

Исследование процессов в эффективном ионном источнике с сетчатым плазменным катодом

Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких

Институт электрофизики УрО РАН, 620016 Екатеринбург, Россия

E-mail: gavrilov@iep.uran.ru

Исследованы процессы в двухступенчатом ионном источнике с сетчатым плазменным катодом на основе тлеющего разряда и магнитным мультиполюм в анодной ступени газоразрядной системы. Рассмотрено влияние площади плазменного катода, размера ячейки сетки и плотности анодной плазмы на эффективность плазменного катода. Обсуждаются особенности ввода быстрых электронов в анодную ступень при различных конфигурациях магнитного мультиполя и извлечения ионов из анодной ступени при наличии протяженного ионного слоя между плазмой и электродом ионно-оптической системы. Получено соотношение для энергетической эффективности генерации плазмы в анодной ступени ионного источника. Приведены характеристики источника, генерирующего пучок ионов аргона сечением 50 cm^2 с током пучка свыше 400 mA и энергией ионов 5 keV.

Введение

Такие свойства ионных источников с холодным катодом, как способность работать в химически активной газовой среде и при повышенных давлениях рабочего газа, их простота и надежность делают их перспективными для использования в таких технологических применениях, как осаждение и травление пленок с использованием ионных пучков, в том числе ионно-ассистируемое нанесение покрытий и химическое ионно-лучевое травление [1], а также для модификации материалов ионной имплантацией [2]. Однако, такие особенности ионных источников на основе тлеющего разряда, как повышенное рабочее давление, невысокая энергетическая эффективность и наличие примеси ионов металла в пучке газовых ионов ограничивают область их технологических применений. Известным путем решения этих проблем является использование двухступенчатых газоразрядных систем, в которых удается разделить функции катодной и анодной плазмы разряда и оптимизировать условия эмиссии электронов холодным катодом и параметры плазменного эмиттера ионов [3]. Одним из перспективных способов реализации такого подхода является использование газоразрядной системы с сетчатым плазменным

катодом на основе тлеющего разряда и магнитным мультиполюм в анодной ступени, в которой можно независимо управлять током и энергией быстрых электронов и создавать большие объемы плотной однородной плазмы [4].

В работе приводятся результаты комплексного исследования процессов электронной эмиссии плазменного катода и генерации анодной плазмы в широком диапазоне давлений газа. Рассмотрено влияние ионного слоя между плазмой и экраным электродом ионной оптики на условия отбора ионов из плазмы и характеристики ионного пучка. Получено соотношение для оценки энергетической эффективности источников данного типа.

2. Электродная схема и принцип действия ионного источника

Конструкция двухступенчатого ионного источника с сетчатым плазменным катодом (СПК) приведена на рис. 1. Рабочий газ подается непосредственно в полость катода 1. Тлеющий разряд зажигается между полым катодом 1 и анодной сеткой 2, установленной напротив выходной апертуры катода. При подаче напряжения между анодом второй ступени 4 и электрически соединенными анодной 2 и экранной 5 сетками в полости анода генерируется плазма, ограниченная перифе-

рийным магнитным полем. Магнитный мультиполь может быть как линейным, образованным линейными рядами постоянных магнитов b на поверхности анода, так и кольцевым, в котором магнитные полюса создаются кольцевыми рядами постоянных магнитов. Встречное направление соседних магнитных полюсов приводит к тому, что в объеме поля взаимно компенсируются, а между соседними полюсами возникает сильное поле, направленное параллельно поверхности анода.

