

ИЗМЕРЕНИЕ АКСИАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗБРОСА ВЫСОКОЧАСТОТНОГО МУЛЬТИКАСПОВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ

В.И. Возный

*Институт прикладной физики НАН Украины,
ул. Петропавловская, 58, г. Сумы, 40030 Украина
E-mail: vozny@ipflab.sumy.ua*

Представлены результаты измерения аксиального энергетического разброса высокочастотного мультикаспового источника ионов, работающего на частоте 27,12 МГц. Измерены функции распределения ионов по энергии гелиевого и аргонного пучков при изменении высокочастотной мощности в пределах 50-300 Вт с помощью сеточного энергоанализатора методом задерживающего потенциала. Определены средняя энергия и энергетический разброс ионов гелия и аргона. Установлено, что минимальный энергетический разброс ионов гелия равен 7 ± 1 эВ при 150 Вт ВЧ мощности.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время высокочастотные (ВЧ) мультикасповые источники ионов (ВЧМКИИ) находят широкое применение в ионной имплантации, ускорительной технике, микролитографии. Одним из преимуществ ВЧМКИИ является их низкий энергетический разброс. Например, в микролитографии применение ионного источника с малым энергетическим разбросом приводит к уменьшению хроматических aberrаций ионной оптической системы.

Малое значение энергетического разброса ВЧМКИИ, равное 3,2 эВ, было достигнуто в работе [1], в которой приведены результаты исследований источника, работающего на частоте 13,56 МГц и ВЧ мощности до 2,5 кВт.

В Институте прикладной физики НАН Украины сконструирован ВЧМКИИ диаметром 4,7 см и длиной 8 см, работающий на частоте ВЧ диапазона -27,12 МГц, разрешенной для применения в промышленных установках. Ионный источник предназначен для работы в электростатическом ускорителе аналитического комплекса в качестве источника ионов легких газов. Повышение рабочей частоты до 27,12 МГц обусловлено тем фактом, что из теоретического рассмотрения условий, влияющих на энергетический разброс ионов ВЧ-источников установлено, что энергетический разброс ионов обратно пропорционален рабочей частоте [2].

В данной статье представлены результаты измерения аксиального энергетического разброса ВЧМКИИ, разработанного в Институте прикладной физики НАН Украины. Поскольку источник ионов будет находиться внутри ограниченного объема высоковольтного электрода электростатического ускорителя, где электрическая мощность не превышает 400 Вт, то представляет интерес измерение энергетического разброса источника, работающего при ВЧ мощности в пределах 50-300 Вт.

1 МОДЕЛЬ И ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ

В реальном ВЧ разряде наблюдаются две различные моды разряда: при низкой ВЧ мощности преобладает емкостной разряд (Е-разряд), а при высокой мощности доминирует индукционный разряд (Н-разряд), характеризующийся высокой плотностью плазмы. Н-разряд поддерживается в основном индукционным электрическим полем ВЧ антенны и электростатическое поле играет небольшую роль. Однако в

любом режиме работы источника всегда одновременно присутствуют обе компоненты поля: емкостная и индукционная. Между ВЧ антенной и камерой источника генерируются сильные электрические поля, в результате чего развивается емкостный разряд в области стенки камеры, в частности, вблизи вытягивающего электрода. Ионы приобретают энергию при ускорении в слое объемного заряда, существующим между границей плазмы и вытягивающим электродом. В этом слое объемного заряда происходит основное падение вытягивающего напряжения, которое и ускоряет ионы. Вследствие емкостной связи на этот постоянный потенциал накладывается переменная ВЧ компонента. В работах [2, 3] рассмотрена теория движения иона с зарядом e и массой M в емкостном бесстолкновительном слое объемного заряда. Предполагается, что напряжение на слое $V_S(t)$ изменяется во времени по синусоидальному закону:

$$V_S(t) = V_0 + V_{rf} \cdot \sin \omega \cdot t, \quad (1)$$

где ω – круговая рабочая частота; V_0 – среднее постоянное напряжение на слое; V_{rf} – амплитуда переменного ВЧ напряжения на слое.

