

## Характеристики отражательного разряда с коробчатой катодной полостью и эмиссионные свойства плазмы разряда

© А.П. Семенов

Отдел физических проблем при Президиуме Бурятского научного центра СО РАН,  
670047 Улан-Удэ, Россия  
e-mail: semenov@pres.bsc.buryatia.ru

(Поступило в Редакцию 25 апреля 2006 г.)

Определено новое геометрическое соотношение формы и размеров катодной полости отражательного разряда с холодным полым катодом. Рассмотрены характеристики разряда и эмиссионные свойства плазмы. Определены условия и показана возможность создания максимально выраженной радиальной неоднородности прикатодной плазмы разряда. Обнаружен стационарный двойной электрический слой в апертуре катодной полости с падением потенциала 14–16 В. Рассмотрены особенности продольного извлечения ионов через пристеночный слой отражательного и полого катодов.

PACS: 52.80.Sm, 52.80.Tn

### Введение

Способность эмитировать заряженные частицы является одним из основных свойств газоразрядной плазмы. Для генерации эмитирующей плазмы используют газовые разряды с холодными катодами [1]. Среди таких разрядов перспективным для технологических применений выглядит отражательный разряд с холодным полым катодом. Впервые электродная структура такого разряда была предложена [2] и применена в источнике ионов протонного ускорителя [3]. Разряд во многом подобен аномальному тлеющему с положительным столбом в магнитном поле, он существует при более низком давлении газа, чем требуется для горения обычного тлеющего, стабильно зажигается и горит, образуя плотную неоднородную плазму. Возможности развития разрядной структуры и эмиссионные свойства плазмы разряда с полым катодом обобщены в [4–8]. Совокупность процессов, протекающих в катодной полости, определяет такие характерные особенности разряда, как „сжатие“ с сильно выраженной радиальной неоднородностью плотностью плазмы [9], свойства которой определяются быстрыми вторичными электронами, рожденными на стенках, и плазменными электронами. Неоднородное распределение концентрации плазмы способствует генерированию пучков ионов и электронов с высокой плотностью эмиссионного тока. Однако использование в источниках заряженных частиц непрерывного сильноточного режима горения разряда с током  $> 1$  А затруднено и нецелесообразно ввиду интенсивного разрушения ионами стенок трубчатой катодной полости и выделения в разрядной камере значительной тепловой мощности. Концентрация заряженных частиц нарастает к выходному отверстию катодной полости [5], достигая значения концентрации приосевой плазмы в полости анода. Особенно быстро разрушается торец полого катода. Необходимость увеличения ресурса полого катода и применения принципа ускорения встречных взаимо-

проникающих ионного и электронного пучков [7,10] в источнике ионов металлов с испарением металлов электронами, извлекаемыми из плазмы отражательного разряда с полым катодом, побудила к поиску новых вариантов электродных структур.

В настоящей работе рассматриваются свойства и характеристики отражательного разряда с коробчатой формой катодной полости, наиболее подходящей для расширения функциональных возможностей плазменных источников заряженных частиц на основе отражательного разряда с полым катодом.

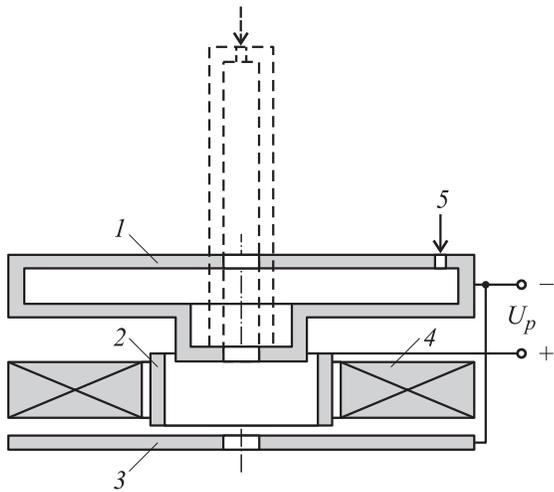
### Методика эксперимента

Результаты работы [11] свидетельствуют о возможности образования в апертуре коробчатой полости двойного электрического слоя при

