

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 537.525

ЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ИСТОЧНИКА НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ

© 2025 г. П. П. Кизириди^{а,*}, Г. Е. Озур^{а,**}, В. И. Петров^{а,***}

^а *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, износостойкость, 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 имевшихся 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 дугowymi 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 дугowymi 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 трубки *2* и медные электроды *3*, образующие вместе с катодом дугowe источники плазмы; 10 дугowych источников расположены по окружности $\varnothing 15$ мм и 15 дугowych 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 впрыснуты 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 $U_{зар}$, 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).

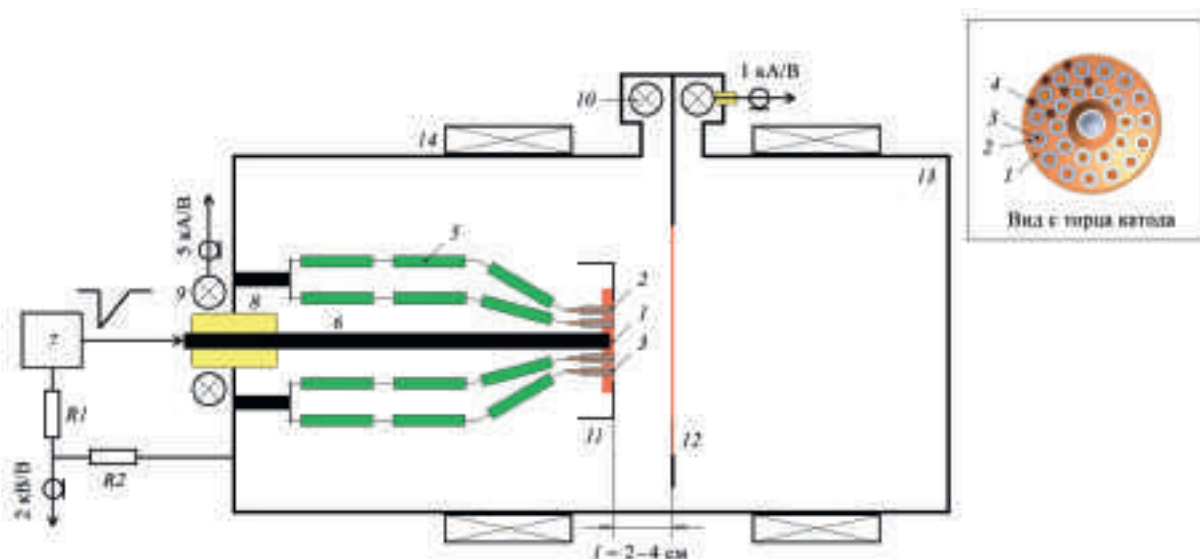


Рис. 1. Схема эксперимента: *1* — катод, *2* — керамические трубки, *3* — медные электроды, *4* — пучок медных проволок, *5* — резистор ТВО-2 (750 Ом), *6* — катододержатель, *7* — генератор высоковольтных импульсов, *8* — изолятор ввода ускоряющего напряжения; *9* и *10* — пояса Роговского, *11* — экран, *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 $0.027\text{--}0.054$ Па.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2, 3 представлены средние за серию из 20 импульсов осциллограммы 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 осциллограммы 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 $10\text{--}12$ кВ, после чего она практически не меняется и составляет $16\text{--}18$ 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

