ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2025, № 3, с. 49–56

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 537.5

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДПРОБОЙНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА КАТОДЕ ВАКУУМНОГО ПРОМЕЖУТКА

© 2025 г. Е. В. Нефедцев[a], *, С. А. Онищенко[a], П. П. Кизириди[a], Е. В. Яковлев[a], С. Г. Аникеев[b]

[a] *Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук Россия, 634055, Томск, просп. Академический, 2/3*

[b] *Национальный исследовательский Томский государственный университет Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36*

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

Поступила в редакцию 12.11.2024 г.
После доработки 26.12.2024 г.
Принята к публикации 13.01.2025 г.

Предложена и реализована на экспериментальном стенде методика стабилизации предпробойного состояния вакуумных промежутков, основанная на использовании анода, изготовленного из материала с высоким удельным сопротивлением. Выявлены следы предпробойных явлений на поверхности катодов, которые обычно приводят к вакуумной искре и самоуничтожению, и проведено их предварительное исследование. Данная методика позволит в дальнейшем расширить представления о природе вакуумного пробоя и электропластических явлений в критически сильных электрических полях напряженностью свыше 1 МВ/см. Предложено использование предпробойной электростатической тренировки поверхности металлов и полупроводников для изучения возможности получения эффективных холодных эмиттеров электронов.

DOI: 10.31857/S0032816225030084

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что электрическая прочность плоских вакуумных промежутков (ВП) на два порядка ниже величины $E_0 \sim 30$ МВ/см, соответствующей началу интенсивной автоэлектронной эмиссии с идеальной поверхности катода. Возникновению самостоятельного разряда в ВП предшествует появление сгустков плазмы на катоде – катодных факелов, функционирование и расширение которых поддерживается совокупностью микровзрывов и сопровождается взрывной электронной эмиссией [1]. Наличие перегретой микрозоны, приводящей к первой вакуумной искре, в настоящее время считается обусловленным существованием на поверхности электродов каких-либо геометрических или химических неоднородностей, концентрирующих электрическое поле: случайных микроострий, незакрепленных частиц, открытых пор, диэлектрических пленок, включений вторых фаз и др. [2, 3]. Однако значительные усилия, затрачиваемые на обеспечение чистоты и совершенства электродов с использованием современных методик, не дают такого эффекта в увеличении электрической прочности ВП, который ожидается на основе теоретических соображений.

В последнее время появляются гипотезы о том, что при напряженности электрического поля в ВП свыше 1 МВ/см поверхность электродов подвергается структурной перестройке [4–8], которая, в свою очередь, приводит к появлению концентраторов электрического поля и центров взрывной эмиссии. Практически неограниченная эмиссионная способность расширяющейся границы катодной плазмы и значительное количество энергии, запасенной в емкости ВП, приводят в дальнейшем к неизбежному росту тока и пробою ВП при любом сколь угодно большом балластном сопро-

тивлении, включенном последовательно в цепь ВП. При этом следы предпробойных явлений на поверхности электродов автоматически уничтожаются эрозией, вызванной вакуумным пробоем. Такие следы удавалось обнаруживать лишь в особых условиях, например на изначально зеркальных стенках резонаторов линейных ускорителей (после эксплуатации и разборки), где напряженности поля свыше 1 МВ/см создаются электромагнитной волной (т. е. без использования ответного электрода) [8].

Для проведения систематических исследований предпробойных явлений, протекающих на поверхности катода под воздействием постоянного электрического поля, необходимо подавление катодной искры, что может быть достигнуто, например, при использовании анода, изготовленного из высокоомного материала [9]. Можно ожидать, что растекание тока по объему и поверхности такого анода приведет к автоматическому снижению локальной разности потенциалов между точками входа и выхода формирующегося разрядного канала и подавлению сильноточного разряда. Реализация данной идеи требует особых конструкционных решений при создании экспериментальной установки, в которой минимизированы утечки заряда, конструктивные емкости и шумовые составляющие полезных сигналов.

