



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.8>

УДК: 537.533.2; 53.083.98; 53.082.722.4

СВЯЗЬ НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ ВАКУУМНОГО ПРОМЕЖУТКА И ЕГО АВТОЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

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

**Институт электрофизики Уральского отделения РАН,
620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106**

Статья поступила в редакцию 23 октября 2025 г.

Аннотация. Были исследованы общие тенденции изменения локального коэффициента усиления электрического поля β на катоде вакуумного промежутка и его статического пробивного напряжения (ПН) по мере эродирования поверхности катода вакуумными пробоями. Катод представлял собой медную иглу диаметром ~ 60 мкм и длиной ~ 15 мм со сферическим кончиком диаметром ~ 70 мкм, а анод – плоскость. Проводилась серия экспериментальных циклов, состоящих из последовательно выполняемых стадий снятия автоэмиссионной вольт-амперной характеристики (ВАХ) вакуумного промежутка и измерения ПН. При этом испытание ПН одновременно выступало эродирующим фактором, приводящим к изменению состояния поверхности катода для следующего цикла измерений. При анализе полученных автоэмиссионных ВАХ для каждого цикла определялся коэффициент β , по которому для значения пробивной напряженности поля медного катода 10×10^7 В/см оценивалась величина ПН. В свою очередь, вычисленное значение ПН сравнивалось с измеренным ПН в данном экспериментальном цикле. Кроме того, к полученным автоэмиссионным ВАХ был применен тест ортодоксальности автоэлектронной эмиссии. Обнаружено,

что для проведенных экспериментальных циклов было возможно предсказать величину ПН с ошибкой не более 10 %. Также показано, что для значений β , которые дают наилучшее совпадение рассчитываемой величины ПН с экспериментально измеренной, показатель ортодоксальности эмиссии лежит значительно выше диапазона для «чистой» полевой эмиссии. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что возможно разработать подход к экспериментальной оценке ПН вакуумных промежутков неразрушающим способом, то есть без непосредственного проведения испытаний ПН, учитывая только автоэмиссионные свойства катода промежутка. Такой подход может найти обширное применение при разработке мощных высоковольтных электрофизических устройств.

Ключевые слова: автоэлектронная эмиссия, полевая эмиссия, вакуумный пробой, напряжение пробоя.

Автор для переписки: Мамонтов Юрий Игоревич, mamontov@iep.uran.ru

Введение

В настоящее время в Институте электрофизики УрО РАН проводится исследование влияния высоковольтных импульсов с различными временными и амплитудными характеристиками на поверхность металлических катодов [1-3]. Целью исследования является разработка методик восстановления электрической прочности вакуумных высоковольтных промежутков после пробоев. Одной из задач, решаемых в ходе исследования, является исследование автоэмиссионных свойств исследуемых образцов-катодов. Это позволяет оценить коэффициент усиления локального электрического поля β , что, в свою очередь, позволяет оперативно получать информацию о состоянии поверхности катода после отдельных этапов эксперимента (эррозия катода, кондиционирование катода, испытание пробивного напряжения и т.д.). Преимуществом такого подхода является то, что автоэмиссионные характеристики катода можно исследовать в той же вакуумной камере, в которой проводятся остальные исследования, то есть без контакта катодов с атмосферой,

что неизбежно происходит при передаче катодов для исследования другими методами, например, методом сканирующей электронной микроскопии. Однако иногда в наших условиях характерный вид получаемых автоэмиссионных вольт-амперных характеристик (ВАХ) оказывается весьма нестабильным и невоспроизводимым даже в серии последовательных измерений. Кроме того, исследование автоэлектронной эмиссии в различных диапазонах токов может давать разные значения β [4]. В результате оценка локального коэффициента усиления электрического поля становится неоднозначной, и может быть не ясно, какое именно значение β характеризует фактическое состояние поверхности исследуемого катода.

При этом с точки зрения теории вакуумного пробоя [5-7] автоэлектронная эмиссия является важнейшим предпробойным явлением. Именно появление заметного автоэмиссионного тока претворяет развитие микровзрывных процессов на катоде [5,8], вызванных развитием тепловых неустойчивостей различных объектов с большой величиной β . Поэтому разумно ожидать, что автоэмиссионные свойства катода должны находиться в прямой связи с электрической прочностью вакуумного промежутка, в частности, с величиной статического пробивного напряжения $U_{\text{бр}}$. Поэтому для проверки нашего подхода к оценке β в настоящей работе мы исследовали соответствие измеренных и расчетных значений $U_{\text{бр}}$ для вакуумного промежутка с субмиллиметровым игольчатым медным катодом. Расчетное значение $U_{\text{бр}}$ вычислялось с учетом известного значения напряженности пробивного электрического поля для медных катодов [9]. Кроме того, к полученным автоэмиссионным ВАХ был применен критерий ортодоксальности автоэлектронной эмиссии, предложенный Форбсом [10]. В результате был найден диапазон значений показателя ортодоксальности эмиссии, в пределах которого полученные значения β наилучшим образом позволяют оценить пробивное напряжение $U_{\text{бр}}$. Полученные результаты могут стать основной для разработки методики неразрушающего контроля электрической прочности

высоковольтных вакуумных промежутков. Данная статья является логическим продолжением работы [4].

1. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка собрана на базе высоковакуумного поста УСУ-4, обеспечивающего давление остаточных газов в камере не хуже 10^{-6} Па. Электропитание установки (см. Рис. 1 и 2) осуществлялось от высоковольтного источника постоянного тока с максимальным выходным напряжением 30 кВ и максимальным выходным током 5 мА. Выходной ток дополнительно ограничивался балластным резистором R_{61} сопротивлением 11,3 МОм. Величина напряжения U , приложенного к исследуемому вакуумному промежутку, измерялась после балласта R_{61} с помощью делителя напряжения $R_{b1}-R_{b2}$ общим сопротивлением ~ 1 ГОм; коэффициент деления составлял 11736 для устройств с входным сопротивлением 10 МОм и 20873 – для устройств с входным сопротивлением 1 МОм.

Исследуемый вакуумный промежуток состоял из двух принципиальных узлов: катодного и анодного. В качестве катода выступала неподвижная тонкая игла длиной ~ 15 мм, изготовленная из высокочистой меди марки М0 (99,99 % Cu). Диаметр иглы составлял ~ 60 мкм. Конец иглы был скруглен сферой диаметром ~ 70 мкм. Анодный узел имел возможность перемещаться в камере в трех направлениях без развакуумирования установки. Расстояние между катодом и анодом в зависимости от этапа эксперимента варьировалось в диапазоне 300–1000 мкм. Для контроля расстояния использовались длиннофокусный микроскоп «Questar QM-100» и микрометрический анодный манипулятор. Погрешность установки расстояния между катодом и анодом была не хуже ± 10 мкм. Конфигурация и положение анодного узла изменялись в зависимости от этапа эксперимента без развакуумирования установки.

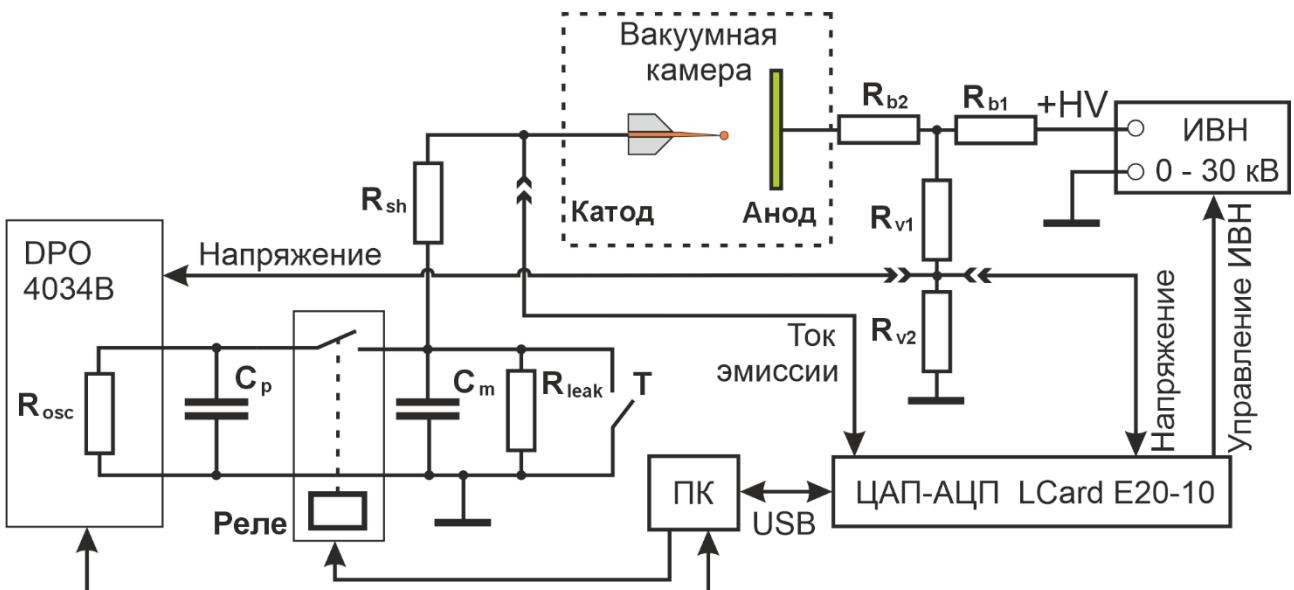


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки в режиме исследования автоэлектронной эмиссии.

В рамках исследования последовательно выполнялись два основных этапа эксперимента: исследование автоэмиссионных ВАХ вакуумного промежутка и измерение напряжения вакуумного пробоя промежутка. Так, исследование автоэмиссионных ВАХ проводилось в автоэмиссионном проекторе, включающем катодный узел (игла) и анодный узел в виде плоского люминесцентного экрана для визуализации катодных эмиссионных центров. Расстояние катод – анод на данном этапе задавалось равным 1 мм. Принципиальная схема экспериментальной установки в режиме исследования автоэмиссионных ВАХ представлена на Рис. 1. Помимо балластного резистора R_{b1} , в данном режиме в анодной цепи имелся дополнительный балластный резистор R_{b2} сопротивлением 0,7 МОм для создания отрицательной обратной связи, позволяющей минимизировать риск развития случайного пробоя промежутка в процессе снятия ВАХ. Величина напряжения U , подаваемого на вакуумный промежуток, регулировалась и измерялась блоком ЦАП-АЦП «LCard E20-10» (1 МГц, 10 Мвыб/с, входное сопротивление 10 МОм) с компьютерным управлением. Ток эмиссии I_{FE} измерялся в катодной цепи. Для измерения тока использовались два подхода. В рамках первого, «резистивного» подхода использовался обычный токовый шунт R_{sh} сопротивлением 1 МОм, который применялся в диапазоне токов от 0,5 до 1000 нА. Сигнал с шунта

