

УДК 537.533.9:538.97

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВАКУУМНОГО ДИОДА НА  
САМОФОКУСИРОВКУ СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА**

В.В. Нгуен, В.И. Олешко

Научный руководитель: профессор, д.ф.-м.н., В.И. Олешко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,

Россия, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050

E-mail: [nguyenvutpu@gmail.com](mailto:nguyenvutpu@gmail.com)

**INFLUENCE OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A VACUUM DIODE ON SELF-FOCUSING OF A  
HIGH-CURRENT ELECTRONIC BEAM**

V.V. Nguyen, V.I. Oleshko

Scientific Supervisor: Prof., Dr. V.I. Oleshko

Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050

E-mail: [nguyenvutpu@gmail.com](mailto:nguyenvutpu@gmail.com)

***Abstract.** The morphology of damage formed on the surface of various materials under irradiation with a self-focused high-current electron beam has been studied. The optimal geometric parameters of the vacuum diode have been determined, which make it possible to obtain beam energy densities up to  $10^{10} \text{ J/m}^3$ .*

**Введение.** Самофокусировка релятивистских электронных пучков (РЭП) в вакуумных диодах с малым катод-анодным зазором позволяет генерировать РЭП с высокой плотностью мощности  $\sim (10^{10} - 10^{12}) \text{ Вт/см}^2$ , что находит применение во многих областях физики: генерации мощных потоков рентгеновского излучения [1], формирования ударных волн [2] и др. К настоящему времени опубликовано значительное число работ, посвященных изучению эффекта самофокусировки релятивистских электронных пучков (РЭП), ток которых превышает ток Альфвена:  $I_A \geq 20 \text{ кА}$  [2]. Что касается физической природы явлений филаментации и самофокусировки сильноточных электронных пучков (СЭП), с током  $< 20 \text{ кА}$ , то эти процессы менее изучены и требуется проведение дополнительных исследований.

В работе [3] были исследованы процессы, приводящие к филаментации и самофокусировке электронного пучка в вакуумном диоде электронного ускорителя с генератором ГИН-600. Было установлено, что в вакуумном диоде формируются два электронных пучка с различными пространственными характеристиками: однородный высокоэнергетический пучок низкой плотности и самософокусированный пучок с плотностью тока, достаточной для испарения различных металлов. Предварительные исследования, проведенные нами, свидетельствовали о влиянии геометрических параметров вакуумного диода на процесс самофокусировки электронного пучка.

Цель настоящей работы – определить оптимальные геометрические параметры вакуумного диода в импульсном сильноточном ускорителе электронов с генератором ГИН-600, позволяющие генерировать самофокусированный сильноточный электронный пучок с высокой плотностью энергии до  $10^{10} \text{ Дж/м}^3$ .

**Методика и материалы.** Эксперименты были проведены на импульсном ускорителе электронов с генератором ГИН-600 [3] к которому подключался вакуумный диод. Максимальная энергия электронов в спектре пучка достигала 400 кэВ, длительность импульса тока СЭП на полувысоте  $\tau_{1/2}$  изменялась от 2 до 12 нс. В экспериментах использовались цилиндрические катоды, изготовленные из латунных трубок с диаметрами от 3 до 8 мм. Процесс фокусировки исследовался по следам эрозии на анодных пластинах из различных металлов («автографам» электронного пучка) с помощью оптической микроскопии с пространственным разрешением  $\sim 10$  мкм. В качестве анодов использовались алюминиевые и медные фольги различной толщины (10 – 500 мкм). В отдельных экспериментах использовались полимерные образцы с нанесенной на их поверхность алюминиевой фольги. Давление в вакуумной камере составляло  $\sim 10^{-2}$  Торр. Ток электронного пучка измерялся с помощью коллектора, состоящего из металлического конуса, образующего с корпусом линию с волновым сопротивлением 50 Ом. Энергия электронов определялась методом поглощения в тонких алюминиевых фольгах. Конструкция вакуумного диода приведена на рис. 1. Типичные осциллограммы тока СЭП, измеренные в режиме самофокусировки и при ее отсутствии, приведены на рис. 2.

### Результаты.

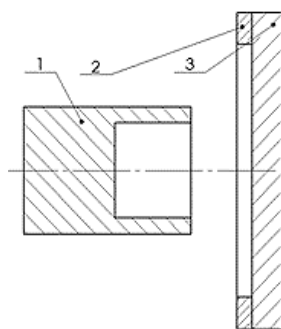


Рис. 1. Конструкция вакуумного диода: 1 – полый цилиндрический катод; 2 – держатель для съемных анодов; 3 – анод

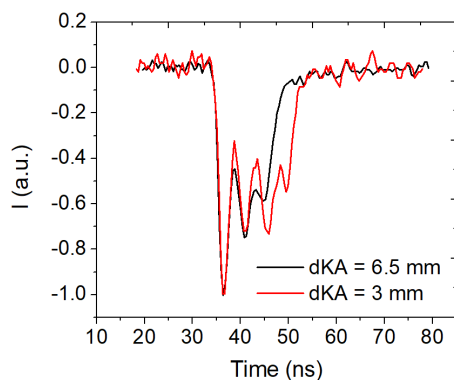


Рис. 2. Осциллограммы тока СЭП в режиме самофокусировки ( $d_{KA}=3$  мм) и без самофокусировки ( $d_{KA}=6,5$  мм)



Рис. 3. Фотография «автографа» самосфокусированного СЭП на медном аноде:  $\Phi_K=6$  мм;  $\tau=12$  нс;  $d_{KA}=3$  мм

В первой серии экспериментов автографы пучка изучались на пластинках из меди, алюминия и винипроза при варьировании межэлектродного зазора от 3 до 8 мм. Эрозионная фигура, образующаяся в медной пластинке после однократного импульса облучения при  $d_{KA} = 3$  мм и  $\Phi_K = 6$  мм,  $\tau_{1/2} = 12$  нс приведена на рис. 3. Видно, что в результате однократного импульса облучения на поверхности исследуемой мишени образуется разрушение в виде многолучевой звезды с центральным пятном самофокусировки.

