  электрического поля направлена вдоль образующей  $x$ , а сила Лоренца — перпендикулярно образующей в направлении  $y$  по окружности ускорительного канала. Ион отклоняется от оси  $x$  в азимутальном направлении  $y$  на величину  $y$ , а вектор скорости иона поворачивается относительно оси  $x$  на угол  $\alpha$ . Уравнения движения иона в плоскости  $xOy$  будут иметь вид

$$\begin{aligned} m \frac{dV_x}{dt} &= qE(x) + qV_y B_z(x); \\ m \frac{dV_y}{dt} &= -qV_x B_z(x), \end{aligned} \tag{1}$$

где  $m$  — масса иона;  $q$  — заряд иона;  $B_z$  — составляющая индукции магнитного поля, перпендикулярная образующей конуса.

Преобразуя левую часть второго уравнения системы (1)

$$m \frac{dV_y}{dt} = m \frac{dV_y}{dx} \frac{dx}{dt} = m \frac{dV_y}{dx} V_x \tag{2}$$

и сокращая на  $V_x$ , получаем

$$m \frac{dV_y}{dx} = -qB_z(x). \tag{3}$$

Из выражения (3) и первого уравнения системы (1), полагая величину  $V_y$  малой по сравнению с  $V_x$ , запишем выражения для проекций скорости:

$$V_x = \left( \frac{2q}{m} \int_{x_0}^x E(x) dx \right)^{\frac{1}{2}}; \quad V_y = -\frac{q}{m} \int_{x_0}^x B_z(x) dx, \tag{4}$$

где  $x_0$  — координата места появления иона.

Для траектории иона справедливо равенство

$$\frac{dy}{dx} = \frac{V_y}{V_x} = \alpha. \tag{5}$$

Здесь  $\alpha$  — угол между образующей  $x$  ускорительного канала и траекторией иона.

Интегрируя выражение (5), с учетом (4) для азимутального отклонения ионов  $y(x)$  получаем

$$y(x) = \int_{x_0}^x \frac{V_y}{V_x} dx = \left( \frac{q}{2m} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{x_0}^x \frac{-\int_{x_0}^x B_z(x) dx}{\left( \int_{x_0}^x E(x) dx \right)^{\frac{1}{2}}} dx. \tag{6}$$

Из выражения (6) следует условие для сведения ионного пучка в точку фокусировки (см. рис. 1):

$$y(f) = 0. \tag{7}$$

Согласно условию (7), на отклонение ионов  $y(x)$  влияет не только распределение магнитного поля в рассматриваемой области, но и распределение электрического поля в ускорительном канале. При этом необходимо знать координату места появления иона  $x_0$ . В ускорителях с анодным слоем этих параметры неизвестны, трудно поддаются оценке и экспериментальному определению.

При малых углах отклонения иона  $\alpha$  и быстром спаде магнитного поля, что обеспечивается малым расстоянием между основной и компенсирующей магнитными системами, максимальное отклонение иона от заданной траектории  $h_{\max}$  невелико. В этом случае (7) можно заменить требованием  $\alpha = 0$  (см. рис. 1) и для проектных расчетов использовать не отклонение иона, а угол отклонения [15]

$$\alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{V_y}{V_x} = -\left( \frac{q}{2m\epsilon_i} \right)^{\frac{1}{2}} \int_{x_0}^x B_z(x) dx, \tag{8}$$

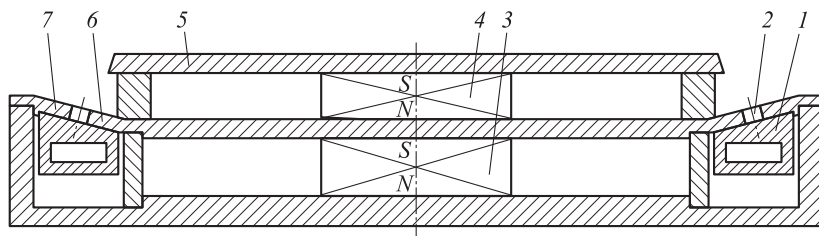
где  $\epsilon_i$  — энергия иона,  $\epsilon_i = \int_{x_0}^x qE(x) dx$ .