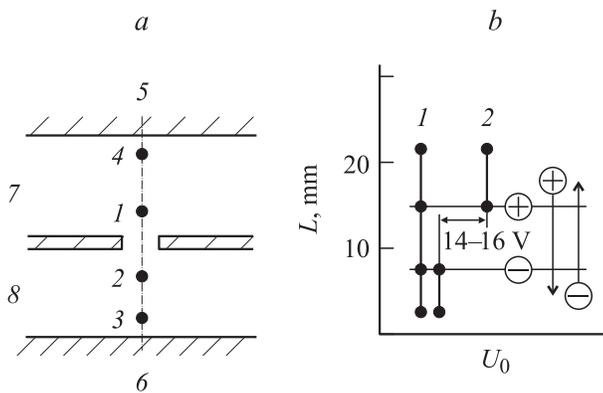
$$\frac{S}{S_k} < \left(\frac{m}{M}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где  $S$  — площадь сечения плазменного канала в апертуре полости,  $S_k$  — площадь внутренней поверхности полости,  $m$ ,  $M$  — массы электрона и иона.

На рис. 1 представлена электродная схема отражательного разряда с коробчатой катодной полостью. Разрядное устройство содержит полый катод 1, медный цилиндрический анод 2 диаметром 18 и высотой 12 мм и отражательный катод 3. Магнитное поле индукцией 0.1 Т обеспечивается постоянным кольцевым магнитом 4 и концентрируется между катодами. Площадь катодной полости  $\sim 50$  см<sup>2</sup>. Рабочий газ аргон 5 натекает в коробчатую полость катода 1. Расход аргона изменялся от 0.8 до 2.4 мПа · м<sup>3</sup> · с<sup>-1</sup> (давление в полости 2–5 Па). Электронная температура, концентрация плазмы и потенциал плазмы определялись из анализа вольт-амперных характеристик (ВАХ) одиночных вольфрамовых зондов [12] с собирающей поверхно-



**Рис. 1.** Электродная схема разряда с коробчатой катодной полостью. Пунктир — полый катод типовых разрядных структур с трубчатой полостью [2–5].



**Рис. 2.** Схема размещения зондов: *a* — 1, 2, 4 — неподвижные зонды, 3 — подвижный зонд. Зависимости продольного потенциала плазмы: *b* — 1 —  $r_a = 4$ , 2 — 2 мм, 5 — полый катод, 6 — отражательный катод, 7 — катодная полость, 8 — анодная полость.

стью  $0.3 \text{ mm}^2$ . Три зонда устанавливались неподвижно, два по обе стороны от апертуры полости на расстоянии от апертуры 3 мм и один на внутренней стенке полого катода рис. 2, *a*. Подвижный зонд перемещался радиально в щелевой прорези отражательного катода 3. Потенциал плазмы измерялся в точке перегиба ВАХ-зонда, концентрация плазмы — по насыщению ионного тока на зонд. Температура электронов определялась по наклону характеристики зонда в отсутствие эмиссии электронов. Радиус апертуры полости  $r_a$  изменяли от 2 до 6 мм, при этом отношение  $S/S_k$  принимало значения от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-2}$ , способствуя при  $r_a = 2 \text{ mm}$  выполнению, а при  $r_a \geq 4 \text{ mm}$  — нарушению критерия (1) образования двойного слоя (отношение  $(m/M)^{1/2}$  для аргона  $\sim 3.7 \cdot 10^{-3}$ ). Поджигание разряда осуществлялось от выпрямителя с регулируемым напряжением до  $10^3 \text{ V}$ .

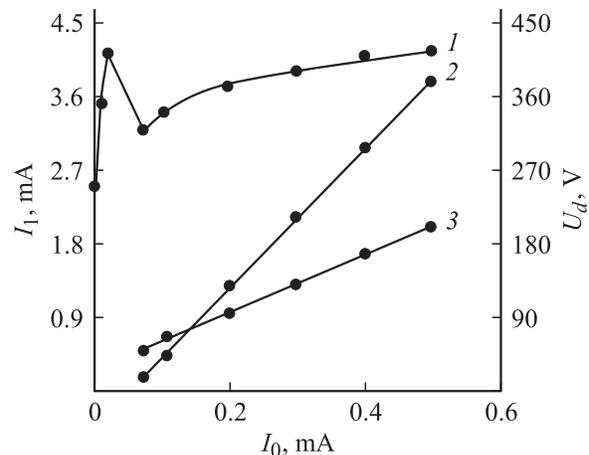
## Результаты и обсуждение

Вольт-амперная характеристика разряда с коробчатой полостью рис. 3 (*I*) практически не отличается от типичной ВАХ разряда с трубчатой полостью [5]. Зависимость (*I*) указывает на переход отражательного разряда в режим полого катода при выполнении условия [5]

