

Сильноточная электронная пушка с радиально сходящимся пучком

П.П. Кизириди, Г.Е. Озур, В.И. Петров*

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Российская Федерация

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

Аннотация. Представлены некоторые характеристики электронной пушки с радиально сходящимся низкоэнергетическим (5–25 кэВ) сильноточным (до 30 кА) пучком микросекундной длительности, предназначенной для модификации поверхностных слоев протяжённых цилиндрических изделий и образцов. Катодный узел пушки включает кольцевой взрывоэмиссионный катод, в который встроены 18 резистивно развязанных дуговых источников плазмы, инициируемых пробоем по поверхности диэлектрика. Продемонстрирована работоспособность электронной пушки источника в режиме вакуумного диода (давление остаточных газов около 0.013 Па) и газонаполненного диода при давлении воздуха 0.05–0.09 Па. Показано, что плотность энергии пучка в импульсе достигает не менее 5–5.5 Дж/см² при зарядном напряжении генератора высоковольтных импульсов, питающего электронную пушку, 17 кВ, что является достаточным для оплавления подавляющего большинства металлов и сплавов.

Ключевые слова: радиально сходящийся сильноточный электронный пучок, кольцевой взрывоэмиссионный катод, дуговые источники плазмы, пробой по поверхности диэлектрика.

1. Введение

Модификация поверхностных слоёв металлических материалов является традиционной областью применения низкоэнергетических (до 30 кэВ) сильноточных (до 30 кА) электронных пучков (НСЭП) [1–6]. Формирование таких пучков осуществляется, как правило, в пушках с плазменным анодом и многоэмиттерным взрывоэмиссионным катодом [7, 8]. Высокая плотность энергии (до 15 Дж/см²) и короткая длительность импульса (2–4 мкс) позволяют выделить значительную энергию пучка в тонком (~1–10 мкм) поверхностном слое, доводя его до плавления и даже частичного испарения. Это позволяет развивать различные перспективные технологии, включая формирование поверхностных сплавов толщиной от долей до десятков микрон [1–7].

Созданные к настоящему времени электронные пушки источников НСЭП имеют планарно-аксиальную геометрию и формируют, как правило, цилиндрические пучки, транспортируемые вдоль силовых линий внешнего ведущего магнитного поля [7, 8]. Данное поле обеспечивает также зажигание сильноточного отражательного (Пеннинговского) разряда (как правило, в аргоне), формирующего плазменный анод электронной пушки. Вместе с тем, существует много задач, когда требуется облучать протяженные изделия цилиндрической или квази-цилиндрической формы, а для этого наиболее рационально использовать радиально сходящиеся пучки. К числу таких задач относятся формирование защитных покрытий оболочек ТВЭЛов ядерных реакторов для предотвращения/замедления коррозии и высокотемпературного окисления; повышение срока службы различного режущего и штампового инструмента, пар трения. Отсутствие электронных пушек с радиально сходящимся НСЭП обуславливает актуальность их разработки и создания.

Импульсные радиально сходящиеся электронные пучки применяются для самых разнообразных целей. Это накачка газовых лазеров [9], генерация СВЧ-излучения [10, 11] и, конечно же, модификация поверхностных слоев материалов [12, 13]. Практически все вышеупомянутые установки генерируют высокоэнергетические пучки (100 кэВ и выше) сравнительно небольшой плотности тока (единицы-десятки А/см²). Наиболее близкими по назначению к нашим источникам НСЭП являются установки серии «GESA», разработанные в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург) [12, 13].

В работах [12, 13], радиально сходящийся электронный пучок генерировался в пушке триодного типа с диаметром катода 28 см и диаметром сетки 20 см. Аксиальная длина катода и сетки составляла 35 см, а площадь поверхности катода 2900 см^2 . Общее число эмиттеров (пучки графитовых волокон) на катоде составляло 2815, в цепь каждого эмиттера последовательно включен резистор сопротивлением несколько кОм. Диаметр анода варьировался и составлял 1, 2 или 3 см. Высоковольтный генератор прямоугольных импульсов длительностью до 30 мкс обеспечивал ускоряющее напряжение между катодом и анодом амплитудой 100–120 кВ. Ток пучка на аноде достигал 2–5 кА.

