

УЧРЕЖДЕНИЕ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
им. Г.И. Будкера СО РАН  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН  
(ИЯФ СО РАН)

В.Е. Блинов, В.Г. Присекин

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

ИЯФ 2011-2

НОВОСИБИРСК  
2011

**Исследование катодного старения  
и порога возникновения автоэмиссии  
с катодных проволочек в дрейфовых камерах**

*В.Е. Блинов, В.Г. Присекин*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера  
630090, Новосибирск, Россия

**Аннотация**

В работе исследовано катодное старение проволочных камер и влияние на него различных загрязнений поверхности катодной проволоки. Для нескольких образцов катодной проволоки измерена пороговая напряжённость возникновения автоэлектронной эмиссии.

# 1 Введение

Дрейфовая камера (ДК) детектора КЕДР проработала в эксперименте около десяти лет и требует замены. В настоящее время ведутся работы по изготовлению новой дрейфовой камеры. В ДК детектора КЕДР [1] используется ячейка струйного типа с фокусировкой [2]. В качестве рабочего газа выбран диметилловый эфир (ДМЭ) [3]. Использование ДМЭ - газа с малым коэффициентом электронной диффузии позволяет получить среднее по ячейке пространственное разрешение 100 мкм при максимальной длине дрейфа равной 28 мм. В ДМЭ минимум зависимости коэффициента диффузии для одного электрона от напряжённости электрического поля достигается при 1.8 кВ/см. При этой напряжённости электрического поля в дрейфовом промежутке напряжённость на поверхности катодных проволочек достигает 40-45 кВ/см, что накладывает серьёзные требования к качеству поверхности катодной проволоки с точки зрения возникновения автоэлектронной эмиссии. Кроме того, высокая напряжённость на поверхности катодных проволочек повышает вероятность возникновения коронного разряда и ускоряет процесс катодного старения ДК.

В связи с изготовлением новой ДК возникла необходимость проверки качества поверхности образцов катодной проволоки от различных производителей для выбора типа проволоки наиболее подходящей для использования в новой дрейфовой камере детектора КЕДР.

С использованием в качестве катодов золочёной алюминиевой проволоки диаметром 120 мкм производства компании California Fine Wire было исследовано влияние различных загрязнений поверхности катодной проволоки на величину порога возникновения Малтер-эффекта (МЭ) [4].

## 2 Краткий обзор

Проблема радиационного старения сопровождают проволочные камеры с момента их появления, начиная с выхода из строя счетчиков Гейгера после регистрации определенного числа частиц и до относительно недавних проблем с радиационным старением дрейфовых камер 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. Поли-

меризация происходит в результате плазменно-химических процессов в лавине, развивающейся вблизи анодной проволоочки 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 проволоочки или удаляются с потоком газа из камеры. В результате этого на электродах камеры образуются полимерные покрытия. Покрытие на аноде приводит к увеличению диаметра проволоочки, напряженность поля на поверхности проволоочки понижается, и, как следствие этого, уменьшается коэффициент газового усиления. Неоднородность покрытия вдоль проволоочки 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 направлении катода. Там она нейтрализуется и может остаться на его поверхности. В результате этого 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 (МЭ), так как аналогичное явление тонкопленочной полевой эмиссии было обнаружено Малтером [4].

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

Поверхность проволоки можно представить в виде набора микровыступов (острий) и впадин между ними. Микровыступы фокусируют на себя силовые линии электрического поля из области с характерным диаметром равным по порядку величины высоте выступа (рис. 1) с площадью сечения  $S_1$ , на малую площадь острия  $S_2$ . Ток положительных ионов, движущихся вдоль силовых линий, также фокусируется. В результате этого плотность тока положительных ионов и положительно заряжен-

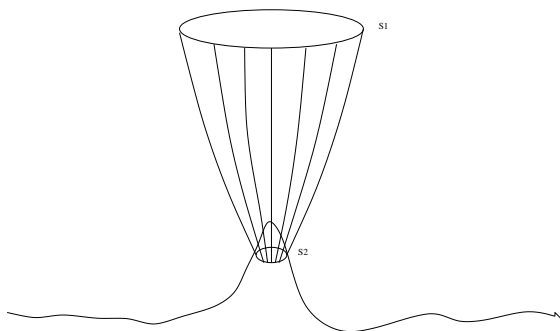


Рис. 1. Форма силовых линий в области микроострий на поверхностях анодной и катодной проволочек.

ных полимерных молекул на поверхности острия в  $\frac{S_1}{S_2}$  раз больше, чем на соседних участках проволоки. Поэтому скорость роста пленки пропорциональна напряженности поля на поверхности и может во много раз превосходить скорость роста покрытия на соседних участках поверхности проволоки. Характерное значение средней напряженности электрического поля на поверхности катодной проволоки равно 20 – 40 кВ/см, при этом на конце острия оно может достигать значения порядка 1 МВ/см и более. Как следствие этого, именно на поверхности острий в первую очередь достигаются условия при которых начинается МЭ. Кроме того, из-за высокой напряжённости электрического поля автоэмиссия тоже в первую очередь возникает с поверхности острий.

Целью данного исследования было измерение порога возникновения автоэмиссии с поверхности катодных проволочек различного диаметра, произведенных в СССР и США. Было проведено измерение порога возникновения автоэмиссии в чистых условиях и изучено влияние различных загрязнений поверхности катодной проволоки на порог возникновения МЭ. Необходимость этого исследования мотивирована тем, что в процессе изготовления и эксплуатации ДК на поверхность катодных проволочек могут попадать различного рода неконтролируемые загрязнения, вызывающие быстрое появление МЭ и делающие использование ДК в эксперименте проблематичным. В данной работе было исследовано влияние на порог возникновения МЭ загрязнений поверхности катодной проволоки изоляционным лаком, вакуумным маслом и отпечатками пальцев.