Напряжение, приложенное между электродами второй ступени, локализуется преимущественно в двойном слое пространственного заряда, формирующемся с анодной стороны сетки. Ускоренные в слое электроны осциллируют в свободной от магнитного поля области, генерируя пространственно однородную плазму. Площадь потерь быстрых электронов, уходящих на анод вдоль линий магнитного поля, пропорциональна произведению полной длины магнитных полюсов на ларморовский радиус быстрых электронов [5]. Использование магнитов из Sm-Co сплава с высокой индукцией магнитного поля (0,25 Тл) способствует снижению

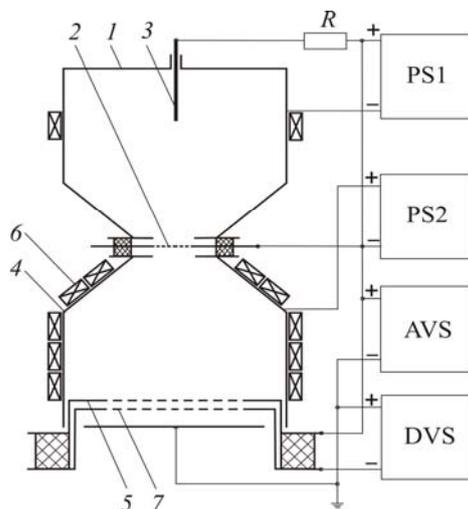


Рис. 1. Электродная схема ионного источника. 1 – полый катод, 2 – сетка, 3 – поджигающий электрод, 4 – анод второй ступени, 5 – экранная сетка, 6 – постоянные магниты, 7 – ускоряющий электрод.

потерь быстрых электронов. Ионы извлекаются из плазмы через отверстия в экранной сетке, причем доля извлеченных ионов и условия первичного формирования пучка зависят от параметров ионного слоя между плазмой и экранной сеткой [6]. Энергетическая эффективность ионного источника определяется отношением тока ионного пучка к суммарной мощности, потребляемой в разряде.

3. Параметры анодной плазмы

Измерения потенциала анодной плазмы, проведенные в [7], показали, что во всем используемом диапазоне токов разряда (0,2-2 А) и давлений газа ($>5 \cdot 10^{-3}$ Па) потенциал плазмы на несколько вольт выше анодного потенциала, из чего следует, что электростатическое удержание ионов в анодной плазме отсутствует, а энергия быстрых электронов на входе в анодную ступень определяется напряжением U_2 , приложенным между ее электродами. Электронная температура плазмы составляет 1-8 eV и возрастает при уменьшении давления газа. Измерения многосеточным энергоанализатором с тормозящим электрическим полем [8] показали наличие в анодной плазме быстрых электронов, максимальная энергия которых близка к eU_2 . Положение максимума продольной составляющей энергии ионов, определяемое потенциалом плазмы, соответствует результатам зондовых измерений, а небольшая ширина энергетического спектра, составляющая 2-3 eV на полувысоте пика, свидетельствует о высокой стабильности параметров плазмы.

Эффективность генерации ионов можно оценить из величины, обратной отношению тока быстрых электронов I_e к полному току ионов I_i , генерируемых в анодной плазме. В экспериментах обычно измеряется ионный ток в цепи коллектора ионов, размещенного в плоскости экранной сетки. Для плазмы, генерируемой быстрыми электронами, удерживаемыми многополюсным магнитным полем, в [5] было получено

соотношение $I_e/I_i \sim \beta(W + \tau_i/\tau_e)$, где β – отношение тока ионов, генерируемых в плазме, к току извлечённых ионов; τ_e – среднее время жизни быстрого электрона в плазме; τ_i – среднее время между актами ионизации, совершаемыми быстрым электроном $\tau_i = (n_0 \langle \sigma_i v_e \rangle)^{-1}$; где n_0 – плотность нейтральных частиц; σ_i – сечение их ионизации электронным ударом; v_e – средняя скорость электрона. $W = w[e(U_2 - U_i)]$ – это величина, обратная максимальному числу ионизационных соударений для быстрого электрона в плазме. Здесь w – средняя энергия, затрачиваемая на образование одного иона, $e(U_2 - U_i)$ – разница между полной энергией быстрого электрона и энергией ионизации. Величина β определяется долей ионов, поступающих на коллектор, от общего числа ионов, генерируемых в анодной плазме.

