

Динамика импульсного магнетронного разряда в сильноточной электронной пушке

© П.П. Кизириди,¹ Г.Е. Озур,¹ Л.А. Зюлькова,¹ С.А. Попов,¹ С.А. Шевелёв,² М.А. Алёхин^{1,2}

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050 Томск, Россия
e-mail: kiziridi_pavel@mail.ru

(Поступило в Редакцию 22 февраля 2017 г.)

С помощью скоростной видеосъемки исследована динамика импульсного газового разряда низкого давления (аргон 0.053–0.133 Па) в планарном магнетроне, встроенном во взрывоэмиссионный катод сильноточной электронной пушки. Установлено, что вначале разряд зажигается у боковой поверхности катода и лишь затем переходит на его торцевую поверхность. Исследована зависимость стабильности момента зажигания разряда на торцевой поверхности катода от давления рабочего газа и конструкции катода. Установлено, что наложение импульсного продольного магнитного поля приводит к переключению разряда в аксиальном направлении на коллектор электронной пушки. Представлено качественное объяснение наблюдаемого поведения разряда.

DOI: 10.21883/JTF.2017.11.45123.2217

Введение

Источники нерелятивистских (10–30 keV) сильноточных (10–25 kA) импульсных (2–4 μs) электронных пучков (НСЭП) со взрывоэмиссионным катодом и плазменным анодом на основе сильноточного отражательного (пеннинговского) разряда (ОР) представляют большой интерес для поверхностной обработки материалов и уже нашли достаточно широкое применение [1–4]. В то же время ряд вопросов их формирования и транспортировки изучен пока недостаточно, несмотря на то что исследованию физики и техники сильноточных электронных пучков посвящено огромное количество оригинальных работ и целый ряд монографий [5–7]. К числу малоизученных вопросов физики и техники НСЭП следует отнести проблему однородности распределения плотности тока (энергии) пучка по его поперечному сечению, которая является одной из ключевых с точки зрения поверхностной обработки материалов [3,8–11], особенно при решении задач, связанных с формированием поверхностных сплавов из предварительно нанесенных покрытий [12].

Суть проблемы однородности сильноточных электронных пучков заключается в следующем. Плотности тока электронов и ионов в двойном слое, в котором формируется электронный пучок, связаны между собой соотношением Ленгмюра: $j_e = j_i(M/m)^{1/2}$, где M и m — массы иона и электрона соответственно. На первый взгляд для обеспечения однородности плотности тока НСЭП, $j_e(r)$, необходима соответствующая однородность распределения плотности ионного тока, $j_i(r)$, по сечению плазменного анода. Однако исследования и опыт эксплуатации сильноточных электронных пушек показали, что при однородном распределении $j_i(r)$ рас-

пределение плотности энергии пучка на мишени тем не менее имеет ярко выраженный максимум в центральной части [8,10]. Одной из причин такой трансформации электронного пучка в процессе транспортировки в плазменном канале является накопление ионов плазмы в приосевой области пучка под действием его собственного радиального электрического поля, появляющегося на стадии нарастания тока вследствие запаздывания зарядовой нейтрализации [6]. Дополнительный вклад в увеличение плотности энергии в центральной области пучка обусловлен действием его собственного магнитного поля, которое сравнимо по величине с ведущим магнитным полем (0.15–0.25 Т).

Для компенсации этого негативного эффекта „фокусировки“ НСЭП необходимо создать плазменный анод с увеличенной на периферии концентрацией ионов $n_i(r)$. В [10] для этой цели использовались дуговые источники плазмы, встроенные в анод ОР и обеспечивающие усиление ионизации рабочего газа преимущественно на периферии плазменного анода. В данной системе удалось улучшить однородность пучка, но несколько ухудшилась стабильность его параметров, обусловленная, видимо, нестабильностью срабатывания дуговых источников.

В [13] нами была предложена другая идея формирования усиленного на периферии профиля $n_i(r)$, заключающаяся в установке во взрывоэмиссионный катод планарного магнетрона. Магнетрон генерирует кольцевое облако плазмы вблизи катода и поток нейтралов, образующихся при катодном распылении. Поэтому при последующем зажигании сильноточного ОР, формирующего плазменный анод, можно ожидать усиления плотности ионного тока на его периферии по сравнению с центральной частью. По сравнению с [10] предлагаемый способ выглядит более перспективным. Кроме того,

предварительное создание плазмы на взрывоэмиссионном катоде с помощью планарного магнетрона должно улучшить стабильность эмиссии катода. Предварительные испытания сильноточной электронной пушки нового класса, в которой плазменный анод создается с помощью гибридного разряда, сочетающего импульсные магнетронный разряд (МР) и ОР, показали ее работоспособность [13].

Однако для понимания процессов в такой пушке необходимо исследовать динамику импульсного МР, его пространственно-временные характеристики. Такого рода данные в литературе практически отсутствуют, поскольку МР, используемый, прежде всего, в технологиях напыления покрытий, функционирует в непрерывном или импульсно-периодическом режиме [14,15] и изучается именно с точки зрения построения и использования напылительных установок или ионных источников. Устройство, сочетающее планарный магнетрон с пеннинговской разрядной ячейкой, описанное в [16], также использовалось для нанесения покрытий в стационарном режиме. Таким образом, исследование динамики импульсного МР и оценка перспективности его использования для формирования плазменного анода сильноточной электронной пушки представляются актуальными.

