

12.3;05.6;06.4

Исследование параметров самосфокусированного электронного пучка, выведенного за анод вакуумного диода

© В.И. Олешко, V.V. Nguyen

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
E-mail: oleshko@tpu.ru

Поступило в Редакцию 14 октября 2021 г.

В окончательной редакции 29 октября 2021 г.

Принято к публикации 29 октября 2021 г.

Исследованы параметры сильнооточного электронного пучка, выведенного из зоны самофокусировки через отверстие в аноде в вакуумную камеру. Параметры пучка определены исходя из измерения зон пространственного распределения разрушений и свечения, возникающих в образцах полиметилметакрилата, установленных на различных расстояниях от анода (автографов электронного пучка). Обнаружено формирование двух электронных пучков: самосфокусированного с высокой плотностью энергии, распространяющегося вдоль оси конуса, обращенного основанием к аноду, с углом при вершине $\sim 7^\circ$ и высокоэнергетического пучка низкой плотности, распространяющегося в полном усеченном конусе и окружающего самосфокусированный. Измерены осциллограммы тока и энергия электронных пучков.

Ключевые слова: вакуумный диод, электронный пучок, филаментация, самофокусировка, полиметилметакрилат, разрушение, свечение.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.04.52075.19053

Исследование процесса кумуляции энергии сильнооточных электронных пучков в вакуумных и плазменных диодах представляет интерес для различных научных и прикладных направлений [1–5]. Стимулом проведения таких исследований является общенаучный интерес к двум проблемам: необходимости изучения поведения конденсированных сред при высоких плотностях энергии и получению новых данных о физической природе таких явлений, как филаментация и самофокусировка электронных пучков в диодах со взрывоэмиссионным катодом, механизмы формирования которых окончательно не установлены. Отсутствие последовательной теории явлений филаментации и самофокусировки электронных пучков в вакуумных и газовых диодах сильнооточных электронных ускорителей с различными параметрами стимулировало проведение экспериментальных работ, основанных на различных модельных представлениях [1,4,6–11].

В предыдущих работах [9,12] проведены исследования филаментации и самофокусировки сильнооточных электронных пучков в вакуумном диоде сильнооточного ускорителя электронов с генератором ГИН-600. Было обнаружено формирование множества электронных микропучков высокой плотности, стягивающихся на аноде в центральное пятно самофокусировки. Объемная плотность энергии в пятне самофокусировки в медном аноде достигала $\sim 10^9$ J/m³, что приводило к испарению материала анода, формированию ударной волны и отколу тыльной поверхности медной мишени.

Для фундаментальных и прикладных исследований процесса взаимодействия мощных электронных пучков с конденсированными средами представляется важным вывести самосфокусированный электронный пучок за

анод вакуумного диода и получить максимальную плотность энергии на заданном расстоянии от анода.

Цель настоящей работы — получить информацию о пространственных, временных и энергетических параметрах самосфокусированного сильнооточного электронного пучка (ССЭП), выведенного за анод вакуумного диода.

Эксперименты были проведены на импульсном ускорителе электронов с генератором ГИН-600, к которому подключался вакуумный диод при давлении $\sim 10^{-2}$ Торр. Максимальная энергия электронов в спектре пучка достигала $T \sim 350$ keV, длительность импульса тока пучка на полувысоте варьировалась в диапазоне от 2 до 15 ns. Наибольший ток пучка составлял $I_{\max} \approx 2$ kA. Вакуумный диод был образован трубчатым латунным катодом с радиусом $R = 3$ mm и плоским анодом толщиной ~ 0.5 mm. Аспектное отношение $g = R/d_{CA}$ (где R — радиус катода, d_{CA} — катод-анодный зазор) варьировалось в диапазоне 0.8–1.2.

