

УДК 537.525

ИСТОЧНИКИ НЕРЕЛЯТИВИСТСКИХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ СО ВСТРОЕННЫМИ В КАТОД ДУГОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ПЛАЗМЫ (обзор)

© 2026 г. П. П. Кизириди^а, Г. Е. Озур^{а*}, А.В. Шнайдер^а

Институт сильноточной электроники Сибирского отделения

Российской академии наук

Россия, 634055, Томск, Академический просп., 2/3

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

Поступила в редакцию 06.06.2025 г.

После доработки 21.08.2025 г.

Принята к публикации 17.11.2025 г.

Представлен обзор по источникам низкоэнергетических сильноточных электронных пучков, генерируемых в пушках со встроенными во взрывоэмиссионный катод резистивно развязанными дуговыми источниками плазмы, срабатывание которых инициируется пробоем по поверхности диэлектрика. Рассмотрены принципы и основные закономерности работы таких пушек в планарно-аксиальной и в коаксиальной геометриях диода, в которых формируются радиально сходящиеся пучки. Приведены результаты исследований по формированию плазменного анода с помощью сильноточного отражательного разряда, инициируемого электронами, эмитируемыми катодными пятнами дуговых источников плазмы. Представлены также результаты работ по генерированию пучков с повышенной частотой следования импульсов и по ресурсу катодного узла с дуговыми источниками плазмы.

1. ВВЕДЕНИЕ

Низкоэнергетические (10–30 кэВ) сильноточные (до 25 кА) электронные пучки (НСЭП) широко используются для модификации поверхностных слоев металлических материалов, как в физическом эксперименте, так и для разработки новых перспективных технологий [1–6]. Высокая плотность тока (примерно до 1 кА/см²) и энергии (до 15 Дж/см²) при малой длительности импульса (2–4 мкс) позволяют выделить значительную долю кинетической энергии пучка в тонком (доли–единицы микрон) поверхностном слое, доводя его до плавления и даже частичного испарения. Высокие скорости нагрева и охлаждения (примерно 10⁹ К/с) вызывают существенные структурно-фазовые изменения в поверхностном слое, зачастую недостижимые стационарными методами.

Формирование НСЭП осуществляется, как правило, в пушках со взрывоэмиссионным многоэмиттерным катодом и плазменным анодом на основе сильноточного отражательного разряда (ОР) [2, 7]. Предварительное заполнение ускоряющего промежутка и пространства дрейфа пучка плазмой умеренной концентрации (примерно 10^{12} – 10^{13} см⁻³) обеспечивает возбуждение взрывной эмиссии при сравнительно небольших ускоряющих напряжениях (до 35 кВ) и большие токи пучка, транспортируемого в плазменном канале за счёт нейтрализации пространственного заряда. При этом импульсное ведущее магнитное поле, создаваемое заранее внешним соленоидом, обеспечивает не только транспортировку пучка, но и зажигание сильноточного ОР.

Несмотря на определенные успехи в физике и технике генерирования НСЭП в таких системах, а также в их применении для модификации металлических материалов и изделий выявились следующие основные проблемы. Во-первых, это недостаточная стабильность работы широкоапертурного (десятки см²) взрывоэмиссионного катода в условиях безмасляного вакуума, являющегося неперенным атрибутом при решении многих задач, таких как формирование поверхностных сплавов из предварительно нанесенных покрытий, повышение электрической прочности вакуумной изоляции и ряда других [2, 8]. Бомбардировка катода ионами плазменного анода, стимулирующая образование взрывоэмиссионных центров (катодных пятен), не решает в полной мере данную проблему для катодов большой площади [2, 7]. Во-вторых, многочисленные эксперименты показали, что для устойчивого зажигания и функционирования сильноточного ОР индукция ведущего магнитного поля не должна превышать 0.1–0.15 Тл, что сравнимо по величине с индукцией собственного магнитного поля пучка. Это приводит к частичной фокусировке пучка, т.е. к его неоднородности. Для компенсации этого негативного эффекта были предложены и реализованы следующие меры: создание плазменного анода с повышенной концентрацией ионов в его периферийной части [7, 9], а также перераспределение плотности тока (энергии) пучка с помощью ферромагнитных вставок в виде полых цилиндров, располагаемых за коллектором и стягивающих на себя силовые линии импульсного ведущего магнитного поля [10]. Однако эти меры не всегда действенны. Например, при обработке массивных деталей перераспределение силовых линий ферромагнитными вставками малоэффективно, а при высокой электропроводности материала мишени – вообще невозможно. В этом случае конфигурация импульсного ведущего магнитного поля корректировалась постоянными магнитами [11], что тоже не всегда возможно. А повышение концентрации ионов в периферийной части плазменного анода требует встраивания резистивно развязанных дуговых источников плазмы в

кольцевой анод сильноточного отражательного разряда, что обычно требует повышенного напряжения (до 7–9 кВ), подаваемого на анод [7, 9, 12]. Это усложняет конструкцию электронной пушки и снижает ее надежность.

В 2020 году мы предложили новый метод инициирования сильноточной электронной эмиссии путем встраивания в дисковый взрывоэмиссионный катод резистивно развязанных дуговых источников плазмы, срабатывание которых инициируется пробоем по поверхности диэлектрика [13, 14]. При этом питание дуговых источников и ускорение электронов пучка обеспечивается одним и тем же высоковольтным импульсом. Первые же эксперименты [13, 14] с новым катодным узлом показали перспективность данного метода генерирования НСЭП. Поскольку напряжение пробоя вдоль поверхности диэлектрика существенно ниже напряжения вакуумного пробоя в его отсутствие [15], это позволяет заметно уменьшить амплитуду импульса ускоряющего напряжения (вплоть до 5–7 кВ вместо прежних минимально необходимых 15–20 кВ), расширяя тем самым диапазон параметров пучка и резко увеличивая надежность срабатывания катода. Благодаря независимости инициирования взрывной эмиссии от ширины ускоряющего зазора и от наполняющей его среды новый катодный узел является управляемым и может функционировать в режиме вакуумного или газонаполненного диода. Это позволило нам построить простую схему генерирования не только планарно-аксиальных НСЭП, транспортируемых во внешнем ведущем магнитном поле, но и радиально сходящихся пучков [16]. Кроме того, в режиме газонаполненного диода можно формировать плазменный анод, инициируя сильноточный отражательный разряд катодными электронами.

Настоящая работа представляет собой обзор наших исследований по генерированию НСЭП в пушке с данным катодным узлом. В разд. 2 описан принцип работы пушки и представлены результаты исследований, проводившихся в планарно-аксиальной геометрии диода, в разд. 3 – результаты, полученные в коаксиальной геометрии диода (радиально сходящиеся пучки). В разд. 4 приведены результаты по формированию плазменного анода с помощью сильноточного отражательного разряда, инициируемого катодными электронами, и возможности управления параметрами пучка в данной системе. Четвертый раздел посвящен частотному режиму работы источника и ресурсным испытаниям катодного узла. В Заключение приведены выводы и намечены пути дальнейших исследований.

2. ПЛАНАРНО-АКСИАЛЬНЫЕ ПУЧКИ

Термином “планарно-аксиальные пучки” мы обозначаем пучки, формируемые в квазиплоском ускоряющем зазоре (двойном слое) и распространяющиеся к коллектору (мишени) вдоль силовых линий ведущего магнитного поля. Это, как правило, цилиндрические пучки, а в некоторых случаях – пучки с поперечным сечением, близким к прямоугольному [17].

2.1. Принцип работы катодного узла со встроенными дуговыми источниками плазмы

Предварительное создание плазмы в катодном узле является давно известным и широко применяемым методом при разработке источников интенсивных электронных пучков. Прежде всего, необходимо отметить классические системы с плазменным катодом и сеточной (слоевой) стабилизацией эмиссии [18–21], в которых плазма создается специальным импульсным дуговым или тлеющим разрядом, заполняет полый электрод с сеткой, через которую эмитируемые электроны выходят в ускоряющий зазор. При этом пробой по поверхности диэлектрика обычно играет роль инициатора основного разряда внутри плазменного катода. Ускоряющее напряжение в таких системах обычно статическое, оно поддерживается во время импульса большой емкостью. Такие системы обеспечивают сравнительно низкую плотность эмиссионного тока (не более 10 А/см^2), но большую длительность импульса (до сотен микросекунд). Также низкую плотность тока (не более 30 А/см^2) дают системы с незавершенным емкостным разрядом по поверхности диэлектрика (обычно – титанат бария). И только системы с завершенным емкостным разрядом обеспечивают плотность тока на 1–2 порядка величины больше [22], однако они отличаются существенной нестабильностью параметров пучка от импульса к импульсу и сильной неоднородностью распределения плотности тока (энергии) в поперечном сечении [15]. Это обусловлено органическим недостатком емкостной развязки разрядных каналов, действующей лишь в течение короткого (как правило, наносекундного) фронта импульса, что и препятствует их стабильной параллельной работе.

Напротив, резистивная развязка каналов разряда действует значительно большее время и обеспечивает их параллельную стабильную работу. Следует отметить, что идея резистивной развязки дуговых источников плазмы, встроенных в катод генератора электронных пучков, была впервые реализована в работе [23], в которой описан ускоритель электронов (200 кэВ, 200 А, 10 мкс) для накачки газовых лазеров.

Следует также отметить, что все описанные выше системы, обеспечивавшие предварительное создание плазмы на поверхности катода, требовали дополнительной

цепи питания соответствующего разряда, а ускорение электронов и формирование пучка осуществлялись с помощью другого источника высокого напряжения.

В нашей системе (см. рис. 1) питание дуговых источников плазмы и ускорение электронов пучка осуществляются одним и тем же высоковольтным импульсом, т.е. эти процессы идут параллельно.

Рис. 1.

2.2. Плазмонаполненный диод

Первые эксперименты с новым катодным узлом были проведены в режиме плазмонаполненного диода [13, 14]. На рис. 1 приведена принципиальная схема электронной пушки. Катодный узел включал в себя взрывоэмиссионный катод 1 в виде перфорированного медного диска диаметром 58 мм, в отверстия которого заподлицо вставлены керамические трубки 2 и медные электроды 3. Наружный диаметр трубок составляет 4 мм, внутренний – 2 мм, диаметр электродов также равен 2 мм. Каждый из 69 электродов (межцентровое расстояние составляет 5.5 мм) заземлен через резисторы 4. Эффективный диаметр эмитирующей площади катода составлял около 5 см. Для уменьшения вероятности попадания электронов катодной плазмы на стенку корпуса пушки 12 установлен экранирующий электрод 13, электрически соединенный с катодом.

При подаче на катод 1 высоковольтного импульса отрицательной полярности амплитудой 5–25 кВ от генератора 5 происходит пробой по поверхности торцов керамических трубок. Возникает плазма, состоящая из материалов катода (катодные пятна), керамических трубок 2 и электродов 3, а также ионизованного десорбированного газа. Образование катодных пятен при протекании тока между электродами 3 и катодом (эти пятна можно назвать затравочными) обеспечивается тем, что амплитуда тока (примерно 5–10 А) через каждый промежуток в несколько раз превышает пороговый ток дуги [24], который составляет доли-единицы ампер практически для всех материалов. Например, для меди это значение составляет около 2 А. Электроны, эмитируемые затравочными, а также возникшими в течение импульса катодными пятнами, ускоряются в двойном слое между плазмой катодных пятен и предварительно созданным плазменным анодом 7 и транспортируются к заземленному коллектору 8. Рост тока обеспечивается как увеличением числа катодных пятен, так и их расширением, т.е. увеличением площади эмиссионной поверхности [2, 7, 25]. Плазменный анод создается предварительно (за несколько десятков микросекунд до подачи на катод высоковольтного импульса) с помощью сильноточного ОР при подаче импульса положительной полярности на

кольцевой металлический анод 9. Зажигание и горение сильноточного ОР обеспечиваются продольным магнитным полем, создаваемым соленоидом 11, которое также обеспечивает транспортировку пучка к коллектору [2, 7].

