

04;12

Особенности функционирования плазменного катода с сеточной стабилизацией в двухступенчатом ионном источнике

© Н.В. Гаврилов, А.С. Каменецких

Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия

e-mail: gavrilov@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 29 апреля 2005 г.)

Исследованы характеристики разряда и параметры катодной плазмы в двухступенчатом ионном источнике с сетчатым плазменным катодом и магнитной ловушкой в анодной области системы. Показано, что повышение давления газа и обусловленное этим увеличение обратного ионного тока в биполярном диоде между катодной и анодной плазмами приводит к росту потенциала катодной плазмы и переходу катода в режим эмиссии электронов с открытой плазменной границы. Дано объяснение зависимости тока ионов, извлекаемых из анодной плазмы, от площади выходной апертуры полого катода и размера ячеек сетки плазменного катода; определены условия, обеспечивающие максимальный ток ионной эмиссии анодной плазмы. Зондовым методом измерена разность потенциалов на биполярном диоде, показано, что при достижении критических давлений газа, зависящих от размера ячейки сетки, разряд переходит в контрагированный режим горения, при котором ток ионов, извлекаемых из анодной плазмы, уменьшается в несколько раз.

PACS: 41.75.-i

Электродная система двухступенчатого ионного источника содержит катодную ступень, обеспечивающую формирование плазменного катода, и анодную ступень, в которой создается плазменный эмиттер ионов [1]. Если ступени разделить мелкоструктурной металлической сеткой, то с анодной стороны сетки формируется слой пространственного заряда, падение напряжения на котором можно регулировать в широких пределах [2]. Электрическое поле слоя обеспечивает извлечение и последующее ускорение электронов катодной плазмы. Для эффективной генерации ионов величина напряжения на слое обычно устанавливается близкой к максимуму сечения ионизации газа электронным ударом, а энергетическая релаксация быстрых электронов обеспечивается с помощью различных систем их удержания в анодной плазме, например, периферийного магнитного поля [3]. В таких условиях возникает значительный обратный ток ионов из анодной плазмы, влияющий на распределение потенциала, электрического поля и пространственного заряда в биполярном диоде между плазмами, а также изменяющий параметры катодной плазмы.

При анализе влияния ионизации газа электронным пучком и обратного ионного потока на эмиссию плазменного катода в электронных источниках по аналогии с электронной эмиссией твердых тел используется понятие ионно-электронной эмиссии плазмы [4]. Избыточный положительный заряд, создаваемый обратным ионным потоком, приводит к повышению потенциала и концентрации эмитирующей плазмы, причем наиболее значительное увеличение плотности плазмы и тока эмиссии электронов достигается в условиях эффективной резонансной перезарядки ионов на атомах газа. При эмиссии электронов через пристеночный слой пространственного заряда изменение потенциала плазмы

приводит к изменению высоты потенциального барьера слоя и, соответственно, величины тока электронной эмиссии. В работах [5,6], посвященных исследованию свойств плазменного катода с сеточной стабилизацией, проанализировано влияние на эмиссию катода параметров разряда и поля в ускоряющей промежулке и показано, что изменение соотношения между толщиной прианодного слоя пространственного заряда у сетки и размером ячейки сетки позволяет реализовать как эмиссию электронов через потенциальный барьер слоя, так и высокоэффективную эмиссию с открытой плазменной поверхности. Обратный ионный поток в этих работах не учитывался, однако, поскольку величина и знак анодного падения потенциала в разряде определяются условиями генерации и исчезновения положительных ионов в анодной области разряда [7], можно предположить, что в характерных для ионного источника условиях, обеспечивающих максимальную степень использования энергии быстрых электронов для ионизации газа, возникновение интенсивного обратного потока ионов способно оказывать существенное влияние на эмиссию плазменного катода.

В работе исследована взаимосвязь процессов в катодной и анодной плазмах двухступенчатого ионного источника, изучено влияние обратного ионного потока на эмиссию плазменного катода и определены условия устойчивой и эффективной работы ионного источника в широком диапазоне давлений газа.