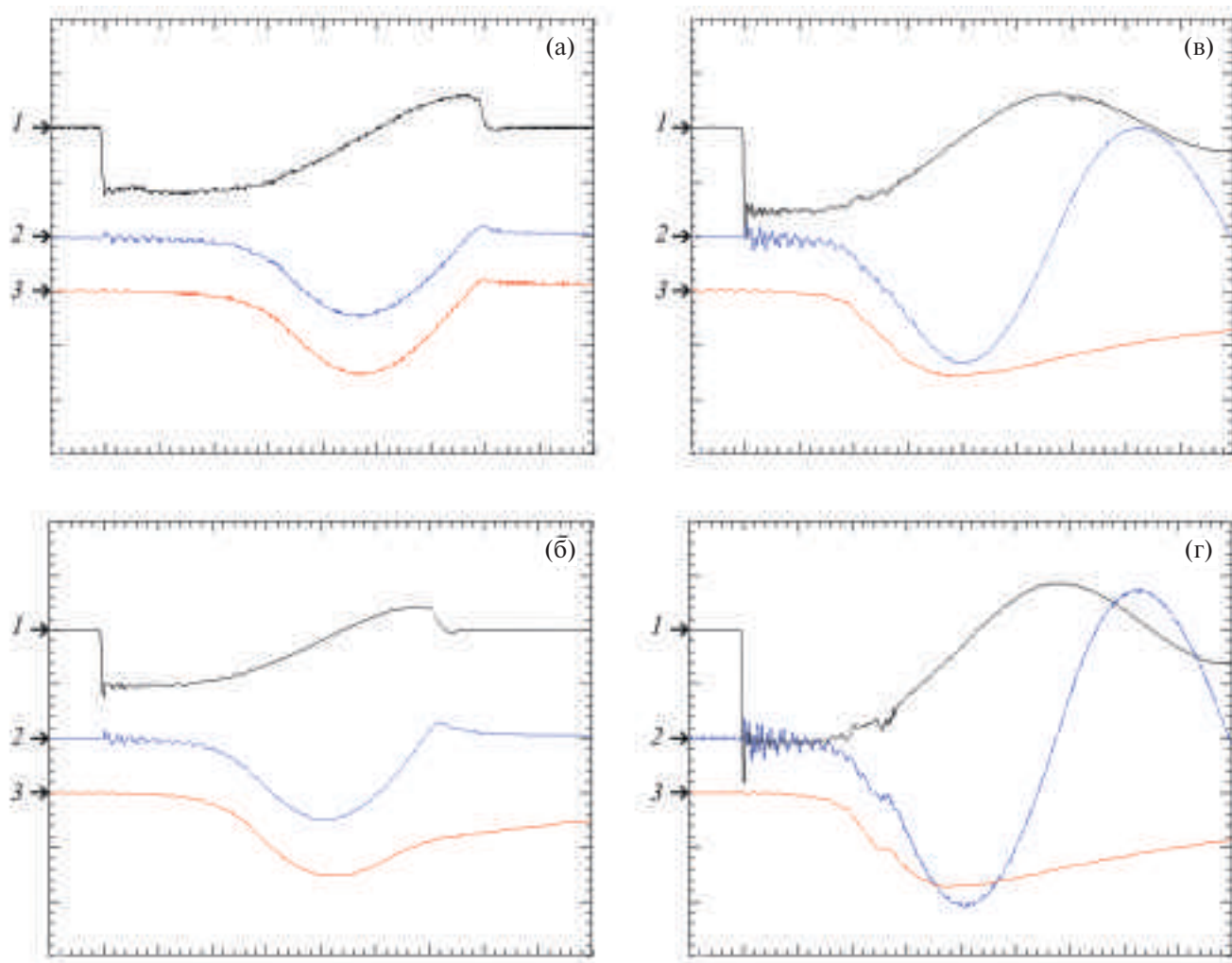


Рис. 2. Средние за серию импульсов осциллограммы ускоряющего напряжения (Ch1), полного тока диода (Ch2) и тока пучка на коллектор (Ch3): **а** — $U_{\text{зар}} = 5$ кВ, **б** — $U_{\text{зар}} = 10$ кВ, **в** — $U_{\text{зар}} = 15$ кВ, **г** — $U_{\text{зар}} = 20$ кВ. Давление остаточного газа (воздух) — 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.

