

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДНОГО СТАРЕНИЯ И ПОРОГА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОЭМИССИИ С КАТОДНЫХ ПРОВОЛОЧЕК В ДРЕЙФОВЫХ КАМЕРАХ

© 2012 г. В. Е. Блинов, В. Г. Присекин

*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

*Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

*E-mail: V.E.Blinov@inp.nsk.su, V.G.Prisekin@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 10.05.2011 г.

Исследовано радиационное старение проволочных камер и влияние на него различного вида загрязнений поверхности катодной проволоки. Для нескольких образцов катодной проволоки изменена пороговая напряженность, при которой возникает автоэлектронная эмиссия.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время ведутся работы по созданию новой дрейфовой камеры (д.к.) для детектора КЕДР, которая должна заменить старую, проработавшую в эксперименте около десяти лет. В д.к. детектора КЕДР [1] используется ячейка струйного типа с фокусировкой [2]. В качестве рабочего газа выбран диметиловый эфир [3], имеющий малый коэффициент электронной диффузии, что позволяет получить среднее по ячейке пространственное разрешение 100 мкм при максимальной длине дрейфа 28 мм.

В диметиловом эфире минимальная зависимость коэффициента диффузии для одного электрона от напряженности электрического поля в дрейфовом промежутке достигается при 1.8 кВ/см. При этом значении напряженность на поверхности катодных проволочек составляет 40–45 кВ/см, что предъявляет серьезные требования к качеству поверхности катодной проволоки с точки зрения возникновения автоэлектронной эмиссии. Кроме того, высокая напряженность на поверхности катодных проволочек повышает вероятность возникновения коронного разряда и ускоряет процесс катодного старения д.к.

В связи с этим при изготовлении новой д.к. было проверено качество поверхности образцов катодной проволоки от различных производителей с целью выбора проволоки, наиболее подходящей для использования в условиях работы д.к. детектора КЕДР.

Для золоченой алюминиевой проволоки диаметром 120 мкм производства компании California Fine Wire было исследовано влияние различного вида загрязнений поверхности этой катодной проволоки на величину порога возникновения малтер-эффекта (м.э.) [4].

### 2. КРАТКИЙ ОБЗОР

Проблема радиационного старения проволочных камер возникла с момента их появления, начиная с выхода из строя счетчиков Гейгера после регистрации определенного числа частиц и до относительно недавних проблем с радиационным старением д.к. детекторов ARGUS и ВаВаг.

Старение связано с процессом полимеризации молекул рабочего газа, примесей, содержащихся в компонентах рабочего газа, или примесей, поступающих в рабочий газ из-за десорбции конструкционных материалов и неконтролируемых загрязнений газовой системы и камеры. Полимеризация происходит в результате плазменно-химических процессов в лавине, развивающейся вблизи анодной проволоки в процессе газового усиления. Полимеры, образующиеся в лавине, в зависимости от знака заряда и наличия дипольного момента дрейфуют в направлении анода или катода, где с некоторой вероятностью остаются на поверхности проволоки или удаляются с потоком газа из камеры. В результате этого на электродах камеры образуются полимерные покрытия.

Покрытие на аноде приводит к увеличению диаметра проволоки, напряженность поля на поверхности проволоки понижается, и, как следствие, уменьшается коэффициент газового усиления. Неоднородность покрытия вдоль проволоки приводит к ухудшению амплитудного разрешения камеры. При этом камера остается в работоспособном состоянии.

В отличие от анодного старения катодное менее изучено, хотя представляет больший интерес для продления срока эксплуатации камер. Катодное старение также связано с процессами полимеризации, происходящими в лавине в процессе газового усиления. Молекула полимера, получившая положительный заряд, дрейфует в направле-

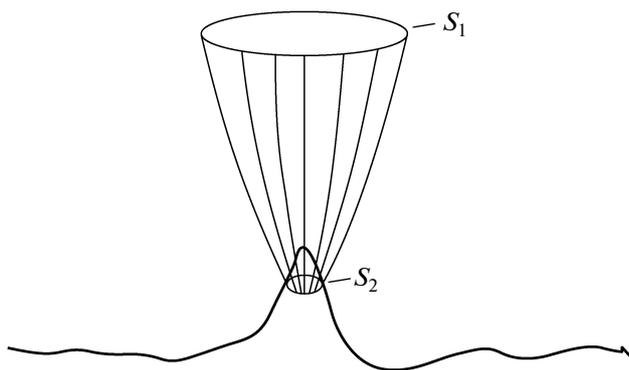


Рис. 1. Форма силовых линий в области микроострий на поверхностях анодной и катодной проволочек.

нии катода, где нейтрализуется и может остаться на его поверхности. В результате на катоде образуется плохо проводящая полимерная пленка. На ее поверхность оседают положительные ионы из лавины, создавая двойной заряженный слой.

Так как толщина пленки мала, то в ней появляется электрическое поле большой напряженности, и работа выхода электронов с поверхности металла снижается. Эмиссионные электроны дрейфуют к аноду, где в процессе газового усиления образуются положительные ионы, которые поддерживают заряд на поверхности катодной пленки. Процесс становится самоподдерживающимся, и в камере течет темновой ток, даже после прекращения внешнего облучения. Эти темновые токи называются малтеровскими токами или малтер-эффектом, так как аналогичное явление тонкопленочной полевой эмиссии было обнаружено Малтером [4].

Как было показано в работе [5], качество поверхности анодной проволоки оказывает существенное влияние на процесс радиационного старения проволочных камер.

Поверхность проволоки можно представить в виде набора микровыступов (острий) и впадин между ними. Микровыступы фокусируют силовые линии электрического поля из области с характерным диаметром, равным по порядку величины высоте выступа (рис. 1), и соответственно площадью сечения  $S_1$  на малую площадь острия  $S_2$ . Ток положительных ионов, движущихся вдоль силовых линий, также фокусируется. В результате плотность тока положительных ионов и положительно заряженных полимерных молекул на поверхности острия в  $S_1/S_2$  раз больше, чем на соседних участках проволоки.

Скорость роста пленки пропорциональна напряженности поля на поверхности и на выступах может во много раз превосходить скорость роста покрытия на соседних участках поверхности проволоки. Характерное значение средней напряжен-

ности электрического поля на поверхности катодной проволоки равно 20–40 кВ/см, при этом на конце острия оно может достигать  $\geq 1$  МВ/см. Как следствие, именно на поверхности острий в первую очередь обеспечиваются условия, при которых начинается м.э. Кроме того, из-за высокой напряженности электрического поля автоэмиссия тоже возникает с поверхности острий.

Целью данного исследования было измерение порога возникновения автоэмиссии с поверхности катодных проволочек различного диаметра, произведенных в СССР и США. Был измерен порог возникновения автоэмиссии в условиях отсутствия загрязнений и изучено влияние различного вида загрязнений поверхности катодной проволоки на порог возникновения м.э. Необходимость этого исследования обусловлена тем, что в процессе изготовления и эксплуатации д.к. на поверхность катодных проволочек могут попадать различные неконтролируемые загрязнения, вызывающие быстрое появление м.э., в результате чего использование д.к. в эксперименте становится проблематичным. В данной работе было исследовано влияние на порог возникновения м.э. загрязнений поверхности катодной проволоки изоляционным лаком, вакуумным маслом и отпечатками пальцев.