1. Экспериментальная установка и методики измерений

На рис. 1 схематично представлена созданная нами электронная пушка „ВЭКсМА“ (ВзрывоЭмиссионный Катод с МАгнетроном), на которой проводились эксперименты. Внутренний диаметр корпуса пушки составляет 204 мм. Электродная система пушки включает в себя катодный узел 3, кольцевой анод ОР 5 и коллектор. В экспериментах по скоростной видеосъемке свечения плазмы разряда коллектором являлась сетка 10 из нержавеющей стали с ячейей 2 × 2 мм и геометрической

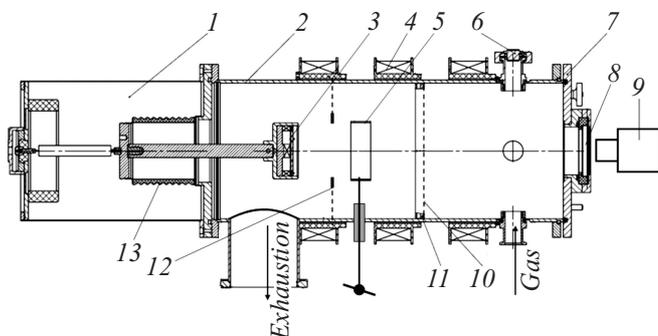


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — катодный ввод, 2 — корпус пушки, 3 — катодный узел, 4 — соленоид, 5 — анод ОР, 6 — патрубок для установки датчика вакуума, 7 — фланец, 8 — оптическое окно, 9 — скоростная видеокамера Photron Fastcam SA1.1, 10 — сетка, 11 — опорное кольцо, 12 — диафрагма с сеткой, 13 — высоковольтный изолятор.

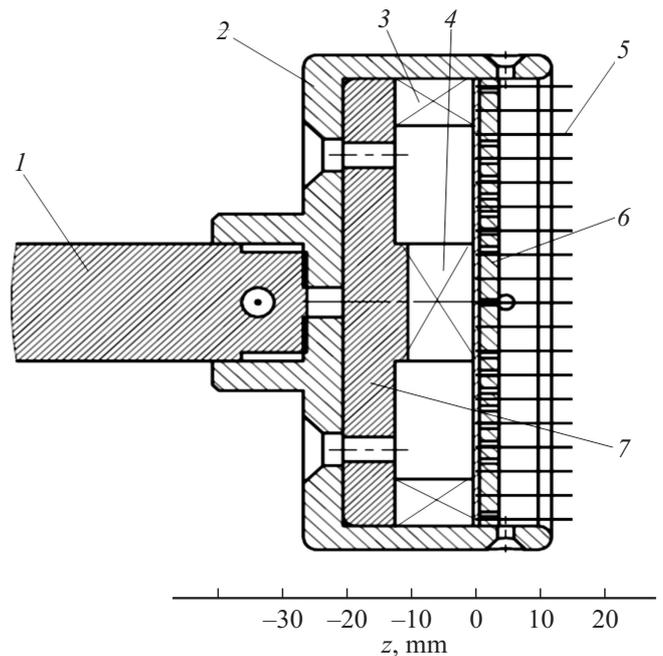


Рис. 2. Сборочный чертеж катодного узла. 1 — катододержатель, 2 — обойма, 3 — кольцевой постоянный магнит $\varnothing 76 \times \varnothing 60 \times 12$ (материал Nd-Fe-B), 4 — дисковый постоянный магнит $\varnothing 20 \times 10$ (материал Nd-Fe-B), 5 — эмиттер, 6 — подложка, 7 — магнитопровод.

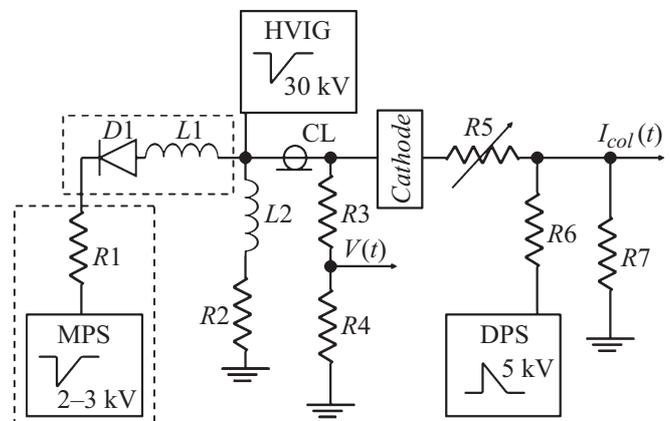


Рис. 3. Принципиальная электрическая схема. $L1 \approx 100 \mu\text{H}$; $L2 \approx 140 \mu\text{H}$; $R1 = 500 \Omega$; $R2 = 1.1 \text{ k}\Omega$; $R3 = 4.4 \text{ k}\Omega$; $R4 = 2.2 \Omega$; $R5$ — сопротивление магнетронного разряда; $R6 = 30 \Omega$; $R7 = 1 \Omega$ (шунт); D1 — линейка диодов HER 308 на 45 kV, MPS — блок питания магнетрона; DPS — блок питания отражательного разряда; CL — передающая линия. HVIG — генератор высоковольтных импульсов.

прозрачностью около 80%. Видеосъемка осуществлялась с помощью цифровой скоростной камеры Photron FastCam SA1.1 при скорости записи 12 000 кадров в секунду. Камера была синхронизована с моментом начала разряда с точностью не хуже $\pm 1 \mu\text{s}$.

