

В.Е. Блинов, И.Н. Попков, А.Н. Юшков

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО
СТАРЕНИЯ ПРОВОЛОЧНЫХ КАМЕР

ИЯФ 2001-52

Новосибирск
2001

Содержание

1 Введение	3
2 Краткий обзор	3
3 Измерение скорости старения	5
3.1 Анализ процедур, используемых для измерения скорости старения	6
3.2 Процедура измерения скорости старения, используемая в наших измерениях	10
4 Описание установки	12
5 Результаты измерения	14
5.1 Измерение радиационной стойкости чистого ДМЭ	14
5.2 Измерение влияния материалов на радиационную стойкость	15
5.3 Измерение скорости старения ДК детектора КЕДР	18
5.4 Влияние предварительного облучения на скорость старения	20
5.5 Модель образования покрытия на анодной проволочке	23
5.6 Процесс роста полимерного покрытия на поверхности анодной проволочки	27
5.7 Исследование влияния качества поверхности проволоки на процессы старения в проволочных камерах .	31
5.8 Зависимость скорости старения и размера плато от диаметра проволоки	33
5.9 Зависимость скорости старения и размера плато от плотности тока	36
5.10 Зависимость скорости старения от расхода газа	37
6 Заключение	38
Список литературы	39

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

В настоящее время в качестве координатных систем детекторов для экспериментов по физике высоких энергий широкое применение получили проволочные дрейфовые камеры. Параметры этих детекторов непрерывно совершенствуются, и в настоящее время пространственное разрешение больших дрейфовых камер достигло 100 мкм. В качестве примера можно привести дрейфовые камеры детекторов CLEO-III, ВаВаг, BELLE, а также детектора КЕДР, работающего на накопителе ВЭПП-4М в ИЯФ СО РАН. Стоимость дрейфовых камер неуклонно возрастает и для детекторов ВаВаг и BELLE достигла уже нескольких миллионов долларов. Время изготовления – 1 – 2 года.

Эксперименты обычно продолжаются 5 – 10 лет и в течение этого времени детектор должен сохранять нормальную работоспособность. В процессе работы дрейфовые камеры подвергаются воздействию интенсивного облучения, что приводит к радиационной деградации этих приборов и выходу их из строя. С учетом того, что светимости ускорителей непрерывно растут и в настоящее время достигли $4 \cdot 10^{33} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$, исследование радиационного старения проволочных камер, направленное на увеличение их срока работы, имеет очень важное значение.

2 Краткий обзор

Проблемы радиационного старения сопровождают проволочные камеры с момента их появления, начиная с выхода из строя счетчиков Гейгера, и до недавних проблем с радиационным старением дрейфовых камер детекторов ARGUS и ВаВаг.

За всю многолетнюю историю существования проволочных камер принимались неоднократные попытки разобраться в процессах, приводящих к потере работоспособности этих приборов из-за радиационного старения. Над решением этой задачи работали многие ученые, в том числе такие известные как Шарпак. Основные результаты этих исследований представлены в великолепных обзорах [1, 2] и материалах рабочего совещания, посвященного старению проволочных камер, прошедшего в Беркли (США) в 1986 году [3]. В силу сложности исследуемого явления и большого числа эффектов, влияющих на старение, получение достоверных результатов и их однозначная интерпретация иногда затруднительны. Часто измерения по старению, проведенные на моделях камер, давали очень малую скорость старения, при этом в реальных дрейфовых

камерах старение проявлялось гораздо раньше. До сих пор нет хорошей модели, описывающей процессы старения проволочных камер. Результаты исследований можно сгруппировать в набор рецептов, соблюдение которых увеличивает время жизни камеры, но не гарантирует успеха в каждом конкретном случае.

В качестве примера можно перечислить некоторые из этих заключений:

1. Использовать газовые смеси, не содержащие полимеризующихся компонент или добавок (изобутан, метан и другие).
2. В случае необходимости использования таких смесей добавлять в газ пары воды с концентрацией (0.1 – 0.3)%.
3. При использовании смесей на основе неполимеризующихся компонент, например, Ar/CO₂ или чистый диметиловый эфир, время жизни камеры увеличивается более чем на порядок. При этом полимеризуются примеси, содержащиеся в газе или поступающие в газ из материалов камеры и газовой системы.
4. Использование чистых газов в качестве компонентов рабочей смеси увеличивает время жизни камеры.
5. Максимально чистая газовая система и камера.
6. Проверка материалов, имеющих контакт с рабочим газом и исключение из конструкции газовой системы и камеры материалов, сильно увеличивающих скорость старения.
7. Результат исследования на модели камеры практически всегда отличается от того, что получается при работе камеры в условиях реального эксперимента. При этом на моделях чаще всего получается меньшая скорость старения.

Далее мы приведем упрощенную модель старения, которой тем не менее достаточно для понимания результатов, полученных в данной работе.

Старение связано с процессом полимеризации молекул рабочего газа, примесей, содержащихся в компонентах рабочего газа, или примесей, поступающих в рабочий газ от десорбции конструкционных материалов и неконтролируемых загрязнений газовой системы и камеры. Полимеризация идет в плазме лавины, 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 проволооч-

ки, 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.

Диэлектрическое покрытие на катоде приводит к накоплению на его поверхности положительных ионов из лавины, образующийся двойной заряженный слой понижает работу выхода электронов из катода (эффект Мальтера[4]). При этом повышается фоточувствительность катода и начинается эмиссия электронов из катода в объем камеры. В результате этого камера начинает шуметь, в амплитудном спектре появляется пик в области малых амплитуд от одноэлектронных импульсов. Возникает самоподдерживающийся процесс, который продолжается и в отсутствии облучения, потребляемый камерой ток возрастает и происходит пробой или выключение высоковольтного питания. При этом камера выходит из строя.

Данная работа посвящена изучению радиационного старения, связанного с образованием покрытия на аноде, так называемого анодного старения.

3 Измерение скорости старения

Исследования радиационной стойкости направлены на достижение малой скорости падения коэффициента газового усиления, поэтому подходящим параметром является

$$R = -\frac{1}{\Delta Q} \frac{\Delta G}{G_0}, \text{ \%}/(\text{Кл}/\text{см}), \quad (1)$$

где G_0 – начальный коэффициент газового усиления, ΔG – падение коэффициента усиления за время измерения и ΔQ – заряд, собранный с одного сантиметра анодной проволоочки. Здесь подразумевается, что падение коэффициента усиления линейно связано с зарядом Q , который пропорционален дозе радиации. Это верно для сравнительно малого падения усиления. Уменьшение коэффициента усиления связано с полимерами, конденсирующимися на поверхность анодной проволоочки из плазмы, образующейся в лавине. Как следствие этого увеличивается диаметр анодной проволоочки D . Электрическое поле на поверхности анодной проволоочки уменьшается, уменьшая усиление, что эквивалентно уменьшению напряжения на камере. Формула (1) может быть переписана в виде:

$$R = -\frac{1}{G_0} \frac{\Delta G}{\Delta Q} \propto -\frac{1}{G_0} \frac{\Delta G}{\Delta D} \propto -\frac{1}{G_0} \frac{\Delta G}{\Delta V}, \text{ \%}/(\text{Кл}/\text{см}), \quad (2)$$

откуда видно, что скорость старения R пропорциональна производной коэффициента газового усиления по напряжению dG/dV в точке по напряжению, при котором производится измерение R .

3.1 Анализ процедур, используемых для измерения скорости старения

Обычно для облучения камер используют радиоактивные изотопы ^{55}Fe , ^{90}Sr или рентгеновскую трубку. Измеряют ток с анодной проволочки во время облучения, а накопленный заряд определяют интегрированием этого тока по времени. Измерение длится в течение нескольких дней и предполагается, что старение зависит только от полной дозы радиации и не зависит от скорости набора этой дозы. В основном используются две процедуры для определения скорости старения.

Процедура 1.

В 60% работ используют процедуру, основанную на измерении анодного тока и предположении, что усиление пропорционально току при постоянном облучении. Скорость старения представляют в виде:

$$R = -\frac{1}{G_0} \frac{\Delta G}{\Delta Q} = -\frac{1}{I_0} \frac{\Delta I}{\Delta Q}, \text{ \%}/(\text{Кл}/\text{см}), \quad (3)$$

где G_0 и I_0 – начальные усиление и ток с анодной проволочки, G и I – те же величины по прошествии некоторого времени, а R и ΔQ – как было определено ранее. Таким образом, уменьшение тока интерпретируется как соответствующее уменьшение усиления. Для ускорения тестов используют очень высокие плотности тока – от 0.5 до 5 мкА/см. При этом эффекты пространственного заряда сильно уменьшают коэффициент газового усиления G и dG/dV в точке измерения. Уменьшение этих параметров происходит вследствие следующих эффектов: попадание двух частиц на один участок анодной проволочки, насыщение коэффициента газового усиления и искажение поля из-за пространственного заряда. Все перечисленные эффекты приводят к уменьшению заряда лавины.

На рисунке 1 приведены результаты нашего измерения зависимости производной коэффициента газового усиления по напряжению $(dG/dV)^J$ от плотности тока с анодной проволочки, нормированной на $(dG/dV)^{J=0}$

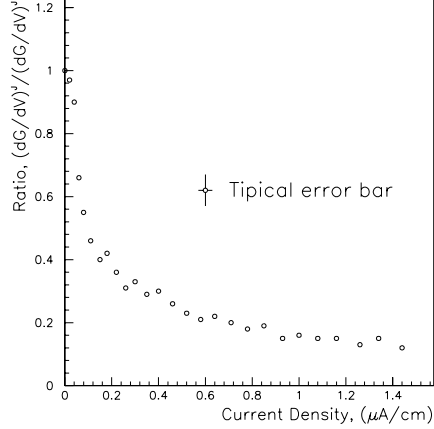


Рис. 1: Зависимость производной коэффициента газового усиления по напряжению $(dG/dV)^J$ от плотности тока с анодной проволоочки.

– производную, измеренную при нулевой плотности тока. Измерения были проведены с пропорциональным счетчиком с газом диметиловый эфир. Согласно формуле 2, скорость старения R пропорциональна значению dG/dV в точке по напряжению, при котором производится измерение скорости старения. Поэтому использование этой процедуры систематически занижает измеренную скорость старения при больших плотностях тока. В два раза при плотности тока $0.1 \text{ мкА}/\text{см}$ и на порядок величины при плотности тока $1.5 \text{ мкА}/\text{см}$.

