

## ИСТОЧНИК РАДИАЛЬНО СХОДЯЩИХСЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

© 2022 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 27.04.2022 г.

После доработки 06.06.2022 г.

Принята к публикации 04.07.2022 г.

Описано устройство и приведены некоторые характеристики источника радиально сходящихся низкоэнергетических (5–25 кэВ) сильноточных электронных пучков микросекундной длительности, предназначенного для модификации поверхностных слоев цилиндрических изделий и образцов. Катодный узел источника представляет собой кольцо из дюралюминия (внутренний диаметр 8 см), в которое встроены 18 резистивно развязанных дуговых источников плазмы. 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. Плотность энергии пучка на аноде диаметром 1 см достаточна для поверхностного оплавления меди (порог импульсного плавления меди составляет 5–5.5 Дж/см<sup>2</sup> при длительности импульса 2–3 мкс) при зарядном напряжении генератора высоковольтных импульсов, питающего электронную пушку, 17 кВ.

DOI: 10.31857/S0032816222060143

### ВВЕДЕНИЕ

Низкоэнергетические (10–30 кэВ) сильноточные (до 25 кА) электронные пучки (НСЭП) широко используются для модификации поверхностных слоев металлических материалов уже несколько десятков лет [1–6]. Формирование таких пучков осуществляется, как правило, в пушках с плазменным анодом и многоэммитерным взрывоэмиссионным катодом [7, 8]. Высокая плотность энергии (до 20 Дж/см<sup>2</sup>) и короткая длительность импульса (2–4 мкс) позволяют выделить значительную энергию пучка в тонком (долиединицы микрон) 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. Электродами разрядной ячейки в данном случае служат взрывоэмиссионный катод, коллектор, а также кольцевой анод, расположенный примерно посередине между ними. Вместе с тем существует много задач, когда требуется облучать протяженные изделия цилиндрической формы, а для этого наиболее рационально использовать радиально сходящиеся пучки. К числу таких задач относятся: формирование защитных покрытий оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, изготавливаемых преимущественно из циркониевых сплавов или легированных сталей, для предотвращения/замедления коррозии и высокотемпературного окисления; повышение срока службы различного режущего и штампового инструмента. Отсутствие электронных пушек с радиально сходящимися НСЭП обуславливает актуальность их разработки и создания.

Импульсные радиально сходящиеся электронные пучки применялись и 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 (около 100 кэВ и выше) сравнитель-

но небольшой плотности тока (единицы—десятки ампер на квадратный сантиметр). 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 работе [12] 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<sup>2</sup>. Общее число эмиттеров (пучки графитовых волокон) на катоде составляло 2815, в цепь каждого эмиттера последовательно включен резистор сопротивлением несколько килоом. 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.

Эксперименты и расчеты, выполненные в работе [12], выявили следующий негативный эффект. Из-за углового разброса в течение примерно 10 мкс от начала импульса значительная часть электронов пучка не попадает на анод и осциллирует в пространстве между ним и катодом, причем с уменьшением диаметра анода доля осциллирующих электронов увеличивается (ток на анод, разумеется, падает), длительность импульса сокращается, ухудшается стабильность работы пушки. Более того, осцилляции электронов и вызванное этим накопление отрицательного объемного заряда усиливают отклонение электронов от попадания на анод и даже приводили в работе [12] к уменьшению тока эмиссии катода, что коррелирует с результатами работы [14].

Выявленный недостаток авторы работы [12] частично преодолели в работе [13] на установке GESA-4. Для уменьшения углового разброса между сеткой и анодом были радиально установлены тонкие пластины (ламели), длина которых (в аксиальном направлении) была равна длине катода. Доля осциллирующих электронов уменьшилась, стабильность работы пушки улучшилась.