В качестве параметра, определяющего фокусировку ионного пучка при выполнении условия (8), можно использовать интеграл составляющей индукции магнитного поля, перпендикулярной образующей  $x$ . Тогда для фокусировки ионного пучка в точке  $x = f$ , лежащей на оси симметрии ускорителя (см. рис. 1), кроме придания ускорительному каналу конической формы, необходимо выполнить условие

$$A \approx 0, \quad A(x_0, f) = - \int_{x_0}^f B_z(x) dx = 0.$$

При значительном отклонении параметра  $A$  от нуля ионный пучок приобретает форму однополостного гиперболоида вращения, причем диаметр «перетяжки» (минимальный диаметр пучка) тем выше, чем больше значение этого отклонения. Таким образом, изменяя значение параметра  $A$ , можно управлять формой ионного пучка, получая различные профили ионного тока в точке фокусировки.

**Описание эксперимента.** В настоящей работе использован ускоритель с анодным слоем с фокусировкой ионного пучка (рис. 2) со средним диаметром ускорительного канала 200 мм и коническими стенками, обеспечивающий «геометрическую» фокусировку на расстоянии 360 мм от среза. Магнитное поле переменной направленности создается с помощью магнитной системы, которая состоит из основной (полюсов 6 и 7 и магнита 3) и компенсирующей (полюса 5 и магнита 4) магнитных систем. Магнитное поле в основной и компенсирующей магнитных системах регулировалось изменением числа установленных постоянных магнитов.



**Рис. 2.** Схема ускорителя с анодным слоем с фокусировкой ионного пучка:

1 — анод; 2 — ускорительный канал; 3, 4 — магниты; 5 — полюс компенсирующей магнитной системы; 6, 7 — полюса основной магнитной системы

Ионный источник работал при напряжении  $U_p = 3$  кВ и токе  $I_p = 150$  мА. В качестве плазмообразующего газа применялся аргон. Остаточное давление в вакуумной камере составляло  $P_{ост} = 1 \cdot 10^{-3}$  Па.

Для измерения распределения плотности ионного тока по радиусу пучка ускорителя применялся многоэлектродный датчик (рис. 3), состоящий из 27 ионных зондов Фарадея, установленных с шагом 7 мм. Зонды были присоединены к опорному электроду (заземленному катоду ионного источника) через



Рис. 3. Многоэлектродный датчик ионного тока

делитель напряжения с полным сопротивлением 6 кОм. Вследствие этого потенциал зондов всегда соответствовал ионной ветви вольт-амперной характеристики, а ток в измерительной цепи был пропорционален ионному току на зонд.

Ускоритель размещался в вакуумной камере вертикально. Многоэлектродный датчик устанавливался на подвижном держателе, конструкция которого позволяла изменять расстояние от датчика до ионного источника в пределах 100...400 мм. Плоскость датчика была перпендикулярна оси ускорителя.

Для управления конфигурацией магнитного поля изменялось число магнитов, установленных в основную и компенсирующую магнитные системы. В зависимости от числа магнитов параметр  $A$  может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Три нормированные зависимости индукции магнитного поля от образующей конического канала при различных значениях параметра  $A$  представлены на рис. 4.

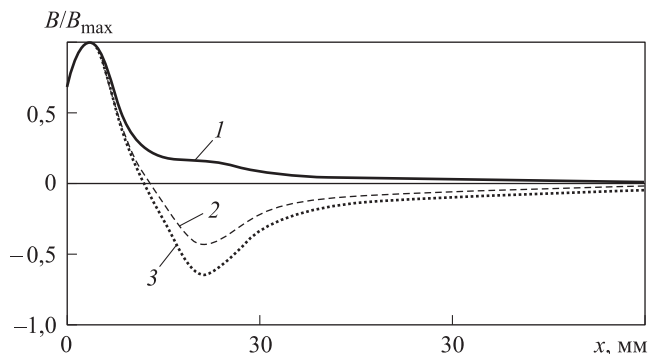


Рис. 4. Нормированные зависимости индукции магнитного поля от образующей ускорительного канала при значениях параметра  $A > 0$  (1),  $A \approx 0$  (2),  $A < 0$  (3)