Помимо этого, было изучено влияние дефектов золочения алюминиевой проволоки на порог возникновения м.э., для чего на поверхность катодной проволоки в вакууме было напылено алюминиевое покрытие, на котором в процессе натяжения камеры в воздухе образовывалась окисная пленка  $Al_2O_3$  толщиной  $\sim 100$  Å. В случае алюминиевой проволоки, использованной в данном исследовании, и некоторых других металлов образование на их поверхности в воздухе тонкой окисной пленки с большим удельным сопротивлением может, в принципе, привести к понижению порога возникновения м.э.

### 3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для исследования катодного старения и измерения порога возникновения автоэмиссии с поверхности катодной проволоки была изготовлена модель дрейфовой камеры, содержащей одну гексагональную ячейку (рис. 2).

По центру корпуса из нержавеющей стали с внутренним диаметром 60 мм натянута анодная проволока. На радиусах 10 и 20 мм в виде правильных шестиугольников натянута 6 катодных и 6 экранных проволок соответственно. Экранные проволоки повернуты на  $30^\circ$  относительно катодных.

Анодная проволока диаметром 20 мкм изготовлена из позолоченного вольфрам-рениевого сплава, а в качестве катодной использованы несколько проволочек от различных производите-

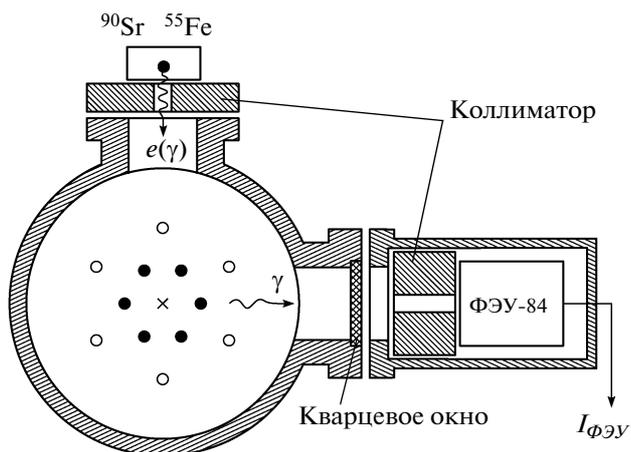


Рис. 2. Вид дрейфовой ячейки.

лей: диаметром 120 и 150 мкм из позолоченного алюминиевого сплава (производства компании California Fine Wire, США) и диаметром 70 и 150 мкм из позолоченного титанового сплава (производства Московского электролампового завода (МЭЛЗ), СССР). Экранные проволоки диаметром 150 мкм изготовлены из позолоченного титанового сплава.

Камера имеет два бериллиевых окна для облучения ячейки изотопами  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{55}\text{Fe}$ . Напротив одного из бериллиевых окон расположено кварцевое окно для регистрации света от лавины (рис. 3). Участок ячейки напротив кварцевого окна просматривается коллимированным фотоумножителем ФЭУ-84, который регистрирует фотоны, образовавшиеся в процессе газового усиления, с ограниченного коллиматором участка анодной проволоочки. Высокое напряжение положительной полярности подается на анодную и экранные проволоочки, катодные проволоочки заземлены.

Исследование катодного старения проводилось с газовой смесью гелий/изобутан (80/20) как с одной из перспективных газовых смесей для использования в д.к. детектора КЕДР, а исследование качества поверхности катодной проволоочки от различных производителей — с газом диметиловый эфир, применяемым в д.к. в настоящее время. Схема газовой системы, используемой в измерениях, показана на рис. 3.

Схема электроники приведена на рис. 4. Сигнал с анодной проволоочки через разделительный конденсатор поступает на вход предусилителя ПУ. Усиленный ПУ сигнал по экранированной

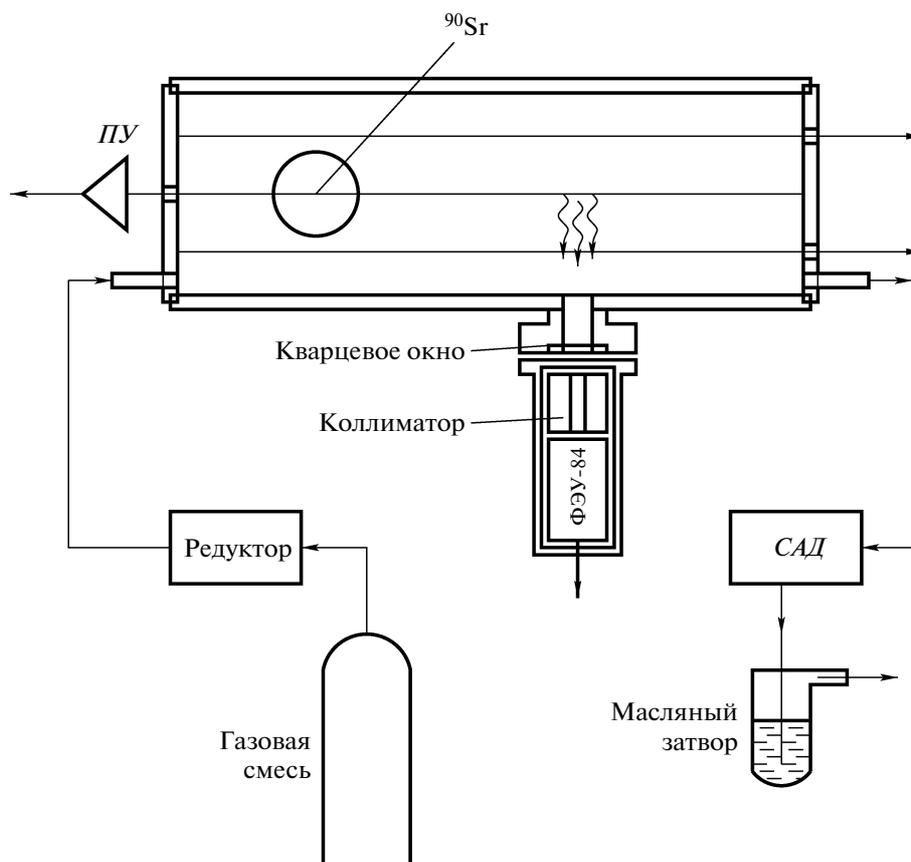


Рис. 3. Схема установки. ПУ — предусилитель, САД — стабилизатор абсолютного давления.

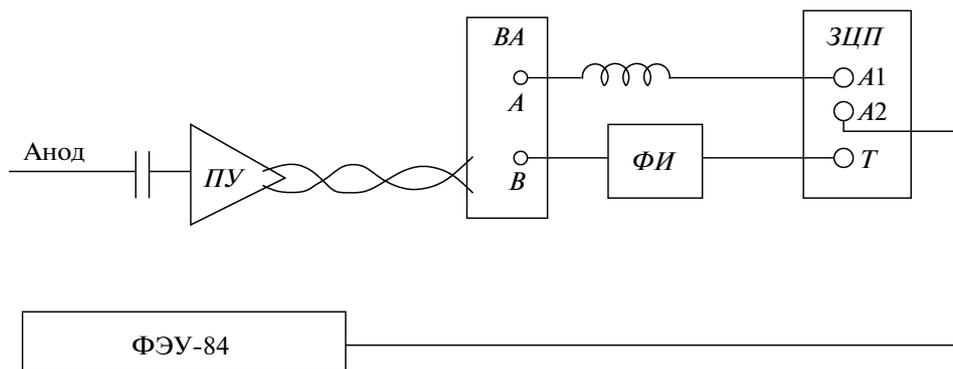


Рис. 4. Схема электроники для набора амплитудных спектров сигналов с проволочки и с фотоумножителя. *ФИ* – формирователь импульсов, *ЗЦП* – зарядоцифровой преобразователь, *ВА* – блок время–амплитуда.