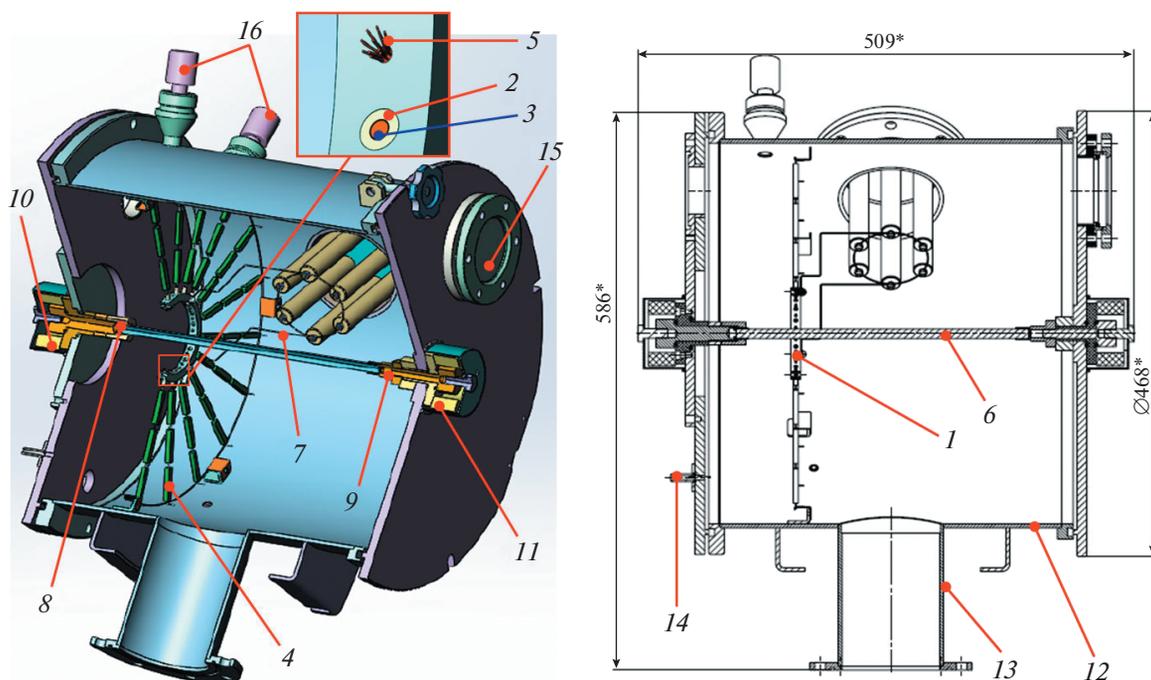
Однако существенным недостатком установок серии GESA является сравнительно высокое ускоряющее напряжение (до 250 кВ), что приводит к высокой цене оборудования и снижает его надежность. Кроме того, достижение необходимой плотности энергии пучка за счет длительности импульса (из-за малой плотности тока) вынудило авторов работ [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 работ [12, 13] часто наблюдали

их пробой из-за газовой выделению с анода под действием пучка. Для предотвращения пробоя авторы работ [12, 13] были вынуждены прогревать анод до 400–500°C специальным импульсным источником тока перед началом импульса пучка, что привело к дополнительным затратам. Благодаря более высокой плотности тока и меньшему (в несколько раз!) ускоряющему напряжению и отсутствию необходимости предварительного прогрева анода источники НСЭП представляются нам более перспективными. В настоящей работе описывается созданный нами источник “МикрЭП” (микросекундный электронный пучок) с радиально сходящимся НСЭП.

## ОПИСАНИЕ ИСТОЧНИКА

Для формирования радиально сходящегося НСЭП мы применили недавно разработанный нами катодный узел с многоканальным иницированием взрывной эмиссии пробоем по поверхности диэлектрика [15, 16]. На рис. 1 приведен общий вид электронной пушки источника. В односекционный кольцевой катод 1 из дюралюминия равномерно по окружности встроены 18 дуговых источников плазмы, включающие в себя трубки 2 и медные электроды 3. Внутренний диаметр катода составляет 8 см, наружный диаметр трубок — 4 мм, внутренний — 2 мм, диаметр электродов также равен 2 мм. Каждый из восемнадцати электродов заземлен 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 [17], 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



**Рис. 1.** Общий вид рабочей камеры и электронной пушки источника НСЭП. 1 – катод; 2 – керамическая трубка; 3 – электрод дугового источника плазмы; 4 – резистор ТВО-2; 5 – пучок медных проволок; 6 – 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 – датчики давления газа.

