

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ  
ТЕХНИКА**

УДК 537.525

**О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ В ПОПЕРЕЧНОМ  
СЕЧЕНИИ РАДИАЛЬНО СХОДЯЩЕГОСЯ  
НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОННОГО  
ПУЧКА**

© 2023 г. П. П. Кизириди<sup>а</sup>, Г. Е. Озур<sup>а,\*</sup>

*<sup>а</sup>Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской  
академии наук,*

*Россия, 634055, Томск, пр. Академический, 2/3*

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

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 09.08.2023 г.

Принята к публикации 08.09.2023 г.

С использованием секционированного трехканального калориметра измерено распределение плотности энергии в поперечном сечении радиально сходящегося низкоэнергетического (до 25 кэВ) сильноточного электронного пучка. Формирование пучка осуществлялось с помощью двухсекционного катодного узла. В кольцевой катод каждой секции, имеющий внутренний радиус 4 см, встроены 18 резистивно развязанных дуговых источников плазмы, инициируемых пробоем по поверхности диэлектрика. Расстояние между центрами секций составляло 4 см. Измерения проводились как в режиме вакуумного диода (давление остаточных газов 0.006 Па), так и газонаполненного диода (аргон при давлении 0.08 Па). Показано, что плотность энергии в центральной части пучка в среднем на 25–30% выше, чем на его периферии, что может быть приемлемо для решения многих задач по поверхностной модификации металлов и сплавов. Ресурсные испытания катодного узла показали устойчивость его работы на протяжении минимум 50 000 импульсов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Сильноточные радиально сходящиеся электронные пучки, используемые для поверхностной модификации материалов, должны иметь приемлемую однородность распределения плотности энергии вдоль  $z$ -координаты,  $W(z)$ , на обрабатываемой мишени (аноде). Автографы пучка на аноде (области оплавления его поверхности), представленные, в частности, в наших предыдущих работах [1, 2], дают лишь качественное представление о распределении плотности энергии в пучке. Эти автографы

только фиксируют факт превышения порога поверхностного плавления для данного материала анода (обрабатываемой мишени). О распределении плотности энергии можно было бы судить по глубине проплавления материала на различных участках анода, однако такой метод чрезвычайно трудоемок и неэкономичен из-за необходимости приготовления большого количества поперечных шлифов. В настоящей работе нами проведены количественные измерения распределения  $W(z)$  с помощью секционированного трехканального калориметра.

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментах использовалась установка, устройство и принцип действия которой описаны в работе [2]. На рис. 1 представлен общий вид рабочей камеры и электронной пушки. Все эксперименты проводились с двухсекционным вариантом катодного узла, ширина автографа пучка на аноде в этом случае составляла около 7 см [2]. На рис. 2 представлено устройство трехканального секционированного калориметра, который устанавливался вместо стержневого анода. Каждый датчик представлял собой медный поглотитель электронов пучка, прошедших через коллимирующее отверстие диаметром 6.8 мм; к тыльной стороне поглотителя припаян калиброванный терморезистор В57820-М 561-А5 номиналом 1 кОм при температуре 25 °С, сопротивление  $R$  которого до и после импульса пучка измерялось цифровым мультиметром. Датчики располагались внутри полого анода наружным радиусом  $R_A = 0.8$  см; каждый датчик пайкой электрически соединялся с анодом двумя нержавеющими проволоками диаметром 0.3 мм и длиной 8 мм. Масса каждого датчика составляла  $4.9 \pm 0.1$  г. Калибровочные кривые всех терморезисторов  $R(T)$  описываются функцией  $R = R_0 \exp(G/T)$ , где  $R_0 = 0.00157$  Ом,  $G = 4002$  К,  $T$  – температура датчика в Кельвинах с точностью не хуже  $\pm 4\%$ . Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов,  $U_{ch}$ , определяющее амплитуду импульса ускоряющего напряжения, варьировалось в интервале от 12 до 23 кВ.

