

Расчет плотности ионного тока индуктивного высокочастотного источника ионов

В.И. Возный*, В.Е. Сторижко, В.И. Мирошниченко, Д.П. Шульга

Институт прикладной физики НАН Украины, ул. Петропавловская, 58, 40030, Сумы, Украина

(Получено 30.03.2012; в отредактированной форме – 17.09.2012; опубликовано online 30.10.2012)

Исследовался высокочастотный (ВЧ) индуктивный ионный источник, работающий на частоте 27,12 МГц. Используя глобальную модель аргонового разряда, рассчитана плотность плазмы, электронная температура и плотность ионного тока ВЧ-источника в зависимости от поглощенной ВЧ-мощности и давления газа при изменении размеров разрядной камеры. Установлено, что плотность тока ионного пучка возрастает при уменьшении размеров разрядной камеры. Расчеты показывают, что в индуктивном источнике с разрядной камерой диаметром 30 мм и длиной 35 мм при 100 Вт поглощенной ВЧ-мощности и давлении аргона 7 мТорр плотность ионного тока равна 40 мА/см², что хорошо согласуется с экспериментально измеренной величиной 43 мА/см². При уменьшении диаметра разрядной камеры до 15 мм плотность ионного тока может достигать величины 85 мА/см² при 100 Вт поглощенной ВЧ-мощности.

Ключевые слова: ВЧ источник ионов, Ионный пучок, Плазма, Плотность тока.

PACS numbers: 41.75.Ak, 52.50.Qt, 52.80.Pi

1. ВВЕДЕНИЕ

Сфокусированные ионные пучки находят широкое применение в микро- и нанотехнологиях. Например, при производстве различных микроустройств приходится изготавливать детали микронных размеров. Одним из основных методов формирования микродеталей является ионная фрезеровка (ion milling), при которой часть обрабатываемого материала распыляется пучком ионов с энергией, достаточной для выбивания атомов с поверхности материала. В качестве источника бомбардирующих ионов в основном используется инертный газ аргон, поскольку он имеет массу, достаточную для распыления, и относительно недорог.

Наиболее распространенными источниками ионов в коммерческих системах ионной фрезеровки являются дуоплазматрон и жидкометаллический ионный источник [1, 2]. Однако этим источникам присущи недостатки, такие как наличие распыляемого катода, невозможность работать с реактивными газами. Для ионного фрезерования плазменный высокочастотный (ВЧ) источник ионов может вполне составить конкуренцию коммерческим источникам, поскольку обладает рядом преимуществ: отсутствием распыляемого катода, чистотой плазмы, возможностью работать с реактивными газами.

Основными параметрами ионного источника, определяющими скорость и производительность ионной обработки, являются высокая яркость пучка и плотность ионного тока источника. Разработкой ВЧ-источников, генерирующих ионные пучки с высокой яркостью, занимаются многие научные группы [3-5]. В ИПФ НАН Украины ведутся работы по изучению некоторых типов ионных ВЧ-источников [6-11] с целью повышения их яркости. Исходя из условия, что для повышения яркости необходимо создание в ионном источнике плотной плазмы и извлечение пучка с высокой плотностью ионного тока, проведено исследование ряда ионных источников, работающих на частоте 27,12 МГц: индуктивного ВЧ-источника без внешнего магнитного поля (или ин-

дукционного), мультикаспового ВЧ-источника с внутренней антенной и геликонного ВЧ-источника с внешним магнитным полем. Источники разрабатывались для получения высокоярких пучков легких сортов ионов Н⁺ и He⁺ при проведении ионного микрозондового анализа на электростатическом ускорительном комплексе.

Среди этих источников индуктивный ВЧ-источник является базовым и имеет большой потенциал для дальнейшего совершенствования. С целью применения индуктивного ВЧ-источника в ионной фрезеровке представляет большой интерес рассмотрение работы источника с рабочим газом Ar и определение максимальной плотности тока аргонового пучка.

В данной работе проведена оценка возможности увеличения плотности тока ионного пучка индуктивного ВЧ-источника при изменении размеров его разрядной камеры. Используя глобальную модель индуктивного ВЧ-разряда в аргоне, определены плазменные параметры источника и максимальная плотность тока аргонового пучка в зависимости от поглощенной ВЧ-мощности, давления аргона и размеров разрядной камеры источника.