витой паре поступает в блок время–амплитуда *ВА*, где он дополнительно усиливается и разветвляется. Один сигнал поступает на дискриминатор, логический импульс с которого подается на выход *В* блока *ВА*, а другой – на выход *А* этого блока.

Амплитудный сигнал с блока *ВА* через линию задержки поступает на вход зарядоцифрового преобразователя *ЗЦП*. Сигнал с выхода *В* блока *ВА* поступает на формирователь импульсов *ФИ*, задающий время интегрирования аналогового импульса для *ЗЦП*. При измерении загрузки одноэлектронными импульсами сигнал с *ФИ* подавался на счетчик импульсов. Одновременное измерение амплитуд импульсов с предусилителя и с *ФЭУ* указывает на наличие корреляции между коэффициентом газового усиления и числом фотонов, образующихся в лавине (рис. 5). Выбранная нами схема измерений позволяет мониторировать процесс возникновения м.э. в стороне от места облучения ячейки изотопом  $^{90}\text{Sr}$  и, таким образом, измерять время распространения процесса возникновения источников малтеровских электронов вдоль катодной проволочки.

В процессе облучения ячейки изотопом  $^{90}\text{Sr}$  осуществлялись непрерывное измерение тока с каждой из катодных проволочек и запись измеренных значений токов для дальнейшей обработки.

#### 4. РАСЧЕТ ЯЧЕЙКИ

Для расчета электрических полей в ячейке д.к. и напряженности поля на поверхности проволочек использовалась программа Garfield [6].

Порог возникновения автоэлектронной эмиссии с катода определялся путем измерения зависимости скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности  $E_k$  на поверхности катодной проволочки. При проведении этих измерений необходимо, чтобы коэффициент газового усиления был постоянным. В результате проведенных

расчетов для анодной проволочки  $\varnothing 20$  мкм, катодных проволочек  $\varnothing 70$  мкм и экранных  $\varnothing 150$  мкм были получены следующие соотношения:

$$U_a = 6.907E_a - 13.577E_k;$$

$$U_c = -1.329E_a - 41.461E_k,$$

где  $U_a$  и  $U_c$ , В – напряжения на аноде и экранах, а  $E_a$  и  $E_k$ , кВ/см – напряженности электрического поля на поверхности анодной и катодной проволочек соответственно.

Для катодных проволочек  $\varnothing 120$  мкм имеем:

$$U_a = 6.907E_a - 19.982E_k;$$

$$U_c = -0.944E_a - 53.928E_k,$$

а для катодных проволочек  $\varnothing 150$  мкм в результате расчетов получаем:

$$U_a = 6.907E_a - 23.3E_k;$$

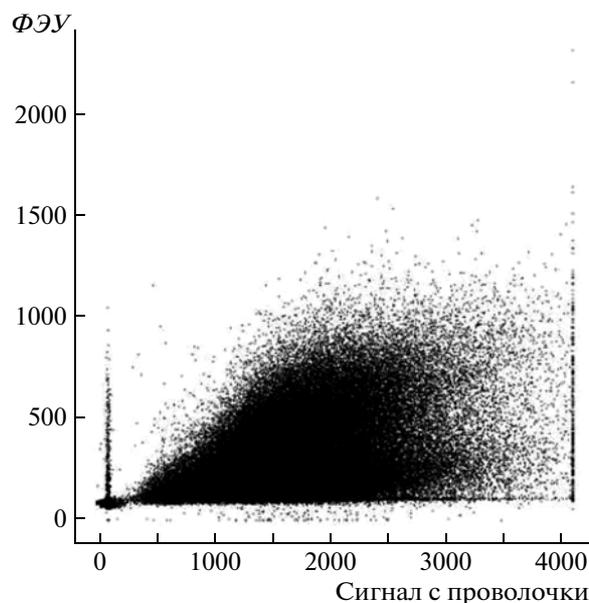


Рис. 5. Корреляция амплитуды сигнала с анодной проволочки и сигнала *ФЭУ*, регистрирующего свет от лавины вблизи анодной проволочки.



Рис. 6. Амплитудный одноэлектронный спектр, полученный при освещении проволоки  $\varnothing 70$  мкм галогеновой лампой (фотоэффект).

$$U_3 = -0.943E_a - 65.731E_k.$$

Из этих соотношений видно, что если изменять напряжения на анодной и экранных проволоках так, чтобы  $E_a$  оставалась постоянной, а  $E_k$  изменялась, то можно измерить зависимость загрузки одноэлектронными импульсами от  $E_k$  при постоянном коэффициенте газового усиления.

## 5. ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЯ КАТОДНОГО СТАРЕНИЯ И ПОРОГА АВТОЭМИССИИ

При исследовании катодного старения для облучения ячейки применялся радиоактивный  $\beta$ -источник  $^{90}\text{Sr}$ , устанавливаемый на одно из бериллиевых окон камеры. Необлученный участок проволоки напротив второго окна использовался для измерения коэффициента газового усиления на несостаренном участке проволоки. Эта методика позволяет устранить влияние внешних условий, приводящих к изменению коэффициента газового усиления, на результаты измерений.

Периодически источник  $^{90}\text{Sr}$  убирался, вычислялся набранный заряд на единицу длины анодной проволоки и в пропорциональном режиме измерялись амплитудные спектры от  $\gamma$ -источника  $^{55}\text{Fe}$  с облученного и необлученного участков. Скорость старения  $R$  определялась по формуле:

$$R = \frac{-1}{A_0} \frac{A - A_0}{Q}, \quad (1)$$

где  $A_0$  — амплитуда сигнала с необлученного участка,  $A$  — амплитуда сигнала с облученного участка после набора заряда на единицу длины анодной проволоки  $Q$ . Затем облучение источником  $^{90}\text{Sr}$  продолжалось. Непрерывное измерение токов с катодных проволок позволяло обнаружить момент возникновения м.э., получить зависимость малтеровского тока от времени, а также

определить, какая из катодных проволок является источником м.э. Продолжительность одного измерения составляла от одного до двух месяцев.

Пороговое значение напряженности электрического поля на поверхности катодной проволоки ( $E_{th}$ ), при котором возникает автоэлектронная эмиссия, определялось из измеренной зависимости скорости счета  $F$  одноэлектронных импульсов от напряженности электрического поля на поверхности катодной проволоки.

Результаты измерений фитировались с использованием формулы Фаулера—Нордхейма [7]:

$$F = F_0 + aE_k^2 e^{-b/E_k}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  — параметры подгонки. В исходную формулу Фаулера—Нордхейма было введено дополнительное слагаемое  $F_0$ , которое учитывало фоновую загрузку, не связанную с автоэмиссией. Систематическая погрешность измерения загрузки одноэлектронными импульсами в каждом опыте определялась из статистического требования  $\chi^2/ndf = 1$ . Пороговая напряженность электрического поля  $E_{th}$  вычислялась из формулы:

$$aE_{th}^2 e^{-b/E_{th}} = F_{th}, \quad (3)$$

где  $F_{th}$  — пороговое значение загрузки, выбранное равным 3 Гц. Изменение порога  $F_{th}$  в широком диапазоне не оказывает существенного влияния на результаты сравнения различных катодных проволок.

Для правильного выбора порога дискриминатора электронного тракта в измерениях скорости счета одноэлектронных импульсов необходимо знать коэффициент газового усиления (к.г.у.), измеренный для одного электрона первичной ионизации.