Электронный пучок выводился из области самофокусировки через отверстие диаметром ~ 1.5 mm в медном аноде и распространялся в цилиндрической вакуумной камере диаметром 23 mm и длиной 15 mm. Пространственная структура пучка регистрировалась по следам разрушений (автографам пучка) образцов из полиметилметакрилата (ПММА), меди и свечению ПММА и сцинтилляторов, устанавливаемых на различных расстояниях L от тыльной поверхности анода. Разрушения, образующиеся в металлах и диэлектриках после однократного импульса облучения, и свечение диэлектриков в момент импульса возбуждения фотографировались зеркальной цифровой фотокамерой SONY DSLR-A500 через микроскоп МБС-10 и микровизором проходящего света

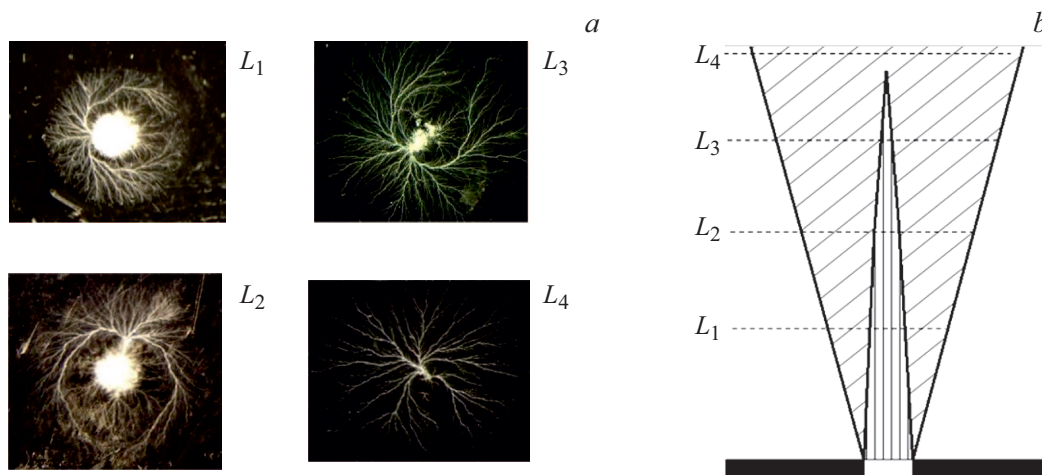


Рис. 1. *a* — фотографии разрушений, формируемых в ПММА электронным пучком, выведенным за анод вакуумного диода, на различных расстояниях от анода: $L_1 = 4$ mm, $L_2 = 6$ mm, $L_3 = 9$ mm, $L_4 = 13$ mm; *b* — пространственная структура электронных пучков, выведенных за анод вакуумного диода. $d_{CA} = 3.5$ mm, $\varnothing_A = 1.5$ mm, $\varnothing_C = 6$ mm.

μ Vizo-101. Ток пучка электронов измерялся с помощью коллектора, состоящего из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50Ω . Коллектор устанавливался за алюминиевой фольгой, отделяющей вакуумный диод от атмосферного воздуха. Для регистрации сигналов с коллектора использовался цифровой осциллограф DPO 3034 (300 MHz). Запуск осциллографа производился с помощью синхроимпульса ускорителя. Временное разрешение системы регистрации составляло ~ 2 ns. Выбор ПММА в качестве материала для диагностики электронного пучка по его свечению и остаточным микроразрушениям определялся тем, что этот диэлектрик имеет низкую плотность, высокую прозрачность и известную морфологию разрушений в виде фигур Лихтенберга (электрического дерева разряда), образующихся при облучении электронными пучками различной плотности, длительности и энергий [13]. Энергия электронов в пучке измерялась двумя методами: по глубине залегания микроразрушений, формируемых электронным пучком в ПММА, и по поглощению электронов в тонких алюминиевых фольгах. Переход в режим испарения регистрировался по следам эрозии, образующимся на поверхности облучаемых мишеней, и по спектрам свечения эрозионной плазмы.

