

## Исследование параметров процесса кондиционирования поверхности электродов в многорежимной экспериментальной установке

Ю.А. Земсков\*, Ю.И. Мамонтов, И.В. Уйманов

Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия

\*yurzem@mail.ru

**Аннотация.** Методика кондиционирования поверхности катода субнаносекундными импульсами показала свою перспективность. Однако установка, на которой она испытывалась, имела недостаточные ресурс и частоту следования импульсов. Кроме того, измерение эмиссионных характеристик образца и напряжения пробоя промежутка требовало его переноса в другую установку, что неизбежно сказывалось на чистоте образца. Для устранения указанных ограничений была создана комплексная установка для контролируемого эродирования образцов, кондиционирования образцов и контроля их параметров без изменения вакуумных условий в экспериментальной камере. В ходе поиска ограничивающих и оптимальных параметров процесса кондиционирования проведено исследование эффективности этого процесса при длительности импульса 800 пс.

**Ключевые слова:** микрорельеф поверхности, вакуумный пробой, автоэлектронная эмиссия.

### 1. Введение

Кондиционирование поверхности электродов как способ повышения электрической прочности вакуумных промежутков является важной процедурой, обеспечивающей надежное функционирование высоковольтных устройств вакуумной электроники в течение длительного времени. Часто кондиционирование производится неоптимальными методами, требующими значительных затрат времени и энергии. Для тугоплавких металлов была показана возможность значительного сглаживания поверхности катода при подаче на него импульсов длительностью менее 5 нс [1], однако для меди аналогичные результаты не были достигнуты. В предыдущих наших работах было проведено испытание методики кондиционирования медных образцов субмиллиметрового размера субнаносекундными импульсами [2, 3]. Результаты проведенных исследований показывают хороший потенциал предложенной методики кондиционирования для обработки медных электродов. Однако данная методика имела и ряд недостатков: низкая частота следования кондиционирующих импульсов (1 импульс в 30 с), низкий ресурс экспериментальной установки, необходимость переноса образца между установками для кондиционирования и последующего исследования с неизбежным нарушением вакуумных условий. Для решения этих вопросов была создана многорежимная экспериментальная установка, позволяющая проводить эродирование, кондиционирование, испытание напряжения пробоя и исследование автоэмиссионных свойств образца без нарушения вакуумных условий в одной экспериментальной камере.

### 2. Экспериментальная установка

Основой экспериментальной методики являлась многорежимная экспериментальная установка на основе вакуумной камеры высоковакуумного поста УСУ-4. Давление остаточных газов в камере не превышало  $10^{-6}$  Па. Ряд узлов данной установки был аналогичен использованным в работах [2–4]. Установка, как и ранее, позволяла переключаться между режимами исследования автоэмиссионных свойств образца, эродирования образца субмикросекундными импульсами, испытания напряжения пробоя промежутка без развакуумирования камеры. В данной работе этот перечень был дополнен режимом кондиционирования образца в камере субнаносекундными импульсами. Схема экспериментальной установки в режиме кондиционирования приведена на Рис. 1.

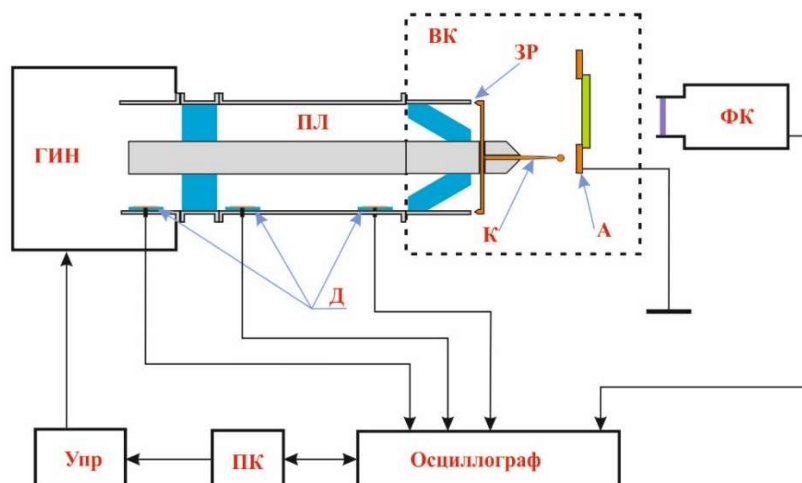


Рис. 1. Схема экспериментальной установки в режиме кондиционирования поверхности образца. К – катод, А – анод, ЗР – защитный разрядник, ВК – вакуумная камера, ФК – фотоэлектрический преобразователь ФК-19, ПЛ – передающая линия, Д – емкостные делители напряжения, ГИН – SOS-генератор, ПК – компьютер, Упр – блок управления генератором.