При плотностях тока несколько микроампер измеряемая скорость старения может быть ниже реального значения в десятки раз, и при очень больших плотностях тока видимого изменения тока практически не происходит. При этом толщина полимерного покрытия на аноде может быть велика и уменьшение реального (при малой плотности тока) коэффициента газового усиления очень значительно.

В качестве примера приведем результат, полученный в работе [5]. Измерение скорости старения проводились с пропорциональным цилиндрическим счетчиком с газом диметиловый эфир (ДМЭ). Счетчик облучался гамма-изотопом, плотность тока с анодной проволоочки равнялась 5 мкА . В течение месяца был набран заряд $10 \text{ Кл}/\text{см}$, при этом ток с анодной проволоочки не изменился. После вскрытия счетчика оказалось, что диаметр анода увеличился в три раза – с 20 до 60 мкм . И хотя авторы не дали научного объяснения этому результату, исходя из вышесказанного, он становится понятен.

Этой систематикой можно, хотя бы частично, объяснить измерения [2, 6], использующие эту процедуру для определения R . В этих работах было показано, что R есть функция интенсивности облучения или скорости дозы. Чем меньше интенсивность облучения, тем R больше, при этом другие параметры оставались постоянными. Было также установлено, что при постоянной интенсивности скорость старения R зависит от коэффициента усиления [6]: чем он больше, тем R меньше. Если усиление или интенсивность облучения, а следовательно и плотность тока возрастают, значение R , измеренное с использованием этой процедуры, систематически занижается. Использование процедуры, зависящей от плотности тока для определения R , делает очень сложным, а иногда и невозможным сравнение результатов различных измерений и систематически занижает скорость старения в тестах с высокой интенсивностью облучения. Для плотности тока 0.5 мкА/см – в 6 раз, а при плотности тока выше 1.5 мкА/см – в более чем 10 раз.

От этой процедуры измерения скорости старения необходимо отказаться, либо проводить измерение R при плотностях тока, типичных для работы камеры в реальном эксперименте. Набор дозы можно проводить при больших плотностях тока, а понижать интенсивность облучения только в момент измерения скорости старения. При этом необходимо проводить измерение R при рабочем значении коэффициента усиления, другими словами, значение dG/dV должно совпадать со значением производной коэффициента усиления по напряжению в реальном эксперименте.

Процедура 2.

Практически во всех других работах измеряют коэффициент газового усиления по положению пика в амплитудном спектре от гамма-изотопа ^{55}Fe . Изотоп с высокой интенсивностью ^{90}Sr или рентгеновскую трубку используют для облучения, а изотоп ^{55}Fe с малой интенсивностью – для измерения усиления. Степень старения определяют сравнивая амплитудные спектры от ^{55}Fe , измеренные в тестовой и в контрольной точках для той же анодной проволоочки. Данные амплитудных измерений корректируются с учетом измерений в контрольной точке. Скорость старения представляют в виде:

$$R = -\frac{1}{G_0} \frac{\Delta G}{\Delta Q} = -\frac{1}{A_0} \frac{\Delta A}{\Delta Q}, \quad \%/(\text{Кл}/\text{см}), \quad (4)$$

где G_0 и A_0 – начальный коэффициент усиления и нормализованная амплитуда от изотопа ^{55}Fe , G и A – те же параметры после набора заряда

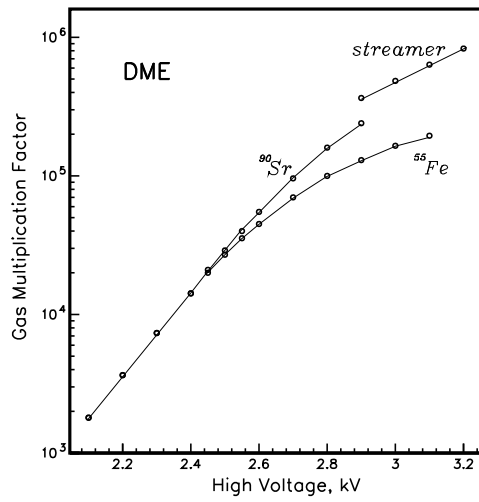


Рис. 2: Зависимость коэффициента газового усиления от типа частиц для газа ДМЭ.

ΔQ , а R и ΔQ были определены ранее. При использовании этой процедуры исчезает зависимость результата измерения скорости старения от плотности тока с анодной проволоочки, связанная с процедурой измерения. К сожалению, использование этой процедуры тоже дает систематическую ошибку, связанную с насыщением коэффициента газового усиления. На рис.2 приведены результаты измерения коэффициента газового усиления в ДМЭ с изотопом ^{55}Fe и минимально-ионизирующими частицами.

Фотоны от ^{55}Fe имеют более плотный кластер первичной ионизации, поэтому насыщение коэффициента усиления наступает раньше, чем с минимально-ионизирующими частицами. На рис.3 показана зависимость $(dG/dV)^{^{55}\text{Fe}}$, измеренная с изотопом ^{55}Fe , от коэффициента газового усиления в пропорциональной моде для газа ДМЭ. Значение (dG/dV) на рис.3 нормировано на значение $(dG/dV)^{mip}$, измеренное с минимально ионизирующими частицами.

Согласно (2) R линейно зависит от dG/dV в точке измерения. Поэтому, измеряя амплитуду ^{55}Fe при усилении большем чем $(2 - 5) \times 10^4$, авторы занижают скорость старения в два раза для ДМЭ при усилении $G = 10^5$ и более при больших коэффициентах усиления. Этим эффектом можно объяснить результаты измерений [7], в которых была использована эта процедура. Авторы этой работы провели измерение R в смеси

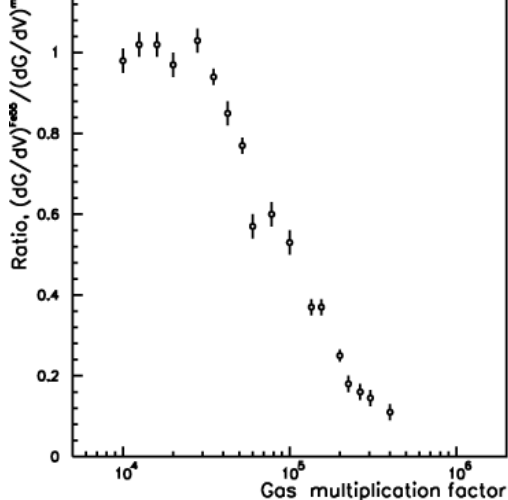


Рис. 3: Зависимость производной коэффициента газового усиления по напряжению от коэффициента газового усиления в пропорциональном режиме работы счетчика.

аргон/этан (50/50) в пропорциональном режиме при коэффициенте усиления $G \approx (2 - 6) \cdot 10^4$ и в стримерном режиме при $G > 10^6$. Было установлено, что при переходе от пропорционального к стримерному режиму значение R уменьшается в два раза. Мы считаем, что этот результат может быть хотя бы частично объяснен большим значением dG/dV в пропорциональном режиме по сравнению со стримерным. Другими словами, данный результат связан с использованием некорректной процедуры для определения скорости старения, а не с плазменно-химическими процессами в лавине [2]. Из сказанного становится ясно, что для устранения систематической ошибки в измерениях R при использовании этой процедуры необходимо производить измерение амплитуды сигнала с анодной проволоки от изотопа ^{55}Fe в области линейности коэффициента газового усиления, что и было сделано в наших измерениях.

3.2 Процедура измерения скорости старения, используемая в наших измерениях

В наших измерениях для облучения использовался коллимированный β -изотоп ^{90}Sr . Размер коллиматора был равен одному сантиметру, при этом размер облученной области вдоль анодной проволоки составил

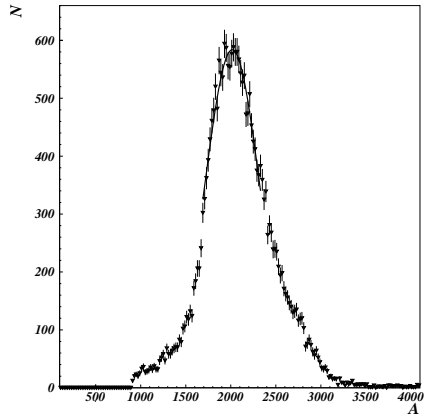


Рис. 4: Амплитудный спектр сигнала с анодной проволоочки от изотопа ^{55}Fe при напряжении 2.4 кВ.

3 см. Для исключения влияния одного измерения на другое расстояние между коллиматорами было выбрано равным 10 см. Заряд определялся интегрированием тока с анодной проволоочки. Периодически изотоп ^{90}Sr убирался и производился набор амплитудных спектров с изотопом ^{55}Fe в облучаемой и контрольной точках для устранения нестабильности параметров электроники и газа.

Скорость старения параметризовалась в виде:

$$R = -\frac{1}{\Delta Q} \cdot \frac{\Delta G}{G_0} = -\frac{1}{\Delta Q} \cdot \frac{\Delta A}{A_0}, \quad \text{\%}/(\text{Кл}/\text{см}), \quad (5)$$

где R , G и ΔQ те же, что и в формуле (4), A_0 – значение амплитуды сигнала от изотопа ^{55}Fe до облучения, ΔA – изменение амплитуды сигнала за время облучения.

Рабочее напряжение на аноде перед набором спектров понижалось до напряжения, при котором счетчик работает в пропорциональном режиме и равнялось 2.4 кВ. Выбор рабочего напряжения проведен на основе измерения зависимости коэффициента газового усиления от напряжения на счетчике (рис.2).

Амплитуда определялась как наиболее вероятное значение в амплитудном спектре сигнала с анодной проволоочки. Для определения наиболее вероятного значения амплитудный спектр в области пика аппроксимировался по методу χ^2 распределением Гаусса. Типичный амплитудный спектр приведен на рис.4.

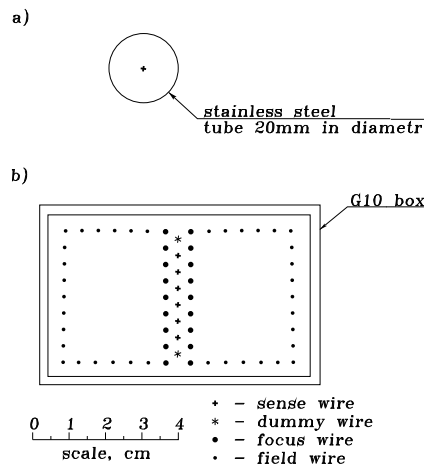


Рис. 5: Сечения используемых ячеек: а) пропорциональный счетчик; б) ячейка ДК.

