

ВЫСОКОЯРКОСТНАЯ СИСТЕМА ЭКСТРАКЦИИ ГЕЛИКОННОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

Д.П. Шульга, С.Н. Мордик, В.И. Мирошниченко
Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина
E-mail: mordyk@ipflab.sumy.ua

Проведены исследования процессов формирования пучка ионов при применении в геликонном источнике экстрактора с изолированной апертурой экстракции, которая находится под плавающим потенциалом плазмы. За счет изменения конфигурации электрических и магнитных полей в области экстракции возникают условия, которые позволяют увеличить приосевую яркость до уровня $300 \text{ А/м}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{эВ}$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Установки, которые используют сфокусированные ионные пучки, являются одним из основных инструментов в материаловедении и полупроводниковой индустрии благодаря огромному количеству современных приложений, таких как подготовка образцов в трансмиссионной электронной микроскопии, фабрикация микроструктур и осаждение пленок в газовой среде, восстановление маски и микрообработка, сканирующая ионная микроскопия, прямая пучковая литография и др. Одной из наиболее сложных задач в материаловедении в настоящее время является создание недорогих методов получения и обработки наноструктурных материалов. Среди методов, которые активно развиваются для производства наноструктур, особое место занимают ионно-имплантационная нанотехнология и ионно-пучковая нанолитография с использованием сфокусированных пучков мегаэлектронвольтных энергий. Такие пучки формируются в ядерном сканирующем микронзонде (ЯСМЗ), принадлежащем к классу аппаратурных комплексов, которые используются для проведения локального неразрушающего анализа структуры и элементного состава как твердых тел, так и биологических объектов. Причем возможности использования микронзондов чрезвычайно сильно зависят от их пространственной разрешающей способности. При облучении исследуемых образцов в ЯСМЗ возникает необходимость в создании прецизионных пучков с заданными свойствами (размером, интенсивностью, дозой облучения, массовым и зарядовым составом пучка). Качество пучка и его свойства в основном определяются параметрами ионного источника. Для повышения разрешающей способности установок и получения прецизионных ионных пучков необходимо использовать источники ионов с высокой яркостью.

Поскольку величина яркости пучка ионов прямо пропорциональна плотности плазмы [1], то возможно повысить яркость источника ионов путем создания в ВЧ-источнике плазмы высокой плотности и вытягивания пучка с высокой плотностью ионного тока. В то же время ионная температура должна быть низкой, чтобы получать ионные пучки с малым разбросом по импульсу и малым эмиттансом. Средством, оказывающим содействие как проникновению ВЧ-полей в плазму, так и удержанию частиц, что, в свою очередь, увеличивает плотность плазмы, является внешнее стационарное магнитное поле, которое используется в геликонных источниках ионов [2-4].

Повышение плотности плазмы является необходимым, но не достаточным условием повышения яркости пучка. При увеличении плотности плазмы возникает необходимость в повышении вытягивающего напряжения, а также в обеспечении фокусировки пучка в системе экстракции для минимизации потерь пучка. Полный ток пучка в значительной степени зависит от пропускной способности канала экстракции, эмиттанс – от геометрических размеров системы экстракции и aberrаций ионно-оптической системы формирования пучка.

2. ГЕЛИКОННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ

В ИПФ НАН Украины разработан ВЧ-источник ионов (Рис.1), который состоит из плазменного генератора, работающего в геликонном диапазоне частот $\omega_{ci} \ll \omega_{LH} < \omega \ll \omega_{ce} \ll \omega_{pe}$, где $\omega_{ci} = eB_0 / M$ – ионно-циклотронная частота; $\omega_{pe} = (en_e^2 / \epsilon_0 m)^{1/2}$ – плазменная ионная частота; ω_{LH} – нижнегибридная частота, $\omega_{LH} = \omega_{pi} [1 + (\omega_{pe} / \omega_{ce})^2]^{-1/2} \approx (\omega_{ce} \omega_{ci})^{1/2}$; компактной магнитной системы с постоянными магнитами круговой формы, создающей продольное магнитное поле специальной конфигурации, и устройства формирования пучка ионов (система экстракции и позиционируемая выходная апертура источника).