Эксперимент

Схема ионного источника с двухступенчатой электродной системой, конструкция которого подробно описана в [8], представлена на рис. 1. С помощью тлеющего

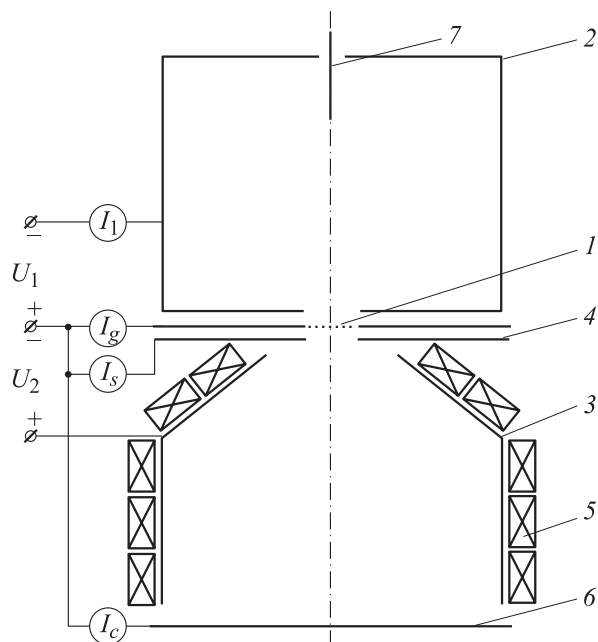


Рис. 1. Схема ионного источника. 1 — сетка, 2 — полный катод, 3 — анод, 4 — экран, 5 — магниты, 6 — коллекторная пластина, 7 — поджигающий электрод.

разряда с полым катодом в области сетки 1 формируется плазменный эмиттер электронов, а в свободной от магнитного поля области анодной ступени источника в результате ионизации газа ускоренными в биполярном диоде электронами создается однородная плазма. Плетеная сетка 1 из нержавеющей стали с размером ячеек 0.6×0.6 или 1.2×1.2 мм и геометрической прозрачностью около 65% устанавливалась между полым катодом 2 и полым анодом 3 второй ступени источника. Для измерения результирующего тока заряженных частиц I_g , поступающих на сетку из катодной и анодной плазм, держатель сетки со стороны анода был закрыт экраном 4 с отверстием диаметром 20 мм, равным диаметру выходной апертуры полого катода. Измерения тока I_s в цепи экрана, имеющего одинаковый с сеткой потенциал, использовались для оценки плотности ионного тока из анодной плазмы. Линейное многополюсное магнитное поле у поверхности анода 3 создавалось постоянными магнитами 5 из самарий-кобальтового сплава. Газ (аргон) подавался в катодную полость. Давление газа, измерявшееся в вакуумной камере, регулировалось в пределах 0.02–0.1 Па. Согласно расчетам, среднее давление в анодной ступени было примерно вдвое выше, а давление в катодной ступени в 25 раз превышало измеряемое давление, т.е. составляло 0.5–2.5 Па. Ток I_c ионов, извлекаемых из анодной плазмы, измерялся в цепи коллекторной пластины 6, установленной взамен экранного электрода ионной оптики и имеющей одинаковый потенциал с сеткой 1.

Для поддержания газового разряда использовались два источника электрического питания: источник тока, подключенный между полым катодом 2 и сеткой 1

и обеспечивающий стабилизацию тока I_1 в цепи катода первой ступени, и источник стабилизированного напряжения питания второй ступени U_2 , подключенный между сеткой 1 и анодом 3. Величина тока I_1 изменялась в пределах 0.2–0.6 А, напряжение второй ступени U_2 варьировалось в пределах 50–150 В. Для измерения параметров плазмы использовались собирающие ленгмюровские одиночные и двойные зонды и многосеточный электростатический энергоанализатор с тормозящим полем.

Характер зависимостей ионного тока на коллектор I_c от давления (рис. 2) определяется, главным образом, размером ячейки сетки. При использовании крупной сетки с шагом ячейки 1.2 мм ионный ток быстро нарастает с давлением, достигает максимальных значений при ~ 0.05 Па, а затем резко уменьшается. При использовании мелкоструктурной сетки (0.6 мм) ионный ток растет во всем диапазоне давлений, причем при больших значениях U_2 (150 В) ионный ток превышает значения тока в максимуме зависимостей для крупной сетки. Скорость роста тока I_c увеличивается при повышении напряжения на второй ступени и величины тока разряда.