Результаты измерений изображались в виде зависимости нормированной амплитуды A/A_0 от величины заряда Q . Зависимость аппроксимировалась прямой:

$$A/A_0 = 1 - R \cdot Q.$$

Для каждой вновь изготовленной трубки проводилось измерение радиационной стойкости с газом ДМЭ в чистых условиях. Если измеренная скорость старения была меньше $1\% / (\text{Кл}/\text{см})$, трубка считалась чистой и использовалась в измерениях. В противном случае считалось, что трубка не достаточно чистая и она браковалась. Тем самым мы уменьшали систематическую ошибку, вносимую в измерения скорости старения, от неконтролируемых загрязнений измерительного счетчика.

4 Описание установки

В наших измерениях в качестве рабочего газа использовался диметиловый эфир $(\text{CH}_3)_2\text{O}$. Измерения проводились с ячейками двух типов (рис.5). Одна из них представляет собой пропорциональный цилиндрический счетчик диаметром 20 мм. Катод счетчика изготовлен из нержавеющей стали. Анодная проволока из позолоченного вольфрама диаметром 28 мкм (производства СССР) фиксировалась в капронитовых проб-

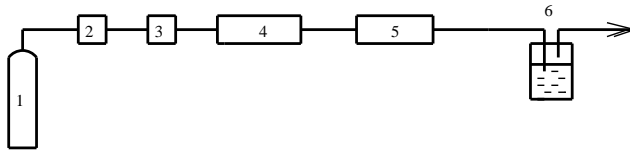


Рис. 6: Схема газовой системы: 1 – баллон с газом, 2 – стабилизатор давления газа, 3 – натекатель, 4 – объем с материалом, 5 – счетчик, 6 – масляный затвор.

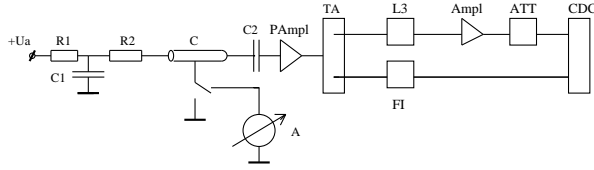


Рис. 7: Схема электроники: С – счетчик, А – микроамперметр, ТА – блок ТА, PAmp1 – предусилитель, LZ – линия задержки, FI – формирователь импульсов, Ampl – усилитель, ATT – аттенюатор, CDC – зарядно-цифровой преобразователь.

как путем обжата в пинах. Счетчик закреплялся в металлическом объеме, который продувался сжатым воздухом для исключения образования взрывоопасной смеси ДМЭ с воздухом. В качестве другой была использована ячейка дрейфовой камеры (ДК) детектора КЕДР, которая была заключена в объем, выполненный из тех же материалов, что и стенки ДК. Рабочие условия были полностью аналогичны условиям в ДК. Длина проволочек равнялась 30 см, после каждого измерения проволочки заменялись на новые.

Схема газовой системы приведена на рис.6. ДМЭ находился в баллоне емкостью 40 литров. Давление насыщенного пара ДМЭ при комнатной температуре составляет 5 атмосфер, для понижения и стабилизации давления газа использовался стабилизатор давления газа СДГ-1. Регулировка расхода газа осуществлялась с помощью натекателя. Далее газ поступал в пропорциональный счетчик. При измерении влияния материалов на скорость старения до счетчика включался объем с исследуемым материалом и газ вначале продувался через объем с материалом, а потом попадал в счетчик. После счетчика газ выбрасывался в атмосферу через масляный затвор, предотвращающий попадание воздуха в систему.

Схема электроники, применявшейся в измерениях, изображена на рис.7.

Высокое напряжение на счетчик подается через фильтр низких частот $R_1, R_2=1$ МОм и $C_1=1000$ пФ. Анод счетчика через разделительный конденсатор C_2 соединяется с предусилителем. Далее сигнал по витой паре в экране поступает в блок ТА. В блоке ТА он разветвляется. Один из сигналов дополнительно усиливается и поступает на выход "А". Другой сигнал подается на дискриминатор с фиксированным порогом, логический сигнал с которого поступает на выход "Т". Сигнал с выхода "А" через усилитель ШИУС-60 подается на вход зарядно-цифрового преобразователя Ц0312. Сигнал с выхода "Т" поступает на формирователь импульсов Л0311, который формирует импульс управления зарядно-цифровым преобразователем длительностью 1.2 мкс. Все блоки выполнены в стандарте КАМАК, разработаны и произведены в ИЯФ СО РАН. Для измерения тока использовался микроамперметр. При наборе спектров он выключался из схемы, для того чтобы исключить наводки.

5 Результаты измерения

5.1 Измерение радиационной стойкости чистого ДМЭ

В дрейфовой камере детектора КЕДР в качестве рабочего газа используется диметиловый эфир. Чистый ДМЭ не полимеризуется, но в реальных условиях используемый нами газ имеет ряд примесей, связанных с технологией синтеза, и загрязнений, поступающих в газ из газовой системы. Первоначально ДМЭ для дрейфовой камеры производился на Украине, но в связи с закрытием производства пришлось организовать синтез ДМЭ в Институте катализа СО РАН. Радиационная стойкость украинского газа измерялась ранее [8], и было получено значение $(1.7 \pm 0.5)\% / (\text{Кл}/\text{см})$. Так как изменилась технология синтеза ДМЭ, и как следствие этого – состав примесей в нем, возникла необходимость повторного измерения радиационной стойкости ДМЭ, произведенного в Институте катализа. Результат измерения показан на рис.8.

Полученное значение $R = (0.7 \pm 0.3) \% / (\text{Кл}/\text{см})$ согласуется с ранее полученным значением $R = (1.7 \pm 0.5) \% / (\text{Кл}/\text{см})$ и позволяет надеяться на то, что с дрейфовой камерой, работающей с газом ДМЭ, может быть получено очень хорошее время жизни, если газовая система и камера достаточно чистые.

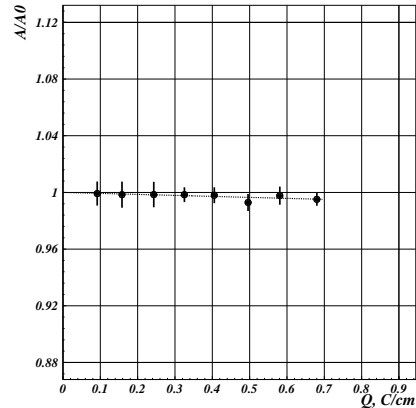


Рис. 8: Скорость старения для чистого диметилового эфира, произведенного в Институте катализа СО РАН. $R = (0.7 \pm 0.3)\% / (\text{Кл}/\text{см})$.

5.2 Измерение влияния материалов на радиационную стойкость

В таблице 1 приведены результаты измерения скорости старения с двумя типами ячеек. Значения R , относящиеся к тестированию материалов, получены вычитанием значений R , измеренных с материалом и без него.

Первоначально было проведено измерение скорости старения с ячейкой ДК в условиях, которые были описаны ранее. Было получено значение R равное $490\% / (\text{Кл}/\text{см})$. Это примерно на порядок больше значения, необходимого для успешной работы ДК в детекторе КЕДР.

Для того, чтобы найти источник загрязнений, ухудшающих радиационную стойкость ячейки ДК, было проведено исследование влияния различных материалов, используемых в конструкции ДК и газовой системе, на скорость старения.

Было исследовано влияние примесей, вносимых в газовую систему от различных трубок и герметиков. Было проведено измерения радиационной стойкости трех различных типов пластиковых трубок. Трубка из исследуемого материала длиной 10 метров включалась в газовую систему перед пропорциональным счетчиком. Как видно из таблицы 1, были получены очень разные значения R . Лучший результат $1.7\% / (\text{Кл}/\text{см})$ был получен для поливинил-хлоридной трубки, используемой в медицине. Тем не менее, другая поливинил-хлоридная трубка значительно

Таблица 1: Результаты тестов с ДМЭ.

Тип модели	Исследуемый материал	Заряд	
		[Кл/см]	R [%/(Кл/см)]
Ячейка ДК	до отбора материалов	0.6	490
Счетчик	ДМЭ(Украина) без материалов	2.8	1.7
	ДМЭ(Ин-т Катализа, СО РАН)	0.7	0.7
	ПХВ трубка (черная)	0.1	95.0
	ПХВ трубка (черная) после промывки пентаном	0.4	0.0
	ПХВ трубка(медицинская)	2.8	< 1.7
	тефлоновая трубка	1.1	5.5
	герметик КС-5	0.8	6.0
	герметик УНИГЕРМ	0.6	2.0
	автомобильный герметик	0.3	65.0
	герметик висксинт	0.5	33.0
	кремний-органическое (ПФМС)	3.0	1.2
	минеральное масло ВМ-1	3.0	0.4
	стеклотекстолит	0.95	9.5
	эпоксидная смола ЭД-20	0.95	5.4
	α -нафтиламин	0.6	1.4
Ячейка ДК	после отбора материалов	1.0	45.0

ускоряла старение $R = 95\%/(\text{Кл}/\text{см})$. Когда эта трубка была исключена из газовой системы, а тест был продолжен, мы наблюдали медленное увеличение газового усиления в процессе облучения. Результаты этого теста показаны на рис.9, на котором амплитуда сигнала изображена в зависимости от набранного заряда. Значение параметра R возросло со скоростью $-20\%/(\text{Кл}/\text{см})$ по мере испарения покрытия с поверхности анодной проволоочки. После того как эта же трубка была промыта пентаном, измеренное значение R составило $0.7\%/(\text{Кл}/\text{см})$, то есть загрязнения на внутренней поверхности трубки дали увеличение скорости старения в 100 раз. Удовлетворительные результаты были получены для тефлоновой трубки ($R = 5.5\%/(\text{Кл}/\text{см})$) и для двух типов герметиков: КС-5 ($R = 6.0\%/(\text{Кл}/\text{см})$) и УНИГЕРМ ($R = 1.5\%/(\text{Кл}/\text{см})$). Унигерм является вакуумным герметиком и применялся для устранения микроот-

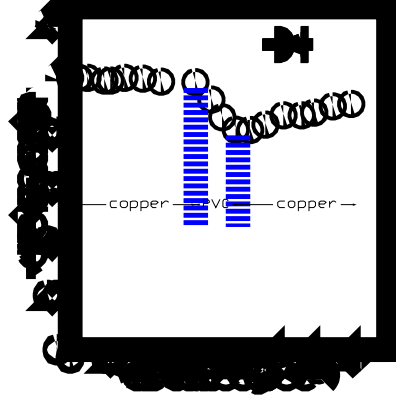


Рис. 9: Влияние черной ПВХ трубки на скорость старения.

