

**INVESTIGATION OF COPPER CATHODE SURFACE CONDITIONING
BY SUBNANOSECOND VACUUM DISCHARGES**

*Yuriy Alexandrovich Zemskov ^a, Yuriy Igorevich Mamontov, Igor Vladimirovich Uimanov,
Sergey Vladimirovich Barakhvostov, Alexandr Ivanovich Lipchak*

Institute of Electrophysics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Amundsen str. 106, Yekaterinburg, 620016, Russia

^a zemskov@iep.uran.ru

ABSTRACT

A copper cathode with an effective surface area less than 0.01 mm² was subjected to several vacuum arc discharges of submicrosecond duration, which led to significant erosion of the surface and a change in its microrelief. This cathode was then connected to a RADAN pulse generator with a pulse duration of less than 1 ns. Several hundred vacuum discharges were performed on this setup. Before and after the treatment with subnanosecond pulses, the emission characteristics of the sample and the state of its surface were studied. Emission characteristics were studied on a field-emission projector with an automated measuring complex to obtain current-voltage characteristics of the field-emission. The results of these measurements made it possible to estimate the electric field enhancement factor on the sample. The microrelief of the sample surface was studied by scanning electron microscopy. A significant decrease in the field enhancement factor and a decrease in the characteristic dimensions of the surface microrelief elements were shown.

KEYWORDS

Vacuum discharges; electrode erosion; surface conditioning; emission properties.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МЕДНОГО
КАТОДА СУБНАНОСЕКУНДНЫМИ ВАКУУМНЫМИ РАЗРЯДАМИ**

*Юрий Александрович Земсков ^a, Юрий Игоревич Мамонтов, Игорь Владимирович Уйманов,
Сергей Владимирович Барахвостов, Александр Иванович Липчак*

Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

^a zemskov@iep.uran.ru

АННОТАЦИЯ

Медный катод с эффективной площадью поверхности менее 0,01 мм² был подвергнут нескольким разрядам вакуумной дуги субмикросекундной длительности, что привело к значительной эрозии поверхности и изменению ее микро рельефа. Затем этот катод был подклю-

чен к импульсному генератору РАДАН с длительностью импульса менее 1 нс. На этой установке было выполнено несколько сотен вакуумных разрядов. До и после обработки субнаносекундными импульсами проводились оценки эмиссионных характеристик образца и состояния его поверхности. Эмиссионные характеристики исследовались на автоэлектронном проекторе с автоматизированным измерительным комплексом для получения вольт-амперных характеристик автоэлектронной эмиссии. Результаты этих измерений позволяли оценивать коэффициент усиления электрического поля на образце. Микрорельеф поверхности образца исследовался методом сканирующей электронной микроскопии. Было показано значительное снижение коэффициента усиления поля и уменьшение характерных размеров элементов микрорельефа поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Вакуумные разряды; эрозия электродов; кондиционирование поверхности; эмиссионные характеристики.

Введение

Кондиционирование электродов серийей последовательных пробоев является одним из самых распространенных методов увеличения электрической прочности вакуумных промежутков. Он заключается в удалении с поверхности электродов областей с высокой автоэмиссионной способностью (микроострий, микротрещин, неметаллических включений, пылевых частиц, пор, органических остатков и т.д.) путем многократного воздействия пробоев на электроды и замещения данных областей продуктами микровзрывных процессов. В результате удаления загрязнений и сглаживания рельефа происходит уменьшение локального коэффициента усиления электрического поля β на поверхности электрода, что ведет к уменьшению предпробойного электронного тока эмиссии. Было установлено, что именно величина предпробойного тока эмиссии является важным индикатором изменения напряжения пробоя. Например, в работах [1, 2] было показано, что в ходе кондиционирования последовательными пробоями коэффициент β снижался, причем изначально полированные электродные поверхности соответствовали максимальным значениям коэффициента β . Данный факт был объяснен в работах [3–5], где отмечалось, что даже тщательная очистка поверхности не спасает от появления на

ней редко расположенных острых выступов высотой 1–2 мкм. На вершинах данных выступов величина β может достигать 100 и более. Кроме того, в более поздних работах [6, 7] было показано, что такие выступы могли внезапно возникать на электродах любых полярностей под воздействием электрического поля напряженностью свыше 30–50 МВ/м. На сегодняшний день очевидно, что такие выступы имеют взрывоэмиссионное происхождение.

Интерес к разработке эффективных методов кондиционирования резко возрос в последнее время с развитием ускорительной техники и вакуумной микроэлектроники. Так, например, в ЦЕРНе обрабатывают импульсными пробоями прототип медной ускорительной структуры линейного электрон-позитронного коллайдера (CLIC) [8, 9]. В процессе кондиционирования применяются радиоволны с частотой 11,994 ГГц и длительностью импульса 50–200 нс. Такие импульсы способны создавать вблизи структуры электрическое поле с напряженностью 100 МВ/см. При этом достигается величина коэффициента β в пределах 30–60, пробои весьма редки (один пробой за десятки – сотни тысяч импульсов), а весь процесс кондиционирования может занимать месяцы.