Данный катодный узел был успешно испытан. На рис. 2 приведены характерные осциллограммы ускоряющего напряжения (U) и тока катода (I), полученные при использовании многопроволочного медного катода [2, 7] с диаметром эмитирующей части 62 мм (рис. 2а) и нового катодного узла с многоканальным инициированием (рис. 2б). Видно, что новый катодный узел обеспечивает не только больший ток, но и увеличенную скорость его нарастания, несмотря на несколько меньшую (на 14%) площадь эмитирующей части катода.

Рис. 2.

Более подробное исследование токовых характеристик пушки с новым катодным узлом показало не только увеличенную (примерно в 1.4–2.4 раза) среднюю плотность тока катода, но и повышенную плотность тока пучка на коллектор – примерно в 1.6–2 раза по сравнению с традиционным многопроволочным медным катодом [26]. Данный результат можно объяснить повышенной скоростью разлета катодной плазмы (см. следующий раздел), поскольку дуговые источники плазмы фактически представляют собой торцевые плазменные пушки Бостика [27].

Исследования, выполненные в работе [26], показали также, что ток пучка на коллектор слабо меняется с изменением ускоряющего напряжения. Это соответствует известному свойству квазистационарных двойных слоев в плазме – независимости плотности тока в двойном слое от приложенного напряжения [28, 29].

Относительный разброс как амплитудных, так и средних за импульс значений тока пучка в оптимальных режимах составил 4.3–7.6%, что в 2–3 раза меньше аналогичных значений в случае традиционного многопроволочного медного катода.

2.3. Вакуумный и газонаполненный диод

Важным преимуществом нового катодного узла является также возможность генерирования НСЭП без плазменного анода, т.е. в режиме вакуумного или газонаполненного диода. В работах [30–32] мы исследовали особенности генерирования пучка в пушке с данным катодным узлом в зависимости от давления и рода рабочего газа, а также от индукции ведущего магнитного поля.

Эти эксперименты проводились по модернизированной по сравнению с работами [13, 14] схеме, которая приведена на рис. 3. Модернизация заключалась в том, что вывод

коллекторного тока, т.е. тока в цепи тепловизионной мишени II , являвшейся одновременно коллектором пучка, осуществлялся в радиальном направлении. Это позволяло регистрировать в *одном* импульсе как электрические параметры (ускоряющее напряжение, полный ток в контуре и ток пучка на коллектор), так и тепловой отпечаток пучка (термограмму), по которому определялись как полная энергия пучка, так и ее распределение в поперечном сечении.

Рис. 3.

На рис. 4 приведены характерные осциллограммы импульсов, полученные в различных режимах.

Рис. 4.

На осциллограммах токов можно выделить три характерные стадии. При относительно низких давлениях газа на первой стадии ток нарастает до 5–10 кА (момент времени t_1 , значение тока I_1), на второй стадии (от t_1 до t_2) ток сначала существенно падает, что вызвано, на наш взгляд, рассасыванием плазмы, инжектируемой из дуговых источников (точнее, ее легкой компоненты, состоящей из ионизованного десорбированного газа), встроенных в катод. Диод переходит в режим плазменного прерывателя – спад тока сопровождается соответствующим индуктивным выбросом напряжения [33]. На третьей стадии (от t_2 до t_m) ток нарастает благодаря распространению в ускоряющий зазор тяжелой компоненты катодной плазмы, состоящей из материала катода (медь), и коллекторной плазмы, возникающей прежде всего из десорбированного газа, а также благодаря ионизации рабочего и остаточного газов. Если давление газа превышает некоторую критическую величину (примерно 0.133 Па в воздушном эквиваленте), то вторая стадия отсутствует: рост тока идет монотонно, импеданс диода падает, длительность импульса пучка сокращается на время, примерно равное t_2 (рис. 4в). Это связано с развитием пучково-плазменного разряда в рабочем газе, приводящего к резкому росту концентрации плазмы, как это описано, например, в работе [34]. Это приводит к уменьшению энергии пучка в импульсе при превышении некоторой критической величины давления рабочего газа (рис. 5).

Рис. 4.

Рис. 5.

По длительности первой стадии t_1 можно оценить скорость катодной плазмы как $v = d/t_1$, где d – ширина зазора катод–анод ($d = l + 15$ мм). Анализ большого числа

осциллограмм показал, что в среднем величина v составляет примерно 3.5–4 см/мкс, что примерно вдвое больше традиционного значения для скорости разлета взрывозмиссионной плазмы [25].

В работе [30] были также исследованы зависимости параметров пучка от индукции внешнего ведущего магнитного поля B_z . В табл. 1 приведены значения токов I_l , I_m в соответствующие моменты времени t_l , t_m (рис. 4а), из которых видно существенное возрастание этих токов и энергии пучка в импульсе с увеличением B_z . Это обусловлено соответствующим увеличением продольной компоненты скорости электронов пучка.

Таблица 1. Значения токов и энергии пучка в импульсе в зависимости от индукции ведущего магнитного поля; $U_{\text{зар}} = 17$ кВ, $p = 0.08$ Па (в воздушном эквиваленте по ионизационному датчику давления ПМИ-2)

B_z , Тл	Аргон			Воздух			Гелий		
	I_l , кА	I_m , кА	E , Дж	I_l , кА	I_m , кА	E , Дж	I_l , кА	I_m , кА	E , Дж
0	6	5	25.4	7	6	30.8	5	7	23.6
0.01	7.5	6	32.7	7	6	47	5	9	23.1
0.02	7.5	9	31.9	7	9	49	4	9.3	25.2
0.031	9.3	10	47.3	9.5	16.3	70.2	4	12	26.9
0.042	12	14.5	83.3	9.5	16	82.2	4	14	31.3
0.074	10.5	15	85.9	10	26	85.8	5	16	47.5
0.088	–	24	79.7	10	28	91.7	5	20	61.7

На рис. 6 представлены диаграммы значений энергии пучка в импульсе, вычисленных по осциллограммам (E_{bw}), вычисленных по термограммам (E_{bt}), эффективности передачи запасенной в генераторе высоковольтных импульсов (ГВИ) энергии в энергию пучка (E_{bt}/E_{st}), а также средней плотности энергии (W_{bt}) в центральной части пучка диаметром 4 см.

Рис. 6.

На рис. 6 видно, что энергия пучка, вычисленная по осциллограммам, E_{bw} , в 1.6–2.7 раза больше энергии, вычисленной по термограммам, E_{bt} , и это различие значительно больше погрешности измерений, не превышающей $\pm 10\%$ для обоих методов измерений энергии пучка. Данное расхождение можно объяснить тем, что ток пучка завышен вследствие контакта коллектора с плазмой, возникающей у его поверхности. Этот эффект известен достаточно давно [35]. Авторы работы [35] на примере своего пучка (200 кВ,

250 А, 25 А/см², 80 мкс) показали, что распад коллекторной плазмы (ионы этой плазмы уходят радиально на стенку трубы дрейфа, а электроны – на коллектор вдоль силовых линий внешнего ведущего магнитного поля) дает существенную добавку в ток пучка (но не в его энергию, поскольку кинетическая энергия плазменных электронов близка к тепловой). Ток ионов на трубу дрейфа возникал примерно через 40 мкс после начала импульса, и в пике его величина превышала 200 А, т.е. почти весь ток на коллектор на этой стадии состоял из распадного тока плазмы. Этот ионный ток многократно превосходил предел Чайлда–Ленгмюра для вакуумного диода, но какого-то объяснения данному факту в работе [35] не приводится.

Аналогичные по характеру результаты были получены авторами работ [36, 37] на источнике электронов с сетчатым плазменным эмиттером SOLO (15 кэВ, 200 А, 10–15 А/см², 100 мкс). Формирование и транспортировка пучка осуществлялись в газе низкого давления (аргон или гелий, давление от 0.1 до 2 Па) в ведущем магнитном поле до 30 мТл. Длина канала транспортировки составляла десятки сантиметров. Величина тока ионов на трубу дрейфа достигала значения 50–80 А, а энергия, измеренная калориметром, была примерно в 1.5 раза меньше величины, получаемой из осциллограмм.

Очевидно, что величина энергии пучка в импульсе, определяемая из термограмм, гораздо ближе к истинному значению не только потому, что понятна физическая причина завышения тока пучка, но и потому, что корректность тепловизионных измерений неоднократно подтверждалась калориметрическими измерениями и совпадением с расчетными и экспериментальными значениями порогов импульсного плавления металлических мишеней [38, 39]. Собственно, тепловизионные измерения энергии пучка, по сути, являются калориметрическими.

2.4. Свечение плазмы в сильноточном диоде с катодом на основе вакуумных дуг

Изучение динамики свечения плазмы является весьма информативным методом исследования процессов в сильноточных диодах. Такие эксперименты мы провели в работе [40] с помощью высокоскоростной четырехканальной электронно-оптической камеры HSFC-Pro (предоставлена ТомЦКП СО РАН).

Схема эксперимента представлена на рис. 7. Использовался катодный узел, описанный выше (разд. 2.2). Анод 7 представлял собой тонкостенную трубку из нержавеющей стали, что обеспечивало беспрепятственное прохождение света в объектив камеры 10. Сброс электронов пучка на анод происходил вдоль расходящихся силовых линий ведущего магнитного поля (около 0.11 Тл в максимуме), создаваемого импульсным соленоидом 11. В ряде экспериментов соленоид отключался, и пушка работала без

ведущего магнитного поля. Для гарантированного предотвращения попадания электронов пучка на окно для наблюдения 9 использовались постоянные магниты 8. Запуск камеры 10 осуществлялся электрическим импульсом одновременно с подачей ускоряющего напряжения на катод с точностью не хуже 10 нс. Длительность экспозиции каждого кадра составляла 50 нс. Одновременно с регистрацией свечения плазмы регистрировались также осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения, тока пучка на анод и полного тока в разрядном контуре с помощью активного делителя напряжения и поясов Роговского соответственно. Время задержки кадров относительно начала импульса запуска камеры выбиралось в соответствии с осциллограммами тока пучка на анод и полного тока. Первый кадр регистрировался с нулевой задержкой, второй кадр – на стадии начального роста тока, третий – на стадии дальнейшего роста тока (примерно 20–50% от амплитуды полного тока в контуре) и четвертый – вблизи максимума полного тока. Зарегистрированные электронно-оптические (ЭОП) изображения передавались в компьютер и отображались с помощью специализированного программного обеспечения, прилагаемого к камере. С помощью этого же программного обеспечения осуществлялось управление камерой: выбор и установка времени экспозиции кадров и задержек.

Рис. 7.

Откачка объема пушки/вакуумной камеры (как и в остальных наших экспериментах, описанных в настоящей статье) осуществлялась вакуумным постом на базе турбомолекулярного насоса Turbovac 350i до давления 0.01 Па. При исследовании режима газонаполненного диода в пушку напускался аргон до давления около 0.06 Па. Также в экспериментах варьировалась величина ускоряющего напряжения от 8 до 18 кВ.

