Система формирования сфокусированных ионных пучков низкой энергии

© *С.С. Выбин*[1], *С.В. Голубев*[1], *И.В. Изотов*[1], *О.С. Моченева*[1], *А.Е. Пестов*[2], *А.В. Поляков*[1], *В.А. Скалыга*[1]

[1] Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород, Россия
[2] Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород, Россия
E-mail: vybinss@ipfran.ru

Поступило в Редакцию 29 апреля 2026 г.
В окончательной редакции 17 сентября 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Изучены возможности формирования сфокусированных ионных пучков низкой энергии (от 0.8 до 1.5 keV) с высокой плотностью тока (более 10 $\mathrm{mA \cdot cm^{-2}}$) в фокусе (с размером пятна не более 1 mm). Исследование проводится в рамках развития технологии ионно-пучкового травления, которое является одним из этапов создания оптических элементов для ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Решается задача оптимизации системы формирования сфокусированного ионного пучка путем численного моделирования. Целью оптимизации является получение пучка с максимальной средней плотностью тока в пятне диаметром 1 mm при минимальном токе пучка вне этого пятна. Также исследуются характеристики сфокусированного ионного пучка (пиковая плотность тока и ширина пучка на половине от максимального уровня интенсивности) в зависимости от его полного тока, финальной энергии и степени компенсации пространственного заряда.

Ключевые слова: сфокусированный ионный пучок, система формирования ионного пучка, ионно-пучковое травление, численное моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.24.64027.9589k

Оптические элементы (зеркала) для излучения экстремального ультрафиолетового (ЭУФ) и мягкого рентгеновского диапазонов составляют основу телескопов, с помощью которых удается исследовать поведение солнечной короны [1]. С другой стороны, они являются одним из главных компонентов современных ЭУФ-литографов [2]. От качества поверхности зеркал зависит эффективность работы всего устройства. Согласно современным требованиям, допускается субнанометровое отклонение формы поверхности зеркала от расчетного значения. Этапы изготовления зеркала включают в себя механическую шлифовку и полировку, химическое травление (суперполировку), ионно-пучковое травление [3]. После полировки на поверхности детали остаются мелкомасштабные (с характерным размером в несколько микрометров) и крупномасштабные (размером от единиц миллиметров и более) шероховатости. Химическое травление устраняет мелкомасштабную шероховатость, а ионно-пучковое травление применяется для устранения относительно крупных ошибок формы поверхности без ухудшения шероховатости. Преимущество ионно-пучковой обработки состоит в том, что этот способ является локальным и бесконтактным. Однако типичная скорость травления невелика и составляет около $1\,\mathrm{nm \cdot s^{-1}}$. Для обработки крупных оптических элементов требуется значительное время (несколько часов непрерывной работы). Поэтому источник ионов должен поддерживать долгую и стабильную работу. Часто для получения пучка используют ионные источники Кауфмана [4] и ионные источники на основе электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) [5]. На практике применяются как широкоапертурные пучки (с поперечным размером в несколько сантиметров) для полировки и чистки областей большой площади, так и сфокусированные пучки (с размером порядка единиц миллиметров) для локальной коррекции формы. Современные источники сфокусированных ионных пучков низкой энергии [5] формируют пучки с плотностью тока порядка $10\,\mathrm{mA \cdot cm^{-2}}$ при энергии 1.5 keV для однозарядных ионов аргона. Одним из направлений развития технологии ионно-пучкового травления является формирование интенсивных (с плотностью тока более 10 $\mathrm{mA \cdot cm^{-2}}$) сфокусированных пучков низкой энергии (в диапазоне от 0.8 до 1.5 keV) и малого размера (менее 1 mm). Повышение интенсивности ионных пучков позволит уменьшить время обработки поверхности.

