

04

©1993 г.

## СИЛЬНОТОЧНЫЙ ТЛЕЮЩИЙ РАЗРЯД В ЭЛЕКТРОДНОЙ СТРУКТУРЕ СТЕРЖНЕВЫХ КАТОДОВ С ПОЛЫМ АНОДОМ

*А.П.Семенов, В.П.Нархинов*

Предложен генератор плазмы тлеющего разряда, зажигаемого в электродной структуре стержневых катодов с общим полым анодом. Проведены экспериментальные исследования особенностей зажигания и горения разряда в круговом магнитном поле и эмиссионных свойств прианодной плазмы. Показана возможность эффективного отбора электронов из плазмы секционированной анодной полости. Получен радиально сходящийся пучок электронов с высокой азимутальной однородностью тока.

### Введение

Тлеющий разряд является эффективным генератором эмиттирующей электроны [1] и ионы [2] плазмы. Обычно такой разряд зажигается в структуре электродов, обеспечивающих формирование ограниченной или протяженной плоской эмиттирующей плазменной поверхности [3]. Поэтому в технологии до настоящего времени преимущественно используют аксиальные электронные и ионные пучки. Тем не менее перспективными, на наш взгляд, являются электродные структуры, в которых зажигается кольцевой разряд и заряженные частицы извлекаются с поверхности узкого цилиндрического слоя плазмы. Часто такая геометрия плазмы используется для генерации трубчатых [4], радиально сходящихся [5] или расходящихся [6] пучков специального назначения (возбуждения эксимерных лазеров [7], коммутации больших токов [6]). Однако радиально сходящиеся пучки, получаемые в коаксиальных электродных структурах, вполне пригодны и для ряда технологических применений, в частности закалки, плавки, пайки, сварки деталей цилиндрической формы, отверждения лаков и смол на поверхности проводов и кабелей, повышения термостойкости полимерных труб, дезинсекции зерна, обеззараживания газовых выбросов и промышленных стоков. Известные коаксиальные электродные структуры различаются типом катода (термоэмиссионный, взрывоэмиссионный, плазменный). В качестве катода часто используют полые цилиндры из алюминия с рефленной внутренней эмиттирующей поверхностью [8], с армированной внутренней поверхностью

графитовым войлоком либо мелкопористым материалом, либо соответствующим образом расположенными на эмиттирующей поверхности металлическими острями (лезвиями). Недостатком твердотельных катодов является неоднородность электронного пучка, связанная с дискретностью эмиссионных центров на поверхности катода. Перспективно применение плазмы незавершенного разряда по поверхности диэлектрика [5]. Наряду с несомненными достоинствами (предельно высокие электронные токи) плазменных катодов с незавершенным разрядом по поверхности диэлектрика их использование в технологии затруднено из-за низкой надежности поджигающего катодного узла [9], вызванной быстрым разрушением участка контакта электрод-диэлектрик катодным пятном дуги. Выработка электрода под диэлектриком приводит к перемещению туда катодного пятна и к нарушению устойчивого горения разряда. Кроме того, нестабильность горения разряда связана с радиальной миграцией катодного пятна. В результате действия этих факторов наблюдается временная нестабильность эмиссионного электронного тока. При этом ресурс непрерывной работы составляет 5-8 ч. Недостатки, ограничивающие ресурс эмиттера, могут быть легко преодолены, если отбор электронов вести из протяженного слоя плазмы замкнутого по окружности стационарного тлеющего разряда в магнитном поле. Хотя такая форма разряда в коротком разрядном промежутке (ячейке Пеннинга) всесторонне исследована [1], она нашла использование только для получения технологических аксиальных электронных пучков [1,10]. Конструктивно можно из коротких разрядных ячеек набрать протяженную электродную структуру и, установив ячейки по окружности, получить газоразрядное устройство, в котором возбуждается цилиндрический слой газоразрядной плазмы, способной испускать электроны к оси цилиндра. Однако какие-либо сведения о свойствах тлеющего разряда и эмиттирующей плазмы в такой электродной структуре отсутствуют. Поэтому представляется целесообразным и практически важным экспериментальное изучение особенностей зажигания и горения разряда сразу во всех ячейках Пеннинга, образованных электрически соединенными стержневыми катодами и общим полым анодом в круговом магнитном поле.