2. МЕТОДИКА И РАСЧЕТ ПЛОТНОСТИ ИОННОГО ТОКА

Для расчета плотности ионного тока, извлекаемого из аргоновой плазмы индуктивного источника, применяется глобальная модель ВЧ-разряда [12]. В модели плотность плазмы n_e и электронная температура T_e определяются из уравнения баланса мощности и баланса частиц в разряде. Предполагается, что плотность положительных ионов и электронов имеет однородный профиль n_e по всему объему разряда за исключением области возле стенок, где плотность частиц падает до значения n_s . Согласно балансу мощности вся поглощенная разрядом мощность идет на образование электрон-ионных пар с учетом всех упругих и неупругих столкновений в объеме. Остальная часть мощности теряется в виде кинетической энергии ионов и электронов при их уходе из

* vozny@ipflab.sumy.ua

разряда на стенки камеры. Полный баланс мощности записывается в виде [12]:

$$P_{abs} = n_s u_b A E_t, \quad (1)$$

где P_{abs} – мощность, поглощенная плазмой, n_s – плотность плазмы на границе плазма-слой у стенки разрядной камеры, $u_b = (kT_e/M)^{1/2}$ – боровская скорость иона на границе плазма-слой, k – постоянная Больцмана, T_e – электронная температура, M – масса иона, A – площадь потерь частиц, E_t – полная энергия, теряемая из системы, приходящаяся на один ион.

Чтобы учесть различие между величиной n_s на аксиальной и радиальной границе слоя, вводится эффективная площадь потерь A_{eff} , определяемая из условия $\int n_s dA = n_e A_{eff}$, где n_e – плотность плазмы в центре разряда. Для цилиндрического плазменного разряда с радиусом R и длиной L выражение для A_{eff} имеет вид: $A_{eff} = 2\pi R(Lh_R + Rh_L)$, где $h_L = n_{sL}/n_e$ и $h_R = n_{sR}/n_e$ – геометрические факторы, равные отношению аксиальной n_{sL} (и соответственно радиальной n_{sR}) плотности плазмы на границе слоя к плотности плазмы в центре. В среднем диапазоне давлений, когда длина свободного пробега иона λ_i меньше или порядка размеров системы, выражения для h_L и h_R имеют вид [12]: $h_L = 0,86 (3 + L/2\lambda_i)^{-1/2}$, $h_R = 0,8(4 + R/\lambda_i)^{-1/2}$. Средняя длина свободного пробега иона равна $\lambda_i = 1/n_g \sigma_i$, где σ_i – сечение столкновений низкоэнергетических ионов с нейтральными атомами в слабоионизованной плазме, n_g – плотность нейтральных частиц газа. Наибольшими сечениями рассеяния при столкновениях ион-нейтрал обладают два процесса: резонансная перезарядка и упругое рассеяние. Суммарное сечение этих процессов равно $\sigma_i = 10 \cdot 10^{-18} \text{ м}^2$ и относительно постоянно для тепловых энергий ионов $T_i \sim 0,05 \text{ эВ}$. Поскольку плотность нейтральных частиц газа зависит от давления газа p (мТорр) как $n_g = 3,3 \cdot 10^{19} p, \text{ м}^{-3}$, то средняя длина свободного пробега иона при столкновениях с нейтральными атомами аргона равна $\lambda_i = 1/33p, \text{ м}$ [12].

Решая уравнение (1), получаем среднюю плотность плазмы n_e внутри разряда [12]:

$$n_e = P_{abs}/u_b A_{eff} E_t. \quad (2)$$

Полная энергия потерь E_t , приходящаяся на один ион, определяется как [12]: $E_t = E_{ew} + E_{iw} + E_c$, где $E_{ew} = 2kT_e$ – средняя кинетическая энергия электрона, теряемая на стенке; E_{iw} – средняя кинетическая энергия иона, теряемая на стенке, E_c – столкновительная энергия, необходимая для образования одной электрон-ионной пары. Энергия E_{iw} равна сумме начальной энергии иона при его вхождении в слой и энергии, приобретаемой ионом при ускорении в слое с разностью потенциалов V_s . Скорость иона, входящего в слой, равна боровской скорости u_b , которая соответствует направленной энергии $kT_e/2$. Таким образом, $E_{iw} = eV_s + kT_e/2$, где e – заряд электрона. Для разряда с изолированными стенками разность потенциалов V_s между плазменной границей и поверхностью стенки определяется из условия равенства электронного и ионного потоков на изолированную поверхность, откуда $V_s = (kT_e/2e) \ln(M/2\pi m_e)$, где m_e – масса электрона. Для аргона $V_s = 4,7(kT_e/e)$, поэтому средняя кинетическая энергия иона аргона,

теряемая на стенке, равна $E_{iw} \approx 5,2kT_e$. Таким образом, полная энергия потерь E_t , приходящаяся на один ион, равна $E_t \approx E_c + 7,2kT_e$ [12].