Задачами работы являлось получение электрофизических характеристик ВП с высокоомным анодом в различных тестовых режимах электростатической тренировки, а также поиск и изучение следов предпробойных явлений на катоде, соответствующих этим режимам. В комплекс исследований были включены также регистрация импульсов тока и акустических волн, вызванных разрядами. Рассмотрена возможность использования электростатической тренировки поверхности металлов в практических целях.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД

Экспериментальный стенд был рассчитан на проведение электростатической тренировки поверхности катода миллиметровых или субмиллиметровых ВП при ограничении тока на уровне 100 нА. Он состоял из трех последовательно соединенных герметичных цилиндрических камер (рис. 1). Электрическая связь осуществлялась через проходные изоляторы из полиэтилена, капролона и керамики.

В нижней камере на диэлектрической стойке располагался источник постоянного напряжения *1*, изготовленный на основе двух последовательно соединенных 20-каскадных умножителей и преобразователя. Диапазон напряжения 7–24 В, подаваемого от внешнего стабилизированного источника питания *2* на преобразователь, соответствовал диапазону напряжения источника 25–60 кВ. Основной постоянной нагрузкой источника питания служил делитель напряжения *3*, собранный на основе шести последовательно соединенных резисторов типа КЭВ-5 сопротивлением 360 МОм каждый, которые располагались на остальных двух диэлектрических стойках. Нижнее плечо делителя сопротивлением 275 кОм обеспечивало коэффициент деления 1:10 000 (с учетом входного сопротивления осциллографа 1 МОм). В средней камере располагался балластный резистор *4* общей длиной 60 см. Для обеспечения равномерной электростатической нагрузки материалы

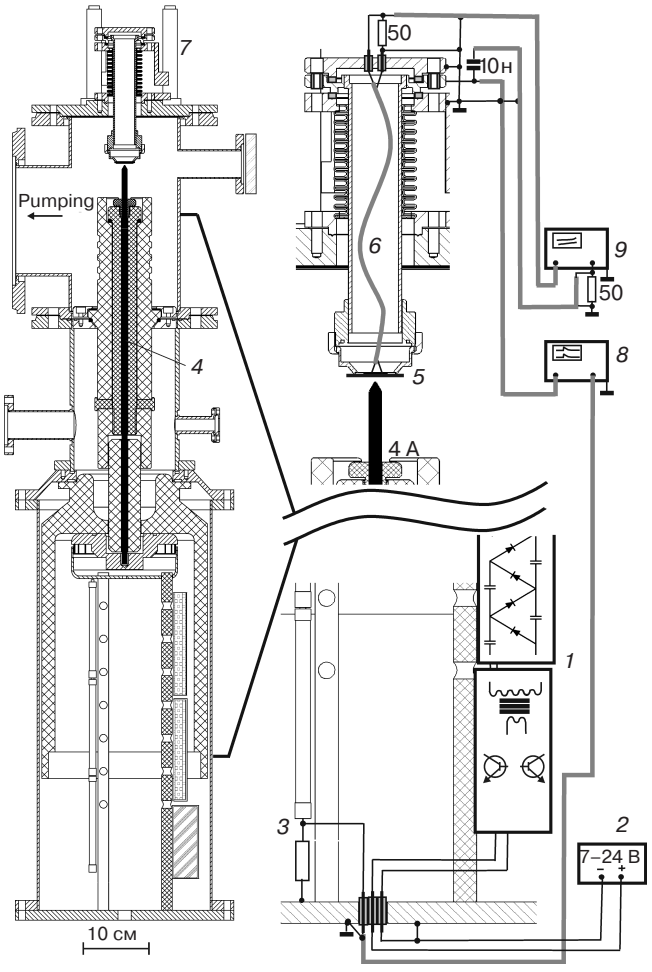

Рис. 1. Эскиз экспериментального стенда.

