

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.12.3>

УДК: 537.533.2, 53.083.98, 53.082.722.4

## МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ СУБНАНОАМПЕРНЫХ АВТОЭМИССИОННЫХ ТОКОВ

Ю.А. Земсков, Ю.И. Мамонтов, П.С. Михайлов,  
И.Л. Музюкин, И.В. Уйманов

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

Статья поступила в редакцию 19 ноября 2024 г

**Аннотация.** В статье описывается разработанная и испытанная методика измерения тока автоэлектронной эмиссии в широком диапазоне, составляющем практически 7-8 порядков измеряемой величины. Использованная экспериментальная установка была создана на основе высоковакуумной камеры с остаточным давлением газа не хуже  $10^{-6}$  Па. Автоэмиссионный катод представлял собой тонкую иглу из чистой меди марки М0 с закругленным полусферическим острием. Диаметр катода составлял  $\sim 70$  мкм, радиус закругления вершины –  $\sim 35$  мкм, длина катода –  $\sim 15$  мм. Анодом выступал плоский люминесцентный экран. Измерение тока эмиссии проводилось в цепи катода. Для измерения тока использовались два подхода. В диапазоне токов 1 нА – 10 мкА использовался обычный токовый шунт сопротивлением 1 МОм. Для измерения тока эмиссии ниже 1 нА использовался метод накопления зарядки конденсатора током автоэмиссии в течение некоторого фиксированного периода времени. Затем конденсатор подключался ко входу осциллографа. При этом регистрировался сигнал разряда конденсатора через входное сопротивление осциллографа. Амплитуда сигнала разряда давала информацию о токе эмиссии, усредненном за период зарядки.

Используя данную методику, удалось измерить ток эмиссии вплоть до  $\sim 0,2$  пА. Также были исследованы границы применимости и ограничения методики.

**Ключевые слова:** автоэлектронная эмиссия, полевая эмиссия, эмиссионный ток, измерение тока, конденсаторы.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭФ УрО РАН, тема 122011200367-7.

**Автор для переписки:** Мамонтов Юрий Игоревич, [mamontov@iep.uran.ru](mailto:mamontov@iep.uran.ru)

## **Введение**

В настоящее время в Институте электрофизики УрО РАН проводится исследование влияние высоковольтных импульсов с различными временными и амплитудными параметрами на поверхности металлических катодов [1,2]. Объектом исследования является микрорельеф поверхности катода после воздействия высоковольтного импульса. Целью исследования является разработка методики сглаживания поверхности катода и восстановления электрической прочности высоковольтных вакуумных промежутков после вакуумных пробоев путем воздействия на катод серией субнаносекундных высоковольтных импульсов. Процесс сглаживания поверхности катода иногда называют «кондиционированием». В случае использования высоковольтных импульсов процесс кондиционирования заключается в удалении микронеоднородностей поверхности катода, обладающих высокой эмиссионной способностью (выступов, острий, трещин, диэлектрических загрязнений, пыли и т.п.), с помощью электрических микровзрывов, вызванных эмиссионной активностью потенциальных центров иницирования пробоя вакуумного промежутка.

Одной из задач, решаемых в ходе исследования, является разработка экспериментальной методики определения локального коэффициента усиления напряженности электрического поля ( $\beta$ -фактора) микронеоднородностями поверхности образца на основе измерения вольт-амперных характеристик автоэлектронной эмиссии. Это позволяет «на ходу» получать информацию

о состоянии поверхности катода на отдельных этапах эксперимента без нарушения высоковакуумных условий. Однако обнаружено, что минимальный ток, который может быть надежно измерен с использованием токового шунта сопротивлением 1 МОм и прецизионного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), составляет не менее 0,5 нА. Между тем, при определенных условиях ток автоэлектронной эмиссии может оказаться меньше данной величины даже при максимально достижимом напряжении на автоэмиссионном промежутке ~30 кВ. Для используемой экспериментальной установки напряжение ограничено максимальным выходным напряжением используемого высоковольтного источника питания и электрической прочностью входных изоляторов вакуумной камеры. Малое значение тока эмиссии является следствием малой величины коэффициента  $\beta$ . Установлено, что низкие значения  $\beta$  характерны для исследуемых образцов непосредственно после их изготовления методом вакуумной плавки или после кондиционирования с хорошо подобранными параметрами. С другой стороны, обнаружено, что металлические катоды из меди имеют крайне нестабильные эмиссионные свойства при токе эмиссии ~10 нА и более. Это вызывает стремление измерять ток эмиссии при меньших величинах, например ~1 нА и ниже. Следовательно, необходимо разработать надежную методику измерения тока полевой эмиссии существенно меньше 1 нА.

В данной статье описывается методика измерения тока автоэлектронной эмиссии субнаноамперного диапазона. Методика предполагает использование обычного конденсатора для накопления заряда автоэмиссионного тока и последующее измерение напряжения на конденсаторе. При известных параметрах конденсатора это позволяет рассчитать значение тока автоэмиссии, усредненное за время накопления. Используя эту методику, нам удалось измерить ток эмиссии ниже 1 пА. Предложенная методика может быть полезной при исследованиях автоэлектронной эмиссии и в других приложениях физической электроники.

## 1. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на Рис. 1. Экспериментальная установка собрана на базе высоковакуумного поста УСУ-4, обеспечивающего давление остаточных газов в камере не хуже  $10^{-6}$  Па. Установка работала в режиме измерения тока автоэлектронной эмиссии. В качестве автоэмиттера выступала тонкая игла, изготовленная из высокочистой меди марки М0 (99,99% Cu). Конечный кончик иглы был скруглен полусферой. Диаметр иглы составлял  $\sim 70$  мкм, соответствующий радиус полусферического кончика –  $\sim 35$  мкм. Данный эмиттер был одним из образцов, используемых в исследованиях по кондиционированию медных катодов субнаносекундными высоковольтными импульсами (см. [2]). Электронная эмиссия исследовалась в автоэмиссионном проекторе, включающем катодный узел (игла) и анодный узел – плоский люминесцентный экран (ЛЭ) для визуализации катодных эмиссионных центров. Вместе катодная игла и анодный экран образовывали исследуемый автоэмиссионный электродный промежуток (ЭП).

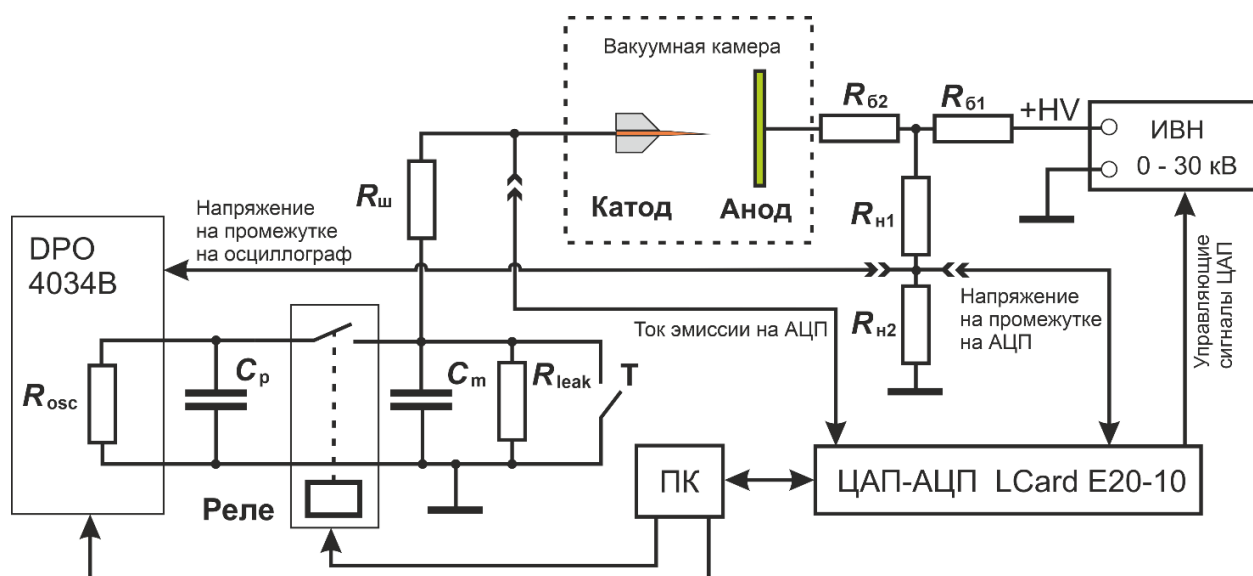


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки.