В настоящей работе путем численного моделирования исследуется вопрос о возможностях получения сфокусированных пучков ионов низкой энергии с высокой плотностью тока. При разработке соответствующих систем формирования пучков принципиально важно учитывать влияние объемного заряда пучка, который препятствует фокусировке ионов в пятно малого размера. Особенно сильно данный фактор сказывается на работе с пучками относительно невысоких энергий. В результате был предложен и оптимизирован один из вариантов системы формирования ионного пучка. В дальнейшем планируется провести эксперименты по фокусировке ионных пучков на существующем в ИПФ РАН ЭЦР ионном источнике GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose

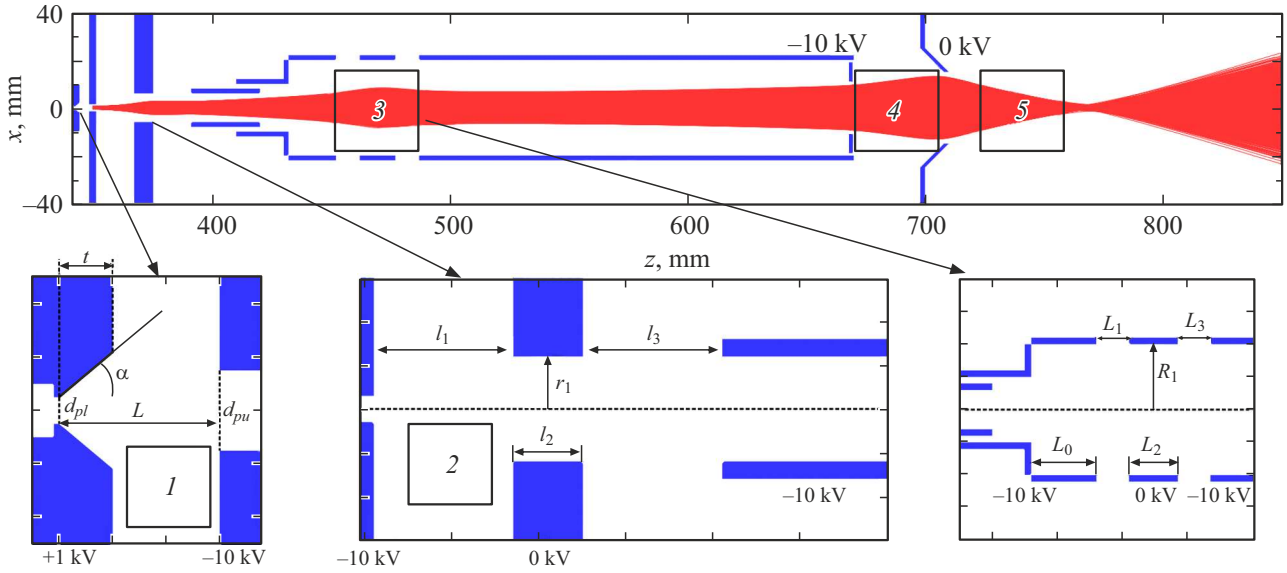


Рис. 1. Схема расположения электродов (обозначены синим цветом) системы формирования ионного пучка. Красным цветом обозначены траектории ионов. *1* — ускоряющий зазор, *2* — первая электростатическая линза, *3* — вторая электростатическая линза, *4* — замедляющий промежуток, *5* — область фокусировки ионного пучка. Также отмечены характерные потенциалы электродов. Цветной вариант рисунков представлен в электронной версии статьи.

Operation [6]). Он был выбран в качестве тестового стенда, так как на установке обеспечивается формирование потоков плазмы высокой интенсивности вплоть до значений порядка $1\,\mathrm{A}\cdot\mathrm{cm}^{-2}$, что значительно превышает требуемые значения для эксперимента. Поэтому расчеты оптимизации были проведены для конкретной установки (например, в модели учитывалось реальное магнитное поле источника). Плазма удерживается внутри ловушки, а область фокусировки ионного пучка должна располагаться снаружи. Точка фокуса должна быть удалена от плазменного электрода на расстояние порядка 40 cm, что нужно учитывать при разработке системы формирования пучка. Пролет ионов от места извлечения из плазмы до фокуса затруднен в связи с действием объемного заряда пучка при его высокой интенсивности. Поэтому предлагается сначала ускорить ионный пучок до энергии выше требуемой (порядка 10 keV), а затем затормозить его и сфокусировать. Данная схема также упрощает извлечение ионного пучка с большим током из плазмы. Фокусировка ионного пучка осуществляется электрическим полем. Перед областью замедления ионный пучок должен обладать минимальным углом расходимости, для чего предусмотрено наличие двух фокусирующих электростатических линз, корректирующих траектории ионов в пучке (рис. 1).

Расчеты динамики ионов производились с помощью программного кода, написанного на языке C++ с использованием набора библиотек для моделирования ионных пучков IBSimu (Ion Beam Simulator) [7]. С его помощью решалась самосогласованная задача об извлечении ионного пучка из плазмы и его распространении во внешних электрическом и магнитном полях с учетом собственного пространственного заряда пучка.