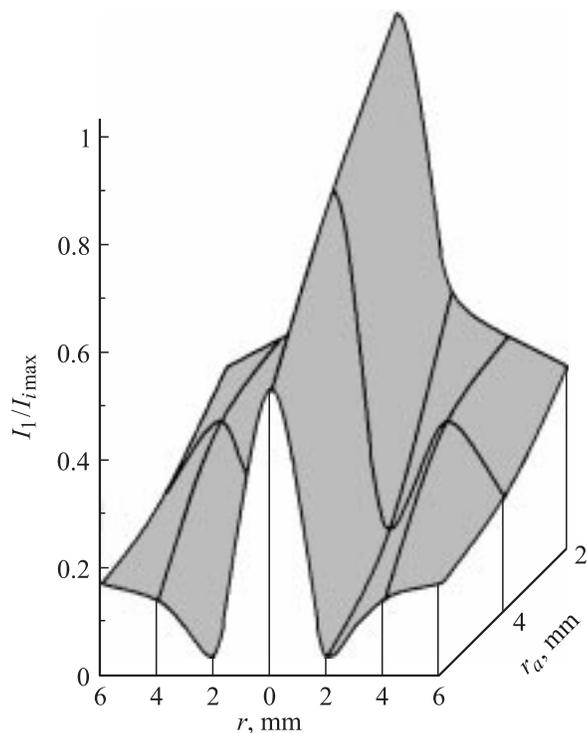
$$r_a \geq l_k, \quad (2)$$

где  $l_k$  — катодное падение потенциала перед апертурой полости. В рассматриваемой электродной системе наблюдается резкое (за  $\sim 10^{-6} \text{ s}$  [6]) снижение напряжения горения разряда и рост разрядного тока. Через отверстие в отражательном катоде 3 (рис. 2) заметен ярко светящийся плазменный шнур. На рис. 3 (2, 3) приведены зависимости зондового ионного тока от тока разряда в стационарном режиме горения,  $r_a = 2 \text{ mm}$ . Установлено, что плазма с плотностью  $10^{18} - 10^{19} \text{ m}^{-3}$  и электронной температурой  $\sim 10^5 \text{ K}$  в виде ярко светящегося плазменного шнура концентрируется на оси разряда, обеспечивая необходимые условия для продольного отбора электронов и ионов через осевые отверстия в катодах 1 или 3 (рис. 1). Экспериментально наблюдаемое пересечение линейных зависимостей зондовых токов (2) и (3) свидетельствует о перераспределении плотности плазмы с увеличением тока разряда. Разная крутизна зависимостей зондового ионного тока от тока разряда показывает, что при токах разряда ниже точки пересечения извлечение заряженных частиц предпочтительней через отверстие в полем катоде 1, при разрядном токе выше установленной величины, через отверстие в отражательном катоде 3.

При извлечении в режиме сильноточного горения разряда электронов или ионов через эмиссионный канал в катоде 3 становится существенным характер радиального распределения концентрации катодной плазмы. Как показали эксперименты, существенное влияние на распределение концентрации плазмы оказывают размеры



**Рис. 3.** Зависимости напряжения горения (*I*) и зондовых ионных токов (2), (3) от тока разряда.



**Рис. 4.** Зависимость радиального распределения ионного тока на отражательный катод при изменении радиуса апертуры полости от 2 до 6 мм: плазмообразующий газ Ar, ток разряда 0.5 А, расход газа  $0.8\text{--}1.2 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  ( $r$  — радиус отражательного катода,  $r_a$  — радиус выходной полости полового катода).