резистора и анода должны обладать близкими значениями удельного сопротивления. Было принято решение объединить функции резистора и анода в одном материале, используя для этой цели набор из пяти ферритовых стержней марки 100НН с удельным сопротивлением порядка 10^8 Ом · м, диаметром 8 мм, длиной 140 мм. Верхний стержень *4А* совмещал функции вакуумного уплотнителя (вместе с винтом и обжимным силиконовым кольцом), окончания балластного резистора (часть ниже уплотнения) и анода (часть выше уплотнения). Остальные стержни резистора располагались свободно в канале диаметром 10 мм составного изолятора, в который проникал элегаз из окружающего объема. Электрический контакт между стержнями осуществлялся через шарики из скомканной алюминиевой фольги. Уплотнение шариков осуществлялось в процессе обжима верхнего стержня силиконовым кольцом. Перед монтажом балластного резистора проводился отбор стержней по величине электрического сопротивления, которое в пределах одной партии поставки имело значительный разброс (около 50%). Точное значение суммарного сопротивления резистора 0.53 ТОм измерено непосредственно в ходе экспериментов (см. далее). Конец анода был отшлифован на конус с округленной вершинкой диаметром 1 мм, отполирован и промыт в изопропаноле в ультразвуковой ванне. Нижняя и средняя камеры после предварительной откачки заполнялись элегазом при 1 атм для подавления коронных и поверхностных разрядов.

Верхняя, экспериментальная, вакуумная камера откачивалась турбомолекулярным насосом до уровня остаточного давления не более $8 \cdot 10^{-4}$ Па. Для вертикального перемещения трубчатого штока *6* с закрепленным на нем образцом (катодом) *5* использовалось его соединение с крышкой вакуумной камеры через сильфон, растягиваемый тремя микрометрическими винтами *7*, расположенными под углами 120° друг к другу. Такая конструкция позволяла регулировать межэлектродное расстояние с точностью до 5 мкм, а также создавать небольшие угловые отклонения стержня относительно вертикали для малых горизонтальных перемещений поверхности катода относительно анода. Межэлектродное расстояние контролировалось также при помощи длиннофокусного микроскопа через окно вакуумной камеры.

Измерение напряжения и тока в цепи ВП осуществлялось осциллографом TDS-2014B *8* в режиме медленных разверток 10–50 с/дел. На первый канал осциллографа подавалось напряжение с делителя 1:10 000. Вход второго канала подключался в разрыв катодной цепи между изолированным фланцем с образцом и корпусом камеры (входное сопротивление осциллографа 1 МОм служило измерительным сопротивлением). При плотном смыкании электродов и ступенчатой подаче напряжения 50 кВ (рис. 2) получены следующие данные:

1) уточнено значение сопротивления балластного резистора – 0.53 ТОм;

2) оценена инерционность отклика сигнала тока – порядка 10 с, связанная с зарядкой кабеля осциллографа и поляризационными явлениями в изоляторах и самом резисторе;

3) исследованы характерные фоновые шумы сигнала тока и устойчивость резистора к пробою. При длительных выдержках под напряжением 50–60 кВ не было зафиксировано ни одного значительного скачка тока, который бы мог свидетельствовать о пробое резистора по объему или по поверхности.

При наличии зазора между электродами иногда возникали разряды. Импульсы разрядов регистрировались в ждущем режиме отдельным осциллографом ADS-2121MV *9* (рис. 1). Постоянная составляющая тока отфильтровывалась конденсатором емкостью 0.01 мкФ, включенным последовательно к внутреннему проводнику коаксиального кабеля. Для исследования акустического отклика разряда на второй канал осциллографа подавался сигнал, снимаемый с пьезоэлемента, закрепленного на образце.