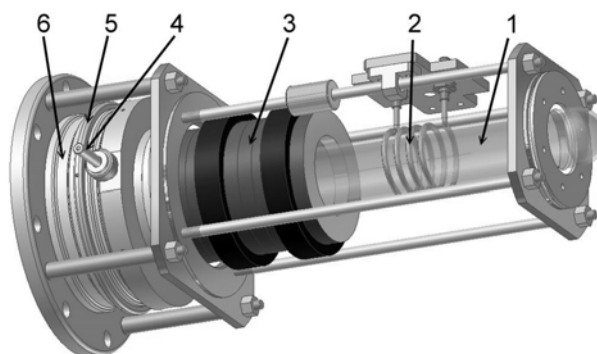


Рис.1. Схема геликонного источника ионов:
 1 - газоразрядная камера; 2 - винтовая антенна;
 3 - магнитная система; 4 - отверстие для напуска газа; 5, 6 - система электродов

Выходная апертура предназначена для формирования эмиттанса с максимальной дифференциальной фазовой плотностью. Положение и размер апертуры определялись при помощи численного моделирования оптики с учетом нелинейной динамики пучка. Разрядная колба изготовлена из кварца и имеет

внешний диаметр 30 мм и длину 260 мм. ВЧ-поле образуется при помощи винтовой антенны, которая состоит из 4 витков медной трубки диаметром 4 мм. Конструкция магнитной системы определялась с обеспечением следующих условий: 1) величина и структура магнитного поля должны способствовать эффективному поглощению ВЧ-мощности плазмой; 2) должна быть компактной; 3) производить минимальное увеличение эмиссионного нормализованного эмиттанса. Магнитное поле фокусирует пучок ионов, препятствуя попаданию их на другие электроды, увеличивает среднюю продолжительность пребывания электронов в межэлектродном пространстве и тем самым усиливает ионизацию. Магнитное поле влияет также на диффузию заряженных частиц в перпендикулярном направлении. Использование магнитных полей в области системы вытягивания приводит к увеличению экстрагированного ионного тока благодаря увеличению концентрации плазмы вблизи канала экстракции и компенсации сил пространственного заряда ионного пучка, что улучшает его фокусирование [5].

В ограниченной плазме, которая находится в цилиндрическом объеме во внешнем магнитном поле, возбуждаются собственные электромагнитные колебания. В низкочастотной области существуют две моды колебаний: электромагнитная геликонная волна и электростатическая волна Трайвелпис-Гоулда (ТГ-волна). ВЧ-антенна возбуждает в плазме геликонное поле, которое слабо поглощается плазмой. Геликонная волна, в свою очередь, становится источником возбуждения ТГ-волны, энергия которой хорошо поглощается плазмой в результате электронных столкновений. Дисперсионное волновое уравнение в геликонном диапазоне частот [6]

$$\omega = \omega_{ce} \cos \theta \frac{k^2 c^2}{\omega_{pe}^2 + k^2 c^2} \left(1 - i \frac{v_e}{\omega_{ce} \cos \theta} \right),$$

где ω , ω_{ce} и ω_{pe} – рабочая, электронно-циклотронная и плазменная частоты; v_e – частота электронных столкновений; k – полное волновое число, которое равняется $k = (k_z^2 + k_r^2)^{1/2}$; k_z – продольное волновое число; k_r – поперечное волновое число; i – мнимая единица; θ – угол распространения волны относительно внешнего магнитного поля \vec{B}_0 ($\cos \theta = k_z / k$).

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В ИПФ НАН Украины разработана, изготовлена и отлажена установка, позволяющая производить экспрессные измерения фазовых характеристик, эмиттанса, яркости, полного тока, профиля тока, энергетического разброса и массового состава пучка ионов, извлекаемого из источника ионов, а также плазменных параметров: плотности плазмы и температуры электронов [7, 8]. Данная установка позволяет производить диагностику источников ионов, используемых в микрозондах, имплантерах, литографах, ускорителях ионов, в частности, решать задачу выбора высокояркостных режимов работы ВЧ-источника ионов. Результаты таких исследований

позволяют определить перспективные направления модернизации ВЧ-источников ионов, используемых для получения высокоэнергетических ионных микропучков.