Существенным недостатком установок «GESA» является сравнительно высокое ускоряющее напряжение (от 100 до 250 кВ), что приводит к высокой цене оборудования, снижает его надежность. Кроме того, достижение необходимой плотности энергии пучка за счет длительности импульса (из-за малой плотности тока) вынудило авторов [12, 13] использовать большие (около 10 см) межэлектродные радиальные зазоры, что приводило к осцилляциям значительной части электронов пучка, не попадающих на анод. Отметим также, что даже при таких межэлектродных зазорах авторы [12, 13] часто наблюдали их пробой из-за газовой выделения с анода под действием пучка. Для предотвращения пробоя авторы [12, 13] были вынуждены прогревать анод до 400–500 °С специальным импульсным источником тока перед началом импульса пучка. Благодаря более высокой плотности тока и меньшему (в несколько раз!) ускоряющему напряжению, отсутствию необходимости предварительного прогрева анода источники НСЭП представляются весьма перспективными. В настоящей работе описывается электронная пушка созданного нами источника «МикрЭП» (Микросекундный Электронный Пучок) с радиально сходящимся НСЭП.

2. Методика эксперимента

Для формирования радиально сходящегося НСЭП мы применили недавно разработанный нами катодный узел с многоканальным инициированием взрывной эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика [14, 15]. На Рис.1 приведен общий вид электронной пушки источника. В односекционный кольцевой катод 1 из дюралюминия внутренним диаметром 8 см равномерно по окружности встроены 18 дуговых источников плазмы, включающие трубки 2 и медные электроды 3. Наружный диаметр трубок составляет 4 мм, внутренний – 2 мм; диаметр электродов также равен 2 мм. Каждый из 18-ти электродов заземляется через резисторы 4 (три последовательно соединенных резистора с номинальным сопротивлением 750 Ом каждый). Для увеличения количества взрывоэмиссионных центров в кольцо также впрессованы 12 пучков тонких (80 мкм) медных проволок 5.

Пушка работает следующим образом. При подаче на катод импульса напряжения отрицательной полярности амплитудой 5–25 кВ от генератора высоковольтных импульсов (ГВИ) происходит пробой по поверхности торцов керамических трубок 2 и возникает плазма, состоящая из материалов катода (катодные пятна), керамических трубок и электродов 3, а также ионизованного десорбированного газа. Образование катодных пятен (взрывоэмиссионных центров) при протекании тока через поджигающие промежутки (эти пятна можно назвать затравочными) обеспечивается тем, что амплитуда тока (2.2–11.1 А) через каждый промежуток превышает так называемый пороговый ток дуги [16], который составляет доли-единицы ампер практически для всех материалов (например, для меди он равен около 2 А). Электроны, эмитируемые затравочными, а также возникшими в течение импульса катодными пятнами, ускоряются в радиальном направлении к аноду, формируя сходящийся пучок. Рост тока обеспечивается, как увеличением числа катодных пятен, так и их расширением, т.е. увеличением площади эмиссионной поверхности [7, 17].