### Методика эксперимента

Конструктивная схема экспериментального газоразрядного устройства представлена на рис. 1. Устройство содержит катод 1 диаметром 260 мм, выполненный из нержавеющей стали в форме кольца прямоугольного сечения. По образующей катода радиально на половину длины заглублены 28 стержней 2 сечением  $10 \times 10$  мм. Стержни 2 являются полусыми наконечниками 56 попарно скрепленных постоянных стержневых магнитов ( $20 \times 7 \times 10$  мм) 3 из  $\text{SmCo}_5$ . Выступающие из катода 1 стержни 2 проникают в полость анодного электрода и делят ее на 28 ячеек. Индукция магнитного поля в каждой из ячеек  $8 \cdot 10^{-2} - 10^{-1}$  Тл, причем магнитное поле в ячейках направлено перпендикулярно стержням и периодически от ячейки к ячейке направление магнитного поля меняется на противоположное. Анодный электрод собран из цилиндра 4 диаметром 200 и высотой 24 мм и двух съемных колец 5 с Г-образной формой сечения. Кольца 5 образуют эмиссионную щель 6. Коаксиально анодным кольцам 5 установлен извлекающий электроды цилиндрический стальной коллектор 7 диаметром 150 мм. Зазор между эмиссионной щелью и

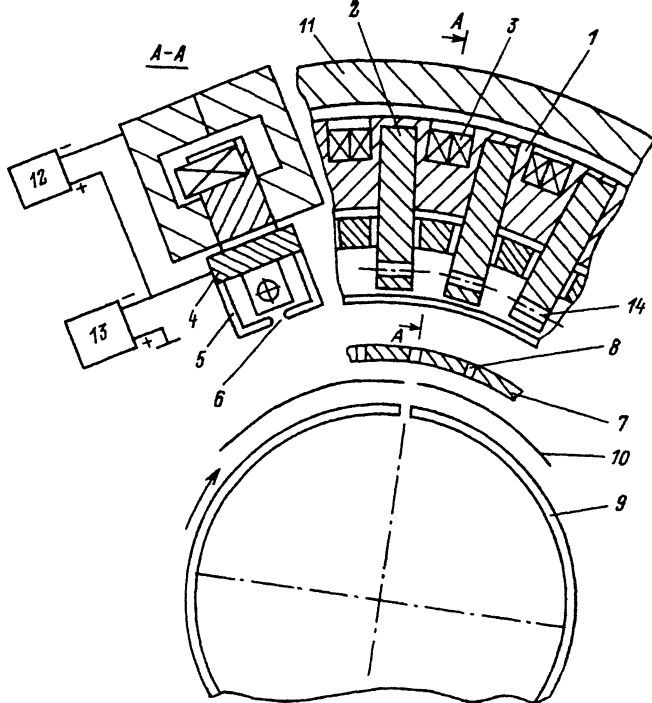


Рис. 1. Схема эксперимента.

коллектором 5 мм. Часть извлеченных из плазмы электронов проникает через отверстия 8 в коллекторе 7 и попадает в цилиндр Фарадея 9. Цилиндр 9 посажен на ось двигателя и, равномерно вращаясь вместе с экраном 10 внутри коллектора 7, регистрирует ток электронов поочередно на выходе 28 отверстий в коллекторе 7. По характеру изменения тока можно судить об однородности эмиссии электронов из каждой ячейки. Катод 1 удерживается между двумя разъемными кольцами 11, при смыкании которых образуется герметичная полость, в которой охлаждаются магниты благодаря их обдуву потоком воздуха высокого давления. Анодная полость газоразрядного устройства откачивалась последовательно включенными насосами предварительного разряжения НВПР-16-066 и паромасляным Р-160/700 до остаточного давления  $\sim 4 \cdot 10^{-3}$  Па. Рабочий газ аргон (воздух) натекал в полость анода из четырех диаметрально противоположных отверстий в катоде. Разряд зажигался от стабилизированного источника тока 12 с плавно регулируемым выходным напряжением 0–1.5 кВ. Электроны из плазмы разряда извлекались подачей плавно регулируемого электрического напряжения 0–15 кВ от высоковольтного выпрямителя 13 между анодными кольцами и коллектором.

