

УДК 537.553.3; 681.7

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-106-114>

EDN RKATXE



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

## Оптимальная конструкция электродов для микроминиатюрной электронной оптики

П.С. Кузнецов <sup>1, @</sup>,  
А.О. Синельников <sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», Москва, 129226  
Россия

<sup>2</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, 117198 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru

• Поступила: 12.09.2025 • Доработана: 15.11.2025 • Принята к опубликованию: 27.03.2026

### Резюме

**Цели.** Цель работы – систематический анализ и оптимизация основных конструктивно-технологических характеристик микроминиатюрных электронно-оптических систем для достижения максимальных показателей их работоспособности. В ходе исследования особое внимание уделялось установлению взаимосвязей между геометрическими параметрами системы и ее функциональными характеристиками.

**Методы.** В основе исследования лежит комплексное математическое моделирование динамики электронов в сложной пятиэлектродной схеме, достоверно воспроизводящей реальную конструкцию компактной электронно-лучевой микроколонны. Данный подход позволил установить количественные зависимости критических показателей производительности системы – разрешающей способности и интенсивности электронного пучка – от фундаментальных геометрических параметров: межэлектродных расстояний, конфигурации апертур диафрагм и углового размера выходного отверстия. Основные усилия были сосредоточены на определении оптимальных значений указанных параметров, обеспечивающих минимальный размер фокального пятна при одновременной максимизации энергии пучка.

**Результаты.** Проведенное компьютерное моделирование выявило определяющее влияние каждого компонента пятиэлементной электронно-оптической структуры на формирование качественных характеристик электронного потока. Установлено наличие выраженного минимума диаметра электронного пучка при определенной комбинации геометрических и электрических параметров системы. Обнаруженный оптимум позволил разработать новую методику проектирования и калибровки компактных электронно-лучевых приборов, обеспечивающую достижение максимального разрешения и высокой чувствительности при минимальном энергопотреблении. Детальный анализ продемонстрировал, что оптимальная конфигурация электродов позволяет снизить сферическую абберацию на 25% по сравнению с традиционными решениями.

**Выводы.** Разработанный подход к проектированию электронно-оптических систем микроколонн существенно повышает производительность и расширяет функциональные возможности электронных микроскопов и родственных аналитических приборов. Практическая значимость работы подтверждается возможностью создания устройств с рекордными показателями разрешения при компактных размерах. Важным достижением является установление количественных критериев оптимизации, позволяющих целенаправленно улучшать характеристики электронно-лучевых систем.

**Ключевые слова:** электронно-лучевая микросистема, электростатическая оптика, микроколонна, микролинза, эмиттер Шоттки, оптимальное проектирование, математическое моделирование, многолучевая литография

**Для цитирования:** Кузнецов П.С., Синельников А.О. Оптимальная конструкция электродов для микроминиатюрной электронной оптики. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):106–114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-106-114>, <https://www.elibrary.ru/RKATXE>

**Прозрачность финансовой деятельности:** Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## RESEARCH ARTICLE

# Optimal electrode design for microminiature electronic optics

Pavel S. Kuznetsov <sup>1, @</sup>,  
Anton O. Sinelnikov <sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Scientific Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, 129226, Russia

<sup>2</sup> Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, 117198 Russia

@ Corresponding author, e-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru

• Submitted: 12.09.2025 • Revised: 15.11.2025 • Accepted: 27.03.2026

### Abstract

**Objectives.** The work set out to systematically analyze and optimize the overall design and technological characteristics of microminiature electron-optical systems for achieving maximum performance indicators. The study paid special attention to establishing relationships between the geometric parameters of the system and its functional characteristics.

**Methods.** The research is based on comprehensive mathematical modeling of electron dynamics in a complex five-electrode scheme that accurately reproduces the actual design of a compact electron-beam microcolumn. This approach was used to establish the quantitative dependencies of resolution and electron beam intensity critical system performance indicators on fundamental geometric parameters: interelectrode distances, diaphragm aperture configurations, and output angular size. The main efforts focused on determining the optimal parameter values while ensuring minimal focal spot size and simultaneously maximizing beam energy.

**Results.** The computer modeling revealed the determining influence of each component of the five-element electron-optical structure on the formation of qualitative electron flow characteristics. A pronounced minimum in electron beam diameter was established at a specific combination of geometric and electrical system parameters. The thus-obtained optimum was used to develop a new methodology for designing and calibrating compact electron-beam devices that ensures maximum resolution and high sensitivity with minimal power consumption. Detailed analysis demonstrated that the optimal electrode configuration reduces spherical aberration by 25% compared to traditional solutions.

**Conclusions.** The developed design approach for microcolumn electron-optical systems significantly enhances performance while expanding the functional capabilities of electron microscopes and related analytical instruments. The practical significance of the work is confirmed by the possibility of creating devices with record resolution indicators in compact sizes. An important achievement is the establishment of quantitative optimization criteria for enabling targeted improvement of electron-beam system characteristics.