Для измерения к.г.у. от одноэлектронных импульсов камера через кварцевое окно освещалась галогеновой лампой. В результате фотоэффекта с поверхности катодной проволоки эмитировались электроны. Измеренные амплитудные спектры (рис. 6) фитировались зависимостью  $P(N) = \alpha e^{-N/N_0}$  (упрощенный закон Пуля [8]). Здесь  $N$  — номер амплитудного канала, а  $N_0$  — величина, пропорциональная к.г.у. Вычисленный из полученного значения  $N_0$  к.г.у. составил  $7.3 \cdot 10^6$ . Это значение было зафиксировано во всех измерениях загрузки одноэлектронных импульсов.

## 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ КАТОДНОГО СТАРЕНИЯ

Радиационные исследования влияния различного вида загрязнений поверхности катодной проволоки на порог возникновения м.э. проводились с газовой смесью  $\text{He}/i\text{C}_4\text{H}_{10}$  (80/20). Исследовалось катодное старение золоченой алюминиевой катодной проволоки  $\varnothing 120$  мкм производства ком-

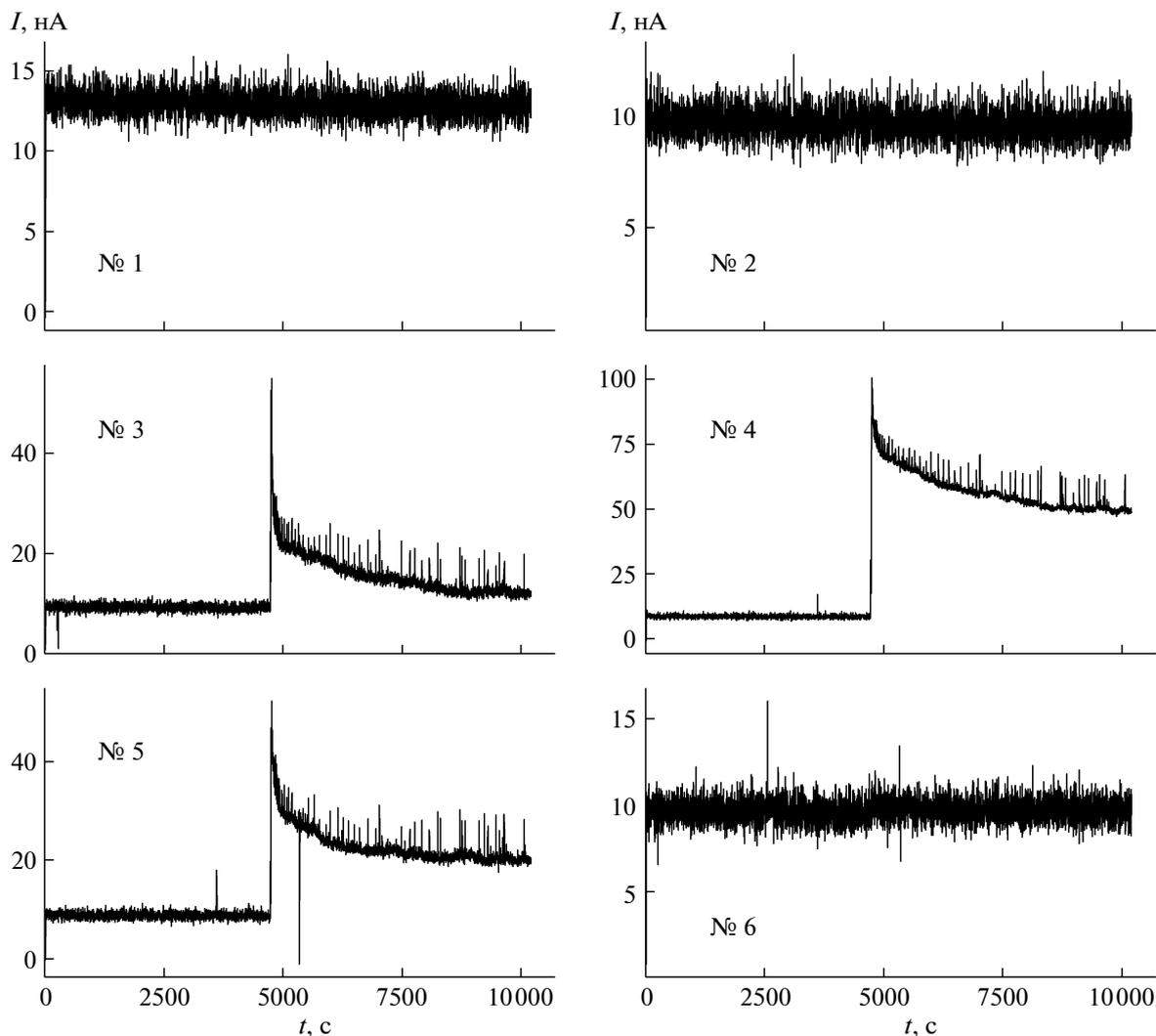


Рис. 7. Временная зависимость тока с катодных проволок № 1–№ 6. Источником м.э. является проволока № 4.

пании California Fine Wire с использованием анодной проволоки  $\varnothing 20$  мкм из золоченого вольфрам-рениевого сплава. После каждого радиационного испытания анодная и катодная проволоочки заменялись, экранные проволоочки не менялись. Результаты измерений представлены ниже.

В первом опыте м.э. возник сразу после начала облучения ячейки источником  $^{90}\text{Sr}$ . Изменение токов с катодных проволочек № 1–№ 6 в зависимости от времени показано на рис. 7. До возникновения м.э. ток на каждой катодной проволоочке от изотопа  $^{90}\text{Sr}$  составлял 10 нА. Видно, что остаточный ток после прекращения облучения протекал по группе соседних проволок. Токи с проволоки № 3 и № 5 примерно одинаковы и составляют 50 нА, ток с проволоки № 4 выше и в начальный момент равен 100 нА. Токи со всех проволок уменьшаются со временем. Аналогичное измене-

ние малтеровского тока в дрейфовой камере наблюдалось в работе [9].

Такая зависимость тока от времени связана с тем, что при бомбардировке положительными ионами полимерной пленки на поверхности катодной проволоки пленка нагревается, уменьшается ее сопротивление, заряд на пленке понижается и, как следствие, уменьшается ток малтеровской эмиссии. Источником малтеровских электронов в этом опыте служила проволока № 4, а токи с проволок № 3 и № 5 обусловлены диффузией электронов в лавине вблизи анодной проволоочки. Причиной возникновения раннего м.э. было следующее. В начале опыта камера по ошибке продувалась плохо перемешанной газовой смесью. Концентрация изобутана в такой смеси была мала, поэтому в камере возник газовый разряд, горевший около часа. Наличие разряда послужило причиной быстрого роста полимерной пленки на катодах, которая и привела к раннему возникновению м.э.