На рис. 1, *a* приведены автографы, сформированные электронным пучком в ПММА, полученные на различных расстояниях L от анода при $d_{CA} = 3.5$ mm и диаметре отверстия в аноде $\varnothing_A = 1.5$ mm. Видно, что неоднородное по диаметру распределение плотности тока пучка приводит к формированию двух типов разрушений. В центральной области облучаемых мишеней образуется совокупность микропузырей диаметром от 10 до $50 \mu\text{m}$, которые возникали, по-видимому, из-за взрывного вскипания полимера при его нагреве ССЭП. Пространственная структура, размеры и форма

микропузырей, образующихся в ПММА при облучении сильноточным электронным пучком в режиме филаментации и самофокусировки при использовании в качестве анода тонкой ($\sim 10 \mu\text{m}$) алюминиевой фольги, были исследованы ранее в [12].

Вокруг зоны вскипания наблюдаются объемные электрические разряды, которые регистрировались за однократный импульс возбуждения в виде кольцевой структуры как по разрушению (рис. 1, *a*), так по свечению. По мере увеличения L диаметр центральной зоны разрушения уменьшается и при $L = 13$ mm наблюдается только один тип разрушений — каналы электрического пробоя (рис. 1, *a*). Обращает на себя внимание тот факт, что после рассеяния ССЭП разрядная кольцевая структура не наблюдается, а вместо нее формируется однородная фигура Лихтенберга, что можно объяснить кулоновским отталкиванием заряженных частиц периферийного электронного пучка и их движением в радиальном направлении. Сравнение фотографий разрушения и свечения ПММА показывает идентичность фигур электрического разряда, зарегистрированных по свечению и разрушению. Отличие фотографий заключается только в том, что объемные разрушения в виде микропузырей по свечению не регистрируются. Это можно объяснить как более низкой температурой ПММА в центральной зоне воздействия ССЭП по сравнению с температурой плазмы в каналах электрического пробоя, так и запаздыванием вскипания полимера по отношению к процессу развития электрических разрядов. Глубина залегания микропузырей от облучаемой поверхности составляет $20\text{--}70 \mu\text{m}$, а каналов электрического пробоя — $350\text{--}450 \mu\text{m}$, что соответствует средней энергии электронов в ССЭП и периферийном электронном пучке ~ 70 и ~ 220 keV соответственно.

Уменьшение величины катод-анодного зазора до $d_{CA} = 2.5$ mm приводит к увеличению плотности