Катод представлял собой медную иглу, полученную в результате электрохимического травления, со сферической законцовкой, сформировавшейся в результате контактного оплавления в вакууме. В качестве заготовок для образцов использовалась медная проволока марки М1 диаметром 300 мкм. Травление велось до достижения диаметра проволоки порядка 40–70 мкм. После оплавления кончика образца в вакууме на конце формировался металлический шарик, который, как правило, имел диаметр 45–60 мкм. Анодом выступал нанесенный на стеклянную подложку люминофорный экран, закрепленный в медной рамке. По сравнению с прошлыми экспериментами [2–4], размер экрана был уменьшен, а рамка получила дополнительную плоскую площадку на одной из сторон. С учетом имеющегося в конструкции вакуумной камеры микрометрического манипулятора, такая конструкция анодного узла позволяла располагать напротив образца разные участки анода: в режиме эрозии, кондиционирования и измерения пробивного напряжения напротив образца располагалась протяженная плоская поверхность металлического медного анода, а в режиме автоэлектронного проектора – середина люминофорного экрана. Коэффициент локального усиления электрического поля  $\beta_{лок}$  вблизи поверхности образца оценивался при анализе вольт-амперных характеристик (ВАХ) автоэлектронной эмиссии с образца в режиме проектора. Для этого использовалась автоматизированная система съемки на основе компьютера с управляющим программным обеспечением, связанного с компьютером модуля ЦАП-АЦП и управляемого высоковольтного блока питания. Этот же блок питания использовался в режиме определения напряжения пробоя. Более подробно методика подготовки образцов и описание работы установки в режиме проектора даны в работах [2–4]. В ходе испытаний доработанной методики кондиционирования проводились исследования состояния поверхности образцов на различных этапах методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), что требовало развакуумирования установки. Приведенные далее снимки поверхности образцов с помощью СЭМ, получены в ЦКП «Геоаналитик» Института геологии и геохимии УрО РАН.

Для кондиционирования образца использовался SOS-генератор импульсов напряжения (ГИН). В случае согласованной нагрузки этот генератор позволял получать импульсы напряжения амплитудой до 40 кВ и длительностью около 800 пс на полувывоте. Максимальная частота следования импульсов – 100 Гц. Пример осциллограммы импульса напряжения приведен на Рис. 2. Для подключения генератора к вакуумной камере

использовалась маслonaполненная коаксиальная передающая линия с волновым сопротивлением 50 Ом и высоковольтный коаксиальный вакуумный ввод.

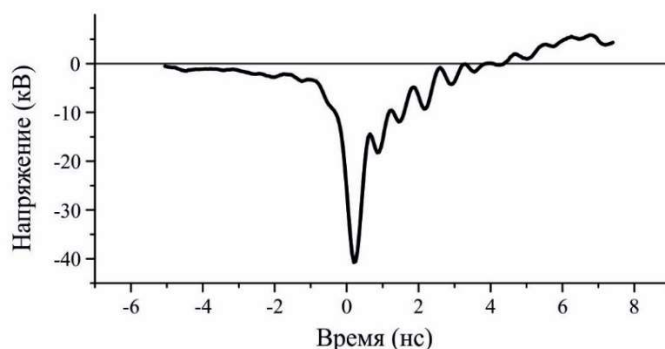


Рис. 2. Пример осциллограммы импульса SOS-генератора на согласованной нагрузке.

Поскольку вакуумный разрядный промежуток не является согласованной нагрузкой для генератора и передающей линии, в процессе кондиционирования значительная часть энергии импульса отражалась обратно в линию и могла привести к повторным неконтролируемым пробоям промежутка. Для подавления отражений в вакуумной части установки был сформирован дополнительный защитный разрядный промежуток. Катод этого промежутка представлял собой закрепленный на центральном проводнике передающей линии латунный диск с острым выступом на кромке. Выступ располагался напротив торца внешнего проводника передающей линии, выступающего анодом защитного разрядного промежутка. Зазор между кромкой и торцом был не менее 850 мкм. Моделирование и проведенные эксперименты показали, что защитный разрядник не мешает развитию пробоя в основном промежутке, т.к. из-за меньшего геометрического коэффициента усиления поля в защитном разряднике пробивное напряжение в нем достигается позже, чем в кондиционирующем промежутке. При этом амплитуда отраженного от вакуумной нагрузки импульса, регистрируемого в линии, снизилась до 60% от амплитуды падающего, тогда как без этой доработки амплитуда отраженного импульса составляла до 90% от амплитуды падающего.