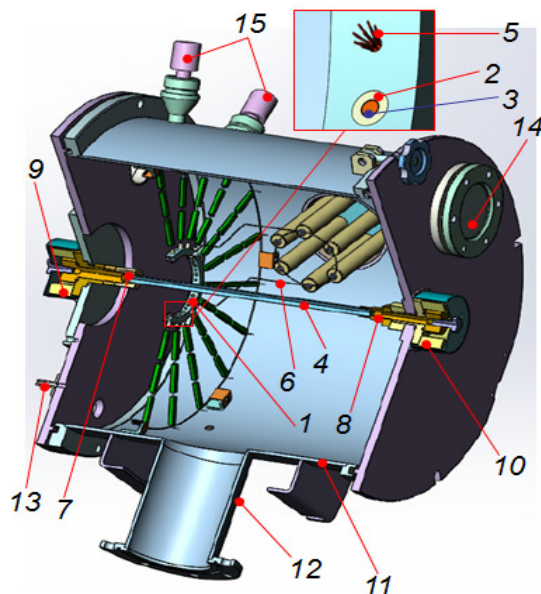


Рис.1. Общий вид рабочей камеры и электронной пушки источника НСЭП: 1 – катод; 2 – керамическая трубка; 3 – электрод дугового источника плазмы; 4 – анод; 5 – пучок медных проволок; 6 – подводы импульса высокого напряжения от передающей линии к катоду; 7 и 8 – цанговые разъемы; 9 и 10 – пояса Роговского *ПР1* и *ПР2* (см. Рис.2); 11 – рабочая камера; 12 – патрубок откачки; 13 – патрубок напуска рабочего газа; 14 – смотровое окно со свинцовым стеклом; 15 – датчики давления газа.

Анодом 4 служил стержень из нержавеющей стали или латуни диаметром 1 см. В ряде случаев часть анода (область воздействия пучка) оборачивалась медной фольгой толщиной 0.5 мм (см. Рис.4в). Анод заземлялся с двух сторон через цанговые токосъемы 7 и 8.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, полного тока катода – поясом Роговского, тока пучка на анод также поясами Роговского, охватывающими оба токосъема. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц) цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024. В каждом режиме производилось 5 выстрелов.

Плотность энергии пучка в импульсе и ее распределение по поверхности анода оценивались по автографам пучка.

Откачка рабочего объема пушки осуществлялась турбомолекулярным насосом до давления 0.013 Па; после откачки напускался рабочий газ до давлений 0.05–0.09 Па.

3. Результаты и обсуждение

На Рис.2 приведены типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (без корректировки на индуктивное падение напряжения на передающей линии и подводящих проводниках), полного тока в контуре и токов в цепи анода. Токи, регистрируемые в цепи 1-го и 2-го токосъемов, различны ввиду различной длины отрезков анода от плоскости катода до соответствующего токосъема, а значит и их индуктивности (расчетные индуктивности составляют 76 и 207 нГн). Причем отношение этих токов, как правило, примерно обратно пропорционально отношению этих индуктивностей. Суммарный ток пучка на анод (сумма токов, регистрируемых поясами *ПР1* и *ПР2*) заметно меньше полного тока в контуре, регистрируемого датчиком *ПР3*, расположенным в ГВИ. Это свидетельствует о наличии утечек тока по изоляторам и/или на стенку камеры, приводящих в итоге к пробое и переходу разряда в колебательный режим. Осциллограммы токов, их временной ход близки к осциллограммам, полученным для планарно-аксиальной геометрии диода [17].

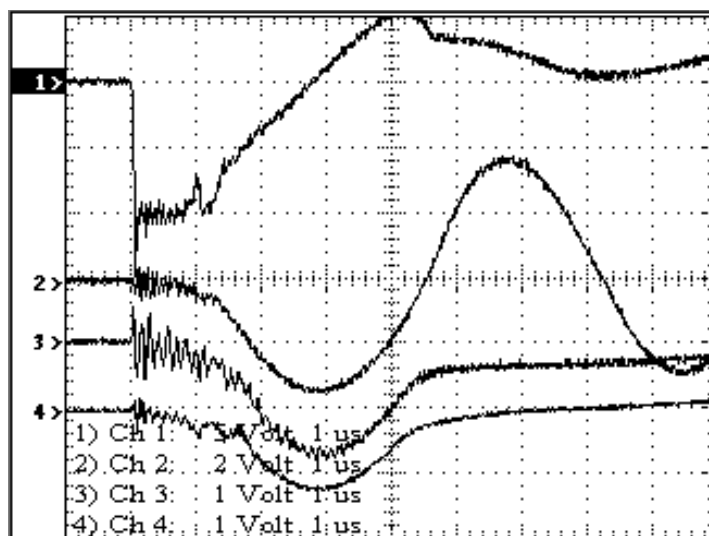


Рис.2. Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (Ch1, 10 кВ/деление), полного тока катода (Ch2, 24 кА/деление) и токов пучка на анод (Ch3, датчик ПР2, 5 кА/деление и Ch4, датчик ПР1, 10 кА/деление); горизонтальная шкала – 1 мкс/деление. $U_{зар} = 20$ кВ, $p = 0.09$ Па.