Кроме этого было изучено влияние дефектов золочения проволоки на понижение порога возникновения МЭ. В случае алюминиевой проволоки, использованной в данном исследовании, и некоторых других металлов, на их поверхности в воздухе образуется тонкая окисная пленка, имеющая большое удельное сопротивление, которая может, в принципе, привести к понижению порога возникновения МЭ. Для проверки влияния дефектов золочения на возникновение МЭ на поверхность катодной проволоки в вакууме было напылено алюминиевое покрытие, на котором в процессе натяжения камеры в воздухе образовалась окисная пленка  $Al_2O_3$  толщиной порядка  $100 \text{ \AA}$

### 3 Описание установки

Для исследования катодного старения и измерения порога возникновения автоэмиссии с поверхности катодной проволоки была изготовлена модель дрейфовой камеры, содержащая одну гексагональную ячейку (рис. 2). По центру корпуса из нержавеющей стали с внутренним диамет-

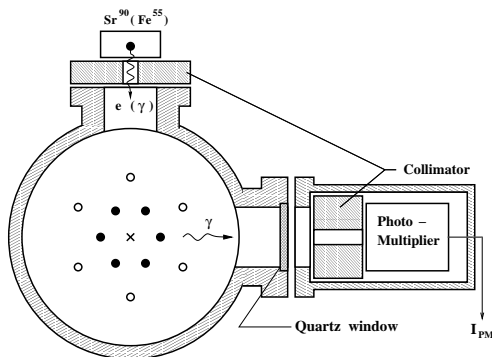


Рис. 2. Вид дрейфовой ячейки.

ром 60 мм натянута анодная проволока. На радиусах 10 мм и 20 мм в виде правильных шестиугольников натянуты 6 катодных и 6 экранных проволок соответственно. Экранные проволочки повернуты на 30 градусов относительно катодных. Анодная проволока диаметром 20 мкм изготовлена из позолоченного вольфрам-рениевого сплава, в качестве катодной были использованы несколько типов проволочек от различных производителей: диаметром 120 мкм и 150 мкм из позолоченного алюминиевого

сплава (производства США, компания California Fine Wire) и диаметром 70 мкм и 150 мкм из позолоченного титанового сплава (производства СССР, предприятие Московский электроламповый завод (МЭЛЗ)). Экранные проволоки диаметром 150 мкм были сделаны из позолоченного титанового сплава. В камере имеется два бериллиевых окна для облучения ячейки изотопами  $\text{Sr}^{90}$  и  $\text{Fe}^{55}$ . Напротив одного из бериллиевых окон расположено кварцевое окно для регистрации света из 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 подаётся на анодную и экранные проволоочки, а катодные проволоочки заземлены.

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

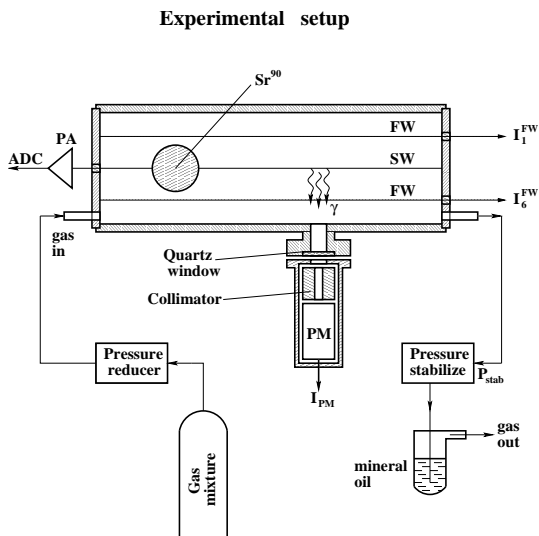


Рис. 3. Схема установки.

Схема электроники приведена на рис. 4. Сигнал с анодной проволоочки через разделительный конденсатор поступает на вход предусилителя (ПУ). Усиленный сигнал после ПУ по витой паре в экране идет в блок ТА. Там он дополнительно усиливается, разветвляется и один сигнал поступает на дискриминатор, логический импульс с которого подается на выход Т блока ТА, а другой поступает на выход А. Амплитудный сигнал с блока ТА проходит через линию задержки и поступает на вход зарядно-цифрового преобразователя (ЗЦП). Сигнал с выхода Т блока ТА поступает на формирователь импульсов (ФИ), задающий время интегрирования аналогового импульса для ЗЦП. При измерении загрузки одноэлектронными импульсами сигнал с ФИ подавался на пересчетку.

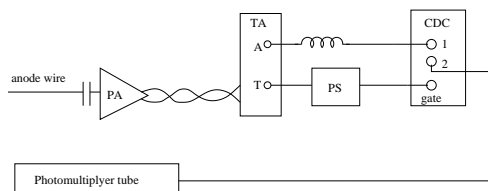


Рис. 4. Схема электроники для набора амплитудных спектров сигналов с проволоочки и ФЭУ (PS-формирователь импульсов Л0311, CDC-ЗЦП Ц0312).

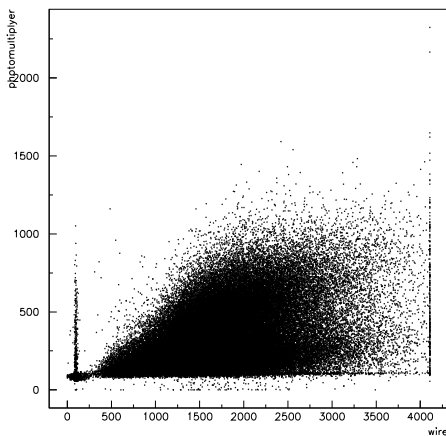


Рис. 5. Корреляция величины коэффициента газового усиления и числа фотонов, образующихся в лавине.



Одновременное измерение импульсов с предусилителя и с ФЭУ указывает на наличие корреляции величины коэффициента газового усиления и числа фотонов, образующихся в лавине (рис. 5). Выбранная нами схема измерений позволяет мониторировать процесс возникновения МЭ в стороне от места облучения ячейки изотопом  $\text{Sr}^{90}$  и таким образом измерять время распространения процесса возникновения источников малтеровских электронов вдоль катодной проволоочки. В процессе облучения ячейки изотопом  $\text{Sr}^{90}$  непрерывно производится измерение тока с каждой из катодных проволоочек и запись измеренных значений токов для дальнейшей обработки.

