

## Сильноточная электронная пушка с плазменным анодом на основе отражательного разряда, инициируемого с катода

*П.П. Кизириди, Г.Е. Озур\**

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

*\*ozur@lve.hcei.tsc.ru*

**Аннотация.** Предложена и опробована новая схема зажигания сильноточного отражательного разряда низкого давления (аргон, 0.027–0.053 Па), формирующего плазменный анод сильноточной электронной пушки. Разряд с током до 2 кА инициируется электронами, эмитированными дуговыми источниками плазмы, встроенными в дисковый катод. На кольцевом аноде отражательного разряда поддерживается постоянное напряжение 150–311 В, что существенно ниже напряжения зажигания разряда в отсутствие электронов, инжектируемых извне. Изучены основные характеристики сильноточной электронной пушки с предложенной схемой формирования плазменного анода.

**Ключевые слова:** сильноточный электронный пучок, дуговые источники плазмы, плазменный анод, сильноточный отражательный разряд

### 1. Введение

Источники низкоэнергетических (до 30 кэВ) сильноточных (десятки кА) электронных пучков (НСЭП) микросекундной длительности (2–4 мкс) широко используются для модификации поверхностных слоёв металлов и сплавов методом импульсного плавления [1–3]. До недавнего времени для формирования НСЭП использовались, в основном, пушки с многопроволочным медным взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом на основе сильноточного отражательного разряда [1–3]. Одной из актуальных проблем генерирования НСЭП является обеспечение однородности распределения плотности энергии в поперечном сечении [5]. Как указано в [4], при транспортировке НСЭП в плазменном канале в ведущем магнитном поле максимум плотности энергии НСЭП приходится на центральную часть пучка, даже если инжектируемый из двойного слоя пучок является макроскопически однородным. Для компенсации этого негативного эффекта нами было предложено увеличить концентрацию анодной плазмы в периферийной части плазменного столба [5] по сравнению с его центральной частью, перераспределять плотность энергии пучка с помощью ферромагнитных полых цилиндров, располагаемых за коллектором [6] или использовать оба метода в комплексе.

В случае источников НСЭП с катодным узлом со встроенными дуговыми источниками плазмы [7, 8], который может работать без предварительно создаваемого плазменного анода, т.е. в режиме вакуумного или газонаполненного диода, мы предлагаем новый способ улучшения однородности пучка. Для этого используется сильноточный отражательный разряд (ОР) в рабочем газе низкого давления (около 0.02–0.06 Па в случае аргона, азота, воздуха), инициируемый электронами, эмитированными катодной плазмой, возникающей при срабатывании дуговых источников. Предлагаемая схема электронной пушки представлена на Рис. 1. В этой схеме, плазменный анод фактически синтезируется в течение импульса пучка, а не создаётся предварительно, как это было в [4–6].

При срабатывании дуговых источников, электроны, эмитируемые катодными пятнами, инжектируются в сторону коллектора вдоль ведущего магнитного поля. Поскольку предельный вакуумный ток при энергиях электронов 10–30 кэВ не превышает десятков ампер, то цилиндрический пучок быстро выродится в *трубчатый*. Таким образом, инициируемый катодными электронами отражательный разряд в системе «взрывоэмиссионный катод-анод-коллектор» будет иметь повышенную концентрацию плазмы в периферийной части столба разряда, как это и требуется по выводам работы [5]. В

настоящей работе представлены предварительные результаты по генерированию НСЭП в предложенной системе.

