

## Характеристики сильноточной электронной пушки с плазменным анодом на основе гибридного разряда

© П.П. Кизириди, Г.Е. Озур

Институт сильноточной электроники СО РАН,  
634055 Томск, Россия  
e-mail: kiziridi\_pavel@mail.ru

Поступило в Редакцию 24 мая 2019 г.

В окончательной редакции 24 мая 2019 г.

Принята к публикации 20 июня 2019 г.

Представлены результаты исследования пространственной структуры свечения и временной динамики гибридного разряда, сочетающего сильноточный отражательный разряд с вакуумными дугами, инициируемыми искровым пробоем по поверхности диэлектрика, при напряжении питания разряда до 9 кВ и давлениях рабочего газа (аргон) 0.1–1 мТорр. Показана возможность формирования плазменного анода с усиленной на периферии концентрацией ионов, в том числе при использовании вспомогательного экрана. Также представлены результаты измерений распределения плотности энергии по сечению нерелятивистского (до 30 кеВ) сильноточного (до 25 кА) пучка, формируемого в электронной пушке со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом на основе этого (гибридного) разряда. Данные результаты сопоставимы с результатами, полученными при использовании концентраторов магнитного поля. Поскольку использование концентраторов не всегда возможно, то предложенный метод улучшения однородности пучка является перспективным.

**Ключевые слова:** сильноточный электронный пучок, плазменный анод, гибридный разряд, дуговые источники плазмы, сильноточный отражательный разряд, однородность пучка.

DOI: 10.21883/JTF.2020.02.48826.206-19

### Введение

Сильноточные (до 25 кА) электронные пушки со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом широко используются для получения низкоэнергетических (до 40 кеВ) пучков микросекундной длительности, применяемых для поверхностной модификации материалов [1–3]. Плазменный анод является одним из ключевых элементов таких пушек; наиболее часто для формирования плазменного анода используют сильноточный отражательный (пеннинговский) разряд (ОР) [1–4]. Для улучшения однородности распределения плотности энергии по сечению пучка предпочтительно создавать плазменный анод с концентрацией ионов, увеличенной в периферийной области [5,6]. Для этой цели в [5,6] использовался гибридный разряд, сочетающий сильноточный ОР с вакуумными дугами, инициируемыми искровым пробоем по поверхности диэлектрика. Катоды дуговых источников плазмы (12 штук) встраивались непосредственно в кольцевой анод ОР, являвшимся одновременно их общим анодом, и заземлялись через резисторы. Зажигание вакуумных дуг на периферии плазменного анода обеспечивает многоэлектронное инициирование пеннинговского разряда и повышает концентрацию анодной плазмы именно в периферийной части столба. Было установлено, что плазменный анод на основе данного гибридного разряда позволяет несколько улучшить однородность пучка, но стабильность его параметров от импульса к импульсу оставляла желать лучшего.

Одной из причин недостаточной стабильности считалась недостаточная амплитуда импульса напряжения, подаваемого на анод ( $\leq 5$  кВ), что приводило к нестабильности зажигания вакуумных дуг.

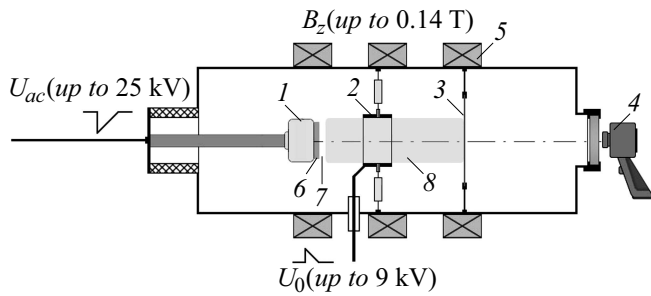
В настоящей работе исследована пространственная структура свечения и временная динамика такого разряда при повышенном (до 9 кВ) анодном напряжении, а также проведены тепловизионные измерения распределения плотности энергии по сечению низкоэнергетического сильноточного электронного пучка (НСЭП), формируемого в данной электронной пушке в различных режимах.