На ЭП подавалось напряжение от высоковольтного источника (ИВН). Максимальное выходное напряжение ИВН составляло +30 кВ относительно «земли», максимальный ток – 5 мА. Выходной ток источника дополнительно ограничивался резистором  $R_{б1}$  сопротивлением 11,3 МОм. Кроме того, в анодной

цепи имелся дополнительный балластный резистор  $R_{62}$  сопротивлением 0,7 МОм для создания отрицательной обратной связи, затрудняющей пробой ЭП в процессе работы установки. Стоит отметить, что данная обратная связь актуальна только при автоэмиссионном токе порядка 1 мкА и выше. В исследуемом в данной работе диапазоне токов ниже 10 нА этот резистор практически не оказывал влияния на работу установки.

Величина напряжения, подаваемого на ЭП, измерялась с помощью резистивного делителя напряжения  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$ . Общее сопротивление делителя было порядка 1 ГОм. Расчетный коэффициент делителя составил 1:11736 и 1:20873, соответственно, для входного сопротивления измерительного устройства 10 МОм и 1 МОм. Автоэмиссионный ток измерялся в катодной цепи с помощью резистивного шунта  $R_{ш}$  сопротивлением 1 МОм. Этот же шунт использовался в наших предыдущих работах [1-5], где в качестве измерителя падения напряжения на  $R_{ш}$  выступал модуль ЦАП-АЦП LCard E20-10. Далее будем называть этот режим регистрации тока автоэмиссии «резистивным». В рамках данной статьи для измерения автоэмиссионного тока больше 0,5 нА также был использован данный модуль ЦАП-АЦП. Он имеет 14-разрядный АЦП с полосой пропускания 1 МГц и частотой дискретизации 10 МГц, входное сопротивление модуля – 10 МОм. При исследовании автоэмиссионных вольт-амперных характеристик (АЭ-ВАХ, ВАХ) модуль с помощью разработанного программного обеспечения управлял ИВН одновременно измерял напряжение, подаваемое на ЭП, и ток эмиссии. Каждая точка полученной ВАХ представляла собой результат усреднения соответствующего сигнала напряжения и тока в течение 100 мс. При использовании шунта  $R_{ш} = 1$  МОм чувствительность АЦП модуля позволяла надежно регистрировать ток эмиссии не менее 0,5 нА. Максимальный измеряемый ток составлял ~3 мкА и был ограничен максимальным входным напряжением АЦП. При необходимости максимальная величина измеряемого тока могла быть увеличена путем уменьшения сопротивления  $R_{ш}$ .

Для расширения диапазона измеряемых токов в субнаноамперную область был разработан измерительный комплекс на основе конденсаторов – конденсаторный измерительный комплекс (КИК). Принцип работы КИК заключался в зарядке калиброванного конденсатора измеряемым автоэмиссионным током в течение определенного периода времени и последующей разрядке конденсатора через входное сопротивление осциллографа, регистрирующего сигнал разрядки конденсатора. Далее проводился анализ полученной осциллограммы и оценивался накопленный заряд конденсатора. Для этого определялось максимальное напряжение на осциллограмме разрядки. Управление экспериментальной установкой и последующие расчеты тока осуществлялись автоматизировано с использованием разработанного программного обеспечения. В данной статье описанная процедура обозначается как «емкостной режим» измерения автоэмиссионного тока.

Электрическая схема КИК (см. Рис. 1) включала измерительный конденсатор с известной емкостью  $C_m$ . Конденсатор подключался последовательно к ЭП в катодной цепи и параллельно – к осциллографу. В данной работе использовался осциллограф Tektronix DPO 4034B (350 МГц, 2,5 Гвыб/с). При измерении тока автоэмиссии для накопления заряда  $C_m$  цепь «осциллограф – измерительный конденсатор» размыкалась с помощью обычного нормально замкнутого электромеханического реле. Время  $t$ , на которое размыкалось реле, тщательно контролировалось программным обеспечением для точного расчета величины тока автоэмиссии. Анализ работы реле показал, что джиттер цикла его включения/выключения составлял  $\sim 1$  мс. Учитывая, что типичное время  $t$  варьировалось от  $\sim 10$  с до  $\sim 300$  с, относительная погрешность определения времени заряда конденсатора не превышала  $\sim 0,01\%$ .

Переключение между резистивным и емкостным режимами измерения тока осуществлялось с помощью механического тумблера (Т). При этом работа в емкостном режиме не требовала исключения из цепи измерительных и балластных сопротивлений, так как в интересующем диапазоне токов  $< 1$  нА падение напряжения на них было  $< 1$  мВ, поэтому им пренебрегалось. С другой

стороны, зарядка конденсатора  $C_m$  до некоторого напряжения  $U$  приводила к соответствующему уменьшению падения напряжения на ЭП. Согласно теории Фаулера-Нордгейма, изменение напряжения на автоэмиссионном промежутке должно вызывать нелинейное изменение тока полевой эмиссии. Чтобы свести данный эффект к минимуму, время зарядки конденсатора ограничивалось таким образом, чтобы напряжение  $U$  на конденсаторе было на уровне  $\sim 1$  В или ниже. Даже при минимальном напряжении на ЭП  $\sim 3$  кВ такая величина  $U$  давала относительное уменьшение напряжения на ЭП не более чем на 0,03%. Поэтому нелинейным уменьшением тока эмиссии можно было пренебречь.

В емкостном режиме измерения тока автоэмиссии электрическая цепь имела по крайней мере два неустраняемых паразитных параметра, напрямую влияющих на расчетную величину автоэмиссионного тока. Во-первых, это конечное сопротивление утечки  $R_{\text{leak}}$ , включенное параллельно конденсатору  $C_m$ . При любом ненулевом напряжении  $U$  на  $C_m$  наличие  $R_{\text{leak}}$  вызывало ненулевой ток утечки, разряжающий конденсатор, что приводило к занижению расчетного значения тока. Величина  $R_{\text{leak}}$  была обусловлена суммарным конечным сопротивлением диэлектрика внутри конденсатора и паразитного сопротивления утечки всех изоляторов, присутствующих в кабелях и разъемах установки. Вторым неустраняемым паразитным параметром была конечная емкость  $C_p$  цепи осциллографа, в которой осуществлялась регистрация сигнала разряда конденсатора. Значение  $C_p$  представляло собой сумму входной емкости осциллографа и емкости кабелей, соединяющих  $C_m$  и осциллограф. Как и сопротивление утечки  $R_{\text{leak}}$ , емкость  $C_p$  была подключена параллельно  $C_m$ , однако параметр  $C_p$  оказывал влияние только непосредственно в момент замыкания реле и подключения  $C_m$  к цепи осциллографа. В этот момент происходило перераспределение накопленного заряда между  $C_m$  и  $C_p$ . В результате измеренное значение напряжения на  $C_m$  было меньше реального. Разница между измеренным напряжением и реальным напряжением тем больше, чем ближе величина емкости  $C_m$  была к величине  $C_p$ . Более подробно данный вопрос рассматривается в следующем разделе.