Столкновительная энергия E_c , необходимая для образования одной электрон-ионной пары, определяется как [12]:

$$E_c = E_{iz} + \sum [E_{ex,i}(K_{ex,i}/K_{iz}) + (K_{el}/K_{iz})(2m_e/M)(3kT_e/2)] \quad (3)$$

где $E_{iz} = 15,76 \text{ эВ}$ – энергия ионизации атома аргона; $E_{ex,i}$ – пороговая энергия возбуждения i -го уровня атома; K_{iz} – константа скорости ионизации; $K_{ex,i}$ – константа скорости возбуждения i -го уровня атома; K_{el} – константа скорости упругого рассеяния электронов на нейтральных атомах.

Уравнение (3) учитывает потери энергии электрона вследствие ионизации, возбуждения и упругого рассеяния на нейтральных атомах. Это основные потери энергии в слабоионизованных электроположительных разрядах. Величина $(2m_e/M)(3kT_e/2)$ – средняя энергия, теряемая электроном при упругом столкновении с атомом. Используя значения констант K_{iz} , $K_{ex,i}$ и K_{el} для аргона в зависимости от электронной температуры [12] определяют энергию E_c , необходимую для образования одной электрон-ионной пары.

Электронная температура T_e определяется из уравнения баланса частиц в разряде. Полная потеря электронов и ионов на поверхности разрядной камеры уравнивается образованием электрон-ионных пар в результате ионизации внутри плазменного объема. Для цилиндрической разрядной камеры с радиусом R и длиной L уравнение баланса частиц имеет вид [12]:

$$K_{iz}/u_b = 1/n_g d_{eff}, \quad (4)$$

где $d_{eff} = 0,5RL/(Lh_R + Rh_L)$, – эффективный размер плазмы. Используя константу скорости ионизации нейтралов электронами K_{iz} , уравнение (4) решается относительно T_e для данных значений n_g и d_{eff} и, таким образом, определяется электронная температура T_e в зависимости от давления p . Определив электронную температуру, находят энергию образования электрон-ионной пары E_c и рассчитывают полную энергию потерь E_t , приходящуюся на один ион, в зависимости от давления газа. Используя уравнение (2), определяют плотность плазмы в зависимости от давления газа и поглощенной мощности.

Максимальная плотность ионного тока, которую можно извлечь из плазмы с плотностью n_e и электронной температурой T_e в отсутствие внешнего магнитного поля является плотностью тока насыщения j_s . При извлечении тока в аксиальном направлении она определяется плотностью ионов n_s на границе плазма-слой и боровской скоростью ионов u_b :

$$j_s = en_s u_b = en_e h_L (kT_e/M)^{1/2}. \quad (5)$$

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Общая схема индуктивного ВЧ-источника ионов показана на рис. 1. Источник содержит цилиндрическую кварцевую разрядную камеру с наружным диаметром D и длиной L , на которой расположена спиральная ВЧ-антенна (3,5 витка медного провода диа-

метром 3 мм). Длина канала экстрактора из Мо равна 3 мм, диаметр равен $d = 0,6$ мм. Между плазмой и экстрактором установлена кварцевая диафрагма.

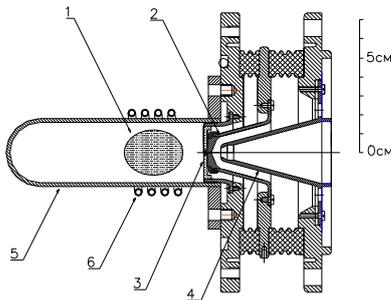


Рис. 1 – Схема индуктивного ВЧ-источника: 1–плазменный объем; 2–экстрактор; 3–диафрагма; 4–фокусирующий электрод; 5–разрядная камера; 6–спиральная ВЧ-антенна

ВЧ-система содержит задающий генератор частотой 27,12 МГц, усилитель мощности «АСОМ-1000»(500 Вт) и систему согласования, состоящую из нагрузочного и резонансного переменных конденсаторов. Изменяя емкости конденсаторов, добиваются положения, когда уровень отраженной мощности близок к нулю. При этом величина прямой мощности является ВЧ-мощностью P , подводимой к разряду источника.