регистрировался блоком ЦАП-АЦП «LCard E20-10». Второй подход заключался в использовании емкостного токоизмерительного блока, который применялся для измерения токов ниже 0,5 нА, вплоть до единиц пикоампер. Этот блок представлял собой емкостный токовый интегратор, подробно описанный в работе [4]. Алгоритм его работы был следующим. В фазе сброса калибранный конденсатор емкостью C_m закорачивался входным сопротивлением (1 МОм) осциллографа Tektronix DPO 4034B (350 МГц, 2,5 Гвыб/с) и разряжался. Емкость C_m в данной работе составляла 9,6 нФ. Затем в фазе интегрирования цепь конденсатор – осциллограф разрывалась, и ток автоэмиссии I_{FE} заряжал конденсатор в течение некоторого периода интегрирования t . По истечении времени t цепь конденсатор – осциллограф снова замыкалась, и осциллограф регистрировал сигнал разряда конденсатора. Пиковое напряжение в самом начале процесса разрядки конденсатора интерпретировалось как измеренное осциллографом значение напряжения заряда конденсатора U_s . Для получения истинной величины напряжения на конденсаторе U_m , величина U_s корректировалась с учетом паразитной емкости входной цепи осциллографа C_p (~140 пФ): $U_m = U_s \times (1 + C_p / C_m)$. Измеренное значение I_{FE} рассчитывалось по формуле:

$$I_{FE} = \frac{U_m}{R_{osc} \exp\left[-\frac{t}{R_{leak} C_m}\right] + R_{leak} \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{R_{leak} C_m}\right]\right)}, \quad (1)$$

где R_{osc} – входное сопротивление осциллографа 1 МОм, R_{leak} – сопротивление утечки измерительной цепи (не хуже 1 ТОм). Вывод формулы (1) подробно описан в работе [4]. Переключение между фазами сброса и интегрирования осуществлялось электромеханическим реле, управляемым компьютером; компьютер также задавал период интегрирования t . Типичный диапазон t составлял от десятков секунд до десятков минут; максимальная величина t составляла ~60 минут для токов ~1 пА. Погрешность установки t была не хуже ±10 мс. Переключение между «резистивными» и «емкостными» измерениями тока осуществлялось с помощью тумблера T, закорачивающего интегратор.

Применение узлов с компьютерным управлением позволило обеспечить снятие автоэмиссионных ВАХ в полуавтоматическом режиме. При этом сначала вручную с помощью блока ЦАП-АЦП устанавливался некоторый уровень напряжения на промежутке для установки автоэмиссионного тока на уровне порядка десятков наноампер, а затем запускалось разработанное программное обеспечение (ПО) для снятия ВАХ. Данное ПО автоматически изменяло напряжение U на промежутке с одновременным измерением величин U и I_{FE} . Съемка ВАХ происходила «сверху вниз», то есть ПО постепенно уменьшало напряжение на промежутке, что позволяло избежать случайных пробоев и повреждения оборудования.

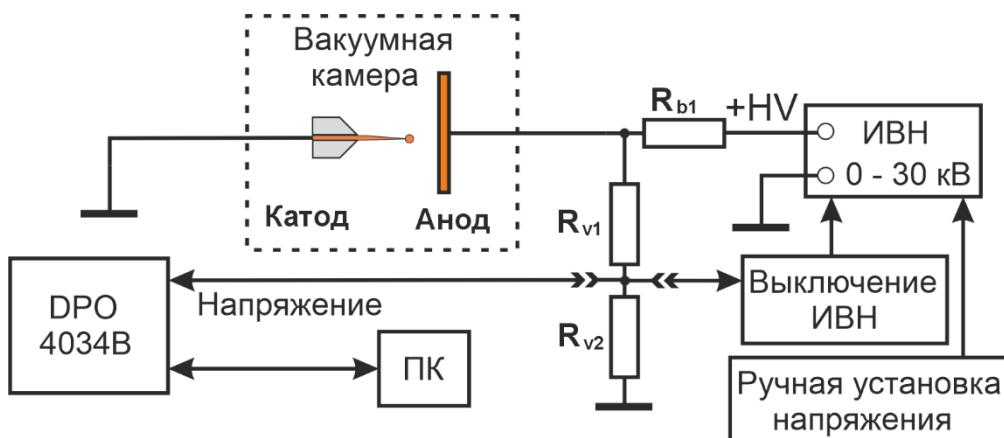


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки в режиме измерения напряжения пробоя вакуумного промежутка.

Схема экспериментальной установки на этапе измерения напряжения пробоя U_{br} вакуумного промежутка представлена на Рис. 2. Здесь вместо люминесцентного экрана в качестве анода использовалась массивная плоская медная пластина. Смена анодного узла производилась с помощью позиционера без повторной откачки камеры. Расстояние между катодом и анодом на данном этапе составляло 300 мкм. Также чтобы не создавать обратных связей, затрудняющих пробой, из анодной цепи был удален балластный резистор R_{b2} , а из катодной – все токоизмерительные узлы. Кроме того, в данном случае использовался узел ручного управления подаваемым напряжением, поскольку блок ЦАП-АЦП «LCard E20-10» работал нестабильно при пробоях. Также для предотвращения повторных пробоев промежутка был использован

