

## ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 537.525

# ЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

© 2025 г. П. П. Кизириди<sup>a,\*</sup>, Г. Е. Озур<sup>a,\*\*</sup>, В. И. Петров<sup>a,\*\*\*</sup>

<sup>a</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3

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

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

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

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 19.07.2024 г.

Принята к публикации 05.08.2024 г.

Исследован частотный режим работы (1 имп/с) источника низкоэнергетических сильноточных электронных пучков на основе взрывоэмиссионного катода со встроенными в него дуговыми источниками плазмы, инициируемыми пробоем по поверхности диэлектрика. Установлено, что источник стабильно (без пропусков) генерирует пучок в условиях вакуумного и газонаполненного диодов при заданной частоте следования импульсов и зарядных напряжениях генератора, питающего электронную пушку, равных 5–20 кВ.

DOI: 10.31857/S0032816225010074, EDN: GGYHWI

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Источники низкоэнергетических (до 30 кэВ) сильноточных (десятки кА) электронных пучков (НСЭП) микросекундной длительности (2–4 мкс) широко используются для модификации поверхностных слоев металлов и сплавов методом импульсного плавления [1–5]. В результате такой модификации поверхностные слои приобретают улучшенные физико-химические свойства, что в конечном счете сказывается и на качестве самого изделия. Например, повышаются коррозионная стойкость, износстойкость, усталостная прочность и т. д. Как правило, для достижения положительного эффекта от облучения требуется несколько десятков импульсов на образец (изделие). Если в установке реализована подача большого количества образцов к месту облучения пучком, то число импульсов в одном вакуумном цикле может достигать нескольких тысяч. При таких условиях производительность источника НСЭП может быть существенно увеличена за счет повышения частоты следования импульсов  $f$ .

Ранее величина  $f$  не превышала 0.2 имп/с, так как она была ограничена мощностью имеющихся в нашем распоряжении блоков питания. Такой режим работы источников НСЭП с плазменным анодом и многопроволочным медным взрывоэмиссионным катодом [6] был достаточно стабилен. При попытке увеличения  $f$  с 0.2 до 1 имп/с (когда это стало технически возможным) было зафиксировано большое количество пропусков генерации пучка (до 30%, при этом плазменный анод формировался стабильно) [7]. На наш взгляд, это связано с частичной дегазацией поверхности катода, в результате чего возникают нестабильности возбуждения взрывной эмиссии.

В 2020 году мы создали новый катодный узел со встроенными в катод дуговыми источниками плазмы, инициируемыми пробоем по поверхности диэлектрика [8, 9]. В режиме одиночных импульсов ( $f \leq 0.2$  имп/с) данный катодный узел обеспечивает высокую стабильность срабатывания всех дуговых источников в катоде, в том числе при пониженных (от 5 кВ) напряжениях. Кроме того, была показана возможность работы данного узла в режиме вакуумного или

газонаполненного диода, т. е. без предварительного создания плазменного анода. Это дало нам основания полагать, что использование катода с дуговыми источниками плазмы при частотном (импульсно-периодическом, пачечном) режиме работы ( $f = 1$  имп./с) источника НСЭП позволит решить проблему пропусков генерирования пучка. Наша работа посвящена исследованию частотного режима работы взрывоэмиссионного катода со встроенными в него дуговыми источниками плазмы.