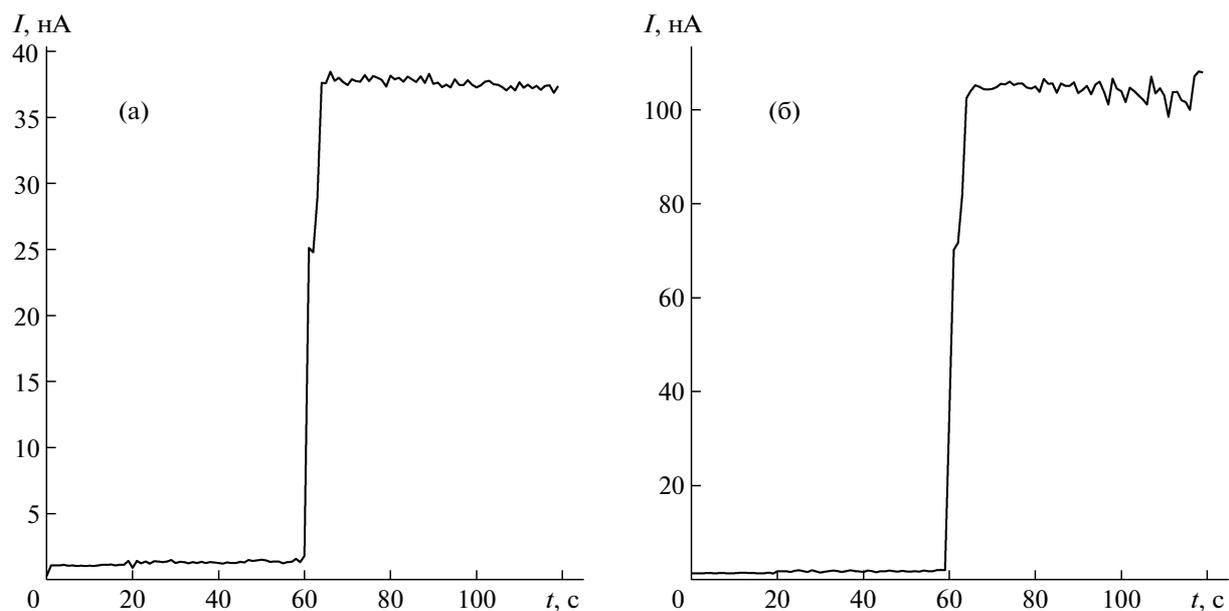


Рис. 8. Временная зависимость тока с катодной проволочкой, покрытой лаком (а), и с соседней с ней проволочкой (б).

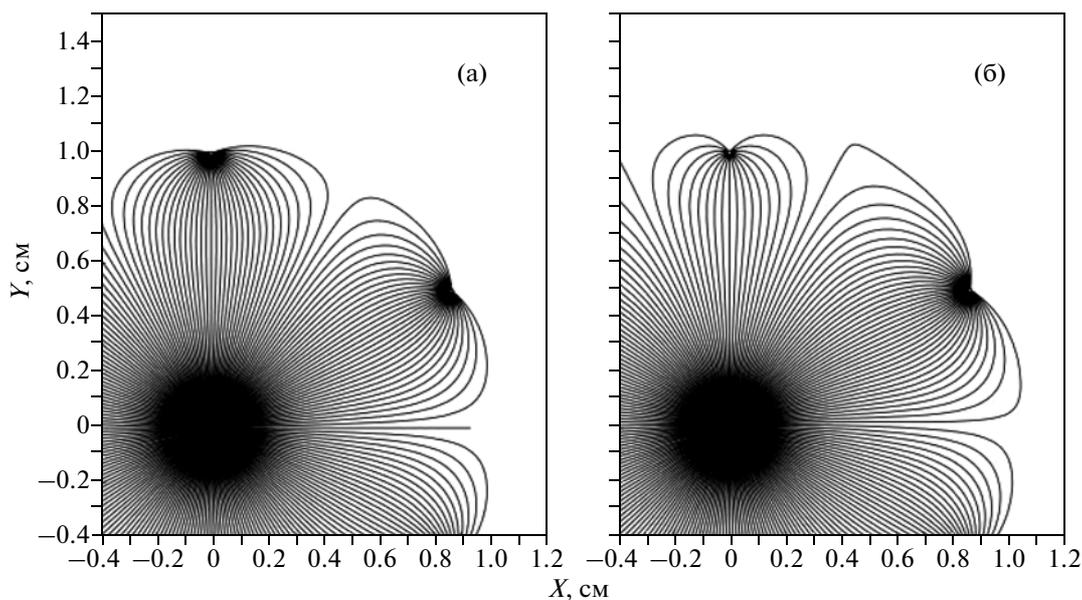


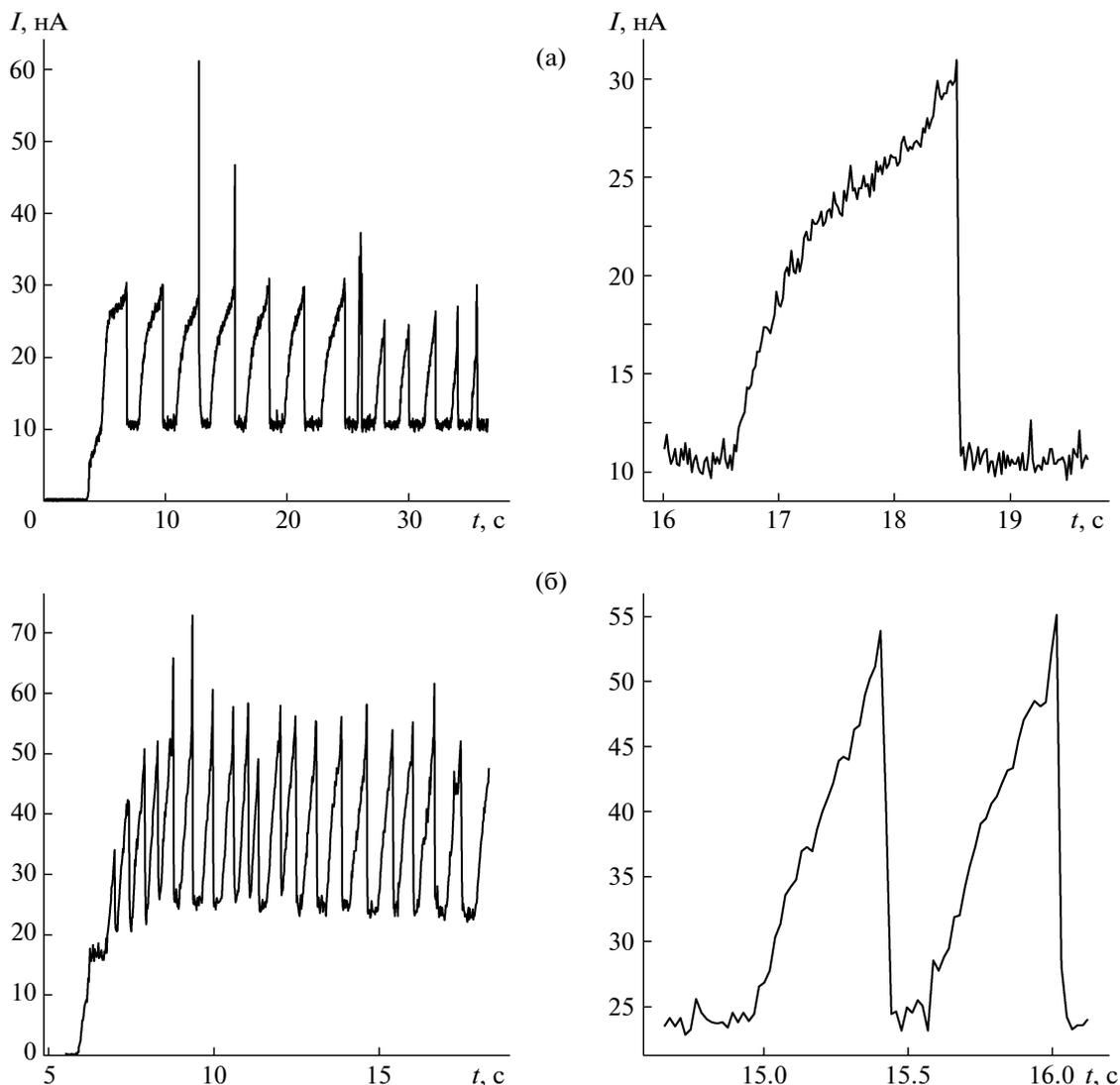
Рис. 9. Линии дрейфа в случае, когда все катодные проволочки заземлены (а) и когда на одной из них (верхней) напряжение 200 В (б).