Вакуумная камера установки откачивается турбомолекулярным насосом «Leybold-350», обеспечивающим давление на уровне $4 \cdot 10^{-6}$ Торр. Для напуска аргона в ионный источник используется система напуска газа «СНА-2».

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1 Результаты расчетов плотности ионного тока

Решая уравнения (2)-(5) рассчитывались плотность плазмы n_e , электронная температура T_e и плотность ионного тока насыщения j_s для индуктивного ВЧ-источника с цилиндрической разрядной камерой диаметром $D = 2R$ и длиной L . Расчеты проводились для 4-х вариантов размера камеры: 1) $D = 30$ мм, $L = 70$ мм, 2) $D = 30$ мм, $L = 35$ мм, 3) $D = 15$ мм, $L = 70$ мм, 4) $D = 15$ мм, $L = 35$ мм. Давление аргона в камере источника изменялось в диапазоне 1 – 50 мТорр.

Зависимость электронной температуры T_e от давления p аргона в разряде показана на рис. 2 для 4-х вариантов размера разрядной камеры D и L . Из рисунка видно, что при увеличении давления от 1 до 50 мТорр электронная температура T_e монотонно уменьшается от 8,5 эВ до 2,2 эВ. При уменьшении длины разрядной камеры от $L = 70$ мм до $L = 35$ мм электронная температура T_e мало изменяется. Большее изменение температуры происходит при уменьшении диаметра камеры D . В камере с диаметром $D = 30$ мм и длиной $L = 35$ мм при давлении $p = 6 - 10$ мТорр температура электронов равна $T_e = 3,5 - 4$ эВ.

Согласно уравнению (2) плотность плазмы n_e прямо пропорциональна поглощенной ВЧ-мощности P_{abs} . Учитывая это, результаты расчетов плотности плазмы и плотности ионного тока насыщения приводятся для значения мощности $P_{abs} = 100$ Вт. Для того чтобы найти n_e и j_s для больших значений

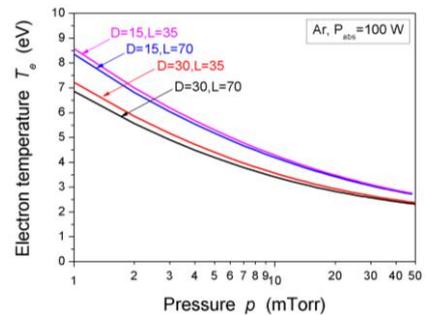


Рис. 2 – Зависимость электронной температуры T_e от давления аргона p для 4-х вариантов размера разрядной камеры $D, L, P_{abs}=100$ Вт

ВЧ-мощности, приведенные величины необходимо увеличить пропорционально. Поглощенная разрядом ВЧ-мощность P_{abs} определяется как $P_{abs} = \eta P$, где P – подводимая к разряду мощность, η – коэффициент эффективности ввода мощности в плазму. Определение коэффициента эффективности η выполнено в работе [10]. Коэффициент эффективности зависит от давления газа p в разряде и при давлении 7 мТорр коэффициент η равен 0,83 в широком диапазоне подводимой к разряду ВЧ-мощности P .

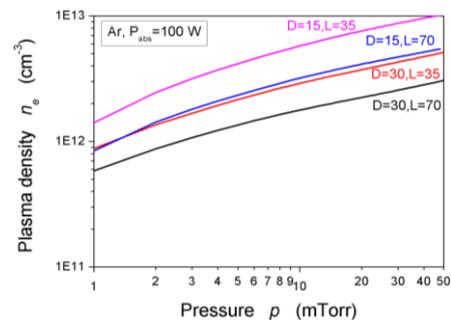


Рис. 3 – Плотность плазмы n_e в зависимости от давления аргона p для 4-х вариантов размера разрядной камеры $D, L, P_{abs}=100$ Вт

На рис. 3 показана зависимость средней плотности n_e аргоновой плазмы от давления p для 4-х вариантов размера разрядной камеры D, L . Видно, что при уменьшении длины и диаметра разрядной камеры средняя плотность плазмы повышается. Это объясняется уменьшением площади поверхности A , на которой происходит потеря частиц. В разрядной камере диаметром $D = 30$ мм и длиной $L = 35$ мм плотность плазмы монотонно увеличивается от величины $n_e = 8,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ до $n_e = 5,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ при увеличении давления газа от 1 до 50 мТорр. При рабочем давлении аргона $p = 7$ мТорр средняя плотность плазмы равна $n_e = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. В камере с диаметром 15 мм при таком же давлении газа плотность плазмы возрастает до $n_e = 4,9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$.