**Keywords:** electron-beam microsystem, electrostatic optics, microcolumn, microlens, Schottky emitter, optimal design, mathematical modeling, multi-beam lithography

**For citation:** Kuznetsov P.S., Sinelnikov A.O. Optimal electrode design for microminiature electronic optics. *Russian Technological Journal*. 2026;14(3):106–114. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-3-106-114>, <https://www.elibrary.ru/RKATXE>

**Financial disclosure:** The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

## ВВЕДЕНИЕ

Внедрение микротехнологий в электронную оптику привело к качественному скачку в характеристиках и использовании электронно-лучевых приборов и устройств. Создание электронных источников, линз, дефлекторов с размерами, уменьшенными на порядок и более по сравнению с обычными [1–4], стало толчком для разработки микроколонн для миниатюрных электронных микроскопов [5, 6] и многопучковых литографических установок [7–9] с новыми технико-экономическими показателями. Переход к другим масштабам расширил перспективы применения электронно-лучевых систем и в областях, связанных с хранением, обработкой и отображением информации [10–16], где их потеснили полупроводниковые приборы и устройства на жидких кристаллах и других материалах с выраженными сенсорными и электролюминесцентными свойствами.

По конструктивным, технологическим и электронно-оптическим соображениям микроколонны делаются полностью электростатическими. В состав первой такой колонны общей длиной около 3.5 мм вошли термополевой источник электронов с двухэлектродной катодной линзой, апертурная диафрагма, октупольный дефлектор и трехэлектродная фокусирующая линза [17, 18]. Линзы представляли собой стопки кремниевых кристаллов, разделенных изолирующими прокладками из пирексного стекла, с мембранными окнами для электродов. Для формирования отверстий в электродах использовались традиционные технологии микроэлектроники – электронно-лучевая литография и реактивное ионное травление, для соединения кремниевых компонентов – многослойная анодная сварка. Микроколонна [17], показавшая весьма высокие характеристики в низковольтном режиме (разрешение порядка 10 нм при ускоряющем напряжении 1 кВ и токе в пучке ~1 нА), явилась прототипом всех последующих модификаций, используясь как своеобразный эталон сравнения. Продолжающиеся исследования, нацеленные на расширение функциональных возможностей и упрощение изготовления микроколонн, касаются структуры (состава и взаимного расположения) и параметров режима функциональных элементов. Один из заслуживающих внимания экспериментальных вариантов – интегрированная электронно-оптическая система (микролинза)

с габаритными размерами  $1 \times 1 \times 0.05$  см, осуществляющая вытягивание электронов, фокусировку и отклонение пучка [19–21]. Катод удален от микролинзы на 1–2 мм, что снижает требования к точности его установки и дает возможность использовать любой тип источника – холодно-полевой, термоэмиссионный или термополевой (эмиттер Шоттки). Другая перспективная модификация – двухлинзовая микроколонна [22, 23], которая позволяет при сохранении оптимальных апертурных условий в объективной линзе, обеспечивающих минимум аберраций и достаточное для суб-100-нанометровых технологий разрешение (не хуже 20–50 нм на 1 кВ), существенно увеличить телесный угол приема и соответственно ток пучка (до 50 нА при угловой яркости источника 100 мкА/ср), правда, за счет некоторого увеличения размеров системы (~7 мм).

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Задача оптимального проектирования состоит в определении параметров геометрии и режима микролинзы, обеспечивающих минимальный диаметр зонда (сфокусированного пучка в плоскости объекта) при заданных характеристиках источника, расстоянии фокусировки (рабочем отрезке), ускоряющем напряжении, определяющем конечную энергию электронов, физических и технологических ограничениях. В отличие от [2, 15], оптимизационная задача решалась при меньшем числе варьируемых геометрических параметров (диаметры отверстий и межэлектродные расстояния выбирались одинаковыми), но при большем количестве электродов и, соответственно, варьируемых потенциалов.

Оптимальные параметры, независимо от критерия оптимизации (предельное разрешение, т.е. минимально возможный размер формируемого зонда, минимальный размер зонда при заданном токе или минимум отдельных аберраций), определяются для узкого диапазона энергий электронов, рабочих отрезков, характеристик источника. Для других условий найденные параметры не являются оптимальными. Поэтому линзы, оптимизируемые в большей степени подбором потенциалов, а не геометрией, которую нельзя изменить, представляются более гибкими в плане использования. Этим, а также установкой на упрощение технологии, на которую

возложена и функция юстировки, обусловлена постановка оптимизационной задачи с минимальным числом варьируемых геометрических параметров. Для оценки электронно-оптических преимуществ и выбора предпочтительного варианта предельное расчетное разрешение оптимизированных линз, состоящих из трех, четырех и пяти одинаковых кремниевых мембранных электродов, сравнивалось между собой и с тем, что дает при тех же условиях оптимизированная по всем геометрическим параметрам трехэлектродная линза [2].

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛИНЗЫ

В работах [24–32] представлены результаты различных численных экспериментов, направленных на структурно-параметрическую оптимизацию и оценку предельных фокусирующих свойств микроминиатюрных диафрагменных систем в заданной области геометрических параметров. Под оптимизацией в данном случае понимается поиск в условиях последовательного увеличения числа электродов расположения, диаметров отверстий, расстояний между электродами и подаваемых на них потенциалов, обеспечивающих при варьируемых в заданных пределах линейном увеличении, ускоряющем напряжении и рабочем отрезке минимальные коэффициенты осевых aberrаций. В каждом из представленных случаев используется метод прямой оптимизации с оригинальными алгоритмами, позволяющими отслеживать и корректировать осевое распределение потенциала. Электростатическое поле обычно задается аналитически как суперпозиция полей отдельных диафрагм.