дополнительный блок, который автоматически отключал высоковольтный источник питания в момент пробоя. Сигналом на выключение высоковольтного источника питания служило резкое снижение напряжения на делителе $R_{B1}-R_{B2}$. Задержка выключения источника питания составила ~ 10 мкс. В описанном режиме работы установки ток пробоя, по существу, определялся только паразитными емкостями узлов установки и проводимостью вакуумной плазмы. Проведенные измерения тока пробоя показали, что ток имел вид затухающих колебаний с характерной частотой несколько МГц и максимальным током ~ 40 А. Период затухания составлял порядка нескольких микросекунд. Алгоритм работы на этапе измерения напряжения пробоя был следующим. С помощью узла ручного управления источником напряжение на промежутке плавно увеличивалось со скоростью ~ 200 В/с. При некотором напряжении происходил пробой. Он одновременно фиксировался осциллографом и блоком, отключающим высоковольтный источник. По зарегистрированной осциллограмме в качестве напряжения пробоя принималось значение напряжения на промежутке непосредственно перед резким спадом.

2. Методика обработки результатов экспериментов

a) Общий ход эксперимента

В данной работе была исследована взаимосвязь между автоэмиссионными характеристиками вакуумного промежутка и его электрической прочностью, характеризующейся напряжением пробоя. Для этого было проведено несколько цикло измерений, состоящих из этапа снятия автоэмиссионных ВАХ промежутка и этапа измерения его пробивного напряжения. В рамках одного цикла данные этапы выполнялись последовательно. При этом испытания пробивного напряжения играли двоякую роль. Помимо, собственно, измерения U_{br} , при испытании оказывалось неизбежное эродирующее воздействие на катод промежутка. В результате после испытания формировалось новое состояние поверхности катода (и всего промежутка в целом) с изменившимися по сравнению с предшествующим экспериментальным циклом автоэмиссионными

и пробивными характеристиками. Из-за стохастической природы вакуумного пробоя данные характеристики резко менялись после испытания, однако эрозия катода оставалась достаточно умеренной, чтобы сохранять его макрореометрию. Таким образом, измерение U_{br} в рамках текущего экспериментального цикла одновременно подготавливало промежуток к следующему циклу. Была проведена серия циклов «снятие ВАХ – измерение U_{br} » для накопления статистики по парам значений локального коэффициента усиления поля β на поверхности катода и показателя ортодоксальности автоэлектронной эмиссии f [10], а также по значениям пробивного напряжения U_{br} для соответствующего экспериментального цикла. Кроме того, в рамках каждого цикла по полученным значениям β также проводилась оценка U_{br} , результаты которой затем сравнивались с фактически измеренной величиной U_{br} . Подходы к вычислению величин β , f и U_{br} по полученным данным подробно описаны в следующих подсекциях.

б) Вычисление локального коэффициента усиления электрического поля

Локальный коэффициент усиления электрического поля β (безразмерный) можно вычислить при анализе автоэмиссионных ВАХ вакуумного промежутка в соответствии с теорией Фаулера-Нордгейма (ФН) [11,12]. Известно, что ток автоэмиссии I_{FE} зависит от напряженности электрического поля E вблизи поверхности катода (эмиттера) по закону $I_{FE} = S A E^2 \exp[-B / E]$. Здесь A – константа из уравнения автоэлектронной эмиссии ФН, а коэффициент B зависит от работы выхода материала эмиттера φ (4,4 эВ для меди), а также слабо зависит от E [11,12]. В свою очередь, S – эффективная площадь эмиссии. Напряженность поля E удобно задать следующим образом:

$$E = \beta_m \beta U = \beta E_m, E_m = \beta_m U. \quad (2)$$

Здесь U – напряжение, приложенное к вакуумному промежутку, а β_m – макроскопический фактор, определяемый геометрией промежутка. Величина β_m вычисляется путем численного решения уравнения Лапласа для рассматриваемого промежутка. В данном случае рассматривалась геометрия

«игольчатый катод – плоский анод» с расстоянием d между вершиной катода и анодом. Для расчетов были использовали реальные размеры катода, полученные в ходе микроскопического исследования. Расчеты проводились в осесимметричном приближении с использованием метода конечных объемов 2-го порядка точности для неструктурированных сеток [13,14]. С учетом введенной величины β_m фактор β показывает, во сколько раз фактическая (локальная) напряженность электрического поля E вблизи катода превышает макроскопическую напряженность поля E_m , определяемую геометрией промежутка. Для определения β по экспериментальным автоэмиссионным ВАХ необходимо представить их в координатах Фаулера-Нордгейма (ФН): $\lg(I_{FE} / E_m^2) = g(1 / E_m)$ и аппроксимировать полученный график прямой линией [12]. Здесь g используется как символ функциональной зависимости вместо буквы f , которая здесь обозначает показатель ортодоксальности автоэлектронной эмиссии. После явной подстановки A и B уравнение для тока автоэлектронной эмиссии, переписанное в координатах ФН, выглядит следующим образом:

$$\lg \frac{I_{FE}}{E_m^2} = -5,85 + \frac{4,39}{\varphi^{1/2}} + \lg \frac{S\beta^2}{\varphi} - \frac{2,98 \times 10^9 \varphi^{3/2}}{\beta E_m}. \quad (3)$$

После соответствующего представления экспериментально полученной автоэмиссионной ВАХ в координатах ФН фактор β может быть вычислен следующим образом:

$$\beta = \frac{-2,98 \times 10^9 \varphi^{3/2}}{\operatorname{tg} \alpha}, \quad (4)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – коэффициент наклона линейной аппроксимации ВАХ в ФН-координатах [12].