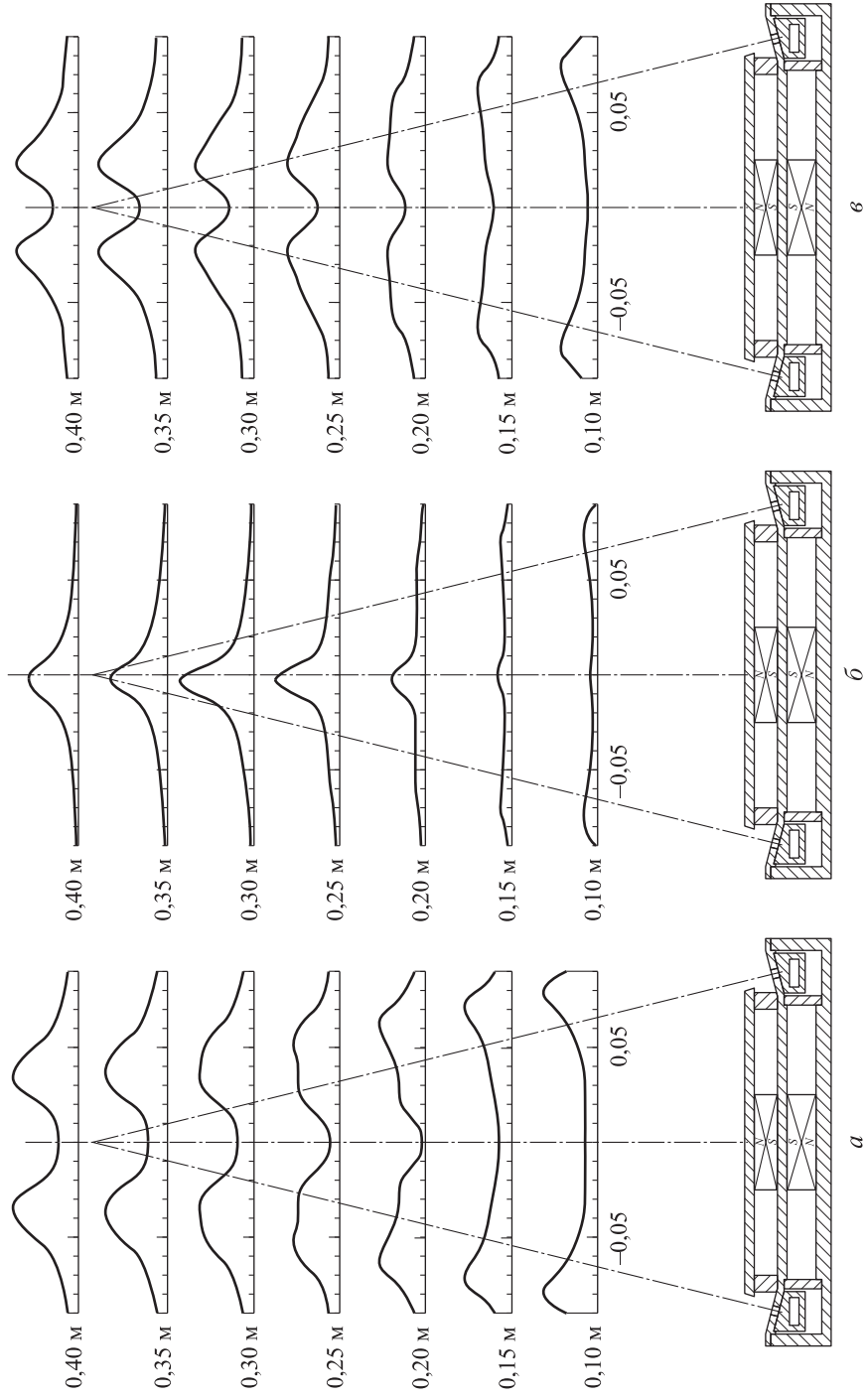
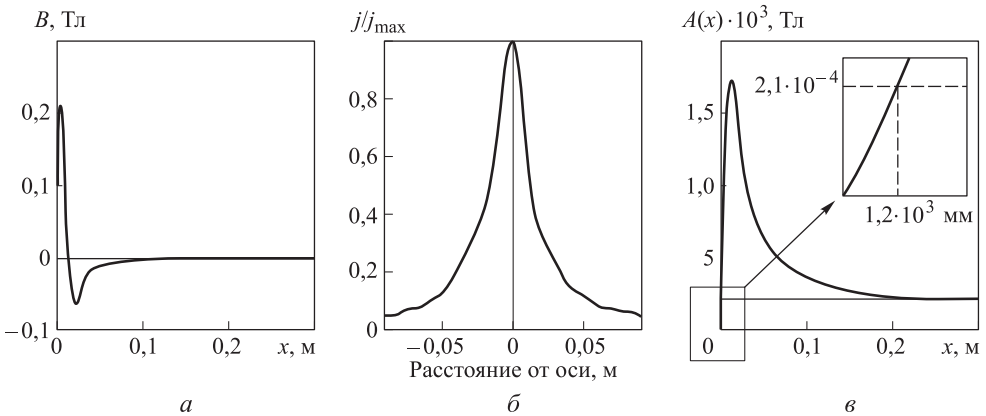