В ходе такой обработки в результате пробоя может произойти изменение морфологии поверхности в результате расплескивания

и застывания жидкого металла в процессе функционирования катодного пятна, что может приводить к резкому росту β поля и последующим пробоям [10, 11]. Данный эффект имеет место и при кондиционировании постоянными импульсами напряжения микросекундной длительности путем постепенного повышения и снижения (после пробоя) напряжения [8].

Одним из способов предотвращения данного эффекта является использование импульсов напряжения более короткой длительности. Так, в работе [12] показано, что использование коротких длительностей высоковольтных импульсов менее 2 нс не приводят к вытеснению жидкого металла и образованию микронеоднородностей, способных быть новыми эмиссионными центрами. Эффективность использования коротких длительностей импульсов напряжения для кондиционирования электродов была также продемонстрирована в работах [13, 14]. В этих работах электрическую прочность удалось существенно повысить путем использования импульсов напряжения длительностью менее 5 нс.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию кондиционирования изначально эродированных металлических поверхностей высоковольтными

импульсами субнаносекундной длительности. При этом эффективность кондиционирования оценивается как с помощью измерения коэффициента β путем снятия автоэмиссионных вольт-амперных характеристик (ВАХ) исследуемой поверхности, так и с помощью непосредственного контроля за состоянием поверхности с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

1. Экспериментальные установки

1.1. Подготовка образцов

В данной работе для исследования кондиционирования использовались образцы, изготовленные из медной проволоки технической чистоты с начальным диаметром порядка 200 мкм. Заготовки подвергались электрохимическому травлению, в результате которого получались полированные медные иглы с диаметром около 40–70 мкм. Затем кончик иглы переплавлялся в вакууме для придания ему формы шара с гладкой поверхностью и с характерным диаметром ~50–120 мкм. На рис. 1 представлена типичная микрофотография поверхности одного из изготовленных образцов, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа. Видно, что характерный масштаб шероховатости поверхности законцовки оказался существенно меньше 1 мкм.

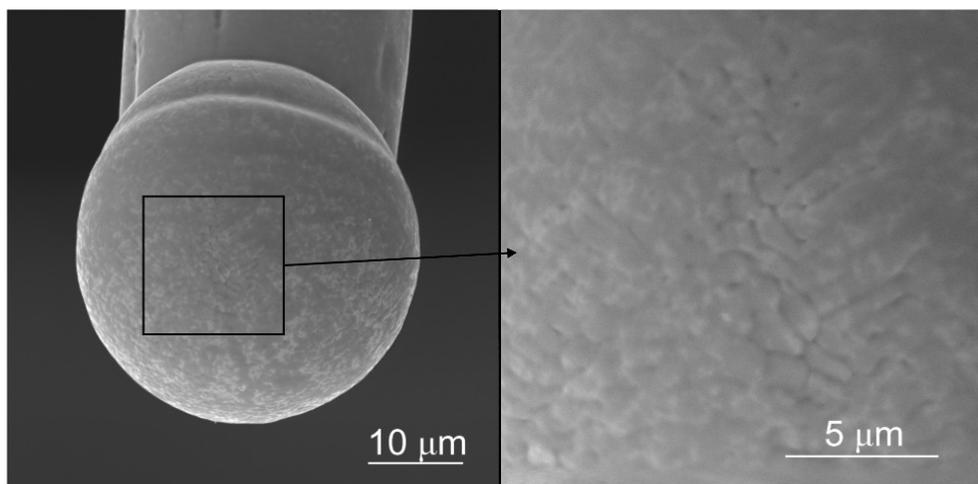


Рис. 1. Типичное СЭМ-изображение поверхности образца до эродирования

Fig. 1. Typical SEM-image of a sample before the erosion treatment

Приведенные СЭМ-изображения, как и все последующие СЭМ-изображения в статье, были получены с помощью микроскопа TESCAN MIRA в ЦКП «Геоаналитик» ИГГ УрО РАН.

Начальный эрозионный рельеф на поверхности образцов создавался путем инициирования на них вакуумного дугового разряда субмикросекундной длительности с током в десятки ампер. Генератор импульсов представлял собой емкостной накопитель энергии емкостью 500 пФ. Он заряжался до напряжения ~ 20 кВ. Ток разряда ограничивался резистором в цепи анода, а измерялся с помощью низкоиндуктивного резистивного токового шунта с сопротивлением 2,4 Ом. Типичная осциллограмма тока эродирующего вакуумно-дугового разряда представлена на рис. 2.