При проведении измерений мы исходили из азимутальной симметрии пучка. В пользу этого говорят азимутальная однородность автографов пучка на аноде и азимутальная однородность свечения плазмы в диоде, приведенных в нашей предыдущей работе [2]. Таким образом, в первом приближении можно считать пучок азимутально симметричным и исследовать распределение плотности энергии в зависимости только от координаты  $z$ .

Регистрация импульсов ускоряющего напряжения осуществлялась с помощью активного делителя, измерений полного тока в разрядном контуре и тока пучка на анод – поясами Роговского, работающими в режиме трансформатора тока. Сигналы с датчиков

подавались на входы 4-канального широкополосного (200 MHz) цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024.

Откачка рабочей камеры до давления 0.006 Па осуществлялась турбомолекулярным насосом, а напуск рабочего газа (аргон) – с помощью прибора СНА-2.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения, полного тока катода и токов на анод приведены рис. 3. Токи на анод, регистрируемые в цепях токосъемов 8 и 9 (рис. 1), несколько отличаются ввиду различной длины отрезков анода от плоскости катода до соответствующего токосъема, а значит, и их индуктивности. Рост токов начинается примерно через 2.5 мкс после начала импульса – это время необходимо для заполнения плазмой (прежде всего катодной) зазора между катодом и анодом, поскольку начальная токопропускная способность вакуумного зазора шириной  $d = R_K - R_A = 3.2$  см (здесь  $R_K = 4$  см – внутренний радиус катода) сильно ограничена объемным зарядом электронов пучка. Необходимо также отметить, что ток пучка на анод уменьшается с радиусом анода (что видно из сравнения рис. 3в с рис. 3а, б), но незначительно (с 25 кА до 22 кА). Это можно объяснить тем, что уменьшение площади анода и, соответственно, площади эмитирующей поверхности катодной плазмы компенсируется эквивалентным увеличением концентрации электронов, а значит, и плотности эмиссионного тока. Таким образом, плотность энергии пучка на аноде должна возрасти с уменьшением радиуса последнего почти обратно пропорционально.

Рис. 3

Результаты калориметрических измерений приведены на рис. 4. Усреднение проводилось по 10 измерениям в каждой серии. Видно, что в центральной области пучка, как правило, плотность энергии несколько выше, чем в периферийной области, несмотря на то, что крайние датчики располагались в плоскостях расположения катодных секций. Основной причиной этого, на наш взгляд, является стягивание электронов пучка в его центральную область под действием собственного магнитного поля. Но в первом приближении можно обеспечить достаточно однородную обработку протяженных изделий при их продольном перемещении и числе импульсов в серии (в одном местоположении) около 10–15. Статистический разброс (стандартное отклонение) от импульса к импульсу составляет от 12 до 38%, что вероятно вызвано локальными нестабильностями концентрации катодной плазмы.

Рис. 4

Сопоставление результатов калориметрических измерений с автографами пучка на различных металлических анодах (нержавеющая сталь, медь, латунь), полученными в [1, 2], и данными компьютерных расчетов порогов плавления [3, 4] показало

удовлетворительное согласие между ними. Кроме того, результаты настоящих измерений коррелируют с результатами измерений полной энергии пучка цилиндрическим калориметром [2], а также оценками этой энергии по осциллограммам ускоряющего напряжения (с коррекцией на индуктивное падение напряжения) и суммарного тока пучка на анод.

Нами были проведены также ресурсные испытания катодного узла и источника низкоэнергетического сильноточного электронного пучка в целом. Условия испытаний:  $U_{ch} = 18$  кВ, давление аргона – 0.08 Па, анод – стержень из нержавеющей стали диаметром 1 см, частота посылок импульсов – 1 имп/10 с, общее число импульсов – 50 000. Периодическая проверка осциллограмм импульсов показала, что деградации токовых характеристик источника не наблюдается. Устойчивость работы катодного узла объясняется тем, что пробивные напряжения по поверхности диэлектрика в вакууме на порядок ниже пробивных напряжений в отсутствие диэлектрика [5]. Это и обеспечивает надежное срабатывание дуговых источников плазмы в катодном узле.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные калориметрические измерения распределения плотности энергии по сечению радиально сходящегося низкоэнергетического сильноточного электронного пучка дают возможность подбора режимов облучения образцов и изделий. Плотность энергии в центральной части пучка, как правило, в среднем на 25–30% выше, чем на его периферии, но для решения многих задач поверхностной модификации металлических материалов такая неоднородность вполне приемлема. Данная неоднородность распределения, вызванная фокусировкой электронов пучка под действием собственного магнитного поля, может быть в дальнейшем компенсирована увеличением расстояния между катодными секциями.