Кроме того, было обнаружено, что емкость  $C_m$  может заметно заряжаться внешними электромагнитными наводками. Особенно ярко данный эффект проявлялся для конденсаторов малой емкости  $<1$  нФ. «Дозарядка» измерительного конденсатора за счет внешних наводок приводила к завышению расчетного значения тока автоэмиссии. Данная проблема была решена путем полного электромагнитного экранирования всех узлов экспериментальной установки. В результате наведенное на  $C_m$  напряжение не превышало собственный шум осциллографа.

## 2. Теоретическое описание «емкостного режима» измерения тока

Работу схемы в емкостном режиме измерения тока можно разделить на два этапа. Первый этап – зарядка конденсатора  $C_m$  током полевой эмиссии  $I_{FE}$ . На данном этапе реле размыкало цепь осциллографа и измерительного конденсатора. Поскольку при напряжении  $U_{EG}$  на ЭП  $\sim 10$  кВ и токе эмиссии  $I_{FE} < 1$  нА суммарное падение напряжения на всех элементах катодной цепи (см. Рис. 1) было  $\sim 1$  В и менее, напряжение  $U_{EG}$  считалось не зависящим от напряжения зарядки конденсатора  $U_m$  (по крайней мере, в диапазоне значений  $U_m \leq 1$  В). Поэтому при зарядке емкости  $C_m$  величина  $I_{FE}$  полагалась постоянной. С этой точки зрения ЭП можно воспринимать как источник тока для зарядки конденсатора. С учетом данного допущения можно записать уравнение для первого закона Кирхгофа для этапа зарядки конденсатора:

$$I_{FE} = C_m \frac{dU_m}{dt} + \frac{U_m}{R_{leak}}. \quad (1)$$

Решение данного уравнения:

$$U_m = A \exp \left[ -\frac{t}{R_{leak} C_m} \right] + I_{FE} R_{leak}, \quad (2)$$



где  $A$  – константа, зависящая от начальных условий. Предположим, что до зарядки при  $t = 0$  начальное напряжение на конденсаторе было  $U_0$ . Тогда для  $A$  можно записать следующее:

$$U_m(t=0) = U_0 = A + I_{FE} R_{leak}, \quad A = U_0 - I_{FE} R_{leak}. \quad (3)$$

Начальное напряжение  $U_0$  определяется падением напряжения на входном сопротивлении осциллографа  $R_{osc}$ . Это падение напряжения вызвано протеканием тока эмиссии  $I_{FE}$  через осциллограф в то время, когда измерительная цепь и цепь зарядки конденсатора еще не были разомкнуты с помощью реле. Поэтому  $U_0$  можно рассчитать следующим образом:

$$U_0 = R_{osc} I_{FE}. \quad (4)$$

Следовательно, напряжение зарядки конденсатора  $U_m$  может быть вычислено как:

$$U_m = I_{FE} (R_{osc} - R_{leak}) \exp\left[-\frac{t}{R_{leak} C_m}\right] + I_{FE} R_{leak}. \quad (5)$$

Из (5) выражение для  $I_{FE}$  имеет следующий вид:

$$I_{FE} = \frac{U_m}{R_{osc} \exp\left[-\frac{t}{R_{leak} C_m}\right] + R_{leak} \left(1 - \exp\left[-\frac{t}{R_{leak} C_m}\right]\right)}. \quad (6)$$

Здесь и далее время  $t$  следует понимать как время зарядки конденсатора.

Теперь рассмотрим этап разрядки конденсатора через входное сопротивление осциллографа. К этому моменту  $C_m$  заряжен до напряжения  $U_m$ , а паразитная емкость  $C_p$  разряжена через входное сопротивление осциллографа  $R_{osc}$ . При замыкании реле первый происходит перераспределение заряда между  $C_m$  и  $C_p$ . Ток перераспределения заряда ограничивается практически нулевым сопротивлением кабелей, соединяющих  $C_m$  и  $C_p$ . Поэтому без потери точности можно считать, что постоянная времени этого переходного процесса имеет

исчезающе малую величину (по крайней мере, по сравнению с постоянной времени  $(C_m + C_p) \times R_{osc}$ ), и процесс предполагался мгновенным. Для учета перераспределения заряда при измерении  $U_m$  используется следующее выражение:

$$U_m = U_{osc} \left( 1 + \frac{C_p}{C_m} \right). \quad (7)$$

Здесь  $U_{osc}$  – реальное напряжение, измеренное осциллографом. Для описываемой экспериментальной установки  $C_p$  была оценена величиной  $\sim 140$  пФ.

Кроме того, имелся второй переходный процесс, связанный с началом прохождения тока полевой эмиссии  $I_{FE}$  через входное сопротивление  $R_{osc}$  и соответствующей зарядкой емкости  $C_m + C_p$ . Его постоянная времени порядка  $R_{osc} \times (C_m + C_p)$ , и, строго говоря, она не является пренебрежимо малой. Учет этого процесса существенно усложняет анализ схемы. Однако предполагалось, что влияние этого процесса на измерение  $U_m$  будет значительным только тогда, когда падение напряжения на  $R_{osc}$ , вызванное протеканием тока эмиссии, будет сопоставимо с  $U_m$  ( $\sim 1$  В). В рамках проведенных экспериментов в емкостном режиме типичные значения  $I_{FE}$  были ниже 1 нА, поэтому падение напряжения на  $R_{osc}$  не превышало  $\sim 1$  мВ. Фактически, в большинстве случаев это падение напряжения было меньше собственного шума осциллографа. Поэтому предполагается, что этим процессом можно было пренебречь. Однако, если в эксперименте  $I_{FE}$  значительно выше  $\sim 10$  нА, переходный процесс следует учитывать.

### 3. Ход эксперимента

Ход эксперимента в резистивном режиме измерения автоэмиссионного тока подробно описан в наших предыдущих работах [1-5]. Для емкостного режима был разработан автоматизированный алгоритм эксперимента. Алгоритм подразумевал использование специально разработанного программного обеспечения (ПО), управляющего ИВН и переключением между стадиями

зарядки и разрядки конденсатора с помощью реле. Кроме того, ПО устанавливало параметры горизонтальной и вертикальной развертки осциллографа, управляло его запуском и сохранением полученных осциллограмм сигнала разрядки конденсатора.

