

03;04;10;12

Расширение рабочего диапазона давлений газа и увеличение ресурса сетки плазменного катода в ионном источнике

© Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких

Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: gavrilov@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 14 июня 2006 г.)

Предложена газоразрядная система источника газовых ионов корзиночного типа с плазменным катодом, в котором используется эмиссия электронов из ограниченной сетчатый электродом расширенной анодной части контрагированного тлеющего разряда с полым катодом. Изменение электродной схемы источника ионов позволило увеличить площадь поверхности и размер апертур сетки плазменного катода, что обеспечило стабильную и постоянную ионную эмиссию плазмы в широком диапазоне давлений газа и повышение на порядок ресурса сетки. Рассмотрены особенности работы плазменного катода в режимах свободной и вынужденной эмиссии, оценена энергетическая эффективность генерации ионов в исследуемой газоразрядной системе.

PACS: 52.80.-s, 41.75.-i

Введение

В работе [1] были рассмотрены особенности функционирования сетчатого плазменного катода на основе тлеющего разряда в двухступенчатом ионном источнике, сетка плазменного катода которого, являющаяся анодом тлеющего разряда, размещается вблизи выходной апертуры полого катода тлеющего разряда и имеет площадь, определяемую сечением катодной апертуры. С анодной стороны сетки формируется биполярный диод с регулируемым падением напряжения, в котором существуют встречные потоки извлеченных электронов из катодной плазмы и ионов — из анодной. Анодная плазма генерируется ускоренными в биполярном диоде электронами в объеме, ограниченном периферийным магнитным полем и экраным электродом ионно-оптической системы формирования пучка.

Оптимальная величина площади сетки S_g в такой газоразрядной системе определяется соотношением $S_g \sim S_c(m_e/M_i)^{1/2}$ [2], где S_c — площадь полого катода; m_e, M_i — масса электрона и иона соответственно. Малый размер сетки обуславливает повышенную плотность тока в биполярном диоде, а повышенное давление газа, напускаемого в катодную полость, обеспечивает эффективную резонансную перезарядку ионов, поступающих из анодной плазмы. В результате рабочий диапазон давлений, в котором плазменный катод работает с максимальной эффективностью извлечения электронов при незначительном росте потенциала катодной плазмы, оказывается довольно узким. Для работы ионного источника в более широком диапазоне изменения значений давления газа и тока разряда необходимо использовать мелкоструктурные сетки с высокой геометрической прозрачностью, ресурс которых в условиях интенсивного ионного распыления оказывается недостаточным.

Значительного увеличения площади плазменного катода при относительно небольших размерах электрод-

ной системы можно достичь, отбирая электроны из расширенной анодной части контрагированного тлеющего разряда. Такой подход используется в дуговых источниках электронов с плазменным катодом [3]. Соотношение между площадью анода и площадью плазменного эмиттера электронов в таких системах определяется параметром G , который примерно равен отношению плотности хаотического электронного тока в плазме к току электронов на анод при отсутствии извлечения электронов [4]. Величина G составляет 2–20, что позволяет на порядок увеличить площадь сетки плазменного катода и соответственно снизить плотность электронного и ионного токов в биполярном диоде, что позволит увеличить размер апертур сетки. Размеры сетки плазменного катода могут быть увеличены до размеров экранной сетки ионно-оптической системы формирования пучка. Большая площадь сетки плазменного катода с высокой геометрической прозрачностью обеспечит снижение давления в анодной полости тлеющего разряда на 1–2 порядка по сравнению с катодной полостью, что должно способствовать повышению устойчивости плазменного катода [5].

В работе исследовано влияние размера апертур сетки плазменного катода на распределение потенциала плазмы и токов по электродам газоразрядной системы, включающей полый катод и полый анод контрагированного тлеющего разряда и выходную ступень, находящуюся в периферийном магнитном поле. Даны оценки ресурса сетки плазменного катода и энергетической эффективности генерации ионов в исследуемой газоразрядной системе.