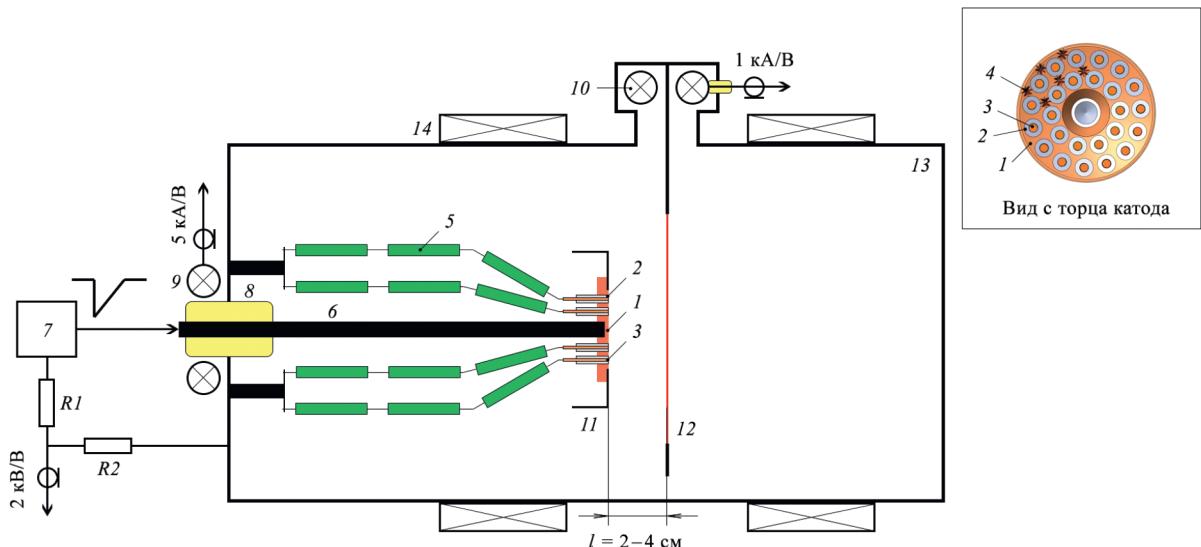
## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 представлена схема эксперимента. Катодный узел пушки включает в себя взрывоэмиссионный катод 1 в виде перфорированного медного диска диаметром 30 мм, в отверстия которого заподлицо вставлены керамические трубы 2 и медные электроды 3, образующие вместе с катодом дуговые источники плазмы; 10 дуговых источников расположены по окружности  $\varnothing 15$  мм и 15 дуговых источников — по окружности  $\varnothing 24$  мм. Каждый из 25 электродов заземлен через резисторы 5 (три последовательно соединенных резистора номиналом 750 Ом каждый). Для увеличения количества взрывоэмиссионных центров в катод (по всей поверхности) также впрессованы пучки тонких (80 мкм) медных проволок 4 в количестве 25 штук (справа на рис. 1

условно показано 6 штук). Таким образом, эмитирующая часть катода фактически представляет собой кольцо внешним диаметром примерно 24 мм и шириной 4.5 мм. На катоде также располагался чашеобразный металлический экран 11. Он прикрывал резисторы от образовавшейся в течение импульса плазмы и тем самым уменьшал вероятность пробоя вдоль их поверхности.

Амплитуда ускоряющего напряжения, подаваемого от генератора высоковольтных импульсов (ГВИ) 7, определявшаяся зарядным напряжением ГВИ  $U_{\text{зар}}$ , варьировалась в диапазоне 5–20 кВ. Частота следования импульсов  $f$  могла меняться от 0.2 до 1 имп./с. Число импульсов в серии варьировалось от 10 до 50, после серии выдерживалась пауза 1–2 мин. Коллектором пучка служила пластина 12 из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Импульсное ведущее магнитное поле, обеспечивающее транспортировку пучка, создавалось секционированным соленоидом 14.

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, полного тока диода и тока пучка на коллектор — поясами Роговского. Сигналы с датчиков подавались на входы 4-канального широкополосного (200 МГц) цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024. Осциллограф работал как в режиме одиночных импульсов, так и в режиме накопления (для получения средних за серию импульсов осциллограмм).