Откачка объема пушки до давления около 3×10^{-3} Па осуществлялась турбомолекулярным насосом OSAKA

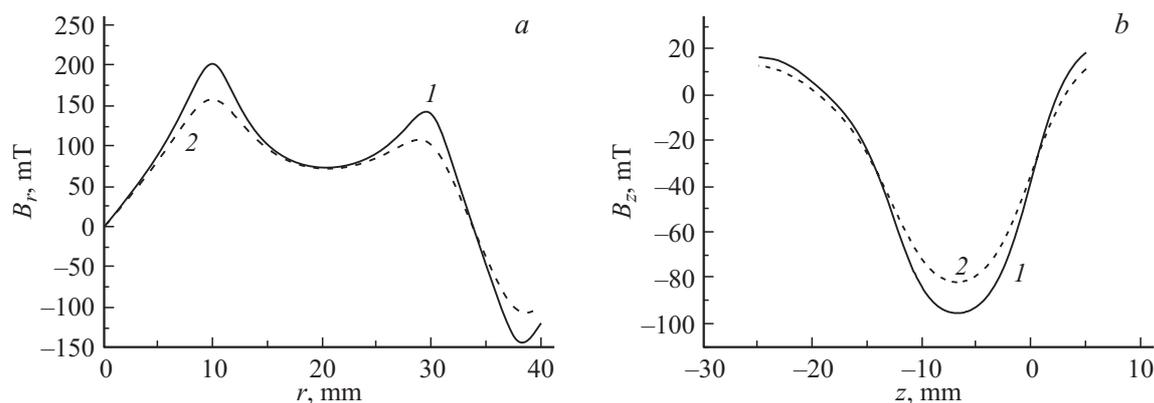


Рис. 4. Распределения магнитной индукции: *a* — $B_r(r)$ при $a = 0$ (кривая 1) и 1 мм (кривая 2); *b* — $B_z(z)$ при $b = 4$ (кривая 1) и 5 мм (кривая 2). *a* — расстояние от плоскости катодной подложки; *b* — расстояние от наружной боковой поверхности кольцевого магнита. $b = 4$ мм соответствует наружной боковой поверхности обоймы, $b = 5$ мм соответствует расстоянию 1 мм от этой поверхности. Координата r отсчитывается от оси системы, привязка координаты z к катоду указана на рис. 2.

(240 l/s). Напуск рабочего газа (аргона) осуществлялся стационарно с помощью прибора СНА-2.

При проведении части электрических измерений видеокамера удалялась, а вместо окна устанавливался коллекторный узел, заземленный через шунт (1Ω). Диаметр коллектора (нержавеющая сталь) составлял 120 мм.

Конструкция катодного узла приведена на рис. 2. В качестве эмиттеров служили медные проволочки $\varnothing 1$ мм, запрессованные, а затем распаянные с тыльной стороны подложки из нержавеющей стали толщиной 2 мм и диаметром 76 мм. Магнетрон и подложка с эмиттерами помещены в обойму 2 из нержавеющей стали наружным диаметром 84 мм. Эмитирующая часть катодного узла изготовлена в двух экземплярах. В первом случае высота эмиттеров составляет 15 мм, шаг (межцентровое расстояние) между эмиттерами — 3 мм, общее число эмиттеров — 514. Во втором случае высота эмиттеров составляет 10 мм, шаг между эмиттерами — 5 мм, общее число эмиттеров — 189. В ряде экспериментов использовался в качестве модельного и чисто плоский катод.

Магнитная система магнетрона образована кольцевым постоянным магнитом 3, дисковым постоянным магнитом 4 и магнитопроводом 7, изготовленным из углеродистой стали. Система создает над поверхностью катода кольцевое арочное магнитное поле, которое обеспечивает замкнутый азимутальный дрейф электронов, что, в свою очередь, обеспечивает зажигание МР при низких давлениях рабочего газа (обычно около 0.2 Па).

Продольное (ведущее для электронов пучка) импульсное магнитное поле создавалось соленоидом 4, питаемым от конденсаторной батареи через тиристорный ключ. Время нарастания тока соленоида до максимума составляло 5.5 мс.

Важным вопросом работоспособности представленной схемы электронной пушки является различие давлений рабочего газа (аргона), при которых зажигается МР и генерируется сильноточный электронный пучок.

Для зажигания МР обычно требуется давление 0.2 Па и выше (при амплитуде поджигающего импульса 0.8–1 кВ и индукции магнитного поля на поверхности катода 0.05–0.06 Т). Для генерации же НСЭП оптимальным является давление примерно втрое меньшее, и это различие представляло дополнительную проблему, требовавшую решения.

Принципиальная электрическая схема экспериментов представлена на рис. 3. Блок питания магнетрона (БПМ) формирует импульс длительностью до 20 мс путем разряда емкостного накопителя ($20 \mu\text{F}$), заряженного до 0.5–3 кВ, через балластный резистор $R1$. Внутри БПМ расположены датчики выходного напряжения и полного тока БПМ (на схеме не показаны). Линейка диодов $D1$ служит для защиты БПМ от перенапряжения при подаче импульса ускоряющего напряжения на катод; резистор $R2$ и катушка индуктивности $L2$ обеспечивают при этом развязку катода от „земли“ при подаче на него ускоряющего напряжения от генератора высоковольтных импульсов (ГВИ). Вследствие деления напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ (с учетом параллельного ему сопротивления $R3$) на катод подается примерно 2/3 зарядного напряжения БПМ.

Блок питания отражательного разряда (БПР) работает аналогично БПМ. Отличие заключается в величине накопительной емкости ($1 \mu\text{F}$), зарядное напряжение составляет 5 кВ, а сопротивление балластного резистора $R6$ составляет 30 Ω . Таким образом, длительность импульса БПР составляет около 100 μs , а амплитуда тока достигает 150 А.

Сигналы с датчиков тока и напряжения подавались на входы цифрового осциллографа Tektronix TDS 2024 с полосой пропускания 200 МГц.

Синхронизация всех импульсных блоков питания осуществлялась с помощью 6-канального генератора импульсов с оптоволоконной развязкой, созданного в ИСЭ СО РАН группой В.Н. Киселёва.