Методика эксперимента

Электродные схемы источника ионов приведены на рис. 1. В первоначальном варианте ионного источника [6] (рис. 1, *a*) сетка плазменного катода I с

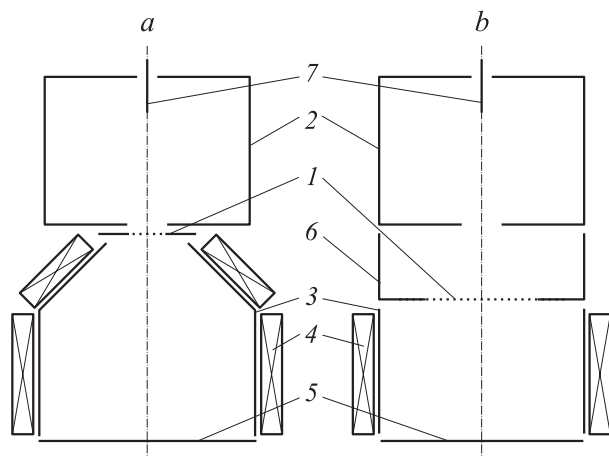


Рис. 1. Электродные схемы источников ионов. 1 — сетка, 2 — полый катод, 3 — полый основной анод, 4 — магниты, 5 — коллектор, 6 — полый анод тлеющего разряда, 7 — поджигающий электрод.

диаметром 20 мм располагалась напротив выходной апертуры полого катода 2. На внешней поверхности полого основного анода 3 установлены линейные ряды постоянных магнитов 4, формирующих периферийное магнитное поле. Вместо экранного электрода ионно-оптической системы в экспериментах использовался коллектор ионов 5. В модернизированной конструкции источника ионов (рис. 1, *b*) дополнительно установлен полый анод тлеющего разряда 6, перекрытый перфорированным электродом 1, в плоскости которого формируется плазменный эмиттер электронов. Диаметр и длина 2, 6 — 130×100, цилиндрической части 3 — 130×100 мм. Диаметр выходной апертуры полого катода (рис. 1, *b*) составлял 10 мм, а размер перфорированной области электрода 1 — 80 мм. Размер отверстий менялся в пределах 0.6–4 мм. Геометрическая прозрачность перфорированной части электрода составляла 2/3.

Ток тлеющего разряда регулировался в пределах 0.2–0.6 А. Напряжение на второй ступени U_2 устанавливалось равным 50, 100 и 150 В. Давление аргона измерялось в вакуумной камере и изменялось в пределах $1.3 \cdot 10^{-2}$ –0.13 Па. Измерялись токи в цепях полого катода, анода тлеющего разряда, основного анода, сетки и коллектора ионов. Разность потенциалов плазм по обе стороны сетки плазменного катода измерялась с использованием двойного зонда, экранированного от потоков быстрых заряженных частиц. Измерялось также напряжение U_1 между электродами первой ступени.

Результаты измерения тока ионов в цепи коллектора в системе „а“ с сеткой 20 мм с размером ячейки 1.2 мм показаны на рис. 2. Зависимости тока от давления имеют немонотонный характер, максимум тока достигается при $\sim 2.7 \cdot 10^{-2}$ Па. Согласно [1], такое поведение зависимостей обусловлено ростом эффективности извлечения электронов в области низких давлений и уменьшением напряжения на биполярном диоде в области высоких давлений.

Зависимости ионного тока от давления в системе „b“ с отбором электронов из плазмы расширенной анодной части разряда через электрод диаметром 80 мм с различным шагом сетки показаны на рис. 3. При малых размерах ячейки ионный ток монотонно нарастает во всем диапазоне давлений, с увеличением ячейки скорость роста тока с давлением возрастает и достигается максимум тока; для крупных сеток зависимости насыщаются, причем чем крупнее сетка, тем меньше ток насыщения.