В процессе настройки установки было обнаружено, что развитие пробоя при кондиционировании сопровождается вспышками люминофорного экрана. Поэтому ситуация, когда при подаче субнаносекундного кондиционирующего импульса вспышка люминофорного экрана не наблюдалась, интерпретировалась нами как «пропуск» пробоя кондиционирующего промежутка. Такая интерпретация подтверждалась визуальным наблюдением плазмы вакуумного разряда вблизи катода-образца с помощью длиннофокусного оптического микроскопа Questar QM-100: случаи, когда плазма вблизи катода не наблюдалась, надежно коррелировали со случаями отсутствия вспышки люминофорного экрана. Для регистрации вспышек люминофора был использован фотоэлектрический преобразователь ФК-19. Он был установлен в окно камеры напротив люминофорного экрана. Вспышка люминофора приводила к резкому увеличению уровня сигнала на выходе ФК-19. Уровень выходного сигнала ФК-19 регистрировался с помощью осциллографа Tektronix DPO 4034 (350 МГц, 2.5 Гвыб/с). Снятые осциллограммы поступали на компьютер для автоматизированной обработки и формирования протокола пробоев кондиционируемого промежутка. В качестве осциллограмм сигнала ФК-19, соответствующих пробоям, рассматривались те, на которых наблюдалось превышение амплитуды сигнала над фоновым уровнем. Осциллограммы, на которых после подачи кондиционирующего импульса сигнал с ФК-19 не превышал фона, рассматривались как «пропуски» пробоя.

В ходе экспериментов управляющая программа устанавливала осциллограф в режим ожидания, а затем подавала команду на запуск SOS-генератора. Полученная осциллограмма сигнала с ФК-19 сохранялась в памяти компьютера. После этого процедура повторялась. На первом этапе кондиционирования с помощью манипулятора расстояние между образцом и анодным узлом устанавливалось равным  $\sim 11$  мм. Затем инициировалось несколько сотен субнаносекундных импульсов до устойчивого прекращения пробоев промежутка. После этого межэлектродное расстояние уменьшалось до 5 мм и инициировалось еще несколько сотен субнаносекундных импульсов. Дальнейшее уменьшение межэлектродного расстояния не производилось, чтобы избежать воздействия анодной плазмы на образец [2, 3].

Напряжение пробоя на различных этапах обработки оценивалось при межэлектродном расстоянии 300 мкм в условиях медленно нарастающего напряжения. Факт пробоя регистрировался осциллографом по резкому спаду напряжения на промежутке.

### 3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Ниже представлены типичные результаты эродирования и кондиционирования двух исследованных образцов. Оба образца имели диаметр оплавленной части около 40 мкм и сравнимый диаметр стержня в районе границы оплавления. Первый образец, СЭМ-изображения которого приведены на Рис. 3, в ходе эродирования был подвергнут 8 пробоям субмикросекундной длительности с током разряда  $\sim 25$  А. Это привело к появлению большого количества эрозионных следов, занимающих всю поверхность кончика образца и часть поверхности стержня (см. Рис. 3а). Для первого образца начальные значения коэффициента локального усиления электрического поля  $\beta_{лок}$  оценивались в 23–35, а напряжение пробоя составило 8.35 кВ. Эти значения определялись, по нашему мнению, исходным загрязнением поверхности. После эродирования коэффициент  $\beta_{лок}$  достигал уже 1500, а напряжение пробоя измерить не удалось, так как очень высокий ток эмиссии, шунтируя часть схемы измерения напряжения, не позволял достаточно увеличить разность потенциалов на промежутке.