### 1. Экспериментальная установка и методики измерений

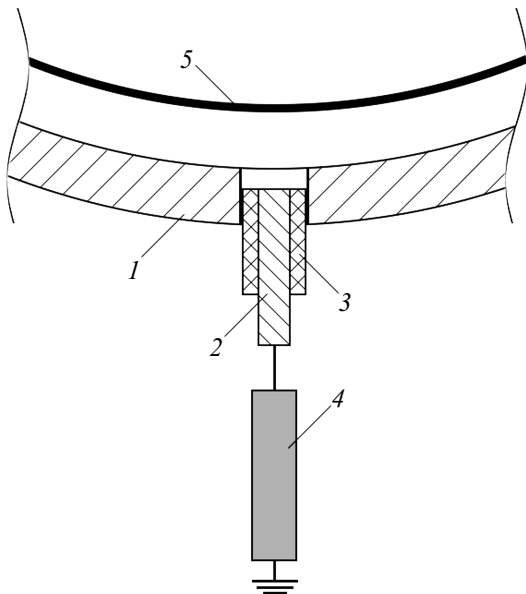
Эксперименты проводились на установке „ВЭКсМА“, электронная пушка которой представлена на рис. 1.

В экспериментах использовались два катода: меднооплеточный катод с диаметром рабочей поверхности 85 мм (диаметр обоймы — 93 мм) и катод с резистивной развязкой эмиттеров диаметром 58 мм (диаметр обоймы — 80 мм).

Анодный узел, принцип работы которого описан во введении, имел внутренний диаметр 80 мм и высоту (ширину) 30 мм. Катоды дуговых источников, каждый из которых заземлен через резистор 75  $\Omega$ , изготовлены из медной проволоки диаметром 2 мм и немного „утопле-



**Рис. 1.** Электронная пушка установки „ВЭКсМА“: 1 — взрывоэмиссионный катод, 2 — анодный узел, 3 — мишень (сетка или тепловизионная мишень), 4 — средство съемки (цифровой фотоаппарат CASIO QV-3000EX/Ir или тепловизор TESTO 875-1), 5 — соленоид, 6 — катодная плазма, 7 — двойной слой, 8 — анодная плазма.



**Рис. 2.** Дуговой источник плазмы: 1 — стенка кольцевого анода, 2 — медный катод, 3 — керамическая трубка, 4 — резистор ТВО-2, 5 — экран.

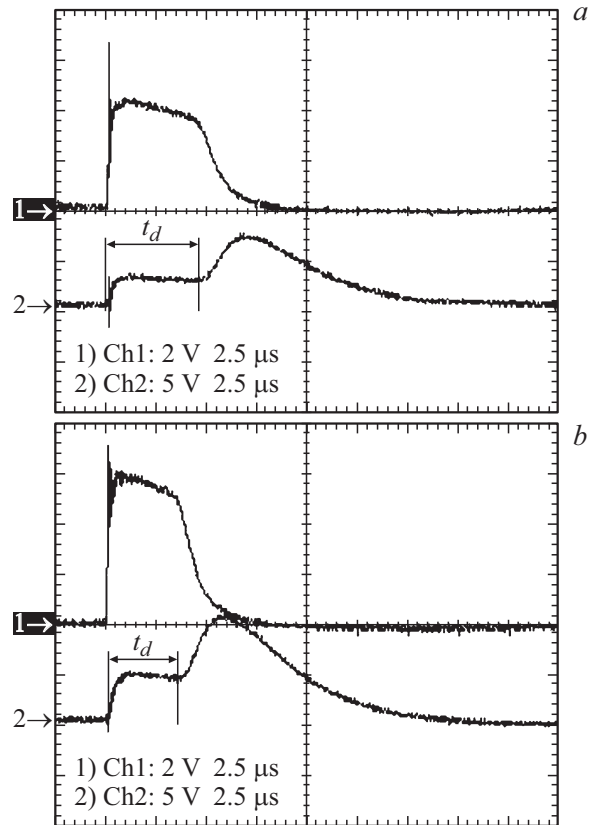
ны“ вглубь стенки анода (рис. 2). В ряде экспериментов на аноде устанавливался кольцевой экран, ограничивающий распространение плазмы дугowych источников в радиальном направлении. Диаметр кольцевого экрана, изготовленного из нержавеющей фольги толщиной  $200\ \mu\text{m}$ , составлял  $70\ \text{mm}$ , а его ширина —  $15\ \text{mm}$ .

