

## УВЕЛИЧЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ИМПУЛЬСЕ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

© 2023 г. П. П. Кизириди<sup>а,\*</sup>, Г. Е. Озур<sup>а,\*\*</sup>

<sup>а</sup>Институт сильноточной электроники СО РАН  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

\*e-mail: kiziridi\_pavel@mail.ru

\*\*e-mail: ozur@lve.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 25.10.2022 г.

После доработки 15.11.2022 г.

Принята к публикации 22.12.2022 г.

Исследованы энергетические характеристики сильноточной электронной пушки с радиально сходящимся электронным пучком. Катодный узел пушки состоял из одной или двух кольцевых секций с внутренним диаметром 8 см, каждая из которых включала 18 резистивно развязанных дуговых источников плазмы, инициируемых пробоем по поверхности диэлектрика. Показано, что электростатическое экранирование, препятствующее выходу электронов и ультрафиолетового излучения из катодной и анодной плазмы в пространство за катодом, снижает вероятность развития пробоя вдоль резисторов дуговых источников плазмы и позволяет примерно вдвое увеличить энергию пучка, выделяемую в аноде. В двухсекционном варианте катодного узла ширина автографа пучка на аноде (следа оплавления) составила около 7 см при аксиальном расстоянии между центрами секций 4 см.