## 4 Расчёт ячейки

Для расчета электрических полей в ячейке ДК и напряженности поля на поверхности проволоочек использовалась программа Garfield [6].

Для определения порога возникновения автоэлектронной эмиссии с катода необходимо измерить зависимость скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности на поверхности катодной проволоочки  $E_c$ . При проведении этих измерений необходимо, чтобы коэффициент газового усиления был постоянен. В результате проведенных расчетов для анодной проволоки диаметром 20 мкм, катодных проволок диаметром 70 мкм и экранных диаметром 150 мкм были получены следующие соотношения:

$$\begin{aligned} U_a &= 6.907 \cdot E_a - 13.577 \cdot E_c , \\ U_e &= -1.329 \cdot E_a - 41.461 \cdot E_c , \end{aligned}$$

где  $U_a$  и  $U_e$  – напряжения на аноде и экранах в вольтах, а  $E_a$  и  $E_c$  – напряжённости электрического поля на поверхности анодной и катодной проволок в кВ/см. Для катодных проволок диаметром 120 мкм имеем:

$$\begin{aligned} U_a &= 6.907 \cdot E_a - 19.982 \cdot E_c , \\ U_e &= -0.944 \cdot E_a - 53.928 \cdot E_c , \end{aligned}$$

а для катодных проволок диаметром 150 мкм в результате расчетов получаем:

$$\begin{aligned} U_a &= 6.907 \cdot E_a - 23.3 \cdot E_c , \\ U_e &= -0.943 \cdot E_a - 65.731 \cdot E_c . \end{aligned}$$

Из этих соотношений видно, что если изменять напряжения на анодой и экранных проволоках так, чтобы  $E_a$  оставалась постоянной, а  $E_c$  изменялась, то возможно провести измерение зависимости загрузки одноэлектронными импульсами от  $E_c$  при постоянном коэффициенте газового усиления.

## 5 Процедура измерения катодного старения и порога автоэмиссии

При исследовании катодного старения для облучения ячейки применялся  $\beta$ -изотоп  $\text{Sr}^{90}$ , устанавливаемый на одно из бериллиевых окон модели. 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 изотоп  $\text{Sr}^{90}$  убирался, вычислялся набранный заряд на единицу длины анодной проволоки и в пропорциональном режиме измерялись амплитудные спектры  $\text{Fe}^{55}$  с облученного и необлученного участков. Скорость старения находилась по формуле:

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

где  $A_0$  – амплитуда с необлученного участка,  $A$  – амплитуда с облученного участка после набора заряда на единицу длины анодной проволоочки  $Q$ . После этого облучение изотопом  $\text{Sr}^{90}$  продолжалось. Непрерывное измерение токов с катодных проволок позволяло обнаружить момент возникновения МЭ, увидеть зависимость малтеровского тока от времени, а также определить какая из катодных проволок является источником МЭ. Для проведения одного измерения требовалось время от одного до двух месяцев.

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

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

$$F = F_0 + aE_c^2 e^{-\frac{b}{E_c}}, \quad (2)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры, определяемые из подгонки. В исходную формулу Фаулера-Нордхейма было введено дополнительное слагаемое  $F_0$ , которое учитывает фоновую загрузку, не связанную с автоэмиссией. Систематическая погрешность измерения загрузки одноэлектронными импульсами в каждом тесте определялась из требования чтобы  $\chi^2/ndf$  был равен единице. Пороговая напряжённость электрического поля  $E_{th}$  вычислялась из уравнения:

$$a E_{th}^2 e^{-\frac{b}{E_{th}}} = F_{th},$$

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 типов катодной проволоки.

Для правильного выбора порога дискриминатора электронного тракта в измерениях скорости счета одноэлектронных импульсов необходимо знать коэффициент газового усиления (КГУ), измеренный с одним электроном первичной ионизации.

Для измерения КГУ с одноэлектронными импульсами модель через кварцевое окно освещалась галогеновой лампой. В результате фотоэффекта с поверхности катодной проволоки эмитировались электроны. Измеренные амплитудные спектры фитировались зависимостью:  $P(N) = \alpha \cdot e^{-N/N_0}$  (упрощённый закон Поля [8]) и показаны на рис. 6. Здесь  $N$  – номер амплитудного канала, а  $N_0$  – величина, пропорциональная КГУ. Из полученного значения  $N_0$  вычислялся коэффициент газового усиления.

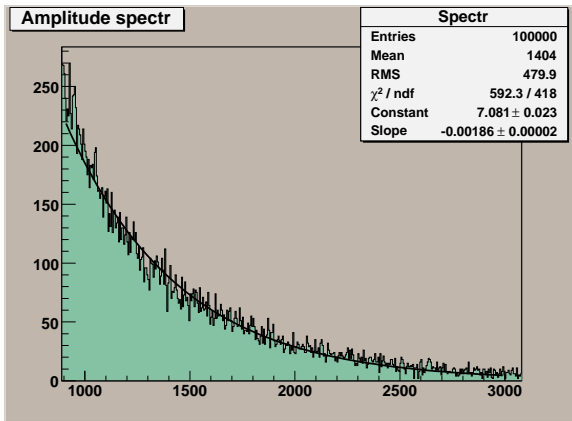


Рис. 6. Амплитудный одноэлектронный спектр, полученный при освещении 70 мкм проволоки галогеновой лампой (фотоэффект).

ния. Измеренное значение КГУ составило  $7.3 \cdot 10^6$ . Во всех измерениях загрузки одноэлектронными импульсами КГУ был фиксирован на этом значении.

## 6 Результаты измерений катодного старения

В радиационных тестах было исследовано влияние различных загрязнений поверхности катодной проволоки на порог возникновения МЭ с газовой смесью  $He/iC_4H_{10}$  (80/20). Все измерения катодного старения были проведены с золоченой алюминиевой катодной проволокой диаметром 120 мкм производства компании California Fine Wire и анодной проволокой диаметром 20 мкм из золочёного вольфрам-рениевого сплава. После каждого радиационного теста проводилась замена анодной и катодных проволочек. Экранные проволочки не менялись. Результаты измерений представлены ниже.