Основным параметром, определяющим форму функции распределения ионов по энергии (ФРИЭ), является параметр $\beta = \tau_{ion} / \tau_{rf}$, где τ_{ion} – время, за которое ион проходит слой при постоянной величине падения напряжения на слое V_0 , а время $\tau_{rf} = 2\pi / \omega$ – период ВЧ колебаний. Полагая, что объемный заряд в бесстолкновительном слое удовлетворяет уравнению Чайльда-Ленгмюра, величина β определяется следующим соотношением:

$$\beta = \frac{3s\omega}{2\pi} \left(\frac{M}{2eV_0} \right)^{1/2}, \quad (2)$$

где s – ширина слоя объемного заряда, M – масса иона.

В низкочастотном режиме ($\beta \ll 1$) ионы пересекают слой за небольшую часть ВЧ периода и реагируют на мгновенное значение напряжения на слое. Их энергия, поэтому, зависит от фазы ВЧ колебаний, когда они входят в слой. В результате энергия ионов, усредненная за ВЧ период, сильно модулирована. Это приводит к существенному уширению ФРИЭ, когда ширина ΔE равна амплитудному значению ВЧ напряжения. ФРИЭ является двухпиковой с двумя пиками, лежащими близко друг к другу и симметрично относительно средней энергии ионов eV_0 . Два пика соответствуют минимальному и максимальному значению амплитуды ВЧ напряжения V_{rf} .

В высокочастотном режиме ($\beta \gg 1$) потенциал слоя осциллирует много раз за время, пока ион проходит слой и поэтому ион реагирует на среднее напряжение слоя. Фаза колебания, при которой ион попадает в слой, перестает иметь значение. В результате ФРИЭ сужается. В таком высокочастотном режиме выражения для функции распределения ионов по энергии и энергетического разброса ΔE имеют вид [2]:

$$f(E) = \frac{2n_e}{\omega \Delta E} \left[1 - \frac{4}{\Delta E^2} (E - eV_0)^2 \right]^{-1/2}, \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{4eV_{rf}}{\pi\beta}. \quad (4)$$

где n_e – плотность плазмы.

Таким образом, при увеличении β ширина ФРИЭ уменьшается и два пика функции распределения сближаются друг к другу до тех пор, когда их уже нельзя разрешить (рис.1, а). В среднечастотном режиме траектория иона зависит от числа колебаний границы плазма-слой, пока ион проходит слой. Поэтому результирующая ФРИЭ является двухпиковой, но проявляет случайные изменения [4].

Энергия ионов E равна сумме энергии, с которой ион входит в слой (соответствует направленной энергии, равной $0,5kT_e$) и энергии $V_S(t)$, приобретаемой ионом при прохождении слоя:

$$E = 0,5kT_e + eV_S(t) = 0,5kT_e + e(V_0 + V_{rf} \cdot \sin \omega \cdot t), \quad (5)$$

где k – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура плазмы.

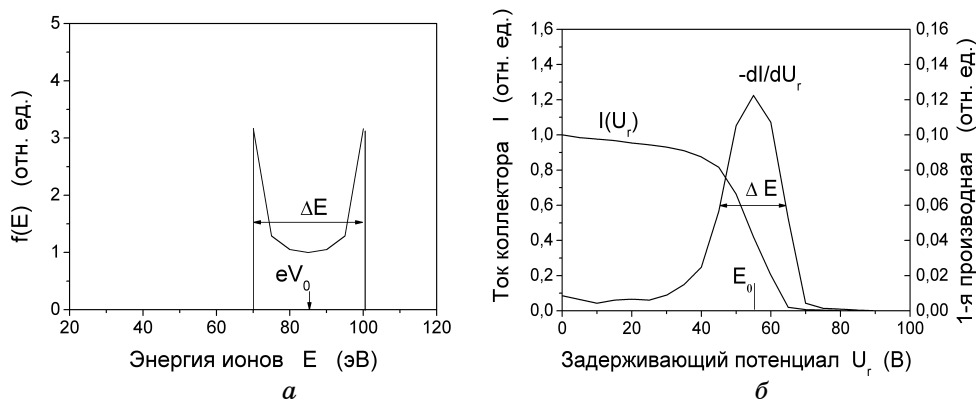


Рисунок 1 - Функция распределения ионов по энергии: – рассчитанная по формуле (2) (а); пропорциональная – dI/dU_r (б)

Среднее постоянное напряжение V_0 на слое равно:

$$V_0 = V_p + V_{ext} = \frac{kT_e}{2e} \ln \frac{M}{2\pi \cdot m_e} + V_{ext}, \quad (6)$$

где V_p – потенциал плазмы, m_e – масса электрона, V_{ext} – вытягивающее напряжение (напряжение экстракции ионов).