В процессе эродирования образцы подвергались воздействию нескольких десятков эродирующих импульсов. В результате на поверхности шаровидных законцовок формировался микрорельеф, образованный в процессе функционирования катодных пятен вакуумной дуги. Характерный вид

рельефа после эродирования исследовался с помощью сканирующей электронной микроскопии. Кроме СЭМ-диагностики, для контроля состояния поверхности образцов также применялся метод измерения коэффициента усиления поля β по характерным автоэмиссионным вольт-амперным характеристикам данного образца. Методика снятия ВАХ была аналогична описанной в наших более ранних работах [15–17] и основана на использовании автоэмиссионного проектора с люминофорным экраном и автоматической системе записи сигналов с датчиков тока и напряжения. Эродирование и измерение эмиссионных характеристик образцов проводились в условиях высокого вакуума при 10^{-8} торр. Для оценки величины электрического поля вблизи поверхности образцов в приближении гладких катодов применялось численное решение уравнения Лапласа с учетом реальной геометрии исследуемых образцов. При этом считалось, что результирующее поле E представляет собой произведение поля вокруг гладкого катода E_{Lapl} на величину коэффициента усиления поля β .

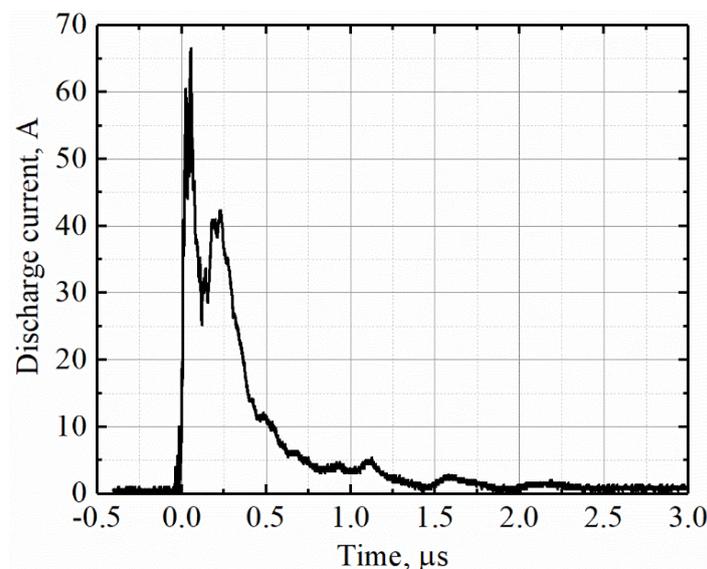


Рис. 2. Типичная осциллограмма тока вакуумного дугового разряда, который использовался для эродирования образцов

Fig. 2. Typical current waveform during the vacuum arc erosion treatment of samples

1.2. Установка для субнаносекундного кондиционирования

На рис. 3 приведена схема установки, которая использовалась в экспериментах по субнаносекундному кондиционированию. Установка была реализована на базе малогабаритного высоковольтного генератора «РАДАН 300» [18]. Данный генератор формирует импульс напряжения амплитудой до 200 кВ с длительностью до 4 нс на полувысоте. Волновое сопротивление всех применявшихся линий, соединений и средств измерения было 50 Ом. Для укорочения длительности импульсов напряжения генератора использовалась коаксиальная маслonaполненная линия с регулируемыми обостряющим и срезающим разрядными промежутками. Данное устройство позволяет уменьшать длительность выходного высоковольтного импульса до 300 пс на полувысоте с потерей амплитуды напряжения [19]. Передача субнаносекундного отрицательного импульса на кондиционируемый образец (катод промежутка), установленный в вакуумной камере (остаточное давление до 10^{-3} торр.), осуществлялась с помощью согласованной передающей линии L2. Напряжение в начале линии

L2 измерялось с помощью калиброванного емкостного делителя напряжения. Анодом кондиционируемого промежутка являлся некалиброванный токовый датчик, представляющий собой цилиндр Фарадея с диаметром входного отверстия 3 мм, закрытый медными фольгами. Сигнал импульса части электронного взрывоэмиссионного тока, попадающего в апертуру токосъемника, после прохождения через две медные фольги общей толщиной 36 мкм регистрировался осциллографом. Для измерения параметров импульсов использовались осциллографы Tektronix DPO70404C с полосой пропускания 4 ГГц и Tektronix TDS684B с полосой пропускания 1 ГГц. Сигнальные тракты и аттенюаторы имели полосы пропускания не хуже 18 ГГц. На рис. 4 представлены типичные осциллограммы напряжения на входе согласующей линии L2 и тока на выходе цилиндра Фарадея. При данных параметрах системы генерации и межэлектродном расстоянии ~ 1 см амплитуда высоковольтного импульса составляла 140 кВ при длительности на полувысоте ~ 500 пс. При этом длительность сигнала взрывоэмиссионного тока разряда составляла ~ 250 пс.