При исследовании пространственной структуры свечения разряда коллектором служила сетка из нержавеющей стали. Регистрация свечения проводилась с помощью расположенного за торцевым окном цифрового фотоаппарата CASIO QV-3000EX/Ir в режиме открытого затвора, т.е. фиксировалось интегральное за импульс свечение.

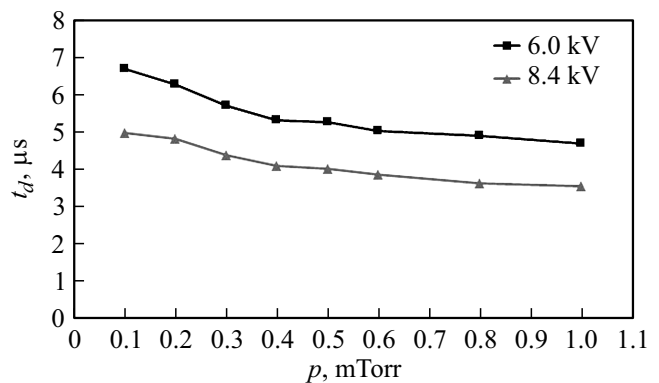
При изучении распределения плотности энергии по сечению пучка коллектором служила тепловизионная

мишень диаметром  $110\ \text{mm}$  и толщиной  $200\ \mu\text{m}$ , изготовленная из нержавеющей стали и покрытая с тыльной стороны черной матовой краской. Измерения проводились с помощью тепловизора TESTO 875-1 по методике, описанной в [7–9].

Наряду с регистрацией свечения разряда и тепловизионными измерениями, проводилось осциллографирование (Tektronix 2024,  $200\ \text{MHz}$ ) как разряда, так и пучка.



**Рис. 3.** Типичные осциллограммы напряжения (Ch1,  $2\ \text{kV/div}$ ) и тока разряда (Ch2,  $1\ \text{kA/div}$ ) (*a* —  $6\ \text{kV}$ , *b* —  $8.4\ \text{kV}$ ). Горизонтальная шкала:  $2.5\ \mu\text{s/div}$ .



**Рис. 4.** Время задержки перехода отражательного разряда в сильноточную стадию в зависимости от давления рабочего газа и напряжения.

Индукция ведущего магнитного поля, создаваемого секционированным соленоидом, питаемым от конденсаторной батареи  $200\ \mu\text{F}$ , составляла  $0.14\ \text{T}$ . Регулировка исходной концентрации анодной плазмы осуществлялась путем изменения времени задержки,  $\tau$ , между началом импульса тока разряда и подачей импульса ускоряющего напряжения на катод.

Управление моментами включения источников питания ведущего магнитного поля, разряда и ускоряющего напряжения осуществлялось с помощью генератора задержанных импульсов с оптической развязкой каналов.

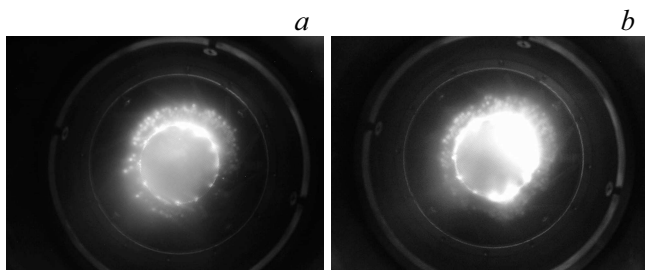
Откачка рабочего объема осуществлялась турбомолекулярным насосом до давления  $0.05\ \text{mTorr}$ ; после откачки напускался рабочий газ (аргон) до давлений  $0.1\text{--}1\ \text{mTorr}$ .