На рис. 8 приведены осциллограммы и соответствующие им ЭОП-изображения для двух случаев: наличия ведущего магнитного поля соленоида и его отсутствия. В отсутствие ведущего магнитного поля картина свечения на третьем и четвертом кадрах (fr3 и fr4) заметно отличается от случая его наличия. На кромке экранного электрода 12 появляется множество катодных пятен (КП). Это связано с так называемым “эффектом подхвата”, т.е. появлением новых КП под плазмой [41]. Появление новых КП, а также развитие пятен-лидеров (на третьем кадре их три) приводит к погасанию части КП на поверхности катода. Пробой в катодном узле приводит к погасанию еще большего количества КП (четвертый кадр).

Рис. 8.

Наложение ведущего магнитного поля в большинстве случаев подавляет эффект подхвата, в результате чего новые эмиссионные центры возникают реже, а уже существующие разгораются более интенсивно, что увеличивает также и яркость диффузного свечения катодной плазмы и позволяет увидеть ее азимутально-радиальный дрейф.

Принципиально важно, что как при отсутствии ведущего магнитного поля, так и при его наличии (при индукции до 0.15 Тл) все дуговые источники плазмы срабатывают в течение первых 50 нс (t_{gr1}) в случае как вакуумного диода, так и газонаполненного диода.

3. РАДИАЛЬНО СХОДЯЩИЕСЯ ПУЧКИ

Как уже упоминалось выше, управляемость нового катодного узла и отсутствие необходимости в плазменном аноде позволяют легко построить простую схему генерирования не только планарно-аксиальных НСЭП, но и радиально сходящихся пучков в режиме вакуумного или газонаполненного диода [16, 42].

Импульсные радиально сходящиеся электронные пучки используются для самых разных целей. Это накачка газовых лазеров [43], генерация СВЧ-излучения [44] и, конечно же, модификация поверхностных слоев материалов [45–48]. Практически все вышеупомянутые установки генерируют сравнительно высокоэнергетические пучки (50–100 кэВ и выше) сравнительно небольшой плотности тока (единицы-десятки А/см²). Наиболее близкими по назначению к нашим источникам НСЭП являются установки с плазменным катодом [45, 46] (ИСЭ СО РАН, г. Томск) и установки серии “GESA” (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург) [47, 48]. Основное предназначение таких установок – формирование защитных покрытий оболочек ТВЭЛов ядерных реакторов для предотвращения/замедления коррозии и высокотемпературного окисления [48].

В работах [45, 46] описывается источник радиально сходящегося электронного пучка (до 50 кэВ, до 120 А, до 150 мкс) с плазменным катодом. Генерирование эмиссионной плазмы с концентрацией до $8.1 \cdot 10^{10}$ см⁻³ осуществлялось с помощью шести дуговых источников (по три на каждом торце плазменного катода). По утверждению авторов работ [45, 46] в лучших режимах им удалось получить энергию пучка в импульсе 960 Дж при длительности импульса 400 мкс, токе пучка на аноде 80 А и ускоряющем напряжении 30 кВ. По расчетам авторов этих работ, плотность энергии на коллекторе диаметром 1.6 см составила в этом случае 21 Дж/см². Авторы работ [45, 46] отмечают важную роль анодной плазмы, нарабатываемой самим электронным пучком при создании отрицательного автосмещения потенциала на коллекторе при включении в его цепь

соответствующего резистора, что позволило существенно сократить время нарастания тока пучка на коллектор. Несмотря на ряд нестыковок в приводимых авторами данных, можно считать, что данный источник имеет неплохие перспективы.

В работе [47] радиально сходящийся электронный пучок генерировался в пушке триодного типа с диаметром катода 28 см и диаметром сетки 20 см. Аксиальная длина катода и сетки составляла 35 см, а площадь поверхности катода – 2900 см^2 . Общее число эмиттеров (пучки графитовых волокон) на катоде составляло 2815, в цепь каждого эмиттера последовательно включен резистор сопротивлением несколько кОм. Диаметр анода варьировался и составлял 1, 2 или 3 см. Высоковольтный генератор прямоугольных импульсов длительностью до 30 мкс обеспечивал ускоряющее напряжение между катодом и анодом амплитудой 100–120 кВ. Ток пучка на аноде достигал 2–5 кА.

Однако существенным недостатком установок серии GESA является сравнительно высокое ускоряющее напряжение (120–250 кВ), что приводит к высокой цене оборудования и снижает его надежность. При малых диаметрах анода (менее 2 см) возникали неустойчивости тока пучка из-за углового разброса электронов и появления вблизи анода облака осциллирующих электронов. Отметим также, что даже при межэлектродных зазорах около 10 см в работах [47, 48] часто наблюдался пробой диода из-за газовой выделения с анода под действием пучка. Для предотвращения пробоя авторы работ [47, 48] были вынуждены прогревать анод до 400–500 °С специальным импульсным источником тока перед началом импульса пучка, что требовало дополнительных затрат. Благодаря более высокой плотности тока и меньшему (в несколько раз) ускоряющему напряжению, а также отсутствию необходимости предварительного прогрева анода источники НСЭП представляются нам более перспективными. Ниже описывается созданный нами источник МикрЭП (микросекундный электронный пучок) с радиально сходящимся НСЭП.

3.1 Источник НСЭП с радиально сходящимся пучком

На рис. 9 представлен общий вид электронной пушки источника МикрЭП в двухсекционном варианте катодного узла [49]. Внутренний радиус кольцевых катодов, соединенных между собой металлическим стаканом 20, составлял $R_K = 4 \text{ см}$, а радиус заземленного анода $b - R_A = 0.5 \text{ см}$. Расстояние между плоскостями расположения дуговых источников плазмы, встроенных в катоды (по 18 штук в каждой секции), составляло 4 см.

Рис. 9.

На рис. 10 приведены типичные осциллограммы, полученные в случае радиально сходящегося НСЭП.

Рис. 10.

На рис. 11 приведены автографы пучка на аноде. В односекционном варианте пушки на автографах, оставленных пучком, видно, что в области, близкой к плоскости расположения эмиттеров катода, наблюдаются следы интенсивного плавления. Учитывая, что порог импульсного плавления меди при длительности импульса 2–3 мкс составляет 5–5.5 Дж/см² [39], можно считать, что указанная плотность энергии достигается, причем при сравнительно скромной величине $U_{\text{зар}} = 17$ кВ. Длина области оплавления вдоль оси анода составляет 1–2 см, за ней следует область менее интенсивного оплавления (ореол пучка). По окружности анода следы воздействия пучка выглядят более или менее однородно, что свидетельствует об азимутальной однородности пучка. В двухсекционном варианте ширина автографа пучка (интенсивное плавление) составляет около 7 см, что позволяет в итоге обеспечить достаточно высокую производительность процесса облучения, тем более что число секций может быть увеличено.

Рис. 11.

Мы провели также измерения полной энергии пучка, выделившейся в аноде, с помощью созданного нами калориметра [49]. В табл. 2 приведены результаты измерений для случаев отсутствия и наличия чашеобразных экранов на катоде. Видно, что при наличии экранов энергия пучка в импульсе увеличивается почти вдвое.

Таблица 2. Значения энергии радиально сходящегося пучка, измеренные калориметром в различных режимах. Односекционный катодный узел

Зарядное напряжение, кВ	Энергия пучка, Дж	
	В отсутствие экранов на катоде	При наличии экранов на катоде
15	26.8	47.9
20	54.4	91.2

Мы полагаем, что положительный эффект от установки экранов обусловлен тем, что они существенно ограничивают выход части электронов и УФ-излучения из катодной и анодной плазмы за пределы диода. Тем самым замедляется развитие пробоя по изолятору 17 ввода ускоряющего напряжения (см. рис. 9) и по поверхности резисторов 4. Отметим, что свечение плазмы вокруг стержневого ввода ускоряющего напряжения 19 наблюдается

практически всегда (как при отсутствии экранов, так и при их наличии), но, вероятно, при наличии экранов оно возникает позже. Причиной появления этой плазмы является разряд в десорбированном газе под действием скрещенных радиального электрического и азимутального магнитного полей. А инициируется данный разряд, например, УФ-излучением катодной и анодной плазмы. В свою очередь, УФ-излучение и какая-то часть электронов разряда попадают на поверхность изолятора 17 и стимулируют развитие пробоя вдоль его поверхности. Эти предположения подтверждаются интегральными фотографиями свечения плазмы (рис. 12). Возникновение плазмы на поверхности токопроводов ограничивает также электрическую прочность катодного узла и в планарно-аксиальной геометрии.

Рис. 12.

При испытаниях пушки на активную нагрузку 3.8 Ом (т.е. без включения диода) никакие пробои не наблюдались вплоть до напряжений 28 кВ, а при напряжениях 28–32 кВ пробои наблюдались лишь изредка (с вероятностью около 10%).

Принципиальным вопросом формирования радиально сходящегося пучка является распределение плотности тока (энергии) вдоль анода. Изучение осциллограмм показывает, что при амплитуде ускоряющего напряжения 15–20 кВ средняя величина тока пучка на анод составляет 8–12 кА, что значительно превышает как ток Альфвена для цилиндрического пучка, так и критический ток замагничивания электронного потока для диодов большого радиуса [50]. Следовательно, собственное магнитное поле радиально сходящегося пучка, а также магнитное поле тока, растекающегося по цилиндрическому аноду, будут существенно влиять на распределение плотности тока и энергии пучка вдоль анода, стягивая электроны пучка к его центральной части (пинч-эффект). Исследование этого вопроса было проведено нами в работах [51, 52].

3.2 Теоретическое исследование и численное моделирование

В работе [51] мы получили следующее аналитическое выражение для критического тока замагничивания электронного потока в коаксиальном диоде конечной протяженности:

$$I_{cr} = \frac{I_0}{2 \ln(R_{кп}/R_A)} \sqrt{\Gamma^2 - 1}. \quad (1)$$

Это выражение, в котором $I_0 = mc^3/e \approx 17$ кА, отличается от выражения для классического тока Альфвена лишь присутствием в знаменателе логарифмического множителя. Это выражение представляет собой аналог этой величины для

коаксиального диода при $R_{\text{кп}} \ll L$. Здесь $R_{\text{кп}}$ – радиус эмиссионной границы катодной плазмы, L – ее длина, $R_{\text{а}}$ – радиус анода, $\Gamma = 1 + eU/mc^2$ – релятивистский фактор, соответствующий ускоряющему напряжению U , m – масса покоя электрона, c – скорость света в пустоте. Легко видеть, что при $U = 10\text{--}20$ кВ критический ток составит единицы килоампер.

На рис. 13 представлены результаты численного моделирования [51], выполненного в приближении осевой симметрии с помощью 2.5-мерной (RZ) версии электромагнитного PiC-кода KARAT [53, 54]. Видно, что при токе пучка чуть ниже критического распределение его вдоль оси z является однородным (рис. 13д), а при незначительном превышении тока пучка над критическим значением происходит стягивание пучка к центральной плоскости симметрии (рис. 13е).

Рис. 13.

Очевидно, что в реальной ситуации, когда ток в течение импульса нарастает (по абсолютной величине), последовательно реализуются оба режима. Экспериментальные данные интегрального за импульс распределения плотности энергии пучка вдоль анода представлены в следующем разделе.

3.3. Эксперимент

Эксперименты проводились с использованием двухсекционного катодного узла, расстояние между центрами секций составляло 4 см, внутренний радиус кольцевых катодов – также 4 см. Измерения распределения плотности энергии вдоль анода, $W(z)$, проводились с помощью трехканального секционированного калориметра, схематично показанного на рис. 14.

Рис. 14.

Измерения показали, что плотность энергии в центральной части пучка в среднем на 25–30% выше, чем на его периферии (рис. 15). Данная неоднородность распределения, вызванная действием собственного магнитного поля пучка, может быть в дальнейшем компенсирована увеличением расстояния между катодными секциями. Это позволит уменьшить концентрацию катодной плазмы, а значит, и плотность энергии в центральной части пучка.