Суммарный ток на сетку I_g (рис. 3) с ростом давления снижается со скоростью, которая значительно превышает скорость увеличения ионного тока I_s на экран 4. На рис. 4 приведены зависимости отношения тока электронов, извлекаемых из катодной плазмы I_e , к электронной составляющей тока полого катода $\alpha = I_e/I_1(1 - \gamma)$ от давления газа, где γ — коэффициент ионно-электронной эмиссии материала катода, который при расчетах был принят равным 0.1. Ток электронной эмиссии определялся как разность между величиной $I_1(1 - \gamma)$ и током в цепи сетки за вычетом ионной составляющей, которая

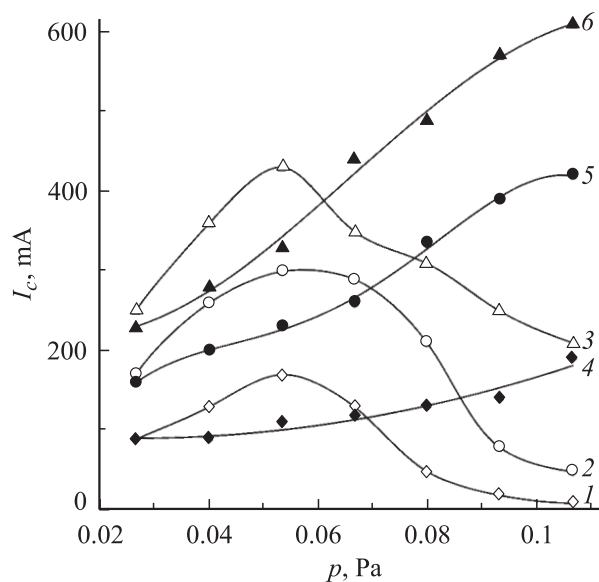


Рис. 2. Зависимости ионного тока на коллектор от давления газа. Шаг ячейки сетки: 1–3 — 1.2; 4–6 — 0.6 мм. Ток разряда I_1 : 1, 4 — 0.2; 2, 5 — 0.4; 3, 6 — 0.6 А. Напряжение второй ступени $U_2 = 150$ В.

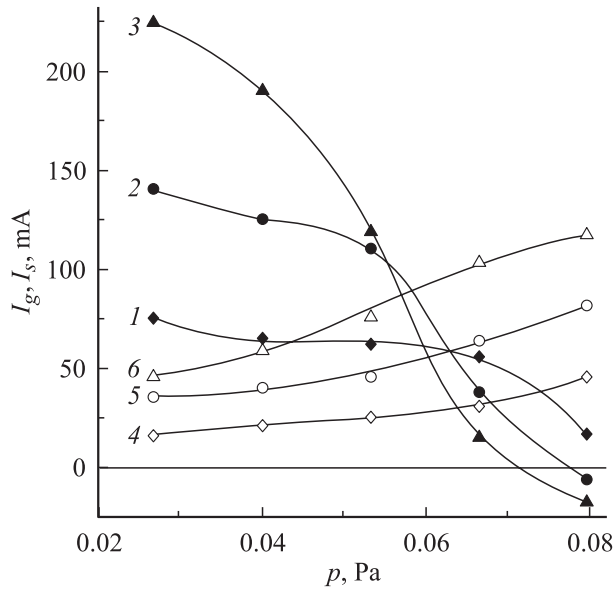


Рис. 3. Зависимость тока в цепи сетки I_g (1–3) и тока на экран I_s (4–6) от давления газа. Ток разряда I_1 : 1, 4 — 0.2; 2, 5 — 0.4; 3, 6 — 0.6 А. Напряжение второй ступени $U_2 = 150$ В. Шаг ячейки сетки 0.6 мм.

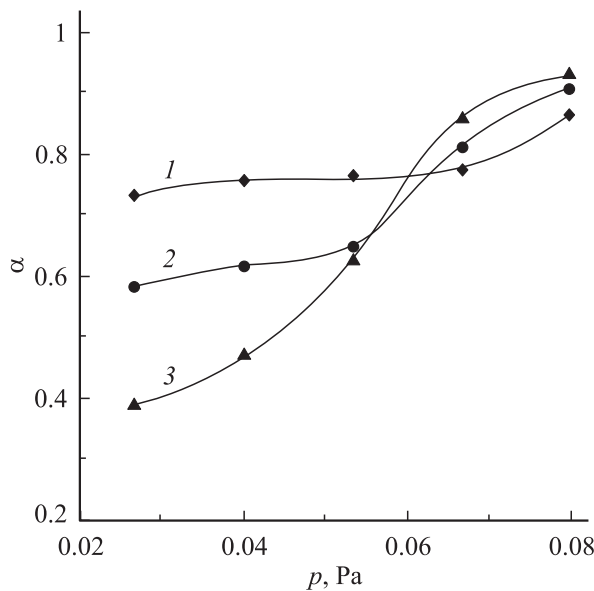


Рис. 4. Зависимость отношения тока электронов, извлекаемых из плазмы к электронной составляющей тока полого катода от давления газа. Ток разряда I_1 : 1 — 0.2; 2 — 0.4; 3 — 0.6 А. Напряжение второй ступени $U_2 = 150$ В. Шаг ячейки сетки 0.6 мм.