Примененные методики практической оптимизации дают исходные данные для проектирования качественной оптики и, таким образом, вполне адекватны поставленной цели. При этом на основе тех же программ можно получить приближенное решение оптимизационной задачи, представленное в виде линейной комбинации достаточно большого числа функций подходящего вида [9]. Это позволяет оценить, насколько близко удастся подойти к предельным значениям коэффициентов aberrаций при данных условиях. Аналогичный подход опробовался в задаче оптимального синтеза магнитных фокусирующих полей при сравнении с решением, полученным методом оптимального управления [10].

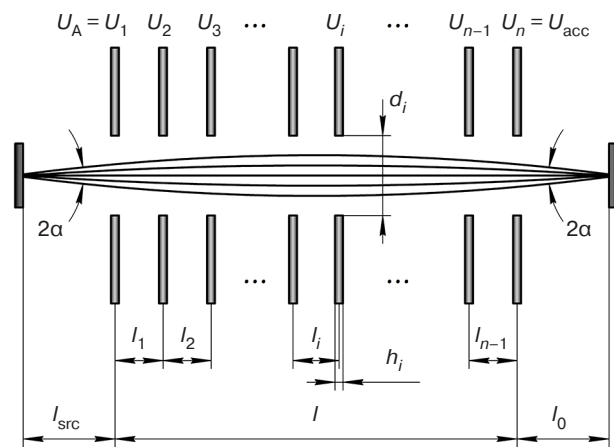
При оптимальном проектировании электростатической микроминиатюрной оптики электронных пучков, показанной на рис. 1, имеем следующие данные для обработки. В качестве варьируемых параметров будут выступать напряжение  $U_i$ , межэлектродные расстояния  $l_i$ , диаметры диафрагм  $d_i$ , угловая апертура  $\alpha_0$ . Исходными данными для оптимизации

являются рабочий отрезок ( $l_0 = 1$  мм) и параметры источника (радиус источника  $r_0 = 2$  нм и угловая яркость  $10$  мкА/ср, диапазон изменения напряжения  $\Delta U_0 = 0.2$  В, расстояние от источника, до первого электрода  $l_{src} = 50$ – $250$  мкм).

Целью оптимизации является минимальный диаметр пучка, равный:

$$d = \sqrt{(Md_0)^2 + d_{chr}^2 + d_{sf}^2 + d_{dif}^2} = \min, \quad (1)$$

где  $M$  – линейное увеличение линзы;  $Md_0$  – диаметр зонда в плоскости сечения;  $d_{chr}$  – диаметр пятна хроматической aberrации;  $d_{sf}$  – диаметр пятна сферической aberrации;  $d_{dif}$  – диаметр сечения электронного пучка, образующийся в результате дифракции.



**Рис. 1.** Исходная модель электронной линзы.  
 $U_A$  – напряжение в начальной точке А линзы,  
 $U_{acc}$  – ускоряющее напряжение

При имеющихся ограничениях напряженности электрического поля ( $E \leq 10^4$  В/мм) и геометрических параметрах ( $l_i = 100$ – $500$  мкм,  $d_i = 20$ – $200$  мкм, диаметр отверстия  $h_i = 1$ – $3$  мкм) ожидаются следующие технические характеристики: ускоряющее напряжение порядка  $1$ – $3$  кВ; ток в пучке более  $1$  нА; диаметр зонда около  $10$  нм; высота колонны около  $5$  мм.

Согласно выбранной математической модели, получаем следующие характеристики:

- минимизируемый радиус пучка:

$$r = \sqrt{r_G^2 + (r_{dif})^2 + (r_{sf})^2 + (r_{chr})^2}, \quad (2)$$

где  $r_G = Mr_0$  – радиус гауссова изображения,

$r_{dif} = \frac{0.75M}{\alpha_0 \sqrt{U_0}}$  – радиус дифракционного размытия,

$r_{sf} = MC_{sf} \alpha_0^3$  – радиус aberrационных дисков сферической aberrации,

$r_{chr} = MC_{chr} \alpha_0 \frac{\Delta U_0}{U_0}$  – радиус aberrационных дисков хроматической aberrации;

- осевое распределение потенциала:

$$E(z) = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^n \tilde{E}_i \left[ \arctg \left( \frac{2(z-z_i)}{h_i} \right) + \frac{2(z-z_i)}{h_i} \frac{1}{1 + \left( \frac{2(z-z_i)}{h_i} \right)^2} \right], \quad (3)$$

где  $\tilde{E}_i = \frac{E_i - E_{i-1}}{2}$ ,  $E_i = \frac{U_i - U_{i+1}}{l_i}$ ,  $i = \overline{1, n-1}$ ,  $E_0 = E_n = 0$ ;

$z$  – осевое положение источника,  $z_i$  – осевая координата  $i$ -го электрода.