Надежность работы катодного узла подтверждена ресурсными испытаниями в течение 50 тысяч импульсов.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузириди П.П., Озур Г.Е. // ПТЭ. 2022. № 6. С. 61. doi:10.31857/S0032816222060143
2. Кузириди П.П., Озур Г.Е. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 84. doi:10.31857/S0032816223030072
3. Rotshtein V.P., Ivanov Yu.F., Markov A.B. et al. // Surface & Coatings Technology. 2006. V. 200. P. 6378.

4. *Марков А.Б., Соловьев А.В.* // Известия вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 11. С. 93. doi: 10.17223/00213411/65/11/93
5. *Месяц Г.А.* Импульсная энергетика и электроника. Москва: Наука, 2004. С. 86.

## ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

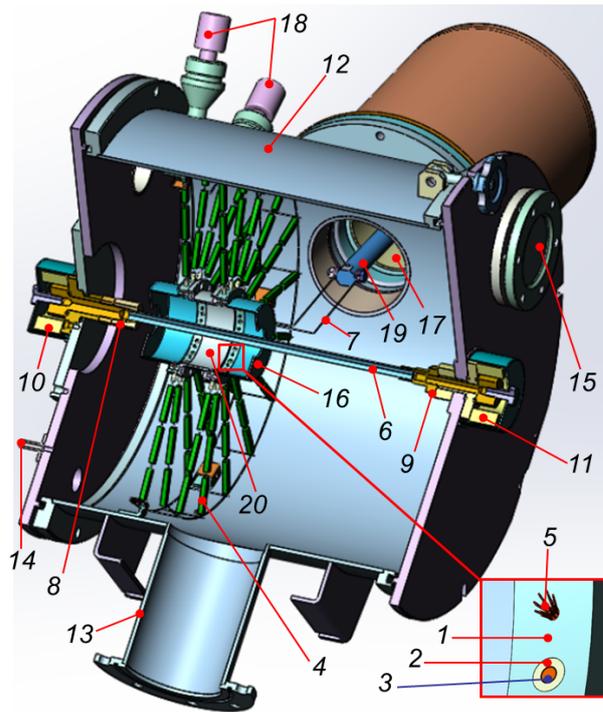
**Рис. 1.** Общий вид рабочей камеры и электронной пушки: 1 – катод, 2 – керамическая трубка, 3 – электрод дугового источника плазмы, 4 – резистор ТВО-2, 5 – пучок медных проволок, 6 – стержневой анод диаметром 10 мм, 7 – подводы импульса высокого напряжения к катоду, 8 и 9 – цанговые токосъемы, 10 и 11 – пояса Роговского, 12 – рабочая камера, 13 – патрубок откачки, 14 – патрубок напуска рабочего газа, 15 – смотровое окно, 16 – чашеобразный экран, 17 – изолятор ввода ускоряющего напряжения, 18 – датчики давления газа, 19 – стержневой ввод ускоряющего напряжения, 20 – соединительный стакан.

**Рис. 2.** Схематическое устройство секционированного калориметра: 1 – полый анод, 2 – коллимирующие отверстия, 3 – медный поглотитель, 4 – терморезистор, 5 и 6 – токопроводы. Координата  $z = 0$  соответствует положению посередине между катодными секциями, расстояние между центрами катодных секций 4 см. Выводы терморезисторов условно не показаны.

