

04;10;12

Плазменный катод электронного ускорителя с большим сечением пучка

© Н.В. Гаврилов, В.В. Осипов, О.А. Буреев, Д.Р. Емлин,
А.С. Каменецких, В.А. Шитов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург
E-mail: gavrilov@ier.uran.ru

Поступило в Редакцию 9 июля 2004 г.

Предложен плазменный катод с сеточной стабилизацией на основе контрагированного протяженной щелью (1000 mm) тлеющего разряда низкого давления с полым анодом, площадь эмиттера электронов в котором увеличена на порядок по сравнению с системами, в которых электроны извлекаются непосредственно из плазмы в полости катода. Определены условия зажигания разряда, переключения тока на полый анод и достижения равномерной эмиссии плазменного катода. При ускоряющем напряжении 160 kV получен пучок сечением 1000×180 mm с током в несколько ампер и длительностью импульсов тока до 10^{-3} s. Плазменный катод работает в условиях технического вакуума (воздух, 0.1 Pa), обеспечивая высокую стабильность и повторяемость формы импульсов тока пучка.

Создание простого и надежного плазменного катода с большой рабочей поверхностью, способного работать в диапазоне длительностей импульса от 10^{-5} s до непрерывного режима и амплитуд тока эмиссии 0.1–10 A и более, открывает возможности развития технологических электроионизационных лазеров с регулируемой высокой пиковой мощностью и длительностью импульса. Поскольку энергетическая эффективность систем с накаливаемыми нитями в импульсных режимах невелика [1], а минимальный ток дуговых плазменных эмиттеров [2] составляет десятки ампер, представляет интерес использование для этой цели тлеющего разряда, способного функционировать как в импульсном сильноточном, так и в непрерывном слаботочном режиме горения.

Наиболее низкое рабочее давление, необходимое для поддержания электрической прочности высоковольтного промежутка, достигается в тлеющем разряде с полым катодом при отношении площадей анода и катода $\geq 10^{-2}$ [3], что затрудняет создание плазменного катода с

большой рабочей поверхностью, площадь которой в известных системах такого типа составляет $\sim 100 \text{ cm}^2$ [4]. Нарушение соотношения площадей электродов ограничивает рабочее напряжение ускорителя на уровне, определяемом условиями газового пробоя [5]. Использование анодной плазмы разряда, контрагированного малым отверстием, затруднено из-за значительной неоднородности плазмы, а генерация анодной плазмы в многоканальном режиме горения разряда возможна только в ограниченном диапазоне значений тока разряда [6]. Возможна также работа нескольких катодных камер на общий полый анод [7], однако необходимость автономного электрического и газового питания каждой камеры затрудняет эксплуатацию и снижает надежность плазменного катода.

В описываемом плазменном катоде ток тлеющего разряда с полым катодом замыкается на анод через протяженную щель. Близкое к равномерному распределение тока разряда вдоль щели обеспечивает генерацию анодной плазмы, однородной в направлении оси щели, и создание плазменного эмиттера с большой площадью поверхности в результате поперечной относительно щели расходимости электронного потока в анодной области разряда. Для коррекции поперечной неоднородности эмиссии плазмы используется сетка с переменной электрической прозрачностью.

Электродная система тлеющего разряда (рис. 1) включает полый катод 1 диаметром 200 мм и длиной 1000 мм и полый анод 2, часть поверхности которого с размерами $180 \times 1000 \text{ mm}$ закрыта металлической сеткой 3. Сетка может быть электрически изолирована от анодного электрода. Для зажигания разряда используется натянутая вдоль оси катода вольфрамовая нить 4, которая через резистор R соединена с положительным выводом источника питания разряда. В катоде прорезана щель длиной 1000 мм, ширина которой изменялась в пределах $h = 10\text{--}40 \text{ mm}$. Электродная система тлеющего разряда размещена внутри корпуса 5, который имеет потенциал анода разряда. Рабочий газ подается в катодную полость. Длина высоковольтных промежутков в вакуумной камере составляет 80–100 мм. Вакуум создается паромасляным насосом без заливки жидкого азота в ловушку.