- коэффициенты сферической и хроматической aberrаций:

$$C_{sf} = \frac{1}{32} \int_{z_0}^{z_i} \sqrt{\frac{U}{U_0}} r^4 \times \left\{ \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \left[ \frac{r'}{r} + \frac{5}{6} \frac{U'}{U} \right]^2 + \frac{3}{2} \left( \frac{U''}{U} + \frac{U'}{U} \cdot \frac{r'}{r} - \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \right)^2 + \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \left( \frac{r'}{r} + \frac{5}{6} \frac{U'}{U} \right)^2 + \frac{1}{36} \left( \frac{U'}{U} \right)^4 + \left[ \left( \frac{U''}{U} + \frac{U'}{U} \cdot \frac{r'}{r} - \frac{5}{4} \left( \frac{U'}{U} \right)^2 \right)^2 \right] \right\} dz, \quad (4)$$

$$C_{chr} = \frac{3}{8} \int_{z_0}^{z_i} \sqrt{\frac{U_0}{U}} r^2 \left( \frac{U'}{U} \right)^2 dz. \quad (5)$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования и оптимизации пятиэлектродной линзы представлены на рис. 2–4. На рис. 2 показана зависимость минимального радиуса электронной линзы от угловой апертуры, имеющая характерный минимум при  $\alpha_0 = 4$  мрад. Видно, что сначала радиус линзы быстро уменьшается с увеличением апертуры, достигая наименьшего значения, после которого начинается его постепенное увеличение при дальнейшем росте угловой апертуры.

Как видно из графиков, представленных на рис. 3, предельные фокусировка и соответствующая апертура пучка уменьшаются почти линейно с увеличением длины рассматриваемой пятиэлектродной линзы.

Зависимости минимального радиуса электронной линзы от диаметра диафрагмы (рис. 4) при значениях  $\alpha_0$ , равных 4 и 6 мрад, носят ярко выраженный нелинейный характер и графически описываются U-образной кривой, имеющей локальный минимум. Это означает, что с увеличением диаметра

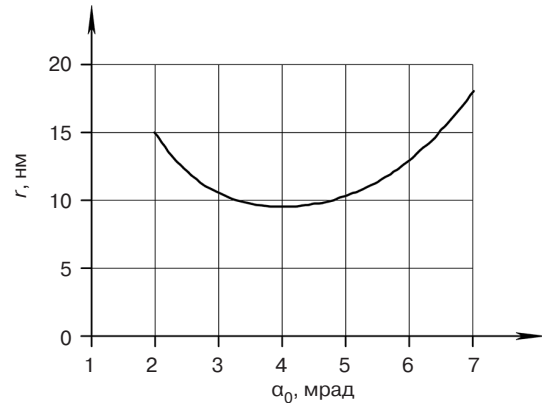


Рис. 2. Зависимость минимального радиуса от угловой апертуры

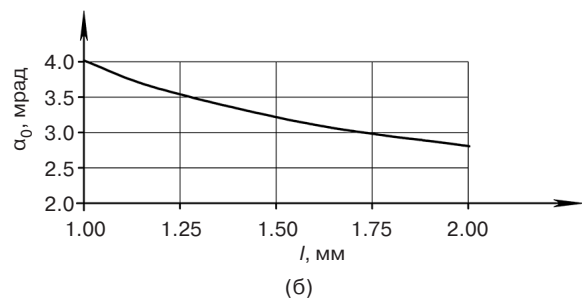
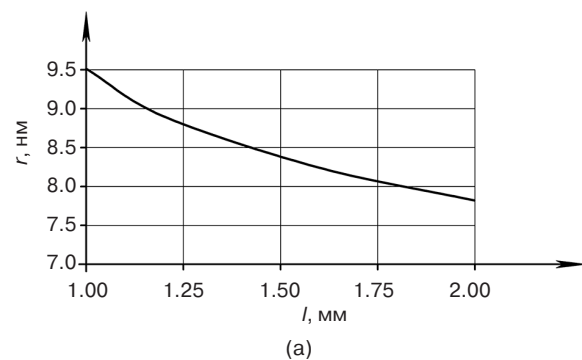


Рис. 3. Предельная фокусировка (а) и соответствующая оптимальная апертура пучка (б) в зависимости от длины пятиэлектродной линзы,  $d_i = 1/4$

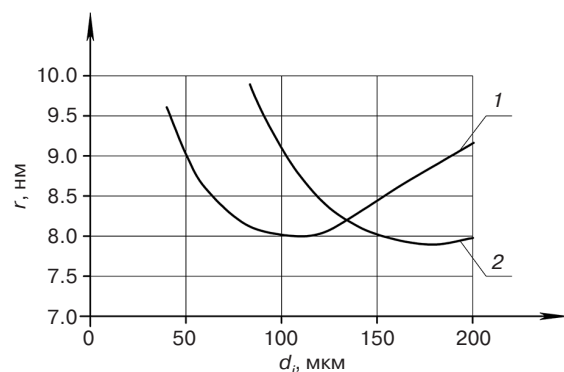


Рис. 4. Зависимость минимального радиуса электронной линзы от диаметра диафрагмы: (1)  $\alpha_0 = 4$  мрад, (2)  $\alpha_0 = 6$  мрад;  $l_0 = 0.25$ ,  $l_{src} = 1$ ,  $U_0 = 1$  кВ

диафрагмы минимальное значение радиуса сначала плавно снижается, проходя точку экстремума (минимальное значение). После прохождения точки минимума дальнейший рост диаметра диафрагмы вызывает постепенное возрастание радиуса.