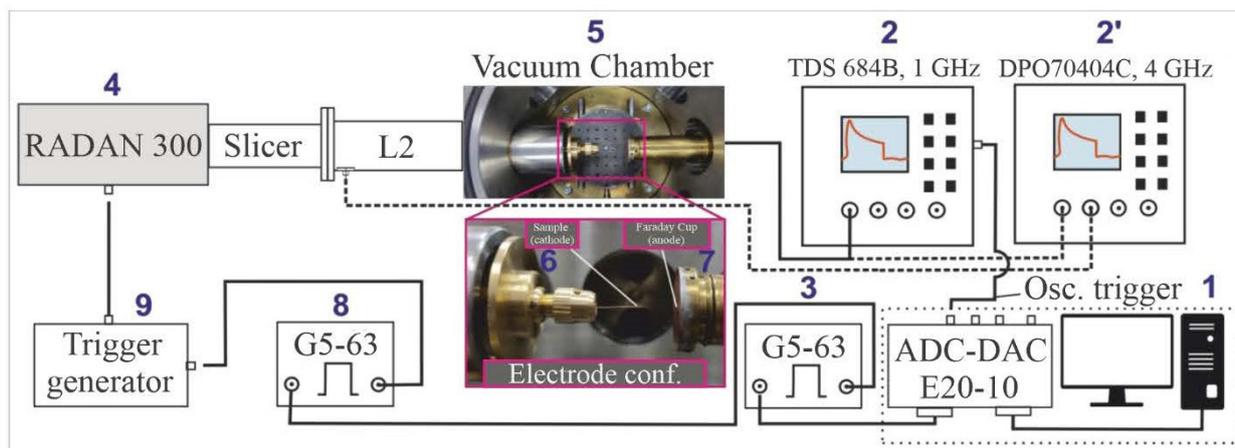


Рис. 3. Схема установки по субнаносекундному кондиционированию

Fig. 3. Scheme of the subnanosecond conditioning setup

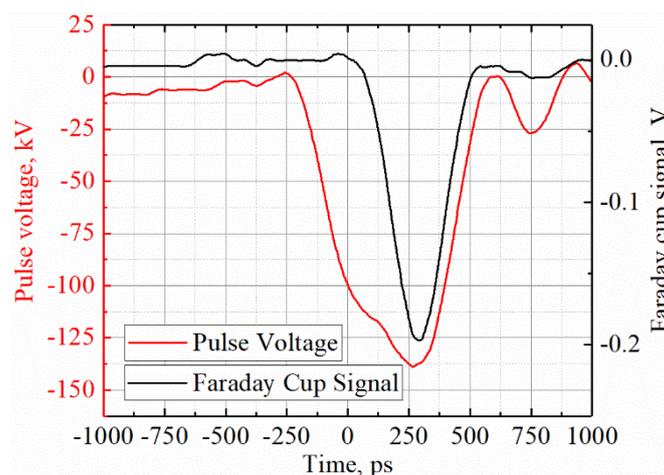


Рис. 4. Типичные осциллограммы импульса напряжения (нижняя) и тока электронов на выходе токового датчика (верхняя) в ходе кондиционирования образца

Fig. 4. Typical waveforms of the voltage pulse (lower) and the electron current pulse from the Faraday cup (upper) during the conditioning treatment of the sample

Для кондиционирования образца многократными субнаносекундными импульсами была создана автоматизированная система запуска и регистрации вакуумного разряда. Данная система на базе компьютера с разработанным программным обеспечением и подключенным к нему модулем ЦАП-АЦП «LCard E20-10» позволяла выполнять серийный перезапуск генератора импульсов, осуществляла контроль пробоя по сигналу с датчика электронного тока, остановку кондиционирования при отсутствии этого сигнала, а также вела протоколирование процесса.

Процедура кондиционирования заключалась в следующем. Предварительно эродированный образец с известным состоянием поверхности (СЭМ-фотография поверхности, измеренная величина β) помещался в вакуумную камеру. После настройки оборудования с помощью разработанного ПО запускалась сессия кондиционирования с частотой импульсов один раз в 30 с. Условием прекращения сессии кондиционирования служили либо прекращение пробоев вакуумного промежутка, либо достижение некоторого заданного числа кондиционирующих импульсов (не менее нескольких сотен). После кондиционирования образцы подвергались СЭМ-фотографированию и

исследованию автоэмиссионных свойств. Полученные СЭМ-изображения и ВАХ после кондиционирования сравнивались с аналогичными изображениями и кривыми ВАХ до кондиционирования, на основании чего делался вывод об эффективности процесса при данных условиях.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Исследуемый образец

Рассмотрим результаты субнаносекундного кондиционирования на примере одного из изготовленных образцов. Согласно данным оптической и электронной микроскопии, данный образец имел диаметр шаровидной законцовки ~ 70 мкм. После изготовления образец был подвергнут воздействию 20 эродирующих разрядов. На рис. 5 приведено СЭМ-изображение поверхности исследуемого образца после эродирования, а также вид типичной автоэмиссионной ВАХ образца и картина свечения люминесцентного экрана. На образце после эродирования видны кратеры и гребни застывшего металла с характерными размерами деталей микрорельефа 5 мкм и более. Кроме того, заметны значительные перепады кривизны поверхности относительно условной «средней» поверхности шаровидной

законцовки. Данные перепады достигают 10 мкм. Описанное сочетание факторов создает на поверхности образца значительные выступы, зачастую – даже с острями застывших микроструй металла. В результате можно утверждать, что поверхность образца после эродирования обладала развитым микрорельефом.