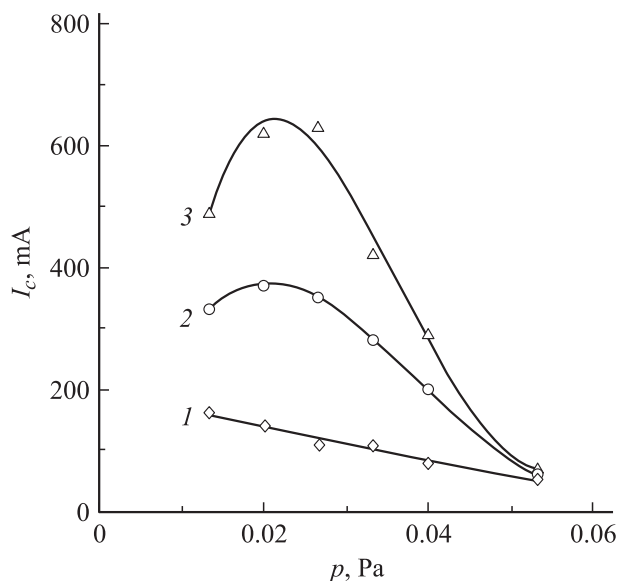


Рис. 2. Зависимости тока в цепи коллектора от давления газа. Напряжение на второй ступени U_2 : 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150 В. Ток разряда 0.6 А.

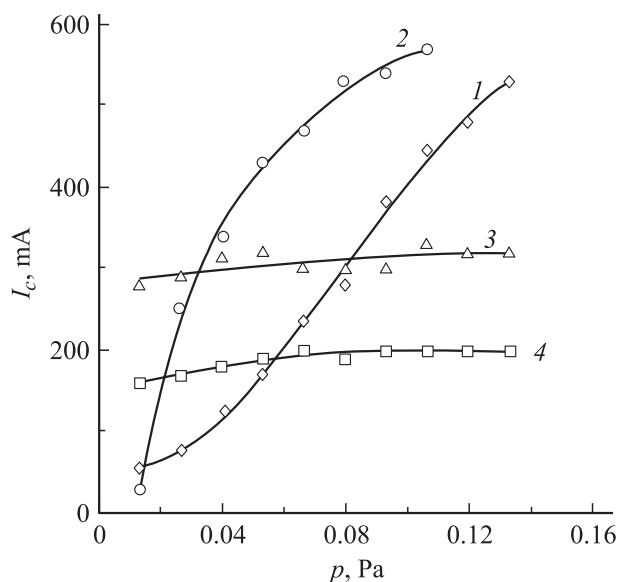


Рис. 3. То же, что на рис. 2. Размер ячейки: 1 — 0.6; 2 — 1.2; 3 — 2; 4 — 4 мм. Напряжение на второй ступени 150 В. Ток разряда 0.4 А.

Изменение напряжения между электродами первой ступени, необходимое для поддержания постоянного тока разряда при изменении давления в условиях работающей второй ступени, показано на рис. 4. Увеличение разности потенциалов между электродами второй ступени на 50 В при максимальном давлении газа приводит к необходимости снижения напряжения на первой ступени примерно на 40 В. Результаты измерения разности потенциалов плазмы по обе стороны сетки плазменного

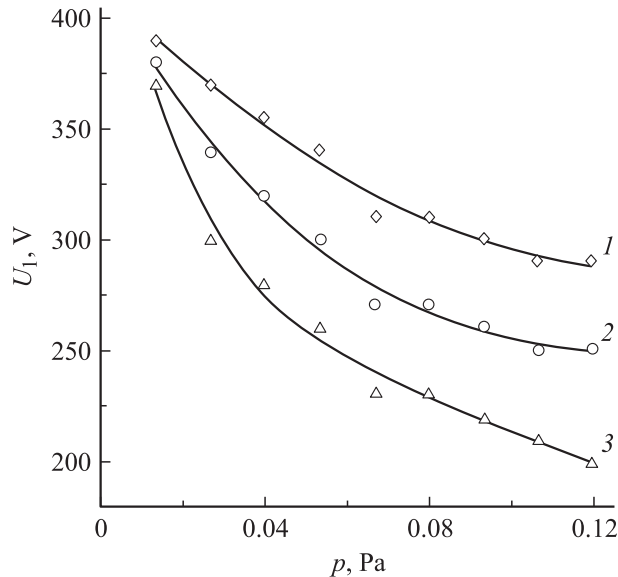


Рис. 4. Зависимости напряжения между электродами первой ступени от давления газа. Размер ячейки сетки 4 мм. Напряжение на второй ступени U_2 : 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150 В. Ток разряда 0.6 А.