Таким образом, существует оптимальный диаметр диафрагмы, при котором достигается минимальный радиус фокусировки электронного пучка. В точке минимума электронная линза имеет следующие параметры:

1. Электронно-оптические характеристики:  $C_{chr} = 1.65$  мм,  $C_{sf} = 51.42$  мм,  $M = 1.34$ ,  $r_G = 2.64$  нм,  $r_{chr} = 1.76$  нм,  $r_{sf} = 4.33$  нм,  $r_{dif} = 7.83$  нм.
2. Параметры режима:  $U_1 = 0.62$  кВ,  $U_2 = 1.17$  кВ,  $U_3 = 3.5$  кВ,  $U_A = U_{acc} = 1$  кВ,  $l_{src} = 250$  мкм,  $l_i = 250$  мкм,  $d_i = 50$  мкм,  $l_0 = 1$  мм.

Исходя из значения тока в пучке  $I = 1$  нА и угловой апертуры  $\alpha_0 = 6$  мрад, получаем следующие значения минимального диаметра пучка:  $d_{min} = 26$  нм (при  $\Delta U_0 = 0.2$  В),  $d_{min} = 54$  нм (при  $\Delta U_0 = 2$  В).

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что наиболее целесообразной конфигурацией является пятиэлектродная электронная линза с равномерно размещенными электродами, способствующая снижению aberrаций примерно на 10% за счет увеличения количества электродов и варьирования межэлектродных расстояний при сохраняемой общей длине. Максимальная эффективность зафиксирована при увеличенной длине линзы, что связано с повышением числа потенциальных областей фокусировки и улучшением взаимодействия полей напряжения с электронами. Дополнительно было определено оптимальное соотношение между длиной линзы, диаметром пучка и величиной диаметра диафрагмы, минимизирующее энергопотери и эффекты рассеяния.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования разработаны методы численно-аналитического моделирования и средства программной поддержки оптимизационных вычислительных экспериментов, направленных на поиск оптимальных конфигураций и режимов работы низковольтной электростатической оптики для электронно-лучевых микроколонн в соответствии со сформулированными критериями. Проведено детальное исследование электронно-оптических свойств микроминиатюрных диафрагменных линз, реализуемых на основе микротехнологий.

Полученные оценки минимального размера зонда, формируемого оптимизированной пятиэлектродной линзой при разных параметрах источника и апертурных условиях, показали, что при использовании термоавтоэмиссионных катодов оптимизированные пятиэлектродные линзы длиной 2.5 мм могут формировать зонд диаметром от 4 до 10 нм в зависимости от угловой апертуры (и, соответственно, тока в зонде) на расстояниях  $\sim 1$  мм, достаточных для манипулирования объектом и размещения специальных миниатюризированных детекторов вторичных излучений.

### Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в разработку концепции, методологию, проведение исследования и подготовку текста рукописи. Каждый из авторов ознакомился с финальной версией статьи и одобрил ее публикацию.

### Authors' contribution

Both authors contributed equally to the conceptualization, methodology, investigation, and writing of this work. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao X., Fan B., Ma Z., Zhong S., Chen J., Zhang T., Su H. Optical-digital joint design of multi-order diffractive lenses for lightweight high-resolution computational imaging. *Opt. Lasers Eng.* 2024;180:108308. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108308>
2. Thomson M.G.R., Chang T.H.P. Lens and deflector design for microcolumns. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 1995;13(6):2445–2449. <https://doi.org/10.1116/1.588018>
3. Perng D.C., Crewe D.A., Feinerman A.D. Micromachined thermionic emitters. *J. Micromech. Microeng.* 1992;2(1):25–30. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/2/1/006>
4. Lee J.-W., Park I.-Y., Ogawa T. Design and optimization of a conical electrostatic objective lens of a low-voltage scanning electron microscope for surface imaging and analysis in ultra-high-vacuum environment. *Ultramicroscopy.* 2024;257:113908. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113908>
5. Laszczyk K., Krysztof M. Electron beam source for the miniaturized electron microscope on-chip. *Vacuum.* 2021;189:110236. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110236>
6. Krysztof M., Białas M., Szyszka P., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A. Fabrication and characterization of a miniaturized octupole deflection system for the MEMS electron microscope. *Ultramicroscopy.* 2021;225:113288. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2021.113288>
7. Hofmann U., Ünal N., Klikovits J. From ghost to state-of-the-art process corrections – PEC enabled e-beam nanofabrication. *Micro and Nano Engineering (MNE).* 2024;25:100286. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100286>