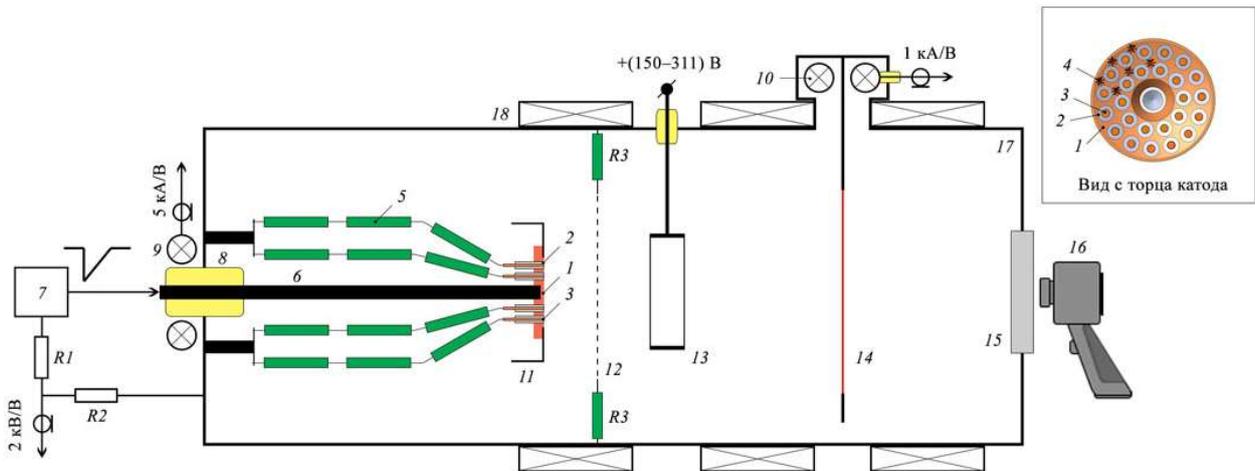


Рис. 1. Схема эксперимента. 1 – катод; 2 – керамические трубки; 3 – медные электроды; 4 – пучок медных проволок; 5 – резистор ТВО-2 (750 Ом); 6 – катододержатель; 7 – генератор высоковольтных импульсов (ГВИ); 8 – изолятор ввода ускоряющего напряжения; 9 и 10 – пояса Роговского; 11 – экран; 12 – сетка; 13 – анод; 14 – теплоизоляционная мишень; 15 – окно из флюорита кальция; 16 – тепловизор Testo 875-1; 17 – вакуумная камера; 18 – соленоид. R1, R2 – активный делитель напряжения, R3 – резисторы автосмещения.

## 2. Предварительные оценки

Оценим концентрацию анодной плазмы, нарабатываемой в предложенной разрядной системе. Изменение концентрации плазмы во времени (рекомбинацией в объёме пренебрегаем) можно выразить следующим образом:

$$\frac{dn_i}{dt} = n_b n_0 \sigma_{i1} v_b + n_i n_0 \sigma_{i2} v_{pe} - n_i / \tau_i. \quad (1)$$

Первый член в правой части уравнения (1) представляет собой скорость ионизации катодными электронами (электронами пучка), второй – скорость ионизации плазменными электронами, третий член характеризует скорость ухода ионов из объёма плазменного анода. Здесь  $n_b$  – концентрация электронов пучка,  $n_0$  – концентрация нейтралов,  $\sigma_{i1}$  и  $\sigma_{i2}$  – сечение ионизации молекул рабочего газа электронами пучка и плазменными электронами, соответственно,  $v_b$  и  $v_{pe}$  – скорости электронов пучка и плазменных электронов, соответственно,  $n_i$  – концентрация ионов, которая равна концентрации плазменных электронов,  $\tau_i$  – характерное время ухода иона из объёма плазменного анода.

Несложные оценки показывают, что первый и второй члены правой части уравнения сопоставимы по величине (причём первый даже несколько меньше). Исключив первый член из уравнения (1), можно легко его проинтегрировать:

$$n_i = n_{i0} \exp[n_0 \sigma_{i2} v_{pe} - 1 / \tau_i] t, \quad (2)$$

где  $n_{i0}$  определим из начальных условий. Для этого будем считать, что величина  $n_{i0}$  равна начальной концентрации электронов пучка:  $n_{i0} = n_{b0} = j_{b0} / e v_b$ , где  $j_{b0}$  – начальная плотность тока пучка,  $e$  – заряд электрона. В свою очередь,  $j_{b0} = I_b / S$ , где  $I_b$  – предельный вакуумный ток цилиндрического пучка (ток Бурсиана),  $S \approx 20 \text{ см}^2$  – площадь поперечного сечения пучка. Несложные оценки показывают, что в нашем случае  $j_{b0} \approx 1 \text{ А/см}^2$ , а  $n_{i0} \approx 10^9 \text{ см}^{-3}$ . Время,

требуемое для достижения этой концентрации, можно определить по формуле  $t_i = (n_0 \sigma_{i1} v_b)^{-1}$  [9]. В нашем случае, эта величина составит  $t_i \approx 1$  мкс.