Средняя энергия E_0 ионов пучка определяется как разность между усредненной по времени энергией ионов \bar{E} и энергией, соответствующей напряжению вытягивания:

$$E_0 = \bar{E} - eV_{ext}. \quad (7)$$

Из анализа факторов, влияющих на величину энергетического разброса ВЧ ионного источника (уравнения 2, 4, 6) следует, что для уменьшения энергетического разброса необходимо повышать рабочую частоту ω ВЧ генератора и уменьшать амплитуду переменного ВЧ напряжения V_{rf} на слое объемного заряда (межэлектродном промежутке).

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Энергетический разброс ионов в пучке измерялся с помощью сеточного энергоанализатора методом задерживающего потенциала. Энергоанализатор состоит из трех плоских параллельных сеток, установленных на расстоянии 2 мм друг от друга. Коллектор (цилиндр Фарадея) изготовлен из нержавеющей стали и имеет диаметр 10 мм и длину 30 мм. Коллектор и входная диафрагма находятся под потенциалом земли, также как и первая и третья сетки. На среднюю сетку подается положительный задерживающий потенциал относительно вытягивающего напряжения. Энергоанализ ионов пучка производится путем изменения задерживающего напряжения в диапазоне 0-100 В с шагом 1 В при одновременном измерении ионного тока на коллектор. Ток коллектора усиливается с помощью усилителя постоянного тока У5-11 и регистрируется.

Известно, что коллекторный ток $I(U_r)$ энергоанализатора является функцией задерживающего потенциала U_r второй сетки [5]:

$$I(U_r) = \frac{ATqe}{M} \int_{U_r}^{\infty} f(E)dE, \text{ где } E\text{—аксиальная кинетическая энергия иона;}$$

$f(E)$ —функция распределения ионов по энергии (ФРИЭ); A —площадь входной диафрагмы; T —прозрачность сеток анализатора, q —заряд иона. Отсюда получаем выражение для функции распределения ионов по

энергии [5]: $f(E) = \frac{-M}{ATqe} \frac{dI(U_r)}{dU_r}$. Таким образом, функция распределения

ионов по энергии $f(E)$ пропорциональна первой производной коллекторного тока $I(U_r)$. Энергетический разброс ΔE ионов пучка определяется как ширина функции распределения ионов по энергии на ее полувысоте (рис.1, б).

Средняя энергия E_0 ионов пучка определяется выражением [6]:

$$E_0 = \frac{\int E \cdot f(E)dE}{\int f(E)d(E)}. \quad (8)$$

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Измерения энергетического разброса ВЧ мультикасового ионного источника выполнялись на установке для тестирования ВЧ источников ионов [7]. Энергетический разброс ΔE ионов пучка определялся из функции распределения ионов по энергии, которая измерялась с помощью сеточного энергоанализатора. Вытягивающее напряжение V_{ext} изменялось от 0,5 до 2,5 кВ. ФРИЭ измерялись для гелиевого и аргонового пучков в диапазоне давления газа в разрядной камере $p=0,7-11$ Па. ВЧ мощность изменялась в диапазоне $P=50-300$ Вт.

На рис.2, а представлена эволюция ФРИЭ ионов гелия при изменении вытягивающего напряжения. Функция распределения является моноэнергетичной (однопиковой) при низком давлении и малой ВЧ мощности и сдвигается в сторону большей энергии E_i при увеличении вытягивающего напряжения V_{ext} . При увеличении мощности до 200 Вт функция распределения ионов гелия начинает проявлять структуру с двойным пиком даже при низких давлениях.