DOI: 10.31857/S0032816223030072, EDN: IRXYDZ

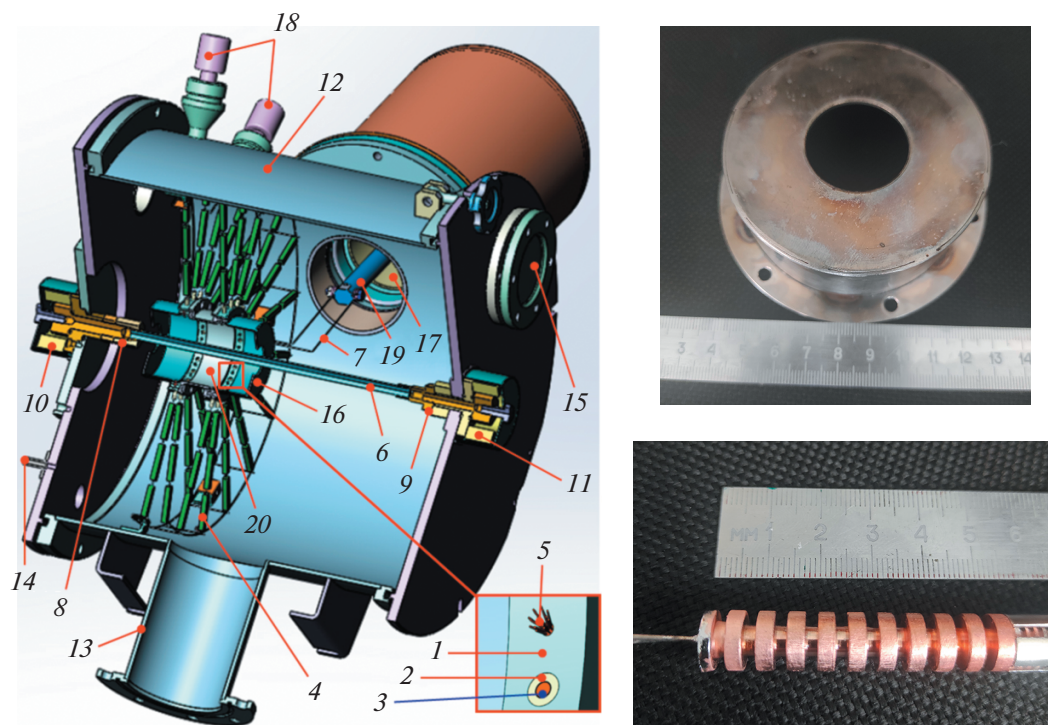
### ВВЕДЕНИЕ

Импульсные радиально сходящиеся электронные пучки применяются для самых разнообразных целей. Это накачка газовых лазеров [1], генерация СВЧ-излучения [2, 3] и модификация поверхностных слоев материалов [4, 5]. Практически все вышеупомянутые установки генерируют высокоэнергетические пучки (около 100 кэВ и выше) сравнительно небольшой плотности тока (единицы–десятки ампер на квадратный сантиметр) и небольшого общего тока пучка (до единиц килоампер). В работе [6] нами представлен источник низкоэнергетических (10–30 кэВ) сильноточных электронных пучков с плотностью тока на аноде несколько килоампер на квадратный сантиметр, общим током до 30 кА и длительностью импульса 2–4 мкс. В односекционном варианте катодный узел электронной пушки источника представляет собой кольцо из дюралюминия шириной 1 см и внутренним диаметром 8 см, в которое встроены 18 дуговых источников плазмы, инициируемых пробоем по поверхности диэлектрика. Данный метод возбуждения сильноточной взрывной электронной эмиссии был впервые предложен и реализован для пушек планарно-аксиальной геометрии [7, 8], генерирующих цилиндрические пучки, транспортируемые в продольном ведущем маг-

нитном поле. Пушки с таким катодным узлом работают не только в режиме плазмонеполненного диода, но и в режиме вакуумного и газонаполненного диода, поскольку возбуждение взрывной эмиссии в них не зависит от ширины ускоряющего зазора и его наполнения.

Наши эксперименты [8] показали, что осциллографические измерения дают значительное (более чем в 2.5 раза) завышение энергии пучка в импульсе по сравнению с калориметрическими измерениями из-за распадного тока коллекторной плазмы, ионы которой уходят в значительном количестве в радиальном направлении на стенку корпуса пушки, а электроны – на коллектор. Кроме того, значительные утечки электронного тока имели место вдоль поверхности изоляторов подвода напряжения к катоду, а также вдоль резисторов катодного узла. В совокупности это приводило к сравнительно невысокой эффективности передачи энергии, запасенной в емкостном накопителе, питающем электронную пушку, в энергию пучка (в среднем около 25%). При этом с ростом амплитуды импульса ускоряющего напряжения эффективность падала из-за роста утечек тока.

Перед началом экспериментов [6] с радиально сходящимся пучком мы предполагали, что в дан-



**Рис. 1.** Слева – общий вид рабочей камеры и электронной пушки: 1 – катод; 2 – керамическая трубка; 3 – электрод дугового источника плазмы; 4 – резистор ТВО-2; 5 – пучок медных проволок; 6 – стержневой анод; 7 – подводы импульса высокого напряжения от передающей линии к катоду; 8 и 9 – цанговые токосъемы; 10 и 11 – пояса Роговского; 12 – рабочая камера; 13 – патрубок откачки; 14 – патрубок напуска рабочего газа; 15 – смотровое окно со свинцовым стеклом; 16 – чашеобразный экран; 17 – изолятор ввода ускоряющего напряжения; 18 – датчики давления газа; 19 – стержневой ввод ускоряющего напряжения; 20 – соединительный стакан. Справа – фотографии экрана 16 (вверху) и калориметра (внизу).

ной геометрии диода эффективность передачи энергии будет существенно выше вследствие значительной удаленности стенок вакуумной камеры и высоковольтного изолятора ввода ускоряющего напряжения. Однако эксперименты [6] показали, что это не так. Утечки по-прежнему были значительными.