**В первом тесте** МЭ возник сразу после начала облучения ячейки изотопом  $Si^{90}$ . Токи с катодных проволочек в зависимости от времени показаны на рис. 7. Нумерация проволочек на рисунке слева направо и сверху вниз. Ток на каждой катодной проволочке до возникновения МЭ

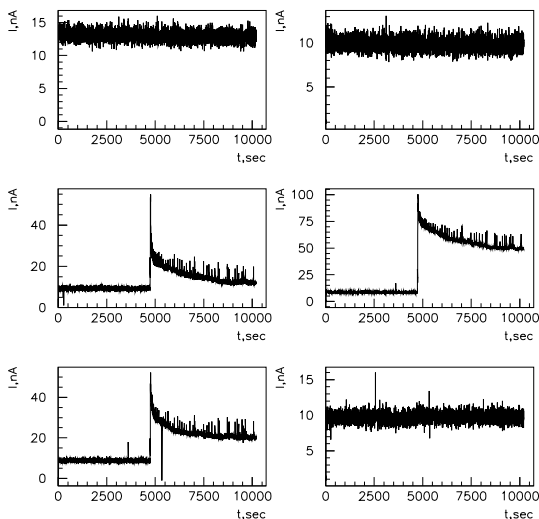


Рис. 7. Временная зависимость тока с катодных проволочек. Нумерация проволочек слева направо сверху вниз. Источник МЭ четвертая проволочка.

от изотопа  $\text{Sr}^{90}$  составляет 10 нА. Видно, что остаточный ток после прекращения облучения был на группе соседних проволок. Токи с третьей и пятой проволок примерно одинаковы и составляют 50 нА, ток с четвертой проволоки выше и в начальный момент равен 100 нА. Токи со всех проволок уменьшаются со временем. Похожее поведение малтеровского тока в дрейфовой камере впервые было обнаружено в работе [9]. Такая зависимость тока от времени связана с тем, что при бомбардировке полимерной пленки на поверхности катодной проволоки положительными ионами она нагревается, уменьшается ее сопротивление, заряд на пленке понижается и, как следствие, снижается ток малтеровской эмиссии. Источником малтеровских электронов в этом тесте служила четвертая проволока, а ток с третьей и пятой проволок связан с диффузией электронов в лавине вблизи анодной проволоки. Причиной возникновения раннего МЭ в этом тесте было то, что по ошибке в начале теста камера продувалась плохо перемешанной газовой смесью, в которой концентрация изобутана была мала и по этой причине в камере возник газовый разряд, горевший около часа. Наличие разряда послужило причиной быстрого роста полимерной пленки на катодах, которая и привела к раннему возникновению МЭ. Это соображение подтверждается тем, что после замены проволок в камере ранний МЭ обнаружен не был. В этом тесте было обнаружено запаздывание нарастания тока с ФЭУ относительно нарастания тока с проволоки примерно на 30 секунд. Это указывает на то, что вначале малтеровская эмиссия начинается на участке проволоки в месте облучения и лишь со временем распространяется на соседние участки, и, в конце концов, захватывает всю проволоку.

**Во втором тесте** измерялась радиационная стойкость дрейфовой ячейки при отсутствии искусственных загрязнений поверхности катодной проволоки. В этих условиях МЭ не наблюдался до набранного заряда на единицу длины анодной проволоки 800 мКл/см. Тест был остановлен после трех месяцев облучения.

**В третьем тесте** исследовалось влияние диэлектрического загрязнения катодной проволоки на порог возникновения МЭ. Для этого на участок поверхности одной из катодных проволок был нанесен тонкий слой кремнийорганического лака. В этом случае МЭ возник уже при облучении ячейки малоинтенсивным изотопом  $\text{Fe}^{55}$ . Токи с катодных проволок, измеренные в этом тесте, показаны на рис. 8. Видно, что ток с загрязненной проволоки несколько меньше чем с соседних. Что указывает на то, что напряжение на наружной поверхности диэлектрического покрытия этой проволоки становится положительным из-за накопления положительного заряда на ее поверхности. Картина силовых линий элект-

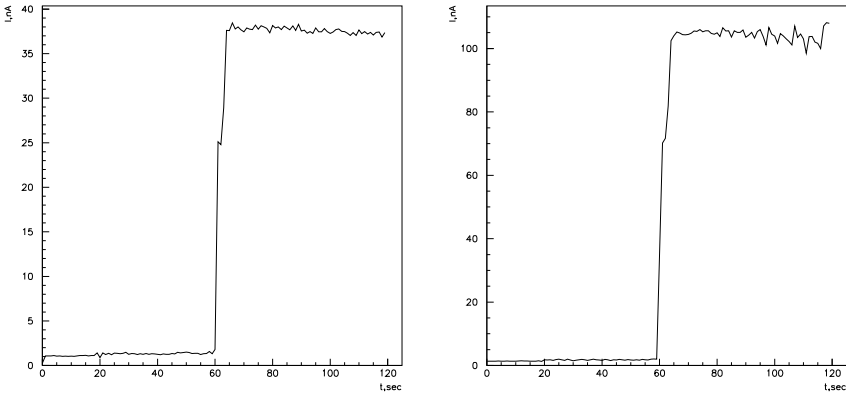
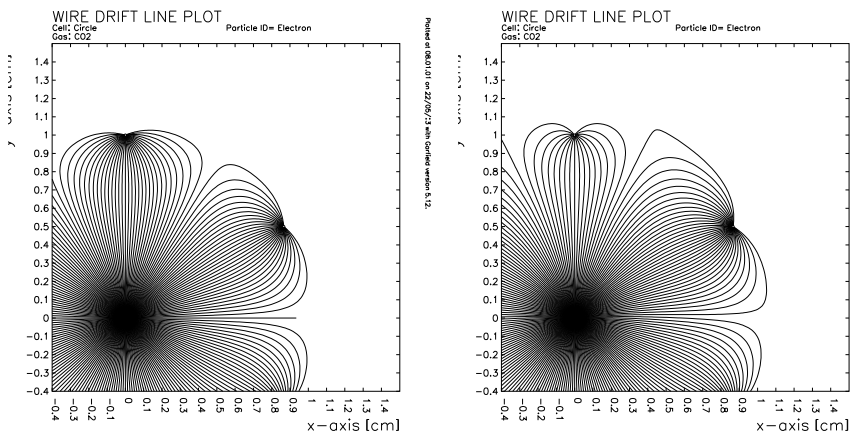


Рис. 8. Временная зависимость тока с катодной проволоочки, покрытой лаком (слева) и с соседней проволоочки (справа).