Эволюция функции распределения ионов аргона в зависимости от давления газа p в разрядной камере показана на рис.2, б. Даже при малых значениях давления ($p=0,7$ Па) функция распределения является двухпиковой, а при увеличении давления ($p=11$ Па) на спектре ФРИЭ аргона появляются несколько пиков. ФРИЭ гелия и аргона сдвигаются в

сторону малых энергий E_i при увеличении давления газа в разрядной камере.

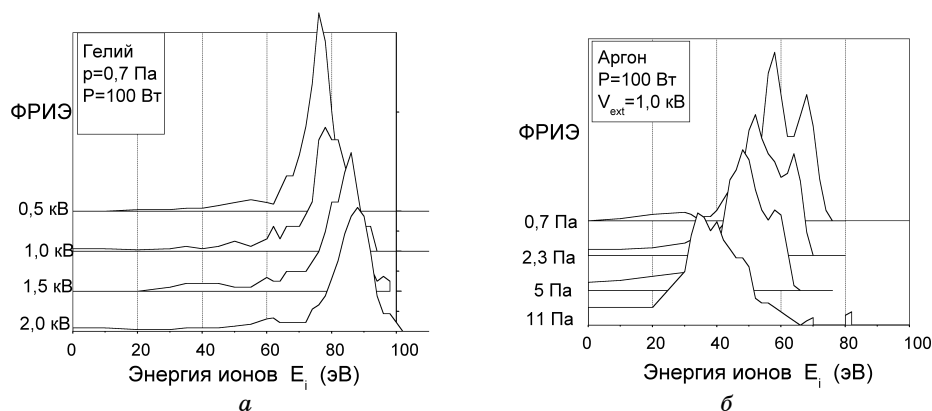


Рисунок 2 - Поведение ФРИЭ при изменении: - вытягивающего напряжения (а); давления газа (б)

Для анализа поведения ФРИЭ необходимо сделать некоторые оценки. Ширина слоя s объемного заряда может быть определена из закона Чайльда-Ленгмюра:

$$s = \frac{2}{3} \left(\frac{2e}{M} \right)^{1/4} \left(\frac{\epsilon_0}{j_i} \right)^{1/2} V_{ext}^{3/4}, \quad (9)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная.

Плотность ионного тока аргонного пучка равна $j_i=33$ мА/см² при $V_{ext}=1,6$ кВ (при $P=144$ Вт) [7]. Таким образом, из (9) следует, что ширина слоя s равна 1,3 мм. Длина свободного пробега иона λ_i определяется как $\lambda_i=1/(n_g \cdot \sigma_i)$, где σ_i – сечение столкновений ионов с нейтральными атомами, n_g – плотность нейтральных частиц газа. Суммарное сечение столкновений низкоэнергетичных ионов с нейтральными атомами в слабоионизованной плазме для двух основных процессов столкновений, преобладающих в разряде – $Ar^+ - Ar$ резонансной перезарядки и $Ar^+ - Ar$ упругих столкновений, равно $\sigma_i=10^{-18}$ м². Плотность нейтральных частиц газа определяется как $n_g=2,4 \cdot 10^{20} p$, где p – давление газа. Таким образом, средняя длина свободного пробега иона при столкновениях с нейтральными атомами аргона определяется как $\lambda_i=4/p$, мм, и равна $\lambda_i=5,7-1,5$ мм при изменении давления от 0,7-2,7 Па и $\lambda_i=1,5-0,4$ мм при изменении давления в диапазоне 2,7-11 Па.

Следовательно, при давлении газа в диапазоне 0,7-2,7 Па длина свободного пробега иона λ_i больше ширины слоя s и ионы проходят слой объемного заряда почти без столкновений. При ВЧ периоде $\tau_{rf}=0,037$ мкс (1/27,12 МГц) величина $\beta=1,4$. Это среднечастотный режим для аргона и можно ожидать увидеть двухпиковую функцию распределения со случайными изменениями, что и наблюдается на рис.2, б. Двухпиковая структура ФРИЭ свидетельствует о наличии определенной степени паразитной емкостной связи между ВЧ разрядом и вытягивающим электродом.