Величину  $\tau_l$  определим из отношения  $L/v_i$ , где  $L \approx 10$  см – расстояние между катодом и коллектором,  $v_i \approx 2.7$  см/мкс – средняя скорость иона  $Ag^+$ , прошедшего разность потенциалов 300 В. При  $n_0 = 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $\sigma_{i2} = 2 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>,  $v_{pe} = 10^9$  см/с, первый член в показателе экспоненты значительно больше второго, и последним можно пренебречь. Подставляя эти значения в (2), получим, что через  $t = 3-3.5$  мкс после зажигания ОР величина  $n_i$  составит примерно  $10^{12}$  см<sup>-3</sup> (что и необходимо для транспортировки пучка с плотностью тока около 1 кА/см<sup>2</sup>) и будет дальше быстро расти.

Из приведённых оценок следует важный вывод: для достижения минимально необходимой концентрации ионов в плазменном аноде *не требуется* никаких катодных пятен для функционирования ОР в предлагаемой системе в отличие от самостоятельного сильноточного ОР, используемого в традиционных источниках НСЭП с предварительным созданием плазменного анода. Хотя в реальности, возникновение катодных пятен и в этом разряде не исключено; более того – весьма вероятно.

Отметим, что проделанные выше оценки  $n_i$  являются оценками снизу (что и показали эксперименты, представленные в следующем разделе). Как отмечалось выше, величина  $n_i$  может быть существенно выше за счёт вклада отражённых от коллектора пучковых электронов и вторичных электронов, выбитых из него. Часть плазменных электронов, рождаемых при образовании электрон-ионных пар под действием высокоэнергетического пучковых электронов и имеющих энергию порядка 50–100 эВ, также внесёт значительный вклад в ионизацию рабочего газа. Доля таких электронов может достигать 7–10% при энергии катодных электронов 10–15 кэВ [10]. Кроме того, осцилляции значительной части плазменных электронов также значительно ускорят процесс формирования плазменного анода необходимой концентрации. И если, наконец, учесть возможность возникновения катодных пятен на коллекторе и сетке, то становится ясным, что достижение необходимой величины  $n_i$  в плазменном аноде может занять намного меньше времени, чем указано выше.

### 3. Эксперимент

В экспериментах использовался катодный узел с 25-ю дуговыми источниками плазмы, описанный в [11]. При подаче импульса напряжения на катод происходит пробой по поверхности торцов керамических трубок 2 между катодом 1 и электродами 3, образующими в совокупности дуговые источники плазмы – эмиттеры электронов. Эмитированные электроны ионизуют рабочий газ, инициируя зажигание отражательного разряда в Пеннинговской ячейке, образованной кольцевым анодом 9 (находящимся под постоянным положительным потенциалом 150–311 В относительно корпуса пушки), коллектором пучка 8 и сеткой 14. Постоянство анодного напряжения обеспечивалось конденсатором большой ёмкости (400 мкФ). Коллектор и сетка являются катодами Пеннинговской разрядной ячейки. Разность потенциалов 150–311 В существенно меньше напряжения зажигания ОР без внешнего инициирования (около 3 кВ при давлениях аргона 0.02–0.06 Па), поэтому разряд зажигается только с началом эмиссии с катода. Сетка 14 экранирует поле катода, иначе осцилляции электронов в ОР были бы невозможны и, следовательно, формирование плазменного анода необходимой концентрации стало бы затруднительным. Сетка заземлялась либо наглухо, либо через резисторы автосмещения R3 общим сопротивлением 5 Ом.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя R1, R2; тока катода и тока пучка на коллектор – поясами Роговского 9 и 10. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц)

цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024. Измерение энергии пучка в импульсе и её распределение по сечению осуществлялось с помощью тепловизора 16 по методике, описанной в [12]. Пространственное разрешение тепловизионной диагностики, определяемое расплыванием теплового отпечатка в паузе (около 0.8 с) между импульсом пучка и моментом фиксации термограммы, составляло около 2 мм.