ВЧ-система питания, состоящая из задающего генератора ($f_{вч}=27.12$ МГц), усилителя мощности «Асом-1000» и согласующего устройства, обеспечивает регулируемую выходную мощность до 400 Вт в непрерывном режиме. Измерение средней плотности плазмы ВЧ-источника проводилось 8 мм СВЧ-интерферометром [8]. В интерферометре, построенном по схеме Маха-Цендера, применяется гомодинное преобразование частоты СВЧ-генератора в результате ее модуляции пилообразным напряжением. Измерение эмиттанса производилось методом диафрагмирования с частичным интегрированием при механическом сканировании вертикальным проволочным зондом. Пластина с отверстиями может выводиться из зоны измерений, что позволяет производить измерения профиля и полного тока пучка, измеряемого с помощью цилиндра Фарадея. Измерения массового состава пучка осуществлялось фильтром Вина, разрешающая способность которого имеет величину $M_i / \Delta M = 100$. Данный прибор является классическим фильтром Вина с параллельными полюсами электромагнита.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ЭКСТРАКЦИИ

Качество пучка зависит от величины тока и размера области, которая эмиттирует ионы, т.е. от плотности тока пучка. Максимальная плотность тока, которая может быть достигнута для любого сорта заряженных частиц, ускоренных электрическим полем, определяется из условия ограничения тока пространственным зарядом и описывается законом Чайлда-Ленгмюра. Ток, извлеченный из ионного источника, зависит от различных параметров: вытягивающего напряжения, геометрии экстракции, плотности плазмы, которая, в свою очередь, зависит от ВЧ-мощности, давления газа и магнитного поля.

На Рис.2 приведена зависимость тока пучка ионов гелия от напряжения экстракции и ВЧ-мощности для геликонного источника ионов ($p=0,5$ Па).

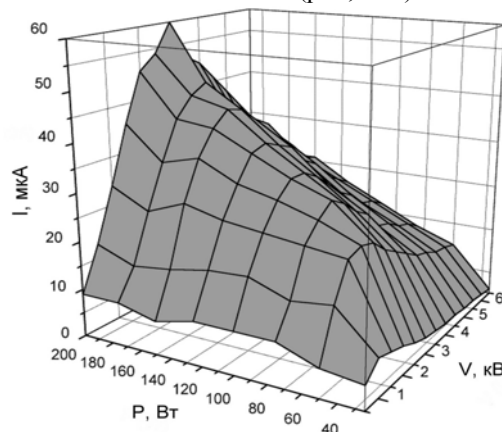


Рис.2. Зависимость тока гелиевого пучка от напряжения экстракции и ВЧ-мощности для стабильного режима работы геликонного источника ионов

Как видно из рисунка, измеренный ионный ток выше необходимого тока для режима работы ускорительного микрозонда (0.1...10 мкА). Уменьшение ионного тока (при постоянной плотности тока) может быть достигнуто при использовании выходной апертуры или за счет уменьшения диаметра эмиссионного отверстия при фиксированных других параметрах структуры экстракции [9].

Поскольку довольно сложно получить высокую яркость при простом уменьшении диаметра отверстия экстракции, то преодоление этого препятствия возможно вследствие регулирования поверхности ионной эмиссии не вытягивающим напряжением, а «плавающим потенциалом», который образуется на дополнительно введенном изолированном электроде. Для этого был использован специально изготовленный экстрактор с отверстием 0,6 мм. Металлическая апертура экстракции отделена от плазменного электрода кварцевым диском (Рис.3). Для такого экстрактора была рассчитана картина электростатического поля и построены эквипотенциальные линии в канале экстракции.

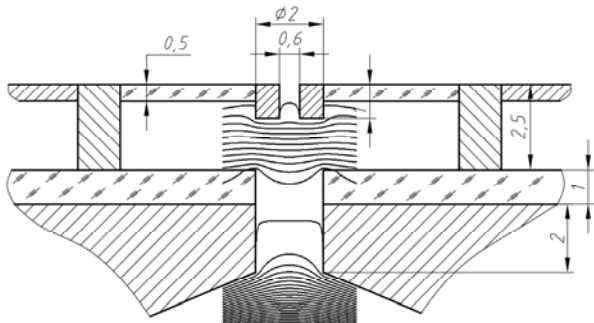


Рис.3. Система экстракции с апертурой под плавающим потенциалом

Размещенное в плазме изолированное тело (в нашем случае апертура) вследствие того, что скорости электронов существенно превосходят скорости ионов, заряжается до некоторого отрицательного равновесного или плавающего потенциала. При плавающем потенциале количество ионов и электронов, которые попадают на тело, уравнивается, поскольку к нему могут доходить лишь наиболее быстрые электроны и практически все ионы. Изолированная апертура приобретает отрицательный заряд. Вокруг нее образуется область положительного пространственного заряда (ее ширина по порядку величины равняется дебаевскому радиусу), которая экранирует плазму от зонда.