рассчитывалась из плотности ионного тока на экран 4. Как следует из рис. 4, величина α , которая определяет эффективность извлечения электронов из катодной плазмы, с ростом давления газа существенно возрастает и приближается к 1, причем приращение величины α тем больше, чем выше ток разряда и напряжение второй ступени U_2 . В системе с крупной сеткой максимальная

величина $\alpha \sim 1$ достигается при более низких давлениях ~ 0.05 Па, при этом ток в цепи сетки также меняет знак.

На рис. 5 приведены результаты измерений разности потенциалов, при которой обращается в нуль ток в цепи зондов, один из которых располагается в катодной, а другой — в анодной плазме. Как известно [9], при использовании двойного зонда разность потенциалов между его электродами равна разности потенциалов в плазме только при условии полной идентичности элек-

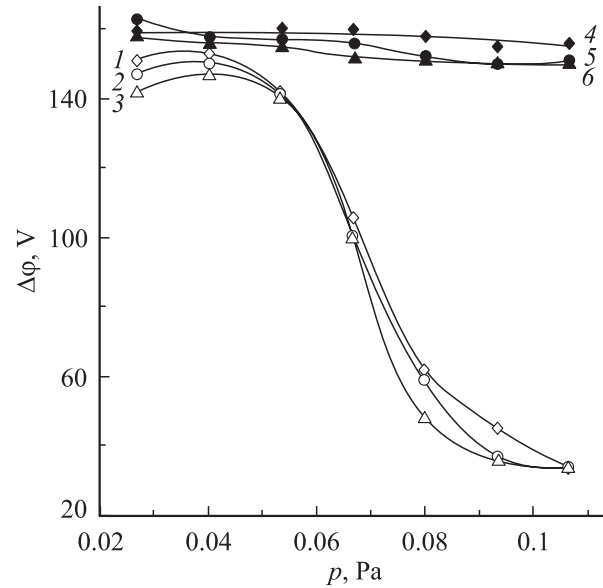


Рис. 5. Зависимость разности потенциалов между электродами двойного зонда от давления газа. Шаг ячейки сетки: 1–3 — 1.2; 4–6 — 0.6 мм. Ток разряда I_1 : 1, 4 — 0.2; 2, 5 — 0.4; 3, 6 — 0.6 А. Напряжение второй ступени $U_2 = 150$ В.

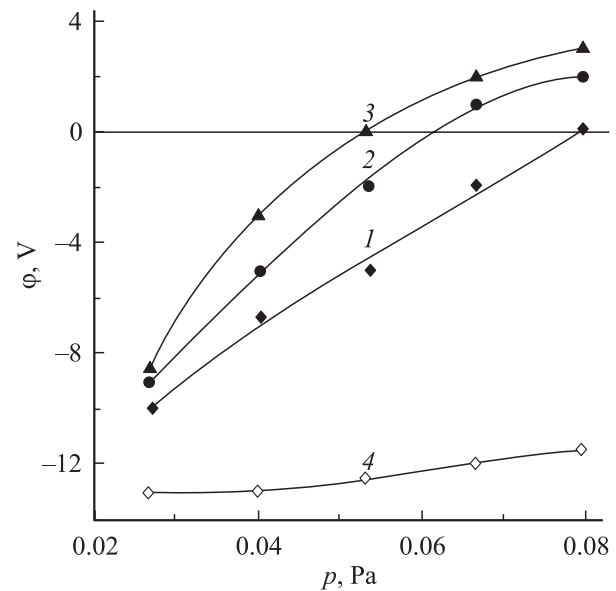


Рис. 6. Зависимость потенциала катодной плазмы от давления газа. Ток разряда I_1 : 1, 4 — 0.2; 2 — 0.4; 3 — 0.6 А. Напряжение второй ступени U_2 : 1–3 — 150; 4 — 0 В. Шаг ячейки сетки 0.6 мм.