Держатель тепловизионной мишени 14 соединён с радиальным стержневым токопроводом, что позволяет одновременно (в одном импульсе) регистрировать осциллограмму тока пучка и его термограмму [12].

Ведущее магнитное поле индукцией до 0.15 Тл, создаваемое секционированным соленоидом 18, обеспечивало как горение сильноточного ОР, так и транспортировку пучка к коллектору [4].

Откачка рабочего объёма пушки осуществлялась турбомолекулярным насосом до давления 0.008 Па; напуск рабочего газа (аргон) до давлений 0.02–0.06 Па – с помощью прибора СНА-2.

На Рис. 2 приведены типичные осциллограммы и соответствующие им термограммы, полученные в различных режимах, а также соответствующие термограммам распределения плотности энергии по сечению пучка.

Изучение большого массива осциллограмм и термограмм выявило следующие закономерности:

1. Ток пучка на коллектор начинается с небольшим (не более 0.2–0.3 мкс) запаздыванием относительно тока в цепи анода (тока ОР). Таким образом, время нейтрализации пространственного заряда пучка примерно на порядок меньше, чем значения, приведённые в предыдущем разделе ( $t = 3–3.5$  мкс). Следовательно, дополнительные механизмы ионизации рабочего газа, упомянутые в предыдущем разделе, действительно работают.

2. Скорость нарастания тока пучка на коллектор заметно выше, чем в случае отсутствия плазменного анода.

3. Осциллограммы и термограммы свидетельствуют об улучшенной стабильности параметров пучка по сравнению со случаем традиционной пушки с многопроволочным медным взрывозамещающим катодом и плазменным анодом на основе самостоятельного предварительно зажигаемого сильноточного ОР.

4. Изменение анодного напряжения в диапазоне от 150 до 311 В практически не влияет на параметры пучка.

5. Наибольшая плотность энергии была получена в следующих условиях (соответствует Рис. 2): а) ведущее магнитное поле в области катода было фокусирующим (отключена первая по счёту от катода катушка); б) сетка 14 была заземлена через сопротивление 5 Ом. Эти меры позволили уменьшить утечки тока в катодном узле и через сетку «на землю». В отсутствие хотя бы одной из этих мер, энергия и плотность энергии пучка на коллекторе уменьшалась в 1.5–2 раза.

6. Распределение плотности энергии имеет максимум в центральной части пучка, хоть и не резкий. Это обусловлено тем, что в описанных экспериментах индукция собственного магнитного поля пучка достигала 0.1 Тл, т.е. была сопоставима с индукцией ведущего магнитного поля, что приводило к фокусировке пучка. В дальнейшем, предполагается увеличить индукцию ведущего магнитного поля вдвое, что будет достаточно для ослабления фокусирующего действия собственного магнитного поля.