Рис. 15.

Распределения $W(z)$ в целом соответствуют характеру эрозии анода вследствие испарения при большом количестве импульсов (рис. 16). Видно, что в центральной части автографа пучка эрозия анода выше, чем в его периферийной части [55]. Это свидетельствует о стягивании части пучка в эту область собственным магнитным полем и подтверждает результаты измерений распределения плотности энергии секционированным калориметром. Однако количественные соотношения между распределением уноса материала анода и распределением $W(z)$ выявить очень сложно, поскольку скорость испарения (ниже точки кипения) экспоненциально зависит от температуры, которая к тому же меняется во времени.

Рис. 16.

В вопросе о самофокусировке пучка ключевым параметром является отношение ларморовского радиуса вращения электрона (r_L) в собственном магнитном поле пучка к длине его пути внутри ускоряющего зазора и в анодной плазме (АП). Оценки, сделанные в работе [55], показали, что эти величины становятся сопоставимыми уже при токе пучка на анод 2–3 кА, что соответствует формуле (1) для критического тока замагничивания пучка.

4. СИЛЬНОТОЧНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ПУШКА С ПЛАЗМЕННЫМ АНОДОМ НА ОСНОВЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО РАЗРЯДА, ИНИЦИИРУЕМОГО С КАТОДА

Описанный выше катодный узел со встроенными дуговыми источниками плазмы, который фактически самостоятельно обеспечивает эмиссию электронов, открывает еще одну возможность управления параметрами пучка. Для этого можно вернуться к пушке с плазменным анодом на базе сильноточного ОР, но уже не самостоятельного, а инициируемого электронами катодной плазмы, возникающей при срабатывании дуговых источников. Предлагаемая схема электронной пушки представлена на рис. 17 [56, 57]. В этой схеме плазменный анод фактически синтезируется в течение импульса пучка, а не создается предварительно, как это было ранее [2, 7], причем напряжение зажигания сильноточного ОР при внешней инжекции электронов с катода как минимум на порядок величины ниже, чем в случае самостоятельного ОР (около 3 кВ при давлениях аргона 0.02–0.06 Па). Постоянство анодного напряжения ОР обеспечивалось конденсатором большой емкости (400 мкФ). Коллектор 14 и сетка 12 являются катодами пеннинговской разрядной ячейки. Сетка заземлялась либо наглухо, либо через резисторы автосмещения R_3 общим сопротивлением 5 Ом.

Рис. 17.

При срабатывании дуговых источников электроны, эмитируемые катодными пятнами, инжектируются в сторону коллектора вдоль ведущего магнитного поля. Поскольку предельный вакуумный ток при энергиях электронов 10–30 кэВ не превышает десятков ампер, цилиндрический пучок быстро вырождается в *трубчатый*. Таким образом, инициируемый катодными электронами отражательный разряд в системе “взрывоэмиссионный катод-анод-коллектор” будет иметь повышенную концентрацию плазмы в периферийной части столба разряда, как это и требуется в соответствии с выводами работ [2, 7]. В настоящем разделе представлены предварительные результаты по генерированию НСЭП в предложенной системе.

Предварительные оценки (снизу) концентрации анодной плазмы, нарабатываемой в предложенной разрядной системе, осуществлялись по формуле [58]

$$n_i = n_{i0} \exp\left\{2 \left[n_0 \sigma_{i2} v_{pe} - \frac{1}{\tau_i} \right] t\right\}, \quad (2)$$

здесь n_{i0} – начальная концентрация ионов, n_0 – концентрация нейтралов, σ_{i2} – сечение ионизации молекул рабочего газа плазменными электронами соответственно, v_{pe} – скорость плазменных электронов (эти величины могут быть заменены в формуле (2) соответствующими значениями для электронов пучка), n_i – концентрация ионов, которая равна концентрации плазменных электронов, τ_i – характерное время ухода иона из объема плазменного анода.

Величина n_{i0} определялась из начальных условий. Оказалось, что при $n_0 = 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $\sigma_{i2} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$, $v_{pe} = 10^9 \text{ см/с}$ через $t \approx 1.5\text{--}1.7 \text{ мкс}$ после зажигания ОР величина n_i составит примерно 10^{12} см^{-3} (что и необходимо для транспортировки пучка с плотностью тока около 1 кА/см^2) и будет дальше быстро расти.

Отметим, что величина n_i должна быть существенно выше за счет вклада отраженных от коллектора пучковых электронов и вторичных электронов, выбитых из него. Кроме того, часть плазменных электронов, рождаемых при образовании электрон-ионных пар под действием высокоэнергетических пучковых электронов и имеющих энергию порядка 50–100 эВ, также внесет значительный вклад в ионизацию рабочего газа. Доля таких электронов может достигать 7–10% при энергии катодных электронов 10–15 кэВ [59]. Осцилляции плазменных электронов также значительно ускорят процесс формирования плазменного анода необходимой концентрации. И наконец, если учесть возможность возникновения катодных пятен на коллекторе и сетке, то становится ясным, что достижение необходимой величины n_i в плазменном аноде может занять намного меньше времени, чем указано выше, что и подтвердилось в экспериментах [57, 58].

На рис. 18 приведены типичные осциллограммы и соответствующие им термограммы, полученные в различных режимах, а также соответствующие термограммам распределения плотности энергии по сечению пучка.

Рис. 18.

Изучение большого массива осциллограмм и термограмм выявило следующие закономерности.

1. Ток пучка на коллектор начинается с небольшим (не более 0.2–0.3 мкс) запаздыванием относительно тока в цепи анода (тока ОР). Таким образом, время нейтрализации пространственного заряда пучка почти на порядок меньше, чем оценочные значения, приведенные выше ($t \approx 1.5\text{--}1.7$ мкс).

2. Скорость нарастания тока пучка на коллектор заметно выше, чем в случае отсутствия плазменного анода.

3. Осциллограммы и термограммы свидетельствуют об улучшенной стабильности параметров пучка по сравнению со случаем традиционной пушки с многопроволочным медным взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом на основе предварительно зажигаемого самостоятельного сильноточного ОР.

4. Изменение анодного напряжения в диапазоне от 150 до 311 В практически не влияет на параметры пучка.

5. Наибольшая плотность энергии была получена в следующих условиях: а) ведущее магнитное поле в области катода было фокусирующим; б) сетка 14 была заземлена через сопротивление 5 Ом. Эти меры позволили уменьшить утечки тока в катодном узле и через сетку на землю. В отсутствие хотя бы одной из этих мер энергия и плотность энергии пучка на коллекторе уменьшались в 1.5–2 раза.

6. Распределение плотности энергии имеет максимум в центральной части пучка, хоть и не резкий. Это обусловлено тем, что в описанных экспериментах индукция собственного магнитного поля пучка достигала 0.1 Тл, т.е. была сопоставима с индукцией ведущего магнитного поля, что приводило к некоторой фокусировке пучка. С увеличением индукции ведущего магнитного поля в 2–3 раза улучшение однородности пучка представляется вполне реальным. При этом, однако, следует иметь в виду, что величина магнитного поля и его конфигурация в области катода могут оказывать существенное влияние на электрическую прочность катодного узла.

Таким образом, предложенная в работах [57, 58] новая схема генерирования НСЭП перспективна как в плане улучшения однородности распределения плотности энергии по сечению пучка, так и в плане увеличения отношения энергии пучка в импульсе к энергии,

запасенной в емкостном накопителе генератора высоковольтных импульсов. Это обеспечивается повышенным током пучка в начальной части импульса (около 1 мкс) благодаря нейтрализации пространственного заряда пучка положительными ионами плазменного анода.

Питание цепи анода постоянным напряжением имеет также практический смысл. В отличие от импульсного питания (обычно использовались импульсы напряжения амплитудой 5–9 кВ и длительностью несколько десятков микросекунд [2, 7]), требующего достаточного дорогих тиристора и импульсного трансформатора, при питании постоянным напряжением достаточно зарядить накопительный конденсатор выпрямленным сетевым напряжением 311 В. Исчезает также необходимость синхронизации процессов зажигания разряда и генерирования пучка.

5. ЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ И РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ КАТОДНОГО УЗЛА

Если в установке, предназначенной для модификации материалов, реализована подача большого количества образцов к месту облучения пучком, то число импульсов в одном вакуумном цикле может достигать нескольких тысяч. В таких условиях увеличение частоты следования импульсов (f) является наиболее рациональным и наиболее распространенным методом повышения производительности установки.

Ранее в источниках НСЭП величина f не превышала 0.2 имп /с (т.е. 1 имп /5 с), так как она была ограничена мощностью имевшихся в то время блоков питания. Такой режим работы источников НСЭП с плазменным анодом и многопроволочным медным взрывоземиссионным катодом [2] 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) [60]. На наш взгляд, это было связано с частичной дегазацией поверхности катода, в результате чего возникали неустойчивости возбуждения взрывной эмиссии.

Поскольку новый катодный узел обеспечивает высокую стабильность срабатывания всех дуговых источников в катоде, в том числе при пониженных (от 5 кВ) напряжениях, это дало нам основания полагать, что и при более высокой частоте следования импульсов ($f = 1$ имп /с) источник НСЭП будет работать стабильно, без пропусков генерирования пучка.

Эксперименты проводились с катодным узлом, представленным на рис. 17 [61]. Амплитуда ускоряющего напряжения, подаваемого от ГВИ, варьировалась в диапазоне 5–20 кВ. Частота следования импульсов составляла 1 имп /с, число импульсов в серии

варьировалось от 10 до 50, после серии выдерживалась пауза 1–2 минуты. Такой режим характерен при облучении большого числа образцов.

Эксперименты [61] показали устойчивый частотный режим работы источника НСЭП 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. 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) ГВИ 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 подачей 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 $\pm 25\%$. При этом средняя за серию импульсов амплитуда полного тока в вакуумном диоде была приблизительно равна аналогичной величине для случая газонаполненного диода.

Мы также провели ресурсные испытания предложенного катодного узла для случая как планарно-аксиального, так и радиально сходящегося пучка. В каждом случае произведено по 50 тысяч импульсов. Какая-либо деградация эмиссионных свойств катода не наблюдалась. Таким образом, данный катодный узел практически на порядок величины превышает по ресурсу традиционный многопроволочный медный катод в условиях безмасляного вакуума.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Катодный узел со встроенными во взрывоэмиссионный катод резистивно развязанными дуговыми источниками плазмы показывает практически стопроцентную стабильность срабатывания при амплитуде ускоряющего напряжения 5 кВ и выше.

2. Независимость возбуждения сильноточной эмиссии на катоде от ширины ускоряющего промежутка и наполняющей его среды позволяет работать не только в режиме плазмонаполненного диода, но и в режимах вакуумного и газонаполненного диодов. Это позволяет разнообразить геометрию электронного пучка: например, формировать радиально сходящиеся сильноточные электронные пучки. Создан и исследован источник таких пучков МикрЭП. В двухсекционном варианте катодного узла источник позволяет обрабатывать протяженные цилиндрические и им подобные изделия в режиме поверхностного плавления с шагом 6–7 см в продольном направлении. Создание источника с радиально сходящимся пучком – наиболее важный результат применения

нового катодного узла. В настоящее время создана и испытывается специализированная установка для формирования *in situ* поверхностных сплавов на протяженных цилиндрических изделиях, сочетающая источник МикрЭП с обращенным магнетроном, формирующим радиально сходящийся поток нейтральных атомов [62].