Полученные в разряде с термоэмиссионными катодами [5,9] зависимости отношения I_e/I_i от обратного давления газа имеют вид прямых линий, наклон которых определяется величиной τ_e . В области повышенных давлений газа линейный ход зависимостей I_e/I_i нарушается, что можно трактовать, как уменьшение времени жизни быстрых электронов в результате усиления

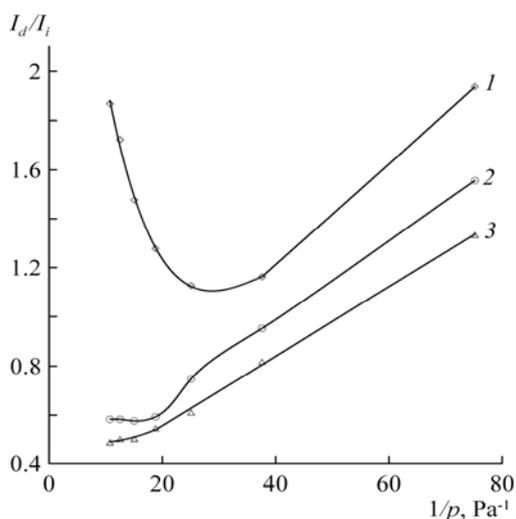


Рис. 2. Зависимости отношения тока в цепи катода тлеющего разряда к ионному току от величины, обратной давлению газа. U_2 : 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150 В.

их диффузии поперек магнитного поля. Экстраполяция линейной части зависимостей до пересечения с осью ординат дает значение W .

Полученные в двухступенчатом ионном источнике с СПК зависимости ионного тока от тока в цепи катода тлеющего разряда (рис. 2) также имеют линейную часть и минимум в области высоких давлений, соответствующий максимальной эффективности извлечения ионов, положение которого зависело от общей площади СПК и размера ячейки сетки, напряжения второй ступени, а также конфигурации магнитного мультиполя.

4. Эмиссионные свойства плазменного катода

Как известно, в газовом разряде с термоэмиссионным катодом изменением давления газа можно реализовать режим свободной эмиссии катода, когда анодный ток меньше тока насыщения катода, и режим вынужденной эмиссии, при котором поле на катоде отлично от нуля и весь ток электронной эмиссии, определяемый мощностью накала, полностью отбирается в плазму [10]. Отсюда следует, что в газоразрядной системе с плазменным катодом также возможен режим с током электронной эмиссии, меньшим тока в цепи полого катода, который с ростом давления переходит в режим эмиссии с током электронов, близким к току тлеющего разряда, причем определяющее влияние на условия перехода будет оказывать плотность обратного тока ионов из анодной плазмы.

Для изучения эмиссионных свойств СПК при наличии плотной анодной плазмы требуется измерять ток электронной эмиссии катодной плазмы I_e . Оценка тока эмиссии СПК по току в цепи анода второй ступени за вычетом тока вторичных электронов, равного току ионов, поступающих на анодную и экранную сетки, затруднена тем, что ток в цепи анодной сетки представляет сумму тока электронов катодной плазмы, перехватываемых прово-

лочками сетки, и части тока ионов из анодной плазмы. Для определения вклада электронной и ионной компонент в ток сетки были проведены эксперименты, в которых сеточный узел со стороны анодной плазмы экранировался диафрагмой с апертурой, равной катодной апертуре. Плотность ионного тока из анодной плазмы рассчитывалась по току в цепи диафрагмы, затем, исходя из площади и геометрической прозрачности сетки, рассчитывался ионный ток на сетку.

С ростом давления газа суммарный ток в цепи сетки менял знак и из преимущественно электронного становился ионным (рис. 3). Одновременные измерения тока в цепи коллектора ионов показали, что ионный ток нарастает с давлением, но при определенных условиях рост тока замедляется, ток достигает максимума и затем начинает быстро уменьшаться. Давление, соответствующее максимуму ионного тока, зависело от напряжения U_2 , размеров ячейки сетки и общей площади СПК и несколько превышало давление, при котором наблюдалась смена направления тока в цепи анодной сетки. Зависимости отношения тока эмиссии к току в цепи катода тлеющего разряда или