тродов и однородности плазмы. Для экранировки электродов зонда, изготовленных из вольфрамовой проволоки диаметром 0.3 и длиной 5 mm, от потоков быстрых заряженных частиц эти электроды помещались внутри цилиндрических экранов диаметром 10 mm. При использовании мелкоструктурной сетки измеряемая разность потенциалов между зондами примерно соответствует напряжению второй ступени, для крупной сетки при давлении, соответствующем максимуму ионного тока на рис. 2, разность потенциалов между зонами резко уменьшается до 25–30 V.

Результаты измерения потенциала катодной плазмы в системе с мелкой сеткой приведены на рис. 6. С увеличением тока разряда I_1 , напряжения U_2 и давления газа отрицательный потенциал катодной плазмы уменьшается и меняет свой знак на положительный. При отсутствии разряда во второй ступени ($U_2 = 0$) отрицательный потенциал катодной плазмы с ростом давления уменьшается всего на несколько вольт (см. рис. 6, кривая 4).

Обсуждение результатов

В области низких давлений ионизация газа быстрыми электронами, удерживаемыми периферийным магнитным полем, описывается рассмотренной в [10–12] моделью, из которой следует, что отношение тока быстрых электронов к току ионов меняется обратно пропорционально давлению газа, времени удержания электронов и усредненной величине произведения сечения ионизации на скорость электронов. Наблюдаемый в экспериментах нелинейный характер зависимостей ионного тока от давления и определяющее влияние размера ячейки сетки на ход этих зависимостей могут быть обусловлены особенностями эмиссии плазменного катода.

Ранее в экспериментах [13] наблюдалось повышение эффективности извлечения ионов из анодной плазмы при увеличении диаметра сетчатого плазменного катода с 5 до 20 mm. Зондовые измерения показали, что такое увеличение размера сетки сопровождается снижением положительного анодного падения потенциала у сетки, являющейся анодом тлеющего разряда с полым катодом. Согласно [14], для такого типа разряда с электростатическим удержанием быстрых электронов существует оптимальная величина отношения площадей анода и катода $S_a/S_c \sim (M_r/m_e)^{1/2}$, при которой обеспечивается как невысокая скорость потерь быстрых электронов на аноде, так и замыкание тока плазменных электронов на анод без формирования области положительного анодного падения потенциала. Здесь M_i , m_e — масса иона и электрона соответственно. В условиях эксперимента ($S_a = 3.2 \text{ cm}^2$) потенциал катодной плазмы ϕ отрицателен (см. рис. 6, кривая 4) во всем диапазоне изменения давлений.

Включение второй ступени приводит к изменению потенциала катодной плазмы, однако при низких давлениях газа p и невысоких значениях U_2 потенциал катодной плазмы остается отрицательным относительно сетки.

В результате реализуется режим эмиссии плазменного катода с предварительным ускорением электронов в положительном анодном падении потенциала, при котором эмиссионный ток ограничен геометрической прозрачностью сетки. Рост давления p и повышение напряжения U_2 приводят к увеличению ионного тока в биполярном диоде (рис. 3), а также к повышению потенциала катодной плазмы и смене знака [15]. При положительном потенциале ϕ между плазмой и элементами сетки возникает потенциальный барьер, препятствующий уходу электронов на анод первой ступени. В зависимости от соотношения размеров ячейки сетки и толщины слоя отрицательного анодного падения в этом случае может быть реализован режим эмиссии электронов через барьер или с открытой плазменной поверхностью в центральной части ячеек [5,6]. В последнем случае эффективность извлечения электронов приближается к величине $\alpha \sim 1$ (рис. 4). Следует отметить, что на рис. 6 приведены только значения потенциала, определяемые по точке перегиба зондовых характеристик для системы с мелкоструктурной сеткой. Значительная трансформация зондовых характеристик не позволила получить надежные данные о зависимостях потенциала катодной плазмы вблизи критического значения давления в системах с крупной сеткой, однако в экспериментах [15] были получены косвенные доказательства роста потенциала катодной плазмы относительно сетки до 70–100 V.

Поскольку высота потенциального барьера в плоскости сетки определяется не только потенциалом катодной плазмы, но и напряженностью поля в биполярном диоде, эффективность извлечения электронов из катодной плазмы должна повышаться с ростом тока разряда и давления газа в результате увеличения обратного ионного тока и соответствующего сокращения длины ускоряющего промежутка в биполярном диоде.