3. Продемонстрирован 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 при исключении риска выхода из строя накопительного конденсатора и коммутатора генератора высоковольтных импульсов.

4. Разработана и успешно испытана новая схема электронной пушки с плазменным анодом, формируемым с помощью несамостоятельного разряда, инициируемого электронами, эмитируемыми катодными пятнами дуговых источников плазмы. В дальнейшем предполагается детальное исследование характеристик этой пушки и основных закономерностей генерирования сильноточных электронных пучков с ее использованием.

5. Достигнут ресурс работы катодного узла 50 000 импульсов без какой-либо деградации его эмиссионных свойств. Нет сомнения, что реальный ресурс работы будет намного больше. Одной из основных проблем остается электрическая прочность катодного узла, что пока ограничивает величину ускоряющего напряжения на уровне 18–20 кВ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны В.И. Петрову и А.Г. Падею за помощь в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-29-00034).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ротштейн В.П., Проскуровский Д.И., Озур Г.Е., Иванов Ю.Ф. Модификация поверхностных слоев металлических материалов низкоэнергетическими

сильноточными электронными пучками. Новосибирск: Наука, 2019. ISBN 978–5–02–038809–3.

2. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. Источники низкоэнергетических сильноточных электронных пучков с плазменным анодом. Новосибирск: Наука, 2018. ISBN 978-5-02-038794-2
3. Meisner L.L., Markov A.B., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Meisner S.N., Yakovlev E.V., Semin V.O., Mironov Yu.P., Poletika T.M., Girsova S.L., Shepel D.A. // J. Alloys Comp. 2018. V. 730. P. 376.
4. Uno Y., Okada A., Uemura K., Raharjo P., Furukawa T., Karato K. // Precision Engineering. 2005. V. 29. P. 449.
5. 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. 404. P. 12644. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126455>
6. Li M.C., Hao S.Z., Wen H., Huang R.F. // Appl. Surf. Sci. 2014. V. 303. P. 350. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.004>
7. Озур Г.Е., Проскуровский Д.И. // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 1. С. 21. <https://doi.org/10.7868/S0367292118010146>
8. Онищенко С.А., Нефедцев Е.В. // Письма в ЖТФ. 2024. Т. 50. № 21. С. 3. <https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.21.58949.19924>
9. Кизириди П.П., Озур Г.Е., Зюлькова Л.А., Батраков А.В.. Изв. вузов. Физика. 2012. Т. 55. № 6/2. С. 42.
10. Кизириди П.П., Озур Г.Е. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 6. С. 132.
11. Кизириди П.П., Озур Г.Е., Яковлев Е.В. РФ Патент 2688190. 2019.
12. Кизириди П.П., Озур Г.Е. // Изв. вузов. Физика. 2019. Т. 62. № 11. С. 151. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/11/151>
13. Кизириди П.П., Озур Г.Е. // Письма в ЖТФ. 2020. Т. 46. № 15. С. 47. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2020.15.49750.18364>
14. Кизириди П.П., Озур Г.Е. РФ Патент 203107. 2021.
15. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. Москва: Наука, 2004.
16. Кизириди П.П., Озур Г.Е. // ПТЭ. 2022. № 6. С. 61. <https://doi.org/10.31857/S0032816222060143>
17. Озур Г.Е., Григорьев В.П., Карлик К.В., Коваль Т.В., Ле Ху Зунг // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 9. С. 100.
18. Крейнделъ Ю.Е. Плазменные источники электронов. Москва: Атомиздат, 1977.

19. *Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М.* Электронные пучки большого сечения. Москва: Энергоатомиздат, 1984.
20. Изв. вузов. Физика: тематический выпуск “Плазменная эмиссионная электроника” / Под ред. П.М. Щанина. – 2001. Т. 44. № 9.
21. *Коваль Н.Н., Девятков В.Н., Воробьев М.С.* // Изв. вузов. Физика. 2020. Т. 63. № 10. С. 7. <https://doi.org/10.17223/00213411/63/10/7>
22. *Бугаев С.П., Шнак В.Г.* // Мощные наносекундные импульсные источники ускоренных электронов. / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука. 1974. С. 71.
23. *Loda G., Schneider S., Otto W.F., Dezenberg G.J.* // Proc. 4th IEEE Pulsed Power Conference. Albuquerque, New Mexico, USA. June 6–8, 1983. P. 486.
24. *Кесаев И.Г.* Катодные процессы электрической дуги. Москва: Наука. 1968.
25. *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука. 1984.
26. *Петров В.И., Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. № 11. С. 1764. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.11.51541.80-21>
27. *Bostik W.H.* // Phys. Rev. D. 1956. V. 104(2). P. 292.
28. *Луценко Е.И., Середа Н.Д., Концевой Л.М.* // Физика плазмы. 1976. Т. 2. № 1. С. 72.
29. *Луценко Е.И., Середа Н.Д., Целуйко А.Ф.* // ЖТФ. 1988. Т. 58. № 7. С. 1299.
30. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // Изв. вузов. Физика. 2022. Т. 65. № 10. С. 9. <https://doi.org/10.17223/00213411/65/10/9>
31. *Kiziridi P.P., Ozur G.E.* // Vacuum. 2021. V. 194. 110560. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2021.110560>
32. *Кизириди П.П., Озур Г.Е.* // ЖТФ. 2022. Т. 92. № 6. С. 876. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.06.52518.316-21>
33. *Абдуллин Э.Н., Баженов Г.П., Ким А.А., Ковальчук Б.М., Кокшенев В.А.* // Физика плазмы. 1986. Т. 12. № 10. С. 1260.
34. *Незлин М.В.* Динамика пучков в плазме. Москва: Энергоатомиздат, 1982.
35. *Лазаренко А.В., Чебуков Е.С., Энгелько В.И.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 7. С. 159.
36. *Григорьев С.В., Девятков В.Н., Коваль Н.Н., Москвин П.В., Тересов А.Д.* // Труды II Международного крейнделевского семинара “Плазменная эмиссионная электроника”. 23–30 июня 2009. Россия, г. Улан-Удэ. С. 30.
37. *Koval N.N., Grigoriev S.V., Devyatkov V.N., Teresov A.D., Shchanin P.M.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2009. V. 37. №. 10. P. 1890.
38. *Марков А.Б.* Дис. ... канд. физ.-мат наук. Томск: Томский государственный университет, 2001. 157 с.

39. *Rotshtein V.P., Ivanov Yu.F., Markov A.B. et al. // Surf. Coat. Technol. 2006. V. 200. P. 6378.*
40. *Кузириди П.П., Озур Г.Е., Шнайдер А.В. // Изв. вузов. Физика. 2024. Т. 67. № 2. С. 101. DOI: 10.17223/00213411/67/2/11*
41. *Проскуровский Д.И., Пучкарев В.Ф. // ЖТФ. 1979. Т. 49. № 12. С. 2611.*
42. *Kiziridi P P. , Ozur G.E. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2024. V. 88. №. 4. P. 623. <https://doi.org/10.1134/S1062873823706220>*
43. *Abdullin E.N., Ivanov N.G., Losev V.F., Morozov A.V. // Laser and Particle Beams. 2013. V. 31. P. 1. <https://doi.org/10.1017/S026303461300075X>*
44. *Kovalchuk B.M., Polevin S.D., Tsygankov R.V., Zherlitsyn A.A. // IEEE Transactions on Plasma Science. 2010. V. 38. No. 10. P. 2819. <https://doi.org/10.1109/TPS.2010.2060367>*
45. *Torba M.S., Doroshkevich S.Yu., Vorobyov M.S. et al // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. V. 87. Suppl. 2. P. S318. <https://doi.org/10.1134/S1062873823704798>*
46. *Торба М.С., Дорошкевич С.Ю., Воробьев М.С, и др. // ПТЭ. 2025. № 1. С. 73. [Torba M.S., Doroshkevich S.Yu., Vorobyov M.S. et al. // ИЕТ. 2025. V. 68. № 1. P. 78. <https://doi.org/10.1134/S0020441225700253M>.]*
47. *Engelko V.I., Kuznetsov V.S., and Mueller G. // J. Appl. Phys. 2009. V. 105. 023305. <https://doi.org/10.1063/1.2996286>*
48. *Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Русанов А.Е., Биржевой Г.А. // Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. 2015. № 4. С. 93.*
49. *Кузириди П.П., Озур Г.Е. // ПТЭ. 2023. № 4. С. 84. <https://doi.org/10.31857/S0032816223030072>.*
50. *Брейзман Б.Н., Рютов Д.Д., Ступаков Г.В. // Изв. вузов. Физика. 1979. № 10. С. 7.*
51. *Кузириди П.П., Озур Г.Е., Пегель И.В. // Изв. вузов. Физика. 2023. Т. 66. № 7. С. 25. <https://doi.org/10.17223/00213411/66/7/3>*
52. *Кузириди П.П., Озур Г.Е. // ПТЭ. 2024. № 1. С. 102. <https://doi.org/10.31857/S0032816224010141>.*
53. *Тараканов В.П. // Математическое моделирование. Проблемы и результаты. Москва: Наука, 2003. С. 456.*
54. *Тараканов В.П. Дис. ... докт. физ.-мат. наук. Москва: Объединенный институт высоких температур РАН, 2011. 264 с.*
55. *Кузириди П.П., Озур Г.Е., Пегель И.В. // Proc. 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024) – 23rd International Symposium on High-*

- Current Electronics. P. 59. September 16–21, 2024. Tomsk, Russia.
<https://doi.org/10.56761/EFRE2024.S1-P-005201>
56. *Кузириди П.П., Озур Г.Е., Марков А.Б.* // Прикладная физика. 2022. № 4. С. 34.
<https://doi.org/10.51368/1996-0948-2022-4-34-39>
 57. *Кузириди П.П., Озур Г.Е.* // Proc. 9th International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2024) 23nd International Symposium on High-Current Electronics. P. 29. September 16–21, 2024, Tomsk, Russia.
<https://doi.org/10.56761/EFRE2024.S1-O-005202>
 58. *Kiziridi P.P., Ozur G.E.* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2025 (to be published).
 59. *Кальман Г., Розен Б.* // УФН. 1932. Т. 12. № 1. С. 105.
 60. *Петров В.И.* Частное сообщение. 2020.
 61. *Кузириди П.П., Озур Г.Е., Петров В.И.* // ПТЭ. 2025. № 1. С. 50. [*Kiziridi P.P., Ozur G.E., Petrov V.I.* // IET. 2025. V. 68. №. 1. P. 58.
<https://doi.org/10.1134/S0020441225700125>]
 62. *Маджара Н., Кузириди П.П., Озур Г.Е., Ажгихин М.И., Соловьев А.А.* // Труды XXVII Международной конференции “Взаимодействие ионов с поверхностью” (ВИП-2025), 25–29 августа 2025 г., Рязань, Россия. 2025.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема электронной пушки и ее катодного узла (вариант с плазменным анодом): 1 – катод, 2 – керамические трубки, 3 – медные электроды, 4 – резистор ТВО-2 (от 0.56 до 1 кОм), 5 – ГВИ, 6 – изоляторы ввода ускоряющего напряжения, 7 – плазменный анод, 8 – коллектор, 9 – кольцевой анод отражательного разряда, 10 – изолятор ввода анодного напряжения, 11 – соленоид, 12 – корпус пушки, 13 – экранированный электрод [13, 14].

Рис. 2. Типичные осциллограммы импульсов. Зарядное напряжение ГВИ $U_{\text{зар}} = 15$ кВ. Давление аргона – 0.06 Па, $\tau_d = 15$ мкс [13], τ_d – задержка между моментом зажигания сильноточного ОР и подачей импульса ускоряющего напряжения на катод: **а** – многопроволочный медный катод, **б** – катодный узел с многоканальным инициированием.