пятен, так и их расширением, т.е. увеличением площади эмиссионной поверхности [7, 18].

Анодом 6 служит 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. ниже, рис. 5в). Анод заземлен с двух сторон через цанговые токосъемы 8 и 9.

ГВИ, схема которого представлена на рис. 2, собран на основе конденсатора ИК-50/3 (измеренная емкость  $C = 2.87$  мкФ) и псевдоискрового разрядника ТД-50к/45 (ООО “Импульсные технологии”, г. Рязань). Для замыкания цепи зарядки и поглощения энергии конденсатора в случае холостого хода в нагрузку, а также для защиты выходных цепей источника зарядки ГВИ служит индуктивно-резистивная катушка  $L_2, R_2$ , намотанная нихромовым проводом толщиной 1 мм. Активное сопротивление катушки составляет 23.5 Ом, расчетная индуктивность – 140 мкГн. Соединение ГВИ с электронной пушкой осуществляется передающей линией из шести параллельных отрезков коаксиального кабеля РК-50-9-11 длиной 1.5 м каждый. Импеданс ГВИ не превышает 0.25 Ом.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, полного тока катода – поясом Роговского, тока пучка на анод – также поясами Роговско-

го, 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.

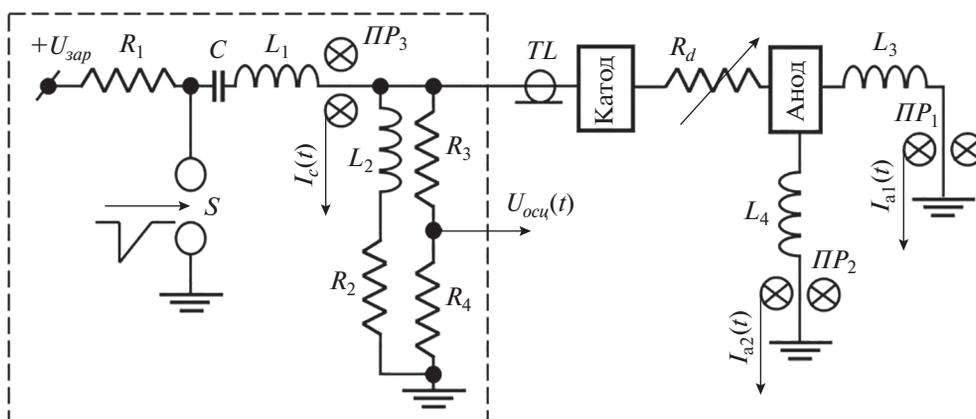
Плотность энергии пучка в импульсе и ее распределение по поверхности анода оценивались по автографам пучка.

Фотографирование свечения плазмы осуществлялось через смотровое окно 15 (см. рис. 1) с помощью цифрового фотоаппарата CASIO QV-3000EX/Ir в режиме открытого затвора. Для предотвращения “пересвечивания” перед объективом фотоаппарата устанавливался интерференционный светофильтр НС-9 толщиной 3 мм (показатель поглощения  $\alpha\lambda = 0.6-0.65$  в зависимости от длины волны на толщину 1 мм).