В ходе эксперимента ПО сначала устанавливало величину выходного напряжения ИВН. Затем ПО оценивало требуемое время зарядки  $t$  в соответствии с информацией, предоставленной пользователем: значениями  $C_m$ ,  $C_p$  и  $R_{leak}$ ; ожидаемым значением  $I_{FE}$ ; желательным значением  $U_{osc}$  (обычно  $\sim 1$  В). Расчет значения  $t$  выполнялся с помощью уравнения (6), переписанного для  $t$ . Соответственно, чем ниже были  $U_{EG}$  и ожидаемый  $I_{FE}$ , тем большее значение  $t$  устанавливалось для обеспечения зарядки  $C_m$  до желаемого значения  $U_{osc}$ . Затем программное обеспечение устанавливало параметры осциллографа в соответствии со значениями  $t$  и  $U_{osc}$ . Развертка времени осциллографа устанавливалась таким образом, чтобы длительность записи была на порядок больше параметра  $R_{osc}C_m$ . После этого шага установка была готова к измерениям, программное обеспечение запускало осциллограф, размыкало реле и начинало обратный отсчет времени. По истечении времени  $t$  программное обеспечение замыкало реле и сохраняло осциллограмму разрядки конденсатора, а также осциллограмму сигнала напряжения  $U_{EG}$  с высоковольтного делителя, после чего описанная процедура повторялась. Для каждого значения  $U_{EG}$  процедура повторялась несколько раз для набора статистики по величине  $I_{FE}$  для данного значения  $U_{EG}$ . Более того, программное обеспечение могло повторять процедуру, если сигнал разряда конденсатора оказывался слишком низким или слишком высоким для надежной интерпретации. После проведения всех требуемых измерений  $I_{FE}$  в заданном диапазоне значений  $U_{EG}$  программное обеспечение автоматически анализировало сохраненные осциллограммы и вычисляло значения  $I_{FE}$ .

Для описанной процедуры была необходима предварительная оценка ожидаемых значений  $I_{FE}$  для расчета необходимого времени зарядки конденсатора  $t$ . Это позволяло избежать зарядки  $C_m$  до избыточных напряжений и, в то же время,

обеспечить хорошее отношение сигнал/шум для регистрируемых осциллограмм. Предварительная оценка зависимости  $I_{FE}$  от  $U_{EG}$  выполнялась в соответствии с данными, полученными в резистивном режиме измерения тока для  $I_{FE} > 1$  нА, путем экстраполяции данных в область значений  $U_{EG}$  для емкостного режима ( $I_{FE} < 1$  нА). При экстраполяции предполагалось, что зависимость  $I_{FE}$  от напряжения ЭП подчиняется закону Фаулера-Нордгейма для автоэлектронной эмиссии.

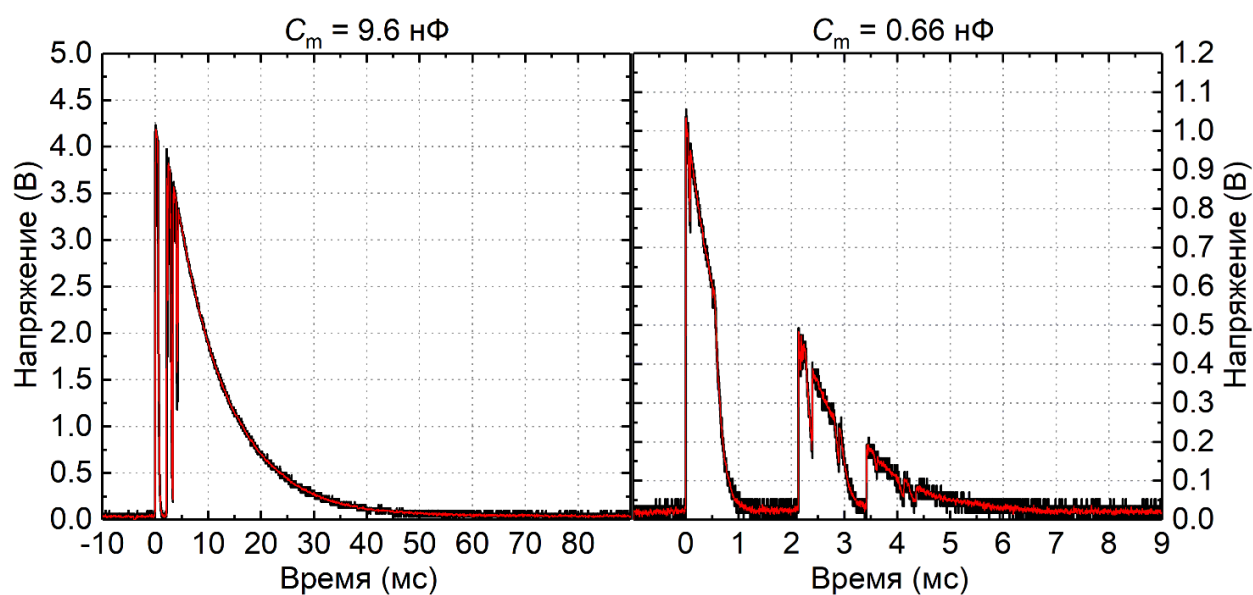


Рис. 2. Осциллограммы разрядки конденсаторов, заряженных током автоэлектронной эмиссии, после замыкания реле. Красная линия поверх осциллограммы – результат скользящего усреднения с «окном», равным 9.

На Рис. 2 показаны типичные осциллограммы разрядки конденсаторов с емкостями  $C_m = 9,6$  нФ и  $C_m = 0,66$  нФ. Форма сигнала соответствует типичной экспоненте RC-процесса. При этом на осциллограммах имеются многочисленные разрывы, вызванные «дребезгом» контактов реле в момент коммутации. «Дребезг» контактов является неизбежным свойством реле, которое трудно подавить. Однако мы считаем, что наличие «дребезга» не оказывало влияния на расчет  $I_{FE}$ .

Использованный подход к расчету  $I_{FE}$  по полученным осциллограммам заключался в определении значения  $U_m$ , представляющего собой напряжение зарядки емкости  $C_m$ . При анализе осциллограмм пиковое напряжение сигнала принималось в качестве измеренного значения  $U_{osc}$ , а затем с помощью

уравнения (7) рассчитывалась величина  $U_m$ . Величина эмиссионного тока  $I_{FE}$  рассчитывалась с использованием уравнения (6). При этом индуктивность цепи осциллографа предполагалась пренебрежимо малой. Для обеспечения корректности этого предположения длина коаксиального кабеля, соединяющего  $C_m$ , реле и вход осциллографа, бралась минимально возможной,  $\sim 1$  м. В результате фронт сигнала разрядки был намного короче 1 мс (на самом деле,  $< 10$  мкс). Поэтому мы считаем, что для процесса, занимающего от нескольких миллисекунд до нескольких десятков миллисекунд, конечной длительностью фронта сигнала можно пренебречь. Для уменьшения влияния шума сигнала напряжение  $U_{osc}$  оценивалось после процедуры скользящего усреднения («окно» усреднения бралось равным 9 точкам). Результат сглаживания осциллограммы показан на Рис. 3 в виде красной линии поверх снятой осциллограммы. Другим возможным подходом к расчету величины  $I_{FE}$  было интегрирование осциллограммы разрядки для прямого расчета заряда, накопленного  $C_m$ . Однако мы опасались, что «дребезг» реле мог дать значительную ошибку интегрирования, поэтому данный подход не использовался.