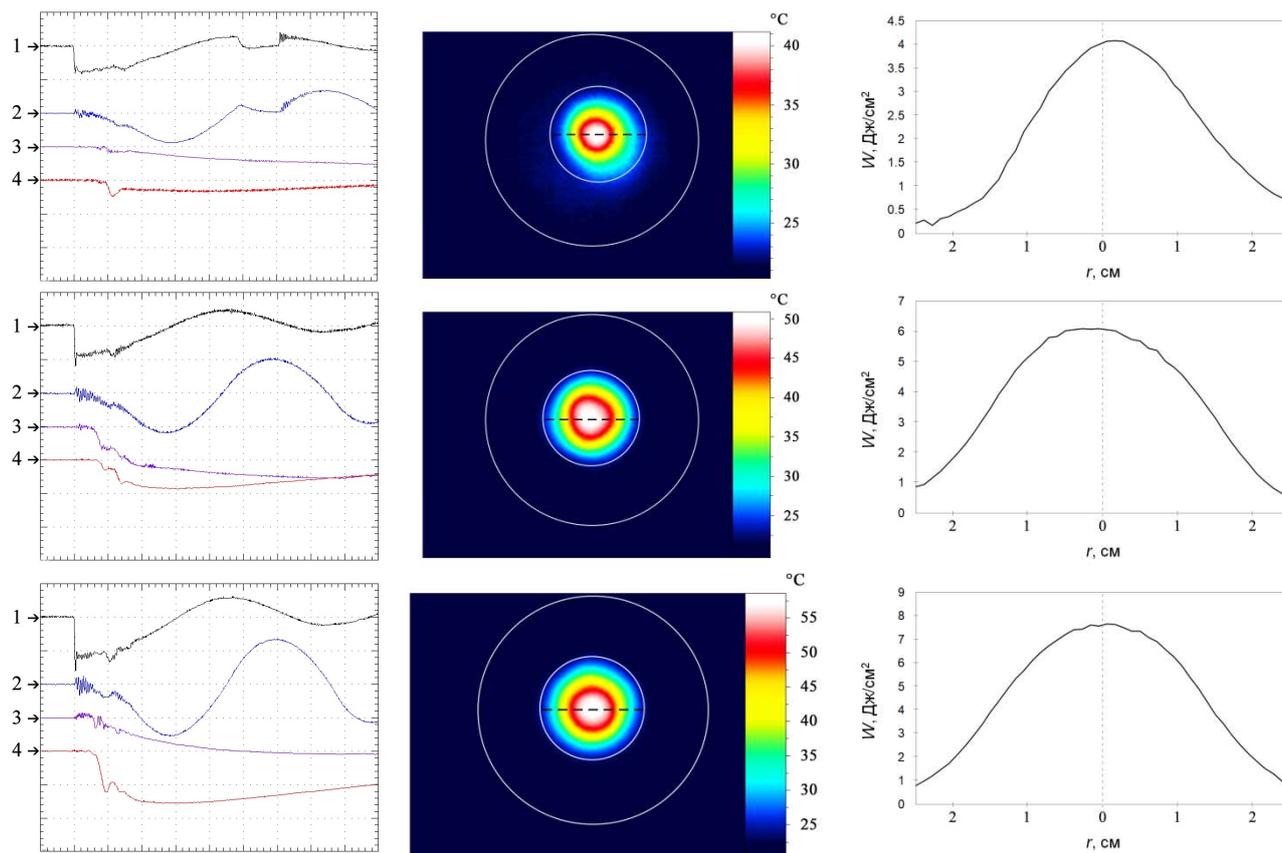


Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов (левый столбец), термограммы (средний столбец) и соответствующие им распределения плотности энергии по радиусу пучка (правый столбец) в сечении, показанном на термограммах пунктирной линией, полученные при различных значениях зарядного напряжения ГВИ ( $U_{ch}$ ). Масштаб осциллограмм по горизонтали: 1 мкс/дел. Масштабы осциллограмм по вертикали: ускоряющее напряжение (Ch1, 20 кВ/дел), полный ток катода (Ch2, 25 кА/дел), ток в цепи кольцевого анода (Ch3, 2 кА/дел) и ток пучка на коллектор (Ch4, 5 кА/дел).  $U_{ch} = 10$  кВ – верхняя строка,  $U_{ch} = 15$  кВ – средняя строка,  $U_{ch} = 20$  кВ – нижняя строка. Давление аргона 0.033 Па, индукция ведущего магнитного поля – 0.15 Тл (в максимуме, включены вторая и третья по ходу пучка катушки соленоида). Сопротивление в цепи сетки – 5 Ом, напряжение на аноде – 150 В.