Это предположение подтверждается тем, что после замены проволочек возникновения в камере раннего м.э. не наблюдалось.

В этом опыте было обнаружено запаздывание нарастания тока с фотоумножителя относительно нарастания тока с проволочки примерно на 30 с. Это указывает на то, что вначале малтеровская эмиссия начинается на участке проволочки в месте облучения и лишь со временем распространяется на соседние участки, захватывая постепенно

всю проволочку. Скорость распространения малтеровской эмиссии вдоль проволочки составила 0.3 см/с.

Во втором опыте измерялась радиационная стойкость дрейфовой ячейки при отсутствии искусственных загрязнений поверхности катодной проволоки. В этих условиях м.э. не наблюдался вплоть до величины набранного заряда на единицу длины анодной проволоки 800 мКл/см. Опыт был остановлен после трех месяцев облучения.



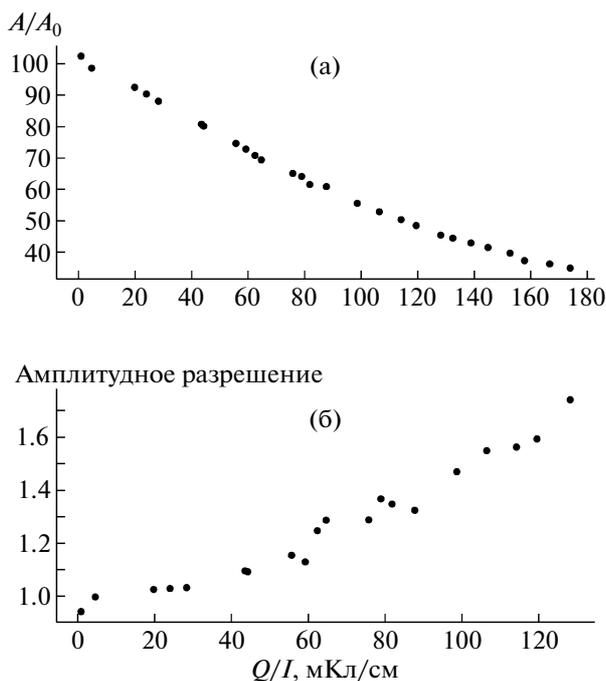
**Рис. 10.** Временные зависимости тока с проволоки, покрытой лаком, для двух условий измерения: **а** – к.г.у. равен  $7.3 \cdot 10^4$ , критическое значение напряженности поля  $E_k = 20$  кВ/см; **б** – к.г.у. равен  $2 \cdot 10^5$ ,  $E_k = 17$  кВ/см. Справа – растянутая по времени часть графика слева.

В третьем опыте исследовалось влияние диэлектрического загрязнения катодной проволоки на порог возникновения м.э. Для этого на участок поверхности одной из катодных проволок был нанесен тонкий слой кремнийорганического лака. М.э. возник уже при облучении ячейки малоинтенсивным изотопом  $^{55}\text{Fe}$ .

Временные зависимости токов с катодных проволок, измеренные в этом опыте, показаны на рис. 8. Согласно рисунку, ток с загрязненной проволоки несколько меньше, чем с соседних. Это указывает на то, что напряжение на наружной поверхности диэлектрического покрытия загрязненной проволоки становится положительным из-за накопленного положительного заряда на ее поверхности. Картина силовых линий электриче-

ского поля в ячейке при этом искажается так, что положительные ионы из лавины в основном собираются не на проволочке, являющейся источником м.э., а на соседних с ней катодных проволоках.

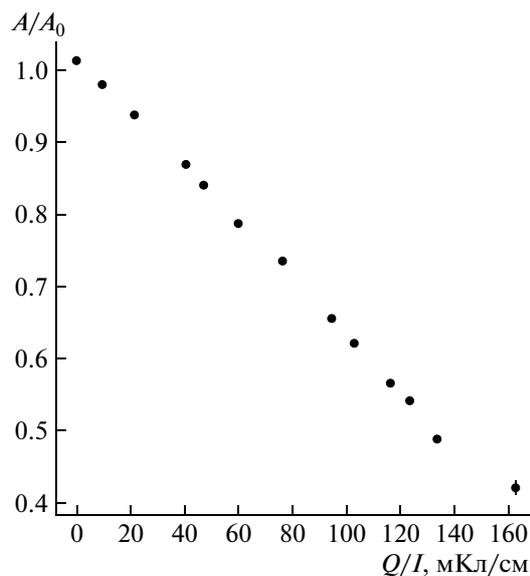
Результаты расчета программой Garfield [6] показывают, что если напряжение на покрытой лаком проволоке увеличить до +200 В, то отношение тока с этой проволоки к току с соседней будет равно 0.44. Картины силовых линий электрического поля в ячейке для заземленных катодных проволок и для случая, когда потенциал на одной из них равен +200 В, показаны на рис. 9. Расчетное значение отношения токов при этом близко к наблюдаемому.



**Рис. 11.** Зависимость к.г.у. (а) и амплитудного разрешения (б) от набранного заряда на единицу длины проволоки в опыте с вакуумным маслом ( $R = 380\%/(\text{Кл/см})$ ). Значения усиления  $A$  и амплитудного разрешения нормированы на соответствующие значения, измеренные на необлученном участке проволоки.

На рис. 10 приведены зависимости тока с катодной проволоки, покрытой лаком, с большим временным разрешением. Хорошо видна периодическая зависимость тока от времени. Объясним это явление на примере рис. 10а (справа). Вначале пленка заряжается положительными ионами, что приводит к росту напряженности поля в ней и возникновению в некоторый момент малтеровского тока, который также нарастает со временем. При превышении критического значения напряженности поля пленка пробивается, и малтеровский ток исчезает. Процесс повторяется снова.

Анализ рис. 10 показывает, что при большем к.г.у. увеличивается ток зарядки пленки, а следовательно, время, необходимое для зарядки до напряжения пробоя, уменьшается и, как следствие, уменьшается период следования импульсов, что согласуется с ранее изложенной моделью. В подтверждение этой модели говорит и тот факт, что после извлечения проволоки, покрытой лаком, на ее поверхности были обнаружены темные точки, указывающие на места пробоя слоя лака. Измеренное экспериментально напряжение пробоя лаковой пленки в среднем составляет 300–350 В, что удовлетворительно соответствует значению положительного потенциала, возникающего на



**Рис. 12.** Измеренная зависимость к.г.у. от набранного заряда на единицу длины анодной проволоки в опыте с отпечатками пальцев ( $R = 370\%/(\text{Кл/см})$ ). Значение к.г.у.  $A$  нормировано на значение к.г.у.  $A_0$  на необлученном участке проволоки.

покрытой лаком катодной проволоке в наших испытаниях.