Данный микрорельеф обеспечивал величину $\beta \sim 170$, которая была оценена в эксперименте по исследованию автоэмиссионных ВАХ образца. По всей видимости, столь большие значения β обеспечивались заостренными поверхностными структурами. Оценка эффективной площади эмиссии S по свойствам ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма [20] дала величину $\sim 15 \text{ nm}^2$. Это говорит о том, что в ходе снятия ВАХ в качестве автоэммиттеров функционировали

одиночные микровыступы с характерным поперечным линейным размером $\sim 4 \text{ nm}$. Если принять, что величина β должна быть пропорциональна отношению высоты h микровыступа к его радиусу r (в приближении формы выступа, близкой к цилиндрической), то характерную высоту микровыступов можно оценить величиной $\sim 350 \text{ nm}$. Данная оценка грубо соответствует результатам электронной микроскопии поверхности образца для отдельных выступов. Путем сопоставления ориентации образца в пространстве во время исследования автоэмиссионных ВАХ и СЭМ исследования нами было сделано предположение о наиболее вероятных областях на поверхности образца, служивших эффективными автоэммиттерами. Данные области отмечены на СЭМ изображении на рис. 5, а.

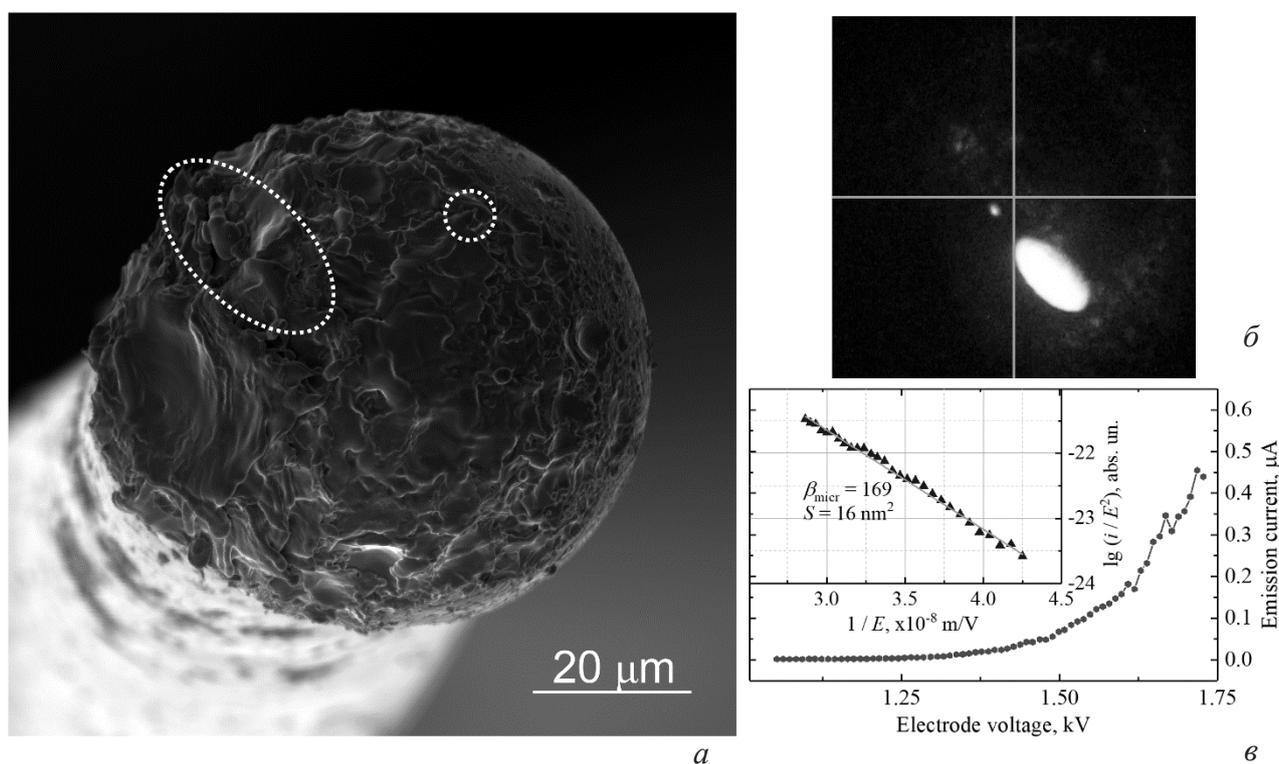


Рис. 5. СЭМ-изображение поверхности образца после эродирования 20 разрядами (а); изображение экрана автоэмиссионного проектора (б) – крестообразной меткой показано положение образца; вольт-амперная характеристика данного образца (в)