трического поля в ячейке при этом искажается так, что положительные ионы из лавины в большей степени собираются на соседние катодные проволоочки, чем на проволоочку, являющуюся источником МЭ. Результаты расчета программой GARFIELD [6] показывают, что если напряжение на покрытой лаком проволоочке увеличить до  $+200$  В, то отношение тока с этой проволоочки к току с соседней будет равно 0.44. Картины силовых линий электрического поля в ячейке для случая заземленных катодных проволоочек и когда потенциал на одной из них равен  $+200$  В показаны на рис. 9 слева и справа соответственно. Для этого случая расчетное значение отношения токов близко к наблюдаемому. На рис. 10 приведена зависимость тока с катодной проволоочки, покрытой лаком, с большим временным разрешением. Хорошо видна периодическая зависимость тока от времени. Дадим объяснение этого явления на примере правого верхнего рисунка. Вначале пленка заряжается положительными ионами, напряженность поля в ней возрастает, в некоторый момент возникает Малтеровский ток, который нарастает со временем, однако, в некоторый момент напряженность поля превышает критическую и пленка пробивается. Малтеровский ток при этом исчезает и процесс повторяется снова. На рис. 10 видно, что при большем КГУ увеличивается ток зарядки пленки, а следовательно время необходимое для зарядки до напряжения пробоя уменьшается, как следствие уменьшается период следования импульсов, что согласуется с ранее изложенной моделью. В подтверждение этой модели говорит и тот факт, что после извлечения проволоочки, покрытой лаком, на ее поверхности были видны темные точки, указывающие на те



Printed at 08/11/17 on 22/02/17 with Scientific version 3.15.

Рис. 9. Линии дрейфа в случае, когда все катодные проволоки заземлены (слева) и когда на одной из них (верхней) напряжение 200 В (справа).

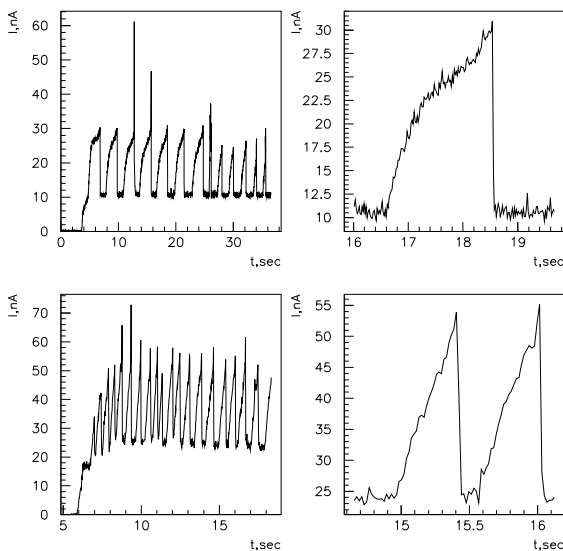


Рис. 10. Временная зависимость тока с проволоочки, покрытой лаком, для двух условий измерения. Вверху –  $KГУ = 7.3 \times 10^4$ ,  $E_k = 20$  кВ/см. Внизу –  $KГУ = 2 \times 10^5$ ,  $E_k = 17$  кВ/см.

места, где слой лака пробился. Кроме того, напряжение пробоя лаковой пленки, измеренное экспериментально, в среднем составляет 300 – 350 В, что удовлетворительно согласуется со значением положительного потенциала, возникающего на катодной проволоке, покрытой лаком, в измерении.

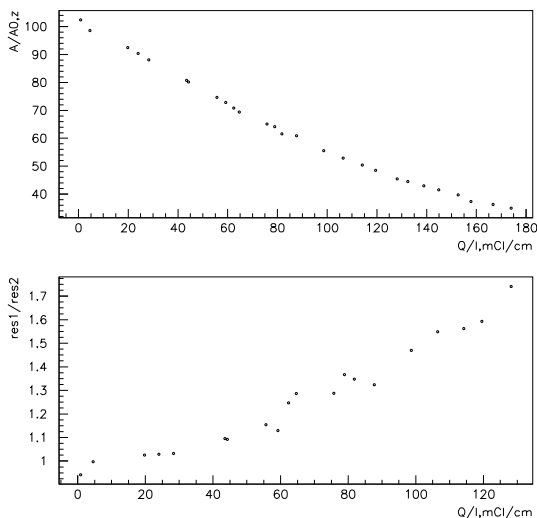


Рис. 11. Измеренная зависимость усиления (вверху) и амплитудного разрешения (внизу) от набранного заряда на единицу длины проволоочки в тесте с вакуумным маслом ( $R=380 \text{ } \%/(\text{Кл}/\text{см})$ ). Значения усиления и амплитудного разрешения нормированы на соответствующие значения, измеренные на необлученном участке проволоочки.

**В четвертом тесте** исследовалось влияние загрязнения поверхности катодной проволоки вакуумным маслом. В камерах причиной такого загрязнения могут служить мельчайшие капли масла из газовых затворов, оседающие на поверхности катодных проволок. В этом тесте проволочка с лаком была заменена на проволочку с тонким слоем вакуумного масла VM-1. Скорость анодного старения в этом тесте получилась равной  $380 \text{ } \%/(\text{Кл}/\text{см})$ . Зависимости КГУ (вверху) и амплитудного разрешения камеры (внизу) от набранного заряда показаны на рис. 11. Амплитудное разрешение медленно изменяется до дозы 40 мКл/см, но при больших дозах наблюдается более быстрое ухудшение амплитудного разрешения. В конце теста оно ухудшилось в 1.7 раз. В этом измерении МЭ не на-



блюдался вплоть до набранного заряда на единицу длины анодной проволоочки 190 мКл/см, из чего можно заключить, что вакуумное масло не приводит к МЭ по крайней мере до этой дозы облучения.