Рис. 5. Профили плотности ионного тока на различных расстояниях от ускорителя при значениях параметра  $A > 0$  (а),  $A \approx 0$  (б),  $A < 0$  (в)

Профили ионного тока на различных расстояниях от среза ускорителя, соответствующие зависимостям магнитного поля, приведенным на рис. 4, показаны на рис. 5. Когда параметр  $A$  существенно положителен (рис. 5, а), воздействия силы Лоренца на ионы при их прохождении над полюсом 5 недостаточно для полной компенсации азимутального поворота, приобретенного в ускорительном канале. При близком к нулю значении параметра  $A$  (рис. 5, б) действие на ионы компенсирующего магнитного поля близко к действию магнитного поля в ускорительном канале. В этом случае угол поворота ионов равен нулю и они возвращаются на свои первоначальные траектории. Наконец, при существенно отрицательном значении параметра  $A$  (рис. 5, в) компенсирующее магнитное поле оказывает значительно большее влияние на движение ионов, чем магнитное поле в ускорительном канале. При этом наблюдается «перефокусировка» пучка.

Используя параметр  $A$ , можно оценить положение наиболее вероятного места появления ионов в ускорительном канале. Для этого необходимо изменением соотношения магнитных полей основной и компенсирующей магнитных систем добиться наилучшей фокусировки ионного пучка, когда значение параметра  $A$  близко к нулю. При неизвестном положении зоны максимальной ионизации в качестве начальной точки интегрирования удобно выбрать положение анода. При этом зависимость  $A(x)$  будет асимптотически стремиться к прямой, параллельной оси абсцисс. Координата точки пересечения этой прямой с зависимостью  $A(x)$  будет координатой зоны максимальной ионизации.

В качестве примера рассмотрим распределение магнитного поля в ускорителе УАС-200К [13] (рис. 6, а, начало координат оси абсцисс лежит на поверхности анода), при котором достигается хорошая фокусировка ионного пучка (рис. 6, б). Зависимость  $A(x)$  показана на рис. 6, в.



**Рис. 6.** Зависимость индукции магнитного поля от расстояния до анода (а); профиль плотности ионного тока в точке фокуса ионного пучка (б), зависимость параметра  $A$  от расстояния до анода (в)

Распределение магнитного поля вдоль оси ускорителя измерялось гауссметром *AlphaLab GM-2* с точностью 1 %. Измерения проводились вне вакуумной камеры на ускорителе, закрепленном на стапеле. Датчик Холла перемещался по



направляющим с микрометрическим винтом. Позиционирование датчика Холла в ускорительном канале выполнялось с точностью 0,2 мм. Изменение магнитного поля при работе ускорителя за счет холловского тока не учитывалось, так как в работах [16–18] показано, что в ускорителях плазмы с замкнутым дрейфом электронов холловский ток не оказывает заметного влияния на конфигурацию магнитного поля.