Амплитуда импульса ускоряющего напряжения,  $U_{ac}$ , подаваемого на катод, в большинстве случаев составляла  $20\text{--}25\ \text{kV}$ .

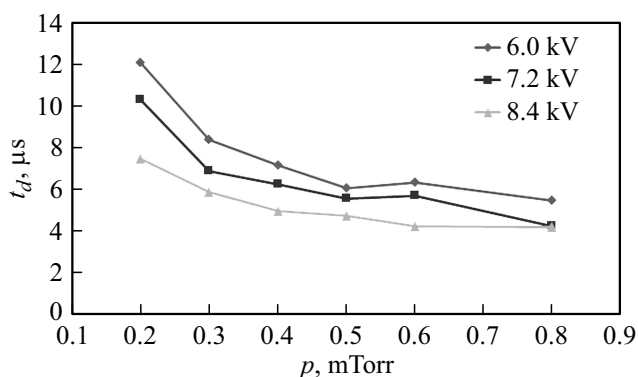
## 2. Результаты и обсуждение

### 2.1. Изучение разряда

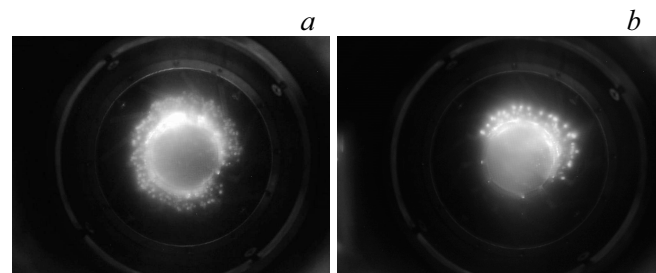
Предварительно нами был определен порог напряжения, при котором все дуговые источники начинают стабильно работать. Он находится в диапазоне  $U_0 = 5.6\text{--}5.8\ \text{kV}$ . Поэтому в дальнейшем минимальным



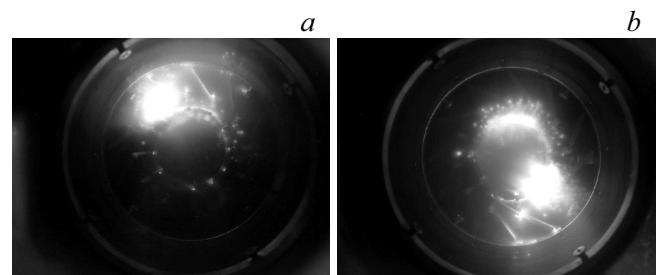
**Рис. 5.** Фотографии свечения разряда.  $p = 0.5\ \text{mTorr}$ ,  $U_0 = 6\ \text{kV}$  (a) и  $U_0 = 8.4\ \text{kV}$  (b).



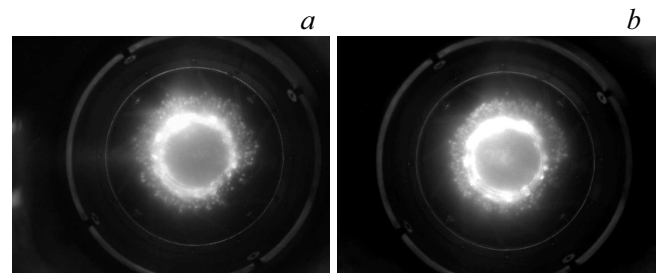
**Рис. 6.** Время задержки перехода разряда в сильноточную стадию в зависимости от давления рабочего газа и напряжения. Гибридный анод с экраном.