Рис. 3. Схема эксперимента с одновременной регистрацией осциллограмм и термограмм пучка: 1 – катод, 2 – керамические трубки, 3 – медные электроды, 4 – резистор ТВО-2 (1 кОм), 5 – генератор высоковольтных импульсов, 6 – изоляторы ввода ускоряющего напряжения, 7 и 8 – пояса Роговского, 9 – соленоид, 10 – экранированный электрод, 11 – тепловизионная мишень (коллектор пучка), 12 – инфракрасное окно, 13 – тепловизор TESTO 875-1, 14 – корпус пушки, R_1 и R_2 – активный делитель напряжения [30–32].

Рис. 4. Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (первый канал, 10 кВ/дел), полного тока катода (второй канал, 12 кА/дел) и тока пучка на коллектор (третий канал, 10 кА/дел): **а** – $p_{\text{Ar}} = 0.053$ Па, **б** – $p_{\text{Ar}} = 0.093$ Па, **в** – $p_{\text{Ar}} = 0.133$ Па. Горизонтальная шкала – 1 мкс/дел. Зазор катод-анод – 3.5 см, $U_{\text{зар}} = 12$ кВ, $B_z = 0.08$ Тл [30].

Рис. 5. Энергия пучка в импульсе в зависимости от давления и рода рабочего газа: аргона, воздуха и гелия, $U_{\text{зар}} = 17$ кВ. Значения давления даны в воздушном эквиваленте (по показанию ионизационного датчика ПМИ-2). Энергия при давлении воздуха 0.008 Па соответствует вакуумному диоду [30].

Рис. 6. Диаграммы значений энергии пучка для диода двух типов, эффективность передачи запасенной в ГВИ энергии в энергию пучка и средняя плотность энергии в центральной части пучка [31, 32].

Рис. 7. Схема эксперимента: 1 – катод, 2 – керамическая трубка, 3 – медный электрод, 4 – резистор ТВО-2 (1 кОм), 5 – генератор высоковольтных импульсов (ГВИ), 6 – изоляторы ввода ускоряющего напряжения, 7 – трубчатый анод внутренним диаметром 112 мм (коллектор пучка), 8 – постоянные магниты, 9 – окно для наблюдения, 10 –

высокоскоростная электронно-оптическая камера HSFC-Pro, 11 – соленоид, 12 – экраный электрод, 13 – корпус пушки [40].

Рис. 8. Осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (первый канал, 10 кВ/дел), полного тока в контуре (второй канал, 30 кА/дел) и тока пучка на анод (третий канал, 5 кА/дел), горизонтальная шкала – 1 мкс/дел, ЭОП-изображения свечения плазмы в различные интервалы времени от начала импульса пучка: 0–50 нс – fr1, 1–1.05 мкс – fr2, 2.6–2.65 мкс – fr3, 3.6–3.65 мкс – fr4. Давление аргона 0.06 Па, зарядное напряжение ГВИ 12 кВ, первая строка: ведущее магнитное поле – 0.11 Тл в максимуме, вторая строка: ведущее магнитное поле отсутствует [40].

Рис. 9. Слева: общий вид рабочей камеры и электронной пушки источника МикрЭП: 1 – катод, 2 – керамическая трубка, 3 – электрод дугового источника плазмы, 4 – резистор ТВО-2 (750 Ом), 5 – пучок медных проволок, 6 – стержневой анод, 7 – подводы импульса высокого напряжения от передающей линии 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 со свинцовым стеклом, 16 – чашеобразный экран, 17 – изолятор ввода ускоряющего напряжения, 18 – датчики давления газа, 19 – стержневой ввод ускоряющего напряжения, 20 – соединительный стакан. Справа: фотографии чашеобразного экрана 16 (вверху) и калориметра (внизу) [49].

Рис. 10. Типичные осциллограммы импульсов ускоряющего напряжения (Ch1, 20 кВ/дел), полного тока катода (Ch2, 24 кА/дел) и суммарного тока на анод (Ch4, 15 кА/дел). Давление аргона 0.2 мторр [49].

Рис. 11. Автографы пучка на нержавеющей стали (**а, г**), латуни (**б**), меди (**в**). Автографы **а–в** получены в случае односекционного катодного узла, **г** – для двухсекционного узла, $U_{зар} = 17$ кВ, давление аргона – 0.08 Па. Каждая серия содержит по 10 импульсов пучка [49].

Рис. 12. Свечение плазмы, зарегистрированное цифровым фотоаппаратом: **а** – в отсутствие экранов, **б** – при наличии экранов, **в** – свечение плазмы на стержневом вводе ускоряющего напряжения 19 (съемка наискосок). Стрелки указывают на плазму вблизи поверхности резисторов (рис. 3а) и стержневого ввода ускоряющего напряжения (рис. 3в) [49].

Рис. 13. Расчетные конфигурации электронного потока (**а, б**), траектории частиц (**в, г**), продольные распределения тока электронов на аноде и приведенной кинетической энергии этих частиц (**д, е**). Зависимости ускоряющего напряжения и тока электронного

пучка от времени (**ж**, **з**). Внутренний радиус катодной плазмы $R_{\text{КП}}=1.0$ см, радиус анода $R_{\text{А}}=0.5$ см. Левая колонка: радиус анодной плазмы $R_{\text{АП}}=0.88$ см, ускоряющий зазор 0.12 см (ток ниже критического на 20%). Правая колонка: $R_{\text{АП}}=0.9$ см, ускоряющий зазор 0.1 см (ток выше критического на 10%) [51].

Рис. 14. Схематическое устройство секционированного калориметра: 1 – полый анод, 2 – коллимирующие отверстия диаметром 6.8 мм, 3 – медный цилиндр Фарадея (поглотитель пучка), 4 – калиброванный терморезистор, 5 и 6 – токопроводы. Координата $z = 0$ соответствует положению посередине между катодными секциями, расстояние между центрами катодных секций 4 см [52].

Рис. 15. Распределения плотности энергии пучка вдоль анода для различных значений зарядного напряжения генератора высоковольтных импульсов. Слева – вакуумный диод (давление остаточных газов – 0.006 Па), справа – газонаполненный диод (аргон при давлении 0.08 Па) [52].

Рис. 16. Фотография анода из нержавеющей стали после 20 тысяч импульсов пучка. Зарядное напряжение генератора высоковольтных импульсов, питающего электронную пушку, равно 17 кВ [55].

Рис. 17. Схема эксперимента: 1 – катод, 2 – керамические трубки, 3 – медные электроды (25 штук), 4 – пучок медных проволок, 5 – резистор ТВО-2 (750 Ом), 6 – катододержатель, 7 – ГВИ, 8 – изолятор ввода ускоряющего напряжения, 9 и 10 – пояса Роговского, 11 – экран, 12 – сетка, 13 – анод, 14 – коллектор (тепловизионная мишень), 15 – окно из флюорита кальция, 16 – тепловизор Testo 875-1, 17 – вакуумная камера, 18 – соленоид, R_1 , R_2 – активный делитель напряжения, R_3 – резисторы автосмещения [56, 57].

Рис. 18. Типичные осциллограммы импульсов (левый столбец), термограммы (средний столбец) и соответствующие им распределения плотности энергии по радиусу пучка (правый столбец) в сечении, показанном на термограммах штриховой линией, полученные при различных значениях зарядного напряжения ГВИ ($U_{\text{зар}}$). Масштаб осциллограмм по горизонтали 1 мкс/дел. Масштабы осциллограмм по вертикали: ускоряющее напряжение, Ch1 – 20 кВ/дел, полный ток катода; Ch2 – 25 кА/дел, ток в цепи кольцевого анода; Ch3 – 2 кА/дел, ток пучка на коллектор; Ch4 – 5 кА/дел, $U_{\text{ch}} = 10$ кВ – верхняя строка, $U_{\text{ch}} = 15$ кВ – средняя строка, $U_{\text{ch}} = 20$ кВ – нижняя строка. Давление аргона 0.033 Па, индукция ведущего магнитного поля 0.15 Тл (в максимуме, включены вторая и третья по ходу пучка катушки соленоида). Сопротивление в цепи сетки составляет 5 Ом, напряжение на аноде равно 150 В [57, 58].

Рисунок 1

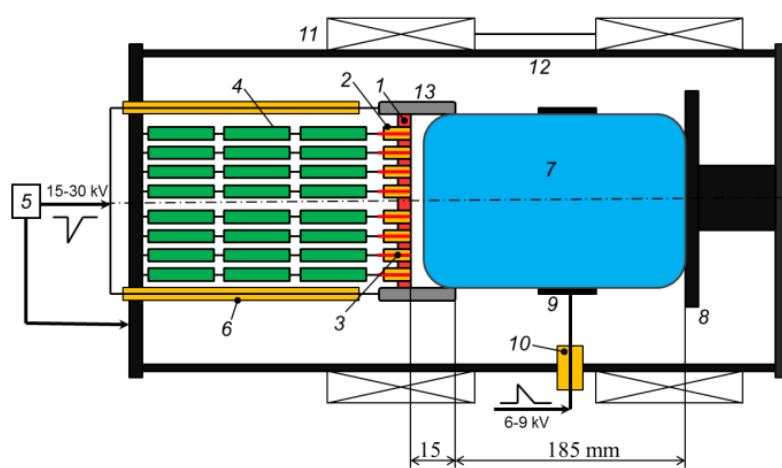


Рисунок 2

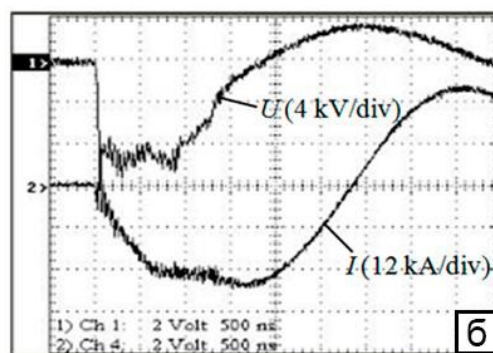
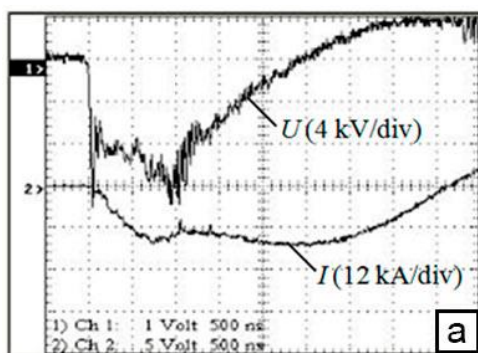