В четвертом опыте исследовалось влияние на возникновение м.э. загрязнения поверхности катодной проволоки вакуумным маслом. Обычно в камерах причиной такого загрязнения могут служить мельчайшие капли масла из газовых затворов, оседающие на поверхность катодных проволок. В опыте проволока с лаком была заменена на проволоку с тонким слоем вакуумного масла VM-1. Скорость анодного старения при этом составила  $380\%/(\text{Кл/см})$ . На рис. 11 приведены зависимости к.г.у. (рис. 11а) и амплитудного разрешения камеры (рис. 11б) от набранного заряда. Согласно рисунку, амплитудное разрешение медленно ухудшается до значения дозы 40  $\text{мКл/см}$ , а затем, с увеличением дозы, наблюдается более быстрое его ухудшение. К концу опыта амплитудное разрешение ухудшилось в 1.7 раза. М.э. не наблюдался вплоть до величины набранного заряда на единицу длины анодной проволоки 190  $\text{мКл/см}$ . Это позволяет сделать вывод, что вакуумное масло не приводит к возникновению м.э., по крайней мере, до этой дозы облучения.

В пятом опыте было проверено влияние отпечатков пальцев, оставленных на поверхности катодной проволоки в процессе изготовления д.к., на порог возникновения м.э. Для этого на одну из катодных проволок были нанесены отпечатки пальцев, после чего она была установлена в камеру. М.э. не наблюдался вплоть до величины набранного заряда 130  $\text{мКл/см}$  при к.г.у., равном  $4 \cdot 10^6$ .

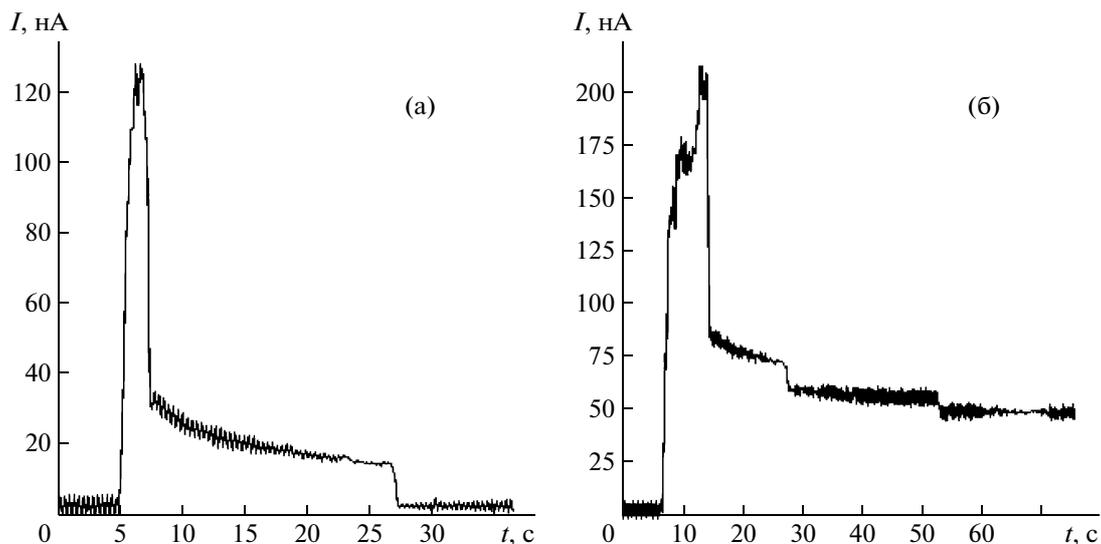


Рис. 13. Зависимость тока с катодной проволоочки от времени при кратковременной экспозиции (а) и при более длительной экспозиции (б) источником  $^{90}\text{Sr}$ .

Зависимость к.г.у. от набранного заряда показана на рис. 12. Измеренная скорость анодного старения составила  $370\% / (\text{Кл}/\text{см})$ .

При увеличении к.г.у. до  $2.5 \cdot 10^7$  в камере при облучении источником  $^{90}\text{Sr}$  возник самоподдерживающийся ток, который оставался и после удаления источника. Источником м.э. была проволоочка с отпечатками пальцев. На малтеровский характер шумового тока указывало следующее. Во-первых, при к.г.у., равном  $1.4 \cdot 10^6$ , остаточный ток после установки и после удаления  $^{90}\text{Sr}$  составлял  $\sim 5$  нА. Загрузка шумовыми импульсами была

равна  $29000 \text{ с}^{-1}$ . Если нормировать остаточный ток на к.г.у., то мы получим в нашем случае ток эмиссии  $3.6 \text{ фА}$ . Поделив его на заряд электрона, получим среднюю частоту эмиссии электронов  $23000 \text{ с}^{-1}$ , что хорошо согласуется с наблюдаемой частотой импульсов. Во-вторых, наблюдалось следующее явление. Если источник  $^{90}\text{Sr}$  удалить сразу после его установки (соответственно 7-я и 5-я секунды, рис. 13а), возникал неустойчивый м.э., который исчезал в течение  $\sim 20$  с. Это можно объяснить саморазрядкой пленки из-за недостаточного тока зарядки. Малтеровский ток при этом спадал и при некотором критическом значении

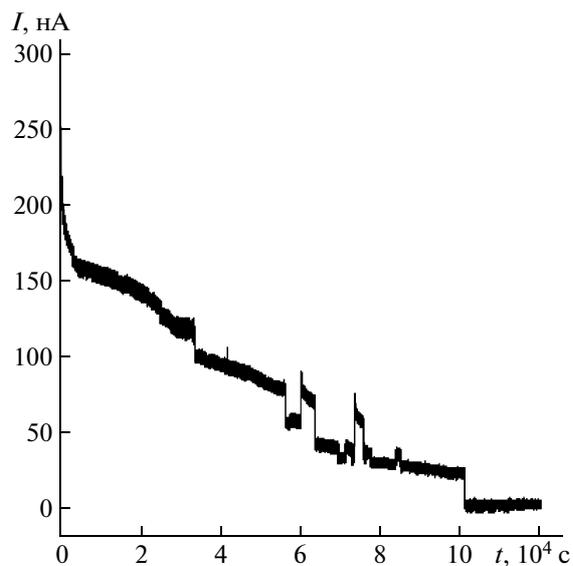


Рис. 14. Зависимость малтеровского тока от времени в опыте с отпечатками пальцев.

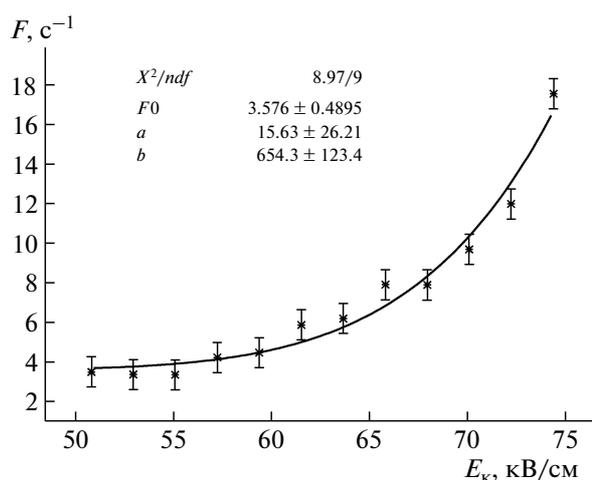


Рис. 15. Зависимость скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности электрического поля на поверхности титановой проволоки  $\varnothing 150 \text{ мкм}$  производства СССР, используемой в д.к. КЕДР (Ti/Cu/Au).