**Рис. 3.** Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (1-й канал, 20 кВ/дел.), полного тока катода (2-й канал, 12 кА/дел.) и токов пучка на анод (3-й и 4-й канал, 10 кА/дел.),  $U_{ch} = 18$  кВ: **а** – газонаполненный диод (аргон при 0.08 Па, радиус анода – 0.8 см), **б** – вакуумный диод (давление остаточных газов – 0.006 Па, радиус анода – 0.8 см), **в** – газонаполненный диод (аргон при 0.08 Па, радиус анода – 0.5 см). Временной масштаб – 1 мкс/дел.

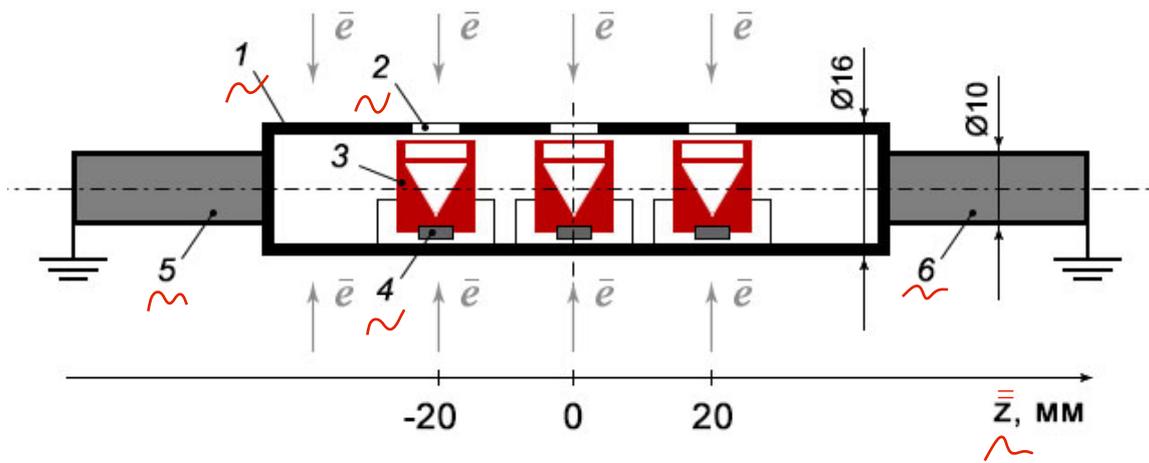
**Рис. 4.** Распределения плотности энергии пучка вдоль анода для различных значений зарядного напряжения.

Рисунок 1



цифры - курсив

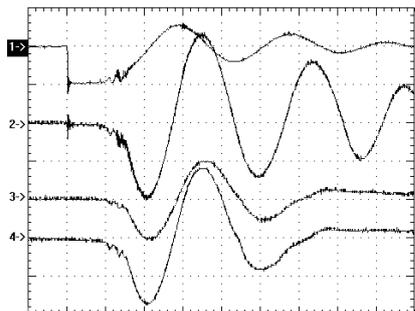
Рисунок 2



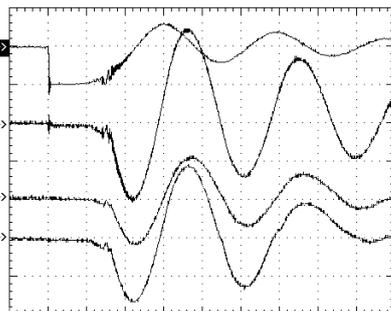
сетку убрать

цифры со стрелкой

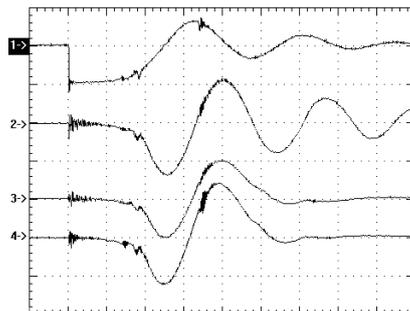
Рисунок 3



(a)