Плотность ионного тока насыщения j_s , которую можно извлечь из плазменного разряда, определяется уравнением (5) и пропорциональна величине поглощенной ВЧ-мощности P_{abs} . На рис. 4 показаны результаты расчетов зависимости плотности ионного тока насыщения j_s от давления газа p для 4-х вариантов размера разрядной камеры D, L . При увеличении давления аргона от 1 до 50 мТорр плотность ионного тока насыщения возрастает, достигает мак-

симула и затем спадает. Это объясняется тем, что плотность тока j_s является произведением функций, одна из которых – плотность плазмы n_e – возрастает с ростом давления, а другие – u_b и h_L – уменьшаются.

Из рис. 4 видно, что при уменьшении размеров разрядной камеры плотность ионного тока насыщения увеличивается. Давление газа, при котором плотность тока достигает максимума, несколько возрастает. В разрядной камере диаметром $D = 30$ мм и длиной $L = 70$ мм максимальная плотность тока равна $j_i = 20$ мА/см² при давлении газа $p = 3 - 5$ мТорр. При уменьшении длины камеры до $L = 35$ мм максимальная плотность тока возрастает до $j_i = 40$ мА/см². Такую же плотность ионного тока можно получить в разрядной камере диаметром $D = 15$ мм и длиной $L = 70$ мм. При уменьшении длины камеры до $L = 35$ мм максимальная плотность тока может возрасти до $j_i = 85$ мА/см².

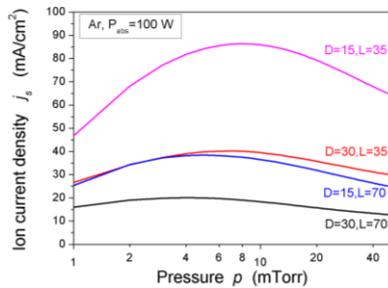


Рис. 4 – Плотность ионного тока насыщения j_s в зависимости от давления аргона p для 4-х вариантов размера разрядной камеры D, L . $P_{abs} = 100$ Вт

4.2 Измерение плотности ионного тока

В плазменном источнике ионы, образованные в разрядной камере, дрейфуя, достигают область экстракции и извлекаются вытягивающим напряжением V_{ext} . В ВЧ-источнике эмитирующая граница не является фиксированной (рис. 5). При данной геометрии экстрактора плотность плазмы должна быть согласована с величиной вытягивающего напряжения [13, 14]. Форма и положение эмитирующей границы определяется балансом между плотностью потока ионов из плазмы (плотностью тока насыщения j_s) и плотностью тока j_c , ограниченного пространственным зарядом. Плотность тока j_c определяется законом Чайльда-Ленгмюра [13]:

$$j_c = (4\epsilon_0/9)(2q/M)^{1/2}(V_{ext}^{3/2}/s^2) \quad (6)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, q – заряд иона, V_{ext} – вытягивающее напряжение; s – расстояние между экстрактором и границей плазмы.

Таким образом, положение плазменной границы определяется соотношением между плотностью плазмы n_e и напряжением экстракции V_{ext} . При большой плотности плазмы (или малом V_{ext}) плазменная граница выпукла (рис. 5а), пучок недофокусирован и расходимость пучка велика; расстояние s между границей плазмы и вытягивающим электродом мало; значительная часть пучка попадает на экстрактор. При малой плотности плазмы (или большом V_{ext}) плазменная граница вогнута (рис. 5б), пучок является перефокусированным и расходящимся;

часть пучка попадает на экстрактор. Когда же выходящий пучок согласован с системой экстракции, то расходимость его невелика и пучок почти параллелен (рис. 5в).