выходной апертуры полости. На рис. 4 представлены радиальные зависимости ионного тока на подвижный зонд 3 от радиуса апертуры полости. В приближении эмиссионная поверхность границы катодной плазмы плоская, ток ионно-электронной эмиссии не влияет на зондовый ток. Измеренный зондовый ток на катод от ионов, ускоренных в катодном падении потенциала, пропорционален плотности плазмы. Наиболее плотная плазма концентрируется на оси разряда независимо от радиуса апертуры полости. Поперечные размеры апертуры полости оказывают существенное влияние на характер распределения и величину ионного тока.

Рост плотности плазмы характерен для малых размеров апертуры полости. С уменьшением  $r_a$  от 6 до 2 мм осевой ионный ток существенно увеличивается (рис. 4). При  $r_a > 4$  мм наблюдается боковой максимум, сформированный симметрично оси катода. Провал между боковым и осевым максимумами заполняется при радиусе апертуры полости 2 мм, и распределение ионного тока принимает форму с резко выраженным осевым максимумом. В случае тока разряда 0.1 А максимум плотности плазмы наблюдался на периферии, осевое сжатие разряда сохранялось. Рост давления в полости (увеличивался расход газа до  $2.4 \text{ mPa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) и изменение радиуса апертуры от 2 до 6 мм не оказывали

существенного влияния на напряжение горения разряда. Зондовый ионный ток на оси катода (радиус апертуры 2 мм) с ростом давления в полости увеличивался. При постоянном давлении  $\sim 5$  Па увеличение радиуса апертуры полости приводило к снижению напряжения зажигания с 500 до 440 В, при этом напряжение горения разряда уменьшалось на  $\sim 10\text{--}20$  В, ток отражательного разряда, при котором зажигается разряд в полой катод, практически не изменялся.

Осевой ионный ток катода 3 (рис. 1) увеличивается пропорционально росту тока разряда (зависимость близка к линейной). Наибольший ионный ток и скорость нарастания тока соответствуют наименьшему радиусу апертуры полости  $r_a = 2$  мм. Ход кривых распределения ионного тока по катоду и оценка плотности плазмы из величины ионного тока на оси катода показывают, что апертура катодной полости с поперечными размерами, сравнимыми с длиной катодного падения потенциала перед апертурой полости, оказывает контрагирующее действие на разряд. Выполняются необходимые и достаточные условия для продольного извлечения электронов или ионов через отверстие на оси катода 3. Кроме того, сравнительно расширенная эмитирующая поверхность полости снижает энерговыделение на стенках полового катода и упрощает охлаждение катода.

Таким образом, размеры апертуры полости можно оптимизировать из необходимости получения максимальной осевой концентрации плазмы при условии достижения сравнительно низких напряжений горения и малых величин стартовых токов зажигания разряда в полости. В электродной структуре рис. 1 оптимальные размеры апертуры полости  $r_a \sim 2$  мм, что удовлетворяет соотношению (2).

Как свидетельствуют условия эксперимента, допустимое сужение сечения плазмы разряда способствует выполнению неравенства (1), обуславливающего образование в выходной апертуре полости стационарного двойного электрического слоя. Потенциал плазмы измерялся вдоль оси разряда с помощью одиночных зондов рис. 2, а. Зонды 1 и 2 устанавливали неподвижно по обе стороны от апертуры полости на расстоянии друг от друга  $\sim 8$  мм, зонды 3 и 4 — соответственно на стенке отражательного катода и внутренней стенке катодной полости. На рис. 2, б представлены продольные зависимости потенциала плазмы  $U_0$  (1 и 2). Как показали эксперименты, в ситуации с широким отверстием  $r_a = 4$  мм неравенство (1) не выполняется. Значения  $U_0$  внутри катодной полости и в полости анода одинаковы. Разность потенциалов плазмы  $\Delta U_{12}$  (нижние индексы в обозначении  $\Delta U$  соответствуют номерам зондов) находится в пределах  $2\text{--}3 \text{ V} \sim kT_e$  (рис. 2, б, 1). Ситуация меняется при  $r_a = 2$  мм, когда соблюдается неравенство (1), и потенциал плазмы в полости катода заметно выше потенциала плазмы в полости анода, в сужении между плазмой внутри полости и внешней плазмой обнаруживается стационарный двойной электрический слой с падением потенциала  $\Delta U_{12} \sim 14\text{--}16 \text{ V}$  (рис. 2, б, 2).