### Результаты экспериментов

Сначала эксперименты были направлены на выяснение, может ли в 28 ячейках Пеннинга с общим анодом и электрически соединенными стержневыми катодами в электродной структуре рис. 1 стабильно зажигаться и стационарно гореть тлеющий разряд во всех ячейках при условном

(произвольно выбранном) давлении газа. Эксперименты показали, что зажигание разряда в секционированной анодной полости не встретило затруднений. С появлением тока разряда при подаче напряжения зажигания свечение разряда мгновенно возникало во всех 28 ячейках. С повышением тока разряда свечение становилось ярче и по интенсивности однородно.

Возможность устойчивого зажигания и стабильность горения разряда в широком диапазоне токов явилась экспериментальной предпосылкой изучения особенностей разряда в предложенной электродной структуре и некоторых эмиссионных свойств плазмы. На рис. 2 представлены вольт-амперные характеристики разряда для различных давлений газа. Можно различить две формы разряда: слаботочную ( $I \lesssim 0.1$  А,  $I$  — ток разряда) высоковольтную при низких давлениях газа ( $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Па) и сильноточную ( $I \geq 0.1$  А) низковольтную при повышенных давлениях газа (1–10 Па). Разряд во многом подобен аномальному тлеющему разряду в магнитном поле. При токах разряда  $I \geq 0.1$  А напряжение горения  $U > 400$  В. Прослеживается сильная зависимость  $I$  от давления газа. Хотя напряжение горения разряда при давлении газа (1–10 Па) сравнительно низко  $\sim 500$  В, все же не настолько, чтобы газоразрядное устройство можно было наиболее полно использовать в качестве генератора эмиттирующей плазмы. Снизить напряжение горения разряда, не повысив при этом давление газа, удалось благодаря конструктивным

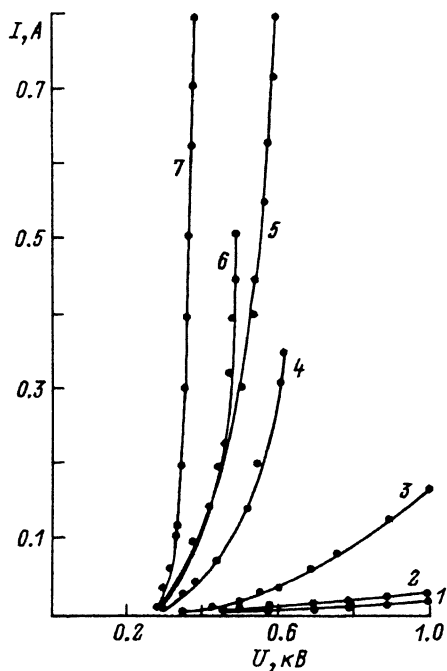


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики разряда.

1 —  $p = 6.6 \cdot 10^{-2}$ ; 2 —  $1.3 \cdot 10^{-1}$ ;  
3 —  $8 \cdot 10^{-1}$ ; 4, 7 — 1.3; 5 — 8;  
6 — 13.3 Па; рабочий газ-аргон.

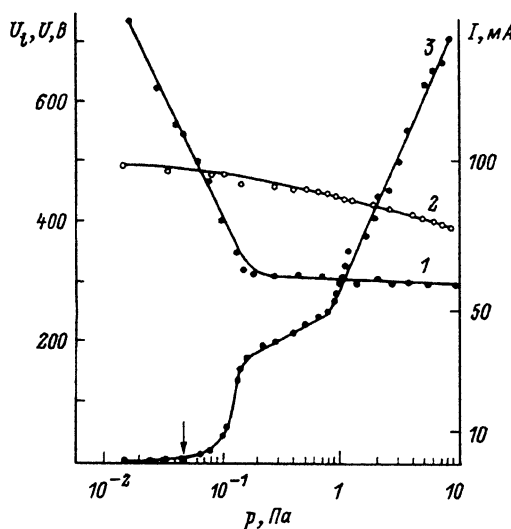


Рис. 3. Зависимости напряжения зажигания (1), напряжения горения (2) и тока разряда (3) от давления газа (аргон).

Стрелка указывает на давление, при котором свечение плазмы сохраняется в последней ячейке.

изменениям стержневых катодов. Такие изменения касались дополнения стержней отверстиями связи 14 (рис. 1) диаметром 4 мм. Вольт-амперные зависимости рис. 2 (кривые 4 и 7) свидетельствуют, что напряжение горения разряда в сообщающихся ячейках (кривая 7) существенно ниже, чем напряжение горения разряда в секционированной анодной полости (кривая 4), давление газа в обоих случаях одинаково (1.3 Па).

