

В СПбПУ исследования проводились в рамках выполнения гос. задания Министерства образования и науки РФ (проект 3.1150.2017/4.6).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Porous glasses in the 21st century—a short review / D. Enke, F. Janowski, W. Schwieger // *Micro-porous and Mesoporous Materials*. – 2003. – V. 60. – P. 19–30.
2. Трехмерные сверхрешетки в матрицах опалов / Балакирев В.Г. [и др.] // *Кристаллография*. – 1993. – Т. 38, №3. – С. 111–120.
3. Yada, K. Study of chrysotile asbestos by a high resolution electron microscope /K. Yada // *Acta Cryst.* – 1967. – V. 23. – P. 704–707.
4. SEM and AFM Studies of Two-Phase Magnetic Alkali Borosilicate Glasses / N. Andreeva [et al.] // *The Scientific World Journal* – 2017 - V. 2017, Article ID 9078152 (9 pp.)
5. Observation of Nuclear Resonant Scattering Accompanied by Phonon Excitation Using Synchrotron Radiation / M. Seto [et al.] // *Phys. Rev. Lett.* – 1995. – V.74, № 19. – P. 3828–3831.
6. Low-Frequency Vibrational Properties of Nanocrystalline Materials / P.M. Derlet, [et al] // *Phys. Rev. Lett.* – 2001- V.87, № 20 – P. 205501-1 - 205501-4.
7. Vibrational Properties of Metallic Nanocrystals / A. Kara, T. S. Rahman // *Phys. Rev.Lett.* – 1998- V.81, № 7 – P. 1453–1456.
8. High-FrequencyVibrational Properties of Metallic Nanocrystalline Grain Boundaries / P.M. Derlet, H. Van Swygenhoven // *Phys. Rev. Lett.* – 2004 – V. 92, № 3 – Art. 035505 (4pp).
9. Магнитострикция и намагниченность железосодержащих стекол / Е.Ю. Королева Е.Ю. [и др.] // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки.* -2013 -2 (170), С. 144–148.
10. Phases Coexistence of Hydrogen-Bonded Mixed Ferroelectric and Antiferroelectric Crystals./ Z. Trybuła, J. Kaszyński // *Ferroelectrics* – 2004 – V. 298 –P. 347–351.
11. Proton glass behavior and phase diagram of the  $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$  system./ Kwon Oh.J., Kim J.-J. // *Phys. Rev. B* – 1993 – V. 48, № 9, P.- 6639–6642.
12. Phase-transitions in mixed-crystal system  $K_{1-x}(NH_4)_xH_2PO_4$  / Ono Y., Hikita T., Ikeda T. J.// *Phys. Soc. Jpn.* – 1987 – V. 56, № 2 – P. 577-588.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ТОРЦЕВОГО ХОЛЛОВСКОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

**М. Палмера<sup>1</sup>, Б. М. Шандарович<sup>2</sup>, Д. А. Котов<sup>3</sup>**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,*

*ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь*

<sup>1</sup>*e-mail: bfcмikep@gmail.com,*

<sup>2</sup>*bazhen.sh@gmail.com,*

<sup>3</sup>*kotov@bsuir.by*

Торцевые холловские источники ионов в последние десятилетия широко используются в промышленном производстве оптических покрытий. Этот тип ионных источников основан на магнитоплазматическом механизме ускорения и эффекте Холла. В данном исследовании производилось моделирование магнитного поля вблизи анода источника с целью получения оптимального распределения значений индукции поля в ускорительном канале. Значения составляющей  $B_{\theta}$  индукции магнитного поля у поверхности анода были уменьшены на 10-40 % с сохранением высоких зна-

чений составляющей  $B_x$  в области плазмообразования, что свидетельствует об увеличении плотности тока ионного пучка.

**Ключевые слова:** торцевой холловский источник ионов; моделирование магнитного поля.

## MODELLING THE MAGNETIC SYSTEM OF THE END-HALL ION SOURCE

M. Palmera<sup>1</sup>, B. M. Shandarovich<sup>2</sup>, D. A. Kotov<sup>3</sup>

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,  
Str. P. Brovki, 6, 220013, Minsk, Belarus,  
Corresponding author: D. A. Kotov (kotov@bsuir.by)*

In recent decades the End-Hall ion sources are widely used in the industrial production of optical coatings. This type of ion sources is based on magnetoplasma acceleration and the Hall effect. In this study, the magnetic field was simulated near the source anode in order to obtain an optimal distribution of field induction values in the accelerating channel. The values of the magnetic induction component  $B_y$  at the anode surface were reduced by 10–40% while maintaining high values of the  $B_x$  component in the plasma formation region, which indicates an increase in the current density of the ion source beam.