Система формирования ионного пучка является цилиндрически симметричной (в качестве оси симметрии выбрана ось Z) и включает в себя начальный ускоряющий промежуток, за которым следуют две электростатические линзы и замедляющий промежуток (см. рис. 1, на котором также указаны геометрические параметры).

Отверстие в плазменном электроде имеет зенковку (с углом к нормали α и глубиной t), обращенную к извлекающему электроду, что необходимо для снижения краевых эффектов, возникающих при извлечении пучка из плазмы, и уменьшения разброса частиц по углам отклонения от направления распространения пучка. Первая пара электродов (плазменный и извлекающий) образует близкий к плоскому ускоряющий зазор, на выходе из которого формируется пучок с относительно малым углом расходимости (не более 60 mrad). Затем пучок пролетает через первую электростатическую линзу, где немного фокусируется, и попадает на вторую линзу, на выходе из которой пучок является практически параллельным (с углом расходимости не более 30 mrad). После этого пучок достигает замедляющего промежутка между электродами, где также происходит его фокусировка под действием электрического поля. Сильное негативное влияние на фокусировку пучка (из-за его высокой интенсивности при малой энергии) оказывает его объемный заряд. Поэтому важно добиться высокой степени компенсации пространственного заряда пучка, что можно реализовать, разместив источник электронов (например, накальную спираль) рядом с фокусом. В численных расчетах в IBSimu компенсация простран-