**Рис. 7.** Фотографии свечения разряда.  $U_0 = 6\ \text{kV}$ ,  $p = 0.2\ \text{mTorr}$  (a) и  $p = 0.8\ \text{mTorr}$  (b).



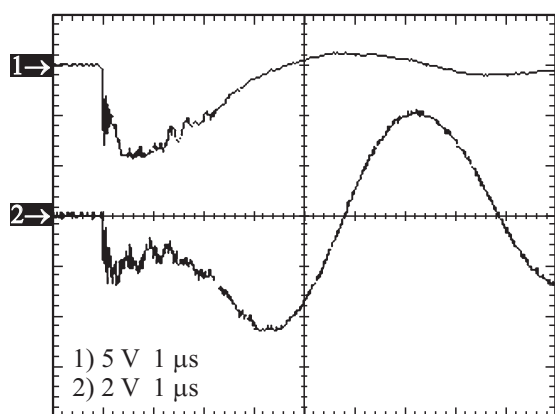
**Рис. 8.** Фотографии пробоя.  $U_0 = 7.2\ \text{kV}$ ,  $p = 0.2\ \text{mTorr}$  (a) и  $U_0 = 8.4\ \text{kV}$ ,  $p = 0.3\ \text{mTorr}$  (b).



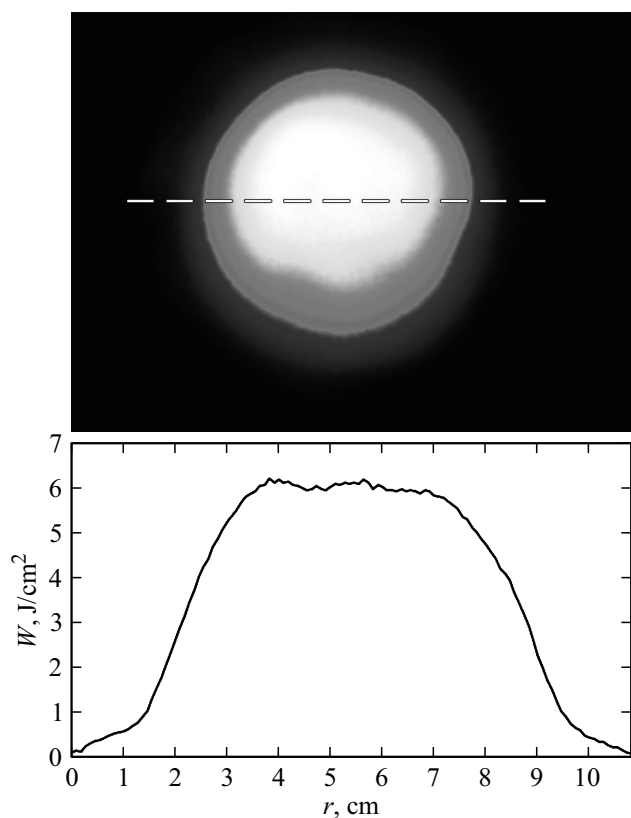
**Рис. 9.** Свечение разряда в оптимальных режимах: a —  $0.3\ \text{mTorr}$ ,  $7.2\ \text{kV}$ ; b —  $0.6\ \text{mTorr}$ ,  $8.4\ \text{kV}$ .

рабочим напряжением питания разряда было принято значение  $U_0 = 6\ \text{kV}$ .

На рис. 3 приведены типичные осциллограммы тока,  $I_d(t)$ , и напряжения горения разряда,  $U_d(t)$ , для давления рабочего газа  $0.5\ \text{mTorr}$  и напряжений  $6$  и  $8.4\ \text{kV}$ . Следует отметить, что осциллограммы  $U_d(t)$  снимались с активного делителя, размещенного между балластным сопротивлением блока питания разряда (БПР) и сопротивлением цепи дуговых источников плазмы; поэтому оно было меньше полного напряжения БПР,  $U_0$ , на величину падения на балластном резисторе. На осциллограммах отчетливо выделяются две стадии: первая стадия длительностью  $t_d$  представляет собой горение вакуумных дуг, вторая стадия, следующая за первой, есть стадия горения сильноточного ОР. Последняя характеризуется резким падением напряжения на аноде и соответствующим ростом тока разряда.