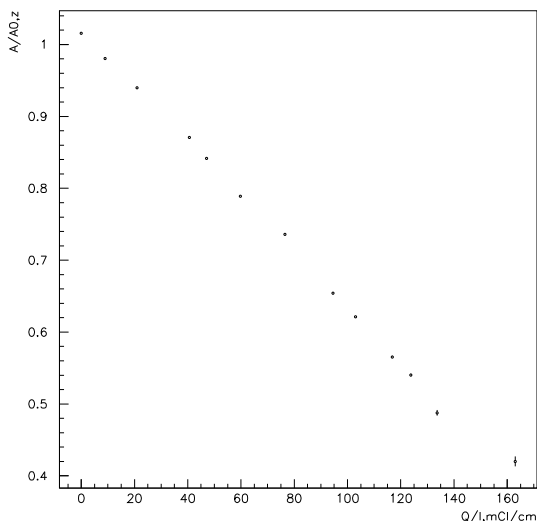


Рис. 12. Измеренная зависимость коэффициента газового усиления от набранного заряда на единицу длины анодной проволоочки в тесте с отпечатками пальцев ( $R=370\%/(\text{Кл}/\text{см})$ ). Коэффициента газового усиления нормирован на значение КГУ на необлученном участке проволоочки.

**В пятом тесте** было проверено влияние отпечатков пальцев, оставленных на поверхности катодной проволоки в процессе изготовления ДК, на порог возникновения МЭ. Для этого на одну из катодных проволок были нанесены отпечатки пальцев и она была установлена в камеру. В этом измерении малтер эффект не наблюдался вплоть до набранного заряда 130 мКл/см при КГУ =  $4 \times 10^6$ . Зависимость КГУ от набранного заряда показана на рис. 12. Измеренная скорость анодного старения составила 370 %/(Кл/см). При увеличении КГУ до  $2.5 \times 10^7$  для ускорения теста в камере возник самоподдерживающийся ток при облучении  $\text{Sr}^{90}$ , который оставался после удаления изотопа. Источником МЭ была проволочка с отпечатками пальцев. Имелись два указания на малтеровский характер шумового тока. Во-первых, при КГУ =  $1.4 \times 10^6$  остаточный ток после установки и удаления  $\text{Sr}^{90}$  составлял порядка 5 нА. Загрузка шумовыми импульсами была равна 29 кГц. Если нормировать остаточ-

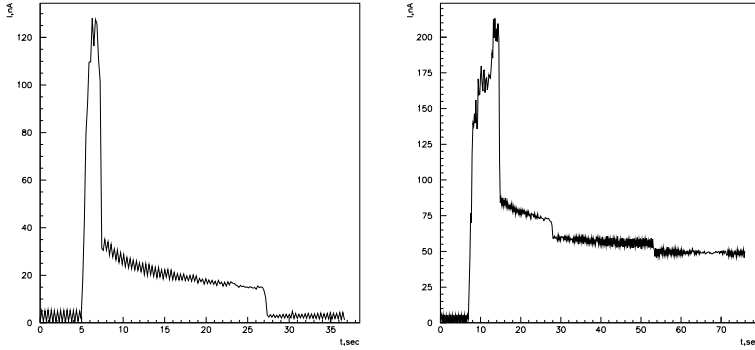


Рис. 13. Зависимость тока с катодной проволоочки от времени при кратковременной экспозиции изотопа  $Sr^{90}$  (слева) и при более длительной экспозиции изотопом (справа).

ный ток на КГУ, то мы получим ток эмиссии, равный в нашем случае 3.6 фА. Поделив его на заряд электрона, получим среднюю частоту эмиссии электронов равную 23 кГц, что хорошо согласуется с наблюдаемой частотой импульсов. Кроме того, наблюдалось следующее явление. При быстрой установке (5-я секунда, рис. 13) и удалении изотопа  $Sr^{90}$  (7-я секунда, рис. 13) возникал неустойчивый МЭ, который исчезал за время порядка 20 секунд (рис. 13). Такое поведение малтеровского тока можно объяснить саморазрядкой пленки из-за недостаточного тока зарядки. Малтеровский ток при этом спадал и при некотором критическом значении на 27-ой секунде резко уменьшался до нуля. Если при тех же условиях подержать изотоп  $Sr^{90}$  дольше, чтобы возник достаточно большой малтеровский ток, то после удаления изотопа ток остается и устойчиво поддерживается (рис. 13, справа).

В этом измерении была исследована временная зависимость малтеровского тока в течение суток. Зависимость малтеровского тока от времени в этом тесте показана на рис. 14. Видно, что со временем эмиссионная способность катода падает и за время порядка суток МЭ полностью исчезает. Наблюдаемые ступеньчатые изменения тока наиболее естественно можно объяснить следующим образом. Вначале с нескольких острий на катодной проволоке начинается Малтеровская эмиссия. С течением времени эмиссионная способность их постепенно понижается и в некоторый момент времени для одного из них условие поддержания тока нарушается и ток с него исчезает. В дальнейшем подобное происходит и с другими

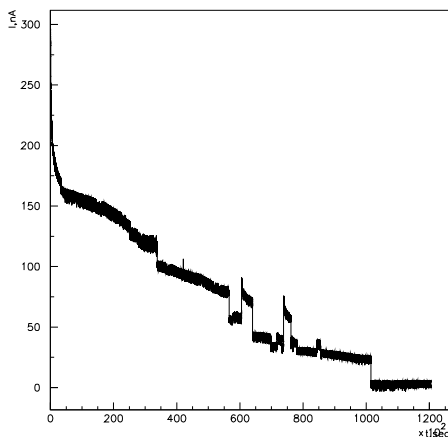


Рис. 14. Зависимость Малтеровского тока от времени в тесте с отпечатками.