Fig. 5. SEM-image of the sample surface after the 20 eroding discharges (a); image of the field emission projector screen (b) – cross marks the sample position; and the current-voltage characteristic of the sample (c)

Таким образом, образование развитого микрорельефа на поверхности исследуемого образца было подтверждено как визуально путем исследования образца с помощью СЭМ-диагностики, так и методом измерения величины β при снятии автоэмиссионных ВАХ исследуемого образца. На следующем этапе эксперимента данный образец был подвергнут субнаносекундному кондиционированию с целью уменьшения характерных размеров объектов микрорельефа поверхности.

2.2. Результаты кондиционирования

В ходе кондиционирования образец был подвергнут воздействию 500 субнаносекундных импульсов с длительностью на полувысоте ~ 500 пс и амплитудой 140 кВ (см. рис. 4). Межэлектродное расстояние составляло ~ 10 мм. На рис. 6 представлено СЭМ-изображение поверхности образца после кондиционирования. На образце после кондиционирования заметны следы крупных деталей рельефа, которые появились в процессе эродирования образца. Однако в среднем рельеф поверхности образца оказался существенно сглаженным, по сравнению с рельефом после эродирования (см. рис. 5, а). По всей видимости, субнаносекундные разряды оставляли эрозионные следы с характерным размером не более 5 мкм. В результате даже на участках с самым большими эрозионными следами их наиболее вероятный размер оказался существенно меньше 5 мкм и составил порядка 1–2 мкм. Можно предположить, что область поверхности с наиболее развитым микрорельефом сформировалась на торцевой части образца, обращенной к аноду кондиционирующего промежутка. Данное предположение также подтвердилось картиной свечения люминесцентного экрана (см. рис. 6, б), на которой наиболее яркая точка оказалась почти точно напротив образца.

Изменения свойств поверхности образца отразились и на измеряемых путем снятия автоэмиссионных ВАХ образца значениях безразмерного коэффициента усиления поля β . На рис. 6, в представлен вид типичной автоэмиссионной ВАХ исследованного образца после первого цикла кондиционирования. Величина β в данном случае составила ~ 21 . Для сравнения: после эродирования 20 субмикросекундными импульсами характерное значение β для данного образца было ~ 170 (см. рис. 5, в). То есть после воздействия серии субнаносекундных импульсов наблюдалось уменьшение β на поверхности образца по меньшей мере в 8 раз. Это говорит о существенном уменьшении размера характерных поверхностных структур, что также подтверждается результатами микроскопического исследования (см. рис. 6, а). Кроме того, обращает на себя внимание резкое (на 8 порядков) увеличение эффективной площади эмиссии образца S до 2×10^8 нм² или, что то же самое, до 200 мкм². Предполагая, что законцовка образца является идеальной сферой диаметром 70 мкм, то половину площади ее поверхности можно оценить величиной порядка 8000 мкм². То есть эффективная площадь эмиссии оказывается всего примерно в 40 меньше площади поверхности образца, обращенной к аноду. В данной ситуации использование приближения $\beta \sim h/r$ для оценки характерной высоты микровыступов дает величину $h \sim 160$ мкм (для $r \sim 8$ мкм).

Исходя из величины эффективной площади эмиссии, можно предположить, что после кондиционирования эффективно эмитировать электроны оказалась способна значительная часть поверхности образца. Данное предположение косвенно подтверждается при анализе СЭМ-изображения на рис. 6, а: после кондиционирования область с наиболее развитым рельефом имеет площадь порядка сотен квадратных микрометров, что совпадает по порядку с оценкой эффективной площади эмиссии.