**Рис. 10.** Осциллограммы ускоряющего напряжения (Ch1, 10 kV/div) и тока катода (Ch2, 10 kA/div). Горизонтальная шкала: 1 μs/div.  $U_{ac} = 20$  kV,  $p = 0.4$  mTorr,  $U_0 = 8.4$  kV,  $\tau = 30$  μs.



**Рис. 11.** Термограмма и соответствующее ей распределение плотности энергии по сечению пучка (вдоль штриховой линии). Меднооплеточный катод, гибридный анод без экрана.  $U_{ac} = 20$  kV,  $p = 0.5$  mTorr,  $U_0 = 7.2$  kV,  $\tau = 30$  μs.

Анализ большого количества осциллограмм позволил построить зависимость времени задержки  $t_d$  перехода разряда в сильноточную стадию от давления аргона при различных анодных напряжениях (рис. 4). Видно, что с ростом напряжения и давления время, необходимое для зажигания сильноточного ОР, сокращается, причем напряжение влияет более существенно. Отметим, что

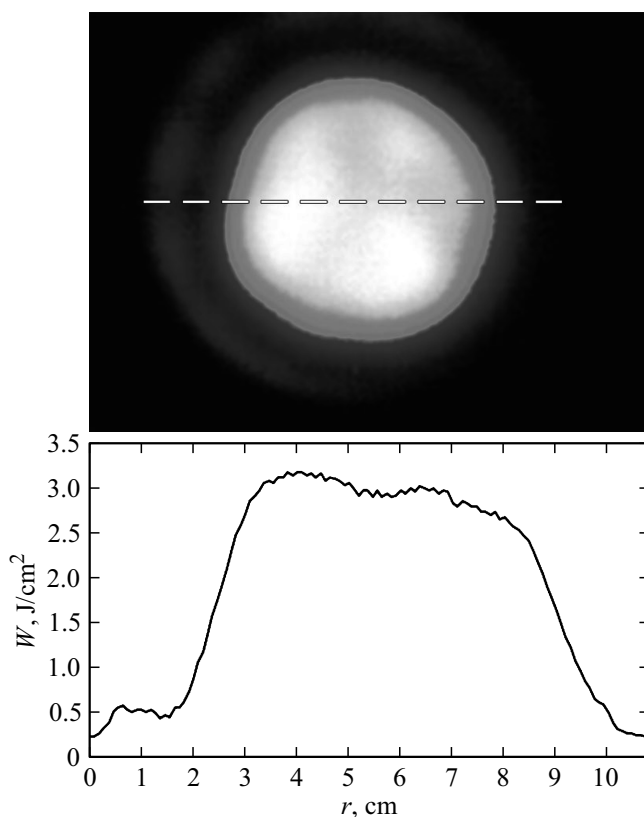
в случае гибридного разряда значения этих времен задержки существенно меньше значений, характерных для обычного ОР, что обусловлено обнулением статистического времени запаздывания при впрыске электронов от стороннего источника (в нашем случае из вакуумных искр-дуг) [1–3,5,6].

Также с ростом напряжения (и соответственно тока) увеличивается интегральная яркость свечения разряда (рис. 5). Увеличение давления на яркость свечения практически не влияет.

Изучение фотографий показало, что разряд имеет квазиколецевую структуру, как правило, азимутально неоднородную. С чем это связано однозначно сказать трудно. Возможно, это обусловлено возникновением на сетке катодных пятен-лидеров, положение которых случайно, что и приводит к несимметричной картине свечения.

Несмотря на азимутальные неоднородности, можно сказать, что стабильность работы анодного узла удовлетворительная. Лишь при крайних значениях давления 0.1 и 1 mTorr могли наблюдаться нестабильности зажигания разряда и пробой на стенку камеры.

