

# ПРИЛОЖЕНИЯ И ТЕХНОЛОГИИ

## ГЕЛИКОННЫЙ ИСТОЧНИК ИОНОВ В РЕЖИМЕ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЫ

*С.Н. Мордик, В.И. Возный, В.И. Мирошниченко, А.Г. Нагорный, Д.А. Нагорный,  
В.Е. Сторижко, Д.П. Шульга*

*Институт прикладной физики НАН Украины, Сумы, Украина*

*E-mail: mordyk@ipflab.sumy.ua*

Проведены исследования геликонного источника водородной/гелиевой/аргоновой плазмы для ионно-пучковых приложений. Для создания продольного магнитного поля в геликонном источнике применена компактная магнитная система с постоянными магнитами (NdFeB) и ферритами кольцевой формы. Измеренные плотности плазмы составляли величину  $0.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (для аргона),  $2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (для гелия) и  $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (для водорода) при рабочем давлении газа в источнике  $< 10 \text{ мТорр}$  и вводимой в плазму ВЧ-мощности  $< 350 \text{ Вт}$  ( $f_{\text{ВЧ}} = 27.12 \text{ МГц}$ ). Плотность ионного тока составляла величину  $\sim 100 \text{ мА/см}^2$  при диаметре эмиссионного отверстия  $0.6 \text{ мм}$ . Измерения плотности плазмы производились с помощью СВЧ-интерферометра.

PACS: 52.50.Dg

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений усовершенствования ионных микро- и нанозондов, установок ионной литографии, масс-спектрометров с индуктивно-связанной плазмой, является повышение их разрешающей способности, под которой понимают не только уменьшение размеров пучка ионов, но и обеспечение при этом достаточной величины тока ( $> 100 \text{ пА}$ ). Поскольку величина тока в плоскости регистрации определяется произведением яркости пучка ионов на фазовый объем, то для получения большего тока при максимально достижимом фазовом объеме, в ионно-пучковых технологиях следует использовать источники ионов с наибольшей яркостью. Задача повышения яркости пучка в плазменных источниках ионов (наиболее часто используемых в качестве инжекторов аналитических установок) является очень сложной, но в то же время необходимой для большинства ионно-пучковых приложений.

Теоретический предел яркости источника при известных электронной и ионной температурах  $T_e$ ,  $T_i$  и плотности плазмы  $n$  можно рассчитать по формуле [1]:

$$B_n = \frac{I}{(\pi \varepsilon_n)^2} = \frac{I}{(2\pi R)^2} \left( \frac{kT_i}{m_i c^2} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $m_i$  – масса иона;  $c$  – скорость света в вакууме;  $k$  – постоянная Больцмана;  $I = \pi R^2 j_+$  – ток эмиссии ионов,  $R$  – радиус эмиссионной плазменной поверхности ионного источника,

$j_+ = 0.4 q n_+ \sqrt{2kT_e/m_i}$  – плотность эмиссионного тока,  $\varepsilon_n = \beta \gamma R \alpha_t$  – нормализованный эмиттанс

эмиссии ионов,  $\beta = v/c$ ,  $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ ,  $v$  –

скорость ионного пучка,  $\alpha_t = \frac{p_t^{(max)}}{p_z} = \frac{2m_i V T_i}{m_i \beta \gamma c}$  –

половинный угол эмиссии,  $V T_i = \sqrt{kT_i/m_i}$  –

тепловая скорость ионов. Выражение для максимума поперечного импульса  $p_t^{(max)} = 2m_i V T_i$  получено в предположении, что распределение скоростей частиц в плазме является Максвелловским, т.е.

$$f(v) = \exp\left(-mv^2/kT_i\right).$$

Таким образом, высокояркостные плазменные ионные источники должны иметь плазму с высокой ионной плотностью и высокой электронной температурой. В то же самое время ионная температура должна быть низкой, чтобы получать ионные пучки с малым разбросом по импульсу, и малым эмиттансом. Высокая яркость пучка может быть получена при экстракции пучка с высокой плотностью тока и малым эмиттансом. Одним из возможных вариантов повышения плотности плазмы в ВЧ-источнике ионов является создание эффективного ВЧ-разряда с внешним магнитным полем [2-4].