На Рис.3 приведена зависимость суммарного тока пучка на анод, I_a , от зарядного напряжения ГВИ, U_{ch} , т.е. фактически от ускоряющего напряжения. Видно, что ток пучка на анод монотонно растёт с увеличением U_{ch} .

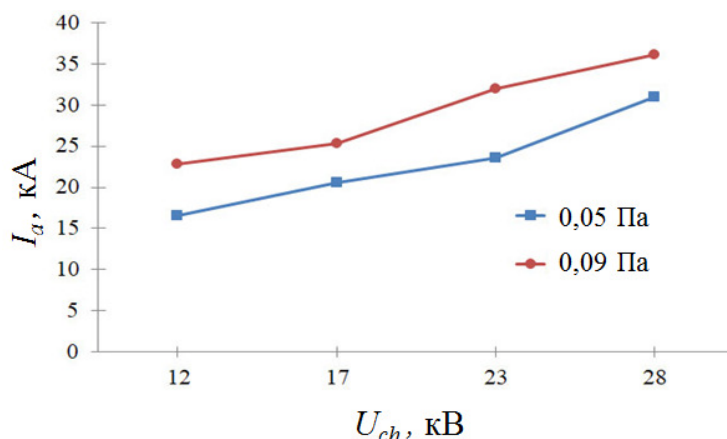


Рис.3. Зависимость амплитуды тока на анод от зарядного напряжения ГВИ для различных значений давления воздуха в рабочей камере.

На Рис.4 приведены фотографии анодов после облучения НСЭП при давлении воздуха 0.09 Па. На автографах, оставленных пучком, видно, что в области близкой к плоскости расположения эмиттеров катода наблюдаются следы интенсивного плавления. Учитывая, что порог импульсного плавления меди при длительности импульса 2–3 мкс составляет 5–5.5 Дж/см² [18], можно считать, что указанная плотность энергии достигается, причем при сравнительно скромной величине $U_{ch} = 17$ кВ. Длина области оплавления вдоль оси анода составляет 1–2 см, за ней следует область менее интенсивного плавления (ореол пучка). По окружности анода следы воздействия пучка выглядят более-менее однородно, что свидетельствует об азимутальной однородности пучка. В режиме вакуумного диода (0.013 Па) азимутальная однородность пучка иногда нарушалась.

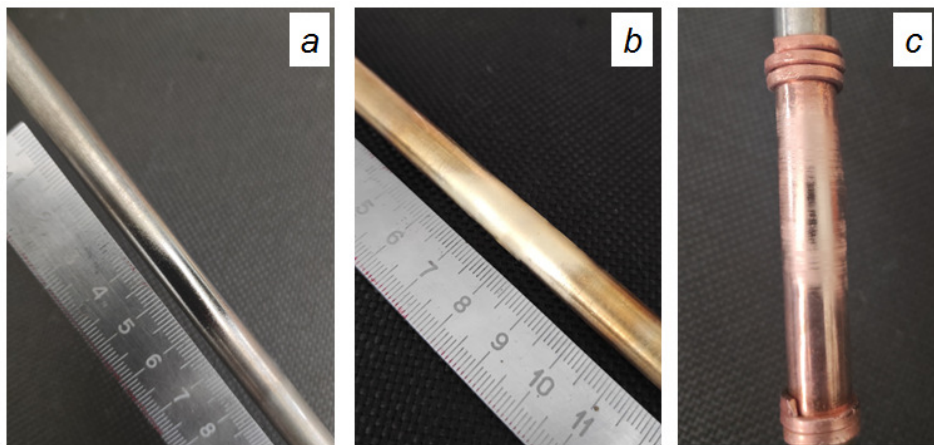


Рис.4. Автографы пучка на нержавеющей стали (a), латуни (b) меди (c). $U_{ch} = 17$ кВ, $p = 0.09$ Па.