Зависимость напряжения зажигания  $U_i$  разряда в секционированной анодной полости от давления газа рис. 3 (кривая 1) свидетельствует, что существует переходное давление  $\sim 2 \cdot 10^{-1}$  Па, выше которого прослеживается слабая зависимость  $U_i$  от давления. При давлениях ниже переходного наблюдается сильная зависимость напряжения зажигания от давления (напряжение зажигания измеряли в момент возникновения слабого свечения в ячейках и появления тока порядка долей миллиампера в электрической цепи источника поджигающего напряжения). Понижение давления  $p$  ниже  $2 \cdot 10^{-1}$  Па вызывает крутой подъем левой ветви кривой  $U_i(p)$ , причем напряжение зажигания быстро достигает  $10^3$  В. Ход зависимостей тока разряда и напряжения горения разряда от давления рис. 3 (кривые 2 и 3) неодинаков (при съемке зависимостей 2 и 3 запись тока и напряжения вели параллельно и каждому давлению в диапазоне  $10^{-2}$ –10 Па соответствуют одна величина тока на зависимости 2 и одно значение напряжения горения на зависимости 3). Во всем диапазоне давления ( $10^{-2}$ –10 Па) напряжение горения разряда слабо зависит от давления газа. Так, с понижением давления газа от 10 до  $10^{-2}$  Па напряжение горения медленно растет от 380 до 490 В, при этом ток разряда быстро снижается (рис. 3, кривая 3). На немонотонной зависимости  $I(p)$  выделяются три характерных участка. Изгиб зависимости при давлении  $8 \cdot 10^{-1}$  Па, разграничивающий два линейных участка с разной крутизной, вероятно, связан с переходом низковольтного сильноточного разряда в форму слаботочного высоковольтного. Обрыв тока разряда при давлении  $\sim 1.3 \cdot 10^{-1}$  Па приводит к неполному погасанию разряда. Об этом свидетельствуют резкое падение тока (но не до полного исчезновения) и сохранение свечения разряда в части ячеек. Благодаря плавному погасанию разряда в ячейках, сохранивших свечение, ток разряда медленно снижается при понижении давления от  $10^{-1}$  до  $1.3 \cdot 10^{-2}$  Па, при давлении  $\sim 1.3 \cdot 10^{-2}$  Па разряд гаснет в последней из ячеек, сохранивших свечение после обрыва тока.

Концентрация невозмущенной плазмы  $n$ , электронная температура  $T_e$ , потенциал  $\varphi_0$  и плавающий потенциал  $\varphi_f$  плазмы оценивались с помощью одиночного цилиндрического зонда из вольфрамовой проволоки диаметром 0.1 мм, установленного в центре грани стержневого катода. Анализ результатов зондовых измерений показал, например, что при токе разряда 0.1 А, напряжение горения 300 В, давлении аргона 6.13 Па параметры плазмы составляли  $n = 4.5 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ,  $T_e \sim 6\text{--}7 \cdot 10^4 \text{ К}$ ,  $\varphi_f \sim 271 \text{ В}$ ,  $\varphi_0 \sim 374 \text{ В}$ . Потенциал плазмы  $\varphi_0$  выше потенциала анода  $\varphi_a$ . Возникающие в разряде отрицательное анодное падение потенциала ( $\varphi_0 - \varphi_a$ ), характеризуемое соотношением [3]  $\varphi_0 - \varphi_a \geq (kT_e/e) \ln(M_i/m)^{1/2}$ , обеспечивает устойчивое протекание разрядного тока на анод ( $k$  — постоянная Больцмана,  $e$  — заряд электрона,  $M_i$  — масса иона,  $m$  — масса электрона). При подаче от выпрямителя 13 напряжения между заземленным коллектором и анодом, отрицательным относительно плазмы, поле ци-

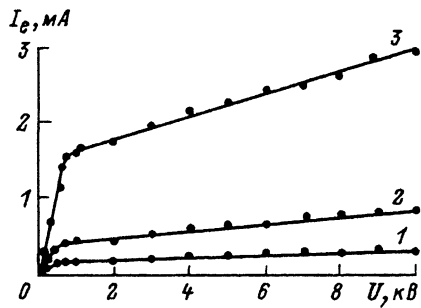


Рис. 4. Зависимости тока пучка от извлекающего напряжения.  
 1 —  $I = 20$ , 2 — 50, 3 — 100 мА;  
 $p = 4 \cdot 10^{-1}$  Па.