Были измерены и построены (Рис.4) профили тока пучка ионов гелия в зависимости от напряжения экстракции и ВЧ-мощности.

Как видно из этого рисунка, профили тока пикированы в параксиальной области, что свидетельствует о перераспределении плотности тока и его максимальном значении на оси пучка. Перераспределение фазовой плотности пучка в зоне экстракции, увеличение плотности тока и использование структуры с низкими aberrациями могут увеличить параксиальную яркость. Для работы ЯСМЗ необходима высокая яркость в приосевой области.

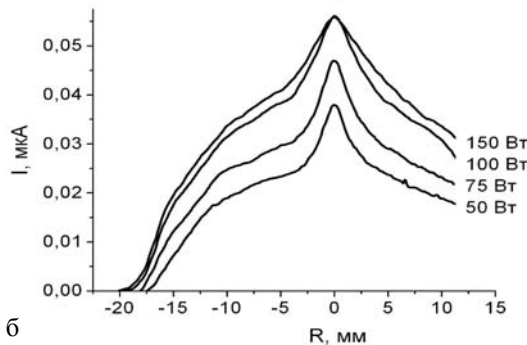
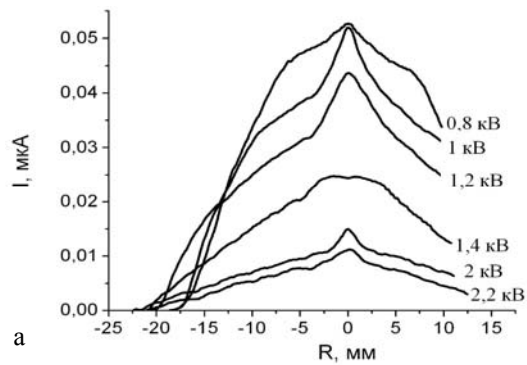


Рис.4. Распределение тока пучка ионов гелия по радиусу пучка при различных значениях: а – напряжения экстракции при $P_{вч}=100$ Вт и б – ВЧ-мощности при $V_{ext}=1,1$ кВ

Для определения приосевой яркости была поставлена выходная апертура диаметром 1 мм. За выходной апертурой измерялся ток (Рис.5) и эмиттанс (Рис.6).

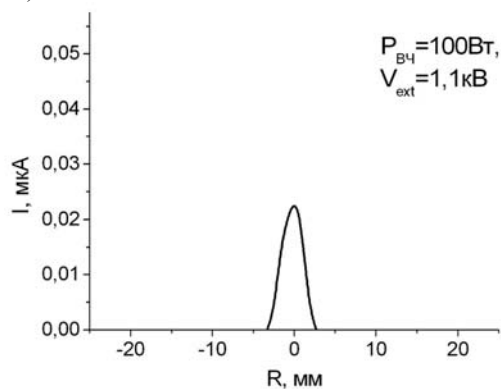


Рис.5. Профиль тока пучка после прохождения выходной апертуры

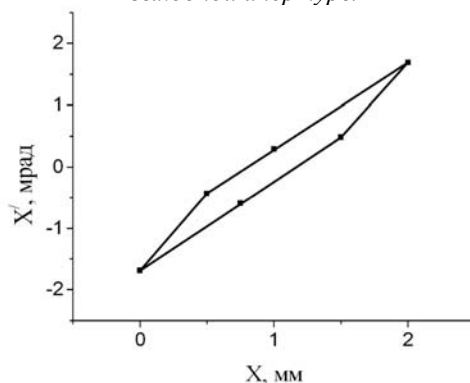


Рис.6. Эмиттансная диаграмма гелиевого пучка после прохождения выходной апертуры

Сила тока 1 мкА, эмиттанс 0,8 мм·мрад. Ток пучка значительно уменьшился, но благодаря уменьшению эмиттанса и тому факту, что яркость пучка обратно пропорциональна квадрату эмиттанса, яркость такого вырезанного пучка в 10 раз выше, чем яркость полного пучка.

Апертура экстракции, которая находится под плавающим потенциалом плазмы, представляет собой электрод смещения по отношению к плазменному электроду.