Из интерферометрических измерений плотности плазмы [8] следует, что плотность аргонной плазмы равна $n_e=10^{18}$ м⁻³ при 140 Вт ВЧ мощности и давлении 0,27 Па. Плотность гелиевой плазмы равна

$n_e=10^{17} \text{ м}^{-3}$ при тех же условиях [8]. Так как ширина слоя s зависит от плотности плазмы как $s \sim n_e^{-1/2}$, то можно ожидать, что параметр β равен $\beta=4,4$ для ионов гелия. Это почти высокочастотный режим и ФРИЭ должна быть узкой и почти моноэнергетичной, что и видно из рис.2, а.

Для давлений газа в диапазоне 2,7-11 Па длина свободного пробега λ_i ионов меньше ширины слоя s и ионы испытывают столкновения. В слое могут происходить процессы резонансной перезарядки и упругих столкновений, которые будут изменять форму ФРИЭ. При резонансной перезарядке быстрые ионы передают свою энергию медленным нейтральным атомам, в результате чего образуются медленные ионы и быстрые нейтралы. Резонансная перезарядка приводит к появлению многопиковой структуры ФРИЭ вследствие ВЧ-модуляции медленных ионов [9]. Такая многопиковая структура функции распределения видна на рис.2, б для ионов аргона при высоком давлении.

Зависимость средней энергии E_0 ионов гелия и аргона от давления p в разрядной камере представлена на рис.3, а. Средняя энергия ионов линейно падает с давлением, выраженном в логарифмическом масштабе, что совпадает с результатами измерений средней энергии ионов индукционного разряда [5, 6]. Уменьшение средней энергии ионов при увеличении давления в разрядной камере может быть объяснено уменьшением потенциала плазмы V_p (уравнение 6). Повышение давления p ведет к уменьшению электронной температуры T_e [8] и, следовательно, к уменьшению потенциала плазмы V_p и средней энергии ионов E_0 (уравнения 7, 8).

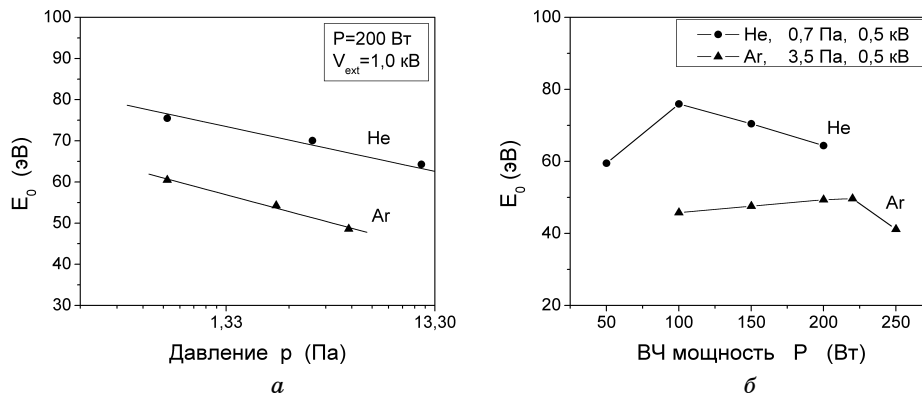


Рисунок 3 - Зависимость средней энергии E_0 ионов гелия и аргона от: давления газа p , (а); ВЧ мощности (б)

На рис.3, б показана зависимость средней энергии E_0 ионов от ВЧ мощности P для ионов гелия и аргона. Заметны два различных поведения средней энергии ионов при увеличении мощности. Повышение E_0 при увеличении ВЧ мощности характерно для емкостного разряда. Уменьшение E_0 с ростом мощности (характерное для индукционного разряда) указывает, прежде всего, на то, что с ростом ВЧ мощности индукционная фаза разряда начинает доминировать над емкостной фазой. С ростом мощности происходит также увеличение плотности плазмы, в результате чего увеличивается экранировка области экстракции и уменьшается емкостная связь.

Поскольку потенциал ионизации гелия (24,6 эВ) выше потенциала ионизации аргона (15,7 эВ), то средняя электронная температура T_e гелиевой плазмы выше электронной температуры T_e аргоновой плазмы. Следовательно, и плазменный потенциал гелиевой плазмы выше

потенциала аргоновой плазмы (6). Это объясняет тот факт, что средняя энергия E_0 ионов гелия выше средней энергии ионов аргона (рис.3).