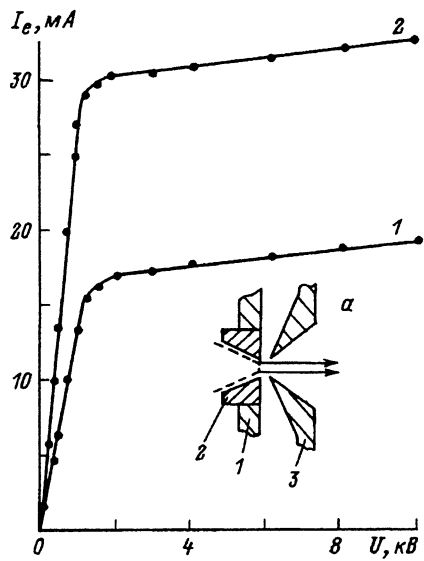


Рис. 5. Зависимости тока пучка от извлекающего напряжения.

$I = 0.1$  А,  $p = 4 \cdot 10^{-1}$  Па; 1 — анод, 2 — магнитная вставка, 3 — извлекающий электрод.

цилиндрического зазора, тормозящее ионы и ускоряющее электроны, накладывается на поле пространственного заряда пристеночного слоя [3]. Это приводит к снижению потенциального барьера для электронов плазмы вплоть до его устранения вдоль центральной области эмиссионной щели, отражению ионов от ускоряющего цилиндрического зазора и радиальному ускорению электронов, проникающих в зазор и поступающих на коллектор. На рис. 4 представлены характеристики извлечения электронов при извлекающих напряжениях  $U_0$  до 10 кВ, сравнительно малом ускоряющем зазоре (5 мм) и короткой эмиссионной щели длиной 2 мм и высотой 1 мм. Вид полученных характеристик извлечения типичен для вольт-амперных характеристик аксиальных эмиттеров [1]. На зависимости извлеченного электронного тока от напряжения имеются два участка: участок быстрого роста извлеченного тока в пределах повышения извлекающего напряжения до 1 кВ и участок с тенденцией к насыщению в широком диапазоне извлекающих напряжений, на котором извлекающее напряжение не оказывает на плазму разряда возмущающего действия, способного повлиять на ее эмиссионные свойства. Как показали эксперименты, повышение давления газа в анодной полости слабо влияет на величину электронного тока на коллектор. При этом возможность повышения давления газа в зазоре извлечения выше  $5 \cdot 10^{-1}$  Па ограничивалась зажиганием разряда между газоразрядным устройством и заземленными частями металлической вакуумной камеры. Несмотря на сравнительно высокую плотность плазмы, эффективность извлечения  $\alpha = I_e/I_p$  низка 0.03 ( $I_e$  — ток электронов). При токе разряда 0.1 А и извлекающем напряжении 8 кВ ток электронов на коллектор был порядка 3 мА. Видно, что отбор электронов из плазмы разряда затруднен и определяется действием по крайней мере двух факторов: влиянием сильного поперечного

магнитного поля и неприспособленностью коллектора выполнять функции извлекающего электрода. Для получения радиально сходящегося пучка электронов с более значительным током использовали прием [1] ослабления поперечной составляющей магнитного поля в области токоотбора оконтуриванием краев эмиссионной щели магнитной сталью. Ослабление поперечной составляющей магнитного поля приводит к появлению и усилению его продольной составляющей. После напрессовки на края эмиссионной щели вставок из магнитной стали продольное к направлению извлечения электронов магнитное поле в цилиндрическом зазоре ускорения между анодом и коллектором усилилось с  $3 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-2}$  Тл (индукцию магнитного поля в зазоре определяли измерителем магнитной индукции РШ1-10). Это свидетельствует о "провисании" магнитного поля в направлении с катодных стержней на стенку анода к эмиссионной щели. Благодаря такому конструктивному приему эффективность извлечения электронов возросла до 0.15–0.18. При токе разряда 0.1 А ток электронов на коллектор составил 18–20 мА (рис. 5, кривая 1). Дополнительные возможности повышения  $\alpha$  были реализованы приданием специальных форм [11] эмиссионной щели и извлекаемому электроду (рис. 5, а). Экспериментально подобранная форма эмиссионной щели позволила повысить эффективность извлечения электронов до 0.3–0.4 (рис. 5, кривая 2) по сравнению с 0.15–0.18 при использовании простой формы щели (рис. 1) с вставкой из магнитной стали.