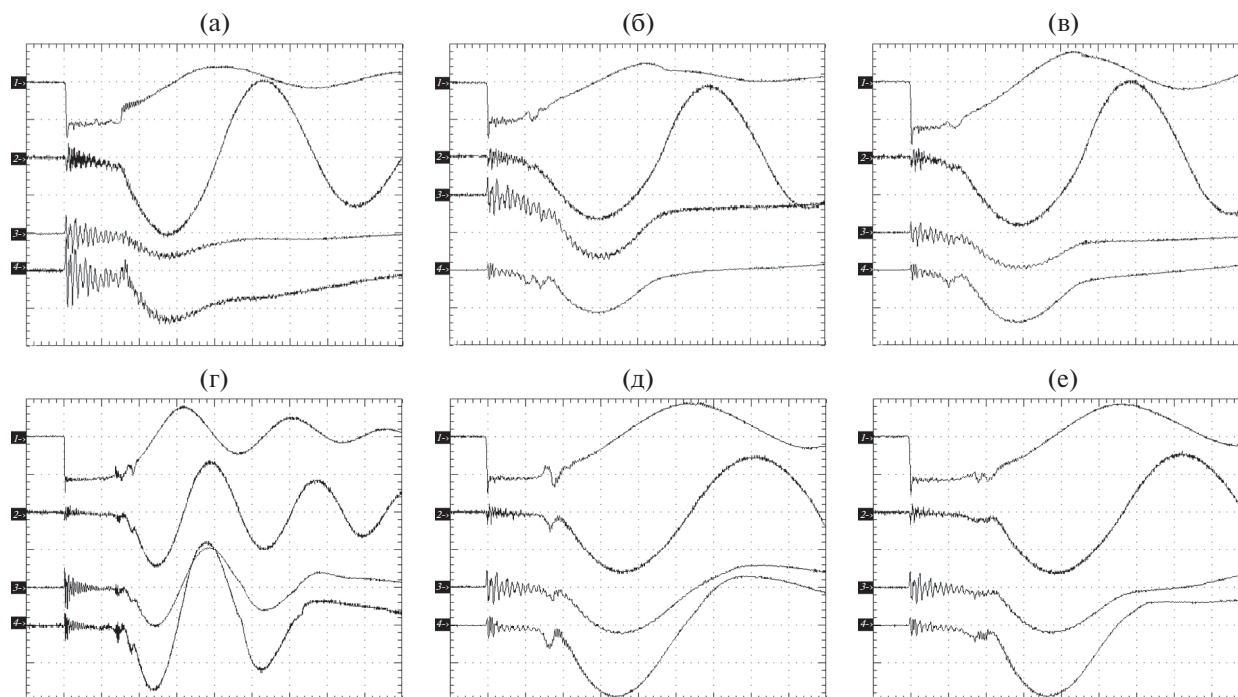
В настоящей работе предложены меры по снижению утечек, т.е. повышению энергетической эффективности электронной пушки с радиально сходящимся пучком, а также представлены результаты испытаний двухсекционного варианта катодного узла.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовалась установка, устройство и принцип действия которой описаны в работе [6]. Отличие настоящих экспериментов заключалось в возможности установки на катод чашеобразных экранов, ограничивавших выход электронов и ультрафиолетового (УФ) излучения катодной и анодной плазмы в пространство рабочей камеры (рис. 1). Диаметр отверстий в доньшках экранов, сквозь которые проходил стержневой анод диаметром 1 см, равен 3 см. Таким обра-

зом, радиальный зазор между кромкой этих отверстий и анодом составлял 1 см, что было достаточно для предотвращения пробоя между ними в отсутствие плазмы при наших амплитудах импульса ускоряющего напряжения (до 28 кВ). Часть экспериментов проводилась в двухсекционном варианте катодного узла, который и показан на рис. 1. Катоды секций соединялись между собой тонкостенным металлическим стаканом длиной 3 см. Таким образом, расстояние между плоскостями расположения дуговых источников плазмы, встроенных в катоды, составляло 4 см. В случае измерения энергии пучка стержневой анод 6 заменялся составным, и частью составного анода являлся калориметр. Калориметр представлял собой медный цилиндр с наружным диаметром 1 см с нарезанными в нем десятью кольцевыми канавками (рис. 1, справа внизу). К одному из торцов цилиндра припаян калиброванный терморезистор В57820-М 561-А5 номиналом 1 кОм при 25°C. Масса калориметра составляла 30.2 г, длина – 6 см.