8. Karkantonis T., Penchev P., Nasrollahi V., Le H., See T.L., Bruneel D., Ramos-de-Campos J.A., Dimov S. Laser micro-machining of freeform surfaces: Accuracy, repeatability and reproducibility achievable with multi-axis processing strategies. *Precis. Eng.* 2022;78:233–247. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.08.009>
9. Parker N.W., Brodie A.D., McCoy J.H. A high throughput NGL electron-beam direct-write lithography system. In: *Proceeding SPIE Emerging Lithographic Technologies*. V. 3997. 2000. <https://doi.org/10.1117/12.390042>
10. Itoh S., Tanaka M., Tonegawa T. Development of field emission displays. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2004;22(3):1362–1366. <https://doi.org/10.1116/1.1691409>
11. Villarroya M., Barniol N., Martin C., Pérez-Murano F., Esteve J., Bruchhaus L., Jede R., Bourhis E., Gierak J. Fabrication of nanogaps for MEMS prototyping using focused ion beam as a lithographic tool and reactive ion etching pattern transfer. *Microelectron. Eng.* 2007;84(5-8):1215–1218. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.074>
12. Appleton B.R., Tongay S., Lemaitre M., Gila B., Fridmann J., Mazarov P., Sanabia J.E., Bauerdick S., Bruchhaus L., Mimura R., Jede R. Materials modifications using a multi-ion beam processing and lithography system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2012;272:153–157. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.01.054>
13. Pease R.F., Ioakeimidi K., Aldana R., et al. Photoelectronic analog-to-digital conversion using miniature electron optics: Basic design considerations. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2003;21(6):2826–2829. <https://doi.org/10.1116/1.1621664>
14. Srivastava K., Le-The H., Lozeman J.J.A., van den Berg A., van der Stam W., Odijk M. Prospects of nano-lithographic tools for the fabrication of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrates. *Micro and Nano Engineering (MNE)*. 2024;23:100267. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100267>
15. Кузнецов П.С. Вопросы и перспективы развития мехатроники и микросистемной техники. *Нано- и микросистемная техника*. 2024;25(4):159–169. <https://doi.org/10.17587/nmst.25.159-169>
16. Кузнецов П.С. Микроэлектромеханические системы: путь к совершенствованию гироскопов. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):103–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>
17. Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., et al. Electron beam technology – SEM to microcolumn. *Microelectron. Eng.* 1996;32(1-4):113–130. [https://doi.org/10.1016/0167-9317\(95\)00366-5](https://doi.org/10.1016/0167-9317(95)00366-5)
18. Kim H.S., Ahn S., Kim D.W., Oh T.-S., Ahn S.J. Efficient electron beam condensing for low-energy microcolumn lithography. *Microelectronics J*. 2008;39(1):94–98. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.09.030>
19. Hu J., Yue L., Ma Y., Liu F., Kang Y. Aberration calculation of microlens array using differential algebraic method. *Ultramicroscopy*. 2025;269:114085. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2024.114085>
20. Zlatkin A., Garcia N. Low-energy (300eV) versatile scanning electron microscope with 30 nm resolution. *Microelectron. Eng.* 1999;45(1):39–46. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(98\)00260-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(98)00260-3)
21. Ximen J. Chapter One – The electron optical imaging system and its aberrations. In: Hawkes P.W., Hÿtch M. (Eds.). *Advances in Imaging and Electron Physics*. Elsevier; 2023. V. 226. P. 1–88. <https://doi.org/10.1016/bs.aiep.2023.03.003>
22. Weigand H., Gautsch S., Strohmaier W., Blideran M., Staufer U., de Rooij N.F., Kern D.P. Microcolumn with variable axis lens for large scan fields and pixel numbers. *Microelectron. Eng.* 2011;88(8):2431–2434. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.12.120>
23. Mankos M., Lee K.Y., Muray L., et al. Optimization of microcolumn electron optics for high current application. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2000;18(6):3057–3060. <https://doi.org/10.1116/1.1321756>
24. Feng Y., Li W., Chen Y., Kang X., Li J., Tang K., Zhao Z., Liu X., Zhou K., You Y., Li M., Li P., Xu Z., Zhao T., Mao R. Design and performance of a low-emittance electron gun for electron beam probe. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1066:169604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169604>
25. Fox J., Lee H.K., Alajo A.B., Avachat A. Simulation study of electron beam optics for a distributed X-ray source toward stationary CT architecture. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1062:169149. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169149>
26. Sinelnikov A.O., Smetanin I.A., Basov B.A., Smetanin E.A., Bykanova U.F. Effect of Ignition Voltage Amplitude on Breakdown Delay Time of Ring Laser Discharge Gap. In: *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2025. <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10971095>
27. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Подкопаев А.А., Савицкая Т.Н. Оптимизация электронно-оптической системы растрового электронного микроскопа для измерения размеров микро- и нанообъектов. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2019;7:36–41. <https://doi.org/10.1134/S0207352819070072>
28. Бакулин Е.М., Курушин Г.В., Строганов К.А. Результаты моделирования конструкции микроакселерометра на основе интегрированной технологии микромеханики и акустоэлектроники. *Электронная техника. Серия 3: Микроэлектроника*. 2018;2(170):43–49. <https://elibrary.ru/xtxzvz>
29. Трапашко Г.А. Синтез оптоэлектронной системы установки контроля микроэлектронных структур. *Наука и техника*. 2014;1:38–43. <https://elibrary.ru/rylmup>
30. Бельский М.Д., Суворинов А.В., Филиппук Т.С., Шахбазов С.Ю. Расчет технологических допусков в электростатических линзах для электронно-лучевых микроколонн. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2006;1:76–83. <https://elibrary.ru/hsywrp>
31. Казьмирук В.В., Курганов И.Г., Савицкая Т.Н. Расчет миниатюрной формирующей линзы высоковольтного электронного литографа. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2020;12:89–94. <https://doi.org/10.31857/S1028096020120158>

32. Бельский М.Д., Львов Б.Г., Рыбалко В.В. Моделирование фокусирующей микролинзы для оже-анализатора с ЦЗА. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2013;77(8):1059–1062. <https://doi.org/10.7868/S0367676513080061>