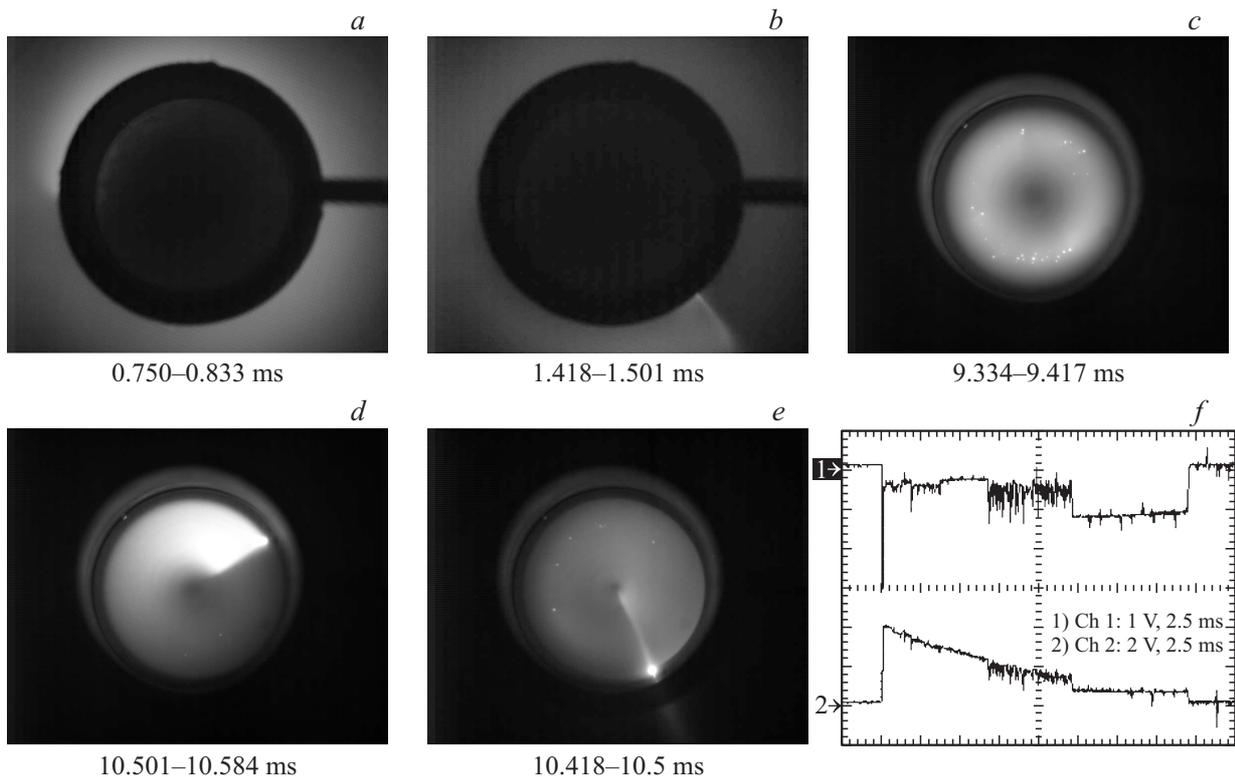


Рис. 5. Кадры видеосъемки (a)–(e) и соответствующие осциллограммы (f) напряжения горения разряда (Ch1, 400 V/div) и полного тока БПМ (Ch2, 2 A/div); горизонтальная шкала 2.5 ms/div. Давление аргона 0.067 Pa, зарядное напряжение БПМ 2 kV.

2. Результаты

2.1. Расчеты магнитного поля

Нами были проведены расчеты магнитного поля магнетрона с помощью программы COMSOL Multiphysics. При этом нас интересовали, прежде всего, компоненты магнитного поля, поперечные электрическому, т.е. радиальная компонента B_r в плоскостях, параллельных катодной подложке, и аксиальная компонента B_z в окружностях, параллельных боковой поверхности катодной обоймы. Результаты расчетов, некоторые из которых приведены на рис. 4, были в дальнейшем использованы в анализе результатов скоростной видеосъемки. Проверка расчетов была осуществлена с помощью измерителя магнитной индукции РШ1-10 и подтвердила их правильность.

На рис. 4, a представлено распределение B_r вдоль поверхности катода ($a = 0$) и на расстоянии 1 mm от катода ($a = 1$ mm). На рис. 4, b представлено распределение B_z на расстояниях b от боковой поверхности кольцевого магнита, равных 4 и 5 mm.

2.2. Видеосъемка свечения разряда

Нами проведен цикл исследований свечения импульсного МР в различных условиях для трех типов катода и четырех значений давления рабочего газа: 0.053, 0.067, 0.093 и 0.133 Pa. Кроме того, изучались случаи с

наложением импульсного продольного магнитного поля соленоида и включением ОР. В каждом режиме производилось 5 „выстрелов“ и соответственно регистрировалось 5 видеофайлов. Одновременно регистрировались осциллограммы напряжения горения МР и полного тока БПМ.

2.2.1. Плоский катод

На рис. 5 приведены результаты видеосъемки, полученные для случая плоского катода, служившего модельным объектом. Анализ полученных данных показал следующее.

1. Вначале появляется свечение вблизи боковой поверхности катодного узла и вообще в радиальном зазоре между ним и стенкой. Время до появления этого свечения составляет 0.4–0.7 ms при давлении аргона $p = 0.053$ Pa и уменьшается до 0.07–0.15 ms при давлении аргона $p = 0.067$ Pa и выше. Появление этого свечения совпадает с ростом тока и соответствующим спадом напряжения разряда до 100–250 V. Продолжительность этой стадии составляет обычно несколько ms, причем интенсивность свечения может и сильно падать, а могут и появляться яркие радиальные каналы (рис. 5, a и b).