Рисунок 3

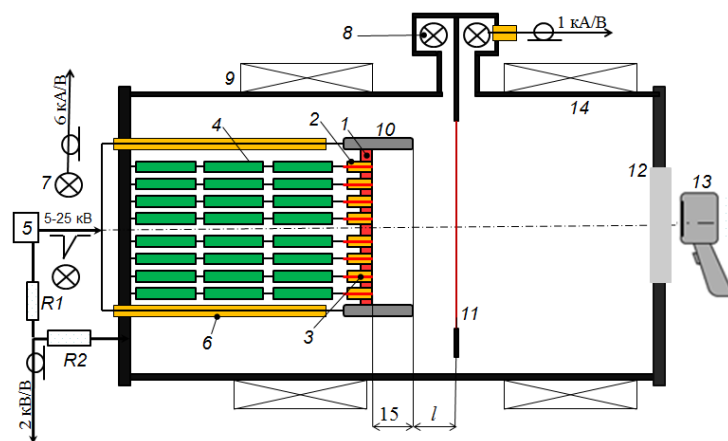


Рисунок 4

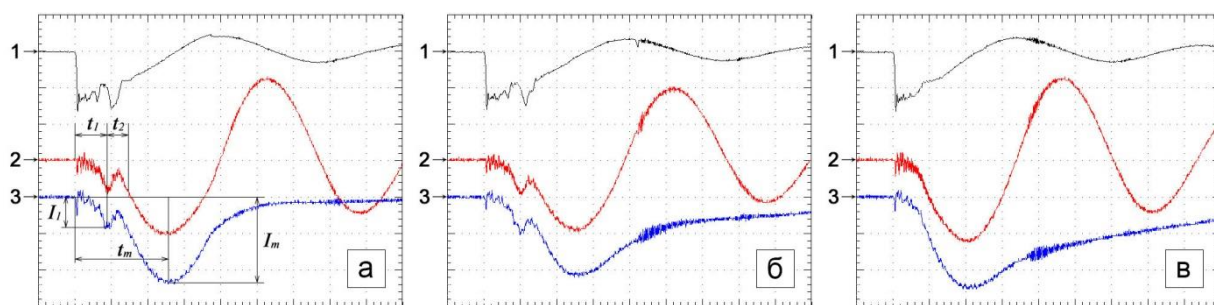


Рисунок 5

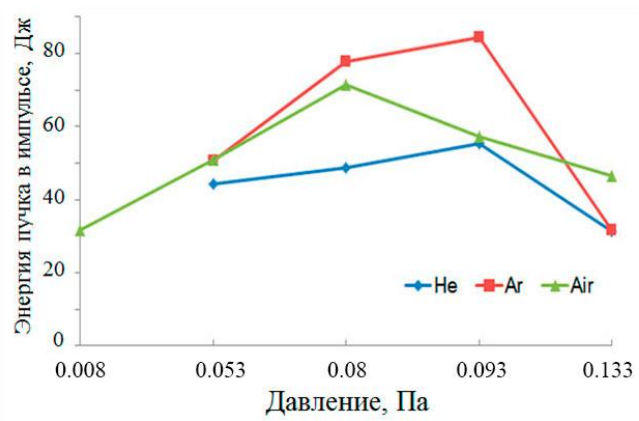


Рисунок 6

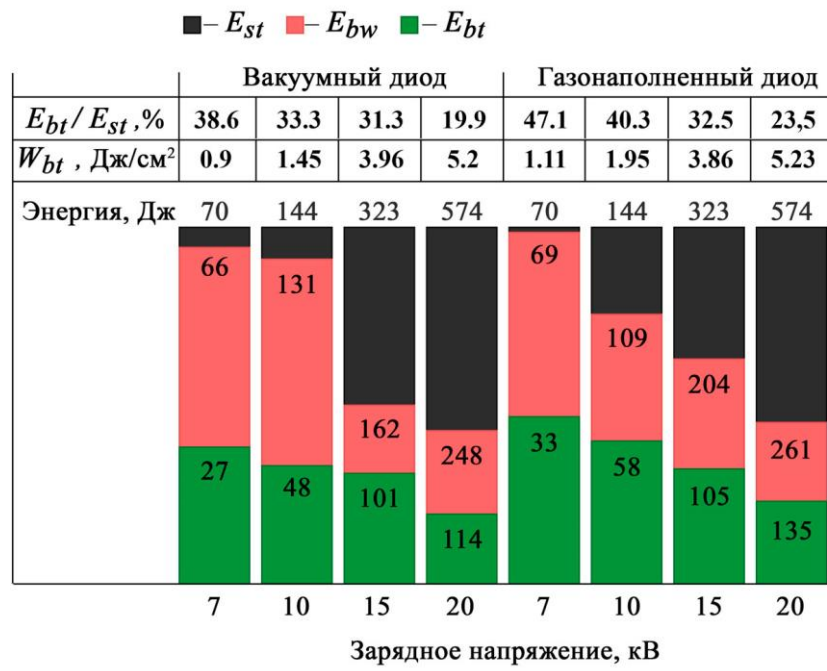


Рисунок 7

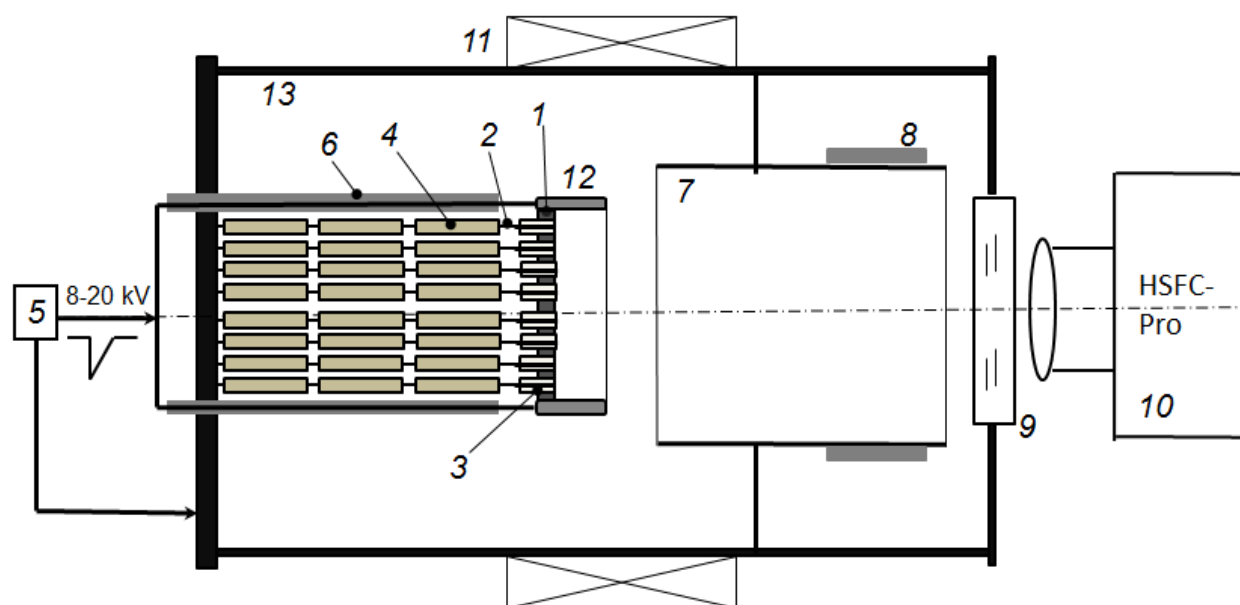


Рисунок 8

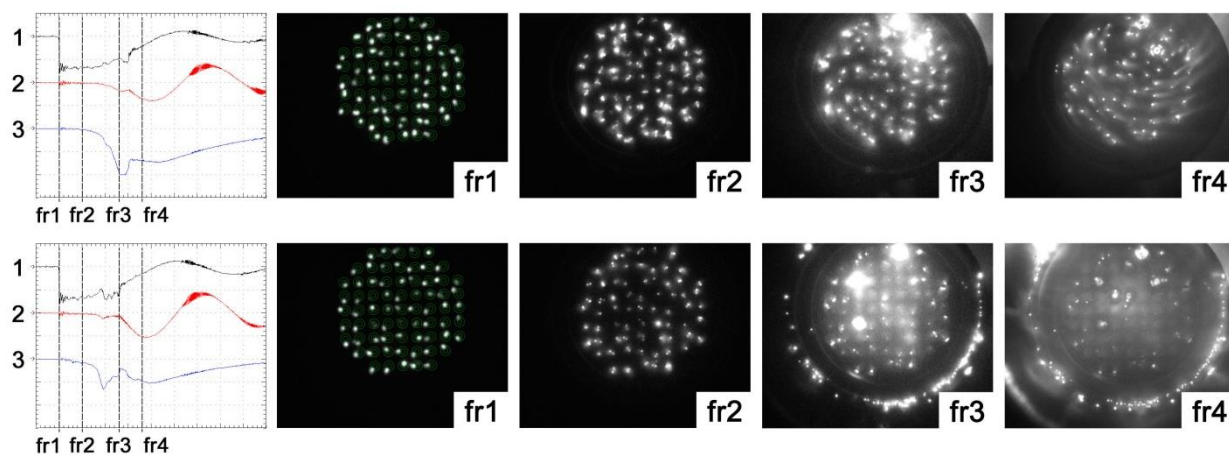


Рисунок 9

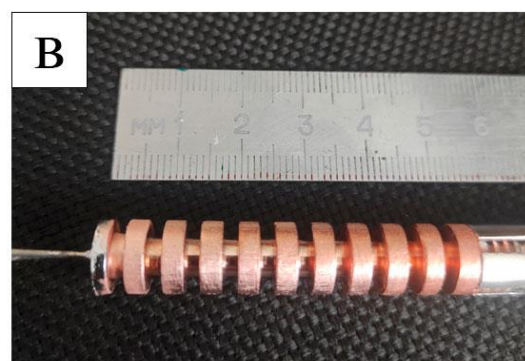
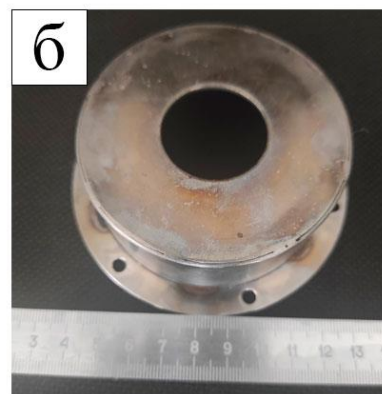
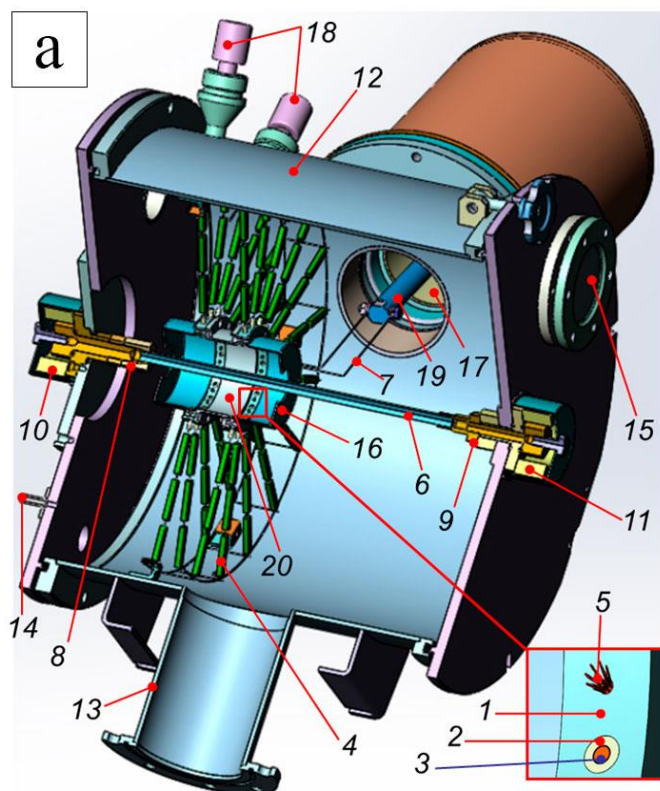