#### 4. Используемые конденсаторы и оценка погрешностей

В настоящей работе использовались два конденсатора: слюдяной с емкостью 9,6 нФ на напряжение до 250 В и пленочный полистирольный емкостью 0,66 нФ на напряжение до 500 В. Измерение емкости производилось с помощью универсального измерительного прибора В7-78/2. Относительная погрешность измерения емкости составила не более 3%. Для оценки  $R_{leak}$  конденсаторов и измерительной цепи в целом использовался метод измерения остаточного напряжения на конденсаторе. Для этого конденсаторы заряжались до некоторого тестового напряжения  $\sim 10$  В, а затем отключались с помощью реле одновременно от осциллографа и от источника питания. Через некоторое заданное время  $t$  испытуемый конденсатор разряжался через осциллограф, что позволяло измерить оставшееся напряжение. Данная процедура повторялась

несколько раз для одного и того же значения  $t$ . Сама величина  $t$  варьировалась от секунд до десятков минут. Для оценки  $R_{\text{leak}}$  использовался график измеренной зависимости остаточного напряжения на конденсаторе от  $t$ . График аппроксимировался экспоненциальной кривой. Это позволяло оценить постоянную времени  $R_{\text{leak}}C_m$  и, следовательно, найти значение  $R_{\text{leak}}$  для известной емкости конденсатора. В результате было обнаружено, что для конденсаторов с  $C_m = 9,6$  нФ и  $C_m = 0,66$  нФ сопротивление  $R_{\text{leak}}$  было не хуже 180 ГОм и 150 ГОм, соответственно. Эти значения  $R_{\text{leak}}$  соответствовали постоянным времени  $\sim 1700$  с и  $\sim 100$  с соответственно. Однако было обнаружено, что при использовании этих значений  $R_{\text{leak}}$  были получены явно завышенные значения  $I_{\text{FE}}$ . Поэтому значения  $R_{\text{leak}}$  для обоих конденсаторов были скорректированы в большую сторону до величины  $\sim 700$  ГОм (постоянные времени  $\sim 6700$  с и  $\sim 460$  с, соответственно). Мы считаем, что эта коррекция  $R_{\text{leak}}$  в сторону более высоких значений обоснована, поскольку используемые конденсаторы имели относительно высокое максимальное напряжение (250 В и 500 В). Естественно ожидать, что значения  $R_{\text{leak}}$  при  $U_m \sim 1..10$  В будут достаточно большими. По-видимому, использованный подход к оценке  $R_{\text{leak}}$  через цикл заряда-разряда конденсатора можно интерпретировать как оценку снизу величины  $R_{\text{leak}}$ . Кроме того, тот факт, что значения  $R_{\text{leak}}$  для обоих конденсаторов оказались довольно близкими, позволяет предположить, что величина  $R_{\text{leak}}$  определялась скорее утечкой в измерительной цепи, а не утечкой самого конденсатора.

Следует отметить, что для реального эксперимента ошибка в определении сопротивления  $R_{\text{leak}}$ , имеющего величину более 600 ГОм, вносит относительно небольшой вклад в погрешность определения  $I_{\text{FE}}$ . Это было связано с тем, что величина  $t$  времени зарядки конденсатора током автоэмиссии обычно выбиралось такой, чтобы отношение  $t / R_{\text{leak}}C_m$  было как можно меньшим. Поэтому время  $t$  не превышало  $\sim 250$  с. В результате, для  $C_m = 9,6$  нФ отношение  $t / R_{\text{leak}}C_m$  было ниже 0,04, а для  $C_m = 0,66$  нФ оно было не более  $\sim 0,54$ . Поэтому для  $C_m = 9,6$  нФ разрядом конденсатора через  $R_{\text{leak}}$  можно было вообще пренебречь, так как за время накопления заряда конденсатор не успевал заметно

разрядиться. Для  $C_m = 0,66$  нФ утечка конденсатора была заметной за время  $t$  около нескольких минут. Однако было обнаружено, что в условиях проведенных экспериментов изменение  $R_{\text{leak}}$  в диапазоне более 600 ГОм давало изменение  $I_{\text{FE}}$  в доли процента или единицы процентов. Данное изменение учитывалось при расчете погрешности.

Для всех экспериментальных данных, представленных в настоящей статье, доверительные интервалы рассчитывались как сумма двух слагаемых. Первое слагаемое представляло собой погрешность определения  $I_{\text{FE}}$ , обусловленную конечной точностью определения соответствующих электрических параметров, включенных в уравнения (6)-(7):  $C_m$ ,  $C_p$ ,  $R_{\text{leak}}$ ,  $t$ ,  $R_{\text{osc}}$ ,  $U_{\text{osc}}$  и т. д. Второе слагаемое – среднеквадратическое отклонение соответствующего набора экспериментальных данных. В условиях проведенных экспериментов первое слагаемое вносило  $\sim 5\%$  относительной погрешности в определение  $I_{\text{FE}}$ , а второе слагаемое – от  $\sim 4\%$  до  $\sim 50\%$  в зависимости от конкретного набора данных.

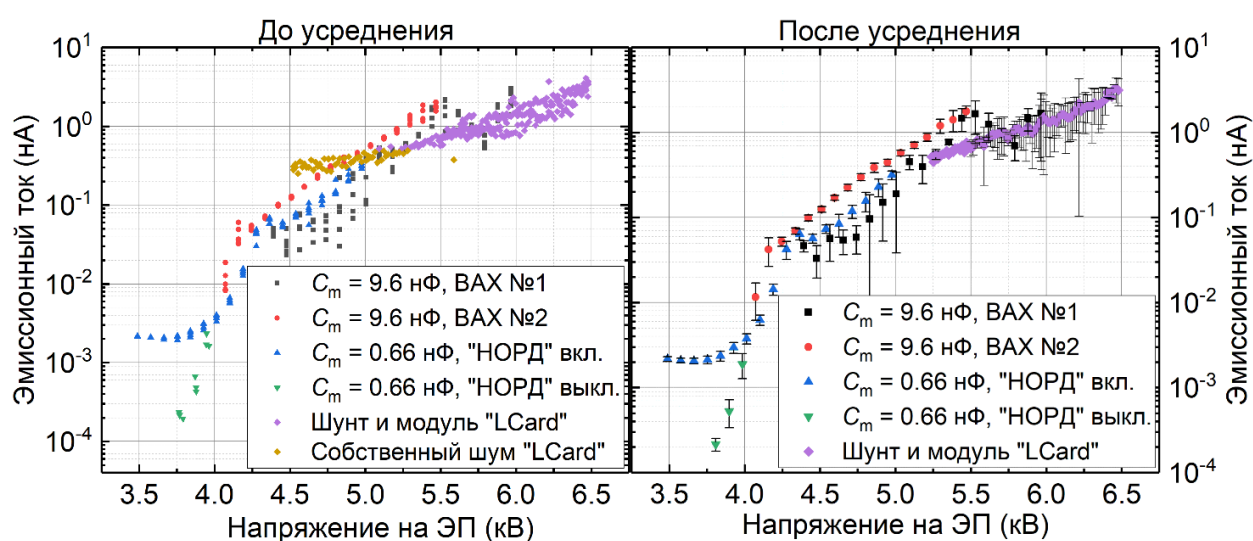


Рис. 3. Экспериментальные данные о токе автоэлектронной эмиссии для исследованного образца в диапазоне напряжений от 3,5 кВ до 6,5 Кв.

## 5. Результаты экспериментов

На Рис. 3 представлена компиляция экспериментальных данных по величине тока  $I_{\text{FE}}$ , полученных в ходе настоящего исследования как в резистивном режиме с использованием токового шунта и модуля ЦАП-АЦП «LCard», так и в емкостном режиме с использованием описанного выше подхода

с помощью двух конденсаторов с  $C_m = 9,6$  нФ и  $C_m = 0,66$  нФ. Для модуля «LCard» также указаны точки  $I_{FE}$  ниже уровня шума АЦП. Для каждого значения напряжения на ЭП  $U_{EG}$  в емкостном режиме измерение тока повторялось 3-5 раз. Левая диаграмма на Рис. 3 иллюстрирует полный набор полученных пар значений « $U_{EG} - I_{FE}$ ». В экспериментах диапазоны  $U_{EG}$  выбирались таким образом, чтобы обеспечить перекрытие наборов данных для разных режимов измерения тока и значений  $C_m$ . Справа на Рис. 3 представлена диаграмма, полученная в результате усреднения данных на левой диаграмме. Усреднение проводилось для значений  $I_{FE}$  отдельно в каждом режиме при фиксированной величине напряжения  $U_{EG}$ .