Поскольку при уменьшении радиуса канала диффузионные потери на стенках выходной апертуры полости снижаются пропорционально  $r_a$ , образование заряженных частиц в плазме канала сужения уменьшается пропорционально  $r_a^2$ . Поэтому при уменьшении  $r_a$  баланс частиц в плазме будет выполняться при больших значениях продольного градиента потенциала. При этом разность потенциалов плазмы на длине анодной и катодной полостей остается 2–4 В. Площадь апертуры полости, перекрываемая двойным слоем при  $r_a = 2$  мм,  $\sim 0.1$  см<sup>2</sup>. Визуальные наблюдения свечения разряда показали, что в случае существования двойного слоя на апертуре полости  $\Delta U_{12} > kT_e$  интенсивность свечения внешней плазмы значительно превышает интенсивность свечения внутри полости, что подтверждается зондовыми измерениями концентрации плазмы внутри и вне полости (рис. 3, 2 и 3). Анализ влияния радиуса анода и расстояния между катодами показывает, что их увеличение приводит к снижению концентрации осевой плазмы [15]. По данным зондовых измерений, электронная температура при разных  $r_a$  остается неизменной  $\sim (5-7) \cdot 10^4$  К. Двойной слой может рассматриваться как промежуток ускорения ионов из катодной в анодную полость, он способствует росту их концентрации в анодной полости, вследствие чего повышается концентрация вторичных электронов, вносящих заметный вклад в ионизацию, что приводит к повышению осевой концентрации плазмы.

В рассматриваемых условиях продольный отбор ионов может быть осуществлен через эмиссионный канал в полой 1 или отражательном 3 катодах (рис. 1). Эмиссионные свойства можно характеризовать зависимостями эмиссионного тока от разрядного. Эмиссионные характеристики (рис. 5) получены при ускоряющих напряжениях 10 кВ и относительно малом ускоряющем промежутке  $\sim 3-4$  мм, при этом ускоряющий электрод образовывал квазипирсову геометрию промежутка ускорения [13]. Особенностью приведенных на рис. 5 зависимостей при ускоряющем напряжении  $U > 0$  является их немонотонность, которая может быть обусловлена немонотонной зависимостью  $n_i(I_0)$  [14]. Расчет зависимости концентрации эмитирующей плазмы от тока разряда [14] из выражения эмиссионного тока

$$I_i = \eta n_i (R - K n_i^{-\frac{1}{2}} U_k^{\frac{3}{4}})^2 \quad (3)$$

( $\eta = e \left( \frac{\pi k T_e}{2m} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $K = \left( \frac{e k T_e}{1.21 e_0^2} \right)^{\frac{1}{4}}$ ,  $R$  — радиус эмиссионного канала,  $U_k$  — падение потенциала на катодном слое) показывает, что при  $I_0 > 0.25$  А концентрация плазмы в эмиссионном канале слабо зависит от тока разряда. Экспериментально наблюдаемый характер поведения эмиссионных зависимостей (рис. 5) с перегибом зависимостей при  $I_0 \sim 0.2$  А качественно согласуется с ходом расчетной зависимости  $n_i(I_0)$ . При этом мощность, затрачиваемая на повышение разрядного тока, не дает заметного вклада в величину отбираемого ионного тока. Извлечение ионов и электроднов из катодной плазмы