Установившееся состояние разряда достигается в результате зажигания тлеющего разряда между нитью и катодом и последующего развития разряда на анод. Напряжение зажигания разряда составляло

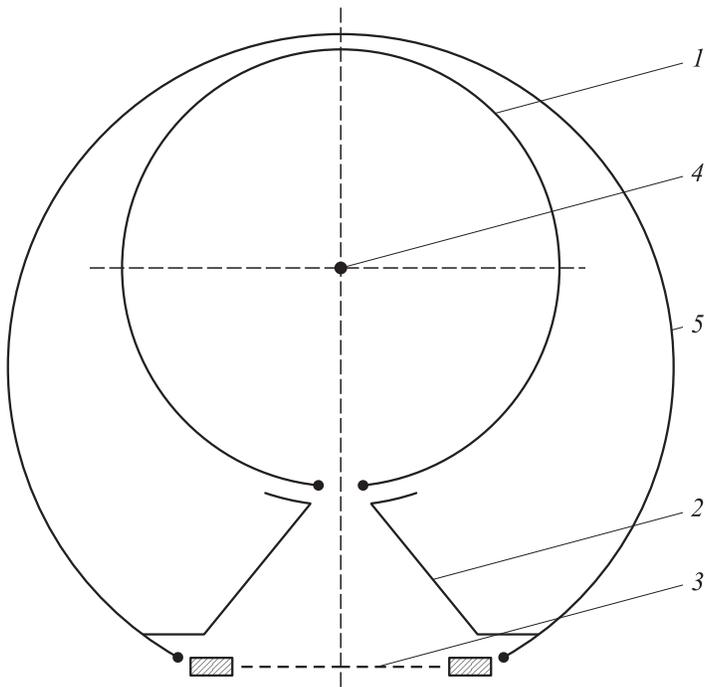


Рис. 1. Схема электродной системы плазменного катода электронного ускорителя: 1 — катод, 2 — анод, 3 — сетка, 4 — вольфрамовая нить, 5 — корпус.

2.6–1.5 kV при давлении воздуха $4-6 \cdot 10^{-2}$ Pa. С увеличением перенапряжения на промежутке (1–2.5) и давления газа время запаздывания разряда уменьшается с 200 до $50 \mu\text{s}$. Время переключения тока разряда на анод зависело от величины сопротивления R , уменьшение которого в пределах $1-0.1 \text{ k}\Omega$ приводило к росту тока на нить и сокращению времени переключения до $20-30 \mu\text{s}$ (рис. 2). Быстрое переключение при низких давлениях газа имеет место при $R = 0$, однако в этом случае ток на нить I_1 составлял до $1/3$ от тока разряда. Влияние величины R на скорость переключения тока на анод определяется динамикой ионного слоя пространственного заряда в катодной полости. Рост тока I_1 на нить и снижение потенциала плазмы на величину $I_1 R$ приводят к сокращению толщины катодного слоя и снижению высоты