Нами была предпринята попытка дополнительно ограничить радиальное распространение плазмы вакуумных дуг и создать более выраженную кольцевую структуру



**Рис. 12.** Термограмма и соответствующее ей распределение плотности энергии по сечению пучка. Меднооплеточный катод, гибридный анод с экраном.  $U_{ac} = 20$  kV,  $p = 0.5$  mTorr,  $U_0 = 7.2$  kV,  $\tau = 45$  μs.

разряда. Для этого использовался описанный выше кольцевой экран, который располагался напротив дуговых источников на расстоянии 5 мм от них.

Наличие экрана в среднем в 1.5 раза увеличило время перехода разряда в сильноточную стадию в зависимости от давления, однако тенденции остались прежними (рис. 6).

При  $U_0 = 6 \text{ kV}$  разряд зажигается на любом давлении (из используемых), пробоев не наблюдается (рис. 7). При этом неоднородность свечения весьма велика.

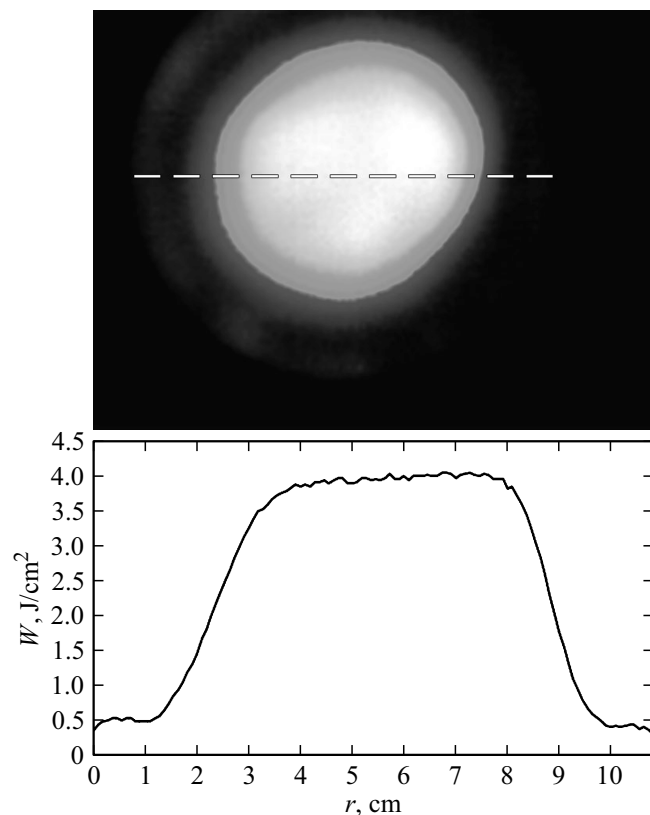
С ростом  $U_0$  нижний порог допустимого давления увеличивается, т.е. при низких давлениях начинают наблюдаться пробои (рис. 8). Для  $U_0 = 7.2 \text{ kV}$  это значение равно 0.2 мТорр, а для  $U_0 = 8.4 \text{ kV}$  — 0.3 мТорр.

Желательная кольцевая структура разряда наблюдается в следующих условиях:  $p = 0.3\text{--}0.5 \text{ мТорр}$  и  $p = 0.4\text{--}0.6 \text{ мТорр}$  для  $U_0 = 7.2$  и  $8.4 \text{ kV}$  соответственно (рис. 9).

## 2.2. Характеристики пучка

Исходя из данных по разряду, были выбраны наиболее приемлемые параметры для генерации НСЭП: давление 0.4–0.5 мТорр, напряжение питания разряда 7.2 и 8.4 кВ.

На рис. 10 представлены характерные осциллограммы ускоряющего напряжения и тока катода.



**Рис. 13.** Термограмма и соответствующее ей распределение плотности энергии по сечению пучка. Катод с резистивной развязкой эмиттеров, гибридный анод с экраном.  $U_{ac} = 20 \text{ kV}$ ,  $p = 0.4 \text{ мТорр}$ ,  $U_0 = 8.4 \text{ kV}$ ,  $\tau = 30 \text{ мкс}$ .