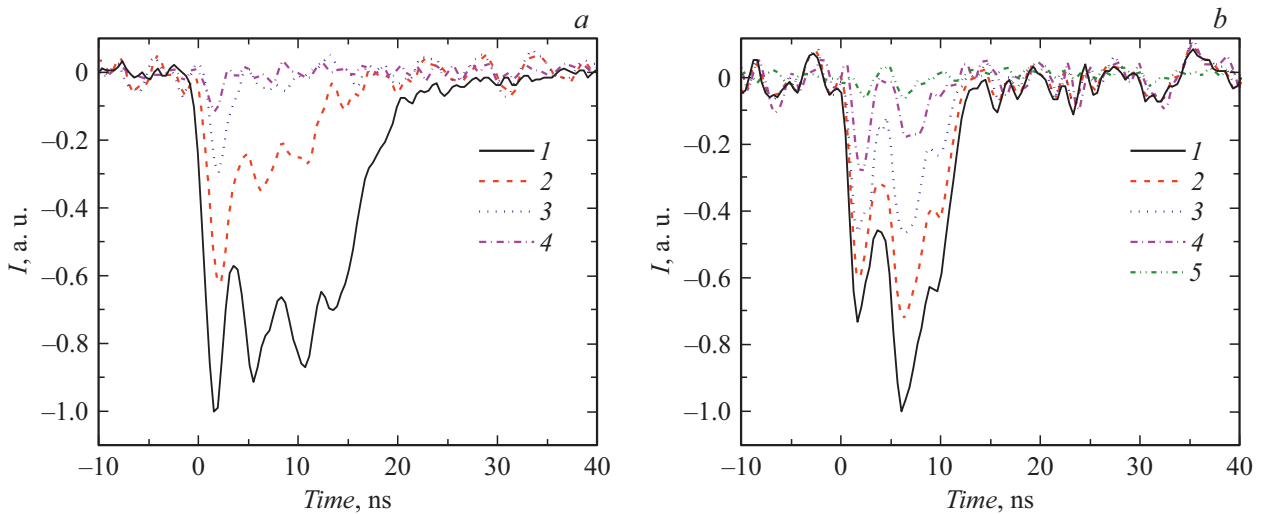


Рис. 2. Осциллограммы тока электронного пучка, выведенного за анод вакуумного диода, после прохождения поглощающих алюминиевых фольг толщиной 30 (1), 80 (2), 130 (3), 230 (4) и $280\ \mu\text{m}$ (5). *a* — ток ССЭП, *b* — ток ВСЭП. $d_{CA} = 3.5\ \text{mm}$, $\varnothing_A = 1.5\ \text{mm}$, $\varnothing_C = 6\ \text{mm}$.

энергии центрального ССЭП, что подтверждается образованием эрозионных пятен на металлических мишенях и глубоких кратеров в ПММА с выбросом продуктов абляции и формированием на облучаемой поверхности полимерных нитей.

При этом периферийный высокоэнергетический сильноточный электронный пучок (ВСЭП), регистрируемый в ПММА по каналам электрического пробоя и по свечению сцинтилляторов, никак не проявляет себя на металлических мишенях, что связано с низкой плотностью энергии ВСЭП. Пространственная структура двух электронных пучков, восстановленная по результатам изучения морфологии разрушений в ПММА, представлена на рис. 1, *b*.

Информация о временных и энергетических параметрах ССЭП и ВСЭП была получена из измерений осциллограмм тока. Для разделения электронных пучков на расстоянии L устанавливались диафрагмы с отверстиями, которые выделяли центральный самосфокусированный или периферийный электронные пучки. На осциллограммах тока ССЭП (рис. 2, *a*) и ВСЭП (рис. 2, *b*), прошедших поглощающие алюминиевые фольги различной толщины, хорошо видно несколько максимумов, которые образуются из-за рассогласования диода с формирующей линией. Сравнение двух осциллограмм (рис. 2, *a* и *b*) показывает, что длительность импульса тока ССЭП превышает длительность импульса тока ВСЭП. Энергии электронов ССЭП и ВСЭП также различаются. Видно, что четвертый пик тока ССЭП (рис. 2, *a*) практически полностью поглощается алюминиевой фольгой толщиной $\sim 80\ \mu\text{m}$, а амплитуды второго и третьего импульсов тока уменьшаются более чем в 2 раза. Это означает, что в ССЭП основная доля электронов имеет энергию $\sim 100\ \text{keV}$. Что касается ВСЭП, то, как видно из осциллограмм, приведенных на рис. 2, *b*, все три импульса

тока присутствуют при суммарной толщине поглощающих алюминиевых фольг $\sim 280\ \mu\text{m}$, что соответствует максимальной энергии электронов $\sim 290\ \text{keV}$.