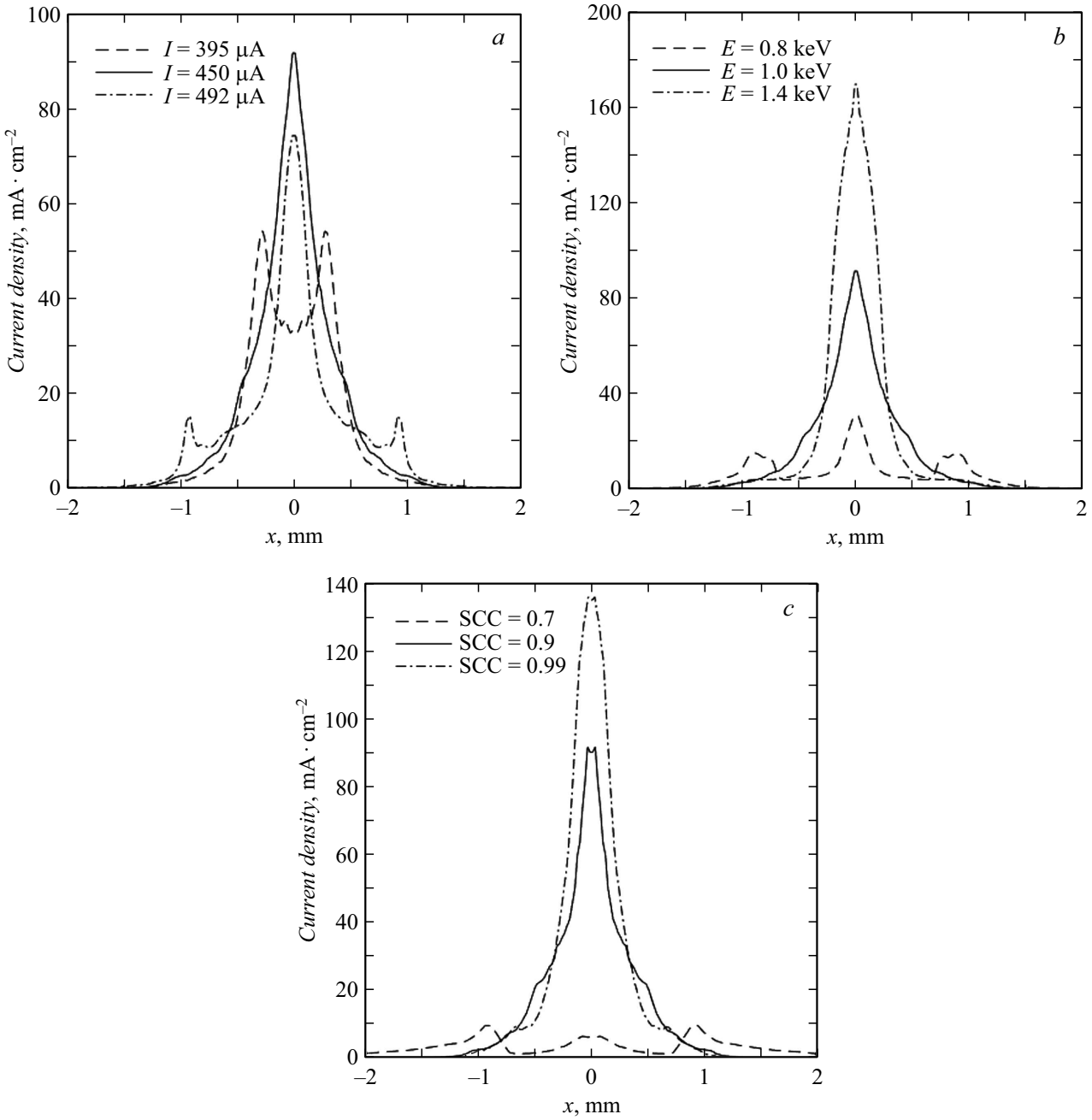


Рис. 2. *a* — зависимость плотности тока пучка в фокусе от поперечной координаты при разном полном токе пучка, фиксированной энергии, равной 1 keV, и степени компенсации пространственного заряда 90 %; *b* — зависимость плотности тока от поперечной координаты при различной финальной энергии пучка, фиксированном полном токе, равном 450 μA, и степени компенсации объемного заряда пучка 90 %; *c* — зависимость плотности тока от поперечной координаты при различной степени компенсации пространственного заряда, энергии 1 keV и полном токе 450 μA.

ственного заряда пучка моделируется за счет умножения на корректирующий коэффициент вычисленного распределения объемного заряда пучка непосредственно перед подстановкой в уравнение Пуассона. Область, в которой учитывается компенсация пространственного заряда, обозначена цифрой *5* на рис. 1. Эффективность компенсации объемного заряда ионного пучка в фокусе и долговременная стабильность оптимального режима работы будут исследованы экспериментально на стенде GISMO.

Сначала была проведена оптимизация геометрии системы формирования ионного пучка. Для использования сфокусированного ионного пучка при травлении важно увеличить долю тока пучка, попадающего в пятно заданного размера (в рассматриваемом случае размер равен 1 mm). Если в качестве „целевой функции“ при