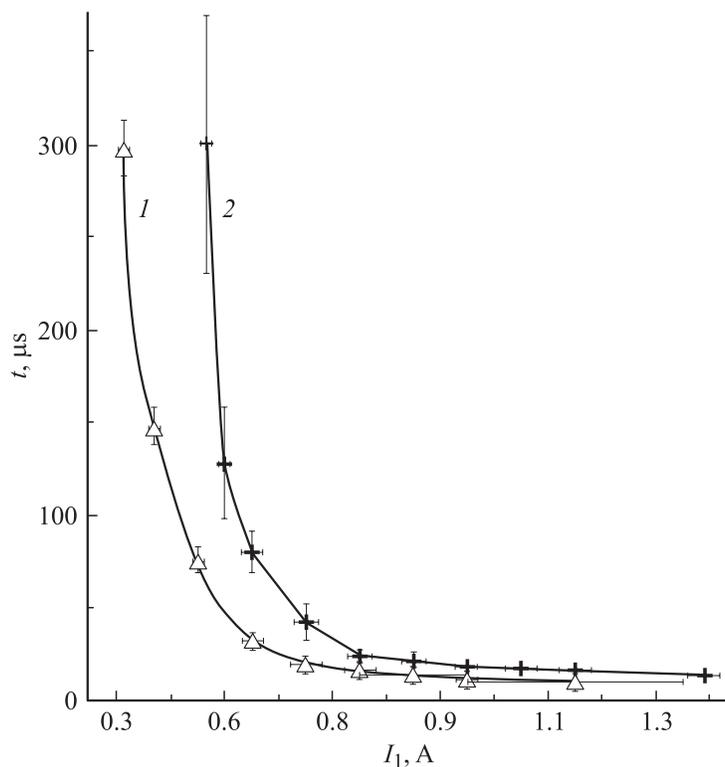


Рис. 2. Зависимости времени переключения тока разряда на анод от величины тока на нить. Давление аргона, P_a : $2.2 \cdot 10^{-2}$ (2) и $5 \cdot 10^{-2}$ (1).

потенциального барьера в катодной апертуре. В результате увеличивается ток быстрых электронов, проникающих в анодную полость, и обратный ионный ток, что в итоге завершается разрывом катодного слоя и переключением тока на анод [8]. Чем больше начальный ток в цепи нити и выше давление газа, тем быстрее происходит развитие разряда на анод. В установившемся состоянии разности потенциалов катодной и анодной плазмы составляет 10–40 В.

Устойчивое горение разряда с близким к равномерному распределением тока вдоль щели обеспечивается при размерах щели, площадь

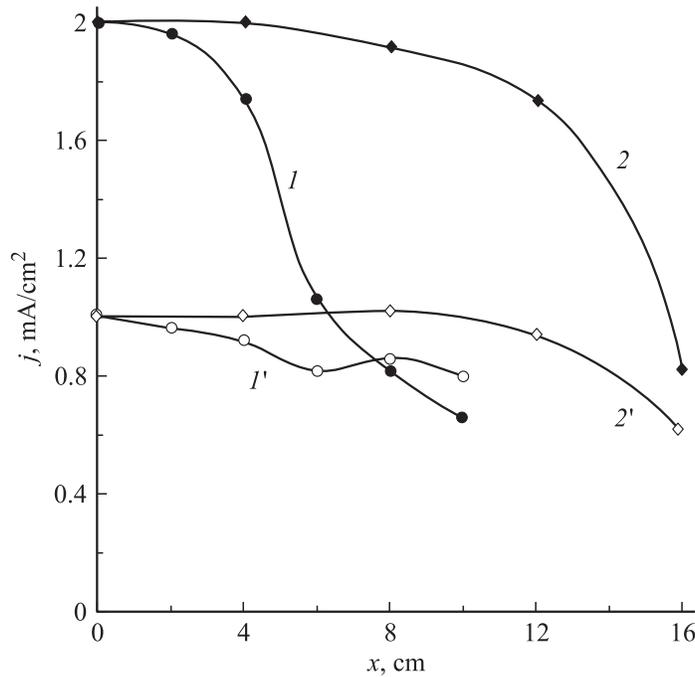


Рис. 3. Поперечные (I, I') и продольные ($2, 2'$) профили плотности тока электронного пучка: $I, 2$ — сетка с шагом 0.6×0.6 мм; $I', 2'$ — с использованием дополнительной корректирующей сетки. Ширина катодной апертуры 4 мм. Ток разряда 1 А. Ток пучка, А: 0.65 ($I, 2$) и 0.43 ($I', 2'$), ускоряющее напряжение 1 кВ, длина ускоряющего промежутка 4 см. Давление аргона 0.05 Па.