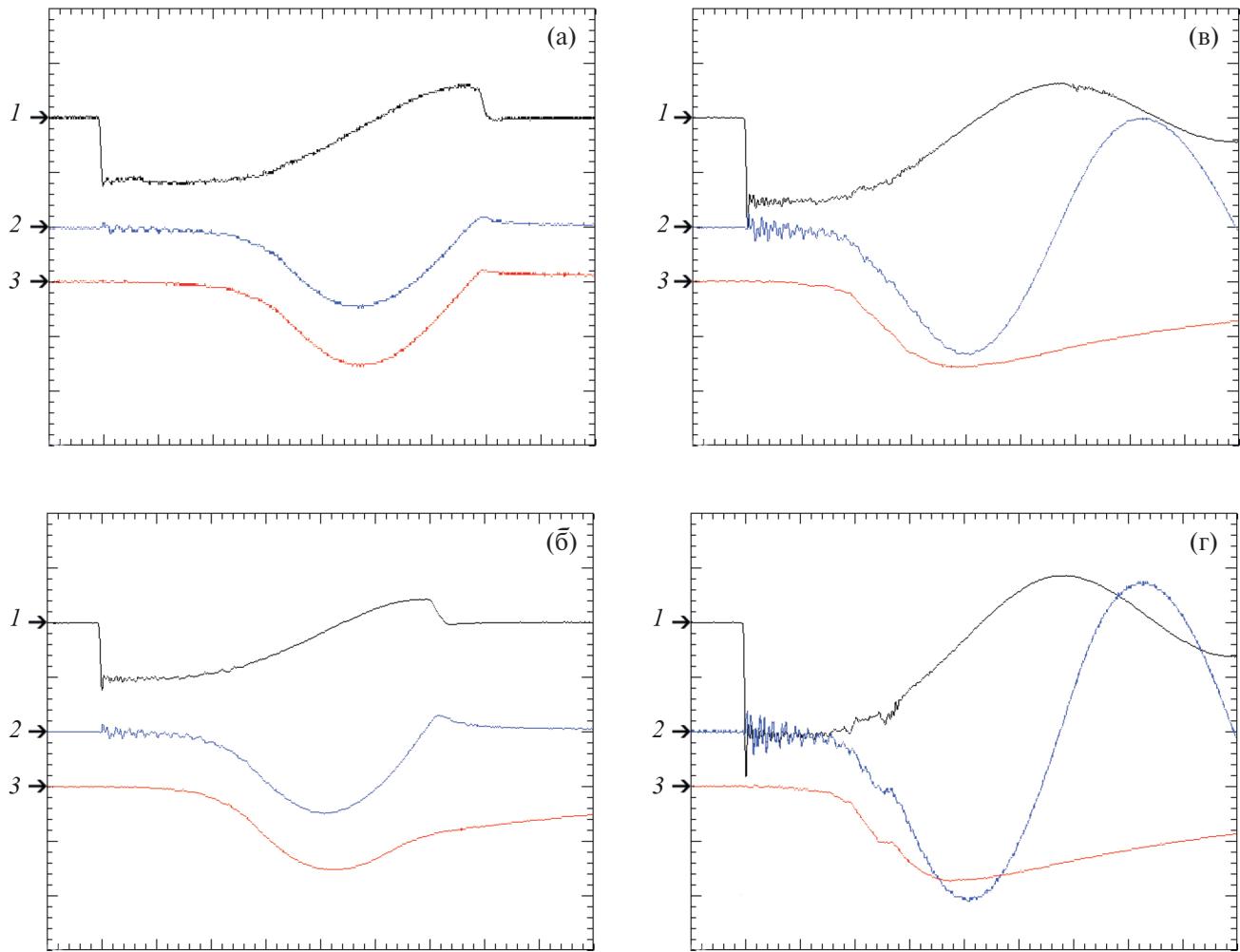
**Рис. 1.** Схема эксперимента: 1 — катод, 2 — керамические трубы, 3 — медные электроды, 4 — пучок медных проволок, 5 — резистор ТВО-2 (750 Ом), 6 — катододержатель, 7 — генератор высоковольтных импульсов, 8 — изолятор ввода ускоряющего напряжения; 9 и 10 — пояса Роговского, 11 — экран, 12 — коллектор (анод), 13 — вакуумная камера, 14 — соленоид;  $R1, R2$  — активный делитель напряжения.

Эксперименты проводились как в условиях вакуумного диода (давление остаточного газа  $p = 0.01$  Па), так и при напуске рабочего газа (аргон) до давления 0.027–0.054 Па.