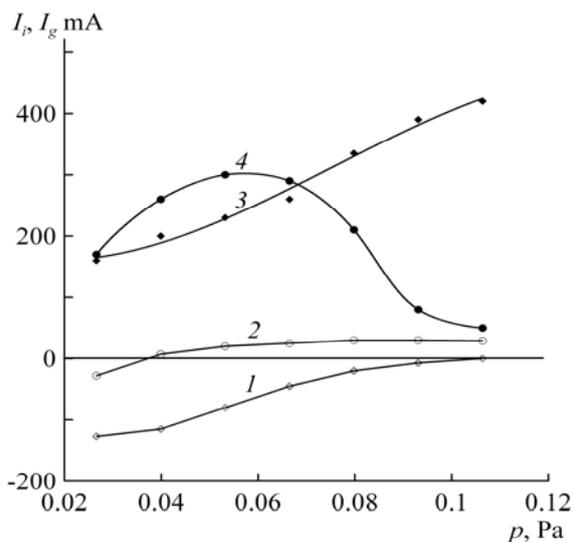


Рис. 3. Зависимости тока в цепи сетки I_g (1, 2), ионного тока I_i (3, 4) от давления газа. Размер ячейки сетки: 1, 3 – 0,6; 2, 4 – 1,2 mm.

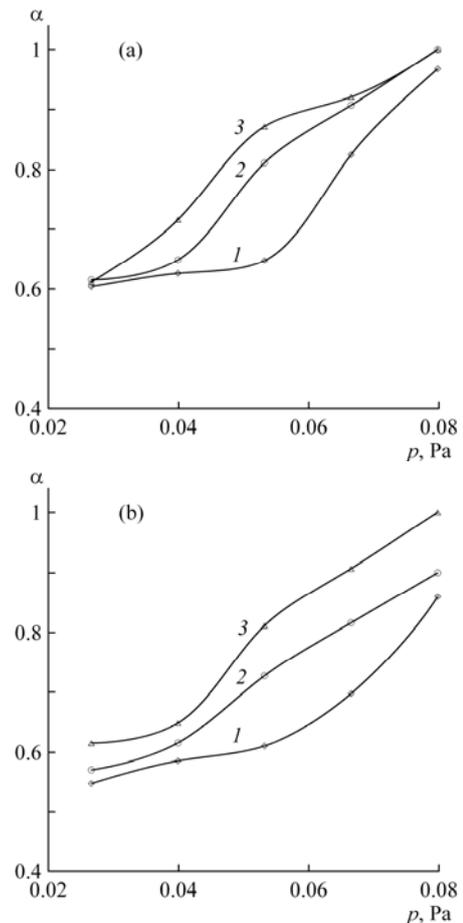


Рис. 4. Зависимости эффективности извлечения электронов от давления газа для различных значений тока разряда (а) и напряжения на второй ступени (б). Ток I_d : а: 1 – 0,2; 2 – 0,4; 3 – 0,6; б – 0,4 А. Напряжение U_2 : а – 150; б 1 – 50; 2 – 100; 3 – 150 В.

эффективности извлечения электронов $\alpha_e = I_e/I_d$ из катодной плазмы от давления газа показаны на рис. 4. Рост тока и напряжения U_2 ускоряет переход СПК в режим эмиссии с эффективностью $\alpha_e \sim 1$.

Измерения потенциала катодной плазмы в системе с площадью поверхности катода 10^3 cm^2 и размером катодной апертуры 2 см показали, что потенциал плазмы отрицателен и слабо повышается с ростом давления. Включение второй ступени приводит к повышению потенциала плазмы, причем оно тем выше, чем больше ток разряда и напряжение второй ступени U_2 (рис. 5).