Повышение плотности плазмы является необходимым, но недостаточным условием повышения яркости пучка. При увеличении плотности плазмы возникает необходимость в повышении вытягивающего напряжения, а также обеспечения фокусировки пучка в системе экстракции для минимизации потерь пучка. Полный ток пучка в значительной степени зависит от пропускной способности канала экстракции, эмиттанса – от геометрических параметров системы экстракции, аббераций ионной оптической системы формирования пучка, давления рабочего газа в канале экстракции. В ВЧ-источниках ионов необходимо использовать режимы с минимальным напуском и максимальной ионизацией газа для обеспечения минимального роста нормализованного эмиттанса в системе экстракции источника ионов за счет перезарядки и столкновения ионов с нейтральными частичками.

В ИПФ НАН Украины проводятся комплексные исследования, направленные на решение задачи повышения яркости пучка. В частности:

- создание плазменных генераторов с высокой плотностью плазмы;
- измерение плотности плазмы с помощью интерферометрического метода (данный метод является более прецизионным чем зонд Ленгмюра);
- измерение характеристик пучка: тока, фазовых характеристик пучка, энергетического разброса, средней энергии, массового состава;
- расчет ионной оптики источника консервативным методом матрицантов с использованием экспериментальных данных;
- на основе анализа экспериментальных и расчетных данных получение информации о канале потерь яркости, моделирование систем экстракции высокояркостных источников.

В данной работе предложены конкретные варианты реализации компактных плазменных генераторов с повышенной плотностью плазмы. Реализованы режимы работы ВЧ-источников с плотностью плазмы на уровне  $10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

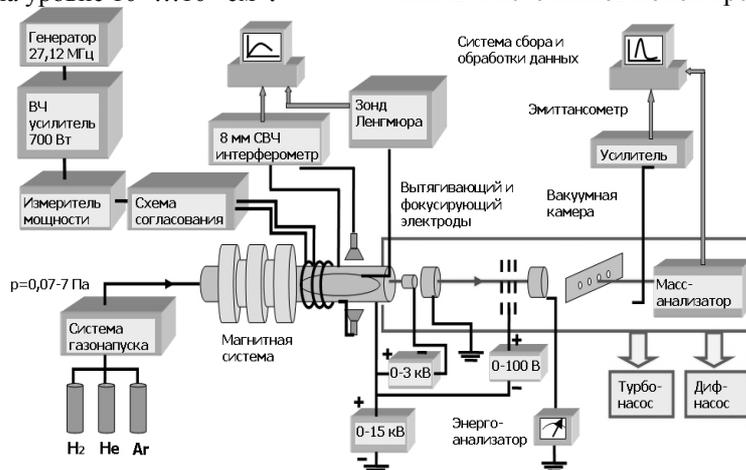


Рис.1. Схема экспериментальной установки

В работе рассмотрен ВЧ-источник ионов, работающий в геликонном частотном диапазоне волн  $\omega_{ci} \ll \omega \ll \omega_{ce}$ , где  $\omega_{ci} = eB_0/m_i c$  – циклотронная частота электронов или ионов. Источник разработан для работы в режимах средних токов (1...300 мкА) с плотностью эмиссионного ионного тока 1...100 мА/см<sup>2</sup>, при этом вводимая в плазму мощность не превышает 350 Вт. ВЧ-источник ионов состоит из геликонного плазменного генератора, в котором продольное магнитное поле создается при помощи компактной магнитной системы с постоянными магнитами круговой формы, системы экстракции, в которой катод отделен от плазмы кварцевым диском с отверстием, а также позиционируемой выходной апертуры источника. Позиционируемая выходная апертура источника предназначена для формирования эмиттанта с максимальной интегральной фазовой плотностью. Положение и размер апертуры определялись при помощи численных расчетов нелинейной динамики пучка. Система вытягивания источника имеет следующие размеры: длина канала катода – 3 мм, диаметр канала – 0.6 мм. Разрядная

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В ИПФ НАН Украины разработана, изготовлена и отлажена установка, позволяющая производить экспрессные измерения фазовых характеристик, эмиттанта, 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. Данная установка позволяет производить испытание источников ионов, используемых в микрозондах, имплантерах, литографах, ускорителях ионов. Данная установка позволяет, в частности, решать задачу выбора высокояркостных режимов работы ВЧ-источника ионов. Результаты этих исследований позволяют определить перспективные направления модернизации ВЧ-источников ионов, используемых для получения высокоэнергетичных ионных микропучков.