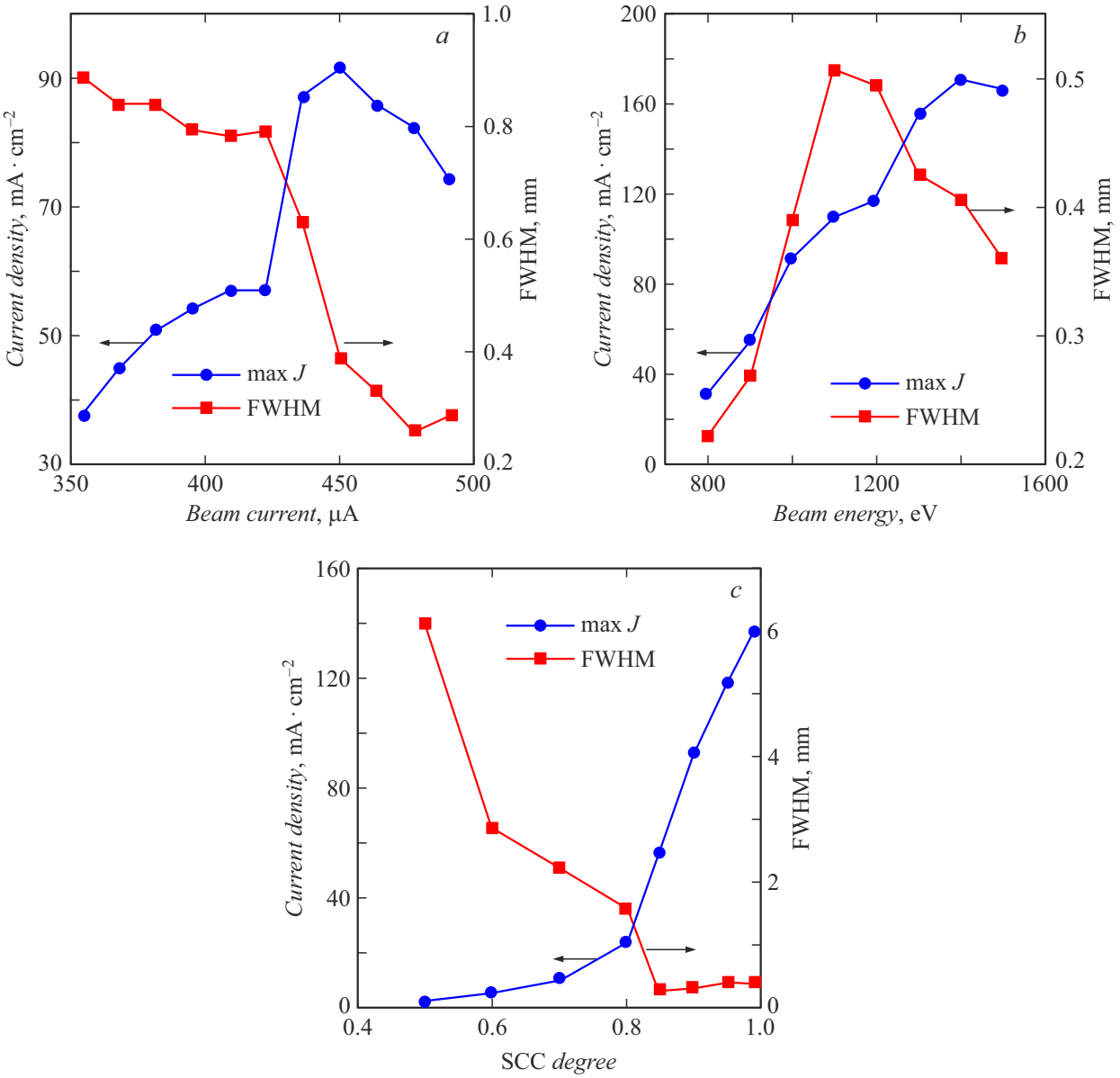


Рис. 3. Зависимость максимальной плотности тока в пучке (кружки) и ширины пучка на половине от максимального уровня интенсивности (квадраты) от полного тока пучка (a), его финальной энергии (b) и степени компенсации пространственного заряда (c).

оптимизации использовать пиковую плотность тока, то оптимальными могут стать конфигурации электродов, формирующие узкий пучок небольшого размера на фоне широкого распределения на периферии. Такой пучок не подходит для применения в установках для травления из-за высокого тока пучка на периферии (эффективный размер пучка значительно больше, чем ширина пучка на уровне половины от максимальной плотности тока). Существует оптимальный ток формируемого пучка, при котором путем оптимизации геометрии электродов при заданных потенциалах на них можно добиться практически полной фокусировки ионного пучка в пятно размером 1 mm при максимальной средней плотности тока в пятне. В рассматриваемом случае такой оптимальный ток равен $I = 450\,\mu$A. Поэтому задача поиска максимальной доли тока пучка в пятне сводится к нахождению максимума тока пучка в пятне при фиксированном полном токе.

Моделировалась фокусировка пучка однозарядных ионов аргона, который часто используется в качестве рабочего газа при ионном травлении. Потенциалы плазменного электрода $\varphi_{pl} = 1\,$kV и извлекающего электрода $\varphi_{pu} = -10\,$kV были фиксированы. Начальная плотность тока формируемого пучка зависит от апертуры плазменного электрода и для $d_{pl} = 1\,$mm составляет около $70\,\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. В моделировании ис-

пользовалась плазма с температурой электронов 10 eV и температурой ионов 1 eV, которые являются характерными значениями для установки GISMO. Максимум тока сфокусированного пучка в пятне диаметром 1 mm реализуется при параметрах ускоряющего зазора $d_{pl} = 1$ mm, $d_{pu} = 3$ mm, $t = 2$ mm, $\alpha = 40°$, $L = 6$ mm, параметрах первой электростатической линзы $r_1 = 6$ mm, $l_1 = 16$ mm, $l_2 = 8$ mm, $l_3 = 16$ mm и второй электростатической линзы $R_1 = 20$ mm, $L_0 = 20$ mm, $L_1 = 10$ mm, $L_2 = 15$ mm, $L_3 = 10$ mm. При фокусировке ионного пучка в тормозящем зазоре возникает сферическая аберрация: ионы из центральной части пучка и с периферии фокусируются в разные точки пространства. Для достижения максимальной плотности тока пучка в фокусе необходимо, чтобы положения перетяжек периферийной и центральной частей пучка были близки друг к другу. На рис. 2, *a* показаны распределения плотности тока пучка в зависимости от поперечной координаты для трех значений полного тока: меньшего, большего и равного оптимальному. При неоптимальном токе пучка распределение имеет локальные максимумы плотности тока на некотором отдалении от оси симметрии, вклад в которые вносят ионы на периферии пучка. На поперечный профиль пучка оказывают влияние геометрические аберрации и объемный заряд. На рис. 2, *b* показаны распределения плотности тока пучка в зависимости от поперечной координаты при различной финальной энергии пучка. При малой энергии пучка и заданном токе не удается эффективно сфокусировать ионный пучок из-за действия объемного заряда. Повышение финальной энергии упрощает задачу фокусировки пучка. На рис. 2, *c* показано, что увеличение степени компенсации пространственного заряда пучка позволяет значительно повысить пиковую плотность тока и уменьшить поперечный размер пучка в фокусе.