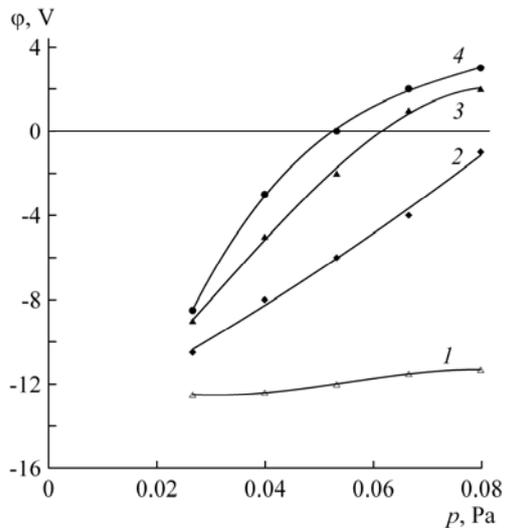


Рис. 5. Зависимости потенциала катодной плазмы от давления газа. Ток разряда: 1, 2, 3 – 0,4; 4 – 0,6 А. Напряжение на второй ступени: 1 – 0; 2 – 50; 3, 4 – 150 В.

Таким образом, из совокупности экспериментальных данных следует, что существенный вклад в рост тока ионов при увеличении давления газа обусловлен изменением эффективности извлечения электронов под действием обратного потока ионов из плазмы анодной ступени, который приводит к смене знака потенциала плазмы и переходу СПК в режим эмиссии с открытой плазменной поверхности [11]. Увеличение размера ячейки сетки и повышение площади СПК ускоряют рост потенциала плазмы и обеспечивают переход СПК в режим эффективной электронной эмиссии при более низких давлениях газа.

Причины снижения тока извлекаемых из плазмы ионов после достижения эффективности извлечения электронов $\alpha = 1$ изучались методом двойного зонда, один из электродов которого размещался в катодной, а другой в анодной плазме. В случае, когда ток извлекаемых ионов резко снижался, разность потенциалов между зондами, при которой ток в их цепи равен нулю, также снижалась до 30-40 В, тогда как при эффективной ионной эмиссии эта разность примерно соответствовала напряжению между электродами второй

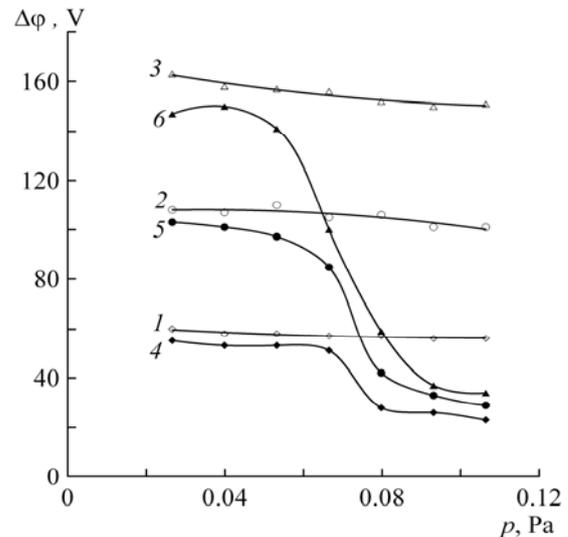


Рис. 6. Зависимости разности потенциалов между зондами в катодной и анодной плазме от давления газа. Ток разряда 0,4 А. U_2 : 1, 4 – 50; 2, 5 – 100; 3, 6 – 150 В.

ступени (рис. 6). Таким образом, одной из причин снижения ионного тока при повышенных давлениях газа является нарушение устойчивости биполярного диода между катодной и анодной плазмами и переход разряда в контрагированный режим горения.

Влияние размера СПК и ячейки сетки обусловлена их влиянием на величину и знак прианодного падения потенциала в тлеющем разряде с полым катодом. Согласно [12], при соотношении между площадью катода и анода $S_k/S_a > (2M_i/m_e)^{1/2}$ в катодной апертуре образуется двойной слой пространственного заряда. Часть ускоренных в этом слое электронов оседает на анодной сетке и только часть электронов проходит сетку и ускоряется в биполярном диоде между плазмами. Рост обратного ионного потока повышает потенциал катодной плазмы и способствует увеличению пропускной способности биполярного диода. При смене знака потенциала плазмы у ячеек сетки возникает потенциальный барьер, эмиссия происходит с открытой плазменной границы и электронный ток полностью переключается на анод второй ступени. Таким образом,

общая площадь поверхности СПК определяет начальный потенциал катодной плазмы в отсутствие ионного потока из анодной ступени, а размер ячейки сетки, напряжение и ток второй ступени – скорость роста потенциала катодной плазмы при увеличении давления газа.