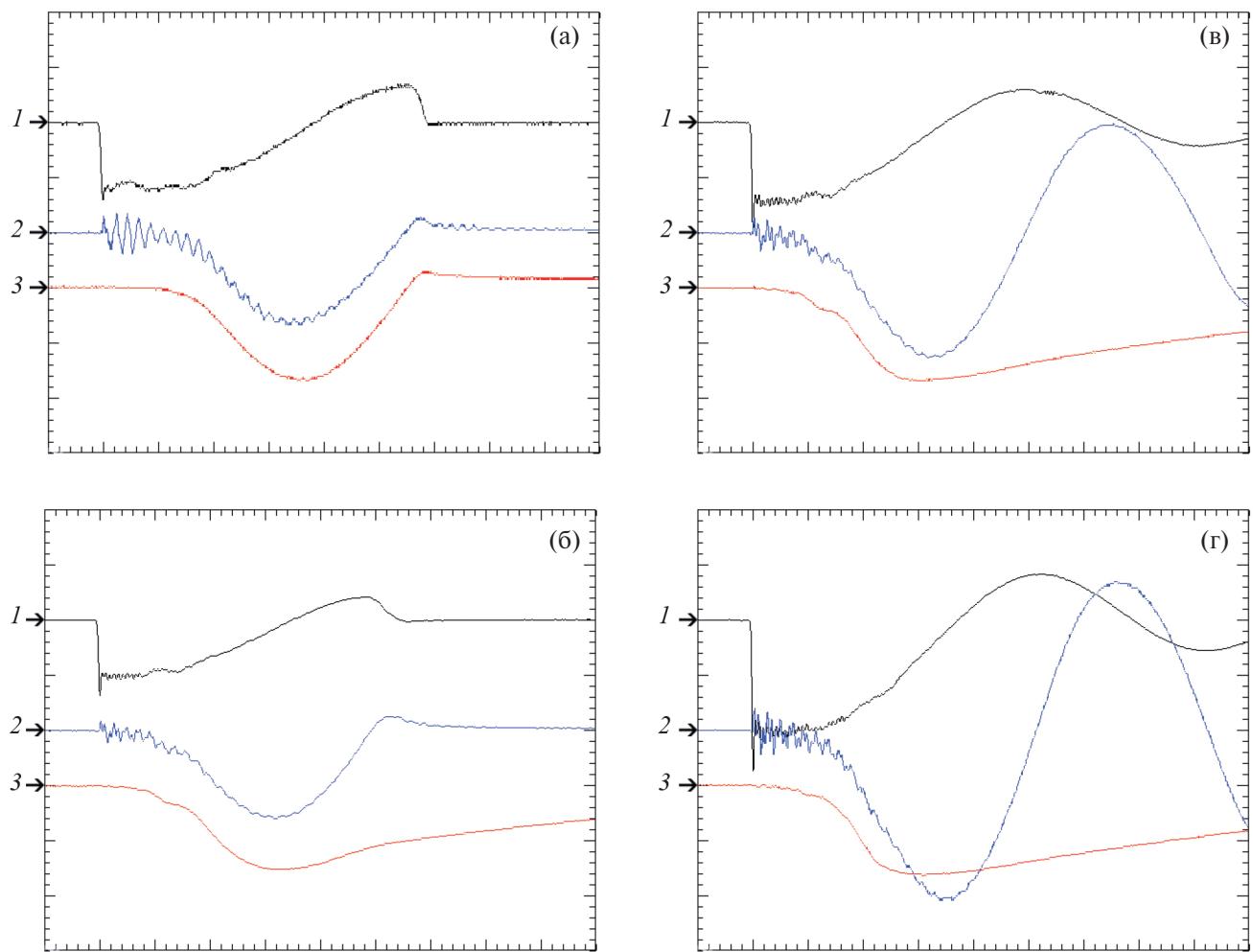
### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2, 3 представлены средние за серию из 20 импульсов осциллографмы напряжения и токов, сделанные в режиме накопления при различных значениях зарядного/ускоряющего напряжения и давления рабочего/остаточного газа. Частота следования импульсов во всех случаях составляла 1 имп/с.

В целом полученные осциллографмы аналогичны тем, которые мы наблюдали при генерации одиночных импульсов [9, 10]. С увеличением зарядного напряжения ГВИ амплитуда полного тока диода растет практически пропорционально. Рост амплитуды тока пучка на коллектор при этом наблюдается лишь при зарядных напряжениях до 10–12 кВ, после чего она практически не меняется и составляет 16–18 кА. Это соответствует известным представлениям о переходе катодной плазмы в режим насыщения, характерным для сантиметровых ускоряющих промежутков [11]. Амплитуда же полного тока в диоде продолжает расти с увеличением зарядного напряжения вследствие развития пробоя в



**Рис. 2.** Средние за серию импульсов осциллографмы ускоряющего напряжения (Ch1), полного тока диода (Ch2) и тока пучка на коллектор (Ch3): **а** –  $U_{\text{зап}} = 5$  кВ, **б** –  $U_{\text{зап}} = 10$  кВ, **в** –  $U_{\text{зап}} = 15$  кВ, **г** –  $U_{\text{зап}} = 20$  кВ. Давление остаточного газа (воздух) – 0.01 Па. Ширина зазора катод–анод – 3 см. Индукция ведущего магнитного поля 0.15 Тл. Масштабы по вертикали: **а** – Ch1 – 4 кВ/дел, Ch2 – 5 кА/дел, Ch3 – 5 кА/дел; **б, в, г** – Ch1 – 10 кВ/дел, Ch2 – 10 кА/дел, Ch3 – 10 кА/дел. Горизонтальная шкала 1 мкс/дел.