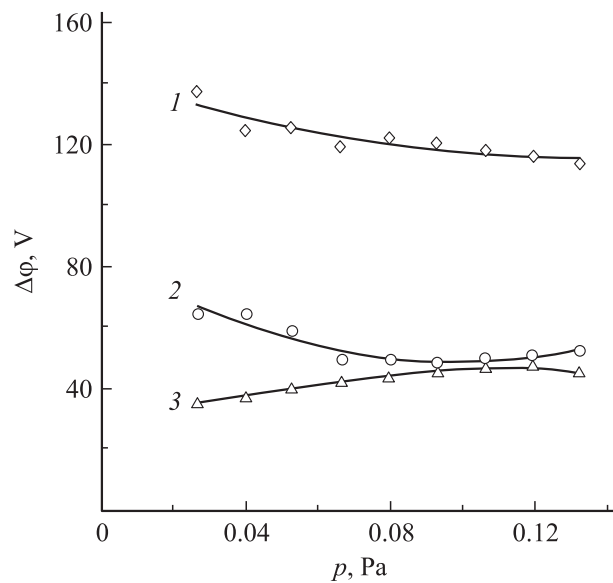


Рис. 5. Зависимости разности потенциалов между плазмами первой и второй ступени от давления газа. Размер ячейки сетки: 1 — 1.2; 2 — 2; 3 — 4 мм. Напряжение на второй ступени 150 В. Ток разряда 0.6 А.

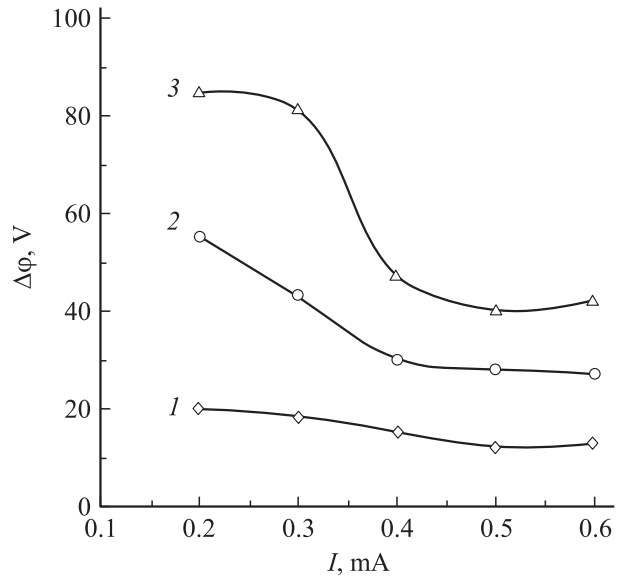


Рис. 6. Зависимости разности потенциалов между плазмами первой и второй ступени от тока разряда. Размер ячейки сетки 4 мм. Напряжение на второй ступени U_2 : 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150 В. Давление газа $6.7 \cdot 10^{-2}$ Па.

катода при различном размере апертур представлены на рис. 5. Увеличение размера апертур приводит к резкому снижению падения потенциала на биполярном диоде. Поскольку потенциал плазмы в выходной ступени, измеренный зондовым методом, оставался близким к потенциалу основного анода, возрастая с +2 до +5 В при снижении давления, из полученных результатов следует, что потенциал эмитирующей электроны плазмы с увеличением размера апертур резко снижается. При заданном напряжении на второй ступени 150 В и размере апертур сетки 3 мм падение напряжения на биполярном диоде снижается на 100 В. Влияние тока разряда на величину падения напряжения на биполярном диоде показано на рис. 6.

Раздельные измерения тока в цепи полого анода тлеющего разряда и сетки плазменного катода показали, что ток в цепи анода с ростом давления меняет знак и становится ионным, при этом плотность ионного тока на анод на 1–2 порядка величины ниже, чем на сетку.