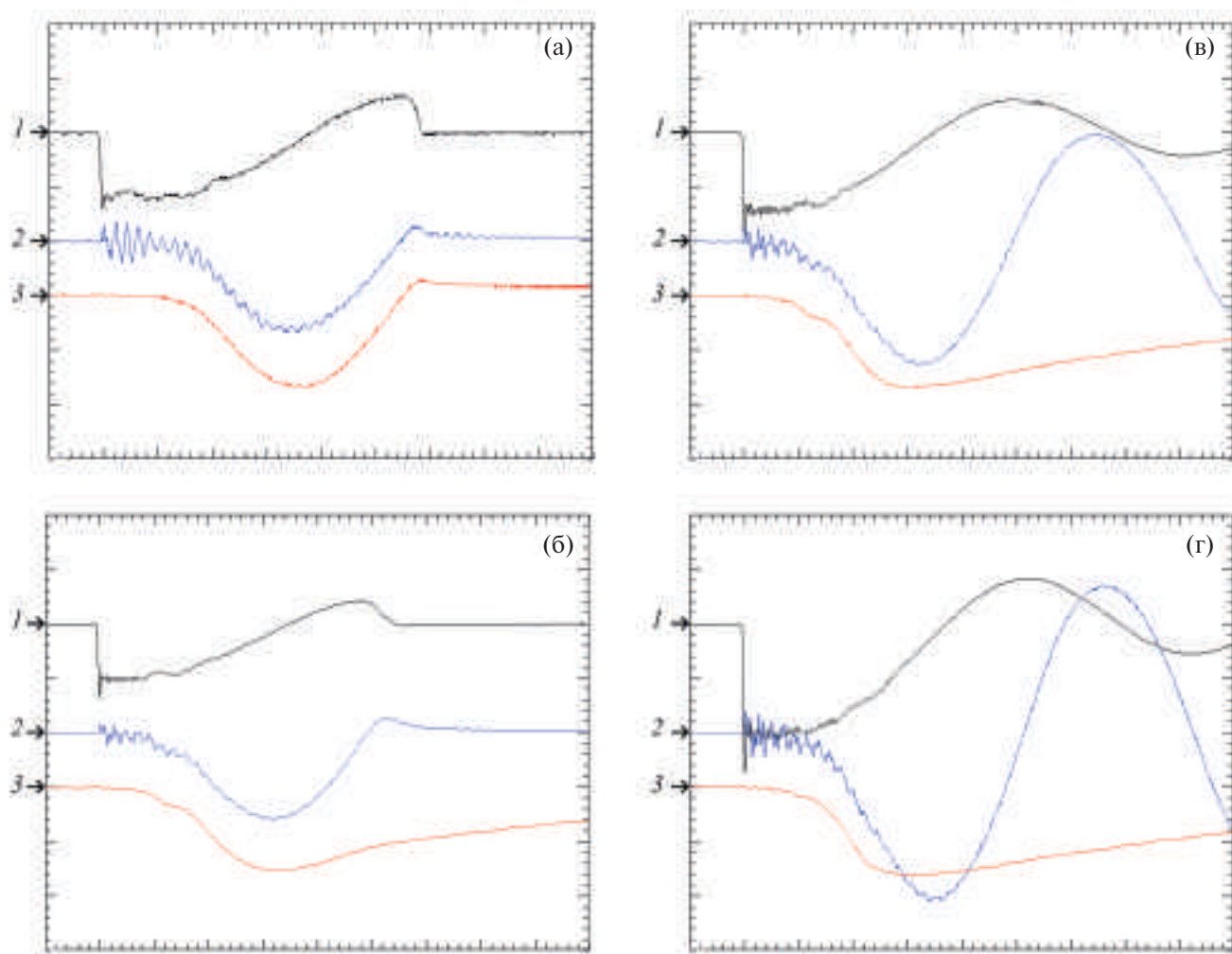


Рис. 3. Средние за серию импульсов осциллограммы ускоряющего напряжения Ch1, полного тока диода Ch2 и тока пучка на коллектор Ch3: **а** – $U_{\text{зар}} = 5$ кВ, **б** – $U_{\text{зар}} = 10$ кВ, **в** – $U_{\text{зар}} = 15$ кВ, **г** – $U_{\text{зар}} = 20$ кВ. Давление аргона 0.04 Па. Ширина зазора 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