Было обнаружено, что ток эмиссии был крайне нестабилен: величина  $I_{FE}$  могла спонтанно изменяться в 2..3 раза для двух последовательных значений  $U_{EG}$ . Более того, ток эмиссии мог как увеличиваться, так и уменьшаться даже при постоянном напряжении  $U_{EG}$ . Нестабильность эмиссионного тока проявлялась как в резистивном, так и в емкостном режиме. На Рис. 3 наборы данных « $C_m = 9,6$  нФ, ВАХ №1» и «Шунт и модуль «LCard»» перекрываются в диапазоне  $U_{EG}$  от 5,2 кВ до 6,0 кВ. Для этого диапазона  $U_{EG}$  значения  $I_{FE}$  были около 1 нА, и оба набора данных предсказывают схожую среднюю тенденцию изменения  $I_{FE}$  с соответствующим изменением  $U_{EG}$ . Учитывая пределы погрешностей и нестабильность  $I_{FE}$ , можно утверждать, что между этими наборами данных существует удовлетворительное качественное и количественное согласие. Однако набор данных « $C_m = 9,6$  нФ, ВАХ №2» лежит заметно выше, чем почти все остальные данные, полученные в экспериментах. Очевидно, что это связано с нестабильностью эмиссионного тока  $I_{FE}$ . Кроме того, на Рис. 5 в диапазоне  $U_{EG}$  4,4 кВ – 5 кВ наборы данных « $C_m = 9,6$  нФ, ВАХ №1» и « $C_m = 0,66$  нФ, «НОРД» вкл.» так же удовлетворительно согласуются друг с другом (с учетом погрешности измерения): оба набора данных предсказывают схожий вид зависимости  $I_{FE}$  от  $U_{EG}$  при значениях  $I_{FE}$  в диапазоне ~40 пА – ~300 пА для указанного диапазона  $U_{EG}$ . Следовательно, можно утверждать, что, с учетом нестабильности тока эмиссии и конечных погрешностей измерений,



наблюдается адекватное качественное и количественное согласие наборов данных.

По Рис. 3 очевидно, что на диаграмме существует по крайней мере два заметных перегиба в видимых трендах автоэмиссионных ВАХ. Первый перегиб находится в области  $U_{EG} \sim 4,2$  кВ. Скорее всего, он связан с некоторыми неконтролируемыми процессами на поверхности образца, приводящими к резкому изменению эмиссионных свойств его поверхности. Такими процессами могут быть локальное изменение коэффициента усиления электрического поля или изменение работы выхода материала катода, вызванное воздействием остаточного газа или какими-то другими факторами. Существует ряд работ, в которых обсуждаются качественно аналогичные эффекты (например, см. [6-9]). Однако исследование этих эффектов выходит за рамки настоящей статьи. Второй перегиб имел место в наборе данных для  $C_m = 0,66$  нФ (синие «направленные вверх» треугольники на Рис. 3) при значении  $U_{EG} \sim 4$  кВ. Было обнаружено, что данный перегиб обусловлен работой высоковакуумного магниторазрядного насоса типа «НОРД», используемого в экспериментальной установке. При работе насос давал ионный ток на образец  $\sim 2$  пА, хотя внутри вакуумной камеры расстояние между насосом и образцом было более 1 м. Чтобы исключить влияние насоса, мы провели серию измерений тока  $I_{FE}$  при выключенном насосе. Серия длилась около 30 минут, и за это время давление остаточного газа внутри камеры увеличилось незначительно. Набор данных для этой серии представлен на Рис. 3 зелеными «направленными вниз» треугольниками. Очевидно, что измеренная величина  $I_{FE}$  резко снизилась после выключения насоса. Более того, полученный тренд зависимости  $I_{FE}$  от  $U_{EG}$  с хорошей точностью продолжил тренд набора данных для  $C_m = 0,66$  нФ для включенного насоса при  $U_{EG} > 4$  кВ. Стоит также отметить, что эмиссионный ток в диапазоне 0,1 пА – 10 пА оказался наиболее стабильным и удобным для анализа.

Общепринятым подходом к обработке экспериментальных автоэмиссионных данных в соответствии с теорией Фаулера-Нордгейма является представление

данных в виде зависимости  $\lg(I_{FE} / E^2)$  от  $1 / E$ , где  $E$  – макроскопическая напряженность поля вблизи поверхности катода. Здесь понятие «макроскопическая напряженность поля» означает напряженность поля, определяемая геометрией ЭП. По наклону зависимости  $\lg(I_{FE} / E^2)$  от  $1 / E$ , которая для автоэмиссионного тока должна быть линейной, определяются значения локального коэффициента усиления электрического поля  $\beta$  и эффективной площади эмиссии  $S$ . Особый интерес в экспериментах по кондиционированию [1,2] представляет величина  $\beta$ , так как она характеризует состояние поверхности образца. Подробнее с методикой обработки автоэмиссионных ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма можно ознакомиться, например, в [1-5,10]. Результаты расчетов  $\beta$  и  $S$  для полученных экспериментальных данных представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчетов локального коэффициента усиления электрического поля  $\beta$  и эффективной площади эмиссии  $S$ .

Шунт и модуль «LCard»	$C_m = 9,6$ нФ, ВАХ №1	$C_m = 9,6$ нФ, ВАХ №2	$C_m = 0,66$ нФ, «НОРД» вкл.	$C_m = 0,66$ нФ, «НОРД» выкл.
$\beta = 80,$ $S = 3,6 \times 10^{-4}$ нм <sup>2</sup>	$\beta = 34,$ $S = 9,9 \times 10^1$ нм <sup>2</sup>	$\beta = 58,$ $S = 3,1 \times 10^{-2}$ нм <sup>2</sup>	$\beta = 51,$ $S = 9,3 \times 10^{-2}$ нм <sup>2</sup>	$\beta = 18,$ $S = 2,3 \times 10^{11}$ нм <sup>2</sup>
$\beta = 70,$ $S = 1,1 \times 10^{-3}$ нм <sup>2</sup>	$\beta = 53,$ $S = 4,2 \times 10^{-2}$ нм <sup>2</sup>		$\beta = 18,$ $S = 2,3 \times 10^{11}$ нм <sup>2</sup>	
$\beta = 126,$ $S = 9,5 \times 10^{-6}$ нм <sup>2</sup>				
$\beta = 59,$ $S = 4,5 \times 10^{-3}$ нм <sup>2</sup>				

Следует отметить, что из-выраженной нестабильности тока эмиссии  $I_{FE}$  линейная аппроксимация ВАХ становится весьма произвольной. Например, набор данных «Шунт и модуль «LCard»» оказалось возможно аппроксимировать по крайней мере четырьмя различными способами с разными коэффициентами наклона и вертикального сдвига, и, как следствие, получать разные значения  $\beta$  и  $S$ . Аналогичные эффекты наблюдаются также для наборов данных « $C_m = 9,6$  нФ,

ВАХ №1» и « $C_m = 0,66$  нФ, «НОРД» вкл.». Однако было обнаружено, что для всех наборов данных имеется тренд с близкими значениями  $\beta \sim 50-60$  и  $S \sim 5 \times 10^{-2}$  нм<sup>2</sup>. При этом, в отличие от всех остальных наборов данных, наборы « $C_m = 0,66$  нФ, «НОРД» вкл.» и « $C_m = 0,66$  нФ, «НОРД» выкл.» при исключении точек вблизи уровня фонового тока магниторазрядного насоса ( $\sim 2$  пА) вполне однозначно и надежно аппроксимируются одним и тем же линейным трендом ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма с  $\beta = 18$  и  $S = 2,3 \times 10^{11}$  нм<sup>2</sup>. В целом, можно сказать, что наиболее стабильный эмиссионный ток с исследованного образца наблюдался в диапазоне напряжений менее 4,2 кВ, что соответствовало значениям  $I_{FE} \sim 10$  пА и менее, вплоть до  $\sim 0,2$  пА.