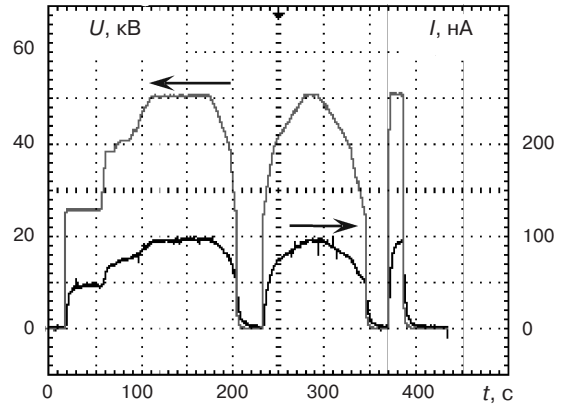

Рис. 2. Характеристики балластного резистора-анода при ступенчатом изменении напряжения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ

Обнаружение мелких и малоконтрастных следов предпробойных явлений после электростатической тренировки ВП оказалось возможным лишь при использовании катодов с зеркально гладкими поверхностями. В качестве тестовых в настоящей работе выбраны два существенно различающихся по свойствам материала: медь (мягкий и пластичный металл) и кремний, легированный сурьмой (твердый и хрупкий полупроводник n-типа) с удельным сопротивлением порядка 10^{-4} Ом · м (ЭКЭС-0,01-БК). Оба материала имели монокристаллическую структуру с ориентацией рабочей поверхности (111).

Пластинки меди имели размер $10 \times 10 \times 3$ мм^3. Перед испытанием проводилась механическая, а затем электролитическая полировка рабочей поверхности на глубину не менее 50 мкм в ортофосфорной кислоте, насыщенной ионами меди, под напряжением 0.9 В. В ходе испытаний пластинки фиксировали в специальной струбцине.

Пластинки кремния размером приблизительно 30×30 мм^2 выкалывались из пластины толщиной 0.8 мм диаметром 100 мм с исходно полированной в заводских условиях поверхностью. Образцы погружались на 20 с в 0.5-процентный водный раствор плавиковой кислоты для снятия поверхностного окисла, после чего на тыльной (не полированной) стороне пластины формировался омический контакт последовательным нанесением In–Ga-эвтектики и слоя клея “Контактол” с серебряным наполнителем. При проведении электроакустических исследований на центральную часть пластинки с тыльной стороны (с уже готовым, тщательно просушенным контактом) дополнительно наклеивался пьезоэлемент. Толщина клея (использовался клей “Момент”) обеспечивала надежную электрическую изоляцию пьезоэлемента. Готовый образец тыльной стороной приклеивался “Контактолом” на оправку, изготовленную из стали 12Х18Н10Т, по круговому периметру диаметром 26 мм (рис. 1). Сигнал от пьезоэлемента передавался по коаксиальному кабелю марки РК50-0.6-21, размещенному в трубчатом штоке манипулятора.

Перед испытаниями с помощью оптического микроскопа проводилось картографирование той части поверхности образцов, напротив которой предполагалось расположить анод. После испытаний выявлялись особенности тренированной электрическим полем поверхности по отношению к исходной. Повторное картографирование позволяло также фиксировать координаты новых локальных образований для их дальнейшего исследования в растровом электронном микроскопе.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Статические характеристики

Начальные условия эксперимента соответствовали минимальному напряжению источника $U = 25$ кВ и расстоянию между электродами $d = 1000$ мкм. При сокращении d или увеличении U наблюдалась ступень “включения” проводимости ВП, после чего возникал флуктуирующий ток I порядка единиц наноампер. Флуктуации превышали шумовые флуктуации, регистрируемые при плотном смыкании анода с катодом, что свидетельствовало о том, что они связаны с физическими процессами, протекающими на поверхности электродов ВП. Дальнейшим сокращением d или увеличением U можно было регулировать ток в пределах величины тока короткого замыкания порядка 100 нА. Приблизительно однозначные характеристики $I(U)$ или $I(d)$ можно было получить в ходе многократного циклирования по U или d в ограниченных пределах. Выход за пределы цикла в сторону уменьшения d или увеличения U приводил к необратимому смещению характеристик в сторону более высоких значений тока. Иными словами, характеристики $I(U)$ или $I(d)$ зависели от того значения максимального тока, который достигался (хотя бы единожды) в ВП. После цикла тренировок ВП в электрическом поле и выдержки электродов в камере, заполненной воздухом, электрофизические характеристики ВП соответствовали финишным, зарегистрированным перед паузой. Таким образом, состояние проводимости ВП при данных условиях тренировки в меньшей степени связано с процессами физической адсорбции или десорбции газов на поверхности катода, а в большей степени с необратимыми процессами в приповерхностном материале катода.