На рис.4, а показана зависимость энергетического разброса ΔE ионов аргона от давления p газа в разрядной камере. Энергетический разброс ионов аргона равен $\Delta E \approx 11$ эВ при $P=100$ Вт ВЧ мощности и не зависит от давления газа в широком диапазоне $p=0,7-11$ Па. Такое поведение энергетического разброса от давления газа характерно также и для ионов гелия.

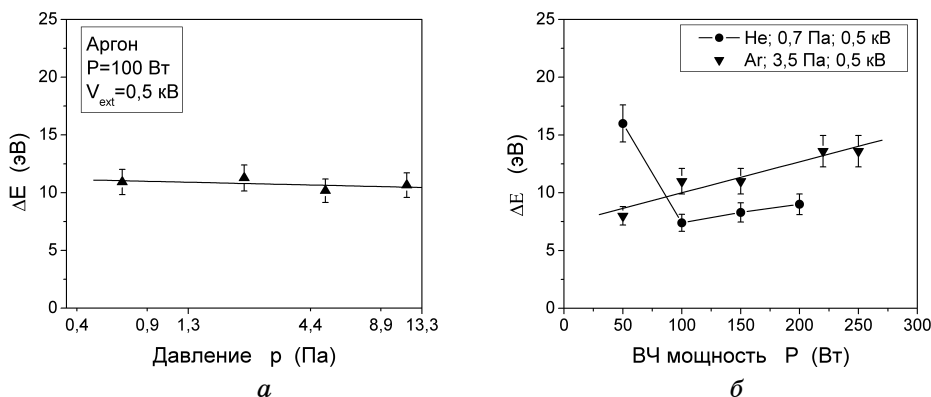


Рисунок 4 - Зависимость энергетического разброса ΔE ионов гелия и аргона от: давления газа p , (а); ВЧ мощности (б)

Зависимость энергетического разброса ΔE ионов гелия и аргона от ВЧ мощности показана на рис.4, б. Энергетический разброс ΔE ионов аргона линейно растет с увеличением мощности и увеличивается от 8 до 12 эВ с ростом мощности от 50 до 300 Вт. Для ионов гелия характерно уменьшение энергетического разброса ΔE от 16 эВ до 7 эВ с повышением ВЧ мощности от 50 до 100 Вт. При изменении мощности от 100 до 200 Вт энергоразброс слабо увеличивается от 7 до 9 эВ. Увеличение энергетического разброса ионов ΔE с ростом ВЧ мощности вызвано как увеличением ВЧ потенциала V_{rf} вдоль слоя, так и уменьшением ширины слоя s , что следует из уравнений (2), (4). Энергетический разброс ионов гелия равен $\Delta E=7$ эВ и меньше энергетического разброса ионов аргона. Это может происходить вследствие того, что как было оценено выше, параметр β имеет большее значение для ионов гелия, чем для ионов аргона. И как следует из уравнения (4), энергетический разброс ионов гелия будет меньше энергетического разброса ионов аргона.

ВЫВОДЫ

Изучено влияние условий работы ВЧ мультикаспового источника ионов на среднюю энергию и энергетический разброс извлекаемого ионного пучка. С помощью сеточного энергоанализатора методом задерживающего потенциала измерены функции распределения ионов по энергии гелиевого и аргонового пучка при изменении вытягивающего напряжения в пределах $V_{ext}=0,5-2,5$ кВ, давления газа $p=0,7-11$ Па и ВЧ мощности в диапазоне $P=50-300$ Вт. Определены средняя энергия и энергетический разброс ионов гелия и аргона. Установлено, что минимальный энергетический разброс ионов гелия равен $\Delta E=7 \pm 1$ эВ и ионов аргона $\Delta E=11 \pm 1$ эВ при 100-200 Вт ВЧ мощности. Энергетический разброс увеличивается с ростом мощности и не зависит от давления газа в разрядной камере ионного источника.