Чем больше ячейка сетки, тем при более низких давлениях (при прочих равных условиях) достигается эффективность извлечения электронов $\alpha \sim 1$. Дальнейшее увеличение давления приводит к резкому падению ионного тока на коллектор. Величина тока разряда и напряжения на биполярном диоде оказывает слабое влияние на величину этого критического давления (рис. 2). Из характеристик двойного зонда (рис. 5) следует, что напряжение между катодной и анодной плазмами при этом резко уменьшается, биполярный диод разрушается и разряд переходит в визуально наблюдаемый контрагированный режим с поперечным размером столба разряда в сужении порядка шага ячейки сетки и падением напряжения на двойном слое перед сужением около 25–30 V. Напряжение между катодом и сеткой, необходимое для поддержания заданной величины тока разряда также снижается в 2–3 раза, с 350–400 до ~ 150 –200 V.

Разрушение биполярного диода при достижении определенного давления было ранее качественно подтверждено измерениями с помощью электростатического анализатора [15]. Кривые задержки тока электронов из анодной ступени источника, полученные при пониженном давлении газа, свидетельствуют о присутствии в

плазме значительного количества высокоэнергетичных электронов, тогда как для кривой, полученной в режиме контракции разряда, характерны гораздо меньшие значения тока и энергии быстрых электронов.

Заключение

Повышение давления газа в ионном источнике с сетчатым плазменным катодом приводит к увеличению обратного тока ионов из анодной ступени в катодную и росту напряженности поля в биполярном диоде между плазмами, а также усилению интенсивности процесса резонансной перезарядки ионов в катодной ступени и повышению потенциала катодной плазмы. В результате изменения распределения потенциала в ячейках сетки возрастает высота потенциального барьера между катодной плазмой и элементами сетки и происходит переход сетчатого плазменного катода в режим эмиссии электронов с открытой плазменной границы с эффективностью извлечения электронов, близкой к 1. Дальнейший рост обратного ионного тока и уменьшение длины резонансной перезарядки с увеличением давления газа увеличивают концентрацию и потенциал катодной плазмы, что создает условия для разрушения биполярного диода между катодной и анодной ступенями ионного источника. При этом разряд переходит в контрагированный режим горения, что сопровождается резким падением величины извлекаемого из анодной плазмы ионного тока. Критическая величина давления снижается при увеличении размера ячейки сетки.

Для эффективного функционирования ионного источника размер ячеек сетки необходимо выбирать с учетом рабочего диапазона давлений газа. При работе в области низких давлений долю извлекаемых из катодной плазмы электронов и соответственно ток генерируемых в анодной плазме ионов можно повысить использованием более крупных сеток. Значительное увеличение тока ионного пучка достигается повышением давления газа, однако для сохранения устойчивости газоразрядной структуры с биполярным диодом в этом случае необходимо использовать мелкоструктурную сетку.

Список литературы

- [1] The Physics and Technology of Ion Sources / Ed. by Ian.G. Brown. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004. P. 107–132.
- [2] Визирь А.В., Окс Е.М., Щанин П.М., Юшков Г.Ю. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 6. С. 28–31.
- [3] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. // ДАН. Сер. физ. 2004. Т. 394. № 2. С. 1–4.
- [4] Завьялов М.А., Крейнделъ Ю.Е., Новиков А.А., Шантурин Л.П. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [5] Жаринов А.В., Коваленко Ю.А., Роганов И.С., Тюрюканов П.М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 1. С. 66–71.
- [6] Галанский В.Л., Крейнделъ Ю.Э., Окс Е.М., Рипп А.Г. // ЖТФ. 1987. Т. 57. Вып. 8. С. 1518–1521.
- [7] Клярфельд Б.Н., Неретина Н.А. // ЖТФ. 1958. Т. 28. Вып. 2. С. 296–315.
- [8] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. // ПТЭ. 2005. № 2. С. 107–111.
- [9] Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 292 с.
- [10] Holmes A.J.T. // Rev. Sci. Instrum. 1981. Vol. 52. N 12. P. 22–32.
- [11] Cope D., Keller J.H. // J. Appl. Physics. 1984. Vol. 56. N 1. P. 96–100.
- [12] Leung K.N., Kribel R.E., Goede A.P.H., Green T.S. // Phys. Lett. 1978. Vol. 66A. N 2. P. 112–114.
- [13] Гаврилов Н.В., Каменецких А.С. // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 9. С. 97–102.
- [14] Метель А.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 241–247.
- [15] Gavrilov N.V., Kamenetskikh A.S. // Proc. 13th Intern. Symp. on High Current Electronics. Tomsk, 2004. P. 45–48.