Схема экспериментальной установки тестирования ВЧ-источников ионов представлена на Рис.1.

колба изготовлена из кварца и имеет наружный диаметр 30 мм и длину 200 мм. Длина колбы увеличена для возможности реализации геликонного разряда во внешнем магнитном поле. ВЧ-система питания, состоящая из задающего генератора ( $f_{вч}=27.12 \text{ МГц}$ ), усилителя мощности «Аcom-1000» и согласующего устройства, обеспечивала регулируемую выходную мощность до 400 Вт в непрерывном режиме. В источниках использовалась винтовая антенна из 4 витков (медный провод диаметром 4 мм). Конструкция магнитной системы определялась с обеспечением следующих условий: 1) величина и структура магнитного поля должны способствовать эффективному поглощению ВЧ-мощности в плазму, 2) быть компактной, 3) производить минимальное увеличение эмиссионного нормализованного эмиттанта.

Измерения средней плотности плазмы  $n_e$  ВЧ-источников проводились с помощью 8 мм СВЧ-интерферометра, разработанного в ИПФ НАН Украины [5]. В интерферометре применяется гомодинное преобразование частоты СВЧ-генератора в результате ее модуляции пилообразным напряжением. Интерферометр построен по схеме Маха-Цендера, в ко-

торой плазма находится в одном из двух плеч двухлучевого интерферометра. СВЧ-сигнал разделяется на две части, одна из которых поступает через опорный канал на детектор, а другая его часть посредством передающей и приемной рупорных антенн проходит через плазму. Минимальный измеряемый фазовый сдвиг  $1,5^\circ$  соответствует плотности плазмы  $3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , сдвиг  $360^\circ$  – плотности плазмы  $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , погрешность измерения фазового сдвига не превышает 5%.

Измерения эмиттанса производились с помощью диафрагмы с набором отверстий и подвижного вертикального проволочного зонда. 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 производились с помощью фильтра Вина. Разрешающая способность данного устройства имеет величину  $M/\Delta M = 100$ . Данный прибор является классическим фильтром Вина с параллельными полюсами электромагнита. Расстояние между полюсами магнита равно 8 мм, между пластинами конденсатора – 3 мм. Эффективная длина электрического и магнитного поля – 100 мм.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЧ-ИСТОЧНИКА ИОНОВ

С целью выяснения степени корреляции между величиной плотности плазмы и величиной плотности тока пучка были проведены измерения данных величин для геликонного источника со взаимным расположением элементов конструкции изображенной на Рис.1 (магнитная система, антенна, система экстракции).

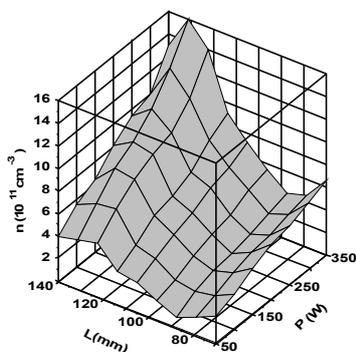


Рис.2. Зависимость плотности He плазмы, от ВЧ-мощности и положения магнитов ( $L$  – расстояние между магнитом и экстрактором,  $p=10$  мТорр)

На Рис.2 представлена зависимость величины средней плотности гелиевой плазмы вблизи эмиссионного отверстия от вводимой в плазму мощности и положения магнитов относительно системы экстракции ( $L$  – расстояние между краем магнита и эмиссионным отверстием системы экстракции) для рабочего давления в разрядной камере 10 мТорр. Измерения плотности плазмы для таких же условий эксперимента показали, что и для аргона и водорода наблюдается подобный характер зависимости величины плотности плазмы от вводимой мощности и положения магнитов.

Как видно из рисунка, имеются положения магнитной системы (распределение величины продольного

магнитного поля представлено на Рис.3), при которых происходит наиболее эффективное поглощение мощности в плазму. Эффективность поглощения мощности в геликонном разряде зависит от ряда параметров: величины и структуры магнитного поля, рабочего давления, сорта газа, частоты генератора, эффективной длины разряда, геометрических размеров разрядной камеры и антенны.