Продemonстрирован 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

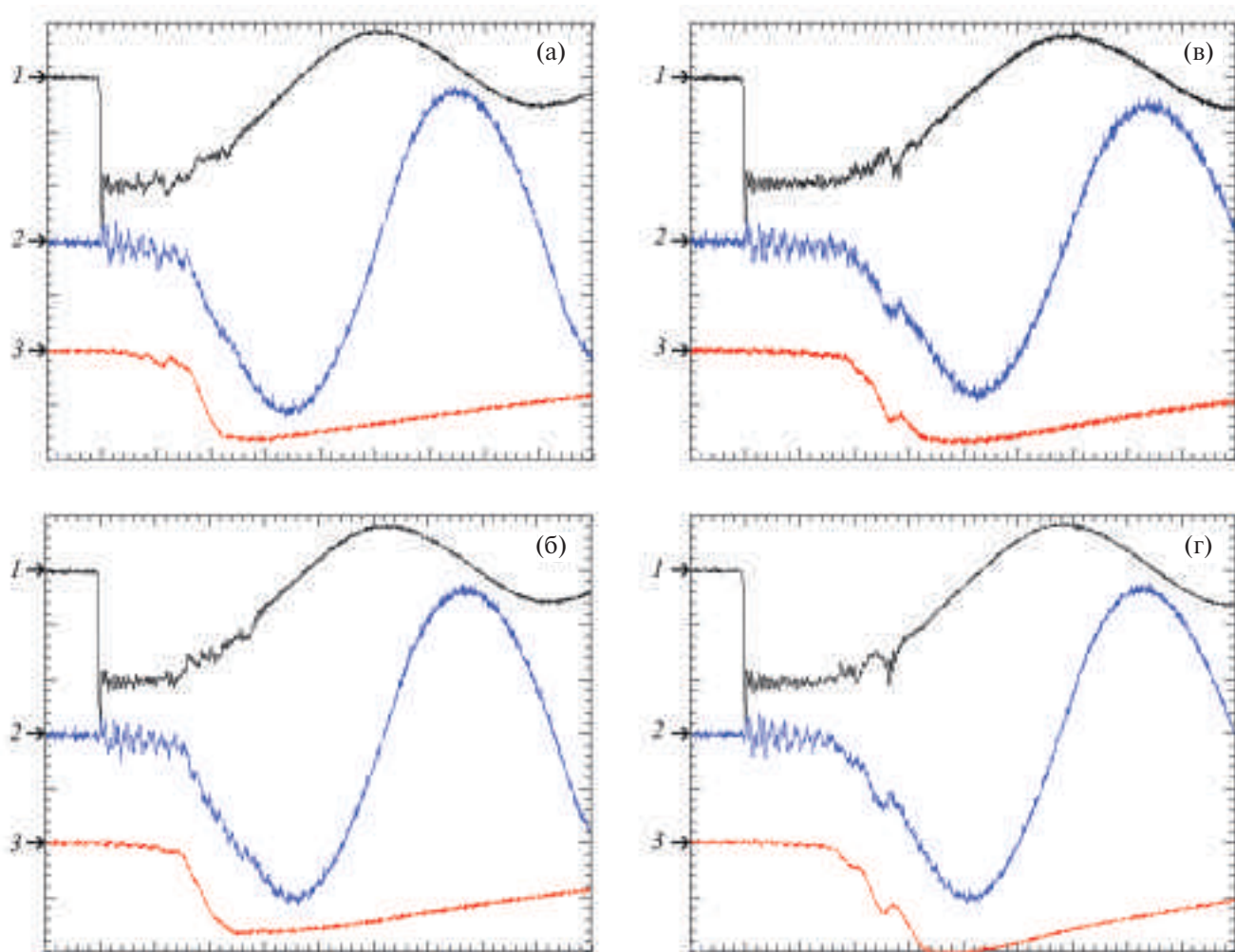


Рис. 4. Осциллограммы ускоряющего напряжения (Ch1, 10 кВ/дел), полного тока диода (Ch2, 10 кА/дел) и тока пучка на коллектор (Ch3, 10 кА/дел): **а** — 1-й импульс в серии, **б** — 10-й импульс в серии, **в** — 20-й импульс в серии, **г** — 30-й импульс в серии. Зарядное напряжение — 20 кВ. Давление аргона — 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 достигать до $\pm 25\%$. При этом средняя за серию импульсов амплитуда полного тока в вакуумном диode 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., Rotshtein 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., Rotshtein 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.jmatprotec.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 сильнотоочных 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.