верстий в пинах. КС-5 использовался для герметизации камеры. Впоследствии выяснилось, что КС-5 плохо подходит для текущего ремонта из-за большого времени высыхания. Поэтому вместо него было предложено использовать два других герметика: виксинт и автомобильный герметик, которые имеют меньшее время высыхания и более технологичны. Для того, чтобы принять решение о возможности их применения, было проведено измерение влияния этих материалов на радиационную стойкость с газом ДМЭ. Измеренные значения R равны $65.0\%/(\text{Кл}/\text{см})$ для автомобильного герметика и $33.0\%/(\text{Кл}/\text{см})$ для виксинта. По результатам этих измерений было решено использовать виксинт для герметизации ДК в процессе ремонта. Так как поверхность виксинта, имеющая контакт с газом, мала, то даже при большой скорости старения его влияние на старение всей камеры будет мало.

Масла, используемые в газовых затворах, могут ускорять старение. Поэтому мы провели тестирование двух типов масел: минерального вакуумного масла (ВМ-1) и кремний-органического (ПФМС). В обоих измерениях ДМЭ пропускался через колонку с маслом (при комнатной температуре) для насыщения парами масла, затем этот газ поступал в счетчик. Как видно из таблицы 1, оба типа масел практически не влияют на старение.

Вполне удовлетворительные результаты были получены с основными материалами, используемыми в конструкции ДК, стеклотекстолит и эпоксидная смола ЭД-20 – 9.5 и $5.4\%/(\text{Кл}/\text{см})$ соответственно.

Мы также исследовали влияние на скорость старения добавки с низким потенциалом ионизации, используемой для прямой лазерной калиб-

ровки дрейфовых камер, α -нафтиламин [9]. Давление насыщенных паров α -нафтиламина при комнатной температуре равно $2.7 * 10^{-4}$ мм рт.ст, при этом концентрация его в газе равна $3.6 * 10^{-7}$. Исследования радиационной стойкости ДМЭ с этой добавкой дали очень хороший результат ($R = 1.4\% / (\text{Кл}/\text{см})$). Это значение во много раз лучше результата, полученного с другой добавкой, широко используемой для лазерной калибровки, тетра-метил-фенил-диамин. В работе [10] для этой добавки получено значение R равное $800\% / (\text{Кл}/\text{см})$ при концентрации добавки 10^{-9} в смеси аргон/этан (40/60). Поэтому α -нафтиламин является хорошим предложением для использования в качестве добавки для прямой лазерной калибровки дрейфовых камер.

Кроме того мы провели измерение скорости старения в смесях CO_2 /изобутан (85/15) и аргон/ CO_2 (92/8) и получили значения $210\% / (\text{Кл}/\text{см})$ и $31\% / (\text{Кл}/\text{см})$ соответственно. Эти измерения подтверждают заключение, сделанное в работе [1] в том, что смеси, содержащие углеводороды, имеют примерно на порядок меньшее время жизни по сравнению со смесями на основе неполимеризующихся компонентов.

После исследования материалов мы вернулись к модели ячейки ДК. Объем с ячейкой был вскрыт и все поверхности тщательно вымыты бензином с последующей мойкой спиртом. В газовой системе были использованы только поливинил-хлоридные трубки, используемые в медицине, и минеральное масло ВМ-1 в газовом затворе. Второе измерение проводилось с ячейкой, в которой были заменены все проволочки. Во втором измерении с ячейкой ДК было получено значение R равное $45\% / (\text{Кл}/\text{см})$ (см. табл. 1), что более чем на порядок величины меньше, чем в первом тесте.

После набора заряда 1.2 Кл/см появились сигналы с малой амплитудой и большой частотой и работа с ячейкой стала невозможной. Это может быть объяснено эффектом Мальтера [4]. В процессе старения на поверхности катода образуется непроводящая пленка, которая заряжается положительными ионами из лавины. Образовавшийся двойной заряженный слой понижает работу выхода электронов из катода, и начинается холодная эмиссия в объем счетчика. Вторичные электроны образуют лавины и поддерживают заряд на поверхности катода.

5.3 Измерение скорости старения ДК детектора КЕДР

Предполагается, что эксперименты с детектором КЕДР [11] на накопителе ВЭПП-4 по физике высоких энергий продлятся 5 – 10 лет. Для

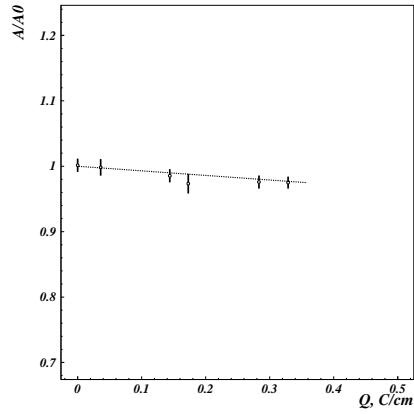


Рис. 10: Скорость старения ДК детектора КЕДР. $R = (7 \pm 3)\% / (\text{Кл}/\text{см})$.

оценки падения амплитуды сигнала за это время было проведено измерение скорости старения дрейфовой камеры в реальных условиях. ДК была установлена в детектор и подключена к реальной газовой системе. Была установлена стандартная скорость продувки – три объема ДК в сутки. Для измерения скорости старения ДК в газовую систему после камеры включался счетчик, при этом концентрации загрязнений в ДМЭ от десорбции конструктивных элементов камеры и газовой системы и примесей в ДМЭ имели реальное значение. Результаты измерения приведены на рис.10. Измеренное значение скорости старения составило $(7 \pm 3)\% / (\text{Кл}/\text{см})$. Меньшее значение R , полученное для камеры, в сравнении с моделью ячейки ДК ($R = 45\% / (\text{Кл}/\text{см})$), видимо, связано с меньшим отношением площади поверхности камеры к ее объему.

При потоке заряженных частиц $1 \text{ кГц}/\text{см}^2$, характерном для работы ДК на ускорителе, и значении коэффициента газового усиления 10^5 набранный на единицу длины проволоочки за год заряд составит $0.044 \text{ Кл}/\text{см}$. При этом падение амплитуды сигнала с анодной проволоочки будет равно 0.3% в год. Полученное значение скорости старения позволяет надеяться на работу ДК в детекторе КЕДР в течение всего времени эксперимента без существенной радиационной деградации.

В заключение этого параграфа кратко сформулируем правила, следуя которым возможно избежать проблем с радиационным старением ДК в течение всего эксперимента:

1. Провести проверку рабочего газа в чистых условиях.
2. Исследовать влияние материалов газовой системы и ДК, имеющих

контакт с рабочим газом, на скорость старения и исключить плохие материалы из конструкции.

3. После сборки газовой системы провести измерение скорости старения счетчика, включенного в газовую систему вместо ДК, в случае плохого результата провести повторную очистку газовой системы.

4. В случае приемлемых скоростей старения, полученных в измерениях 1 – 3, включить ДК в газовую систему и провести радиационный тест со счетчиком, включенным в газовый поток после ДК. В этом случае концентрации загрязнений в газе имеют реальные значения и измеренная скорость старения должна соответствовать скорости старения ДК в реальном эксперименте.

5. Для контроля за изменением концентрации и состава примесей при замене баллонов с газом и элементов газовой системы в процессе работы ДК в эксперименте желателен постоянно контролировать амплитуду сигнала со счетчика, включенного после ДК. При этом интенсивность облучения счетчика должна в несколько раз превышать интенсивность облучения ДК, для того чтобы иметь запас во времени для ДК в случае возникновения проблем со старением.

5.4 Влияние предварительного облучения на скорость старения

При исследовании влияния материалов на скорость старения было обнаружено ранее не наблюдавшееся явление. В случае, когда исследование влияния материала на скорость старения проводилось на том участке анодной проволоки, где до этого проводилось тестирование счетчика в чистых условиях (без объема с исследуемым материалом, далее будем называть его предварительным облучением или предварительным облучением в чистых условиях), были замечены две особенности:

1. В зависимости амплитуды от набранного заряда в области малых зарядов появлялась область (плато), в которой амплитуда сохраняла постоянное значение. Мы назвали это явление областью нулевого старения.
2. Далее амплитуда начинала падать, но скорость старения была меньше, чем скорость старения, измеренная на соседнем участке анодной проволоки, который не был подвергнут предварительному облучению в чистых условиях, то есть в условиях, когда концентрация примесей в ДМЭ минимальна.

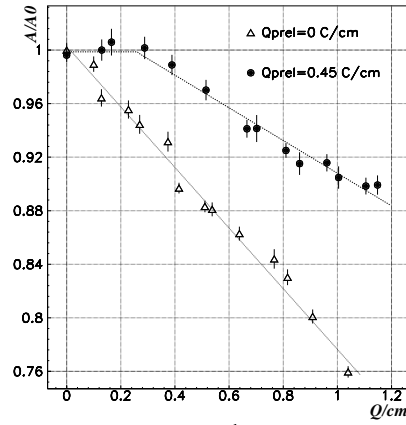


Рис. 11: Влияние предварительного облучения на старение счетчика. После предварительного облучения появляется плато (около 0.2 Кл/см) и уменьшается скорость старения.

На рисунке 11 для сравнения приведены зависимости нормированной амплитуды от заряда для двух участков анодной проволоки: без предварительного облучения ($Q_{prel} = 0$ Кл/см) и после предварительного облучения ($Q_{prel} = 0.45$ Кл/см). Наглядно видны оба обнаруженных эффекта: появление плато и уменьшение скорости старения.

Оба обнаруженных эффекта позволяют надеяться на возможность увеличения срока службы проволочных камер. Для лучшего понимания обнаруженного эффекта мы провели исследование зависимости размера плато и скорости старения от дозы предварительного облучения в чистых условиях.

В качестве материала, дающего примеси в ДМЭ, во всех последующих измерениях использовался викинт, который давал контролируемое увеличение скорости старения масштаба $(20 - 30)\% / (\text{Кл}/\text{см})$, но не приводил к очень быстрой деградации счетчика. При этом предыдущие измерения с викинтом с интервалом более года дали совпадающие скорости старения, что указывает на стабильность во времени состава и концентрации загрязнений в ДМЭ от этого материала. Все измерения проводились при токе с анодной проволоочки 2 мкА и скорости продувки 2.5 л/ч. Результаты измерений представлены на рисунках 12 и 13 и в таблице 2.

Размер плато увеличивается по мере увеличения дозы предварительного облучения и достигает максимума 0.25 Кл/см при дозе около 0.4 Кл/см. При больших дозах предварительного облучения плато уменьшается и исчезает при дозе около 1 Кл/см.