2. Через 5.5–9.5 ms (в зависимости от давления аргона) появляется свечение на торцевой поверхности катода, т.е. там, где нам и нужно (рис. 5, c). Свечение имеет ожидаемую кольцевую структуру, характерную для традиционного планарного магнетрона. На фоне

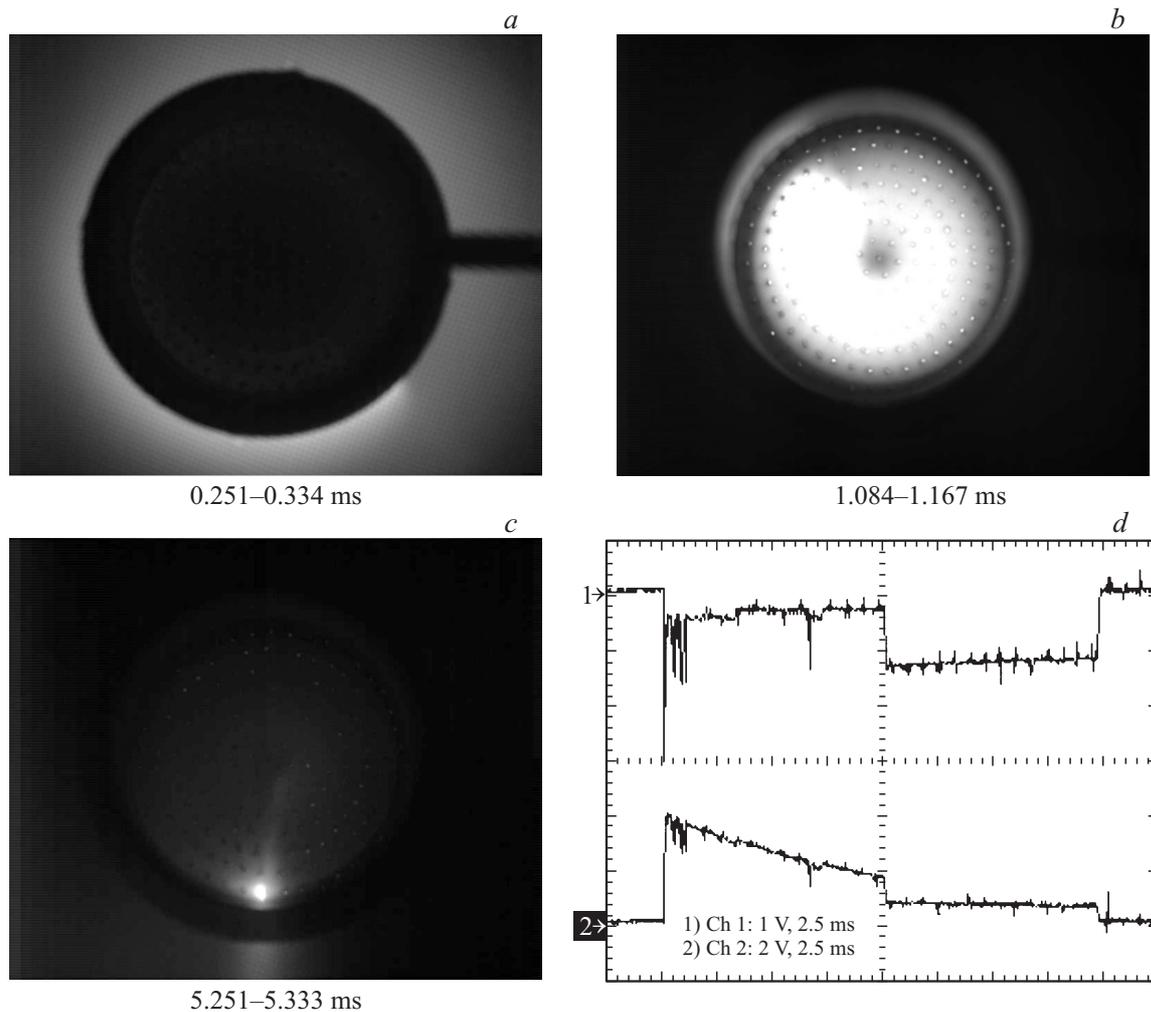


Рис. 6. Кадры видеосъемки (a)–(c) и соответствующие осциллограммы (d) напряжения горения разряда (Ch1, 400 V/div) и полного тока БПМ (Ch2, 2 A/div); горизонтальная шкала 2.5 ms/div. Давление аргона 0.067 Pa, зарядное напряжение БПМ 2 kV.

диффузного свечения наблюдаются яркие пятна. Видимо, это катодные пятна, а их сравнительно большое количество на снимке (до двух десятков) обусловлено большой длительностью единичного кадра (83.3 μ s), существенно превосходящей время жизни катодного пятна с током, близким к пороговому (около 1 A), которое составляет доли микросекунд. Таким образом, наблюдаемое свечение представляет интегрированную по длительности кадра картину, а число одновременно существующих катодных пятен составляет единицы.

Момент начала данного свечения достаточно стабилен от импульса к импульсу. Продолжительность этой стадии в среднем 1–1.5 ms. Затем свечение становится более неоднородным, ток падает, а напряжение горения возрастает до 500–600 V, характерных для тлеющего разряда.

2.2.2. Катод с шагом 5 мм между проволочными эмиттерами

Динамика свечения для данного катода близка к случаю плоского катода, однако время до появления

свечения на торцевой поверхности резко сократилось, примерно до 1 ms (рис. 6).