Таким образом, в пространстве за анодом регистрируются два электронных пучка с различными параметрами. Первый из них — ССЭП с плотностью энергии, достаточной для испарения металлических и диэлектрических мишеней, и средней энергией электронов в спектре $\sim 100\ \text{keV}$ — распространяется в конусе, обращенном основанием к аноду (рис. 1, *b*), с углом при вершине $\sim 7^\circ$. Второй — ВСЭП с плотностью энергии, превышающей пороговую для инициирования электрического пробоя в ПММА ($\geq 0.2\ \text{J/cm}^2$), и максимальной энергией электронов в спектре $\sim 290\ \text{keV}$ — распространяется центрально-симметрично относительно ССЭП в полем усеченном конусе с углом при вершине, обращенной к аноду, $\sim 22^\circ$ (рис. 1, *b*). Длина транспортировки ССЭП в вакуумной камере длиной $15\ \text{mm}$ и диаметром $23\ \text{mm}$ при $d_{CA} = 2.5\ \text{mm}$ и диаметре отверстия в аноде $\varnothing_A = 1.5\ \text{mm}$ составляет $L \sim 10\ \text{mm}$. Приведенная на рис. 1, *b* пространственная структура ССЭП и ВСЭП, по-видимому, формируется в результате взаимодействия электромагнитных полей двух пучков между собой и со стенками вакуумной камеры. Одна из причин распада ССЭП может быть связана с развитием различного рода неустойчивостей.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках программы развития ТПУ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] D.D. Hinshelwood, R.J. Allen, R.J. Comisso, G. Cooperstein, B.M. Huhman, D. Mosher, D.P. Murphy, P.F. Ottinger, J.W. Schumer, S.B. Swanekamp, S.J. Stephanakis, B.V. Weber, F.C. Young, I. Crotch, J. O'Malley, J.R. Threadgold, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **35** (3), 565 (2007). DOI: 10.1109/TPS.2007.895227
- [2] В.Е. Фортвов, *Физика высоких плотностей энергии* (Физматлит, М., 2013).
- [3] Б.А. Демидов, В.П. Ефремов, В.А. Петров, А.Н. Мещеряков, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 9, 18 (2009). [B.A. Demidov, V.P. Efremov, V.A. Petrov, A.N. Mescheryakov, *J. Synch. Investig.*, **3** (5), 673 (2009). DOI: 10.1134/S1027451009050036
- [4] Э.Э. Тарумов, *Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков* (Энергоатомиздат, М., 1990).
- [5] В.И. Олешко, *Пороговые процессы в твердых телах при взаимодействии с сильноточными электронными пучками*, автореф. докт. дис. (ТПУ, Томск, 2009).
- [6] S. Anishchenko, V. Baryshevsky, N. Belous, A. Gurinovich, E. Gurinovich, E. Gurnevich, P. Molchano, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **45** (10), 2739 (2017). DOI: 10.1109/TPS.2017.2707591
- [7] V.I. Baryshnikov, V.L. Paperny, *Phys. Plasmas.*, **25** (8), 083106 (2018). DOI: 10.1088/1361-6463/aa85c4
- [8] М.И. Ломаев, В.Ф. Тарасенко, А.В. Дятлов, *Изв. вузов. Физика*, **62** (6), 68 (2019). DOI: 10.17223/00213411/62/6/68 [M.I. Lomaev, V.F. Tarasenko, A.V. Dyatlov, *Russ. Phys. J.*, **62** (6), 996 (2019). DOI: 10.17223/00213411/62/6/68].
- [9] В.И. Олешко, В.Ф. Тарасенко, А.Г. Бураченко, V.V. Nguyen, *Письма в ЖТФ*, **45** (7), 3 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.07.47526.17640 [V.I. Oleshko, V.F. Tarasenko, A.G. Burachenko, V.V. Nguyen, *Tech. Phys. Lett.*, **45** (4), 309 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019040023].
- [10] Г.А. Месяц, В.Г. Шпак, *Письма в ЖТФ*, **3** (14), 708 (1977).
- [11] А.А. Жерлицын, Б.М. Ковальчук, Н.Н. Педин, *ЖТФ*, **84** (4), 132 (2014). [A.A. Zherlitsyn, B.M. Koval'chuk, N.N. Pedin, *Tech. Phys.*, **59** (4), 600 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214040276].
- [12] V. Oleshko, A. Yakovlev, V. Tarasenko, V. Nguyen, in *Proc. 2020 7th Int. Congress on energy fluxes and radiation effects (EFRE)* (IEEE, 2020), p. 906. DOI: 10.1109/EFRE47760.2020.9242003
- [13] А.И. Акишин, *Космическое материаловедение* (НИИЯФ МГУ, М., 2007).