**Key words:** End- Hall; ion source; modeling; magnetic field.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия торцевые холловские источники ионов (ТХИ) применяются в производстве оптических покрытий для операций ионно-ассистированного осаждения и предварительной очистки поверхности [1, 2]. Использование бессеточных источников ионов на основе магнитоплазматического механизма ускорения и эффекта Холла является выгодным для многих применений, поскольку данные устройства имеют относительно высокую плотность пучка ионов, широкое пространственное распределение пучка, средние значения энергии пучка около 60–200 эВ и способны работать как с инертными, так и реактивными газами. Однако, по мере того, как современные процессы производства масштабируются под более крупные технические системы, более высокие скорости обработки и большие площади обрабатываемых подложек, возникает необходимость увеличения мощности торцевых холловских источников ионов, уменьшения их форм-факторов, значительного совершенствования требований к их монтажу и обслуживанию, а также снижения стоимости данных устройств.

В источниках ионов, основанных на эффекте Холла, магнитное поле  $B$ , перпендикулярное току разряда, образует барьер для переноса электронов от катода к аноду в определенной области, что приводит к увеличению электрического поля  $E$  в плазме в данной области в направлении, перпендикулярном магнитному полю. Это электрическое поле ускоряет ионы через выходной канал источника.

Образующаяся в результате конфигурация скрещенных электрического и магнитного полей позволяет генерировать ток (ток Холла), направление которого перпендикулярно плоскости  $E \times B$ . Большинство источников ионов на эффекте Холла имеют осесимметричную конструкцию, в которой приложенное магнитное поле и результи-

рующее электрическое поле ориентированы так, что ток Холла генерируется в азимутальном направлении. В этой конфигурации анод имеет плоскую рабочую поверхность, а область ускорительного канала формируется над ним и между катодами-магнитопроводами. В конфигурации торцевого холловского источника ионов анод имеет коническую форму, а область ускорения распространяется от поверхности анода к выходному торцу устройства.

### МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Изучение магнитного поля источника (рис. 1) основывалось на предположении, что поле в нем формируется цилиндрическими постоянными магнитами; поэтому решение определялось уравнениями:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = \nabla \cdot (\nabla \varphi) = 0 \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция поля и  $\varphi$  – магнитный потенциал.

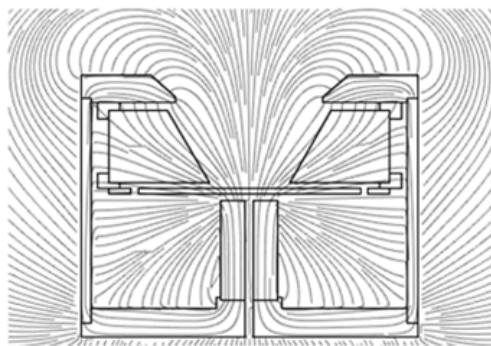


Рисунок 1. – Конфигурация линий магнитного поля торцевого холловского источника ионов

Вместо расчета непосредственно из конфигурации постоянных магнитов, магнитное поле в канале разряда определяется из набора граничных значений, заданных на границах доменов. Это позволяет непосредственно использовать измеренные значения магнитного поля или преднамеренно корректировать поле, что полезно при изучении его влияния.

Линии магнитного поля описываются потоковой функцией  $\lambda(x, r)$  [5, 6], рассчитанной из:

$$B_a = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial r}, \quad B_r = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial x} \quad (2)$$

где  $a$  и  $r$  – осевые и радиальные координаты, а  $B_a$  и  $B_r$  – осевые и радиальные составляющие индукции магнитного поля. Функция  $\lambda$  постоянна вдоль линий магнитного поля ( $B \cdot \nabla \lambda = 0$ ). Подставляя  $\lambda$  в уравнение (2) имеем:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{\mu r} \frac{\partial \lambda}{\partial r} \right) = -r J_{\text{магн}} \quad (3)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость,  $J_{\text{магн}}$  – азимутальный ток. Решение для этого уравнения находится численно.