Зарядное напряжение  $U_{\text{зар}}$  генератора высоковольтных импульсов, практически определяющее амплитуду импульса ускоряющего напряжения, варьировалось в интервале от 10 до 28 кВ.



**Рис. 2.** Типичные осциллограммы импульсов: 1 – ускоряющего напряжения (20 кВ/деление), 2 – полного тока в разрядном контуре (24 кА/деление) и 3, 4 – токов пучка на анод (10 кА/деление), полученные при отсутствии экранов на катоде (а–в) и при их установке (г–е) при давлении воздуха  $p = 0.013$  Па (а, г), давлении аргона  $p = 0.078$  Па (б, д) и 0.133 Па (в, е). Масштаб по горизонтальной оси: 1 мкс/деление (а–в, д, е) и 2.5 мкс/деление (г).  $U_{зар} = 20$  кВ.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, а полного тока в контуре и токов на анод – поясами Роговского. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц) цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024.

Свечение плазмы регистрировалось с помощью цифрового фотоаппарата CASIO QV-3000EX/Ir в режиме открытого затвора через смотровое окно 15.

Напуск рабочего газа (аргон) в камеру осуществлялся с помощью прибора США-2. Давление остаточных газов в объеме пушки не превышало  $10^{-2}$  Па.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (без корректировки на индуктивное падение напряжения на передающей линии и подводящих проводниках), полного тока в разрядном контуре и токов на анод приведены на рис. 2. Токи на анод, регистрируемые в цепях 1-го и 2-го токосъемов, различны ввиду различной длины отрезков анода от плоскости катода до соответствующего токосъема, а значит, и их индуктивности. Видно, что, начиная примерно с первого максимума (по абсолютной величине),

характер осциллограмм в отсутствие экранов 16 (см. рис. 1) на катоде и при их наличии заметно различается. При отсутствии экранов осциллограммы токов на анод после прохождения максимума униполярные (в отличие от осциллограммы полного тока, имеющей колебательный характер после первого максимума). Это свидетельствует о начале интенсивных утечек тока (по изоляторам, на стенки камеры и т.д.), параллельных “полезному” току на анод. Такое поведение осциллограмм, отражающее процесс утечек тока в пушке, неоднократно наблюдалось нами ранее для случая планарно-аксиальной геометрии электронной пушки как в режиме плазменного диода, так и в режимах вакуумного и газонаполненного диода [8, 9]. Напротив, при наличии экранов на осциллограммах токов на анод наблюдаются два-три “переполаривания”, и лишь затем начинается униполярная стадия. Кроме того, при наличии экранов отношение амплитуды тока анода к амплитуде полного тока заметно увеличивается по сравнению со случаем отсутствия экранов.

Можно предположить, что чем позже осциллограммы токов на анод становятся униполярными, тем больше энергии электронного пучка выделится в аноде. Данное предположение подтвердилось результатами калориметрических измерений. В табл. 1 приведены значения энергии пучка (усреднен-

**Таблица 1.** Значения энергии пучка, измеренные калориметром в различных режимах. Односекционный катодный узел

Зарядное напряжение, кВ	Энергия пучка, Дж	
	в отсутствие экранов на катоде	при наличии экранов на катоде
15	26.8	47.9
20	54.4	91.2

ные по десяти импульсам), полученные при наличии и отсутствии экранов на катоде. Видно, что эти значения различаются примерно в 2 раза. Следует отметить, что необходимость обеспечения жесткости анода при встраивании в него калориметра существенно ухудшила теплоизоляцию последнего. По нашим оценкам, это занижало значения энергии, измеряемой калориметром, примерно на 20%.