в) Оценка напряжения пробоя

Оценка U_{br} выполнялась, исходя из следующих соображений. Вакуумный пробой происходит, когда напряженность E вблизи поверхности катода достигает некоторого критического значения E_{br} . Пусть E вблизи катода

определяется формулой (2). Тогда для наступления пробоя необходимо выполнение следующего условия:

$$U_{\text{бр}} = \frac{E_{\text{бр}}}{\beta_m \beta}. \quad (5)$$

Здесь β – экспериментально определяемая величина, а β_m получена из решения уравнения Лапласа. В качестве значения $E_{\text{бр}}$ для медного катода в настоящей работе принимается величина 10×10^7 В/см [9].

г) Вычисление фактора ортодоксальности автоэлектронной эмиссии

Критерий ортодоксальности автоэлектронной эмиссии, предложенный Форбсом [10], основан на соотношении величин, характеризующих электрическое поле вблизи катода: $f = X / X_R$, где f – величина фактора ортодоксальности, X – величина, характеризующая электрическое поле, а X_R – значение этой величины, при котором высота потенциального барьера на границе металл-вакуум становится равной нулю. В настоящей работе принимается $X = E_m$. Удобная формула для расчета f выглядит следующим образом [10]:

$$f = -0.95\eta / \left[\operatorname{tg} \alpha \cdot \left(\frac{1}{E_m} \right) \right], \quad (6)$$

где η – параметр, зависящий от работы выхода материала катода. Интерполируя данные, представленные в [10], получим $\eta = 4,69$ для $\varphi = 4,4$ эВ. В зависимости от величины f данные автоэмиссионного эксперимента можно разделить на три группы [10]: 1) «разумный» диапазон значений f , соответствующий «чистой» автоэлектронной эмиссии; 2) «явно неразумный» диапазон f , в пределах которого данные не соответствуют критерию ортодоксальности автоэлектронной эмиссии; и 3) «неопределенный» диапазон f , для которого «требуется дополнительные исследования» [10]. Границы диапазонов зависят от природы эмиттера и работы выхода φ [10]. После интерполяции данных из [10] до значения $\varphi = 4,4$ эВ, в настоящей работе «разумный» диапазон f был принят равным 0,152-0,456, а диапазоны «явно неразумных» значений f – меньше 0,1 и больше 0,759. Остальные значения f рассматривались как «неопределенные».

4. Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты измерений и вычислений величин $U_{\text{бр}}$ и β в разных экспериментальных циклах представлены в Таблице 1. Здесь расчетные значения $U_{\text{бр}}$ и β были получены из формулы (5) (для вычисления β рассматривалось значение $U_{\text{бр}}$, непосредственно измеренное в эксперименте), а f_{\min} и f_{\max} – показатели ортодоксальности автоэлектронной эмиссии в начале и в конце интервалов значений $1 / E_m$ для соответствующей линейной аппроксимации автоэмиссионной ВАХ и определенного по ней коэффициента β . Зеленый фон ячеек соответствует значениям β и соответствующим им расчетным $U_{\text{бр}}$, которые совпадают с измеренными $U_{\text{бр}}$ с относительной погрешностью не более 10 %. Желтый фон соответствует расчетным значениям $U_{\text{бр}}$, которые наиболее близки к измеренным, но относительная погрешность между расчетными и измеренными значениями превышает 10 %.

Таблица 1. Результаты измерений коэффициента β , пробивного напряжения $U_{\text{бр}}$, а также их сравнение с соответствующими вычисленными значениями.

	β (изм.)	f_{\min}	f_{\max}	$U_{\text{бр}}$ (расчет), В	$U_{\text{бр}}$ (изм.), В	β (расчет)
Цикл 0	4,7	0,262	0,232	88945,26	16243	25,7
	5,1	0,285	0,254	81969,16		
	9,52	0,472	0,421	43912,05		
Цикл 1	63,5	0,997	0,711	6583,35	6833	61,2
	74,85	1,187	0,839	5585,07		
	55,3	0,708	0,653	7559,54		
	44	0,504	0,448	9500,97		
Цикл 2	54,35	0,724	0,558	7691,68	6140	68,1
	34,2	0,456	0,407	12223,47		
	80,2	0,95	0,842	5212,50		
	4,6	0,168	0,158	26626,93		
	70,2	0,709	0,663	5955,02		

Таблица 1. (Продолжение).

	β (изм.)	f_{\min}	f_{\max}	U_{br} (расчет), В	U_{br} (изм.), В	β (расчет)
Цикл 3	24	0,58	0,56	17418,45	9127	45,8
	47,4	1,153	1,03	8819,47		
	35,1	0,591	0,556	11910,05		
	15,8	0,115	0,11	26458,40		
Цикл 4	51	0,886	0,823	8196,92	11411	36,6
	37,7	0,826	0,774	11088,67		
	44,4	0,908	0,811	9415,38		
	61,5	1,118	1,01	6797,44		
	24,1	0,428	0,39	17346,17		
Цикл 5	33	0,732	0,579	12667,96	9100	45,9
	41,9	0,931	0,742	9977,15		
	26,9	0,502	0,475	15540,62		
	13,1	0,227	0,214	31911,66		
	51,7	0,847	0,796	8085,93		
Цикл 6	17,7	0,326	0,298	23618,23	7238	57,8
	44,7	0,848	0,8	9352,19		
	34	0,581	0,558	12295,37		
	82	1,318	1,211	5098,08		
	29	0,436	0,419	14415,27		
	53,4	0,859	0,76	7828,52		
Цикл 7	22	0,592	0,587	19001,94	14861	28,1
	16	0,421	0,415	26127,67		
	29,6	0,733	0,682	14123,06		
	45	0,711	0,595	9289,84		
	29	0,383	0,358	14415,27		

Таблица 1. (Продолжение).