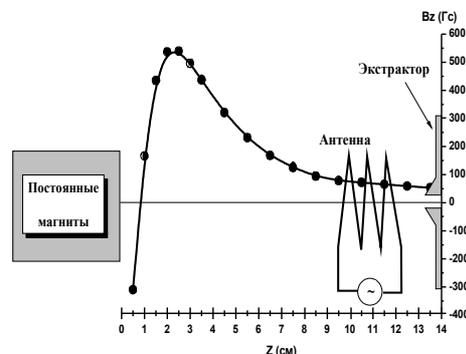


Рис.3. Распределение величины продольного магнитного поля вдоль оси источника

Измеренные плотности плазмы вблизи эмиссионного отверстия составляли величину  $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (для аргона),  $1,6 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (для гелия) и  $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (для водорода); между антенной и магнитом –  $0,9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (для аргона),  $2,4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (для гелия) и  $8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (для водорода); плотности ионного тока составляли величину  $\sim 100 \text{ мА/см}^2$ , яркости пучка  $\sim 100 \text{ А/(м}^2\text{рад}^2\text{эВ)}$  при рабочем давлении газа в источнике  $< 10$  мТорр и вводимой в плазму ВЧ-мощности  $< 350$  Вт ( $f_{\text{ВЧ}}=27,12$  МГц).

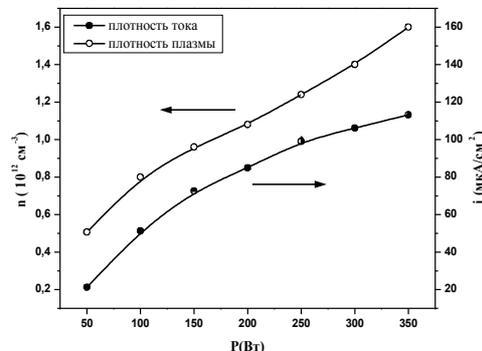


Рис.4. Зависимость величины тока насыщения пучка ионов гелия и плотности плазмы от ВЧ-мощности ( $L=130$  мм,  $p=10$  мТорр)

На Рис.4 представлена зависимость величины ионного тока насыщения пучка гелия и плотности плазмы вблизи эмиссионного отверстия системы экстракции, от мощности вводимой в плазму геликонного источника для оптимального положения магнитной системы относительно системы экстракции. Как видно из рисунка, имеется хорошая корреляция между измеренной плотностью плазмы и плотностью тока насыщения для плотностей гелиевой плазмы  $< 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . При повышении плотности плазмы происходит изменение свойств плазменной границы и, как следствие, изменение ионно-оптических характеристик пучка. При увеличении плотности плазмы возникает необходимость в повышении вытягивающего напряжения, а также обеспечении

дополнительной фокусировки пучка в системе экстракции для минимизации потерь пучка.

Основной трудностью в моделировании систем экстракции является вопрос о том, какую модель извлечения ионов из плазменной границы выбирать. В данной работе для определения канала потерь интенсивности пучка в геликоновом источнике ионов использовались экспериментальные данные: измеренные фазовые характеристики пучка в плоскости регистрации, средняя энергия пучка и энергетический разброс, напряжение экстракции  $V_{\text{sat}}$  при котором происходило насыщение ионного тока. Путем решения обратной задачи методом матрицантов определялись начальные фазовые характеристики пучка в районе экстрактора. Затем решалась прямая задача. Проводилось исследование эволюции фазовых множеств консервативным методом матрицантов [6,7]. Количество частиц начального фазового множества (~1 миллион) задавалось пропорционально  $V_{\text{extr}}^{2/3}$  (для  $V_{\text{extr}} < V_{\text{sat}}$ ) и  $V_{\text{sat}}^{2/3}$  (для  $V_{\text{extr}} > V_{\text{sat}}$ ). Расчеты производились без учета пространственного заряда (в большинстве ионно-зондовых и литографических установок используются режимы с малыми токами пучка < 100 мкА). Результаты расчетов нелинейной динамики пучка для высокоплотностных режимов работы источника показали, что потери интенсивности пучка происходят в основном на катоде источника. Экспериментальные исследования геликонного источника для плотности аргоновой плазмы на уровне  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  показали, что существуют режимы работы источника, при которых более 95% эмиссионного тока теряется на катоде источника.

Как показали результаты измерений характеристик пучка и результаты расчетов, в режимах с высокой плотностью плазмы, для обеспечения более высокой яркости пучка  $\sim 1000 \text{ А}/(\text{м}^2 \text{ рад}^2 \text{ эВ})$ , возникает необходимость в разработке структурированных систем экстракции с эмиссионным отверстием порядка нескольких радиусов Дебая [8,9], обеспечивающих для конкретных плазменных параметров источника оптимальное прохождение пучка по ионно-оптическому тракту.