Характерная термограмма и соответствующее ей распределение плотности энергии по сечению пучка для случая меднооплеточного катода приведены на рис. 11.

Пиковое значение плотности энергии  $W = 5\text{--}6 \text{ J}/\text{cm}^2$  является типичным для  $U_{ac} \sim 20 \text{ kV}$ . При наличии экрана эта величина значительно снижается (рис. 12), зато область относительно равномерного распределения (на уровне 0.9) расширяется. Кольцевая структура разряда способствует перераспределению энергии и расширению однородной области пучка.

Использование катода с резистивной развязкой эмиттеров также позволяет получить пучок с неплохой однородностью (рис. 13), а плотность энергии получается несколько выше, чем при использовании меднооплеточного катода (при аноде с экраном).

Отметим, что при использовании гибридного разряда напряжением до 5 кВ пучки с диаметром однородного распределения плотности энергии 50–55 мм (по уровню 0.9) ранее были получены лишь при использовании полых ферромагнитных концентраторов [9]. Также отметим, что диаметр рабочей поверхности катода с резистивной развязкой сопоставим с диаметром однородной части пучка. Можно предположить, что увеличение рабочей поверхности такого катода позволит расширить однородную часть распределения.

## Заключение

1. Установлено, что в гибридном разряде, сочетающем вакуумные дуги с сильноточным отражательным разрядом низкого давления, время задержки зажигания последнего медленно уменьшается с ростом давления рабочего газа (аргон) и более существенно — с увеличением напряжения питания разряда.

2. Показана возможность формирования плазменного анода с кольцевой структурой при помощи вспомогательного экрана, ограничивающего радиальное распространение плазмы дуговых источников.

3. Получены пучки с диаметром однородного распределения плотности энергии до 55 мм (по уровню 0.9), что соответствует наилучшим результатам, полученным ранее при использовании гибридного разряда напряжением до 5 кВ совместно с полыми ферромагнитными концентраторами. Поскольку использование концентраторов не всегда возможно, то предложенный метод улучшения однородности пучка является перспективным.

## Финансирование работы

Работа финансировалась в рамках госзадания по программе фундаментальных научных исследований „Современный проблемы физики плазмы, включая физику высокотемпературной плазмы и физику низкотемпературной плазмы и основы ее применения в технологических процессах“; проект „Фундаментальные

основы и технологические применения взрывоэмиссионных процессов в вакуумном разряде“ (гос. рег. № 0366-2016-0005).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] *Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B.* // Laser Part. Beams. 2003. Vol. 21. N 2. P. 157–174.
- [2] *Озур Г.Е., Прокурковский Д.И., Карлик К.В.* // ПТЭ. 2005. Вып. 6. С. 58–65.
- [3] *Озур Г.Е., Прокурковский Д.И.* // Физика плазмы. 2018. Вып. 1. С. 21–44. DOI: 10.7868/S0367292118010146
- [4] *Озур Г.Е., Григорьев В.П., Карлик К.В., Коваль Т.В., Ле Ху Зунг* // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 9. С. 100–104.
- [5] *Ozur G.E., Razin A.V.* // Proc. of the 16th Symp. on High Current Electronics. Tomsk, Russia, 2010. P. 144–147.
- [6] *Кизириди П.П., Озур Г.Е., Золькова Л.А., Батраков А.В.* // Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. Вып. 6/2. С. 42–48.
- [7] *Pushkarev A.I., Kholodnaya G.E., Sazonov R.V., Ponomarev D.V.* // Rev. Sci. Instrum. 2012. Vol. 83. N 10.103301.
- [8] *Кизириди П.П., Марков А.Б., Озур Г.Е., Фролова В.П.* // Изв. вузов. Физика. 2014. Т. 57. Вып. 3/2. С. 114.
- [9] *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 6. С. 132.