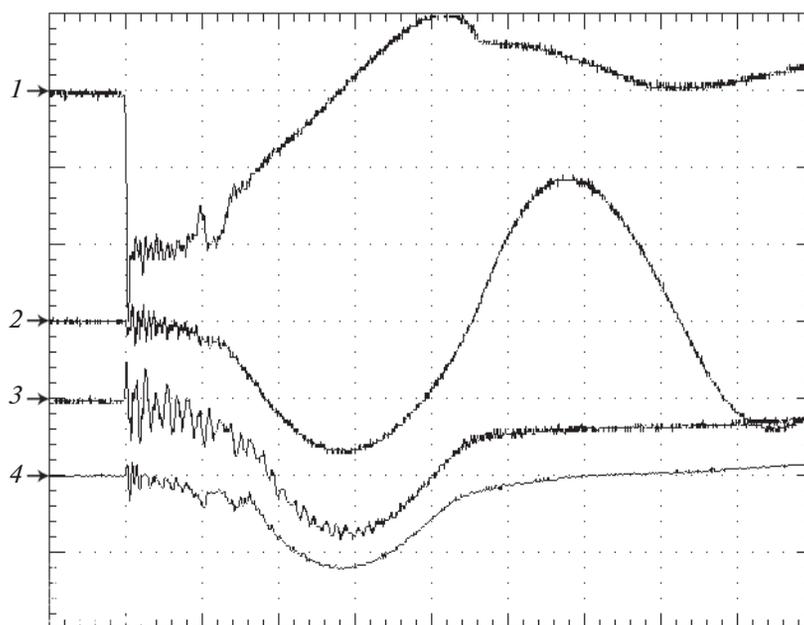
Откачка рабочего объема пушки осуществлялась турбомолекулярным насосом до давления 0.013 Па; после откачки напускался рабочий газ до давлений 0.05–0.09 Па.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (без корректировки на индуктивное падение напряжения на передающей линии и подводящих про-



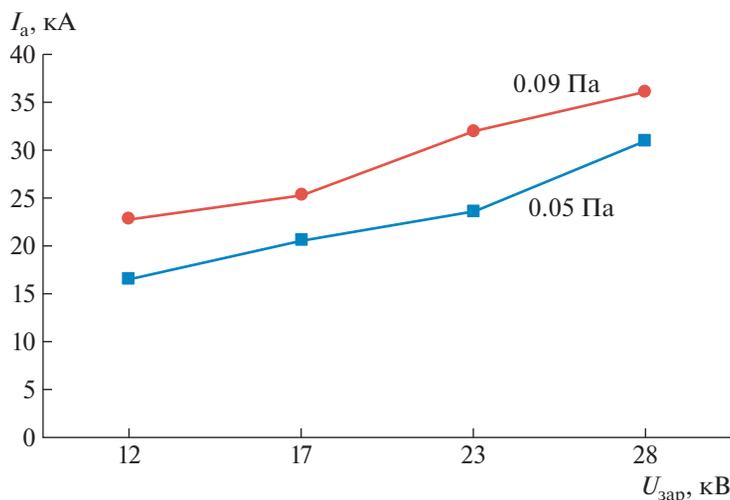
**Рис. 2.** Принципиальная схема ГВИ (выделен штриховой линией) и разрядного контура (цепи дуговых источников плазмы условно не показаны).  $R_1 = 4.7$  кОм – зарядный резистор;  $R_2 = 23.5$  Ом – сопротивление катушки ГВИ;  $R_3 = 10$  кОм и  $R_4 = 5$  Ом – делитель напряжения;  $R_d$  – сопротивление диода;  $L_1 \approx 120$  нГн – индуктивность разрядного контура за вычетом индуктивностей в цепи анода;  $L_2 \approx 140$  мкГн – индуктивность катушки ГВИ;  $L_3, L_4$  – индуктивности в цепи анода;  $TL$  – передающая линия;  $PP_1$ – $PP_3$  – пояса Роговского (трансформаторы тока);  $S$  – управляемый разрядник ТД-50к/45.