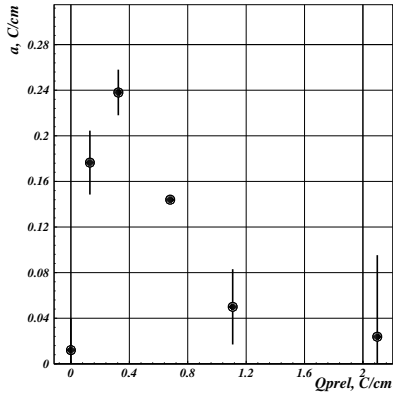


Рис. 12: Зависимость размера плато от дозы предварительного облучения.

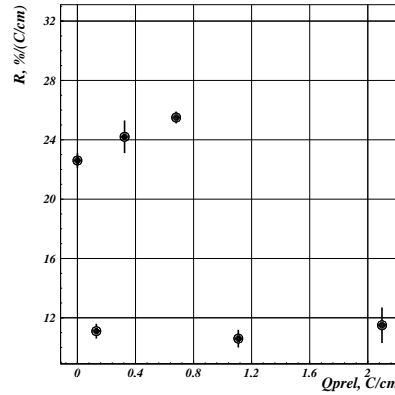


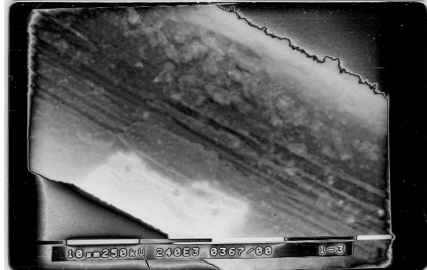
Рис. 13: Зависимость скорости старения от дозы предварительного облучения.

Таблица 2. Зависимость размера плато и скорости старения от дозы предварительного облучения

Доза облучения, Кл/см	Размер плато, Кл/см	Скорость старения, %/(Кл/см)
0.00	0.012 ± 0.027	22.6 ± 0.5
0.13	0.177 ± 0.028	11.1 ± 0.6
0.33	0.238 ± 0.020	24.2 ± 0.1
0.68	0.144 ± 0.002	25.5 ± 0.04
1.11	0.049 ± 0.039	10.6 ± 0.3
2.10	0.024 ± 0.204	11.5 ± 0.9

Скорость старения тоже проявляет динамику по мере увеличения дозы предварительного облучения в чистых условиях и уменьшается в два раза с $(22 - 25)\% / (\text{Кл}/\text{см})$ при дозах $(0 - 0.6)$ до $11\% / (\text{Кл}/\text{см})$ при дозе больше 0.8 Кл/см. При этом значение, измеренное при $Q_{\text{prel}} = 0.13$ Кл/см, сильно отличается от измерений с близкими дозами. Причину этого понять не удалось.

Для объяснения полученных результатов была предложена модель, описывающая процесс образования покрытия на поверхности анодной проволоочки. Существенную роль в этой модели играет микроструктура поверхности анодной проволоочки. Под микроструктурой поверхности понимаются неровности на ней, связанные со средним качеством поверхности и определяемые технологией производства и золочения проволоки.



Фотография 1. Облученный участок проволоочки диаметром 28 мкм. В месте скола покрытия видна его средняя толщина. Выступы образуются на остриях поверхности.

5.5 Модель образования покрытия на анодной проволочке

Структуру поверхности анодной проволоки можно представить в виде набора микровыступов (острий) и впадин между ними. Микровыступы фокусируют на себя силовые линии электрического поля с площади, характерный диаметр которой по порядку величины равен высоте выступа. Здесь необходимо заметить, что интенсивность бомбардировки полимерами, образовавшимися в лавине, единицы поверхности проволочки пропорциональна напряженности электрического поля в этой точке. Напряженность поля обратно пропорциональна радиусу кривизны поверхности. На концах острий напряженность поля может в десятки раз превышать среднюю напряженность поля на поверхности анодной проволочки, равную 350 кВ/см для газа ДМЭ. Поэтому полимеры, образующиеся в лавине, более интенсивно бомбардируют поверхность острий, как следствие этого, образование полимерного покрытия начинается в этих местах и его толщина на выступах должна быть больше, чем на соседних участках поверхности, что подтверждается снимком облученного участка проволоки с помощью растрового электронного микроскопа (фотография 1).

Поверхность проволоки покрыта сплошной пленкой, при этом видны выступы и грани, которые, видимо, образуются на одиночных остриях или на дефектах поверхности.

Для объяснения обнаруженного нами эффекта нулевого старения необходимо сделать предположение о том, что коэффициент прилипания молекул полимеров к золоченой поверхности много меньше единицы, то

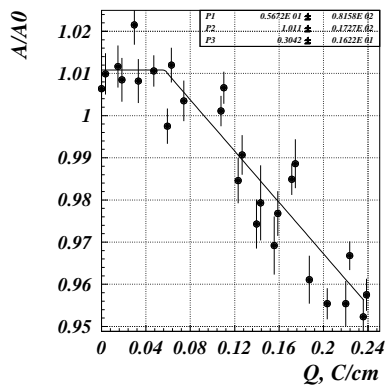


Рис. 14: Скорость старения при токе 0.2 мкА, без предварительного облучения. Размер плато равен (0.057 ± 0.008) (Кл/см), скорость старения $R = (30.4 \pm 1.6)\%$ /(Кл/см).

есть только малая часть полимерных молекул остается на поверхности проволоки после процесса нейтрализации. После образования монослоя из полимеров коэффициент прилипания резко возрастает и начинается быстрый рост полимерной пленки. Поэтому в начале облучения амплитуда сигнала с анодной проволоочки не изменяется, так как необходима некоторая доза для образования монослоя полимеров. После образования первичного покрытия скорость роста пленки резко возрастает, что приводит к быстрому падению амплитуды сигнала.

Из всего вышеизложенного следует, что при отсутствии облучения в чистых условиях тоже должна быть область с нулевым падением амплитуды, но ее размер должен быть меньше. Чтобы проверить это предположение мы провели измерения при токе с анодной проволоочки 0.2 мкА, что позволило получить больше экспериментальных точек в области малых доз. Результат измерения приведен на рисунке 14.

Размер плато равен (0.057 ± 0.008) Кл/см. Напомним, что при дозе предварительного облучения 0.33 Кл/см размер плато составил (0.24 ± 0.02) Кл/см, то есть размер области, в которой старение отсутствует, увеличился более чем в 4 раза.

Увеличение размера плато после предварительного облучения счетчика в чистых условиях связано с травлением (испарением) острий в плазме, образующейся в лавине. В результате травления увеличивается их радиус кривизны и, как следствие, понижается напряженность поля

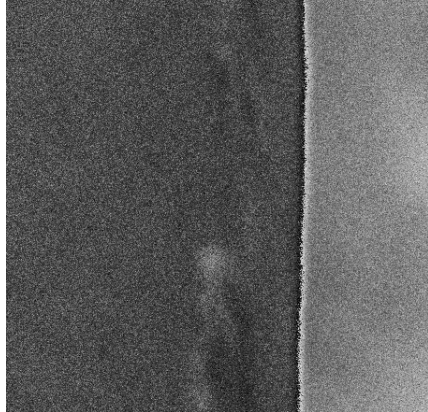
на остриях, что, в свою очередь, приводит к уменьшению интенсивности бомбардировки единицы площади поверхности полимерами и поэтому требуется большая доза для образования первичного покрытия.

Нами было исследовано влияние предварительного облучения на качество поверхности проволоки. На фотографии 2 показана золоченая вольфрамовая проволока диаметром 28 мкм, взятая из катушки, а на фотографии 3—анодная проволока того же типа, но облученная в чистых условиях. Доза облучения составила 0.5 Кл/см.

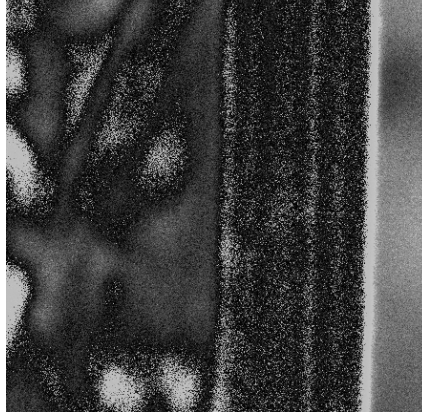
На более контрастном изображении края проволоки видно, что качество поверхности облученного образца лучше, чем исходного. Из этого можно заключить, что качество поверхности влияет на размер плато, а улучшая технологию полировки поверхности проволоки, можно существенно увеличить дозу облучения, при которой старение никак не проявляется.

Уменьшение размера плато до нуля при дозах предварительного облучения больше 1.2 Кл/см мы объясняем тем, что таких доз облучения достаточно для образования первичного полимерного покрытия из микропримесей, содержащихся в ДМЭ, в процессе предварительного облучения. Поэтому после внесения в газ загрязнения от висксинта сразу начинается интенсивный рост полимерной пленки, так как коэффициент прилипания полимера к полимеру велик.

Другим обнаруженным эффектом является уменьшение скорости старения в 2 раза после дозы предварительного облучения 0.8 Кл/см. Как было сказано выше, предварительное облучение в чистых условиях приводит к травлению поверхности анодной проволоочки и тем самым увеличивается радиус кривизны острий. Напряженность электрического поля на остриях понижается, и интенсивность бомбардировки единицы площади поверхности острий падает. При этом для той же дозы облучения, набранной после предварительного облучения, толщина покрытия уменьшается. Необходимо заметить, что электроны в процессе газового усиления движутся вдоль силовых линий электрического поля и достигают поверхности проволоочки преимущественно в районе острий из-за упомянутой выше фокусировки силовых линий на остриях. По этой причине положительные ионы, образующиеся на последней длине свободного пробега, образуются с большей вероятностью вблизи концов острий. С учетом того, что основной вклад в образование сигнала с анодной проволоочки вносит наведенный заряд от дрейфа ионов, можно заключить, что на уменьшение амплитуды сигнала большее влияние оказывает толщина покрытия на остриях, чем между ними, так как основное число ионов образуется в этих местах.



Фотография 2. Фотография в электронный микроскоп края не облученной проволоочки. Проволока расположена слева и имеет более темный цвет. Размер стороны снимка 2 мкм.



Фотография 3. Фотография в электронный микроскоп края анодной проволоочки облученной в чистых условиях (доза облучения 0.5 Кл/см. Проволока находится слева. Размер стороны снимка 2 мкм.