Утечки тока и развитие пробоя по изоляторам и вдоль поверхности резисторов подтверждаются интегральными фотографиями свечения плазмы (рис. 3).

Мы полагаем, что позитивный эффект от установки экранов обусловлен тем, что они существенно ограничивают выход части электронов и УФ-излучения из катодной и анодной плазмы за пределы диода. Тем самым замедляется развитие пробоя по изолятору ввода ускоряющего напряжения 17 (см. рис. 1) и по поверхности резисторов 4. Отметим, что свечение плазмы вокруг ввода 19 наблюдается практически всегда (как при отсутствии экранов, так и при их наличии), но, вероятно, при наличии экранов оно возникает позже. Причиной появления этой плазмы, на наш взгляд, является разряд в десорбированном (с поверхности ввода 19) газе под действием скрещенных радиального электрического и азимутально-

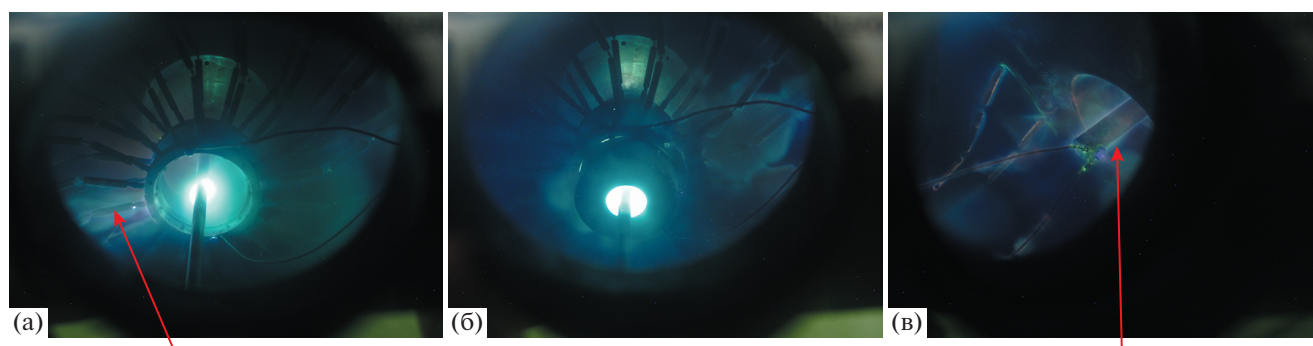
го магнитного полей. А инициируется данный разряд УФ-излучением катодной и анодной плазмы. В свою очередь, УФ-излучение и какая-то часть электронов разряда (не вовлеченных в дрейф вдоль поверхности ввода 19) попадают на поверхность изолятора 17 и стимулируют развитие пробоя вдоль его поверхности. При испытаниях пушки на активную нагрузку 3.8 Ом (т.е. без включения диода) никаких пробоев не наблюдалось вплоть до напряжений 28 кВ.

На рис. 4 приведены автографы пучка на аноде. Сравнивая автографы на рис. 4а–4в, полученные нами ранее в работе [6] для односекционного катодного узла, с автографом на рис. 4г для двухсекционного варианта, мы видим, что ширина автографа (области оплавления) для случая двухсекционного катодного узла составляет около 7 см, что более чем вдвое превышает ширину автографа в случае односекционного узла. Таким образом, выбранное расстояние между центрами секций (4 см) оказалось близким к оптимальному.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