Отличия характеристик ВП с полупроводниковым и металлическим катодами в основном связаны с характерными временами релаксационных переходов от одного значения тока к другому при изменении d и U: порядка 10 с для ВП с медным катодом и порядка 100 с для ВП с полупроводниковым катодом (рис. 3).

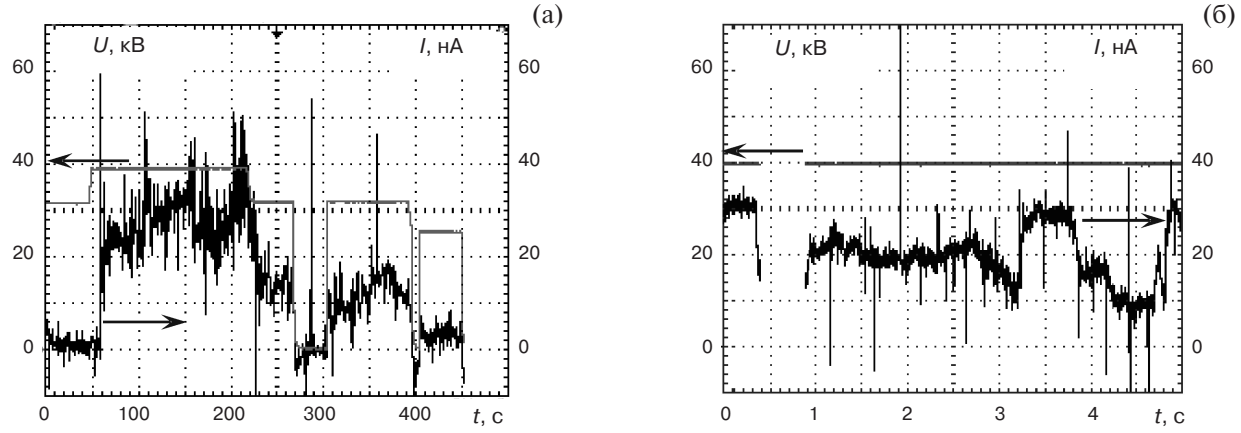

Рис. 3. Характер флуктуаций и релаксаций сигнала тока при ступенчатых изменениях напряжения: **а** – развертка 50 с/дел; **б** – развертка 0.5 с/дел. Катод – легированный кремний. Зазор между электродами 500 мкм.

4.2. Разряды

В ходе измерений характеристик $I(t)$ и $U(t)$ в цепи ВП обнаружены скачки тока амплитудой примерно 0.1–0.3 А длительностью около 100 нс (разряды). Количество разрядов в полном цикле измерений, как правило, не превышало десяти. Часто после серии, состоящей из 2–3 разрядов, они прекращались и могли повториться вновь при дальнейшем увеличении напряженности поля. Разряды, как правило, не влияли на ход и зашумленность характеристики $I(t)$. Лишь в редких случаях непосредственно после разряда наблюдалось ступенчатое увеличение или уменьшение величины тока. Для исследования формы волны тока, протекающего во время разряда, в общую схему была введена измерительная цепь с отдельным осциллографом, работающим в ждущем режиме на короткой развертке (рис. 1). Импульс разряда уширялся с увеличением межэлектродного расстояния. В случае полупроводникового катода при $d > 200$ мкм импульс принимал сложную форму с наложением нескольких максимумов. Использование образцов с закрепленными на них пьезоэлементами показало корреляционную связь между осциллограммой тока разряда и осциллограммой звуковой волны (рис. 4). Следует отметить, что амплитуда тока разрядов по порядку величины соответствовала нижнему пределу тока взрывной электронной эмиссии, установленной экспериментально [1].