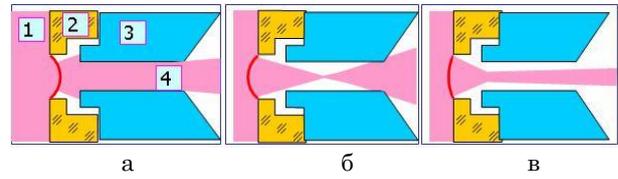


Рис. 5 – Форма ионного пучка, извлекаемого из плазменного ВЧ-источника. 1- плазма, 2- изолятор, 3- экстрактор, 4- пучок

На рис. 6 представлены результаты измерения плотности ионного тока пучка, извлекаемого из индуктивного ВЧ-источника. Плотность ионного тока j_i определялась отношением полного тока пучка I_i к площади отверстия экстрактора: $j_i = 4I_i/\pi d^2$, где $d = 0,6$ мм – диаметр отверстия экстрактора. Ионный ток I_i измерялся с помощью цилиндра Фарадея с супрессором для подавления тока вторичных электронов.

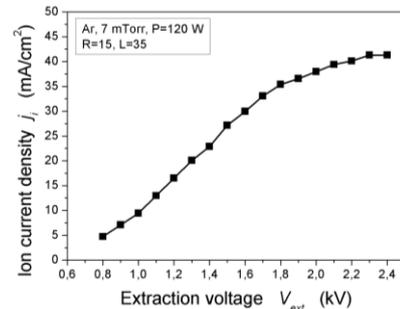


Рис. 6 – Плотность ионного тока j_i в зависимости от вытягивающего напряжения V_{ext} . $D = 30$ мм, $L = 35$ мм, $p = 7$ мТорр, $P = 120$ Вт

Зависимость плотности тока аргонового пучка j_i от вытягивающего напряжения V_{ext} показана на рис. 6. Видно, что плотность тока j_i возрастает с повышением вытягивающего напряжения V_{ext} (формула (6)) и при $V_{ext} = 1,6 - 2,4$ кВ достигает насыщения (формула (5)). При подводимой мощности $P = 120$ Вт и давлении аргона $p = 7$ мТорр максимальная плотность тока равна 43 мА/см², что хорошо согласуется с расчетной величиной 40 мА/см².

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматривалась работа индуктивного ионного ВЧ-источника без магнитного поля для использования в ионной фрезеровке. Используя глобальную модель индуктивного ВЧ-разряда в аргоне, определены плазменные параметры источника и максимальная плотность тока аргонового пучка в зависимости от поглощенной ВЧ-мощности, давления аргона и размеров разрядной камеры. Установлено, что максимальная плотность ионного тока пропорциональна поглощенной разрядом ВЧ-мощности и возрастает при уменьшении размеров разрядной камеры. Для устойчивой работы источника, снижения его температурного режима и уменьшения ВЧ-наводок на измерительную аппаратуру не следует повышать

ВЧ-мощность более ~ 150 Вт. Поэтому представляет интерес повышение плотности ионного тока за счет уменьшения размера разрядной камеры источника. Расчеты показали, что в камере диаметром $D = 30$ мм и длиной $L = 35$ мм максимальная плотность ионного тока равна 40 mA/cm^2 при $P_{\text{abs}} = 100$ Вт. Проведено измерение плотности тока аргонового пучка с разрядной камерой таких размеров и получена величина 43 mA/cm^2 , что подтверждает правильность выполненных расчетов. Установлено, что при уменьшении диаметра камеры до $D = 15$ мм плотность ионного

тока может достигать 85 mA/cm^2 при 100 Вт ВЧ-мощности, а значит $\sim 120 \text{ mA/cm}^2$ при $P_{\text{abs}} = 150$ Вт. Дальнейшее уменьшение диаметра разрядной камеры не целесообразно, поскольку при этом уменьшаются геометрические размеры ВЧ-антенны и затрудняется ввод ВЧ-мощности в разряд. Таким образом, для извлечения высокой плотности тока из индуктивного ВЧ-источника без внешнего магнитного поля оптимальными размерами разрядной камеры являются: диаметр $D = 15\text{-}20$ мм и длина $L = 30\text{-}35$ мм.