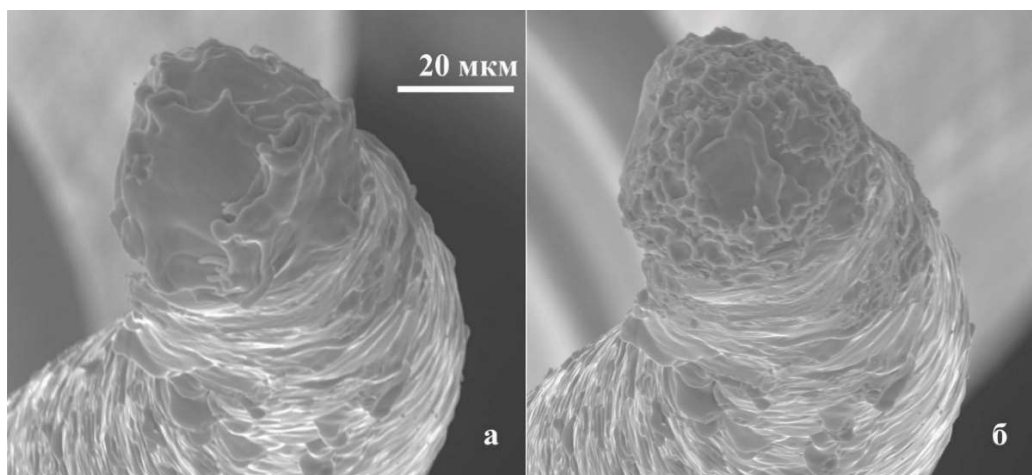


Рис. 3. СЭМ-изображения первого образца после эродирования 8 субмикросекундными импульсами (а) и после кондиционирования 1600 импульсами SOS-генератора (б).

На Рис. 3б приведено СЭМ-изображение образца после кондиционирования. Заметно, что средний размер объектов микрорельефа уменьшился после кондиционирования, форма кончика катода стала немного ближе к сферической. Однако размеров кратеров порядка 1 мкм, как в прошлом эксперименте [3], на этой установке пока достичь не удалось.

На Рис. 4 представлена зависимость числа пробоев промежутка от числа кондиционирующих импульсов для первого образца. Первые 400 поданных импульсов

относятся к первому этапу кондиционирования при межэлектродном расстоянии 11 мм, а остальные – ко второму. Импульсы подавались сериями по 200–400. Нужно отметить, что после паузы между сериями вероятность пробоя могла повышаться. Этим объясняется заметный резкий рост числа пробоев, начинающийся после 800-го импульса. Всего в процессе кондиционирования первого образца на промежуток было подано 1600 импульсов, из которых 522 привели к пробоям. После кондиционирования величина коэффициента  $\beta_{лок}$  для этого образца составила 9–12, а напряжение пробоя достигло 9.4 кВ.

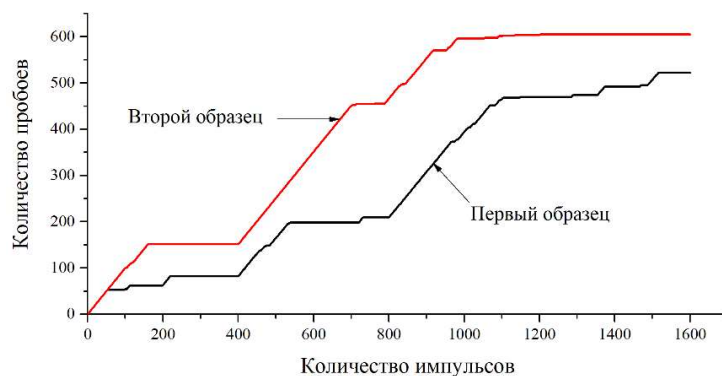


Рис. 4. Процесс кондиционирования образцов как диаграмма роста количества пробоев по мере подачи импульсов.

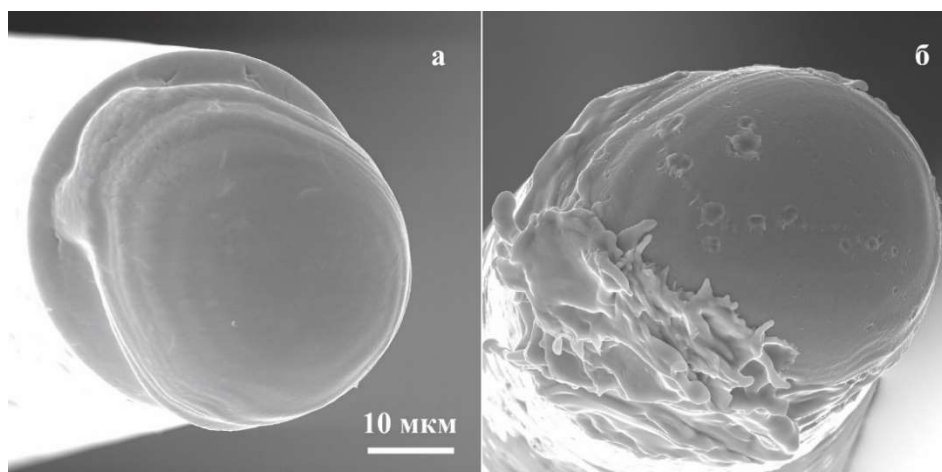


Рис. 5. СЭМ-изображения второго образца до начала экспериментов (а), и после эродирования 2 субмикросекундными импульсами (б).