которой на порядок величины превосходит значение, соответствующее оптимальному отношению площадей поверхностей анода и катода $S_c/S_a \sim (M_i/m_e)^{1/2}$, где M_i, m_e — масса иона и электрона соответственно [3]. При уменьшении ширины щели разряд контрагировался, увеличение ширины приводило к росту минимального рабочего давления газа или напряжения горения разряда. Устойчивое горение тлеющего разряда при большой ширине щели также обусловлено экранирующим влиянием катодного слоя, толщина которого в разряде с осцилляцией электронов может превосходить значения, оцениваемые с использованием соотношения Чайльда–Ленгмюра.

Распределения плотности тока электронного пучка, полученные на макете с размерами сетки 350×200 mm, приведены на рис. 3. Неоднородность в направлении, параллельном щели, составляла $\sim 10\%$ от максимального значения тока на длине, равной 0.6 от длины катода, полная ширина поперечного распределения на половине его высоты составила около 100–120 mm при ширине щели 40–20 mm и расстоянии между сеткой и щелью, равном 100 mm. Уменьшение расстояния до сетки и ширины щели делает поперечное распределение более неравномерным. Использование сетки с переменной прозрачностью для коррекции поперечного распределения плотности эмиссионного тока позволяет существенно снизить неоднородность эмиссии (рис. 3, кривые 1', 2').

В исследуемой системе, как и в дуговых плазменных катодах с положительным анодным падением потенциала, возможно сеточное управление эмиссией плазменного катода [9]. При подаче между сеткой и анодным электродом импульсного напряжения были сформированы импульсы тока электронной эмиссии с длительностью нарастания тока, определяемой фронтом импульса управления (несколько μs).

Высоковольтные испытания проводились при постоянном ускоряющем напряжении 160 kV в импульсно-периодическом режиме генерации пучка с частотой 1–10 Hz. В качестве рабочего газа использовался воздух, давление которого в вакуумной камере ускорителя составляло 0.06 Pa. При длительности импульсов тока 0.4–1 ms был получен электронный пучок с током в несколько ампер. Изменение амплитуды тока от импульса к импульсу не превышало 10%, нестабильность длительности, обусловленная статистическим разбросом времени зажигания, составляла несколько десятков микросекунд. Значительная длительность фронта и спада импульса тока ($> 100 \mu s$) может быть уменьшена до нескольких десятков μs доработкой импульсного трансформатора и до нескольких единиц μs методом сеточного управления. Эффективность извлечения электронов, определяемая отношением тока пучка к току тлеющего разряда, при размере ячеек сетки 0.2×0.2 mm и длине ускоряющего зазора 80 mm составила 0.5.

Достоинствами предложенного плазменного катода являются надежность и простота эксплуатации, большой ресурс катода и его устойчивая работа в условиях технического вакуума, высокая стабильность и повторяемость формы импульсов, широкий диапазон изменения длительности импульса и тока пучка.

Список литературы

- [1] *Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М.* // Электронные пучки большого сечения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 112 с.
- [2] *Гаврилов Н.В., Ковальчук Б.М., Крейнделъ Ю.Е.* и др. // ПТЭ. 1981. № 3. С. 152–154.
- [3] *Метель А.С.* // ЖТФ. 1984. Т. 54. В. 2. С. 241–247.
- [4] *Мельник Ю.А., Метель А.С., Ушаков Г.Д.* // Тез. докл. 7 Всес. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. 1. С. 113–115.
- [5] *Bayless Y.R.* // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. N 6. P. 1158–1160.
- [6] *Журавлев Б.И., Прилепский В.В., Горлатов В.С.* // ПТЭ. 1993. № 3. С. 215–218.
- [7] *Бойко В.В., Кузьмичев А.И., Суханов В.Н.* и др. // Тез. докл. 1 Всес. совещания по плазменной эмиссионной электронике. Улан-Удэ, 1991. С. 106–109.
- [8] *Источники электронов с плазменным эмиттером / Сб. статей под ред. Ю.Е. Крейнделя.* Новосибирск: Наука, 1983. С. 5–14.
- [9] *Гушенец В.И., Коваль Н.Н., Крейнделъ Ю.Е.* и др. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 11. С. 2264–2268.