Двухпиковая структура ФРИЭ при низких давлениях свидетельствует о наличии паразитной емкостной связи ВЧ разряда. Такая структура характерна для ФРИЭ, которая формируется в ВЧ слое с временной модуляцией потенциала слоя. Многопиковая структура ФРИЭ при высоких давлениях указывает на рассеяние ионов и резонансную перезарядку при прохождении ионом слоя объемного заряда.

Из анализа факторов, влияющих на энергетический разброс ВЧ ионного источника следует, что для уменьшения энергетического разброса необходимо принимать ряд мер: а) повышать рабочую частоту ВЧ генератора, б) уменьшать амплитуду переменного ВЧ напряжения, возникающего на межэлектродном промежутке. Комплексное выполнение этих мер, а также использование магнитного фильтра внутри разрядной камеры для экстракции лишь низкоэнергетичных ионов, и тщательная экранировка электрических цепей напряжения экстракции ионного пучка от высокочастотных наводок позволит еще более снизить энергетический разброс ВЧ мультикаспового источника.

SUMMARY

AXIAL ENERGY SPREAD MEASUREMENTS OF A RADIO-FREQUENCY MULTICUSP ION SOURCE

V.I.Voznyy

Institute of Applied Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Petropavlovsk 58, 40030, Sumy, Ukraine, e-mail: vozny@ipflab.sumy.ua

The results of axial energy spread measurements of a 27.12 MHz radio-frequency multicusp ion source are presented. Ion energy distribution functions of extracted helium and argon ion beams have been measured by use of retarding field energy analyzer for 50-300 W of radio-frequency power. Average energy and energy spread of helium and argon ions have been determined. It was found that minimal ion energy spread of helium beam is equal to 7 ± 1 eV at 150 W of radio-frequency power.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lee Y., Gough R.A., Kunkel W.B, Leung K.N. et al. Ion energy spread and current measurements of the rf-driven multicusp ion source // *Rev. Sci. Instrum.*-1997.-V.68, №3.-P.1398-1402.
2. Benoit-Cattin P. and Bernard L.C. Anomalies of the energy of positive ions extracted from high-frequency ion sources. A theoretical study // *J. Appl. Phys.*-1968.-V.39.-P.5723-5726.
3. Kawamura E., Vahedi V., Lieberman M.A. and Birdsall C.K. Ion energy distributions in rf sheaths; review, analysis and simulation // *Plasma Sources Sci. Technol.*-1999.-V.8.-P. R45-R64.
4. Farouki R.T., Hamaguchi S. and Dalvie M. Analysis of a kinematic model for ion transport in rf plasma sheaths// *Phys. Rev. A.*-1992.-V.45.-P.5913-5928.
5. Kortshagen U. and Zethoff M. Ion energy distribution functions in a planar inductively coupled RF discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.*-1995.-V.4.-P.541-550.
6. Gudmundsson J.T. Ion energy distribution in H₂/Ar plasma in a planar inductive discharge // *Plasma Sources Sci. Technol.*-1999.-V.8.-P.58-64.
7. Возный В.И., Мирошниченко В.И., Мордик С.Н., Сторижко В.Е., Сулкіо-Клефф Б., Шульга Д.П. Экспериментальная установка для тестирования ВЧ источников ионов // *Problems of Atomic Sciences and Technology. Ser.:Plasma Electronics and New Acceleration Methods.*-2003.-№4(3).-С.284-287.
8. Возный В.И., Мірошніченко В.І., Мордик С. М., Сторіжко В.Ю., Сулкіо-Клефф Б., Шульга Д.П. Високочастотні плазмові джерела іонів ядерного мікрозонда // *Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень.*-2004.-№1(12).-С.77-82.
9. Voznyy V.I., Miroshnichenko V.I., Mordyk S.M., Nagorny A.G., Nagorny D.A., Storizhko V.E., Shulha D.P. Plasma density measurement of RF ion source // *Problems of Atomic Sciences and Technology. Ser.:Plasma Physics.*-2005.-V.10, №1.-P.209-211.
10. Wild C. and Koidl P. Ion and electron dynamics in the sheath of radio-frequency glow discharges // *J. Appl. Phys.*-1991.-V.69.-P.2909-2922.

Возный В.И., кандидат физ.-мат. наук,
старший научный сотрудник

Поступила в редакцию 5 мая 2008 г.