Другими словами, вблизи анодной проволоочки вклад в образование сигнала вносит не вся поверхность проволоки, а только ее часть (эффективная поверхность проволоочки), на которой замыкаются линии электрического поля. При этом коэффициент усиления чувствителен к толщине покрытия на эффективной поверхности проволоочки, а не на всей проволочке. Так как эффективную поверхность проволоочки формируют выступы, а на них напряженность больше, чем на поверхности идеальной проволоочки, которая представляет собой гладкий цилиндр, то качество поверхности анодной проволоочки должно оказывать влияние на величину коэффициента газового усиления. При фиксированном напряжении на счетчике и диаметре анодной проволоочки коэффициенты усиления, измеренные для проволоочек с разным качеством поверхности, должны различаться. Другим выводом из изложенной выше модели является то, что коэффициент газового усиления должен изменяться от дозы предварительного облучения.

Из вышесказанного следует, что травление острий в процессе предварительного облучения уменьшают толщину покрытия на остриях при фиксированной дозе облучения. В силу большей чувствительности коэффициента газового усиления к толщине покрытия в этих местах снижение усиления при той же дозе облучения, или, другими словами, при той

же массе полимеров, будет меньше. Что и объясняет обнаруженный нами эффект влияния предварительного облучения на скорость старения. Следовательно, и в этом случае улучшение качества поверхности проволоки должно приводить к увеличению времени жизни за счет уменьшения скорости старения.

5.6 Процесс роста полимерного покрытия на поверхности анодной проволоочки

Как было показано в предыдущем параграфе, образование и рост полимерного покрытия не идет равномерно по всей поверхности анодной проволоочки, а начинается на выступах в областях максимальной напряженности электрического поля. При этом было отмечено, что масса полимера, приходящаяся на единицу поверхности, пропорциональна напряженности поля и, следовательно, скорость роста покрытия максимальна в тех же областях.

Из этого следует, что дефекты поверхности в виде выступов являются затравками, на которых начинается быстрый рост полимерных нитей вдоль вектора напряженности электрического поля. Чем больше размер нити, тем с большей области собираются на ней силовые линии (диаметр области собирания по порядку величины равен длине нити), и по мере увеличения размера нити увеличивается масса полимеров, поступающих на нее за единицу времени. При некоторой длине нити (которая зависит от числа нитей на единицу поверхности) все силовые линии, а следовательно, и все полимерные молекулы собираются на концы нитей и рост покрытия на поверхности проволоочки прекращается. При этом изменяется конфигурация электрического поля вблизи анодной проволоочки и рост покрытия происходит в области окончания нитей. Поэтому можно ожидать изменения в характере падения амплитуды сигнала с анодной проволоочки, что действительно наблюдалось в ряде измерений (рис.15), где явно виден перегиб в области зарядов 0.5 Кл/см. При этом надо заметить, что в этой фазе продолжается рост только тех нитей, которые сформировались на выступах с максимальной высотой и с минимальным радиусом кривизны. Так как скорость роста покрытия на них максимальна, то в процессе роста они перехватывают силовые линии (потoki полимерных молекул), которые замыкались на более медленно растущих соседних нитях.

В процессе исследования влияния конструкционных материалов на скорость старения с газами ДМЭ и CO_2 /изобутан (85/15) было проведено большое число измерений. Исследование образовавшихся покрытий

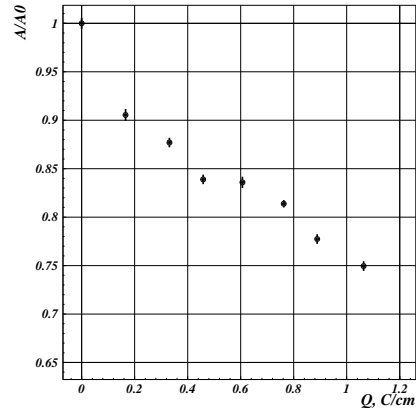


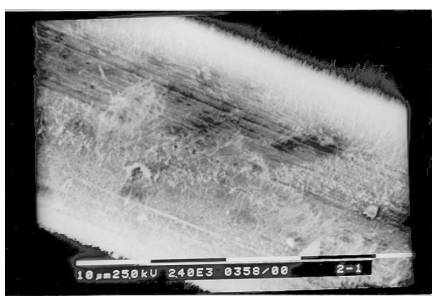
Рис. 15: Изменение амплитуды сигнала с анодной проволоочки в зависимости от дозы облучения

в электронный растровый микроскоп позволило выделить характерные типы возникающих покрытий (фотографии 4–9). Во всех случаях присутствует однородное покрытие всей поверхности проволоочки, о происхождении которого говорилось в п.5.5. Форма наростов на этом покрытии разная и изменяется от острых нитей (фотография 4) через цилиндрические (фотография 5), цилиндрические с шарообразными наростами на концах (фотография 6) до расширяющихся и ветвящихся в направлении от проволоочки (фотография 7) и, наконец, шероховатых покрытий с небольшим размером неровностей (фотография 8), и завершает этот ряд практически гладкое однородное покрытие (фотография 9).

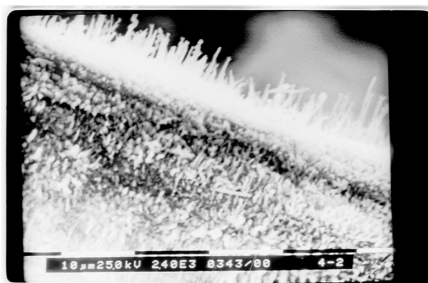
Анализируя полученные изображения, можно заключить, что проводимость полимерного покрытия может оказывать существенное влияние на форму наростов и процесс роста покрытия в целом.

Описанная ранее в этом параграфе картина роста покрытия, строго говоря, справедлива только в случае полимерного покрытия с достаточно большой проводимостью. Что подразумевается под словом достаточно будет пояснено ниже. На самом деле полимерные покрытия чаще всего являются плохо проводящими, на что указывает зарядка поверхности покрытия при получении изображения с помощью электронного микроскопа.

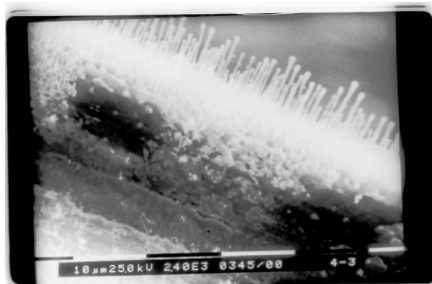
Проанализируем процесс роста полимерной нити для случаев разной проводимости покрытия. Для простоты рассмотрим одну нить. В процессе работы счетчика под воздействием облучения в его объеме образуются



Фотография 4. Поверхность анодной проволочки. Газ – ДМЭ. Материал – тефлон.



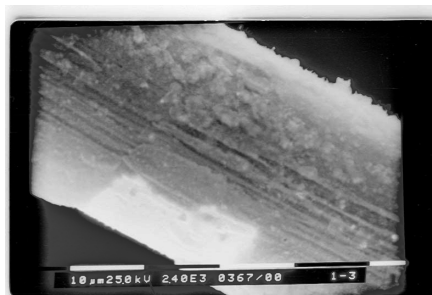
Фотография 5. Поверхность анодной проволочки. Газ – ДМЭ. Материал – эпоксидная смола ЭП-20.



Фотография 6. Поверхность анодной проволочки. Газ – CO₂/изобутан (85/15). Без материала.



Фотография 7. Поверхность анодной проволочки. Газ – CO₂/изобутан. Материал – ПВХ трубка.



Фотография 8. Поверхность анодной проволочки. Газ – ДМЭ. Материал – ПВХ трубка.



Фотография 9. Поверхность анодной проволочки. Газ – ДМЭ. Материал – герметик КС-5.

электроны и ионы. Электроны дрейфуют к анодной проволочке, где в области больших полей происходит газовое усиление. Электроны и отрицательно заряженные полимерные цепочки, образующиеся в лавине, движутся вдоль силовых линий электрического поля и собираются на концах полимерных нитей. Создаваемый ими ток нейтрализует положительный заряд нити. В случае достаточной проводимости нити происходит перетекание положительного заряда с проволочки и картина силовых линий электрического поля не изменяется. При этом продолжается рост нити в длину (фотография 4) и тем самым увеличивается ее сопротивление.

При достижении некоторой длины восстановление положительного заряда на конце нити не происходит, и силовые линии, а вместе с ними и поток полимерных молекул, перераспределяются с конца нити к ее основанию. В этом случае происходит изменение формы нитей и из острой (фотография 4) она становится цилиндрической (фотография 5) или на конце нити начинается рост шарообразного наконечника (фотография 6). Иногда нить начинает ветвиться (фотография 7), что, возможно, связано с большим дипольным моментом полимерных молекул, образующихся в этом случае. Когда проводимость покрытия мала, то уже при малых длинах нити происходит процесс перераспределения, и силовые линии (поток полимерных молекул) замыкаются на поверхность проволочки вблизи основания растущей нити. В этом случае длина выступов мала (фотография 8) или (при очень плохой проводимости) полностью нивелирована (фотография 9).

Ток, создаваемый электронами и отрицательно заряженными полимерами, зависит от интенсивности облучения счетчика и числа дефектов поверхности, с которых начинается рост, на единицу площади анодной проволочки. Поэтому можно ожидать изменения морфологии покрытия в зависимости от интенсивности облучения.

В заключении заметим, что морфология покрытия на поверхности анодной проволочки зависит от проводимости полимеров, образующихся в лавине, и интенсивности облучения камеры, а также от качества поверхности проволочки. Последнее обстоятельство связано с тем, что дефекты поверхности определяют количество нитей на единицу поверхности анодной проволочки. Кроме того, морфология покрытия проволочки влияет на вид зависимости, описывающей падение амплитуды сигнала в зависимости от набранной дозы облучения. Для получения вида этой зависимости необходимо точное моделирование, что в настоящее время выглядит достаточно проблематичным. В отсутствии точной формы зависимости подгонка прямой вносит систематическую ошибку в измеряемую скорость старения. Для уменьшения влияния этого эффекта необхо-

димо проводить фитирование в равном диапазоне изменения амплитуды с анодной проволоочки, например в диапазоне $(1.0 - 0.8)A_0$, где A_0 – амплитуда сигнала до начала облучения.

5.7 Исследование влияния качества поверхности проволоки на процессы старения в проволоочных камерах

Для дополнительной проверки модели образования покрытия на анодной проволоке, изложенной в предыдущем пункте, мы провели исследование старения с золочеными анодными проволоками диаметром 20 мкм. Использовалась проволока трех различных производителей: советского производства (завод МЭЛЗ, Москва), произведенная в США (фирма California Fine Wire Company, Grover Beach) и используемая в дрейфовой камере детектора ВаВаг и итальянского производства (Franco Corradi, Milano). Измерение было проведено со стандартным цилиндрическим счетчиком с газом ДМЭ и висксинтом в качестве загрязнителя при токе с анодной проволоочки 2 мкА и расходе газа 2.5 л/ч. В этих измерениях масса полимера, образующаяся на единицу дозы, одинакова, а диаметр анодной проволоочки фиксирован. Поэтому если качество поверхности не влияет на скорость старения, полученные значения должны совпадать.