**Рис. 3.** Средние за серию импульсов осциллограммы ускоряющего напряжения Ch1, полного тока диода Ch2 и тока пучка на коллектор Ch3: а –  $U_{\text{зап}} = 5 \text{ кВ}$ , б –  $U_{\text{зап}} = 10 \text{ кВ}$ , в –  $U_{\text{зап}} = 15 \text{ кВ}$ , г –  $U_{\text{зап}} = 20 \text{ кВ}$ . Давление аргона 0.04 Па. Ширина зазора катод–анод 3 см. Индукция ведущего магнитного поля 0.15 Тл. Масштабы по вертикали: а – Ch1 – 4 кВ/дел, Ch2 – 5 кА/дел, Ch3 – 5 кА/дел; б, в, г – Ch1 – 10 кВ/дел, Ch2 – 10 кА/дел, Ch3 – 10 кА/дел. Горизонтальная шкала 1 мкс/дел.

катодном узле, а также пробоя на стенку корпуса пушки, которые пока не удалось подавить.

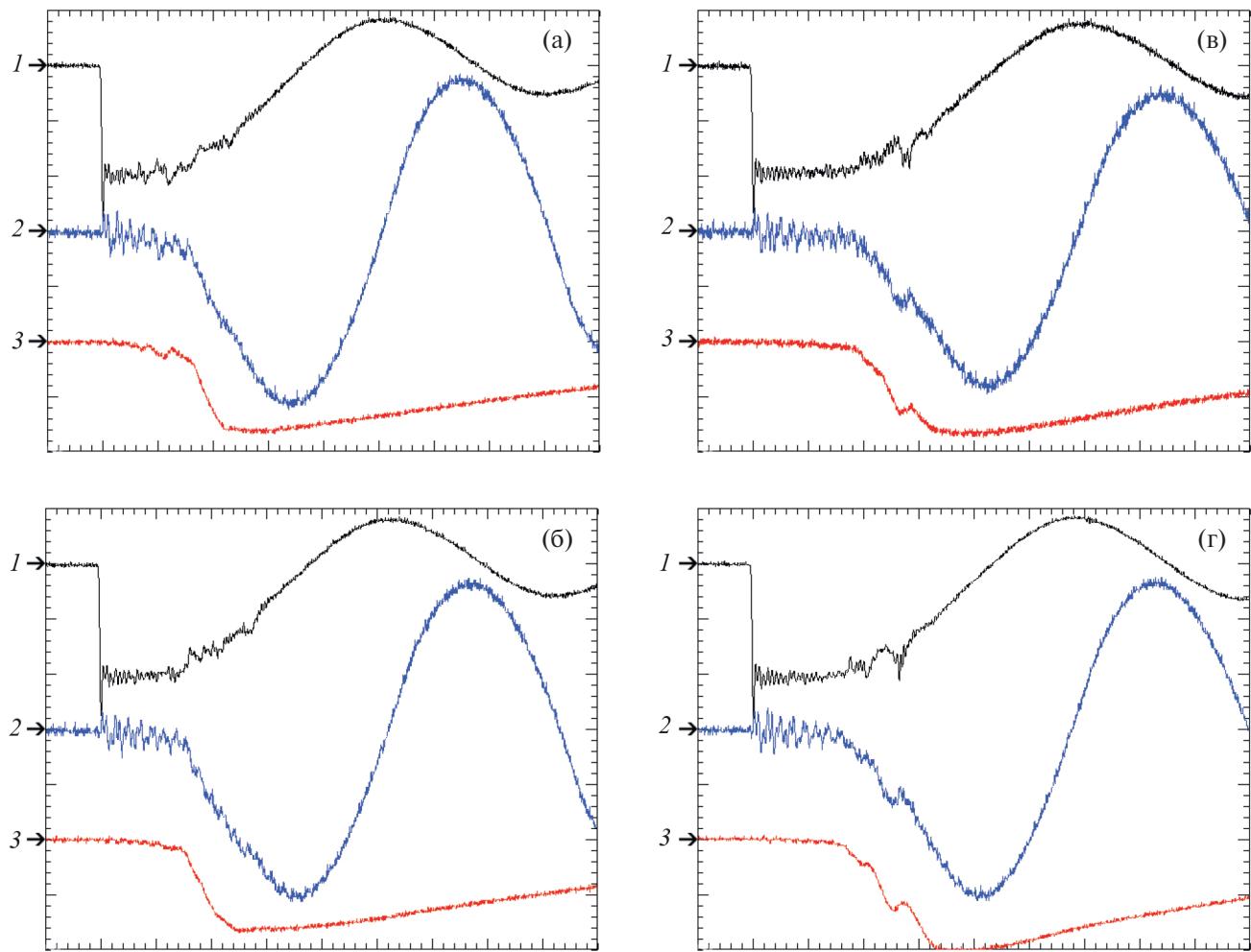
Наиболее стабильную работу катод показал в условиях газонаполненного диода. На рис. 4 представлены осциллограммы нескольких импульсов из серии. Видно, что осциллограммы тока пучка практически повторяют друг друга, разброс амплитуды тока пучка не превышает  $\pm 10\%$ . В случае вакуумного диода этот разброс мог достигать  $\pm 25\%$ .