Ion Current Density Calculation of the Inductive Radio Frequency Ion Source

V.I. Voznyi, V.E. Storizhko, V.I. Miroshnichenko, D.P. Shulha

Institute of Applied Physics NAS of Ukraine, 58, Petropavlivska Str., 40030 Sumy, Ukraine

A radio-frequency (RF) inductive ion source at 27.12 MHz is investigated. With a global model of the argon discharge, plasma density, electron temperature and ion current density of the ion source is calculated in relation to absorbed RF power and gas pressure as a discharge chamber size changes. It is found that ion beam current density grows as the discharge chamber size decreases. Calculations show that in the RF source with a discharge chamber 30 mm in diameter and 35 mm long the ion current density is 40 mA/cm^2 at 100 W of absorbed RF power and 7 mTorr of pressure, and agrees well with experimentally measured value of 43 mA/cm^2 . With decreasing discharge chamber diameter to 15 mm ion current density can reach 85 mA/cm^2 at absorbed RF power of 100 W.

Keywords: RF ion source, Ion beam, Plasma, Current density.

Розрахунок густини іонного струму індуктивного високочастотного джерела іонів

В.І. Возний, В.Ю. Сторіжко, В.І. Мірошніченко, Д.П. Шульга

Інститут прикладної фізики НАН України, вул. Петропавлівська, 58, 40030, Суми, Україна

Досліджувалось високочастотне (ВЧ) індуктивне джерело іонів, що працює на частоті 27,12 МГц. Використовуючи глобальну модель аргонового розряду, розраховано густину плазми, електронну температуру та густину іонного струму ВЧ-джерела в залежності від поглиненої ВЧ-потужності і тиску газу при зміні розмірів розрядної камери. Встановлено, що густина іонного струму зростає при зменшенні розмірів розрядної камери. Розрахунки показують, що в індукційному джерелі з розрядною камерою діаметром 30 мм і довжиною 35 мм при 100 Вт поглиненої потужності і тиску аргону 7 мТорр густина іонного струму дорівнює 40 mA/cm^2 , що добре узгоджується з експериментально виміряною величиною 43 mA/cm^2 . При зменшенні діаметру камери до 15 мм густина іонного струму може досягати величини 85 mA/cm^2 при 100 Вт поглиненої ВЧ-потужності.

Ключові слова: ВЧ джерело іонів, Іонний пучок, Плазма, Густина струму.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. C.D. Coath, J.V.P. Long, *Rev. Sci. Instrum.* **66**, 1018 (1995).
2. R. Clampitt, D.K. Jefferies, *Nucl. Instrum. Meth.* **149**, 739 (1978).
3. N.S. Smith, P.P. Tesch, N.P. Martin, D.E. Kinion, *Appl. Surf. Sci.* **255**, 1606 (2008).
4. X. Jiang, Q. Ji, A. Chang, K.N. Leung, *Rev. Sci. Instrum.* **74**, 2288 (2003).
5. Y.J. Kim, D.H. Park, H.S. Jeong, Y.S. Hwang, *Rev. Sci. Instrum.* **77**, 03B507 (2006).
6. V.I. Miroshnichenko, S.N. Mordik, V.V. Olshansky, K.N. Stepanov, V.E. Storizhko, B. Sulkio-Cleff, V.I. Voznyy, *Nucl. Instrum. Meth. B* **201**, 630 (2003).
7. V.I. Voznyy, V.I. Miroshnichenko, S.N. Mordyk, A.G. Nagornyy, D.A. Nagornyy, V.E. Storizhko, D.P. Shulha, *Probl. At. Sci. Tech. Ser.: Plasma Physics* **10** No1, 209 (2005).
8. V. Miroshnichenko, S. Mordyk, D. Shulha, V. Storizhko, V. Voznyy, *Nucl. Instrum. Meth. B* **260**, 39 (2007).
9. S. Mordyk, V. Miroshnichenko, D. Shulha, V. Storizhko, *Rev. Sci. Instrum.* **79**, 02B707 (2008).
10. V. Voznyi, *J. Nano-Electron. Phys.* **2** No2, 75 (2010).
11. В.І. Возний, В.І. Мірошніченко, С.Н. Мордик, А.Г. Нагорний, Д.А. Нагорний, В.Е. Сторіжко, Д.П. Шульга, *Наука та інновації*. **6** No5, 38 (2010).
12. M.A. Lieberman and A.J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. (New York: Wiley: 1994).
13. B.H. Wolf, *Handbook of Ion Sources*. (Boca Raton: CRC Press: 1995).
14. P. Spadtke, *Rev. Sci. Instrum.* **63**, 2647 (1992).