5. Влияние условий ввода быстрых электронов на ток извлекаемых ионов

При использовании СПК, площадь поверхности и размер ячейки сетки которого исключают нарушение устойчивости биполярного диода, в анодной области газоразрядной системы могут наблюдаться эффекты, обусловленные захватом быстрых электронов магнитным полем при повышенных давлениях газа. Так, при использовании магнитного мультиполя кольцевой структуры с малым диаметром магнитного полюса на входе в анодную область ($d = 90$ мм) наблюдалось резкое уменьшение тока на коллектор ионов с давлением газа (рис. 7), при этом ток на анод сохранялся примерно постоянным. Скорость уменьшения ионного тока была максимальной при наибольшем диаметре СПК. Увеличение диаметра магнитного полюса до $d = 110$ мм привело к значительному увеличению ионного тока на

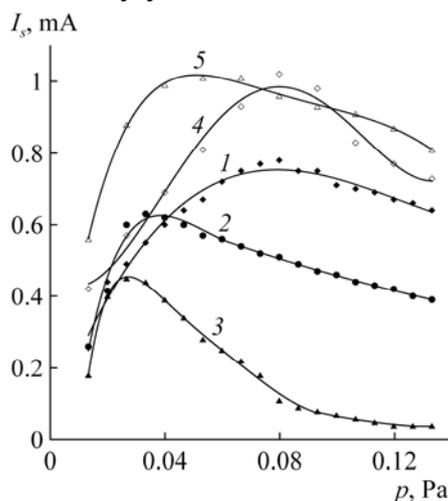


Рис. 7. Зависимости тока на коллектор ионов от давления газа. Ток разряда 0,6 А. Диаметр выходной апертуры полого катода: 1, 4 – 10; 2 – 20; 3, 5 – 30 мм. Диаметр d : 1, 2, 3 – 90; 4, 5 – 110 мм.

коллектор в широком диапазоне давлений (рис. 7). Следует отметить, что в системе с линейным мультиполем минимальный диаметр анода, на котором устанавливались магниты, составлял 80 мм. Измерения распределения магнитного поля показали, что максимум продольной составляющей магнитного поля вблизи СПК при малом размере полюса достигает 16 мТл, что примерно вдвое больше, чем при $d = 110$ мм.

В отличие от газоразрядных систем с термоэмиссионным катодом, который располагается вне магнитного поля, использование СПК предполагает ввод быстрых электронов в эту область извне. Основное отличие условий ввода электронов в магнитные системы с кольцевыми и линейными полюсами заключается в различном направлении начальных скоростей быстрых электронов и линий магнитного поля. При инъекции поперек магнитного поля электроны периферийной области пучка попадают в более сильное поле и отражаются последним, двигаясь по трохоидальным траекториям в направлении экранного электрода. В системе с кольцевым мультиполем характер движения электронов периферийной части пучка, которые вводятся вдоль линий неоднородного магнитного поля представляет сочетание ларморовского вращения и азимутального дрейфа в магнитном поле [13]. Если ларморовский радиус много меньше расстояния от СПК до магнитного полюса, что имеет место в испытываемых системах, то по мере движения в направлении магнитного полюса продольная составляющая энергии электрона преобразуется в поперечную энергию вращательного движения. В результате, периферийные электроны замедляют свое движение в направлении экранной сетки большую часть времени проводят в области вблизи анодной сетки. С ростом давления вероятность их захвата магнитным полем и диффузионного ухода поперек магнитного поля на анод возрастает. Поскольку генерируемые вблизи СПК ионы уходят на сетку, доля тока ионов на коллектор при этом снижается.