## 6. Обсуждение результатов

Сравнение трендов данных на Рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что зависимости  $I_{FE}(U_{EG})$ , полученные в резистивном и емкостном режимах, оказались достаточно хорошо согласующимися друг с другом как качественно, так и количественно. В частности, «емкостные» и «резистивные» наборы данных обеспечивают диапазон значений локального коэффициента усиления электрического поля  $\beta \sim 50-60$  в диапазоне значений  $U_{EG}$  от 4,5 кВ до 6,0 кВ. С другой стороны, нестабильность эмиссионных свойств исследованного образца вносила большой вклад в разброс значений тока  $I_{FE}$  даже при постоянном напряжении на ЭП. Поэтому в рамках описанной экспериментальной установки исследование автоэлектронной эмиссии оказалось не совсем подходящим методом для испытаний емкостного режима измерения малых токов. Тем не менее, мы считаем, что существует надежное согласие между данными, полученными в емкостном и резистивном режимах. Кроме того, мы считаем, что в диапазоне значений  $U_{EG} < 4,2$  кВ, где ток автоэлектронной эмиссии находился в диапазоне от долей пикоампер до  $\sim 10$  пА, наблюдались наиболее стабильные эмиссионные свойства исследованного медного образца. Поэтому представляет интерес оценка минимально измеряемой величины  $I_{FE}$  в емкостном режиме.

Основным параметром, определяющим минимальный измеряемый диапазон  $I_{FE}$ , является емкость  $C_m$ . Чем меньше  $C_m$ , тем меньше времени  $t$  требуется для накопления значительного заряда  $q_m$  и напряжения  $U_m$  выше уровня шума осциллографа. Однако в цепи разряда  $C_m$  присутствует паразитная емкость  $C_p$ . Конечное значение  $C_p$  ограничивает минимально применимое значение  $C_m$ . Для нашей экспериментальной установки величина  $C_p$  составила  $\sim 140$  пФ. Соответственно, если использовать измерительный конденсатор аналогичной емкости, то есть положить  $C_m = C_p$ , то это приведет к двукратному снижению регистрируемого осциллографом напряжения  $U_{osc}$  по сравнению с напряжением заряда  $U_m$ , согласно уравнению (7). Это неизбежно снижает соотношение сигнал/шум. Вторым фактором, ограничивающим минимальное значение  $C_m$ , является наличие конечного сопротивления утечки  $R_{leak}$ . Чем меньше  $C_m$ , тем меньше постоянная времени  $C_m R_{leak}$ , а конечное значение  $R_{leak}$  ограничивает максимальное напряжение  $U_m$  зарядки конденсатора при заданном значении  $I_{FE}$ . Очевидно, что максимальным напряжением зарядки является такое значение  $U_m$ , при котором ток автоэмиссии равен току утечки. Для оценки, пусть  $C_m = 300$  пФ, то есть примерно вдвое больше  $C_p$ , а  $R_{leak} = 1000$  ГОм. Для используемого осциллографа с учетом неизбежных шумовых помех минимальное значение  $U_{osc}$ , надежно регистрируемое осциллографом, составило  $\sim 100$  мВ. Для времени заряда  $t = 600$  с (10 минут) с помощью уравнения (6) можно получить минимальное измеримое значение  $I_{FE} \sim 0,08$  пА. Это значение  $I_{FE}$  можно интерпретировать как наименьшее измеримое значение  $I_{FE}$ , по крайней мере, при использовании общедоступных электронных компонентов. При этом фактическое минимальное значение  $I_{FE}$ , измеренное в эксперименте, составило  $\sim 0,2$  пА, то есть оно было близко к пределу измерений в емкостном режиме. При этом, учитывая, что большинство измерительных приборов имеют входное сопротивление намного меньше  $\sim 1$  ГОм, ток полевой эмиссии  $\sim 0,1$  пА недостижим для прямого измерения без использования высокочувствительных и дорогостоящих пикоамперметров.

Таким образом, использование резистивного и емкостного режимов позволяет измерять  $I_{FE}$  в пределах 7-8 порядков величины  $I_{FE}$ . При этом переключение режима измерения  $I_{FE}$  осуществляется только путем некоторых тривиальных переключений электрической схемы без повторной откачки камеры. В результате переключение занимает менее одной минуты. Кроме того, существенным достоинством предлагаемого подхода к измерению автоэмиссионного тока малой величины  $<1$  нА является отсутствие вакуумных вторично-электронных умножителей. Этот факт особенно важен при работе в диапазоне значений  $I_{FE}$ , где автоэлектронная эмиссия оказывается нестабильной, и существует высокий риск повреждения умножителя при случайных бросках тока. Также описанная методика не требует дополнительного высоковольтного источника питания для умножителя. С другой стороны, недостатками описанного подхода являются относительно высокие временные затраты при измерении  $I_{FE}$  ниже 10 пА (~200 с на измерение), наличие «дребезга» реле, а также трудности в определении точного значения  $R_{leak}$ .

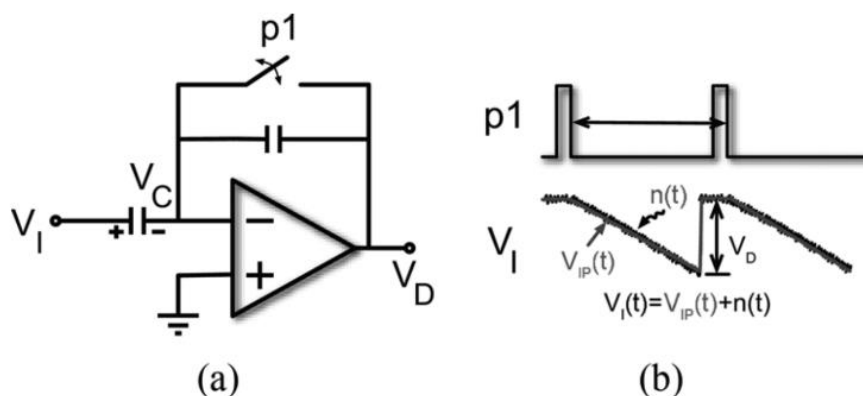


Рис. 4. Принципиальная схема «емкостного амперметра» (а) и осциллограмма его работы (б) (Fig. 13 в [11]).