	β (изм.)	f_{\min}	f_{\max}	U_{br} (расчет), В	U_{br} (изм.), В	β (расчет)
Цикл 8	64,4	1,309	1,258	6491,35	8531	49,0
	28	0,544	0,522	14930,10		
	50	0,973	0,797	8360,85		
	372	7,665	7,287	1123,77		
	55,3	1,083	0,798	7559,54		
	45	0,885	0,825	9289,84		
	65	1,098	0,937	6431,43		
	38	0,697	0,669	11001,12		
	21	0,506	0,478	19906,80		
	16,2	0,398	0,388	25805,11		
	7,7	0,174	0,171	54291,26		
Цикл 9	11,45	0,299	0,287	36510,28	10326	40,5
	44,25	1,042	0,995	9447,29		
	65,4	1,466	1,216	6392,09		
	36,25	0,973	0,792	11532,21		
	50,86	1,109	0,995	8219,48		
	31,23	0,669	0,657	13385,93		
	101,2	2,113	2,085	4130,86		
	21,2	0,41	0,368	19719,00		
Цикл 10	22,6	0,844	0,778	18497,47	15785	26,5
	33,42	1,145	1,066	12508,76		
	28,95	1,033	0,873	14440,16		
	44,12	1,195	1,167	9475,13		
	8,6	0,256	0,253	48609,62		
	60,54	1,702	1,636	6905,23		
	18,6	0,511	0,505	22475,42		

Очевидно, что в условиях проведенных нами экспериментов наблюдаемая автоэлектронная эмиссия была весьма нестабильной. Как следствие, из-за выраженной нестабильности тока эмиссии I_{FE} линейная аппроксимация ВАХ также становится неоднозначной. В рамках каждого проведенного

экспериментального цикла можно было выделить несколько линейных трендов на автоэмиссионной ВАХ в ФН-координатах. Каждый из этих трендов обрабатывался отдельно в соответствии с методиками, описанными в Разделе 3 настоящей статьи. Результаты обработки представлены в Таблице 1. Нестабильность автоэмиссионного тока также отмечалась нами в работе [4]. Нужно отметить, что, по нашему мнению, данная нестабильность не была связана с недостаточным уровнем вакуума в установке (не хуже 10^{-6} Па), а скорее была связана с неконтролируемыми процессами на поверхности катода. По существу, данная нестабильность эмиссии явилась также одной из причин проведения описываемого исследования. Нужно также отметить, что, исходя из глобальных целей нашего исследования (см. Введение), мы не могли проводить специальную подготовку катода (например, его прогрев) перед измерениями, чтобы обеспечить стабильный эмиссионный ток.

Однако анализ данных, представленных в Таблице 1, показывает, что для всех экспериментальных циклов, кроме цикла 0, удавалось экспериментально определить такой коэффициент β , который позволял оценить пробивное напряжение с точностью лучше 90 %. При этом оказалось, что наилучшее совпадение между расчетными и измеренными значениями U_{br} наблюдалось для значений β , которые были определены по линейным аппроксимациям автоэмиссионных ВАХ в ФН-координатах с показателем ортодоксальности эмиссии f в диапазоне 0,7–1,0. Согласно работе [10], данные значения f попадают в «явно неразумный» диапазон ортодоксальности автоэлектронной эмиссии. Более того, большинство значений β с показателем ортодоксальности в «разумном» диапазоне f от 0,15 до 0,45 давали сильно завышенные значения U_{br} . В свою очередь, значения β при $f > 1,0$ сильно занижали оцениваемое значение U_{br} . То есть, обнаружено, что существовал диапазон значений f , в пределах которого оценки U_{br} по (5) для соответствующего значения β с достаточно высокой точностью совпадали с измеренными значениями U_{br} . Для экспериментального цикла 0 отсутствие совпадения оцененного и измеренного значения U_{br} , по всей видимости, связано с тем, что данный цикл проводился

сразу после постановки катода в камеру и ее откачки. Логично предположить, что на данном этапе поверхность катода содержала достаточно большое число адсорбированных газов, диэлектрических пленок и, возможно, пыли или других загрязнений. В результате пробивные характеристики рассматриваемого промежутка, по всей видимости, зависели скорее от поверхностных «примесных» включений, чем от микрорельефа.