Эффективность генерации низкоэнергетических ионов в торцевом холловском источнике можно повысить, уменьшив значение радиальной составляющей магнитной индукции  $B_r$  в области над анодом. Уменьшение составляющей  $B_r$  позволяет повысить эффективность инжекции электронов, поступающих от накаливаемого катода в зону плазмообразования. Величина аксиальной составляющей  $B_x$  в области формирования плазмы должна оставаться высокой для усиления ионизирующей способности находящихся там электронов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данном разделе представлено сравнение результатов моделирования магнитных полей классической конструкции АИДА и модифицированной конструкции торцевого холловского источника ионов. Моделирование проводилось с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics. Расчет магнитного поля осуществлялся в стационарном режиме с использованием уравнения Максвелла. При расчете было принято, что распределение поля равномерно во всем пространстве и исключено действие на него внешних полей. В процессе исследования производилось моделирование конструкций источника с различными размерами постоянных магнитов и формой магнитопроводов. В результате моделирования были построены графики, которые показывают изменение значений составляющих индукции магнитного поля  $B_x$ ,  $B_r$  по осям, расположенным на расстояниях  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  от центральной оси, как показано на рисунке 2.



**Рисунок 2.** – Схема измерений магнитного поля торцевого холловского источника ионов на расстояниях  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_3$  от центральной оси

Как видно из рисунков 3, 4 и 5, значения составляющей  $B_r$  в области над зоной плазмообразования уменьшились на 10–40% без значительного уменьшения составляющей  $B_a$ . Кроме того, значения составляющей  $B_r$  с удалением от поверхности анода уменьшаются более интенсивно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Произведено моделирование магнитного поля исходной и модифицированной конструкций торцевого холловского источника ионов. Модифицированная конструкция позволила уменьшить значения составляющей индукции магнитного поля  $B_r$  в области над зоной плазмообразования. Полученные результаты указывают на увеличение количества электронов, следующих от накаливаемого катода к аноду, увеличение эффективной поверхности анода и, как следствие, увеличение разрядной области. Таким образом, в модифицированной конструкции торцевого холловского источ-

ника ионов увеличена эффективность магнитной ловушки, соответственно, повышена эффективность генерации ионов низкой энергии.

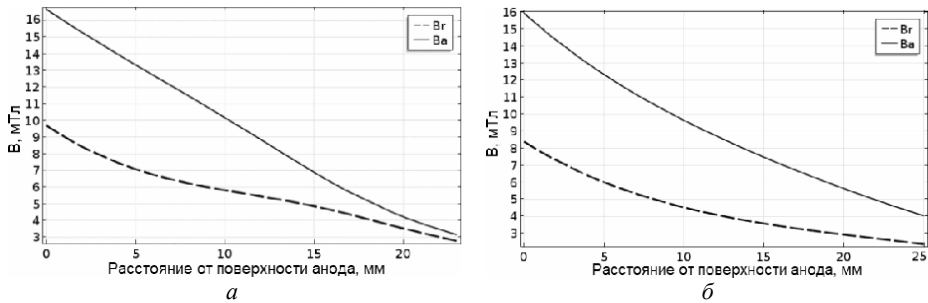


Рисунок 3. – Значения составляющих магнитной индукции  $B_x$  и  $B_r$  для исходной (а) и модифицированной (б) конструкций торцевого холлового источника ионов на расстоянии  $r_1$  от центральной оси

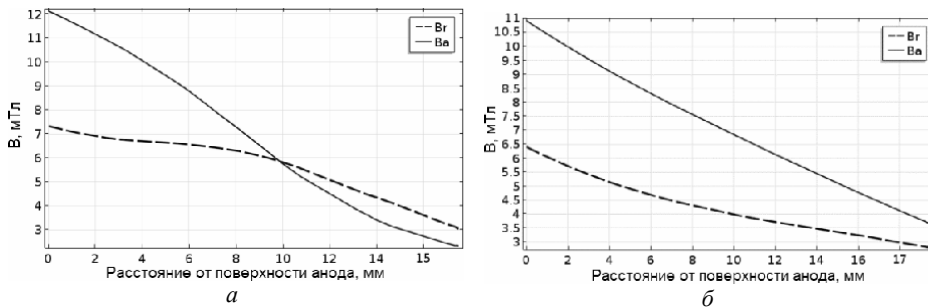


Рисунок 4. – Значения составляющих магнитной индукции  $B_x$  и  $B_r$  для исходной (а) и модифицированной (б) конструкций торцевого холлового источника ионов на расстоянии  $r_2$  от центральной оси