4. Заключение

Впервые создан источник радиально сходящихся низкоэнергетических (5–25 кэВ) сильнотоковых (до 30 кА) электронных пучков «МикрЭП» с длительностью импульса 2–4 мкс. Электронная пушка источника способна функционировать в режиме вакуумного или газонаполненного диода при низких давлениях рабочего газа (для воздуха – около 0.05–0.1 Па), благодаря встроенным в катод резистивно развязанным дуговым источникам плазмы. Более стабильно пушка работает в варианте газонаполненного диода. Плотность энергии пучка в импульсе достигает не менее 5–5.5 Дж/см² при зарядном напряжении генератора высоковольтных импульсов, питающего электронную пушку, 17 кВ. Такая плотность энергии достаточна для оплавления подавляющего большинства металлов и сплавов. В азимутальном направлении автограф пучка на аноде выглядит однородным. Дальнейшее совершенствование источника будет заключаться в минимизации утечек электронного тока, а также в расширении области однородного оплавления анода (мишени) путем добавления катодных секций.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного Фонда (проект № 22-29-00070).

5. Литература

- [1] Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Markov A.B., Nazarov D.S., Shulov V.A., Ivanov Yu.F., Buchheit R.G., *J. Vac. Sci. & Techn. A.*, **16**(4), 2480, 1998; doi.org/10.1116/1.581369
- [2] Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Meisner L.L., Rotshtein V.P., Neiman A.A., D'yachenko F., *Applied Surface Science*, **437**, 217, 2018. doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.107
- [3] Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Furukawa T., Karato K., *Precision Engineering*, **29**, 449, 2005; doi:10.1016/j.precisioneng.2004.12.005
- [4] Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B., *Laser & Particle Beams*, **21**(2), 157, 2003; doi.org/10.1017/S0263034603212040
- [5] Murray J.W., Clare A.T., *J. of Materials Processing Techn.*, **212**, 2642, 2012; doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.07.018

- [6] Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф., *Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими сильноточными электронными пучками*. (Новосибирск: Наука, 2019).
- [7] Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., *Физика плазмы*, **44**(1), 21, 2018; doi: 10.7868/S0367292118010146
- [8] Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И., ПТЭ, **39**(4), 83, 1996;
- [9] Abdullin E.N., Ivanov N.G., Losev V.F., Morozov A.V., *Laser and Particle Beams*, **31**, 1, 2013; doi: 10.1017/S026303461300075X
- [10] Бугаев А.С., Климов А.И., Коваль Н.Н., Кошелев В.И., Сочугов Н.С., Щанин П.М., *Препринт ТНЦ СО АН СССР*, 25, 2, 1991.
- [11] Kovalchuk B.M., Polevin S.D., Tsygankov R.V., Zherlitsyn A.A., *IEEE Transactions on Plasma Science.*, **38**(10), 2819, 2010; doi: 10.1109/TPS.2010.2060367
- [12] Engelko V.I., Kuznetsov V.S., Georg Mueller, *J. Applied Physics*, **105**, 023305, 2009. doi: 10.1063/1.2996286
- [13] Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Русанов А.Е., Биржевой Г.А., *Вопросы атомной науки и техники. Серия: ЯДЕРНО-РЕАКТОРНЫЕ КОНСТАНТЫ*, **4**, 93, 2015.
- [14] Кизириди П.П., Озур Г.Е., *Письма в ЖТФ*, **46**(15), 47, 2020; doi: 10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364
- [15] Петров В.И., Кизириди П.П., Озур Г.Е., *ЖТФ*. **91**(11), 1764, 2021; doi: 10.21883/JTF.2021.11.51541.80-21
- [16] Кесаев И.Г. *Катодные процессы электрической дуги*. (Москва: Наука, 1968).
- [17] Месяц Г.А., Проскуровский Д.И., *Импульсный электрический разряд в вакууме*. (Новосибирск: Наука, 1984).
- [18] Rotshtein V.P., Ivanov Yu.F., Markov A.B., Proskurovsky D.I., Karlik K.V., Oskomov K.V., Uglov B.V., Kuleshov A.K., Novitskaya M.V., Dub S.N., Pauleau Y., Shulepov I.A., *Surf. Coat. Technol.*, **200**, 6378, 2006.