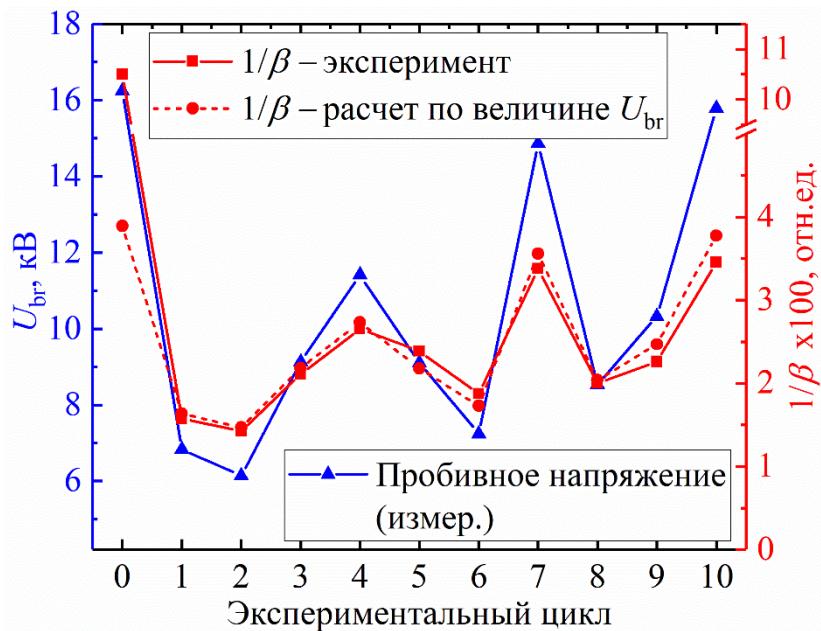


Рис. 3. Значения U_{br} , измеренные в каждом экспериментальном цикле, и значения обратного коэффициента усиления электрического поля $1 / \beta$ на катоде для каждого цикла. Здесь учтены только те значения β , которые давали оценку U_{br} , наиболее близкую к экспериментально измеренному значению.

На Рис. 3 представлены график изменения измеренного значения пробивного напряжения по ходу экспериментов, а также величины $1 / \beta$ для соответствующих экспериментальных циклов. Для $1 / \beta$ приводятся как значения, вычисленные по (5) с учетом U_{br} , так и значения из Таблицы 1, которые соответствуют наиболее точной оценке пробивного напряжения в данном экспериментальном цикле. Из графика видно, что уменьшение пробивного напряжения всегда соответствовало увеличению коэффициента β , и наоборот: увеличение пробивного напряжения соответствует уменьшению β . Для подтверждения наличия корреляции между величинами U_{br} и β (здесь рассматривались значения β , полученные из автоэмиссионного эксперимента) был вычислен коэффициент корреляции по Пирсону, который оказался равным

-0,94. То есть между величинами U_{br} и β действительно наблюдалась сильная обратная корреляция.

С точки зрения оценки состояния поверхности катодов вакуумных высоковольтных промежутков с учетом глобальной цели разработки методики восстановления электрической прочности таких промежутков мы считаем, что именно значения β , которые с высокой точностью коррелируют с пробивным напряжением промежутка, несут в себе наиболее важную информацию о состоянии поверхности катода. Кроме того, полученные нами результаты позволяют сделать вывод о возможности разработки неразрушающей методики прогнозирования статического пробивного напряжения вакуумных промежутков U_{br} с точностью порядка 90 %. При этом методика может учитывать только автоэмиссионные свойства рассматриваемого промежутка, то есть в данном случае отсутствует необходимость непосредственного проведения тестов пробивного напряжения. В частности, для промежутков с медными катодами методика может включать в себя следующие шаги: 1) исследование автоэмиссионных ВАХ рассматриваемого промежутка; 2) определение локальных коэффициентов усиления электрического поля β и соответствующих показателей ортодоксальности автоэлектронной эмиссии f ; 3) выбор значений β в диапазоне значений f от 0,7 до 1,0; 4) расчет U_{br} по формуле (5) с учетом $E_{\text{br}} = 10 \times 10^7$ В/см и выбранных значений β . Важно подчеркнуть, что данный подход не ограничивается простым выбором наибольшего значения β из полученного набора. Возвращаясь к Таблице 1, можно заметить, что для значений β при f за пределами диапазона 0,7-1,0 существовали значения β больше того, которое давало наилучшую оценку U_{br} . Следовательно, описанная методика представляется более точной, чем тривиальный подход, заключающийся в рассмотрении самых высоких значений β . Интересно отметить, что мы получали «истинные» значения β в широком диапазоне токов автоэмиссии, в том числе в субнаноамперном диапазоне, далеко от предпробойного режима.

Однако следует сделать несколько замечаний. Прежде всего, рассмотрение значений β в диапазоне показателя ортодоксальности автоэлектронной эмиссии f от 0,7 до 1,0, по всей видимости, не гарантирует обеспечение относительной погрешности оценки пробивного напряжения на уровне не более 10 % в силу достаточно большой ширины принятого диапазона f . Для практического использования диапазон «правильных» значений f следует несколько сузить, чтобы обеспечить более строгий критерий выбора значения β . Кроме того, применимость методики к загрязненным или недегазированным катодам также может быть сомнительной (см. результаты для экспериментального цикла 0) из-за изменения механизма пробоя. Также для верификации методики необходимо провести ее тестирование для различных материалов катода и различных геометрий вакуумного зазора, чтобы убедиться в универсальности выявленных закономерностей. Тем не менее, мы считаем, что полученные нами результаты важны для области электровакуумного машиностроения и могут быть использованы непосредственно при проектировании и испытаниях мощных вакуумных электрофизических устройств.