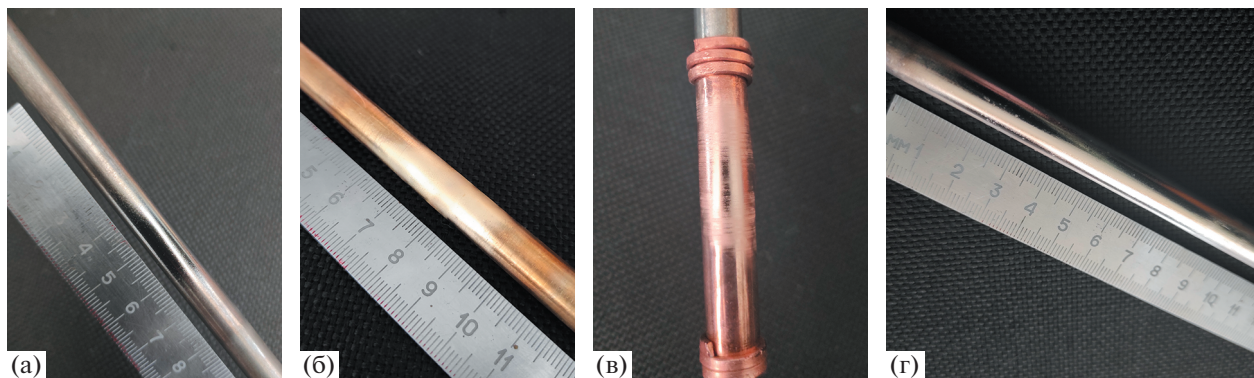
Проведенные исследования показали возможность существенного (примерно в два раза) увеличения энергии в импульсе радиально сходящегося низкоэнергетического (до 30 кэВ) сильного электронного пучка. Это обеспечивается за счет ограничения выхода электронов и УФ-излучения из катодной и анодной плазмы за пределы диода с помощью чашеобразных электростатических экранов, закрепленных на кольцевом катоде.

Продемонстрирована работоспособность электронной пушки с двухсекционным катодным узлом, причем ширина автографа пучка (оплавленной области) на аноде составила около 7 см в сравнении с 2.5–3 см в случае односекционного катодного узла. Увеличение количества парал-



**Рис. 3.** Свечение плазмы: а – в отсутствие экранов, б – при наличии экранов, в – свечение плазмы на стержневом вводе 19 (см. рис. 1) ускоряющего напряжения (съемка наикосок). Стрелки указывают на плазму вблизи поверхности резисторов (а) и вблизи стержневого ввода ускоряющего напряжения (в).





**Рис. 4.** Фотографии автографов пучка на нержавеющей стали (а, г), латуни (б) и меди (в), полученные в случае односекционного катодного узла [6] (а–в) и двухсекционного узла (г).  $U_{\text{зар}} = 17$  кВ, давление аргона – 0.09 Па. В каждой серии – по 10 импульсов пучка.

тельно работающих секций позволит в дальнейшем нарастить производительность пушки при обработке протяженных изделий.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00070.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abdullin E.N., Ivanov N.G., Losev V.F., Morozov A.V.* // *Laser and Particle Beams*. 2013. V. 31. P. 1. <https://doi.org/10.1017/S026303461300075X>
2. *Бугаев А.С., Климов А.И., Коваль Н.Н., Кошелев В.И., Сочугов Н.С., Щанин П.М.* Препринт ТНЦ СО АН СССР № 25. Томск, 1991. С. 21.
3. *Kovalchuk B.M., Polevin S.D., Tsygankov R.V., Zherlitsyn A.A.* // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2010. V. 38. Issue 10. P. 2819. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2060367>
4. *Engelko V.I., Kuznetsov V.S., Mueller G.* // *J. Applied Physics*. 2009. V. 105. P. 023305. <https://doi.org/10.1063/1.2996286>
5. *Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Русанов А.Е., Биржевой Г.А.* // *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2015. № 4. С. 93.
6. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // *ПТЭ*. 2022. № 6. С. 61. <https://doi.org/10.31857/S0032816222060143>
7. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // *Письма в ЖТФ*. 2020. Т. 46. № 15. С. 47. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364>
8. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // *ЖТФ*. 2022. Т. 92. № 6. С. 876. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.06.52518.316-21>
9. *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* // *Физика плазмы*. 2018. Т. 44. № 1. С. 21. <https://doi.org/10.7868/S0367292118010146>