При оптимальной геометрии системы формирования ионного пучка сравнивались максимальная плотность тока пучка и его размер в фокусе при различных параметрах (рис. 3): в зависимости от полного тока пучка, его финальной энергии и степени компенсации пространственного заряда пучка. При изменении одного параметра остальные фиксировались. При заданной геометрии электродов и потенциалах на них существует оптимальное значение полного тока пучка, при котором достигается максимум пиковой плотности тока. Увеличение финальной энергии пучка позволяет добиться повышения пиковой плотности тока за счет уменьшения объемного заряда. При этом положение точки фокуса смещается в сторону отдаления от электродов (различие в продольных положениях фокуса для энергий 800 и 1500 eV составляет 27 mm). Большее фокусное расстояние приводит к увеличению протяженности области перетяжки ионного пучка (и к лучшему согласованию фокусировки пучка из центральной области и с периферии), что также благоприятно влияет на пиковую плотность тока пучка в фокусе. При увеличении степени компенсации пространственного заряда пучка максимальная плотность тока растет из-за уменьшения объемного заряда пучка, однако начиная со степени компенсации 85 % размер пучка практически не меняется. Это объясняется влиянием аберрации на фокусировку пучка.

Таким образом, в настоящей работе была предложена система формирования сфокусированных пучков низкой энергии для ионного источника GISMO. Результаты расчетов распространения ионного пучка показывают возможность получения пучка малого размера с высокой плотностью тока путем его фокусировки электрическим полем. Плотность тока пучка, полученного при моделировании, практически на порядок превышает современные достижения в области получения сфокусированных пучков низкой энергии [5]. Ионный пучок пролетает внутри электродов, не задевая их, что предотвращает распыление материала электродов и загрязнение поверхности обрабатываемой детали.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 25-29-01192.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] S.A. Bogachev, N.I. Chkhalo, S.V. Kuzin, D.E. Pariev, V.N. Polkovnikov, N.N. Salashchenko, S.V. Shestov, S.Y. Zuev, Appl Opt., **55** (9), 2126 (2016). DOI: 10.1364/ao.55.002126
[2] C. Wagner, N. Harned, Nat. Photon., **4** (1), 24 (2010). DOI: 10.1038/nphoton.2009.251
[3] R. Shurvinton, H. Wang, P. Pradhan, I.-T. Nistea, S. Alcock, M. Bazan Da Silva, A. Majhi, K. Sawhney, J. Synchrotron Radiat., **31** (4), 655 (2024). DOI: 10.1107/s1600577524002935
[4] G. Dornberg, E. Rohkamm, P. Birtel, F. Scholze, F. Frost, J. Vac. Sci. Technol. A, **41** (5), 053104 (2023). DOI: 10.1116/6.0002766
[5] https://www.cameca.com/products/ecr-sources
[6] V.A. Skalyga, A.F. Bokhanov, S.V. Golubev, I.V. Izotov, M.Yu. Kazakov, E.M. Kiseleva, R.L. Lapin, S.V. Razin, R.A. Shaposhnikov, S.S. Vybin, Rev. Sci. Instrum., **90** (12), 123308 (2019). DOI: 10.1063/1.5128489
[7] T. Kalvas, O. Tarvainen, T. Ropponen, O. Steczkiewicz, J. Ärje, H. Clark, Rev. Sci. Instrum., **81** (2), 02B703 (2010). DOI: 10.1063/1.3258608