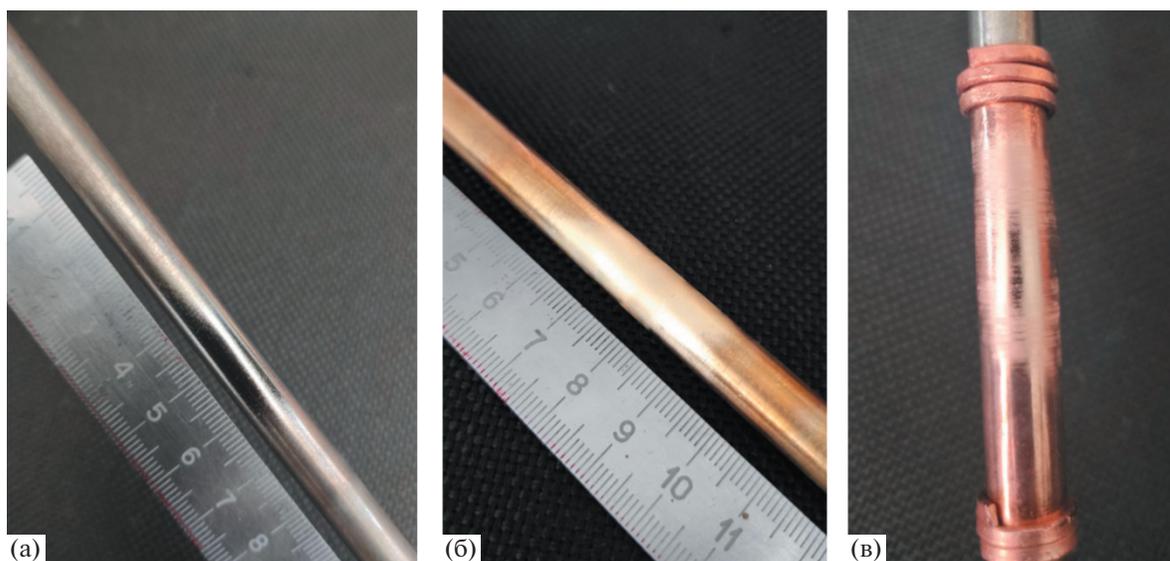
**Рис. 3.** Типичные осциллограммы импульсов: 1 – ускоряющего напряжения (10 кВ/деление); 2 – полного тока катода (24 кА/деление); 3, 4 – токов пучка на анод, зарегистрированных соответственно поясами Роговского  $PP_2$  (5 кА/деление) и  $PP_1$  (10 кА/деление). Масштаб по горизонтальной оси – 1 мкс/деление.  $U_{зар} = 20$  кВ,  $p = 0.09$  Па.

водниках), 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). При этом отношение этих токов, как правило, примерно обратно пропорционально отношению этих

индуктивностей. Суммарный ток пучка на анод (сумма токов, регистрируемых датчиками  $PP_1$  и  $PP_2$ ) заметно меньше полного тока в контуре, регистрируемого датчиком  $PP_3$ , 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)



**Рис. 4.** Зависимость амплитуды тока на анод от зарядного напряжения ГВИ для различных значений давления воздуха в рабочей камере (цифры у кривых).



**Рис. 5.** Автографы пучка на нержавеющей стали (а), латуни (б), меди (в).  $U_{зар} = 17$  кВ,  $p = 0.09$  Па.

близки к осциллограммам, полученным для планарно-аксиальной геометрии диода [16].

На рис. 4 приведена зависимость суммарного тока пучка на анод  $I_a$  от зарядного напряжения ГВИ, т.е. фактически от ускоряющего напряжения. Видно, что ток пучка на анод монотонно растет с увеличением  $U_{зар}$ .

На рис. 5 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/см<sup>2</sup> [19], можно считать, что указанная плотность энергии достигается, причем при сравнительно скромной величине  $U_{зар} = 17$  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 или менее однородно, что свидетельствует об азимутальной однородности пучка. В режиме вакуумного диода (0.013 Па) азимутальная однородность пучка иногда нарушалась, насколько об этом можно судить по фотографиям свечения анодной плазмы, полученным с помо-