Результаты измерений приведены на рис.16,17,18 для советской, американской и итальянской проволок соответственно. Во всех случаях наблюдается качественно одинаковая зависимость измеренной амплитуды от заряда, прошедшего через сантиметр анодной проволоочки. При малых зарядах амплитуда постоянна, а потом начинается падение амплитуды сигнала, что качественно согласуется с нашей моделью. В таблице 3 приведены измеренная скорость старения и размер плато для каждого типа проволоки.

Таблица 3. Скорость старения и размер плато для проволоки диаметром 20 мкм от трех различных производителей.

Производитель	R, %/(Кл/см)	a, Кл/см
СССР	-32.0 ± 1.0	0.054 ± 0.013
США	-88.1 ± 2.0	0.027 ± 0.006
Италия	-106.7 ± 1.6	0.036 ± 0.001

В измерениях наблюдаются существенные различия в измеренных значениях как скорости старения, так и размера плато. При этом видна

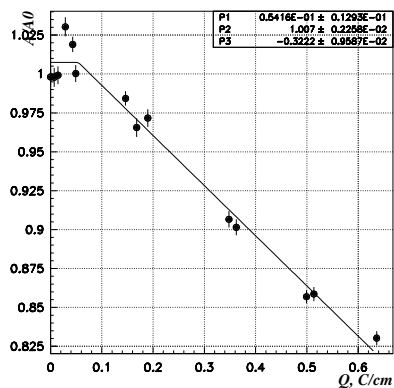


Рис. 16: Зависимость амплитуды сигнала с анодной проволочки от заряда. Проволока диаметром 20 мкм производства СССР. Размер плато равен (0.054 ± 0.013) Кл/см, $R = (32.0 \pm 1.0)\% / (\text{Кл}/\text{см})$.

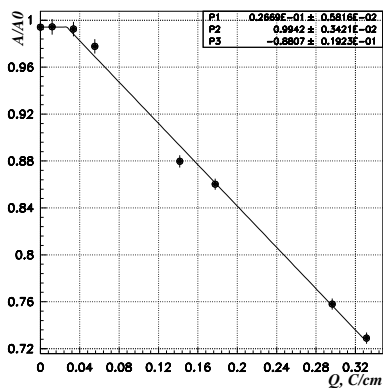


Рис. 17: Зависимость амплитуды сигнала с анодной проволочки от заряда. Проволока диаметром 20 мкм производства США. Размер плато равен (0.027 ± 0.006) Кл/см, $R = (88.1 \pm 2.0)\% / (\text{Кл}/\text{см})$.

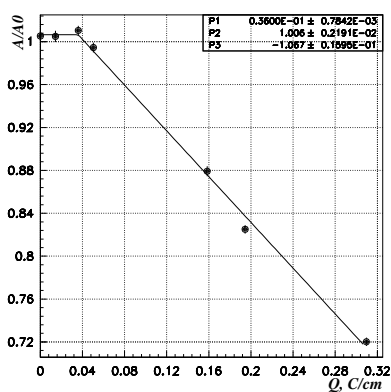


Рис. 18: Зависимость амплитуды сигнала с анодной проволочки от заряда. Проволока диаметром 20 мкм производства Италии. Размер плато равен (0.036 ± 0.001) Кл/см, $R = (106.7 \pm 1.6)\% / (\text{Кл}/\text{см})$.

антикорреляция между скоростью старения и размером плато: чем больше скорость старения, тем меньше размер плато. Отношение скоростей старения, измеренных с проволочками производства СССР и США, равно $R_{USA}/R_{USSR} = 2.75 \pm 0.08$. Отношения размеров плато $a_{USSR}/a_{USA} = 2.0 \pm 0.6$ с точностью до ошибки измерения совпадают, что согласуется с моделью образования покрытия, изложенной в п.5.5.

Из полученных данных можно заключить, что качество поверхности проволоки оказывает существенное влияние на скорость старения.

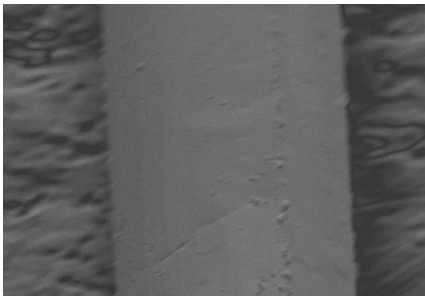
Исследование поверхности проволоки в электронный микроскоп действительно показало существенное отличие качества поверхности проволоки. Проволока производства СССР (фотографии 10, 11) имеет самую лучшую поверхность, что связано с другой технологией золочения. Золото на проволоку наносилось методом протягивания проволоки через каплю расплавленного металла. Проволока, произведенная в США и Италии (фотографии 12–15), имеет крупнозернистую поверхность. Подобная морфология поверхности связана с другой технологией золочения поверхности проволоки. В производстве обоих образцов проволоки использовался метод гальванического нанесения золота. В зависимости от выбранного режима работы изменяется форма и размер зерна (фотография 12; 14).

На фотографиях 16–19 приведены снимки в электронный микроскоп проволочек после облучения. Во всех случаях идет рост полимерных нитей, но для проволоки, произведенной в СССР, обрастание идет равномерно по всей поверхности. Для проволоки производства США и Италии нити по большей части растут из областей, расположенных между зерен золота, что, видимо, связано с намного более худшим качеством поверхности в этих областях в сравнении с поверхностью зерен. Исследование проволоки подтверждает модель образования и роста полимерного покрытия на поверхности проволоки, изложенную в пп. 5.5, 5.6, и сильного влияния качества поверхности на этот процесс.

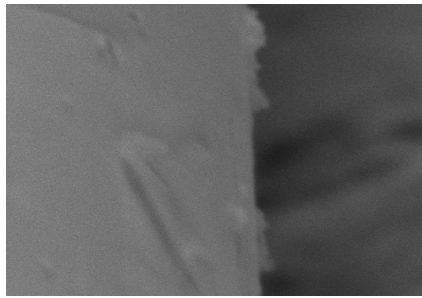
5.8 Зависимость скорости старения и размера плато от диаметра проволоки

В случае, если поверхность проволочки идеальная, а покрытие однородное, согласно формуле, приведенной в работе [1], отношение скоростей старения для проволок диаметром $d_1 = 20$ мкм и $d_2 = 28$ мкм составит:

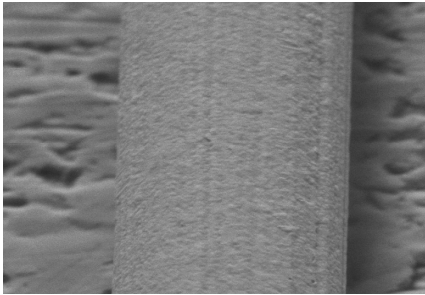
$$\frac{R_1}{R_2} \sim \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 = \left(\frac{28}{20}\right)^2 = 1.96.$$



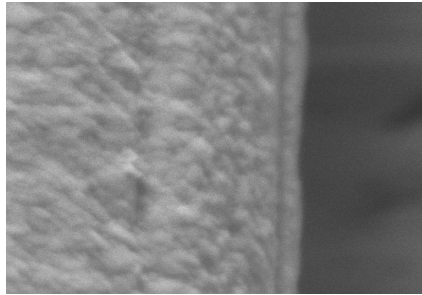
Фотография 10. Проволока производства СССР. Размер стороны снимка 40 мкм.



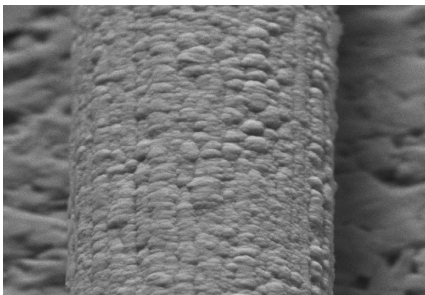
Фотография 11. Проволока производства СССР. Размер стороны снимка 8 мкм.



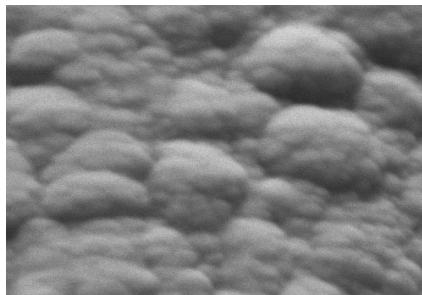
Фотография 12. Проволока производства США. Размер стороны снимка 40 мкм.



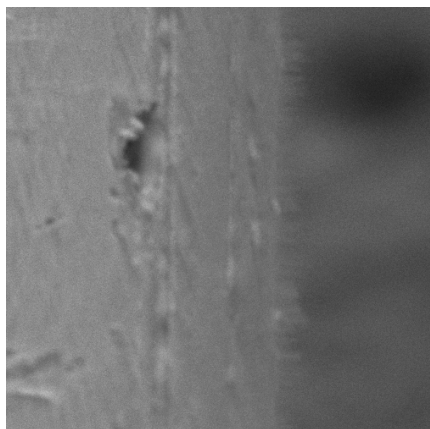
Фотография 13. Проволока производства США. Размер стороны снимка 8 мкм.



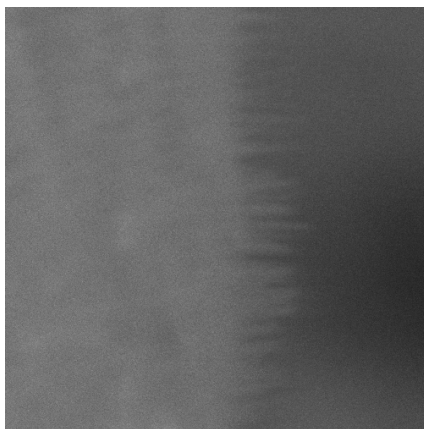
Фотография 14. Проволока производства Италии. Размер стороны снимка 40 мкм.