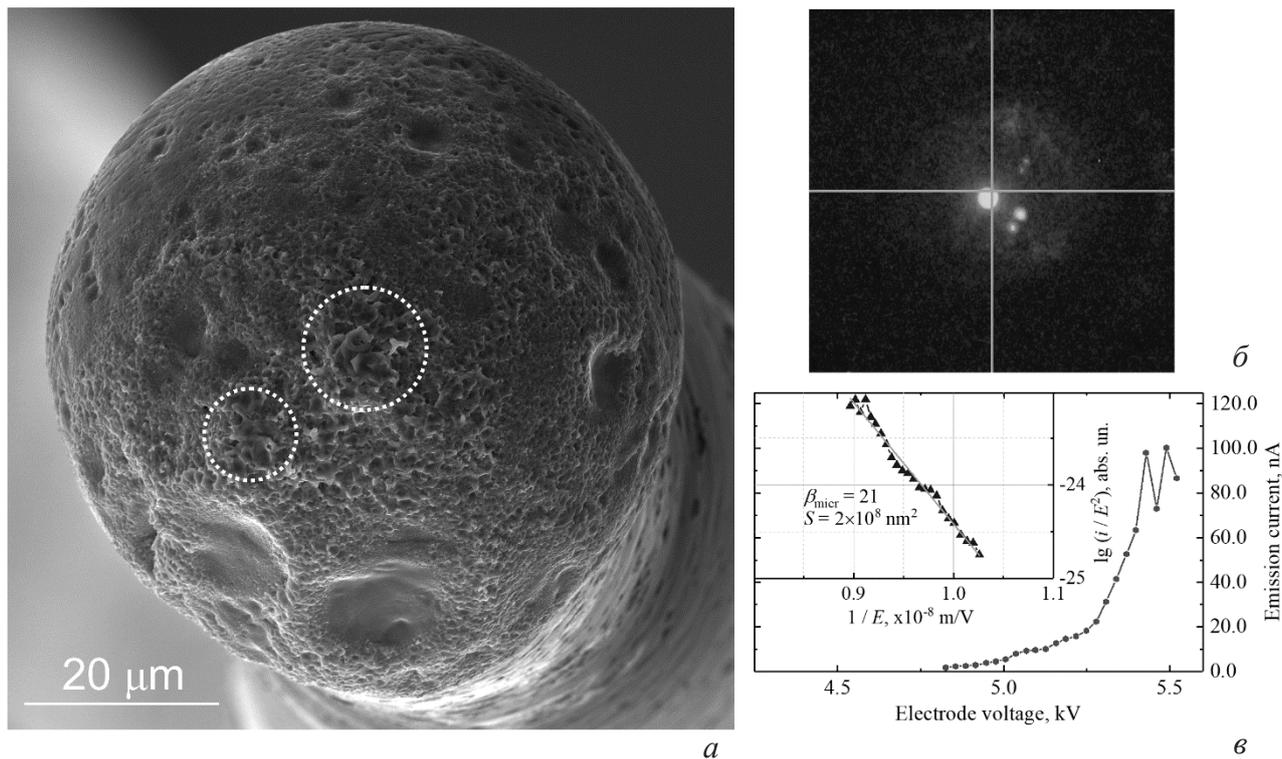


Рис. 6. СЭМ-изображение поверхности образца после кондиционирования 500 субнаносекундными импульсами (а); изображение экрана автоэмиссионного проектора (б) – крестообразной меткой показано положение образца; вольт-амперная характеристика данного образца (в)

Fig. 6. SEM-image of the sample surface after the 500 conditioning pulses (a); image of the field emission projector screen (b) – cross marks the sample position; and the current-voltage characteristic of the sample (c)

Нужно отметить, что в процессе кондиционирования в протоколе пробоев не было зарегистрировано ни одного случая «пропуска» пробоя за все 500 импульсов. После 500 импульсов было принято решение о прекращении цикла кондиционирования, поскольку в ходе эксперимента не было замечено никакой тенденции ни к уменьшению амплитуды токового сигнала (хотя его величина и не могла быть достоверно измерена), ни к уменьшению вероятности пробоя промежутка по мере его кондиционирования. Это позволяет предположить, что достигнутый результат кондиционирования не является предельным.

Выводы

В ходе данной работы было проведено испытание методики кондиционирования поверхности электрода субнаносекундными высоковольтными импульсами. Для этого ис-

пользовался специально изготовленный образец с исходной поверхностью, полученной методом оплавления в вакууме с шероховатостью не хуже 1 мкм.

Типичный микрорельеф эрозионного следа вакуумной дуги с характерными размерами выступов, впадин и застывших струй металла порядка десятков микрометров в результате обработки несколькими сотнями вакуумных разрядов с длительностью около 500 нс был значительно сглажен. Размер микронеровностей на поверхности обработанного образца не превышает единиц микрометров. Качество обработки оценивалось по результатам сканирующей электронной микроскопии, а также по измерениям автоэмиссионных параметров образца до и после обработки. Измерения коэффициента усиления электрического поля β показали уменьшение этого показателя в 8 раз с ~ 170 до ~ 21 .

Данная методика по сравнению с кондиционированием более длинными импульсами имеет потенциал большей скорости обработки, а также большей предсказуемости и надежности, по крайней мере для случая электродов малой площади. Однако она требует определения возможности масштабирования и оптимальных параметров обработки для снижения удельных временных и энергетических затрат.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-19-00323-П).