6. Особенности извлечения ионів и формирования ионного пучка

На рис. 8 показана зависимость эффективности извлечения ионов из плазмы от плотности тока эмиссии при различных значениях напряжения на биполярном диоде. Эффективность извлечения определялась как доля тока ионов, извлекаемых через отверстия экранной сетки, от полного тока ионов из плазмы на перфорированную область электрода. Геометрическая прозрачность экранной сетки с диаметром отверстий 4 мм составляла ~67%. Наибольшая эффективность (0,82) достигается при минимальных значениях плотности тока и напряжения. При максимальной плотности тока 7 mA/cm^2 и напряжении на диоде 150 В через отверстия экранной сетки извлекается всего 0,46 от полного тока поступающих из плазмы ионов. Столь значительное различие в токе извлекаемых ионов обусловлено существенным влиянием ионного слоя между плазмой и экранным электродом на размер и форму плазменного мениска [6] в условиях, когда толщина слоя и размер отверстий в экранном электроде сопоставимы по величине.

Если параметры ионного слоя определяют положение границы плазмы на

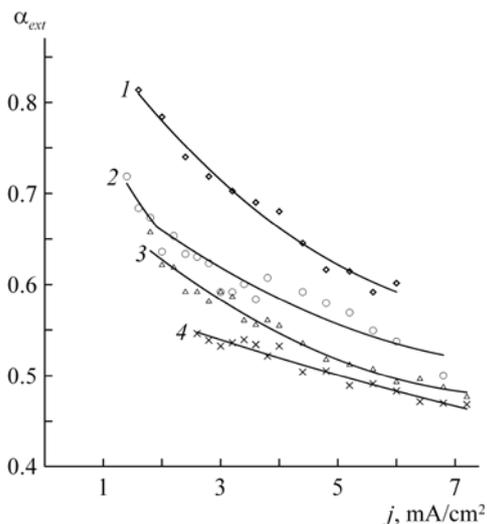


Рис. 8. Зависимость эффективности извлечения ионов из плазмы от плотности тока эмиссии. Напряжение на второй ступени: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200 В.

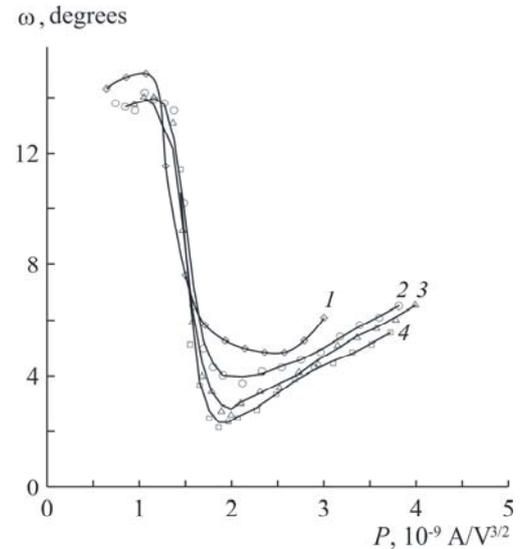


Рис. 8. Зависимости половинного угла расходимости ионного пучка от его первеанса. Напряжение на второй ступени: 1 – 50, 2 – 100, 3 – 150, 4 – 200 В.

периферии плазменного мениска, то поле ускоряющего промежутка влияет на положение его центральной части. Увеличение напряжения на ионном слое и рост толщины слоя в отверстиях сокращает площадь поверхности плазмы, с которой ионы могут быть извлечены ускоряющим полем. Рост плотности тока, приводящий к перемещению центрального участка плазменной границы в направлении ускоряющего промежутка, уменьшает кривизну плазменной границы, что приводит к росту потерь ионов на экранной сетке.

Следует отметить, что в этих экспериментах минимальная угловая расходимость пучка соответствовала минимальной плотности тока эмиссии. На рис. 8 представлены зависимости расходимости ионного пучка от его первеанса, полученные изменением плотности тока пучка при постоянном ускоряющем напряжении. Увеличение напряжения на ионном слое приводит к уменьшению угловой расходимости пучка, сужению области оптимальных значений первеанса и уменьшению его величины. Ток пучка при этом снижается (см. рис. 8).