График  $A(0, x)$  асимптотически стремится к прямой  $A = 2,1 \cdot 10^{-4}$  Тл·м, которая пересекает его в точке  $x = 1,2 \cdot 10^{-3}$  м. Таким образом, в этом случае можно полагать, что зона максимальной ионизации лежит на расстоянии приблизительно 1,2 мм от анода.

**Заключение.** Приведенные результаты показывают, что эффект азимутального отклонения ионов в пучке ускорителя с азимутальным дрейфом электронов можно использовать для управления формой ионного пучка и профилем распределения плотности ионного тока по радиусу. Корректируя профиль распределения магнитного поля вдоль оси канала, можно придавать профилю плотности ионного тока на обрабатываемой поверхности кольцевую форму, а также форму, близкую к распределению Гаусса. Последнее является важным условием для применения ускорителей с анодным слоем в оптической промышленности для прецизионного формообразования. Добившись хорошей фокусировки ионного пучка, по известному распределению магнитного поля в ускорительном канале, можно оценить положение зоны максимальной ионизации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Zhurin V.V.* Industrial ion sources: Broadbeam gridless ion source technology. Wiley, 2011. 326 p.
2. *Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A.* Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of ion beam figuring // Proc. SPIE. 6671. Optical Manufacturing and Testing VII. 2007. Vol. 6671. P. 667114-1–667114-10. DOI: 10.1117/12.734273  
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1321975>
3. *Ghigo M., Cornelli S., Canestrari R., et al.* Development of a large ion beam figuring facility for correction of optics up to 1.7 m diameter // Proc. SPIE. 7426. Optical Manufacturing and Testing VIII. 2009. Vol. 7426. P. 742611-1–742611-8. DOI: 10.1117/12.826433  
URL: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=785644&resultClick=1>
4. *Arnold T., Pietag F.* Ion beam figuring machine for ultra-precision silicon spheres correction // Precision Engineering. 2015. Vol. 41. P. 119–125. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.03.009  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635915000513>
5. *Морозов А.И.* Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2008. 616 с.
6. *Гришин С.Д., Лесков Л.В.* Электрические ракетные двигатели космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. 216 с.
7. *Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К.* Стационарные двигатели Морозова. М.: Изд-во МАИ, 2012. 292 с.
8. *Hofer R.R.* Development and characterization of high-efficiency, high-specific impulse xenon Hall thrusters. Ph.D. dissertation. Dept. of Aerospace Engineering, University of Michigan, 2004.

9. *Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Воробьев Е.В.* Экспериментальное подтверждение эффекта азимутального отклонения ионов в двигателях с анодным слоем // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 11. С. 233–238. DOI: 10.7463/1112.0483882 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/483882.html>

10. *Влияние азимутального отклонения ионов плазменной струи на тяговый КПД двигателя с анодным слоем / М.К. Марахтанов, Д.В. Духопельников, С.Г. Ивахненко, Е.В. Воробьев, В.И. Крылов* // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 12. DOI: 10.7463/1212.0483944 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/483944.html>

11. *Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Марахтанов М.К.* Потеря тяги в двигателях с анодным слоем за счет азимутальной закрутки ионов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Специальный выпуск «Ионно-плазменные технологии». С. 58–63.

12. *Духопельников Д.В., Марахтанов М.К.* Способ электромагнитной фокусировки ионного пучка в ускорителе плазмы с азимутальным дрейфом электронов. Патент RU 2465749. Оpubл. 2012. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2465749> (дата обращения: 15.01.2017).

13. *Воробьев Е.В., Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Марахтанов М.К.* Холловский ускоритель с фокусированным пучком для наноразмерной обработки крупногабаритных зеркал оптических телескопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. Специальный выпуск «Ионно-плазменные технологии». С. 35–41.