Появлению свечения на торцевой поверхности катода, как правило, предшествует кратковременный скачок напряжения до 500–600 V. Момент начала данного свечения достаточно стабилен от импульса к импульсу. Завершается процесс горения разряда на торцевой поверхности катода через 2–3 ms появлением одиночного яркого катодного пятна (рис. 6, c). Напряжение горения разряда при этом составляет около 100–120 V. Через 9.5–11 ms после начала импульса все гаснет.

2.2.3. Катод с шагом 3 мм между проволочными эмиттерами

Уменьшение расстояния между эмиттерами с 5 до 3 мм резко отрицательно сказывается на стабильности появления кольцевого свечения на плоскости катода. Поэтому данный случай мы детально рассматривать не будем; отметим только этот факт нестабильности.

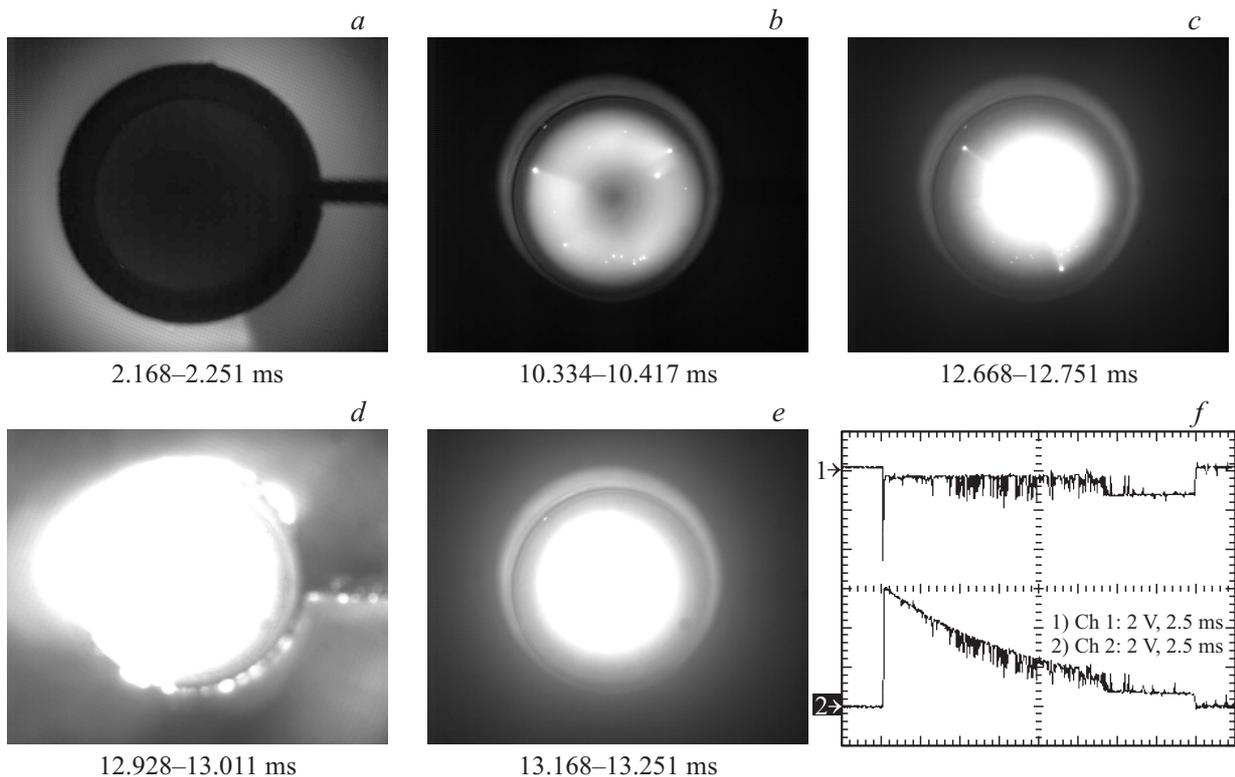


Рис. 7. Кадры видеосъемки (a)–(e) и соответствующие осциллограммы (f) напряжения горения разряда (Ch1, 400 V/div) и полного тока БПМ (Ch2, 2 A/div); горизонтальная шкала 2.5 ms/div. Давление аргона 0.067 Pa, зарядное напряжение БПМ 3 kV. Задержка запуска соленоида относительно запуска БПМ 12 ms. Задержка запуска БПР относительно запуска БПМ 13 ms.

2.2.4. Наложение ведущего магнитного поля и включение пеннинговского разряда

Наложение импульсного ведущего магнитного поля, создаваемого соленоидом 4 (рис. 1), существенно меняет наблюдаемую картину (рис. 7). Включение соленоида до появления свечения на плоскости катода приводит, как правило, к погасанию разряда, поскольку нарушаются условия замкнутого дрейфа электронов. Напротив, включение соленоида после появления свечения на плоскости катода приводит к развитию разряда в продольном направлении (рис. 7, c).

При зажигании ОР интенсивность свечения резко увеличивается (рис. 7, d), поскольку ток ОР значительно больше тока МР. После окончания импульса тока ОР свечение некоторое время (1–1.5 ms) остается достаточно ярким (рис. 7, e) и однородным.