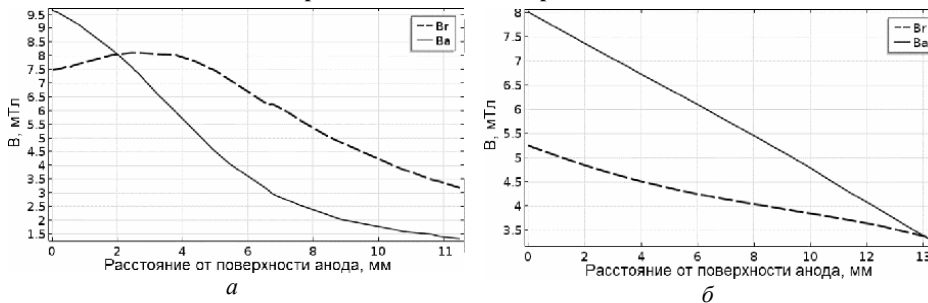


Рисунок 5. – Значения составляющих магнитной индукции  $B_x$  и  $B_r$  для исходной (а) и модифицированной (б) конструкций торцевого холлового источника ионов на расстоянии  $r_3$  от центральной оси

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. V. V. Zhurin, U. S. Patent No. 2005/0237000 A1 (2005).
2. Modélisation d'une source d'ions à effet Hall pour des applications de traitement de surface/ G .J.M. Hagelaar, J. Bareilles, L. Garrigues, J.P. Boe // Université Paul Sabatier, 31062 Toulouse France.

3. Linear ion source with magnetron hollow cathode discharge / D. L. Tang, S. H. Pu, L. S. Wang, and X. M. Qiu, // Rev. Sci. Instr. 76, 113502 (2005).
4. Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology / V. V. Zhurin // Wiley 2012
5. Physics and modeling of an end-Hall (gridless) ion source/ N. Oudini, G. J. M. Hagelaar, J.-P. Boeuf, L. Garrigues, J. // Appl. Phys 2011.- P 109, 073310.
6. Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters / J.-P. Boeuf. // Appl. Phys 2017.- P 121, 011101.

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ, ОСАЖДЕННЫХ В ВАКУУМЕ НА КРЕМНИЕВЫЕ ПОДЛОЖКИ

**В. К. Гончаров<sup>1</sup>, А. А. Пехота<sup>1</sup>, М. В. Пузырев<sup>1</sup>, В. Ю. Ступакевич<sup>2</sup>**

---

<sup>1)</sup> Научно-исследовательское учреждение "Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко" Белорусского государственного университета,  
ул. Курчатова 7, 220108 Минск, Республика Беларусь, e-mail: [puzyrev@bsu.by](mailto:puzyrev@bsu.by)

<sup>2)</sup> Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, ул. Ожешко, 22, 230023,  
Гродно, Республика Беларусь, e-mail: [tv\\_sad@grsu.by](mailto:tv_sad@grsu.by)

Осаждены нанопленки алюминия с наличием на их поверхности наночастиц. Разработана программа для автоматизированного распознавания размеров наночастиц и найдено их распределение.

**Ключевые слова:** лазерно-плазменный метод; наночастицы.

## AUTOMATED METHOD OF RECOGNITION OF ALUMINUM NANOPARTICLES DEPOSITED IN VACUUM ON SILICON SUBSTRATES

**V. K. Goncharov<sup>1</sup>, A. A. Pekhota<sup>1</sup>, M. V. Puzyrev<sup>1</sup>, V. Yu. Stupakevich<sup>2</sup>**

---

<sup>1)</sup> A.N.Sevchenko Institute of Applied Physics Problems, Belarusian State University,  
Kurchatov St., 7, 220045, Minsk, Republic of Belarus,

<sup>2)</sup> Grodno State University. Yanka Kupala Str. Ozheshko, 22, 230023,  
Grodno, Republic of Belarus,

Corresponding author: M. V. Puzyrev ([puzyrev@bsu.by](mailto:puzyrev@bsu.by))

Nanofilms of aluminum with the presence of nanoparticles on their surface have been deposited. A program for automated detection of nanoparticles sizes has been developed and found their distribution.

**Key words:** laser plasma method; nanoparticles.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время эффект ГКР (гигантского комбинационного рассеяния) используется для достижения сверхвысокой чувствительности спектральных методов анализа состава вещества [1]. Благодаря этому эффекту, применяя макроскопические спектральные методики, можно регистрировать сигнал от одиночных микро- и даже нанообъектов [2, 3]. Применение методов ГКР-спектроскопии на практике требует изготовления специальных сред, содержащих активные низкоразмерные