Обсуждение результатов

В проведенных экспериментах изменением размера апертур сетки и давления газа реализованы различные режимы эмиссии плазменного катода в ионном источнике. При малых размерах ячеек сетки и низких давлениях ток извлеченных электронов определяется пропускной способностью биполярного диода, т.е. согласно критерию Ленгмюра, плотность электронного тока изменяется пропорционально плотности обратного ионного потока $j_e \sim j_i(M_i/m_e)^{1/2}$ [7]. Разность потенциалов на биполярном диоде при этом примерно соответствует

напряжению между электродами второй ступени. Такой режим эмиссии, ограниченный пространственным зарядом, соответствует режиму свободной эмиссии термоэлектронного эмиттера для разряда в газонаполненном диоде.

По мере увеличения давления или напряжения на второй ступени растут ток насыщения ионов анодной плазмы и проводимость биполярного диода, в результате достигается режим, при котором ток эмиссии электронов равен току тлеющего разряда, или режим с максимальной эффективностью извлечения электронов из плазмы. Поскольку ток разряда поддерживается постоянным, ток эмиссии также стабилизируется, несмотря на увеличение плотности обратного ионного тока из анодной плазмы, или, если использовать аналогию с термоэмиссионным катодом, плазменный катод переходит в режим вынужденной эмиссии. Стабилизация тока эмиссии плазменного катода, как и в источниках электронов [8], обеспечивается в результате повышения потенциала катодной плазмы, увеличения толщины ионного слоя, сокращения площади эмитирующей электроны поверхности плазмы и повышения плотности тока эмиссии в соответствии с изменением плотности ионного обратного тока. Поскольку, в отличие от термоэмиссионного катода, на поверхности плазменного катода в стационарном состоянии сохраняется нулевая напряженность электрического поля, следует предположить, что в катодную плазму поступает лишь малая доля тока ионов, обеспечивающая условие устойчивости двойного слоя в апертурах сетки. Остальной ток ионов, сопоставимый по величине с током эмиссии электронов, замыкается на сетку плазменного катода.

Изменение электродной схемы ионного источника и переход к отбору электронов из плазмы расширенной анодной части тлеющего разряда с полым катодом позволили увеличить диаметр сетки плазменного катода до 80 мм и перейти от плетеных сеток к использованию сплошного перфорированного электрода с увеличенным диаметром апертур. Наряду со снижением плотности тока в биполярном диоде это привело к повышению общего тока на сетку из-за увеличения общей площади ее поверхности. В экспериментах площадь сетки была увеличена в ~ 16 раз, общий ток на сетку при том же токе разряда возрос в ~ 4 раза, поэтому плотность ионного тока на сетку снизилась в ~ 4 раза. Толщина перфорированного электрода была увеличена до 0.5 мм по сравнению с толщиной проволоки сетки 0.3 мм. Таким образом, если исходить из условия, что минимальная толщина сетки не должна быть меньше 0.15 мм, ресурс сетки плазменного катода удалось увеличить почти на порядок величины. Однако следует отметить, что количество распыляемых с поверхности сетки большого размера частиц в этом случае должно возрастать пропорционально ионному току на сетку, т.е. в ~ 4 раза.

Энергетическая эффективность генерации ионов в анодной плазме ионного источника с отбором электро-