Рисунок 10

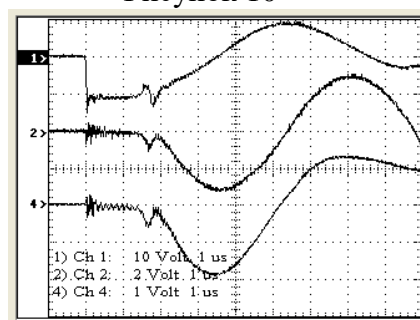


Рисунок 11

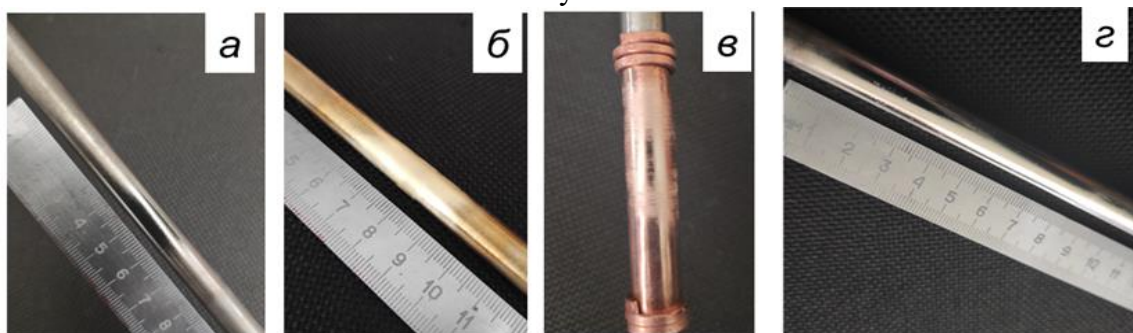


Рисунок 12

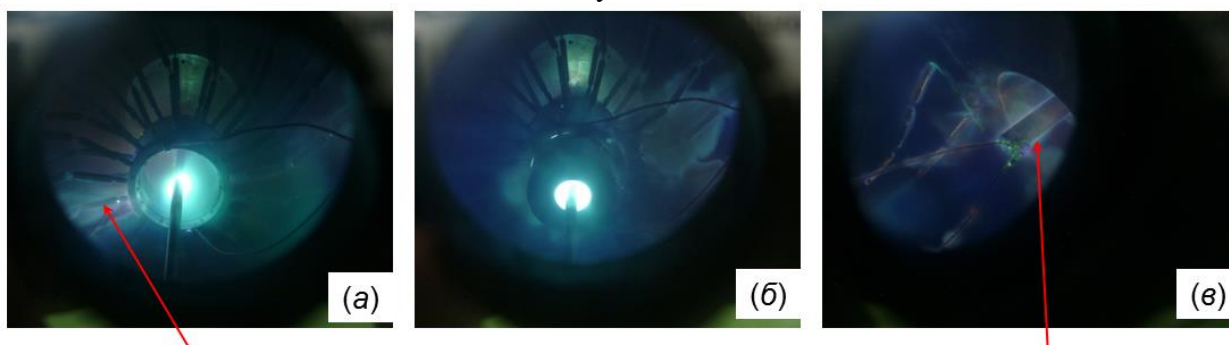


Рисунок 13

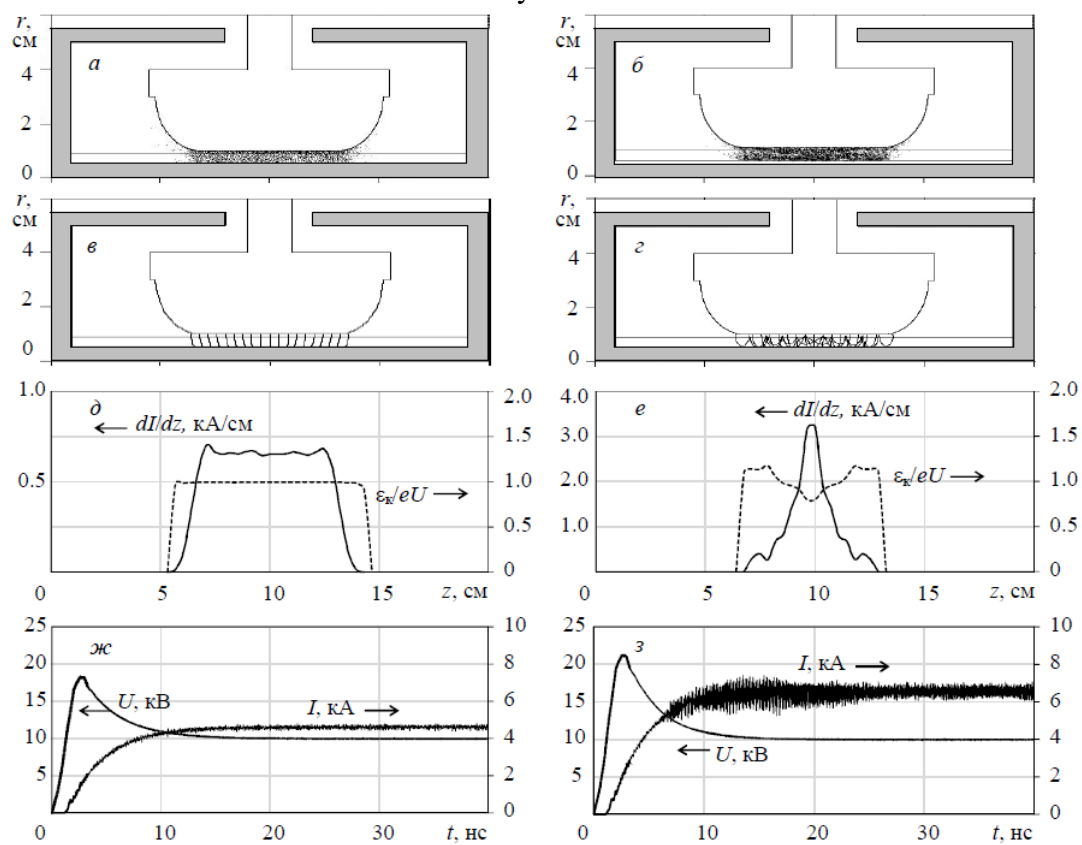


Рисунок 14

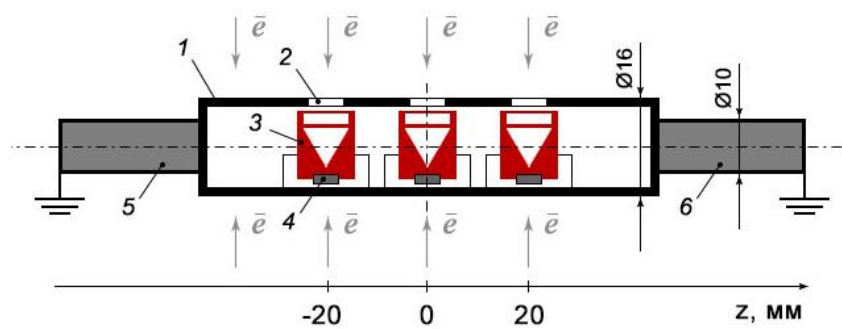


Рисунок 15

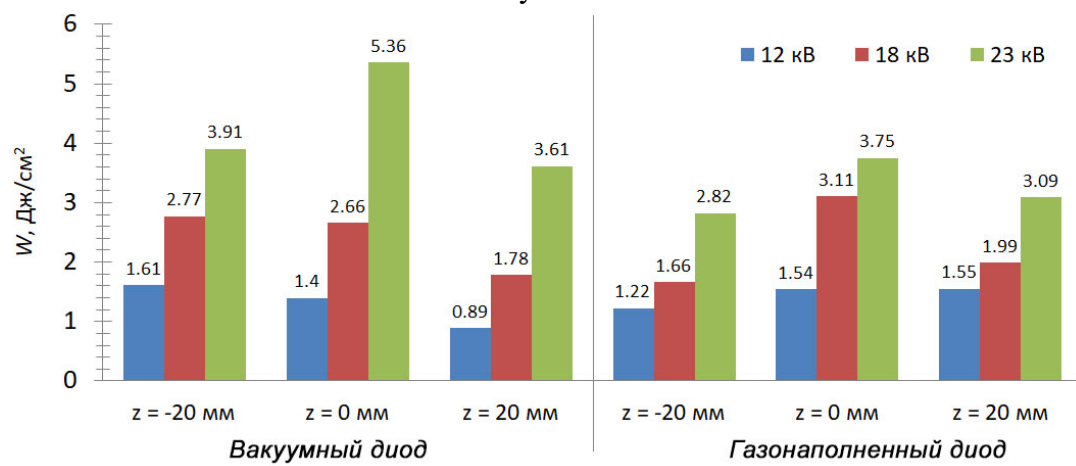


Рисунок 16

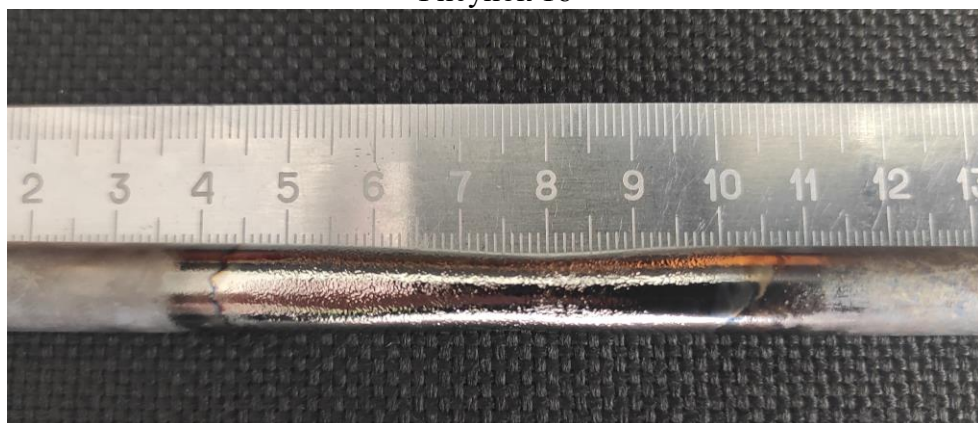


Рисунок 17

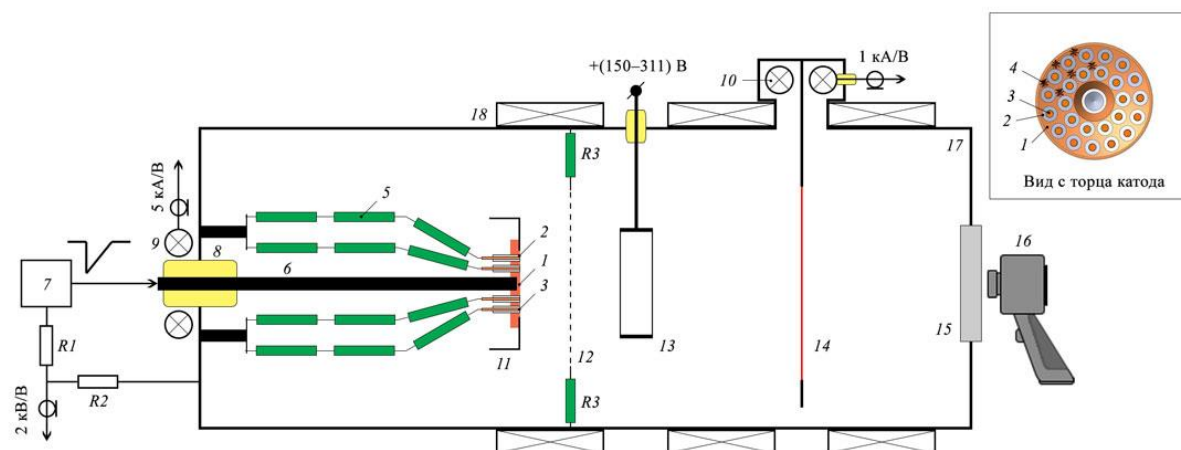


Рисунок 18