4.3. Поверхность катода

После электростатической тренировки медных и кремниевых катодов (независимо от возникновения или отсутствия разрядов в ходе тренировки) на той части их поверхности, которая находилась напротив анода, обнаружены малоконтрастные пятна. На рис. 5а, 5б представлено изображение пятен после использования допол-

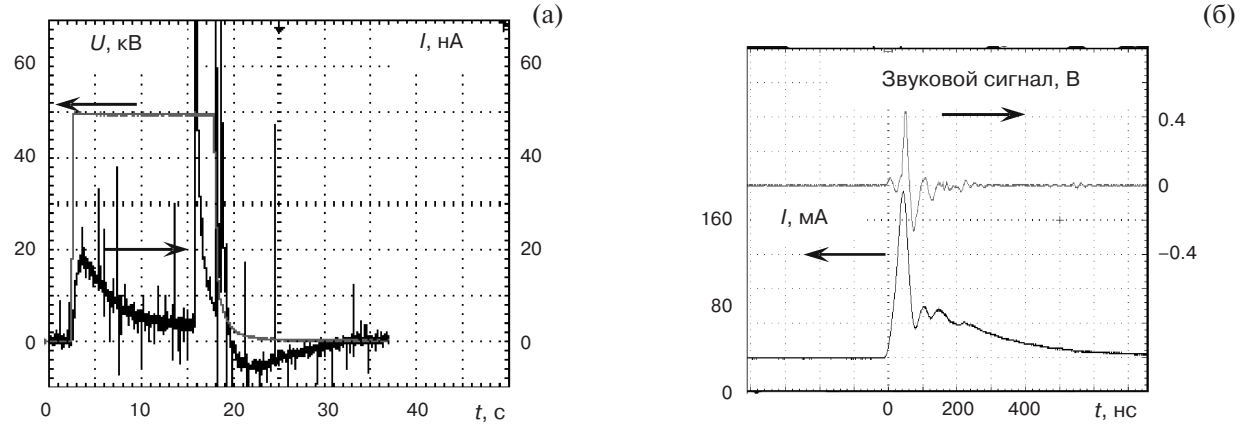

Рис. 4. Скачки тока во время разрядов: **а** – осциллограмма с длительной разверткой, совмещенная с осциллограммой напряжения; **б** – осциллограмма с быстрой разверткой, совмещенная с осциллограммой звукового сигнала. Зазор между электродами 350 мкм.