2.3. Измерения коллекторного тока

На рис. 8 приведены характерные осциллограммы импульсов напряжения горения МР, полного тока БПМ и тока на коллектор. При переходе разряда в низковольтную стадию на коллекторе появляется небольшой ток (не более 0.5 A). При отсутствии магнитного поля этот ток сначала уменьшается, а затем (в данном случае через ≈ 7 ms с момента перехода разряда в низковольтную стадию, рис. 8, a) резко возрастает. При наложении

продольного магнитного поля ток на коллектор начинает нарастать буквально через 0.2 ms после начала тока в соленоиде, т.е. когда индукция продольного магнитного поля достигает примерно 5 mT, а до максимума ток на коллектор возрастает за 1–1.2 ms (рис. 8, b). Стадия с малым током, как на рис. 8, a, почти не видна, поскольку переход МР в низковольтную стадию в данном случае совпал с началом импульса тока в соленоиде.

Парадоксально, но уменьшение зарядного напряжения БПМ с 3 до 2 kV приводило к уменьшению длительности высоковольтной стадии МР.

3. Обсуждение результатов

Появление свечения у боковой поверхности катода (т.е. в радиальном зазоре) оказалось для нас некоторым сюрпризом. И хотя затем разряд зажигается и на торцевой поверхности катода, утечки в радиальном направлении являются дестабилизирующим фактором для последующего формирования НСЭП. Для понимания создавшейся ситуации и поиска путей подавления радиальных утечек тока сделаем некоторые простые оценки.

Необходимым условием зажигания разряда низкого давления в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{H}$ полях является набор электроном на высоте арки циклоиды кинетической энергии, достаточной для ионизации. Кроме того, вы-

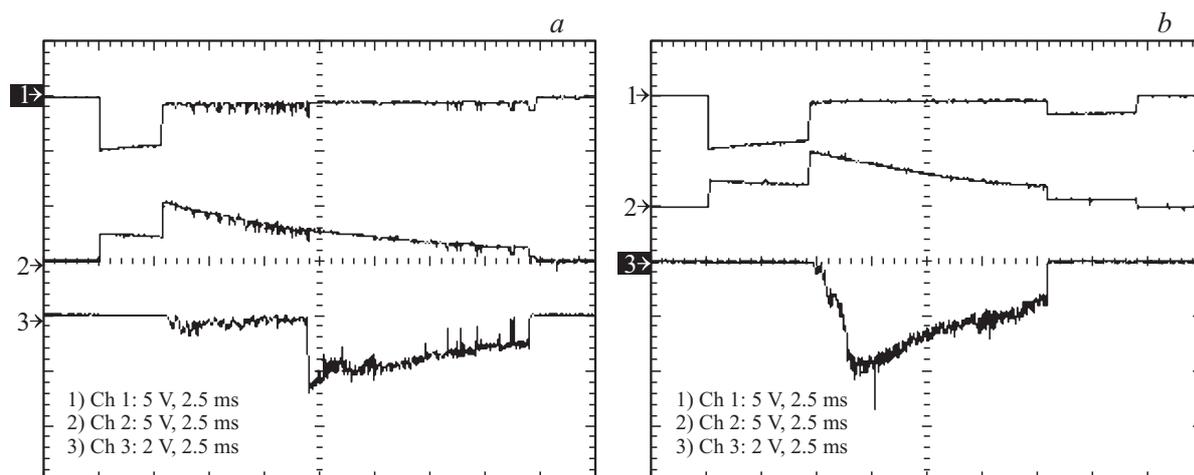


Рис. 8. Осциллограммы напряжения горения разряда (Ch1, 2000 V/div), полного тока БИМ (Ch2, 5 A/div) и тока на коллектор (Ch3, 2 A/div); горизонтальная шкала 2.5 ms/div. *a* — без запуска соленоида, *b* — задержка начала тока соленоида относительно запуска БИМ 5 ms. Расстояние между катодом и коллектором 20 см. Катод с проволочными эмиттерами с шагом между ними 5 мм. Давление аргона 0.067 Pa, зарядное напряжение БИМ 3 kV.

сота арки циклоиды $h = 2mE/eB^2$ [17] должна быть меньше межэлектродного зазора (m и e — масса и заряд электрона соответственно, E — напряженность электрического поля, B — индукция магнитного поля). Положим для определенности, что разность потенциалов на высоте арки циклоиды $U = E \times h = 30$ V. Тогда при характерных для нашего случая значениях $E \approx 3.4 \times 10^4$ V/m индукция магнитного поля не должна превышать $B_{cr} = (2m/eU)^{1/2} E \approx 0.021$ T. Высота арки циклоиды составит при этом $h \approx 0.9$ mm. Обратившись к результатам расчетов радиальной и аксиальной компонент магнитного поля (рис. 4), увидим, что площадь поверхности, где выполняется этот критерий, в несколько раз выше в радиальном зазоре, нежели в аксиальном. Другими словами, у боковой поверхности катода имеются более подходящие условия для зажигания разряда. Этим можно объяснить то, что МР начинается вблизи боковой поверхности катода.

Отметим, что в стандартной конструкции магнетрона радиальный зазор составляет обычно 1–2 mm, что намного меньше высоты арки циклоиды (радиальная компонента электрического поля при таком зазоре составляет уже около 10^6 V/m), и азимутальный дрейф в этой области становится невозможным, поскольку электроны уходят на заземленную стенку, которая является для МР анодом. В нашем случае, когда заземленная стенка не может находиться столь близко к катоду, подавление развития разряда в радиальном направлении можно осуществить с помощью магнитных или электростатических экранов под плавающим потенциалом, что предполагается реализовать в дальнейшем.