Заключение

В данной работе экспериментально исследована связь между автоэмиссионными свойствами вакуумного промежутка и электрической прочностью этого же промежутка. Катод промежутка представлял собой тонкую иглу из чистой меди длиной 15 мм и диаметром 60 мкм со сферической вершиной; диаметр вершины составлял 70 мкм. В качестве величин, характеризующих автоэмиссионные свойства промежутка, рассматривались локальный коэффициент усиления электрического поля на катоде β и показатель ортодоксальности автоэлектронной эмиссии f , предложенный Форбсом [10]. Электрическая прочность вакуумного промежутка описывалась статическим пробивным напряжением $U_{\text{бр}}$. Установлено, что при заданной величине пробивной напряженности электрического поля $E_{\text{бр}} = 10 \times 10^7$ В/см существовал такой диапазон значений показателя f , в котором соответствующие значения β

позволяли оценить U_{br} с относительной погрешностью не хуже 10 %. При этом диапазон «правильных» значений f был от 0,7 до 1,0, что, согласно работе [10], соответствует «явно неразумному» диапазону ортодоксальности автоэлектронной эмиссии. В рамках отдельных экспериментальных циклов с последовательным снятием автоэмиссионных вольт-амперных характеристик и испытанием пробивного напряжения для каждого цикла было обнаружено хотя бы одно значение β , попадающее в диапазон f от 0,7 до 1,0 и позволяющее оценить значение U_{br} с погрешностью не более 10 % относительно величины U_{br} , непосредственно измеренной в том же экспериментальном цикле. Исходя из полученных результатов, мы сделали вывод, что в условиях нашего эксперимента именно значения β , попадающее в диапазон f от 0,7 до 1,0, характеризовали состояние поверхности катода и определяли электрическую прочность рассматриваемого вакуумного промежутка. Полученные результаты также позволяют предположить, что возможно разработать методику неразрушающего контроля электрической прочности вакуумных промежутков, в частности, определения пробивного напряжения с точностью порядка 90 % и более. Такая методика может опираться исключительно на автоэмиссионные свойства рассматриваемого промежутка. При этом предлагаемая методика может оказаться точнее тривиального подхода, в рамках которого при оценке пробивного напряжения учитывается максимальное измеренное значение β , которое дает наименьшее пробивное напряжение. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы при проектировании вакуумных электрофизических приборов или при оценке электрической прочности вакуумных промежутков после проведения процедуры кондиционирования электродов.

Литература

1. Zemskov Y.A., Mamontov Y.I., Uimanov I.V. Investigation of Changes in the Field Emission Characteristics of the Eroded Cathode Surface after Submicrosecond Vacuum Arc Discharges with Different Current Amplitudes // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – V. 87. – No. Suppl 2. – P. S202-S209. <https://doi.org/10.1134/S1062873823704610>
2. Mamontov Y.I. et al. Conditioning a Copper Cathode Surface by High-Voltage Subnanosecond Pulses // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2024 – V. 52. – No. 9 – P. 4439-4449. <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3374898>
3. Zemskov Y.A., Mamontov Y.I., Uimanov I.V. Study of the Parameters of the Electrode Surface Conditioning Process in a Multi-Mode Experimental Setup // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2025. – V. 89. – No. 9. – P. 1565-1572. <https://doi.org/10.1134/S1062873825712243>
4. Земсков Ю.А., Мамонтов Ю.И., Михайлов П.С., Музюкин И.Л., Уйманов И.В. Методика измерения субнаноамперных автоэмиссионных токов // Журнал радиоэлектроники. – 2024. – №. 12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.3>
5. Mesyats G.A., Proskurovsky D.I. Pulsed electrical discharge in vacuum / Berlin: Springer-Verlag. – 1989. <https://link.springer.com/book/9783642837005>
6. Marić R. et al. Electrical breakdown mechanisms in vacuum diodes // Vacuum. – 2010. – V. 84. – No. 11. – P. 1291-1295. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2010.02.005>
7. Li Y. et al. Influence of material properties and surface conditions of metal electrodes on vacuum breakdown characteristics in small gaps // Journal of Applied Physics. – 2025. – V. 138. – No. 8. – Art. No. 083301. <https://doi.org/10.1063/5.0276729>
8. Hantsche E. et al. Erosion of metal cathodes by arcs and breakdowns in vacuum // Journal of Physics D: Applied Physics. – 1976. – V. 9. – No. 12. – P. 1771. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/9/12/016>

9. Kranjec P., Ruby L. Test of the critical theory of electrical breakdown in vacuum // Journal of Vacuum Science and Technology. – 1967. – V. 4. – No. 2. – P. 94-96. <https://doi.org/10.1116/1.1492528>
10. Forbes R.G. Development of a simple quantitative test for lack of field emission orthodoxy // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2013. – V. 469. – No. 2158. – Art. No. 20130271. <https://doi.org/10.1098/rspa.2013.0271>
11. Fowler R.H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields // Proceedings of the royal society of London. Series A, containing papers of a mathematical and physical character. – 1928. – V 119. – No. 781. – P. 173-181. <https://doi.org/10.1098/rspa.1928.0091>
12. Houston J.M. The slope of logarithmic plots of the Fowler-Nordheim equation // Physical review. – 1952. – V. 88. – No. 2. – P. 349. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.88.349>
13. Jayantha P.A., Turner I.W. A comparison of gradient approximations for use in finite-volume computational models for two-dimensional diffusion equations // Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals. – 2001. – V. 40. – No. 5. – P. 367-390. <https://doi.org/10.1080/104077901753243179>
14. Schnack D.D. et al. A finite-volume algorithm for three-dimensional magnetohydrodynamics on an unstructured, adaptive grid in axially symmetric geometry // Journal of Computational Physics. – 1998. – V. 140. – No. 1. – P. 71-121. <https://doi.org/10.1006/jcph.1998.5873>

Для цитирования:

Земсков Ю.А., Мамонтов Ю.И., Уйманов И.В. Связь напряжения пробоя вакуумного промежутка и его автоэмиссионных характеристик // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.1.8>