## REFERENCES

- Zhao X., Fan B., Ma Z., Zhong S., Chen J., Zhang T., Su H. Optical-digital joint design of multi-order diffractive lenses for lightweight high-resolution computational imaging. *Opt. Lasers Eng.* 2024;180:108308. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2024.108308>
- Thomson M.G.R., Chang T.H.P. Lens and deflector design for microcolumns. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 1995;13(6):2445–2449. <https://doi.org/10.1116/1.588018>
- Perng D.C., Crewe D.A., Feinerman A.D. Micromachined thermionic emitters. *J. Micromech. Microeng.* 1992;2(1):25–30. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/2/1/006>
- Lee J.-W., Park I.-Y., Ogawa T. Design and optimization of a conical electrostatic objective lens of a low-voltage scanning electron microscope for surface imaging and analysis in ultra-high-vacuum environment. *Ultramicroscopy*. 2024;257:113908. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113908>
- Laszczyk K., Krysztof M. Electron beam source for the miniaturized electron microscope on-chip. *Vacuum*. 2021;189:110236. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110236>
- Krysztof M., Białas M., Szyszka P., Grzebyk T., Górecka-Drzazga A. Fabrication and characterization of a miniaturized octupole deflection system for the MEMS electron microscope. *Ultramicroscopy*. 2021;225:113288. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2021.113288>
- Hofmann U., Ünal N., Klikovits J. From ghost to state-of-the-art process corrections – PEC enabled e-beam nanofabrication. *Micro and Nano Engineering (MNE)*. 2024;25:100286. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100286>
- Karkantonis T., Penchev P., Nasrollahi V., Le H., See T.L., Bruneel D., Ramos-de-Campos J.A., Dimov S. Laser micro-machining of freeform surfaces: Accuracy, repeatability and reproducibility achievable with multi-axis processing strategies. *Precis. Eng.* 2022;78:233–247. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.08.009>
- Parker N.W., Brodie A.D., McCoy J.H. A high throughput NGL electron-beam direct-write lithography system. In: *Proceeding SPIE Emerging Lithographic Technologies*. V. 3997. 2000. <https://doi.org/10.1117/12.390042>
- Itoh S., Tanaka M., Tonegawa T. Development of field emission displays. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2004;22(3):1362–1366. <https://doi.org/10.1116/1.1691409>
- Villarroya M., Barniol N., Martin C., Pérez-Murano F., Esteve J., Bruchhaus L., Jede R., Bourhis E., Gierak J. Fabrication of nanogaps for MEMS prototyping using focused ion beam as a lithographic tool and reactive ion etching pattern transfer. *Microelectron. Eng.* 2007;84(5-8):1215–1218. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2007.01.074>
- Appleton B.R., Tongay S., Lemaitre M., Gila B., Fridmann J., Mazarov P., Sanabia J.E., Bauerdick S., Bruchhaus L., Mimura R., Jede R. Materials modifications using a multi-ion beam processing and lithography system. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2012;272:153–157. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.01.054>
- Pease R.F., Ioakeimidi K., Aldana R., et al. Photoelectronic analog-to-digital conversion using miniature electron optics: Basic design considerations. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2003;21(6):2826–2829. <https://doi.org/10.1116/1.1621664>
- Srivastava K., Le-The H., Lozeman J.J.A., van den Berg A., van der Stam W., Odijk M. Prospects of nano-lithographic tools for the fabrication of surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS) substrates. *Micro and Nano Engineering (MNE)*. 2024;23:100267. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2024.100267>
- Kuznetsov P.S. Issues and prospects for the development of mechatronics and microsystem technology. *Nano-i mikrosistemnaja tehnika = Nano- and Microsystem Technique*. 2024;26(4):159–169 (in Russ.). <https://doi.org/10.17587/nmst.25.159-169>
- Kuznetsov P.S. Microelectromechanical systems for improved gyroscope design. *Russian Technological Journal*. 2025;13(3):103–121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-3-103-121>
- Chang T.H.P., Thomson M.G.R., Yu M.L., et al. Electron beam technology – SEM to microcolumn. *Microelectron. Eng.* 1996;32(1-4):113–130. [https://doi.org/10.1016/0167-9317\(95\)00366-5](https://doi.org/10.1016/0167-9317(95)00366-5)
- Kim H.S., Ahn S., Kim D.W., Oh T.-S., Ahn S.J. Efficient electron beam condensing for low-energy microcolumn lithography. *Microelectronics J.* 2008;39(1):94–98. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2007.09.030>
- Hu J., Yue L., Ma Y., Liu F., Kang Y. Aberration calculation of microlens array using differential algebraic method. *Ultramicroscopy*. 2025;269:114085. <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2024.114085>
- Zlatkin A., Garcia N. Low-energy (300eV) versatile scanning electron microscope with 30 nm resolution. *Microelectron. Eng.* 1999;45(1):39–46. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(98\)00260-3](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(98)00260-3)
- Ximen J. Chapter One – The electron optical imaging system and its aberrations. In: Hawkes P.W., Hÿtch M. (Eds.). *Advances in Imaging and Electron Physics*. Elsevier; 2023. V. 226. P. 1–88. <https://doi.org/10.1016/bs.aiep.2023.03.003>
- Weigand H., Gautsch S., Strohmaier W., Blideran M., Staufer U., de Rooij N.F., Kern D.P. Microcolumn with variable axis lens for large scan fields and pixel numbers. *Microelectron. Eng.* 2011;88(8):2431–2434. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2010.12.120>
- Mankos M., Lee K.Y., Muray L., et al. Optimization of microcolumn electron optics for high current application. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2000;18(6):3057–3060. <https://doi.org/10.1116/1.1321756>
- Feng Y., Li W., Chen Y., Kang X., Li J., Tang K., Zhao Z., Liu X., Zhou K., You Y., Li M., Li P., Xu Z., Zhao T., Mao R. Design and performance of a low-emittance electron gun for electron beam probe. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1066:169604. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169604>