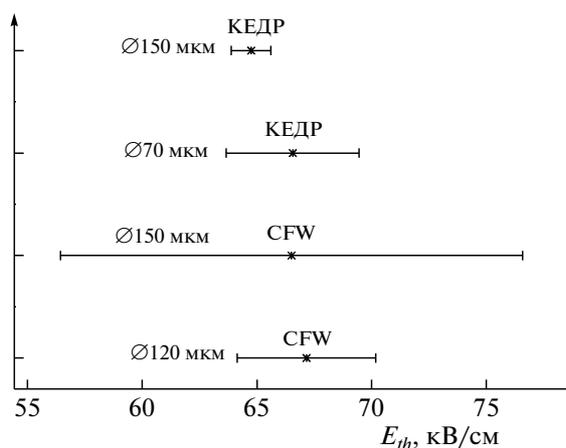


Рис. 16. Измеренные значения пороговой напряженности электрического поля на поверхности катодной проволоки для различных типов проволок.

на 27-й секунде резко уменьшался до нуля. Если при тех же условиях источник  $^{90}\text{Sr}$  не удалять до тех пор, пока не возникнет достаточно большой малтеровский ток, то даже после удаления источника ток будет устойчиво поддерживаться (рис. 13б).

В этом опыте была исследована временная зависимость малтеровского тока в течение суток (рис. 14). Видно, что со временем эмиссионная способность катода падает, и за время  $\sim 1$  сут м.э. полностью исчезает. Наблюдаемые ступенчатые изменения тока можно объяснить тем, что с течением времени эмиссионная способность острий постепенно снижается и в некоторый момент времени, при нарушении условия поддержания тока, ток с острий исчезает. Возможен и обратный процесс, когда с одного из нерабочих острий возникает самоподдерживающийся ток из-за случайно возросшей плотности тока, приходящего на него. На рис. 14 можно наблюдать оба этих процесса.

В шестом опыте было исследовано влияние дефектов золочения катодной проволоки на старение камер. Материал катодной проволоки на непокрытых золотом участках окисляется на воздухе. Так как окислы большинства металлов имеют плохую проводимость, накопление положительного заряда ионов на их поверхности может инициировать возникновение раннего м.э. Для исследования этого эффекта на золоченую поверхность одной из алюминиевых катодных проволок был напылен слой алюминия толщиной  $\sim 400 \text{ \AA}$  для имитации дефекта золочения алюминиевой проволоки. Малтеровский ток с алюминизированной проволоки не возникал вплоть до величины набранного заряда  $225 \text{ мКл/см}$ , после чего опыт был остановлен.

## 7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ПОРОГА ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОЭМИССИИ

Целью данных исследований был выбор катодной проволоки для разрабатываемой д.к. детектора КЕДР, поскольку использованная ранее в д.к. титановая проволока была изготовлена еще в СССР и в настоящее время не производится.

Была протестирована катодная проволока от разных производителей. Всего было выполнено десять измерений: по два измерения для титановой проволоки, покрытой золотом (Ti/Cu/Au),  $\varnothing 70$  и  $\varnothing 150$  мкм производства СССР и проволоки, изготовленной из сплава алюминия и покрытой золотом (Al/Ni/Au),  $\varnothing 120$  мкм производства компании California Fine Wire, а также по четыре измерения для проволоки  $\varnothing 150$  мкм производства компании California Fine Wire (CFW). Полученные в двух измерениях значения порога возникновения автоэмиссии усреднялись.

Результаты измерений скорости счета одноэлектронных импульсов в зависимости от напряженности электрического поля на поверхности катодной проволоки фитировались с помощью формулы (2) и для одной из исследованных проволок показаны на рис. 15. Средние значения пороговой напряженности электрического поля  $E_{th}$  для исследованных проволочек приведены на рис. 16 и составили:  $67 \pm 3 \text{ кВ/см}$  для алюминиевой проволоки  $\varnothing 120$  мкм производства компании California Fine Wire,  $67 \pm 10 \text{ кВ/см}$  для алюминиевой проволоки  $\varnothing 150$  мкм производства той же компании,  $67 \pm 3 \text{ кВ/см}$  для титановой проволоки  $\varnothing 70$  мкм производства СССР,  $65 \pm 1 \text{ кВ/см}$  для титановой проволоки  $\varnothing 150$  мкм производства СССР.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние различного вида загрязнений поверхности катодной проволоки на порог возникновения малтер-эффекта. Получены следующие результаты.

При отсутствии загрязнений на поверхности катодной проволоки м.э. не наблюдался вплоть до величины набранного заряда на единицу длины анодной проволоки  $0.8 \text{ Кл/см}$ .

Газовый разряд в камере приводит к ускоренной полимеризации и быстрому возникновению м.э.

Диэлектрические покрытия, такие как кремнийорганический лак, приводят к мгновенному возникновению м.э.; наблюдаемая при этом периодическая зависимость тока от времени обусловлена накоплением положительного заряда от ионов на поверхности пленки с последующим ее пробоем.

Вакуумное масло на поверхности катодной проволоки не провоцирует возникновение м.э. вплоть до величины набранного заряда на единицу длины анодной проволочки  $190 \text{ мКл/см}$ .

Отпечатки пальцев на поверхности катодной проволоки приводят к возникновению м.э. при величине набранного заряда на единицу длины анодной проволоочки, равной 130 мКл/см.

На проволоке с алюминиевым напылением м.э. не возникал вплоть до величины набранного заряда 225 мКл/см, что свидетельствует об отсутствии влияния дефектов золочения поверхности алюминиевой проволоки на порог возникновения м.э. до этой дозы облучения.

Ступенчатое изменение малтеровского тока указывает на дискретный характер источников м.э. Скачки тока при этом связаны с исчезновением или появлением малтеровской эмиссии на отдельных остриях. Кроме того, возникнув в одной точке, процесс становится самоподдерживающимся и распространяется вдоль проволоочки с характерной скоростью 0.3 см/с.

Измерение величины порога возникновения автоэмиссии золоченой алюминиевой и титановой катодной проволоки от различных производителей показало, что все образцы проволоки имеют близкие значения пороговой напряженности электрического поля, которые находятся в диапазоне 65–67 кВ/см. Исходя из этого можно сделать вывод, что алюминиевая проволока  $\varnothing 150$  мкм

производства California Fine Wire подходит для использования в новой д.к. детектора КЕДР.

В заключение авторы выражают благодарность А.С. Старостину за изготовление модели дрейфовой ячейки, Н.В. Плюснину за помощь при проведении измерений и И.Б. Николаеву за полезные обсуждения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anashin V.V., Aulchenko V.M., Baibusinov B.O., Balashov V. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A478. P. 420.
2. *Atwood W.B., Carr J., Chadwick G., Csorna S. et al.* // SLD Design report. SLAC-Report-273. 1984. P. 67.
3. *Villa F.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1983. V. 217. P. 273.
4. *Malter L.* // Phys. Rev. 1936. V. 50. P. 48.
5. *Blinov V.E., Popkov I.N., Yushkov A.N.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A515. P. 95.
6. <http://garfield.web.cern.ch/garfield/>
7. *Fowler R.H., Nordheim L.* // Proc. R. Soc. Lond. A. 1928. V. 119. P. 173.
8. *Alkhazov G.D.* // Nucl. Instrum. and Methods. 1970 V. 89. 1970. P. 155.
9. <http://www.slac.stanford.edu/cgi-wrap/getdoc/slac-pub-9058.pdf>