Принципиально важным является наблюдавшееся видеокамерой переключение МР в сторону коллектора при наложении магнитного поля соленоида. В результате такого переключения разряд переходит в иную форму: „прямой разряд“ в продольном магнитном поле (или без

него). Это переключение подтвердилось также путем регистрации тока амплитудой до 4 A на коллектор (рис. 8). Данное переключение открывает возможность формирования плазменного анода необходимой концентрации (около 3×10^{12} cm $^{-3}$) путем ионизации рабочего газа электронами, эмитируемыми плазмой МР. Скорее всего, ток МР целесообразно увеличить в десятки раз. Реализация подобного варианта формирования плазменного анода сулит преимущества перед традиционным способом на основе ОР, поскольку позволит избежать появления плазмы между катодом и стенкой пушки из-за паразитного магнетронного разряда между ней и анодом ОР, неизменно сопутствующего этому способу [18]. И, как следствие, появится возможность увеличения эффективности передачи энергии, запасенной в генераторе высоковольтных импульсов, в энергию пучка, которая сейчас не превышает, как правило, 30–35% [3,9,18].

Ухудшение стабильности перехода МР на торцевую поверхность катода при уменьшении межцентрового расстояния между эмиттерами с 5 до 3 mm обусловлено, на наш взгляд, ухудшением условий для азимутального дрейфа электронов, вынужденных „пробираться“ через более плотный частокатод эмиттеров.

Заключение

С помощью скоростной видеосъемки исследована динамика свечения импульсного магнетронного разряда в сильноточной электронной пушке, в которой во взрывоэмиссионный многоэмиттерный катод встроены планарный магнетрон. Установлено, что свечение вначале появляется в радиальном зазоре между боковой поверхностью катода и стенкой корпуса пушки, и лишь через несколько миллисекунд свечение появляется на торцевой (рабочей) поверхности взрывоэмиссионного

катода. Эксперименты показали возможность достаточно стабильного зажигания разряда при сравнительно низких давлениях аргона (0.067–0.093 Па), необходимых для работы электронной пушки.

Наложение продольного магнитного поля, необходимого для последующего зажигания отражательного разряда и транспортировки сильноточного электронного пучка, после появления плазмы у торцевой поверхности взрывоэмиссионного катода приводит к переключению разряда в продольном направлении — в сторону коллектора пучка. Данное переключение открывает возможность формирования плазменного анода исключительно с помощью магнетронного разряда, т.е. без использования отражательного разряда.

Конструкция взрывоэмиссионного катода (расстояние между эмиттерами, их высота и т.д.) должна обеспечивать эффективный для ионизации рабочего газа азимутальный дрейф электронов.

Дальнейшие исследования предполагается посвятить предотвращению образования плазмы у боковой поверхности катода. Это позволит, в конечном счете, повысить стабильность образования плазмы на рабочей (торцевой) поверхности катода и увеличить эффективность генерации пучка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-48-700239-р_сибирь-а) и РНФ (грант № 15-13-00023 от 18.05.2015).

Авторы признательны также проф. А.С. Матвееву (Томский политехнический университет) за предоставление видеокамеры и полезные советы по проведению скоростной видеосъемки.

Список литературы

- [1] *Proskurovsky D.I., Ivanov Yu.F., Rotshtein V.P. et al // J. Vacuum Sci. Technol. 1998. Vol. A16(4). P. 2480–2488.*
- [2] *Uno Y., Okada A., Uemura K. et al // Precision Engineering. 2005. Vol. 29. P. 449–455.*
- [3] *Ozur G.E., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Markov A.B. // Laser Particle Beams. 2003. Vol. 21. P. 157–174.*
- [4] *Dian Luo, Guangze Tang, Xinxin Ma, Le Gu, Liqin Wang, Tingbao Wu, Fang Ma. // Vacuum. 2017. Vol. 136. P. 121–128.*
- [5] *Лоусон Дж.Д. Физика пучков заряженных частиц. Пер. с англ. М.: Мир, 1980. 438 с.*
- [6] *Рухадзе А.А., Богданкевич Л.С., Росинский С.Е., Рухлин В.Г. Физика сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Атомиздат, 1980. 168 с.*
- [7] *Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 277 с.*
- [8] *Назаров Д.С., Озур Г.Е., Прокурковский Д.И. // ПТЭ. 1996. Вып. 4. С. 83–88.*
- [9] *Озур Г.Е., Прокурковский Д.И., Карлик К.В. // ПТЭ. 2005. Вып. 6. С. 58–65.*
- [10] *Озур Г.Е., Батраков А.В., Карлик К.В., Зюлькова Л.А. // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. Вып. 7/2. С. 37–41.*
- [11] *Кизириди П.П., Озур Г.Е. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 6. С. 132–136.*
- [12] *Meisner L.L., Markov A.B., Proskurovsky D.I., Rotshtein V.P., Ozur G.E., Meisner S.N., Yakovlev E.V., Poletika T.M., Girsova S.L., Semin V.O. // Surf. Coating. Technol. 2016. Vol. 302. P. 495–506.*
- [13] *Kiziridi P.P., Ozur G.E. // Proc. 19th Int. Symp. on High-Current Electronics, Tomsk, Russia, October 2–7, 2016 (to be published in a special issue of the journal „Vacuum“ in 2017).*
- [14] *Кузьмичёв А.И. Магнетронные распылительные системы. Книга 1: Введение в физику и технику магнетронного распыления. Киев: Аверс, 2008. 244 с.*
- [15] *Nikolaev A.G., Oks E.M., Vizir A.V., Yushkov G.Yu., Frolova V.P. // Rev. Sci. Instr. 2016. Vol. 87. N 2. 02A902.*
- [16] *Вересов Л.П., Вересов О.Л. // ЖТФ. 2016. Т. 86. Вып. 1. С. 61–69.*
- [17] *Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука: Гл. ред. физ. мат. лит., 1972. 224 с.*
- [18] *Ozur G.E., Popov S.A., Lazutkin M.N. // Proc. of the 13th Symposium on High Current Electronics. Tomsk, Russia, July 25–29, 2004. P. 60–63.*