The work was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 20-19-00323-P).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Alpert D., Lee D., Lyman E., Tomaschke H. Initiation of electrical breakdown in ultrahigh vacuum // *J. Vac. Sci. Technol.* 1964. V. 1, Iss. 2. P. 35–50. DOI: 10.1116/1.1491722.
- Kranjec P., Ruby L. Test of the Critical Theory of Electrical Breakdown in Vacuum // *J. Vac. Sci. Technol.* 1967. V. 4, Iss. 2. P. 94–96. DOI: 10.1116/1.1492528.
- Little R. P., Whitney W. T. Electron Emission Preceding Electrical Breakdown in Vacuum // *J. Appl. Phys.* 1963. V. 34, Iss. 8. P. 2430–2432. DOI: 10.1063/1.1702760.
- Little R. P., Smith S. T. Electrical Breakdown in vacuum // *IEEE Trans. on Electron Devices.* 1965. V. 12, Iss. 2. P. 77–83. DOI: 10.1109/T-ED.1965.15456.
- Jedynak L. Whisker growth in high-voltage high-vacuum gaps // *J. Appl. Phys.* 1965. V. 36. P. 2587–2589. DOI: 10.1063/1.1714537.
- Little R. P., Smith S. T. Field enhancing projections produced by the application of an electric field // *J. Appl. Phys.* 1965. V. 36. P. 1502–1504. DOI: 10.1063/1.1714350.
- Little R. P., Smith S. T. Investigation the source of sharp protrusions // *Proceedings of 2nd ISDEIV, (Cambridge, Massachusetts, USA), 1966.* P. 43–52.
- Wuensch W. Advances in the Understanding of the Physical Processes of Vacuum Breakdown // *CERN-OPEN-2014-028. CLIC-Note-1025.* 2013. DOI: 10.1142/9789814602105_0003.
- Aicheler M., Burrows P., Draper M., Garvey T., Lebrun P., Peach K., Phinney N., Schmickler H., Schulte, D., Toge N. A Multi-TeV Linear Collider Based on CLIC Technology // *CLIC Conceptual Design Report.* 2012. V. CERN-2012-007. DOI: 10.5170/CERN-2012-007.
- Wuensch W., Degiovanni A., Calatroni S., Korsbäck A., Djurabekova F., Rajamäki R., Giner-Navarro J. Statistics of vacuum breakdown in the high-gradient and low-rate regime // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2017. V. 20. Article number 011007. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.011007.
- Wu X., Shi J., Chen H., Shao J., Abe T., Higo T., Matsumoto Sh., Wuensch W. High-gradient breakdown studies of an X-band Compact Linear Collider prototype structure // *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2017. V. 20. Article number 052001. DOI: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.052001.
- Barengolts S. A., Uimanov I. V., Oreshkin V. I., Khishchenko K. V., Oreshkin E. V. Plasma-liquid interaction during a pulsed vacuum breakdown // *J. Appl. Phys.* 2021. V. 129. Article number 133301. DOI: 10.1063/5.0044303.
- Jüttner B., Rohrbeck W., Wolff H. Zerstörung und Erzeugung von Feldemittern auf ausgedehnten Metaloberflächen // *Beitr. Plasmaphys.* 1970. V. 10. Article number 383.
- Hantzsche E., Jüttner B., Puchkarov V. F., Rohrbeck W., Wolff H. Erosion of metal cathodes by arcs and breakdowns in vacuum // *J. Phys. D Appl. Phys.* 1976. V. 9. Article number 1771. DOI: 10.1088/0022-3727/9/12/016.
- Mamontov Yu. I., Zemskov Yu. A., Uimanov I. V., Zubarev N. M., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Barengolts S. A. Emission Properties and Dielectric Strength of a Nanostructured Tungsten Field-Emissive Cathode // *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2022. V. 50, Iss. 9. P. 2720–2728. DOI: 10.1109/TPS.2022.3193177.
- Mamontov Yu. I., Zemskov Yu. A., Uimanov I. V., Zubarev N. M., Kaziev A. V., Barengolts S. A. Electrical properties of He-induced W "fuzz" within the pre-breakdown and breakdown regimes // *Proceedings of 29th ISDEIV, (Padova, Italy), 2021.* P. 69–72. DOI: 10.1109/ISDEIV46977.2021.9587227.
- Zemskov Yu. A., Mamontov Yu. I., Uimanov I. V., Zubarev N. M., Kaziev A. V., Kharkov M. M., Barengolts S. A. Instabilities of electrical properties of He-induced W "fuzz" within the pre-breakdown and breakdown regimes // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. V. 2064, Iss. 1. Article number 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/2064/1/012004.
- Mesyats G. A., Korovin S. D., Rostov V. V., Shpak V. G., Yalandin M. I. The RADAN series of compact pulsed power Generators and their applications // *Proceedings of the IEEE.* 2004. V. 92, Iss. 7. P. 1166–1179. DOI: 10.1109/JPROC.2004.829005.
- Mesyats G. A., Rukin S. N., Shpak V. G., Yalandin M. I. Generation of High-Power Subnanosecond Pulses / E. Heyman, B. Mandelbaum, J. Shiloh (eds). *Ultra-Wideband Short-Pulse Electromagnetics 4.* Boston: Springer, 2002. DOI: 10.1007/0-306-47093-4_1.
- Fowler R. H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields // *Proc. R. Soc. Lond. Series A.* 1928. V. 119, Iss. 781. P. 173–181. DOI: 10.1098/rspa.1928.0091.