14. *Compact steady-state and high-flux Falcon ion source for tests of plasma-facing materials / O. Girka, I. Bizyukov, K. Sereda, A. Bizyukov, M. Gutkin, V. Sleptsov* // Review of Scientific Instruments. 2012. Vol. 83. DOI: 10.1063/1.4740519 URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4740519>

15. *Духопельников Д.В., Ивахненко С.Г.* Влияние азимутального отклонения ионов на форму пучка двигателя с анодным слоем // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2012. № 10. DOI: 10.7463/1012.0483832 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/483832.html>

16. *Matthew T. Dmonkos, Alec D. Gallimore, Sven G. Bilén.* A Hall probe diagnostic for low density plasma accelerators // Rev. Sci. Instrum. 1998. Vol. 69. No. 6. P. 2546–2549. DOI: 10.1063/1.1148956 URL: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1148956>

17. *Духопельников Д.В.* Измерение индукции магнитного поля и моделирование холловского тока в разряде магнетронной распылительной системы // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 10. DOI: 10.7463/1015.0818660 URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/818660.html>

18. *Rosnagel S.M., Kaufman H.R.* Induced drift currents in circular planar magnetrons // Journal of Vacuum Science & Technology A. Vacuum Surfaces and Films. 1987. Vol. 5. No. 1. P. 88–91. DOI: 10.1116/1.574822 URL: <http://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.574822>

**Духопельников Дмитрий Владимирович** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Воробьев Евгений Валентинович** — ассистент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Ивахненко Сергей Геннадьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Кириллов Даниил Вячеславович** — ассистент кафедры «Плазменные энергетические установки» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Духопельников Д.В., Воробьев Е.В., Ивахненко С.Г., Кириллов Д.В. Управление формой пучка технологического ионного источника для высокоточной обработки поверхности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 3. С. 24–36. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-24-36

## **SHAPE CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL ION SOURCE BEAM FOR HIGH-PRECISION SURFACE TREATMENT**

**D.V. Dukhopel'nikov**

duh@bmstu.ru

**E.V. Vorob'ev**

**S.G. Ivakhnenko**

ivakhnenko@bmstu.ru

**D.V. Kirillov**

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

### **Abstract**

The study shows that the effect of azimuthal deflection of ions in an accelerator beam with a closed azimuthal electron drift can be used to control the shape of the ion beam and the profile of the ion current density distribution along the radius. By varying the distribution profile of the magnetic field along the axis of the accelerating channel, it is possible to control the ion current density profile, giving it both an annular shape and a shape close to the Gaussian distribution. We propose a criterion for calculating the magnetic system providing the best focusing of the ion beam. Findings of the research show that from the known distribution of the magnetic field with the optimal focusing of the ion beam, one can estimate the position of the ionization zone in the accelerating channel

### **Keywords**

*Accelerator with anode layer, Hall current accelerator, ion beam focusing, ion sputtering, anode layer, Lorentz force*

## **REFERENCES**

- [1] Zhurin V.V. Industrial ion sources: Broadbeam gridless ion source technology. Wiley, 2011. 326 p.
- [2] Ghigo M., Canestrari R., Spiga D., Novi A. Correction of high spatial frequency errors on optical surfaces by means of ion beam figuring. Proc. SPIE. 6671. Optical Manufacturing and Testing VII, 2007, vol. 6671, pp. 667114-1–667114-10. DOI: 10.1117/12.734273 Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=1321975>