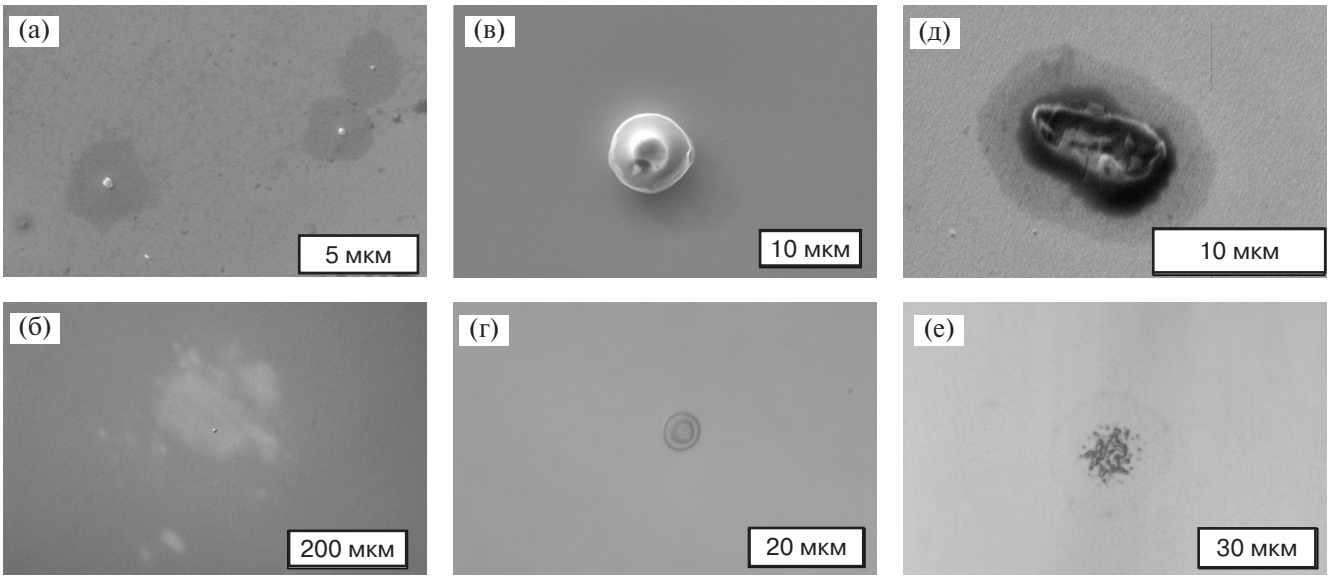

Рис. 5. Образования, появившиеся после электростатической тренировки поверхности медных (**а, в, д**) и кремниевых (**б, г, е**) катодов: **а, б** – пятна; **в, г** – предразрядные локальные образования; **д, е** – образования, возникшие после разрядов.

нительного цифрового контрастирования. В центральных областях некоторых пятен выявлены локальные образования с гладким рельефом и ровной окантовкой (рис. 5в, г). После электростатических тренировок, сопровождаемых разрядами, обнаружены образования с развитым рельефом и неровной окантовкой (рис. 5д, е), причем их количество соответствовало количеству разрядов. Следует заметить, что на микрофотографиях поверхности катода, сделанных до электрической тренировки, участки, соответствующие всем перечисленным образованиям, выглядели ровными и оптически однородными.

Энергодисперсионный микроанализ не выявил содержания каких-либо сторонних элементов в составе пятен и локальных образований, возникших на поверхности кремниевых катодов {100 ат. % Si}. Для медных же катодов получены противоречивые результаты. Элементный состав новых образований находился в диапазоне от {100 ат. % Cu} до {70 ат. % Cu + 30 ат. % C}. Выяснение причин появления углерода на поверхности меди после выдержки в электрическом поле требует отдельных исследований.

5. ОБСУЖДЕНИЕ ТЕСТОВЫХ ИСПЫТАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Апробация функционирования экспериментального стенда и связанной с ним методики исследования характеристик ВП показала возможность получения новых фундаментальных знаний о механических и электрофизических свойствах поверхности твердых проводящих сред, погруженных в сильное электрическое поле. Результаты работы прежде всего указывают на то, что теоретический предел электрической прочности вакуумного промежутка E_0, отвечающий ровной поверхности электродов, недостижим хотя бы в силу того, что уже при напряженности электрического поля порядка $E_0/10$ возникают изменения свойств приповерхностного слоя, которые, в свою очередь, приводят к локальным геометрическим нарушениям поверхности. На основе лишь электрических измерений и микроскопических исследований, представленных в нашей работе, сложно дать заключение о том, происходят ли такие изменения в твердой фазе (согласно, например, гипотетическим механизмам [6, 7]), или в результате появлении фрагментов жидкой пленки (согласно, например, гипотезе и оценкам авторов [8]).

С учетом возможности стабилизации и контролирования предпробойных условий в ВП представленная в настоящей работе методика может быть дополнена лазерно-оптической диагностикой состояния катодной поверхности *in situ*. Для применения методов структурного анализа поверхности катода в дальнейшем целесообразна электростатическая тренировка широких областей электрода с использованием плоского анода.