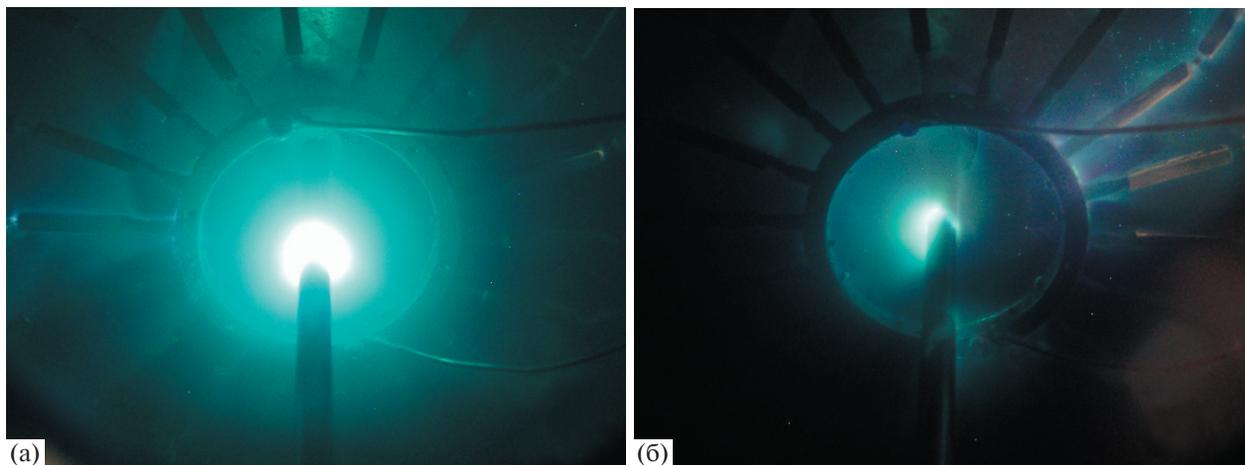


Рис. 6. Фотографии свечения при работе электронной пушки в режиме: а – газонаполненного диода ( $p = 0.09$  Па) и б – вакуумного диода ( $p = 0.013$  Па).  $U_{зар} = 17$  кВ.

щью цифрового фотоаппарата с открытым затвором (рис. 6).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан источник радиально сходящихся низкоэнергетических (5–25 кэВ) сильноточных (до 30 кА) электронных пучков “МикрЭП” с длительностью импульса 2–4 мкс. Источник способен 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 источник работает в варианте газонаполненного диода. Плотность энергии пучка в импульсе достигает не менее 5–5.5 Дж/см<sup>2</sup> 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.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.И. Петрову, А.Г. Падею и И.Н. Коновалову за помощь в работе.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meisner L.L., Markov A.B., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Mironov Yu.P., Poletika T.M., Girsova S.L., Shepel D.A. // *J. Alloys Comp.* 2018. V. 730. P. 376. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.09.238>
2. Rotshtein V.P., Shulov V.A. // *J. of Metallurgy.* V. 2011. Article ID 673685 (15 p.)
3. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Furukawa T., Karato K. // *Precision Engineering.* 2005. V. 29. № 4. P. 449. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.12.005>
4. Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. // *Laser & Particle Beams.* 2003. V. 21. № 2. P. 157. <https://doi.org/10.1017/S0263034603212040>
5. Murray J.W., Clare A.T. // *J. of Materials Processing Techn.* 2012. V. 212. P. 2642. <https://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. ISBN 978-5-02-038809-3
7. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // *Физика плазмы.* 2018. № 1. С. 21. <https://doi.org/10.7868/S0367292118010146>
8. Назаров Д.С., Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // *ПТЭ.* 1996. Т. 39. № 4. С. 83.
9. 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>
10. Бугаев А.С., Климов А.И., Коваль Н.Н., Кошелев В.И., Сочугов Н.С., Щанин П.М. Препринт ТНЦ СО АН СССР. 1991. № 25. С. 21.
11. 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>

12. *Engelko V.I., Kuznetsov V.S. and Georg Mueller* // J. Applied Physics. 2009. V. 105. 023305. <https://doi.org/10.1063/1.2996286>
13. *Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Русанов А.Е., Биржевой Г.А.* // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2015. № 4. С. 93.
14. *Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д., Ступаков Г.В.* // Изв. вузов. Физика. 1979. № 10. С. 7.
15. *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>
16. *Петров В.И., Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1764. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.11.51541.80-21>
17. *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. М.: Наука, 1968.
18. *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
19. *Roitshtein 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.* // Surface & Coatings Technology. 2006. V. 200. P. 6378.