Второй рассматриваемый образец, по-видимому, был достаточно сильно загрязнен до установки в камеру, поэтому коэффициент  $\beta_{лок}$  не удалось достоверно оценить. По нашим оценкам, он мог достигать 500. Второй образец был эродирован 2 субмикросекундными импульсами с током  $\sim 25$  А. СЭМ-изображения образца до эродирования и после него приведены на Рис. 5. По-видимому, эродирующие импульсы удалили загрязнения с поверхности катода, а эрозия носила ограниченный характер, поэтому коэффициент  $\beta_{лок}$  после эродирования составил 30–40, а напряжение пробоя – 7.9 кВ. При этом на торцевой поверхности катода на Рис. 5б были обнаружены небольшие кратеры диаметром менее 5 мкм, которые можно ассоциировать с катодными пятнами первого типа, характерными для загрязненных поверхностей.

Как и для первого образца, первый этап кондиционирования второго образца проходил при межэлектродном расстоянии  $\sim 11$  мм. На образец было подано 400 кондиционирующих

импульсов. Как видно на протоколе пробоев на Рис. 4, количество пробоев достигло 151 и далее не росло. На втором этапе при расстоянии 5 мм было выполнено еще три серии по 400 импульсов. Общее количество пробоев промежутка достигло 605, но в последней серии пробой практически не происходил. После первого этапа кондиционирования оценка коэффициента  $\beta_{лок}$  дала величину  $\sim 11$ , а после второго – в диапазоне от 8 до 14. Напряжение пробоя по окончании процесса кондиционирования достигло 14.8 кВ. СЭМ-изображение данного образца после кондиционирования на момент написания статьи было не доступно.

Следует отметить, что общее количество пробоев, по-видимому, велико для случая ограниченной эрозии на втором образце и может объясняться вовлечением в процесс кондиционирования неэродированных областей. К тому же, как видно на Рис. 3б, на краях кратеров после кондиционирования формировались застывшие микроструи металла, капли и остря, чем и объясняются многочисленные повторные пробойи. В целом, образование развитого микрорельефа после воздействия кондиционирующего импульса должно приводить к снижению эффективности всего процесса кондиционирования.

#### 4. Заключение

В ходе данной работы была создана эффективная методика исследования процесса кондиционирования поверхности электродов. Так, при использовании кондиционирующих импульсов длительностью около 800 пс для одного из двух представленных в работе медных образцов удалось добиться снижения коэффициента локального усиления электрического поля с 30–40 до 8–14 и повысить напряжение пробоя промежутка почти в два раза: с  $\sim 8$  кВ до  $\sim 15$  кВ. Однако при использовании имеющегося SOS-генератора не удалось добиться тех же параметров микрорельефа, какие были получены в работе [3], где в качестве источника кондиционирующих импульсов выступал генератор типа РАДАН. Требуется более детальное исследование влияния параметров импульса на характер эрозионных следов, оставляемых катодным пятном вакуумного разряда.

#### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00323-П, <https://rscf.ru/project/23-19-45034/>.

#### 5. Список литературы

- [1] E. Hantzsche, B. Juttner, V.F. Puchkarov, W. Rohrbeck, and H. Wolff, Erosion of metal cathodes by arcs and breakdowns in vacuum, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. **9**(12), 1771, 1976; doi: 10.1088/0022-3727/9/12/016
- [2] Ю.А. Земсков, Ю.И. Мамонтов, И.В. Уйманов, С.В. Баракхвостов и А.И. Липчак, Исследование кондиционирования поверхности медного катода субнаносекундными вакуумными разрядами, *Materials. Technologies. Design*, vol. **5**(2(12)), 140, 2023; doi: 10.54708/26587572\_2023\_5212140
- [3] Yu.I. Mamontov, Yu.A. Zemskov, I.V. Uimanov, S.V. Barakhvostov, A.I. Lipchak and S.A. Barendolts, Conditioning a Copper Cathode Surface by High-Voltage Subnanosecond Pulses, *IEEE Trans. on Plasma Sci.*, 2024 (early access); doi: 10.1109/TPS.2024.3374898
- [4] Yu.A. Zemskov, Yu.I. Mamontov, and I. V. Uimanov, Investigation of Changes in the Field Emission Characteristics of the Eroded Cathode Surface after Submicrosecond Vacuum Arc Discharges with Different Current Amplitudes, *Bull. RAS: Physics*, vol. **87**(S2), S202, 2023; doi: 10.1134/s1062873823704610