точечными источниками МЭ. 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 видны оба этих процесса.

**В шестом тесте** 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, то накопление положительного заряда ионов на их поверхности может инициировать возникновение раннего МЭ. Для исследования этого эффекта в случае алюминиевой проволоки на золоченую поверхность одной из катодных проволок был напылен слой алюминия толщиной порядка  $400\text{\AA}$ , который имитировал дефект золочения алюминиевой проволоки. В этом измерении малтеровский ток с алюминизированной проволоки не возникал до набраного заряда  $130\text{ мКл/см}$ , при котором тест был остановлен.

## 7 Результаты измерений порога возникновения автоэмиссии

Целью данных исследований был выбор подходящей катодной проволоки для использования ее при изготовлении новой ДК детектора КЕДР, так как использованная для натяжения существующей ДК титановая

проволока, изготовленная в СССР, в настоящее время не производится.

Были протестированы четыре типа катодной проволоки от разных производителей. Всего было выполнено десять тестов – по два измерения для трёх типов проволоки и четыре измерения для 150 мкм проволоки производства компании California Fine Wire. Полученные в двух измерениях значения порога возникновения автоэмиссии усреднялись. Были испытаны два типа титановой проволоки покрытой золотом (Ti/Cu/Au) диаметром 70 мкм и 150 мкм производства СССР, в настоящее время используемые в ДК КЕДР. Кроме этого были испытаны два типа проволоки, изготовленной из сплава алюминия и покрытые золотом (Al/Ni/Au) диаметром 120 мкм и 150 мкм производства компании California Fine Wire (CFW).

Результаты измерений частоты одноэлектронных импульсов от напряжённости электрического поля на поверхности катодной проволочки фиксировались с помощью формулы 2. Результаты измерений для разных типов катодной проволоки показаны на рис.15–18. Средние значения пороговой напряжённости электрического поля  $E_{th}$  для этих проволочек приведены на рис. 19 и равны:  $E_{th} = 67 \pm 3$  кВ/см для алюминиевой проволоки диаметром 120 мкм производства компании California Fine Wire,  $E_{th} = 67 \pm 10$  кВ/см для алюминиевой проволоки диаметром 150 мкм производства той же компании,  $E_{th} = 67 \pm 3$  кВ/см для титановой проволоки диаметром 70 мкм производства СССР,  $E_{th} = 65 \pm 1$  кВ/см для титановой проволоки диаметром 150 мкм производства СССР.

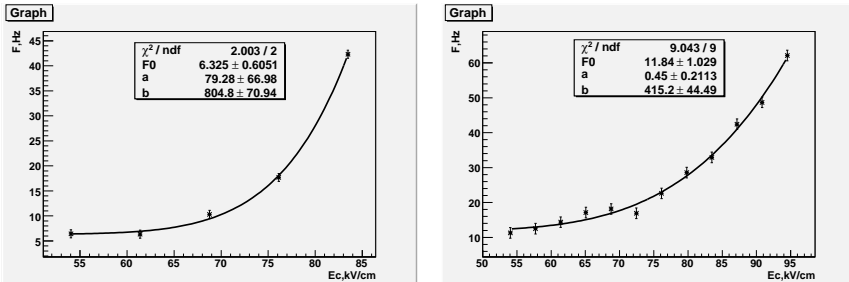


Рис. 15. Зависимость скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности электрического поля на поверхности титановой проволоки диаметром 70 мкм, используемой в ДК КЕДР (Ti/Cu/Au).

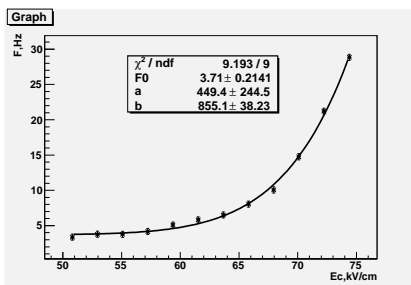
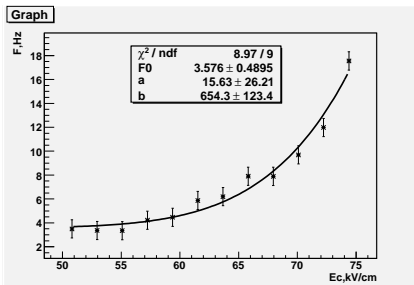


Рис. 16. Зависимость скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности электрического поля на поверхности титановой проволоки диаметром 150 мкм, используемой в ДК КЕДР (Ti/Cu/Au).

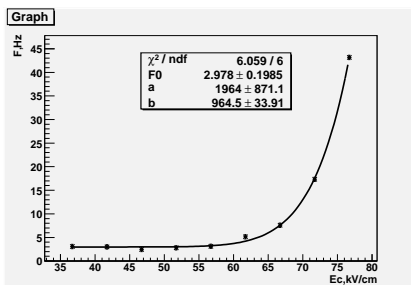
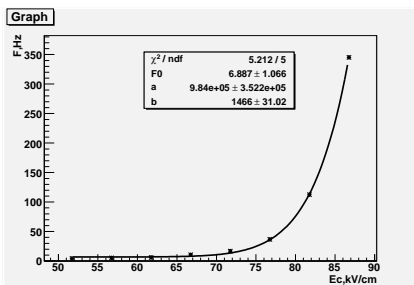


Рис. 17. Зависимость скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности электрического поля на поверхности алюминиевой проволоки диаметром 120 мкм производства CFW (Al/Ni/Au).