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирован устойчивый частотный режим работы ( $f = 1$  имп/с) источника низкоэнергетических сильноточных электронных

пучков на базе взрывоэмиссионного катода со встроенными в него дуговыми источниками плазмы. При работе источника не зафиксировано ни одного пропуска генерирования пучка во всем диапазоне амплитуд ускоряющего напряжения (5–20 кВ). Оценки тепловой стойкости резисторов в цепях дуговых источников плазмы показывают возможность дальнейшего увеличения частоты следования импульсов до 2–3 имп/с, однако риск выхода из строя накопительного конденсатора (ИК-50/3) генератора высоковольтных импульсов вынудил нас пока отказаться от этого.

Наиболее стабильные от импульса к импульсу (разброс амплитуды тока пучка не более  $\pm 10\%$ ) осциллограммы наблюдались в режимах с



**Рис. 4.** Осциллографмы ускоряющего напряжения (Ch1, 10 кВ/дел), полного тока диода (Ch2, 10 кА/дел) и тока пучка на коллектор (Ch3, 10 кА/дел): **а** – 1-й импульс в серии, **б** – 10-й импульс в серии, **в** – 20-й импульс в серии, **г** – 30-й импульс в серии. Зарядное напряжение – 20 кВ. Давление аргона – 0.04 Па. Горизонтальная шкала – 1 мкс/дел.

напуском рабочего газа (аргон) до давлений 0.027–0.054 Па. В случае вакуумного диода (давление остаточного газа 0.01 Па) разброс амплитуды тока пучка на коллектор мог доходить до  $\pm 25\%$ . При этом средняя за серию импульсов амплитуда полного тока в вакуумном диоде была приблизительно равна аналогичной величине для случая газонаполненного диода.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа финансировалась в рамках государственного задания по программе фундаментальных научных исследований Сибирского отделения РАН “Низкотемпературная газоразрядная плазма и ее применение для решения научных

и технологических задач”, проект “Низкотемпературная плазма стационарных и импульсных разрядов в газах и вакууме и ее применение в электрофизических устройствах”, № FWRM-2021-0007.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meisner L.L., Rotshstein V.P., Semin V.O., Meisner S.N., Markov A.B., Yakovlev E.V., D'yachenko F.A., Neiman A.A., Gudimova E.Yu. // Surf. Coat. Technol. 2020. V. 4044. 12644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126455>
2. Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Meisner L.L., Rotshstein V.P., Neiman A.A., D'yachenko F.A. // Appl. Surf. Sci. 2018. V. 437. P. 217. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.12.107>

3. *Okada A., Okamoto Y., Uno Y., Uemura K.* // J. Mater. Process. Technol. 2014. V. 214. P. 1740.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotc.2014.02.028>
4. *Murray J.W., Walker J.C., Clare A.T.* // Surface and Coatings Technology. 2014. V. 259. P. 465.  
<http://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.10.045>
5. *Cai J., Guan Q., Hou X., Wang Zh., Su J., Han Zh.* // Appl. Surf. Sci. 2014. V. 317. P. 360.  
<http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.049>
6. *Озур Г.Е., Проскуровский Д.И.* Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом. Новосибирск: Наука, 2018.
7. *Петров В.И.* Частное сообщение. 18.01.2020.
8. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 15. С. 47.  
<http://doi.org/10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364>
9. *Петров В.И., Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1764.  
<http://doi.org/10.21883/JTF.2021.11.51541.80-21>
10. *Kiziridi P.P., Ozur G.E.* // Vacuum. December 2021. V. 194. 110560.  
<https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110560>
11. *Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П.* // ЖТФ. 1981. Т. 51. № 9. С. 1969.