На рис. 4 приведены зависимости диаметра центрального кратера от величины межэлектродного зазора (а), диаметра катода при  $d_{KA} = 3$  мм (б) и длительности импульса при  $\Phi_K = 6$  мм,  $d_{KA} = 3$  мм (в). Особенности морфологии разрушений, образующихся в полимерах, в частности полиметилметакрилате, подробно изучены в [4]. Из анализа рис. 4 следует, что с увеличением межэлектродного зазора  $d_{KA}$  от 3 до 9 мм, диаметр центрального кратера постепенно уменьшается для всех исследованных материалов. При

этом наиболее чувствительным, в плане диагностики явления самофокусировки, является винипроз. Действительно, в алюминии центральный эрозионный кратер исчезал при  $d_{KA} = 4,5$  мм, в меди – при  $d_{KA} = 6$  мм, а в винипрозе при  $d_{KA} = 9$  мм.

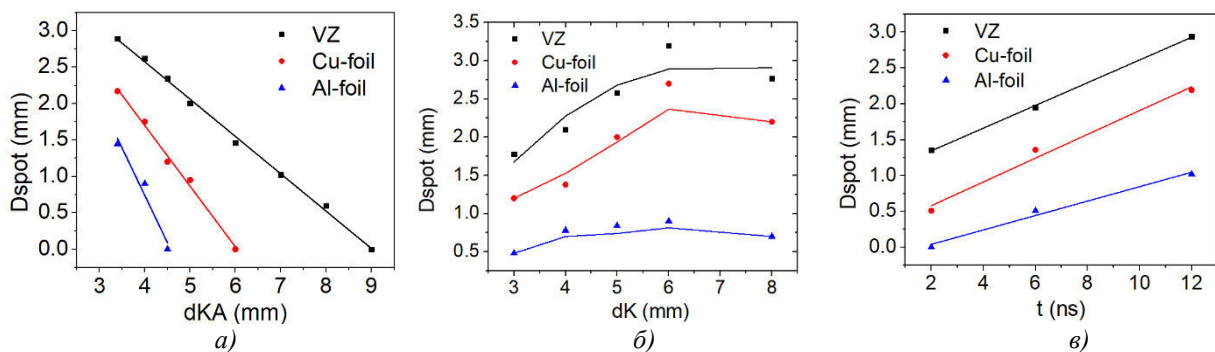


Рис. 4. Зависимость диаметра центрального кратера, образующегося на поверхности винипроза (VZ), меди и алюминия, от межэлектродного зазора (а), диаметра катода при  $d_{KA} = 3$  мм (б) и длительности импульса тока СЭП (в)

При фиксированном межэлектродном зазоре  $d_{KA} = 3$  мм и изменении диаметра катода от 3 до 8 мм, диаметр кратера вначале увеличивается до максимального значения при  $\Phi_K = 6$  мм и после этого уменьшается. С увеличением длительности импульса от 2 до 12 нс, диаметр центрального кратера увеличивается. Следует отметить определяющую роль полости в катоде. При ее отсутствии явление самофокусировки не наблюдается, а на поверхности исследуемых материалов образуются локальные эрозионные пятна, хаотично расположенные по облучаемой поверхности образцов.

**Заключение.** Результаты экспериментальных исследований позволили определить геометрические параметры вакуумного диода, необходимые для реализации процесса самофокусировки в импульсном сильноточном ускорителе электронов с генератором ГИН-600. Вакуумный диод с оптимальными геометрическими параметрами представляет собой полый цилиндрический катод с глубиной полости не менее  $\sim 0,5$  мм, диаметром катода  $\Phi_K \sim 6$  мм и величиной катод - анодного зазора  $d_{KA} \sim (2,5 - 3)$  мм.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Philip N. Martin, James R. Threadgold and Simon Vickers. Critical Current Operation of the Optimized Self-Magnetic-Pinch Radiographic Diode // IEEE transactions on plasma science. – 2013. – Vol. 41, No. 9. – С. 2510-2515.
2. Тарумов Э.Э. Получение и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков в диодах // Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков / под ред. Л.И. Рудакова. М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 122-181.
3. Олешко В.И., Тарасенко В.Ф., Бураченко А.Г., Nguen V.V. Филаментация и самофокусировка электронных пучков в вакуумных и газовых диодах // ПЖТФ. – 2019. – Т. 45, №.7. – С. 3-7.
4. Oleshko V., Nguyen V.V. et al. Morphology of destruction of solids when exposed to a high-current electron beam in the modes of filamentation and self-focusing modes // 7th International Congress on EFRE - 19th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter. – Tomsk, 2020. – С. 906-910.