В электронном эмиттере рассматриваемого типа, генерирующего радиально сходящийся пучок, существенное значение для технологических применений имеет азимутальное распределение плотности извлеченного электронного тока, по характеру изменения которого можно судить о однородности эмиссии из каждой ячейки. Однородность эмиссии электронов из всех 28 ячеек, во-первых, может характеризовать однородность плазмы, во-вторых, дает основание получить равномерное распределение тока по периметру цилиндра благодаря "перекрытию" 28 элементарных сходящихся ленточных пучков. Сравнивая ток электронов, проникающих из прианодной плазмы каждой из ячеек в движущийся цилиндр Фарадея 9 через отверстия 8 диаметром 1.2 мм в коллекторе 7, оценивали однородность эмиссии. Однако в отсутствие анодной магнитной вставки, когда в зазоре ускорения действует поперечное извлечению электронов магнитное поле, наблюдался "снос" электронов от радиального направления, причём направления сил Лоренца на электроны, вылетающие из любой пары смежных ячеек, не совпадают. Допустим, что на выходе произвольно взятой ячейки наблюдается "снос" электронов вниз. При этом на выходе двух примыкающих ячеек видим "снос" электронов вверх. Действие этого фактора таково, что электроны не попадают в отверстия коллектора, соосные с эмиссионной щелью, и не проникают в цилиндр Фарадея. Поэтому численная оценка однородности электронного тока была проведена с анодной магнитной вставкой. Предельный разброс электронных токов на выходе 28 отверстий в коллекторе невелик и составил  $\sim 0.05$ .

## Выводы

1. Экспериментально исследованы особенности зажигания и горения кругового разряда в стержневой структуре катодных электродов с общим полым анодом.

2. Показано, что для получения радиально сходящегося пучка электронов целесообразно использовать плазму тлеющего разряда, зажигаемого в скрещенных электрическом и магнитном полях между стержневыми катодами и полым анодом.

3. Эффективный отбор электронов возможен при "провисании" в направлении на эмиссионную щель поперечного извлечению электронов магнитного поля стержневой системы.

4. Геометрия эмиссионной щели и извлекающего электрода оказывает сильное влияние на токовые параметры радиально сходящегося электронного пучка.

5. Предложенный нами генератор кольцевой эмиттирующей плазмы можно использовать в плазменных источниках электронов с радиально сходящимся пучком.

### Список литературы

- [1] Крейндель Ю.Е. Плазменные источники электронов. М.: Атомиздат, 1977. 144 с.
- [2] Габович М.Д. Физика и техника плазменных ионных источников. М.: Атомиздат, 1972. 304 с.
- [3] Langmuir I. // Phys. Rev. 1929. Vol. 33. N 11. P. 954-959.
- [4] Окс Е.М., Чагин А.А., Шанин П.М. // Сб. докл. I Всесоюз. совещания по плазменной эмиссионной электронике. Улан-Удэ, 1991. С. 18-23.
- [5] Бугаев С.П., Винтизенко Л.Г., Гушенец В.И. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. II. С. 174-176.
- [6] Ефремов А.М., Ковальчук В.М., Крейндель Ю.Е. и др. // ПТЭ. 1987. № 1. С. 167-169.
- [7] Бугаев С.П., Крейндель Ю.Е., Шанин П.М. Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [8] Кассиров Г.М., Кленов Г.И., Секисов Ф.Г. // ПТЭ. 1990. № 2. С. 210-212.
- [9] Аксенов А.И., Панковец Н.Г., Толопа А.И. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. I. С. 40-43.
- [10] Винтизенко Л.Г., Гаериллов Н.В., Коваль Н.Н. и др. // Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск: Наука, 1983. С. 41-59.
- [11] Груздев В.А., Крейндель Ю.Е., Семенов А.П. // ПТЭ. 1978. № 2. С. 193-195.

Бурятский институт естественных наук  
Улан-Уде

Поступило в Редакцию  
19 февраля 1992 г.  
В окончательной редакции  
28 октября 1992 г.