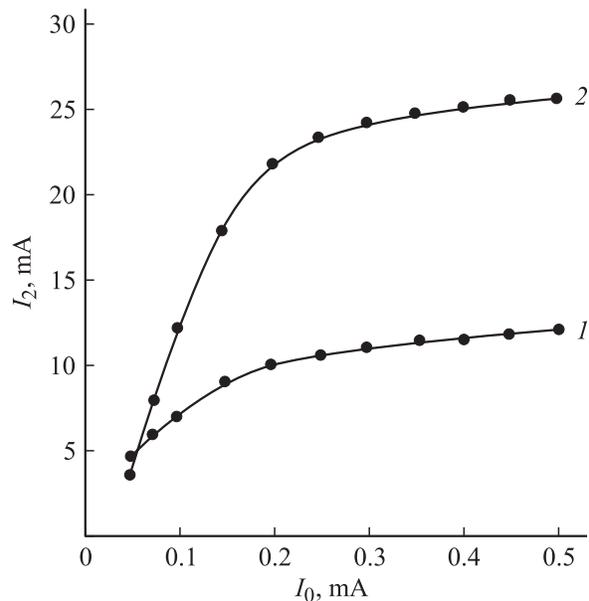


Рис. 5. Эмиссионные характеристики (ускоряющее напряжение 10 кВ): 1 — эмиссионный канал в стенке катодной полости, 2 — эмиссионный канал в отражательном катоде.

через отверстие в полости характеризуется плотностью эмиссионного ионного  $\sim 0.6$  и электронного  $\sim 5$  А/см<sup>2</sup> токов при потенциале извлекающего электрода 10 кВ и токе разряда  $I_0 = 0.5$  А. Электродная структура (рис. 1) позволяет наиболее полно реализовать принцип ускорения встречных взаимопроникающих электронного и ионного пучков [10] в конструкции источника ионов металлов [7] благодаря управлению эмиссией электронов параметрами пристеночного ионного слоя [16].

## Заключение

Рассмотрены характеристики отражательного разряда с коробчатой формой катодной полости. Определены основные факторы, показана возможность создания максимально выраженной радиальной неоднородности прикатодной плазмы разряда. Обнаружен стационарный двойной электрический слой в апертуре коробчатой полости с падением потенциала 14–16 В (площадь апертуры, перекрываемая слоем,  $\sim 0.1$  см<sup>2</sup>). Рассмотрены особенности извлечения электронов и ионов в вакуум из прикатодной плазмы разряда через эмиссионный канал в отражательном и полой катодах. Как показали эксперименты, стенки катода с коробчатой полостью сохраняют свою первоначальную форму при сильноточном режиме горения разряда, ток разряда 0.5–1 А, в течение  $> 500$  ч. Малый износ связан с распространением эмиссионных процессов на существенно расширенную поверхность полости и уменьшением приблизительно в четыре раза плотности ионного тока на стенке коробчатой полости и с незначительно выраженной аксиальной неоднородностью плотности плазмы, как это наблюдается в разряде с

трубчатой полостью. При этом площадь потерь электронов и ионов в обоих вариантах полого катода (трубчатая полость или коробчатая полость) одинаково мала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 91.

## Список литературы

- [1] Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Под ред. П.М. Щанина. Екатеринбург: УИФ Наука, 1993. 148 с.
- [2] Глазов А.А., Кузмяк М. Препринт. Р-500. Дубна: ОИЯИ, 1960. 13 с.
- [3] Глазов А.А., Кузмяк М., Новиков Д.Л. и др. // ПТЭ. 1964. № 1. С. 34–36.
- [4] Москалев Б.И. Разряд с полым катодом. М.: Энергия, 1969. 184 с.
- [5] Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [6] Завьялов М.А., Крейндель Ю.Е., Новиков А.А. и др. Плазменные процессы в технологических электронных пушках. М.: Энергоатомиздат, 1989. 256 с.
- [7] Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 1999. 207 с.
- [8] Метель А.С., Григорьев С.Н. Тлеющий разряд с электростатическим удержанием электронов. М.: Янус-К, 2005. 296 с.
- [9] Крейндель М.Ю., Осипов И.В., Ремпе Н.Г. // ЖТФ. 1992. Т. 62. Вып. 10. С. 165–169.
- [10] Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Семенов А.П. // ПТЭ. 1978. № 2. С. 193–195.
- [11] Метель А.С. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 241–246.
- [12] Козлов О.В. Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. 292 с.
- [13] Семенов А.П. // ПТЭ. 1993. № 5. С. 128–133.
- [14] Груздев В.А., Ремпе Н.Г. // Сб. докл. I Всесоюз. совещания по плазменной эмиссионной электронике. Улан-Удэ, 1991. С. 45–50.
- [15] Никулин С.П. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 5. С. 43–47.
- [16] Груздев В.А., Ремпе Н.Г. // Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск: Наука, 1983. С. 14–20.