#### 4. ВЫВОДЫ

Созданы компактные генераторы плазмы с высокой плотностью плазмы  $5 \cdot 10^{11} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$  для использования в ионно-пучковых технологиях. Измерения плотности плазмы производились с помощью СВЧ-интерферометра. Существует хорошая корреляция между измеренной плотностью плазмы и плотностью тока. Получены яркости пучка на уровне

не  $100 \text{ А}/(\text{м}^2 \text{ рад}^2 \text{ эВ})$ . Дальнейшее повышение яркости требует проведения комплексных (экспериментальных и теоретических) оптимизационных исследований геликонных генераторов и систем экстракции источников ионов.

Проведенные исследования показали, что существуют реальные возможности повышения плотности плазмы в ВЧ-источниках ионов за счет оптимизации структуры и величины как магнитного, так и ВЧ-поля, а также снижения потерь заряженных частиц на элементах конструкции плазменного генератора.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. A.van Steenberg. Design of a transport system for high intensity // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1965, p.745-752.
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. Д.А. Нагорный, А.Г. Нагорный, В.И. Возный. Сверхвысокочастотный интерферометр для измерения плотности стационарной плазмы // *ИТЭ*. 2005, №2, с.98-100.
6. A.D Dymnikov, R. Hellborg. Matrix theory of the motion of a charge particle beam in curvilinear space-time. Part I. General theory // *Nucl. Instr. and Meth.* 1993, A330, p.323-328.
7. S.M. Mordyk, A.G. Ponomarev. Application of the matrix method to calculate the third-order aberration coefficients for a sector electrostatic field including fringing-field effects. // *Nucl. Instr. And Meth.* 2002, A480/2-3, p.359-372.
8. Q. Ji, X. Jiang, T.-J. King, K.N. Leung. Improvement in brightness of multicusp-plasma ion source // *J. Vac. Sci. Technol.* 2002, B20(6), p.2717-2723.
9. С.Н. Мордик, Д.П. Шульга, В.И. Возный, В.И. Мирошниченко, В.Е. Сторижко. Возможности повышения осевой яркости ВЧ-источников ионов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические методы исследования»*. 2005, №6, с.81-86.

#### HELICON ION SOURCE IN HIGH PLASMA DENSITY OPERATION MODE

*S.M. Mordyk, V.I. Voznyy, V.I. Miroshnichenko, A.G. Nagornyj, D.A. Nahornyj, V.Yu. Storizhko, D.P. Shulha*

We are testing a high-plasma-density Helicon Source for ion beam application. Experiments were performed with a hydrogen-, helium- and argon gas. The source has been diagnosed by a microwave interferometer. Measured plasma densities in the vicinity antenna of up to  $9.0 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (for argon),  $2.4 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$  (for helium), and  $6.5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (for hydrogen) were obtained for working gas pressure of <10 mTorr and RF power <350 W ( $f_{\text{RF}}=27.12 \text{ MHz}$ ). The ion current density was  $\sim 100 \text{ mA}/\text{cm}^2$ .

#### ГЕЛІКОННЕ ДЖЕРЕЛО ІОНІВ У РЕЖИМІ ВИСОКОЇ ЩІЛЬНОСТІ ПЛАЗМИ

*С.М. Мордик, В.І. Возний, В.І. Мирошниченко, О.Г. Нагорний, Д.О. Нагорний, В.Ю. Сторіжко, Д.П. Шульга*

Проведені дослідження геліконного джерела водневої /гелійової/ аргонової плазми для іонно-пучкових застосувань. Для створення подовжнього магнітного поля в геліконному джерелі застосована компактна магнітна система зі сталими магнітами (NdFeB) і феритами кільцевої форми. Виміряні густини плазми були  $0.9 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  (для аргону),  $2.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$

(для гелію) і  $6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (для водню) при робочому тиску газу у джерелі  $< 10$  мТорр та введеній у плазму ВЧ-потужності  $< 350$  Вт ( $f_{\text{вч}} = 27.12$  МГц). Густина іонного струму складала величину  $\sim 100$  мА/см<sup>2</sup> при діаметрі емісійного отвору  $0.6$  мм. Вимірювання густини плазми проводились за допомогою НЧ-інтерферометра.