#### 4. Заключение

Предложена схема формирования плазменного анода с помощью сильноточного отражательного разряда, инициируемого электронами, эмитированными катодными пятнами дуговых источников плазмы, встроенными во взрывоэмиссионный катод сильноточной электронной пушки. В начальной части импульса, инжектируемый вдоль ведущего магнитного поля электронный пучок с энергией электронов до 30 кэВ вырождается в трубчатый, что обеспечивает повышенную концентрацию заряженных частиц на периферии синтезируемого плазменного анода. Это условие необходимо для улучшения однородности распределения плотности энергии по сечению формируемого сильноточного электронного пучка.

Наряду с возможностью улучшения однородности пучка, предложенная схема перспективна в плане повышения энергетической эффективности источника, а именно: увеличения отношения энергии пучка в импульсе к энергии, запасённой в емкостном накопителе генератора высоковольтных импульсов. Это обеспечивается увеличенным током пучка в начальной части импульса (около 1 мкс), благодаря нейтрализации пространственного заряда пучка положительными ионами плазменного анода.

Питание цепи анода постоянным напряжением имеет также практический смысл. В отличие от импульсного питания (традиционно использовались импульсы напряжения амплитудой 5–9 кВ и длительностью несколько десятков микросекунд [5]), требующего достаточно дорогих тиристора и импульсного трансформатора, через который заряжается накопительный конденсатор, при питании постоянным напряжением достаточно зарядить конденсатор выпрямленным сетевым напряжением 311 В. Исчезает также необходимость синхронизации процессов зажигания разряда и генерирования пучка.

## 5. Список литературы

- [1] S.N. Meisner, E.V. Yakovlev, V.O. Semin, L.L. Meisner, V.P. Rotshtein, A.A. Neiman, F.A. D'yachenko, Mechanical behavior of Ti-Ta-based surface alloy fabricated on TiNi SMA by pulsed electron-beam melting of film/substrate system, *Applied Surface Science*, vol. **437**, 217, 2018; doi: 10.1016/j.apsusc.2017.12.107
- [2] Y. Uno, A. Okada, K. Uemura, P. Raharjo, T. Furukawa, K. Karato, High-efficiency finishing process for metal mold by large-area electron beam irradiation, *Precision Engineering*, vol. **29**, 449, 2005; doi: 10.1016/j.precisioneng.2004.12.005
- [3] J.W. Murray, A.T. Clare, Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. **212**, 2642, 2012; doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018
- [4] Г.Е. Озур, Д.И. Проскуровский, Генерация низкоэнергетических сильноточных электронных пучков в пушках с плазменным анодом, *Физика плазмы*, т. 44, № 1, 21, 2018; doi: 10.7868/S0367292118010146
- [5] П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, Характеристики сильноточной электронной пушки с плазменным анодом на основе гибридного разряда, *ЖТФ*, т. 90, № 2, 312, 2020; doi: 10.21883/JTF.2020.02.48826.206-19
- [6] P.P. Kiziridi, G.E. Ozur, On the Low-Energy, High-Current Electron Beam Profile Controlled Using Ferromagnetic Insertions, *Technical Physics*, vol. **60**(6), 917, 2015; doi: 10.1134/S1063784215060110
- [7] П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, Катодный узел сильноточной электронной пушки с многоканальным иницированием эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика, *Письма в ЖТФ*, т. 46, №. 15, 47, 2020; doi: 10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364
- [8] P.P. Kiziridi, G.E. Ozur, Production of Low-Energy, High-Current Electron Beams in a Gun with a Controlled Explosive Emission Cathode, *Vacuum*, vol. **194**, 110560, 2021; doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110560
- [9] М.В. Незлин, *Динамика пучков в плазме*, М.: Энергоатомиздат, 1982.
- [10] Г. Кальман, Б. Розен, Элементарные процессы при ионизации ударом материальных частиц, *Успехи физических наук*, т. 12, № 1, 105, 1932.
- [11] П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, А.Б. Марков, Компактный источник низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, *Прикладная физика*, № 4, 34, 2022; doi: 10.51368/1996-0948-2022-4-34-39
- [12] П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, Энергия в импульсе нерелятивистского сильноточного электронного пучка, *ЖТФ*, т. 92, № 6, 876, 2022; doi: 10.21883/JTF.2022.06.52518.316-21