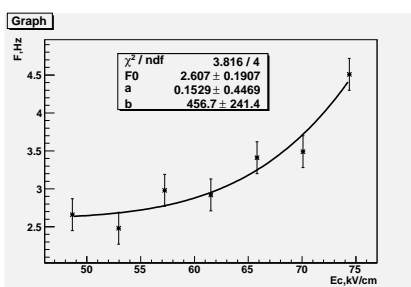
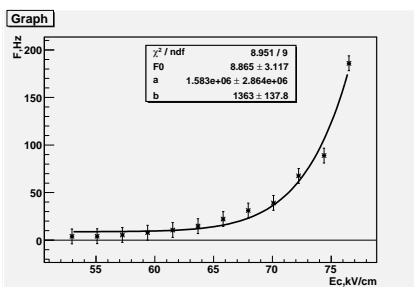


Рис. 18. Зависимость скорости счета одноэлектронных импульсов от напряженности электрического поля на поверхности алюминиевой проволоки диаметром 150 мкм производства CFW (Al/Ni/Au).

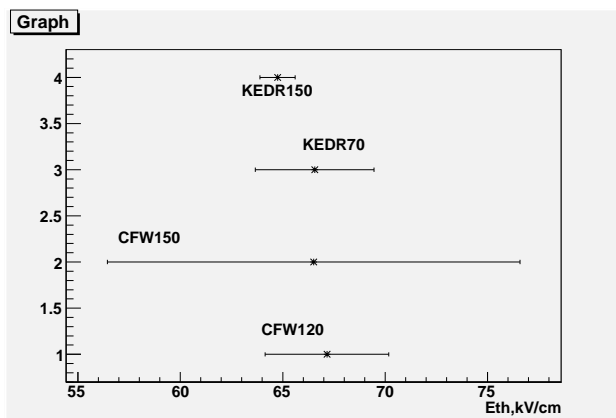


Рис. 19. Измеренные значения пороговой напряжённости электрического поля на поверхности катодной проволоки для различных типов проволок. CFW120 – проволока диаметром 120 мкм производства компании California Fine Wire (CFW). Материал Al/Ni/Au. CFW150 – проволока диаметром 150 мкм производства CFW (Al/Ni/Au). KEDR70 – проволока диаметром 70 мкм, используемая в ДК КЕДР, производства СССР (Ti/Cu/Au). KEDR150 – проволока диаметром 150 мкм, используемая в ДК КЕДР, производства СССР (Ti/Cu/Au).

## 8 Заключение

В работе исследовано влияние различных загрязнений поверхности катодной проволоки на порог возникновения Малтер-эффекта:

При отсутствии загрязнений на поверхности катодной проволоки Малтер-эффект не наблюдался до набранного заряда на единицу длины анодной проволоки равного 0.8 Кл/см.

Газовый разряд в камере приводит к ускоренной полимеризации и быстрому возникновению Малтер-эффекта.

Диэлектрические покрытия, подобные кремнийорганическому лаку приводят к мгновенному МЭ. Наблюдаемая при этом периодическая зависимость тока от времени, связана с накоплением положительного заряда от ионов на поверхности пленки с последующим ее пробоем. Однако вакуумное масло на поверхности катодной проволоки не провоцирует возникновение Малтер-эффекта до набранного заряда на единицу длины анодной проволоки 190 мКл/см.

Отпечатки пальцев на поверхности катодной проволоки ускоряют возникновение Малтер-эффекта, который возник при величине набранного

заряда на единицу длины анодной проволоочки равной 130 мКл/см.

На проволоке с алюминиевым напылением не возник Малтер-эффект до заряда 130 мКл/см. Таким образом, влияние дефектов золочения поверхности алюминиевой проволоки на порог возникновения МЭ до этой дозы облучения не обнаружено.

Ступенчатое изменение Малтеровского тока указывает на дискретный характер источников МЭ. Скачки тока при этом связаны с исчезновением и 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 проволок от различных производителей показало, что все образцы проволоки имеют близкие значения пороговой напряжённости электрического поля, которые лежат в диапазоне 65 – 67 кВ/см. Исходя из чего, можно заключить, что алюминиевая проволока диаметром 150 мкм производства California Fine Wire подходит для использования в новой дрейфовой камере детектора КЕДР.

#### **Благодарности.**

В заключении 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] *V.V. Anashin et al.*. Status of the KEDR detector. Nucl. Instr. and Meth. A478 (2002) 420-425.
- [2] *W.B. Atwood et al.*. Performance Of The Sld Central Drift Chamber Prototype. SLD Design report, SLAC-Report-273 (1984).
- [3] *F. Villa*. Dimethylether: A Low Velocity, Low Diffusion Drift Chamber Gas. Nucl. Instr. and Meth. 217 (1983) 273.
- [4] *L.Malter*. Phys. Rev. 50 (1936) 48.
- [5] *V.E. Blinov, I.N. Popkov, A.N. Yushkov*. Aging measurements in wire chambers. Nucl. Instr. and Meth. A515 (2003) 95.
- [6] *Rob Veenhof*. GARFIELD, a drift chamber simulation program.
- [7] *R.H. Fowler, L. Nordheim*. Electron Emission in Intense Electric Fields. Proc. R. Soc. Lond. A-1928, Vol.119, p.173-181.
- [8] *G.D. Alkhazov*, Nucl. Instr. and Meth. 89 (1970) 155-165.
- [9] *A.M. Boyarski*. SLAC-PUB-9058.

# Содержание

1	Введение	3
2	Краткий обзор	3
3	Описание установки	6
4	Расчёт ячейки	9
5	Процедура измерения катодного старения и порога автоэмиссии	10
6	Результаты измерений катодного старения	12
7	Результаты измерений порога возникновения автоэмиссии	19
8	Заключение	22
9	Список литературы	23



*В.Е. Блинов, В.Г. Присекин*

**Исследование катодного старения  
и порога возникновения автоэмиссии  
с катодных проволочек в дрейфовых камерах**

*V.E. Blinov, V.G. Prisekin*

**Investigation of cathode aging  
and cathode wires autoemission in drift chambers**

**ИЯФ 2011-2**

Ответственный за выпуск А.В. Васильев

Работа поступила 3.02.2011 г.

---

Сдано в набор 4.02.2011 г.

Подписано в печать 10.02.2011 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 85 экз. Бесплатно. Заказ № 2

---

Обработано на РС и отпечатано на  
ротапринте «ИЯФ им. Г.И. Будкера» СО РАН  
*Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*