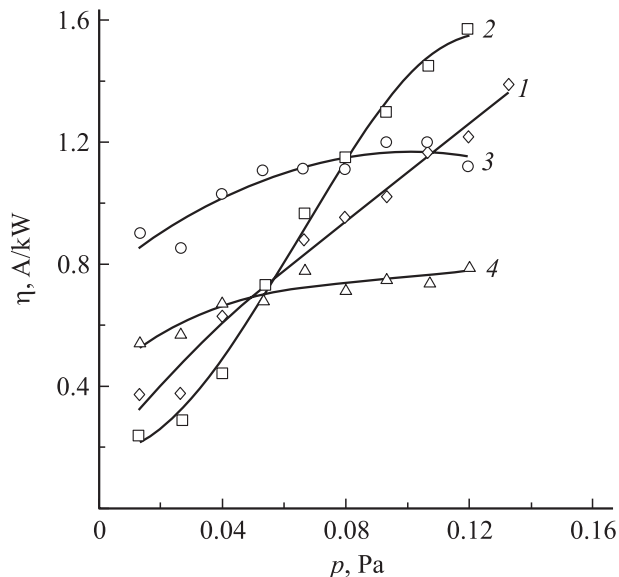


Рис. 7. Зависимости энергетической эффективности генерации ионов от давления газа. Размер ячейки сетки: 1, 2 — 0.6; 3, 4 — 4 мм. Ток разряда: 1, 3 — 0.2; 2, 4 — 0.6 А. Напряжение на второй ступени 150 В.

нов через электрод с перфорацией может быть представлена соотношением $\eta = I_{i1}/[I_1(U_1 + U_2) + I_{i12}U_2]$, где I_{i1} — ток ионов на коллектор, I_{i12} — сумма ионных токов на сетку и коллектор, I_1 — ток разряда в первой ступени. Увеличение ионных потерь на сетку плазменного катода, а также снижение энергии электронов и, следовательно, частоты ионизаций приводят к снижению эффективности, которая частично компенсируется уменьшением полного напряжения на газоразрядной системе ($U_1 + U_2$) с ростом давления. Расчетные значения эффективности для сетки с большой площадью поверхности (50 cm^2) при различных размерах апертур и тока разряда приведены на рис. 7. Быстрый рост эффективности с давлением газа при размере ячейки 0.6 мм обусловлен увеличением эффективности извлечения электронов при незначительном изменении потенциала плазмы электронного эмиттера. При использовании сетки с размером ячейки 4 мм плазменный катод работает в режиме вынужденной эмиссии с постоянным током. Незначительное повышение эффективности в таком режиме может быть обусловлено увеличением частоты ионизации газа во второй ступени с ростом давления. Максимальные значения энергетической эффективности составили: 1.6 А/кВт при использовании сетки с размерами ячейки 0.6 мм, 1.1 для сетки 4 мм. Для источника с сеткой малого размера (рис. 1, а) в точке, соответствующей максимуму зависимости тока ионов от давления (рис. 2), энергетическая эффективность составила 1.4; 2.2; 2.6 А/кВт при токах 0.2; 0.4; 0.6 А соответственно. Более высокая эффективность обусловлена небольшим током потерь ионов на сетке с малой площадью.

Заключение

1. Использование в источнике корзиночного типа сетчатого плазменного катода с отбором электронов из плазмы расширенной анодной части тлеющего разряда с полым катодом обеспечивает работу плазменного катода в режиме вынужденной эмиссии с максимальной эффективностью извлечения электронов и практически постоянным током эмиссии ионов в широком диапазоне изменения давления газа.

2. Режим вынужденной эмиссии сетчатого плазменного катода в ионном источнике обеспечивается механизмом сеточной стабилизации, при котором изменение потенциала эмитирующей электроны плазмы приводит к такому изменению размера прианодного ионного слоя, площади плазменного эмиттера электронов и плотности электронного тока, при котором выполняется условие устойчивости двойного слоя в апертурах сетки. Избыточный ионный ток из анодной плазмы замыкается на сетку плазменного катода.

3. Увеличение размера сетки плазменного катода приводит к росту тока потерь ионов на сетку, следствием чего является увеличение потока распыляемых с сетки частиц и снижение энергетической эффективности ионного источника, однако ресурс сетки, являющейся наиболее критичным узлом ионного источника данного типа, согласно оценкам, в результате может быть увеличен на порядок величины.

Список литературы

- [1] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 2. С. 57–61.
- [2] Метель А.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 241–247.
- [3] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [4] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 66–71.
- [5] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 4. С. 687–693.
- [6] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 9. С. 97–102.
- [7] Langmuir I. // Phys. Rev. Vol. 33. P. 954.
- [8] Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005. 216 с.