Увеличение параксиальной яркости может быть объяснено с точки зрения поведения приэлектродного слоя. Потенциал плазмы является положительным относительно плазменного электрода благодаря природе электроположительного разряда. Когда электрод находится под плавающим потенциалом, а он отрицателен относительно потенциала плазмы, ионный слой между плазмой и электродом начинает расширяться. Расширение слоя делает форму мениска более плоской. Поэтому потери ионного пучка, вызванные выпуклостью мениска, могут быть уменьшены, уменьшаются углы расхождения пучка, и, как следствие, уменьшается эмиттанс. Магнитное поле сжимает плазму в районе экстракции и за счет перераспределения фазовой плотности тока в параксиальной части пучка значительно повышается яркость. Слабое электрическое поле проникает в апертуру экстракции и усиливается с ростом вытягивающего напряжения. Таким образом, ионы, эмиттированные в сторону от оси, изменяют свое движение в сходящемся электрическом поле, т.е. конечные радиальные электрические поля возле входа в апертуру сгибают траектории ионов, что уменьшает взаимодействие ионов с элементами конструкции системы экстракции.

Экспериментально получены значения яркости для всего пучка $30 \text{ A/m}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{эВ}$ и приосевой яркости $313 \text{ A/m}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{эВ}$ после прохождения пучком выходной апертуры диаметром 1 мм.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования процессов формирования пучка ионов геликонного ВЧ-источника ионов на базе специальной высокояркостной системы экс-

тракции, которая имеет металлическую апертуру экстракции, отделенную от плазменного электрода изолирующим диском, т.е. находится под плавающим потенциалом плазмы, позволили экспериментально получить значение приосевой яркости после прохождения пучком 1 мм выходной апертуры на уровне $300 \text{ A/m}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{эВ}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Van Steenberg. Recent developments in high intensity ion beam production and preacceleration // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1965, №12, p.746-750.
2. Y. Oka, T. Shoji, T. Kuroda, et al. Studies of an expansion-type tandem rf bucket source // *Rev. Sci. Instrum.* 1990, v.61, №1, p.398-400.
3. I.S. Hong, Y.S. Hwang, G.H. Lee, et al. Ion-beam characteristics of novel helicon ion sources for different plasma parameters // *Rev. Sci. Instrum.* 2000, v.71, №3, p.1385-1388.
4. S. Mordyk, V. Voznyy, V. Miroshnichenko, et al. High brightness RF ion source for accelerator-based microprobe facilities // *Rev. Sci. Instrum.* 2004, v.75, №5, p.1922-1924.
5. М.Д. Габович. *Физика и техника плазменных источников ионов*. М.: «Атомиздат», 1972, 304 с.
6. К.Р. Shamrai, V.B. Taranov. Volume and surface RF power absorption in a helicon plasma source // *Plasma Sources Sci. Technol.* 1996, v.5, p.474-491.
7. В.И. Возный, В.И. Мирошніченко, Д.П. Шульга и др. Экспериментальная установка для тестирования ВЧ-источников ионов // *Problems of Atomic Science and Technology. Series «Plasma Electronics and New Acceleration Methods»*. 2003, №4, с.284-287.
8. Д.А. Нагорный, А.Г. Нагорный, В.И. Возный. Сверхвысокочастотный интерферометр для измерения плотности стационарной плазмы // *Приборы и техника эксперимента*. 2005, №2, с.98-100.
9. S.M. Mordyk, D.P. Shulha, V.I. Miroshnichenko, et al. Possibilities of improving paraxial brightness in RF ion sources // *Problems of Atomic Science and technology. Series «Nuclear Physics Investigations»*. 2005, №6, p.81-86.

Статья поступила в редакцию 02.06.2010 г.

HIGH-BRIGHTNESS EXTRACTION SYSTEM OF THE HELICON ION SOURCE

D.P. Shulha, S.N. Mordyk, V.I. Miroshnichenko

Ion beam forming processes were studied when extractor with isolated aperture being under the floating plasma potential was used in the helicon source. Conditions allowing paraxial brightness to be increased up to $300 \text{ A/m}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{эВ}$ appear due to changes in electric and magnetic field configurations in the extraction area.

ВИСОКОЯСКРАВИНА СИСТЕМА ЕКСТРАКЦІЇ ГЕЛІКОННОГО ДЖЕРЕЛА ІОНІВ

Д.П. Шульга, С.М. Мордик, В.І. Мирошніченко

Проведено дослідження процесів формування пучка іонів при застосуванні в геліконному джерелі екстрактора з ізольованою апертурою екстракції, яка перебуває під плавающим потенциалом плазми. За рахунок зміни конфігурації електричних і магнітних полів в області екстракції виникають умови, які дозволяють збільшити приосєву яскравість до рівня $300 \text{ A/m}^2 \cdot \text{рад}^2 \cdot \text{эВ}$.