- [3] Ghigo M., Cornelli S., Canestrari R., et al. Development of a large ion beam figuring facility for correction of optics up to 1.7 m diameter. *Proc. SPIE. 7426. Optical Manufacturing and Testing VIII*, 2009, vol. 7426, pp. 74611-1–74611-8. DOI: 10.1117/12.826433 Available at: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=785644&resultClick=1>
- [4] Arnold T., Pietag F. Ion beam figuring machine for ultra-precision silicon spheres correction. *Precision Engineering*, 2015, vol. 41, pp. 119–125. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2015.03.009 Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141635915000513>
- [5] Morozov A.I. *Vvedenie v plazmodinamiku [Introduction to plasmodynamics]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 616 p.
- [6] Grishin S.D., Leskov L.V. *Elektricheskie raketnye dvigateli kosmicheskikh apparatov [Spacecraft electrical jet propulsion]*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 216 p.
- [7] Arkhipov A.S., Kim V.P., Sidorenko E.K. *Statsionarnye dvigateli Morozova [Morozov stationary engines]*. Moscow, MAI Publ., 2012. 292 p.
- [8] Hofer R.R. Development and characterization of high-efficiency, high-specific impulse xenon Hall thrusters. Ph.D. dissertation, Dept. of Aerospace Engineering, University of Michigan, 2004.
- [9] Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'yev E.V. Experimental demonstration of azimuthal ion deviation effect in engines with anode layer. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU]*, 2012, no. 11, pp. 233–238 (in Russ.). DOI: 10.7463/1112.0483882 Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/483882.html>
- [10] Marakhtanov M.K., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Vorob'yev E.V., Krylov V.I. The influence of the azimuthal deviation ion plasma jet on the traction motor efficiency with anode layer. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU]*, 2012, no. 12 (in Russ.). DOI: 10.7463/1212.0483944 Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/483944.html>
- [11] Vorob'yev E.V., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Marakhtanov M.K. Loss of thrust in engines with anode layer due to ion twirling. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, Spec. iss. “Ion plasma technologies”, pp. 58–63 (in Russ.).
- [12] Dukhopel'nikov D.V., Marakhtanov M.K. Sposob elektromagnitnoy fokusirovki ionnogo puchka v uskoritele plazmy s azimutal'nym dreyfom elektronov [Electromagnetic focusing method of ion beam in plasma accelerator with azimuth electron drift]. Patent RU 2465749. Publ. 2012 (in Russ.). Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2465749> (accessed 15.01.2017).
- [13] Vorob'yev E.V., Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G., Zhukov A.V., Kirillov D.V., Marakhtanov M.K. Hall accelerator with a focused beam for nanoscale processing of large-sized mirrors of optical telescopes. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2011, Spec. iss. “Ion plasma technologies”, pp. 35–41 (in Russ.).
- [14] Girka O., Bizyukov I., Sereda K., Bizyukov A., Gutkin M., Sleptsov V. Compact steady-state and high-flux Falcon ion source for tests of plasma-facing materials. *Review of Scientific Instruments*, 2012, vol. 83. DOI: 10.1063/1.4740519 Available at: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4740519>

[15] Dukhopel'nikov D.V., Ivakhnenko S.G. Influence of azimuthal deflection of ions on the beam shape of the engine with anode layer. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2012, no. 10 (in Russ.). DOI: 10.7463/1012.0483832

Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/483832.html>

[16] Matthew T. Domonkos, Alec D. Gallimore, Sven G. Bilén. A Hall probe diagnostic for low density plasma accelerators. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, vol. 69, no. 6, pp. 2546–2549. DOI: 10.1063/1.1148956 Available at: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1148956>

[17] Dukhopel'nikov D.V. Measurement of magnetic field and Hall current modeling in discharge of magnetron sputtering system. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication of BMSTU], 2015, no. 10 (in Russ.). DOI: 10.7463/1015.0818660

Available at: <http://technomag.bmstu.ru/en/doc/818660.html>

[18] Rossnagel S.M., Kaufman H.R. Induced drift currents in circular planar magnetrons. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum Surfaces and Films*, 1987, vol. 5, no. 1, pp. 88–91. DOI: 10.1116/1.574822 Available at: <http://avs.scitation.org/doi/10.1116/1.574822>

**Dukhopel'nikov D.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Plasma Power Facilities Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Vorob'ev E.V.** — assistant of Plasma Power Facilities Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Ivakhnenko S.G.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Plasma Power Facilities Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Kirillov D.V.** — assistant of Plasma Power Facilities Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Dukhopel'nikov D.V., Vorob'ev E.V., Ivakhnenko S.G., Kirillov D.V. Shape Control of the Technological Ion Source Beam for High-Precision Surface Treatment. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2017, no. 3, pp. 24–36. DOI: 10.18698/1812-3368-2017-3-24-36