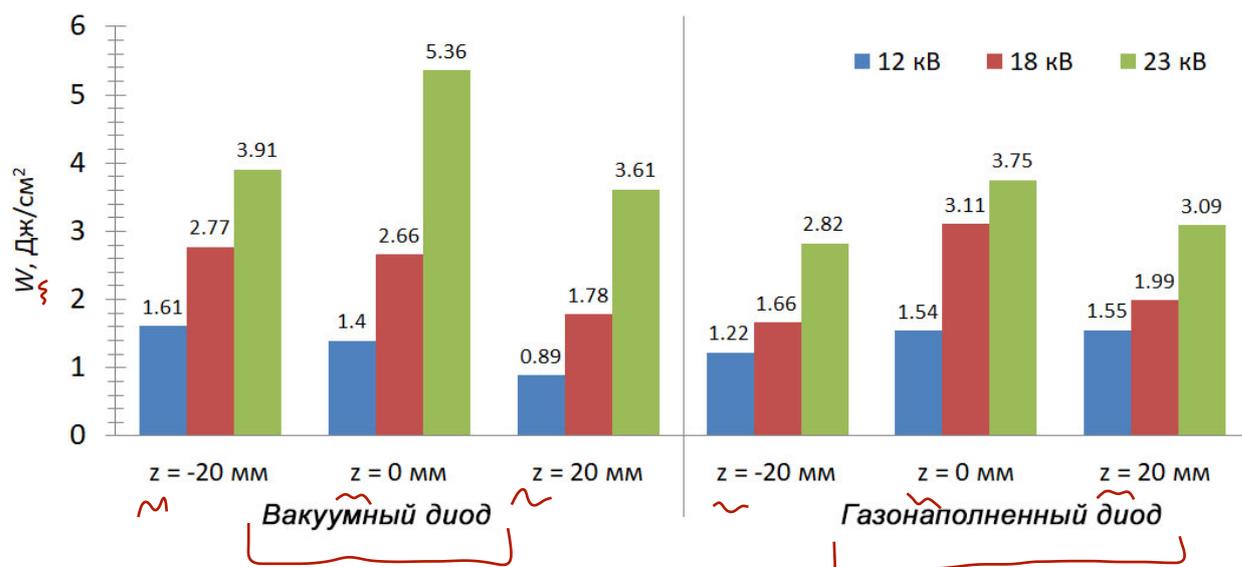
(б)



(в)



Рисунок 4



**Для связи с авторами:**

**Кизириди Павел Петрович**

**Тел.: 8-923-434-43-63 (моб.)**

**Тел.: (3822)49-20-52 (сл.)**

**E-mail: [kiziridi\\_pavel@mail.ru](mailto:kiziridi_pavel@mail.ru)**

**Озур Григорий Евгеньевич**

**Тел.: 8-962-785-04-83 (моб.)**

**Тел.: (3822)49-20-52 (сл.)**

**E-mail: [ozur@lve.hcei.tsc.ru](mailto:ozur@lve.hcei.tsc.ru)**

**Для переводчика:**

ENERGY DENSITY DISTRIBUTION VIA CROSS SECTION OF A RADIALLY CONVERGING, LOW-ENERGY, HIGH-CURRENT ELECTRON BEAM

Аннотация:

An energy density distribution of a radially converging, low-energy (up to 25 keV), high-current electron beam has been measured using a sectioned calorimeter. The beam formation was performed with the help of two-sectioned cathode assembly. Eighteen resistively decoupled arc plasma sources triggered by dielectric surface flashover were built-in to 4-cm in radius ring cathode of each section. The distance between the centers of sections was 4 cm. Measurements were carried out both in the mode of vacuum diode and gas-filled diode (argon at pressure of 0.08 Pa). It has been shown that energy density in the beam central part is higher in average by a factor of 25–30% than in its periphery and it is acceptable for solving many tasks of surface modification of metals and alloys. Lifetime tests of the cathode assembly have shown its operation stability for 50,000 pulses in minimum.