При анализе литературы по схемам субнаноамперных измерений были найдены несколько схем, позволяющих измерять ток величиной  $\sim 10$  пА и менее. Наиболее близкой по принципу действия является схема «емкостного амперметра», представленная на Рис.4 [11,12]. Она включает в себя три основных узла: ключ, управляющий фазами «интегрирования» и «сброса»,

конденсатор, накапливающий заряд, и операционный усилитель. В фазе «сброса» ключ замыкается, а конденсатор разряжается. В фазе интегрирования ключ размыкается, а конденсатор заряжается измеряемым током. На выходе усилителя регистрируется усиленная разность потенциалов между инверсным и неинверсным входами операционного усилителя. Данная схема применяется в биомедицинских исследованиях и микроэлектронике для измерения токов пикоамперной величины [11,12]. Очевидно, что описанный в текущей статье «емкостной режим» измерения субнаноамперного тока имеет ряд недостатков по сравнению с «емкостным амперметром». Во-первых, описанная схема не имеет обратной связи, а ее коэффициент усиления равен 1. Поэтому ей требуется значительное время для сбора заряда, чтобы обеспечить хорошее соотношение «сигнал – шум». Во-вторых, в представленной схеме нет возможности измерять ток в реальном времени.

С другой стороны, можно сказать, что описанный «емкостной режим» измерения автоэмиссионного тока имеет некоторые преимущества. Первое – простота разработанной схемы. В ней нет операционных усилителей, а значит, и дополнительного двухполярного источника питания, необходимого для усилителя. Второе – описанная схема имеет входное сопротивление не хуже  $R_{\text{leak}} \sim 1000$  ГОм. В свою очередь, входное сопротивление «емкостного амперметра» может зависеть от особенностей операционного усилителя. Кроме того, усилитель может иметь паразитные параметры, влияющие на измеряемую величину тока. Третье – при работе в составе высоковольтной экспериментальной установки операционный усилитель может подвергаться различным электромагнитным помехам. Последнее замечание может быть принципиально важным для высоковольтных систем, так как в них всегда имеется риск пробоев, которые могут привести к повреждению измерительного оборудования или ввести операционный усилитель в режим генерации. В свою очередь, благодаря своей простоте и электромагнитному экранированию, предлагаемая схема оказалась практически нечувствительной к внешним

и внутренним помехам. Поэтому предлагаемый подход к измерению субнаноамперных токов автоэлектронной эмиссии может найти применение.

## Заключение

В данной работе описан испытанный подход к измерению тока автоэлектронной эмиссии в широком диапазоне значений тока от  $\sim 0,1$  пА до  $\sim 10$  мкА. Автоэмиссионный катод представлял собой тонкую иглу из чистой меди марки М0 с закругленным полусферическим острием. Диаметр катода составлял  $\sim 70$  мкм, радиус закругления вершины –  $\sim 35$  мкм, длина катода –  $\sim 15$  мм. Анодом выступал плоский люминесцентный экран. Измерение тока эмиссии проводилось в цепи катода. При этом измерение тока осуществлялось в двух режимах: резистивном и емкостном. Резистивный режим позволял измерять ток автоэлектронной эмиссии более  $\sim 1$  нА и не более  $\sim 10$  мкА с помощью обычного токоизмерительного шунта сопротивлением 1 МОм. Емкостной режим заключался в зарядке конденсатора с известной емкостью током автоэлектронной эмиссии в течение некоторого фиксированного периода времени. Такой подход давал возможность измерять ток автоэлектронной эмиссии более  $\sim 0,1$  пА и менее  $\sim 1$  нА. Работа в емкостном режиме подразумевала два этапа: этап зарядки измерительного конденсатора измеряемым током в течение заданного времени и этап разрядки конденсатора через входное сопротивление осциллографа. При разрядке конденсатора и регистрации сигнала разрядки осциллографом измерялось напряжение, до которого зарядился конденсатор. Это позволило при известных времени зарядки и емкости конденсатора рассчитать усредненное за время зарядки значение тока автоэлектронной эмиссии. В результате, используя такой подход, удалось измерить ток эмиссии  $\sim 0,2$  пА. Такая величина тока является недостижимой для прямого измерения обычными приборами, за исключением дорогостоящих пикоамперметров. Кроме того, преимуществами предлагаемого подхода к измерению автоэмиссионного тока являются: 1) простота электрической схемы и ординарность используемых компонентов; 2) простота переключения

между резистивным и емкостным режимами измерения тока – переключение осуществляется с помощью обычного тумблера и некоторых тривиальных операций, связанных с переключением измерительных приборов; 3) нечувствительность к внешним наводкам и помехам (при обеспечении хорошего электромагнитного экранирования). Однако имеется ряд недостатков схемы: 1) отсутствие обратной связи по измеряемому току и отсутствие усиления сигнала; 2) большие временные затраты при измерении автоэмиссионного тока ниже  $\sim 10$  пА; 3) наличие «дребезга» контактов реле, применяющегося для управления циклом зарядки/разрядки измерительного конденсатора; 4) трудности в определении точного значения сопротивления утечки цепи заряда конденсатора, которое оказалось важным паразитным параметром. Тем не менее, мы полагаем, что предложенный подход к измерению субнаноамперного тока автоэлектронной эмиссии может применяться в случаях, когда ток слишком мал для прямого резистивного измерения или есть риск повреждения более сложной измерительной аппаратуры из-за неконтролируемого пробоя вакуумного промежутка в продолжительных статических режимах измерения ВАХ автоэлектронной эмиссии.

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭФ УрО РАН, тема 122011200367-7.

### 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 (Early Access). <https://doi.org/10.1109/TPS.2024.3374898>



3. Mamontov Y.I. et al. Electrical properties of He-induced W "fuzz" within the pre-breakdown and breakdown regimes // 2020 29th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). – IEEE, 2021. – P. 69-72. <https://doi.org/10.1109/ISDEIV46977.2021.9587227>
4. Mamontov Y.I. et al. Emission Properties and Dielectric Strength of a Nanostructured Tungsten Field-Emissive Cathode //IEEE Transactions on Plasma Science. – 2022. – V. 50. – No. 9. – P. 2720-2728. <https://doi.org/10.1109/TPS.2022.3193177>
5. Zemskov Y.A. et al. Instabilities of electrical properties of He-induced W “fuzz” within the pre-breakdown and breakdown regimes //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – V. 2064. – No. 1. – Art. No. 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2064/1/012004>
6. Lang S.A., Darr A.M., Garner A.L. Theoretical analysis of the transition from field emission to space-charge-limited emission in liquids and gases // Journal of Applied Physics. – 2020. – V. 128. – No. 18. – Art. No. 185104. <https://doi.org/10.1063/5.0021948>
7. Doytcheva M., Kaiser M., De Jonge N. In situ transmission electron microscopy investigation of the structural changes in carbon nanotubes during electron emission at high currents //Nanotechnology. – 2006. – V. 17. – No. 13. – P. 3226. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/17/13/025>
8. Gilkes M. J., Nicolaescu D., Wilshaw P. R. Residual gas effects on the emission characteristics of silicon field emitter arrays // Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. – 2000. – V. 18. – No. 2. – P. 948-951. <https://doi.org/10.1116/1.591304>
9. 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>

10. 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>
11. Kim D. et al. Noise analysis and performance comparison of low current measurement systems for biomedical applications // IEEE transactions on biomedical circuits and systems. – 2012. – V. 7. – No. 1. – P. 52-62.  
<https://doi.org/10.1109/TBCAS.2012.2192273>
12. Al Mortuza A. et al. Pico-current measurement challenges and remedies: A review // Univers. J. Eng. Sci. – 2017. – V. 5. – No. 4. – P. 57-63.  
<https://doi.org/10.13189/ujes.2017.050401>

**Для цитирования:**

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>