Представленную методику удержания контролируемого предпробойного состояния ВП с высокоомным анодом предполагается распространить в область практических технологий. Следует заметить, что, в отличие от технологии вакуумной электронно-пучковой обработки, где мишенью является анод, на котором выделяется основная тепловая мощность, в данном случае предполагается модификация поверхности материала образца-катода электрическим полем, где плотность тока является количественным показателем уровня такой модификации. При этом, как следует из представленных результатов, металл или полупроводник с модифицированной поверхностью автоматически приобретает и сохраняет свойства эффективного холодного эмиттера электронов, что может быть использовано на практике, в том числе в упоминаемой выше технологии вакуумной электронно-пучковой обработки. Исходя из простых оценок, при использовании достаточно мощного источника питания и балластного резистора – анода с удельным сопротивлением порядка 10^4 Ом · м эмиссионный ток можно контролируемо поднимать вплоть до 1 мА. Ферриты различных марок как термически стойкие и механически прочные материалы с широким спектром высоких значений удельного сопротивления могут оказаться наиболее подходящими материалами для изготовления анодов при реализации такого рода поверхностной формовки эмиттеров.

6. ВЫВОДЫ

1. Изготовлен экспериментальный стенд, позволяющий исследовать воздействие сильного электрического поля на металлические и полупроводниковые материалы через вакуумный промежуток без риска значительного разрушения поверхности пробоем.

2. На основе представленной экспериментальной методики получены предварительные данные, свидетельствующие о том, что в электрическом поле напряженностью свыше 1 МВ/см на поверхности монокристаллических катодов вакуумного промежутка возникают плоские структурно-модифицированные участки и объемные микроскопические объекты, не несущие признаков взрывообразных процессов. Механизмы образования этих объектов и их последующей трансформации во взрывоэмиссионные центры будут освещены в отдельных публикациях на основе дополнительных исследований.

3. Экспериментальные работы, основанные на изложенной методике, могут представлять интерес для специалистов, работающих в различных областях физики, в частности занимающихся проблемами инициирования и подавления вакуумного пробоя (электрофизика), изучением природы электропластических явлений при критически высоких напряженностях электрического поля (физика твердого тела), а также поиском новых методов модификации поверхности материалов, в том числе с целью получения эффективных холодных электронных эмиттеров большой площади (эмиссионная электроника).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Д.И. Проскуровскому и А.В. Батракову за обсуждение результатов работы. Исследования поверхности экспериментальных образцов выполнены на оборудовании Томского регионального центра коллективного пользования Национального исследовательского Томского государственного университета.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-29-00481).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Месяц Г.А., Проскуровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984.
2. *Латам Р.* Вакуумная изоляция установок высокого напряжения. Москва: Энергоатомиздат, 1985.
3. *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
4. *Nordlund K., Djurabekova F.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2012. V. 15. P. 071002. https://doi.org/10.1103/PhysRevSTAB.15.071002
5. *Engelberg E.Z., Ashkenazy Y., Assaf M.* // Phys. Rev. Lett. 2018. V. 120. P. 124801. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.124801

6. *Engelberg E.Z., Yashar A.B., Ashkenazy Y., Assaf M. Popov I.* // Phys. Rev. Accel. Beams. 2019. V. 22. № 6. P. 083501. https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.083501
7. *Djurabekova F., Kimari Y., Saressalo A.* // Proc. 30th ISDEIV, Okinawa, Japan, 2023. P. 5. https://doi.org/10.23919/ISDEIV55268.2023.10200159
8. *Antoine C.Z., Peauger F., Le Pimpec F.* // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2011. V. 665. P. 54. https://doi.org/10.1016/j.nima.2011.11.032
9. *Nefedtsev E.V., Onischenko S.A.* // Proc. 29th ISDEIV. Padova, Italy, 2021. P. 23. https://doi.org/10.1109/ISDEIV46977.2021.9586987