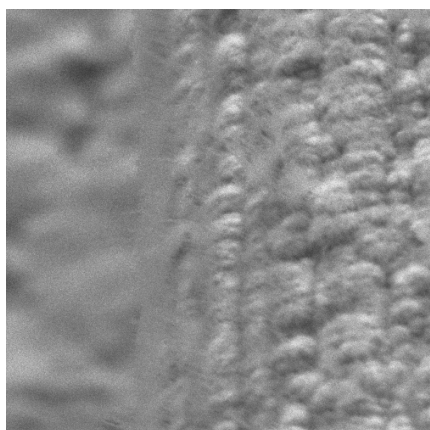
Фотография 15. Проволока производства Италии. Размер стороны снимка 8 мкм.



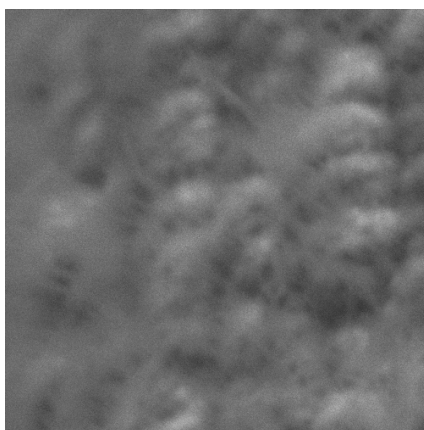
Фотография 16. Проволока производства СССР. Размер стороны снимка 20 мкм.



Фотография 17. Проволока производства СССР. Размер стороны снимка 8 мкм.



Фотография 18. Проволока производства Италии. Размер стороны снимка 20 мкм.



Фотография 19. Проволока производства Италии. Размер стороны снимка 8 мкм.

Для исследования влияния диаметра проволоочки на скорость старения и размер плато были проведены измерения с золочеными вольфрамовыми проволочками советского производства диаметром 20 мкм и 28 мкм при токе с анодной проволоочки 2 мкА и расходе газа 2.5 л/ч. Использование проволоки одного производителя позволяет надеяться на одинаковое качество поверхности проволоки и исключить систематическую ошибку, связанную с этим эффектом (см. п.5.6). Измерения проводились с газом ДМЭ и вискинтом в качестве загрязнителя. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения скорости старения и размера плато для анодных проволочек диаметром 20 мкм и 28 мкм.

Диаметр, мкм	R, %/(Кл/см)	a, Кл/см
20	32.2 ± 1.0	0.054 ± 0.013
28	50.2 ± 0.8	0.072 ± 0.007
28	22.6 ± 0.5	0.013 ± 0.028

Из-за большого отличия в полученных значениях скоростей старения для двух измерений с проволокой диаметром 28 мкм ($(50.2 \pm 0.8)\% / (\text{Кл}/\text{см})$) и $(22.6 \pm 0.5)\% / (\text{Кл}/\text{см})$) не удалось исследовать зависимость скорости старения от диаметра проволоки. Возможной причиной столь большого отличия измеренных скоростей старения может быть отличие в качестве поверхности для разных участков проволоки, используемой в измерениях.

5.9 Зависимость скорости старения и размера плато от плотности тока

Плотность тока при проведении исследований по радиационному старению определяет время измерения. Для уменьшения времени измерения плотность тока увеличивают, при этом тест по старению длится порядка недели. Реальные камеры работают при меньших значениях токов и набирают дозу облучения в течении нескольких лет. Для более ясного понимания результатов лабораторных тестов и их применения к реальным камерам нужно знать зависимость скорости старения от плотности тока.

Мы провели измерения зависимости скорости старения от плотности тока. Все измерения были проведены без предварительного облучения в чистых условиях с газом ДМЭ и вискинтом при расходе газа 2.5 л/ч. Измерение для каждого значения плотности тока проводились на новом

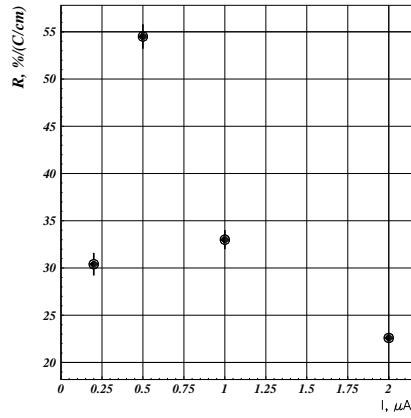


Рис. 19: Зависимость скорости старения от плотности тока с анодной проволоочки.

участке анодной проволоочки. Результаты этих измерений приведены в таблице 5 и на рисунке 19.

Таблица 5. Значения скорости старения при различных плотностях тока.

Ток анода, мкА	Скорость старения, $\% / (\text{Кулон}/\text{см})$	Размер плато, Кл/см
0.2	-30.4 ± 1.2	0.057 ± 0.008
0.5	-54.5 ± 1.3	0.012 ± 0.006
1.0	-33.0 ± 1.0	0.042 ± 0.012
2.0	-22.6 ± 0.5	0.012 ± 0.028

Измеренная скорость старения сначала увеличивается с $30\% / (\text{Кл}/\text{см})$ ($I=0.2$ мкА) до $55\% / (\text{Кл}/\text{см})$ ($I=0.5$ мкА), проходит через максимум и уменьшается до $23\% / (\text{Кл}/\text{см})$ при плотности тока 2.0 мкА. Размер плато с учетом ошибок не зависит от плотности тока.

5.10 Зависимость скорости старения от расхода газа

Влияние расхода газа на процесс радиационного старения исследовалось ранее [12]. Измерения проводились с газом аргон/этан (50/50). Измеренная скорость старения равнялась $33\% / (\text{Кл}/\text{см})$ при расходе газа $105 \text{ см}^3/\text{мин}$ и увеличивалась до $69\% / (\text{Кл}/\text{см})$ при уменьшении расхода до $50 \text{ см}^3/\text{мин}$. В этой работе скорость старения измерялась по уменьшению тока с анодной проволоочки (процедура 1). При этом измерения скорости старения проводились при разных значениях плотности тока. Как было указано в п.3.1, использование этой процедуры дает большую

систематическую ошибку, величина которой зависит от плотности тока с анодной проволоочки. Поэтому извлечь искомую зависимость из результатов этой работы затруднительно.

Мы провели измерения скорости старения, используя более корректную процедуру измерения, при расходах газа 1.25 и 2.5 л/ч. Результаты измерения приведены в таблице 6. Плотность тока с анодной проволоочки во всех измерениях равнялась 2 мкА, в качестве загрязнителя использовался висксинт.

Из полученных результатов сложно сделать однозначный вывод о зависимости скорости старения от расхода газа, так как при расходе газа 1.25 л/ч два независимых измерения дали значения скорости старения, различающиеся более чем в 3 раза. Причину этого понять не удалось.

Таблица 6. Значения скорости старения при различных расходах газа.

Расход газа, л/ч	Скорость старения, %/(Кл/см)
1.25	-16.0 ± 1.0
1.25	-56.6 ± 0.9
2.5	-22.6 ± 0.5

6 Заключение

В результате проделанной работы было обнаружено, что используемые процедуры измерения скорости старения проволоочных камер некорректны и систематически занижают значения скорости старения. Предложена более корректная процедура измерения скорости старения, свободная от вышеуказанных недостатков.

Было проведено измерение скорости старения для чистого ДМЭ. Полученное значение $(0.7 \pm 0.3) \%$ /(Кл/см) позволяет сделать вывод, что газ ДМЭ, производимый в Институте катализа, пригоден для использования в ДК детектора КЕДР.

Проведено исследование влияния материалов на радиационную стойкость дрейфовой камеры с диметиловым эфиром. В конструкции дрейфовой камеры и газовой системы использованы материалы, не ухудшающие радиационную стойкость, что позволило увеличить время жизни, измеренное с моделью ячейки ДК КЕДР, более чем в десять раз.

Найдена добавка к рабочему газу дрейфовых камер - альфа-нафтиламин, предназначенная для прямой лазерной калибровки, практически не ухудшающая радиационную стойкость дрейфовой камеры на диметиловом эфире.

Монитор был включен в газовую систему после дрейфовой камеры детектора КЕДР и проведено измерение скорости старения ДК в рабочих условиях. Ее значение составило $(7 \pm 3)\% / (\text{Кл}/\text{см})$. Полученное значение скорости старения указывает на возможность работы ДК в детекторе КЕДР в течение всего времени эксперимента без существенной радиационной деградации.

Был обнаружен ранее не наблюдавшийся эффект влияния качества поверхности анодной проволоки на старение. Исследована зависимость этого эффекта от дозы предварительного облучения в чистых условиях и обнаружено влияние облучения в чистых условиях на скорость старения и на размер области, в которой старение отсутствует.

Предложена модель образования и роста полимерного покрытия на поверхности анодной проволоки, объясняется обнаруженный эффект.

Исследовано влияние плотности анодного тока и расхода газа на скорость старения. Полученные результаты по зависимости скорости старения от расхода газа не позволяют сделать однозначного вывода о характере зависимости.

Благодарности. Авторы выражают свою благодарность Онучину А.П. за поддержку данной работы, Тельнову В.И. за продуктивные дискуссии, Старостину А.С. за изготовление моделей ячеек и Маркову Ю.В. за помощь в проведении измерений.

Список литературы

- [1] J.Va'vra, Nucl. Instr. and Meth. A 252 (1986) 547.
- [2] J.Kadyk, Nucl. Instr. and Meth. A 300 (1991) 436.
- [3] Proc. Workshop on Radiation Damage to Wire Chambers, Lawrence Berkeley Laboratory (Jan. 1986) LBL-21170.
- [4] L.Malter, Phys. Rev. 50 (1936) 48.
- [5] G.Bari et al., Nucl. Instr. and Meth. A251 (1986) 292.
- [6] J.Kadyk et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-36(1) (1987) 481.
- [7] R.Kotthaus, Nucl. Instr. and Meth. A252 (1986) 531.
- [8] V.E.Blinov, V.R.Groshev, Nucl. Instr. and Meth. A385 (1997) 419
- [9] E.M. Guschin et al., Prib. Tekh. Eksp. Instr. Eksp. Tech. USSR. 3(1984) 33.
- [10] S.P. Beingessner et al., Nucl. Instr. and Meth. A272 (1988) 669.
- [11] S.E.Baru et al., Proc. Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics, Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, 1990, pp. 41-52.
- [12] J.Kadyk. Results from some anode wire aging tests, LBL Workshop (1986)

В.Е. Блинов, И.Н. Попков, А.Н. Юшков

**Исследование радиационного старения
проволочных камер**

V.E. Blinov, I.N. Popkov, A.N. Yushkov

**Aging measurements
in wire chambers**

ИЯФ 2001-52

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 11.07.2001 г.

Сдано в набор 20.07.2001 г.

Подписано в печать 23.07.2001 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2.6 печ.л., 2.1 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ ь 52

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротационте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.