7. Эффективность ионного источника с сетчатым плазменным катодом

Согласно [14] при отборе ионов из плазмы одноступенчатого тлеющего разряда напряжение его горения повышается в функции эффективности извлечения ионов α_i как $U = U_o/(1 - \alpha_i)$. Соответственно, в оптимальном режиме отбора ионов при $\alpha_i = 20\%$ энергетическая эффективность одноступенчатой системы составит $\eta = \alpha_i/U = (U - U_o)/U^2$. Здесь α_i – отношение ионного тока к току разряда, U_o – напряжение горения разряда в отсутствие отбора ионов. При характерных значениях $U = 600$ V, $U_o = 500$ V максимальная величина η для одно-ступенчатого источника составит примерно 0,3 A/kW.

Формирование биполярного диода с регулируемым падением напряжения на входе второй ступени позволяет при неизменных затратах энергии на эмиссию холодного катода повышать долю энергии, расходуемую электронами на ионизацию газа. Энергетическая эффективность генерации ионов определяется отношением полного ионного тока к суммарной мощности, потребляемой в обеих ступенях газоразрядной системы $\eta = I_i/(I_1 U_1 + I_2 U_2)$: Наибольший ток ионов при максимальной величине α_e , то есть, при $I_1 = I_e$ составит $I_i = I_1/W$. Ток второй ступени равен сумме тока быстрых электронов и тока вторичных электронов, равного току генерируемых ионов, $I_2 = I_1 + I_1/W = I_1(1 + 1/W)$. Соответственно, соотношение для максимальной эффективности будет иметь вид: $\eta = (I_i/I_1)/[U_1 + U_2(1 + 1/W)] = N_i/[U_1 + U_2(1 + N_i)]$, где $I_i/I_1 = 1/W = N_i$ – максимально возможное число ионизаций для быстрого электрона.

При характерных значениях $U_1 = 400$ V, $U_2 = 150$ V и $w = 50$ eV величина η составит около 3 A/kW. Вследствие потерь ионов на анодной сетке и аноде второй ступени (~0,5), с учетом доли ионов, извлекаемых через экранную сетку (0,8-0,4), а также потерь ионов на экранную сетку за пределами области однородной плазмы величина η для двухступенчатого источника

в настоящее время составляет ~0,5 A/kW и может быть существенно повышена принятием мер для сокращения ионных потерь.

Разработанный источник ионов с СПК генерирует пучок ионов аргона с площадью поперечного сечения 50 cm² с током свыше 400 mA при напряжении 5 kV. Энергетическая эффективность источника при высокой эмиссионной плотности тока (16 mA/cm²) составила 0,4 A/kW.

Литература

- [1] Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ. Изд-во БНЦ СО РАН, 1999. 207 с.
- [2] Falkenstein Z., Gavrilov N.V., Walter K.C., Nastasi M.A., Rej D.J. Journal of Materials Research. 1999. Vol. 14 (11). P. 4351-4357.
- [3] Gavrilov N.V., Mesyats G.A., Radkovskii G.V., Bersenev V.V. Surface and Coating Technology. 1997. Vol. 96. N 1. P. 81-88.
- [4] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. ДАН. Сер. физ. 2004. Т. 394. № 2. С. 1-4.
- [5] Holmes A. J. T. Rev. Sci. Instrum. 1981. Vol. 52 (12). P. 1814-1823.
- [6] Гаврилов Н.В., Емлин Д.Р. ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 5. С. 74-81.
- [7] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 9. С. 97-102.
- [8] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. ПТЭ. 2005. №1. С. 107-111.
- [9] Leung K.N., Kribel R.E., Goede A.P.H., Green T.S. Phys. Lett. 1978. Vol. 66A. N 2. P. 112-114.
- [10] Габович М.Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М.: Атомиздат, 1972, 304 с.
- [11] Е.М. Окс. Электронные источники с плазменным катодом, Томск, НТЛ, 2005. 216 с.
- [12] А.С. Метель, С.Н. Григорьев. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов, Москва, Янус-К, 2005. 296 с.
- [13] Голант В.Е., Жилинский А.П., Сахаров И.Е. Основы физики плазмы. М.: Атомиздат, 1977, 384 с.
- [14] С.П. Никулин. Известия ВУЗов. Физика. 2001. Т. 44. № 9. С. 63-68.