25. Fox J., Lee H.K., Alajo A.B., Avachat A. Simulation study of electron beam optics for a distributed X-ray source toward stationary CT architecture. *Nuclear Inst. Methods in Physics Research, A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2024;1062:169149. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169149>
26. Sinelnikov A.O., Smetanin I.A., Basov B.A., Smetanin E.A., Bykanova U.F. Effect of Ignition Voltage Amplitude on Breakdown Delay Time of Ring Laser Discharge Gap. In: *2025 7th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE)*. 2025. <https://doi.org/10.1109/REEPE63962.2025.10971095>
27. Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Podkopaev A.A., et al. Optimization of the Electron Optical System of a Scanning Electron Microscope for Measuring the Size of Micro- and Nanoobjects. *J. Surf. Investig.* 2019;13(4):594–599. <https://doi.org/10.1134/S1027451019040074>  
[Original Russian Text: Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Podkopaev A.A., Savitskaya T.N. Optimization of the Electron Optical System of a Scanning Electron Microscope for Measuring the Size of Micro- and Nanoobjects. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2019;7:36–41 (in Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0207352819070072> ]
28. Bakulin E.M., Kurushin G.V., Stroganov K.A. Results of simulation of the microaccelerometer design based on integrated technology of micromechanics and acoustoelectronics. *Ehlektronnaya tekhnika. Seriya 3: Mikroehlektronika = J. Electronic Engineering. Series 3: Microelectronics*. 2018;2(170):43–49 (in Russ.). <https://elibrary.ru/xtxzvz>
29. Trapashko G.A. Synthesis of optoelectronic system for control of microelectronic structures. *Nauka i tekhnika = Science and Technique*. 2014;1:38–43 (in Russ.). <https://elibrary.ru/rylmup>
30. Belsky M.D., Suvorinov A.V., Filipchuk T.S., Shakhbazov S.Yu. Calculation of technological tolerances in electrostatic lenses for electron beam micro columns. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Ehlektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2006;1:76–83 (in Russ.). <https://elibrary.ru/hsywrp>
31. Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Savitskaya T.N. Miniature forming lens for high-voltage electron-beam lithography system. *J. Surf. Investig.* 2020;14:1366–1370. <https://doi.org/10.1134/S1027451020060336>  
[Original Russian Text: Kazmiruk V.V., Kurganov I.G., Savitskaya T.N. Miniature forming lens for high-voltage electron-beam lithography system. *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya* 2020;12:89–94 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1028096020120158> ]
32. Belsky M.D., Lvov B.G., Rybalko V.V. Modeling the focusing microlenses of an auger analyzer equipped with a CMA. *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* 2013;77(8):959–962. <https://doi.org/10.3103/S1062873813080066>  
[Original Russian Text: Belsky M.D., Lvov B.G., Rybalko V.V. Modeling the focusing microlenses of an auger analyzer equipped with a CMA. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2013;77(10):1059–1062 (in Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0367676513080061> ]

## Об авторах

**Кузнецов Павел Сергеевич**, к.т.н., заместитель начальника экспериментального комплекса микроэлектроники и микромеханических систем, Акционерное общество «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения» (АО «ГосНИИП») (129226, Россия, Москва, пр-т Мира, д. 125). E-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru. Scopus Author ID 58513707600, SPIN-код РИНЦ 6564-9540, <https://orcid.org/0000-0001-5459-7883>

**Синельников Антон Олегович**, к.т.н., доцент, кафедра «Нанотехнологии и микросистемная техника», ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) (117198, Россия, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6). E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru. Scopus Author ID 55382453500, ResearcherID AAC-2606-2022, SPIN-код РИНЦ 2442-7507, <https://orcid.org/0000-0002-5579-3509>

## About the Authors

**Pavel S. Kuznetsov**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Experimental Complex of Microelectronics and Micromechanical Systems, State Scientific Research Institute of Instrument Engineering (GosNIIP) (125, Mira pr., Moscow, 129226 Russia). E-mail: ps\_kuznetsov@mail.ru. Scopus Author ID 58513707600, RSCI SPIN-code 6564-9540, <https://orcid.org/0000-0001-5459-7883>

**Anton O. Sinelnikov**, Cand. Sci. (Eng.), Associated Professor, Basic Department “Nanotechnology and Microsystem Technology,” RUDN University (6, Miklukho-Maklaya ul., Moscow, 117198 Russia). E-mail: mr.sinelnikov.a@mail.ru. Scopus Author ID 55382453500, ResearcherID AAC-2606-2022, RSCI SPIN-code 2442-7507, <https://orcid.org/0000-0002-5579-3509>