

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 539.172

НОВЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ СОСТАРЕННОЙ АНОДНОЙ ПРОВОЛОЧКИ КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ

© 2013 г. Г. Е. Гаврилов, Д. А. Аксёнов, В. М. Вахтель, А. Г. Крившич, Д. А. Майсузенко,
А. А. Фетисов, Н. Ю. Швецова

ФГБУ Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова

Поступила в редакцию 03.11.2011 г.

В работе представлен метод, позволяющий неоднократно восстанавливать после старения анодную проволоку пропорционального счетчика путем ее тренировки в коронном разряде газовой смеси $80\%CF_4 + 20\%CO_2$. Детектор старился в результате облучения β -источником ^{90}Sr с рабочей газовой смесью $60\%Ar + 30\%CO_2 + 10\%CF_4$. Как показывает опыт, механизмом старения для данной газовой смеси, при отсутствии примесей, является распухание анодных проволочек, которое и приводит к падению газового усиления. Анализы поверхности, восстановленной проволоки, проведенные при помощи электронного сканирующего микроскопа и методом рентгенофлуоресцентного анализа, показали хорошую очистку поверхности от образований, появившихся на ней в результате старения.

Ключевые слова: старение газоразрядных детекторов, травление в газовом разряде, восстановление газоразрядных детекторов, распухание анодной проволоки.

DOI: 10.1134/S2079562913040064

1. ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в рамках подготовки к экспериментам на Большом адронном коллайдере (БАК) были выполнены широкомасштабные исследования радиационной стойкости газоразрядных детекторов. Актуальность этих исследований обусловлена значительно выросшей на современных ускорителях светимостью и энергией заряженных частиц, в результате чего при работе газоразрядных детекторов в эксперименте суммарный набираемый заряд может достигать порядка 10 Кл на сантиметр длины проволоки.

В результате проведенных исследований были определены основные причины, вызывающие старение детектора. Так «классическое» старение газоразрядных детекторов является результатом химических реакций полимеризации, происходящих в лавине газового разряда вблизи анодных проволочек, которые приводят к образованию осадков на поверхностях электродов. На развитие процесса старения в этом случае сильно влияют примеси в рабочей газовой смеси, а так же к материалы детектора, вступающие в контакт с газом.

Наиболее распространенным элементом, который регулярно обнаруживается при анализе образовавшихся осадков на поверхности электродов, является кремний (Si), который входит в состав таких конструктивных материалов как: стеклопластик, герметики, кремниевая смазка. Источником загрязнения газовой смеси кремни-

ем может стать циркуляционный насос, соединения и клапаны системы газового снабжения, сами электроды детектора. В результате загрязнения в детекторе происходит образование кремниевых осадков на анодной проволоке при набранном заряде менее 1 Кл/см. Диаметр проволоки увеличивается, а коэффициент газового усиления (КГУ), соответственно, падает. Данные многолетних исследований, конструктивных материалов, с точки зрения их влияния на старение, каталогизированы и используются при разработке новых детекторов. С другой стороны, процесс образования осадков можно замедлить путем добавления в газовую смесь спиртовых или водяных паров [1].

Анализ радиационной стойкости рабочих газовых смесей привел к ограничению списка используемых газов до Ar, Xe, CO_2 и CF_4 . Изучение процессов старения в газоразрядных детекторах, работающих с применением этих компонент в газовой смеси, продемонстрировало отсутствие заметного падения КГУ до накопления заряда на уровне 1 Кл/см. Значительную роль в предотвращении загрязнения кремнием электродов играет присутствие в смеси CF_4 [2].

Однако, при накопленных зарядах более 1 Кл/см, был обнаружен другой эффект старения, связанный не с появлением осадков, вызванных полимеризацией, а с распуханием материала анодной проволоки – вольфрама [3]. Исследо-

вание поверхности поврежденных анодных проволок из позолоченного вольфрама, показало, что кислород и другие активные радикалы, образованные в газоразрядной лавине проникают через поры и микротрещины под золотое покрытие и вступают в химические реакции с вольфрамом. Продукты этих реакций, преимущественно окислы вольфрама — WO_x , имеют плотность значительно меньшую, чем вольфрам. Образуясь под золотым покрытием, соединения WO_x распирают его, вызывая растрескивание, и выступают наружу. Происходит как бы распухание проволоки, ее диаметр увеличивается, что и вызывает падение амплитуды сигнала. Остановить или замедлить этот процесс в ходе физического эксперимента невозможно. В результате деградации рабочих характеристик детектор становится непригодным к работе и, практически, не подлежит восстановлению.

Таким образом, создание радиационно-стойких газовых детекторов по-прежнему является сложной задачей, не имеющей универсального решения. Тем большую практическую ценность представляет собой возможность восстановить, состарившийся детектор, не разбирая его, для извлечения поврежденных электродов.

В работе описывается метод восстановления состарившейся в результате распухания анодной проволоки пропорционального счетчика. Без разборки детектора оксидные соединения вольфрама удалось удалить с поверхности проволоки путем травления в разряде газовой смеси $80\%CF_4 + 20\%CO_2$. Качество поверхности после восстановления позволяет неоднократно повторять процедуры старения и восстановления детектора.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования старения проволок и последующего их восстановления использовался пропорциональный счетчик, выполненный из полиамидной пленки с углеродным напылением, идентичный тем, что используются в детекторе переходного излучения в эксперименте ATLAS на БАК. По результатам многолетних исследований этот счетчик обладает минимальным выделением паров конструкционных материалов в рабочий объем, далее по тексту будет использоваться его рабочее название — straw (солома). Диаметр детектора 0.4 см, анодная проволока — 50 мкм, выполнена из вольфрама покрытого золотом с толщиной около 1 микрона.

При старении использовалась рабочая газовая смесь $60\%Ar + 30\%CO_2 + 10\%CF_4$ со скоростью продува $0.5 \text{ см}^3 \text{ мин}^{-1}$. Две тестовые straw, установленные в герметичном модуле, облучались од-

новременно радиоактивным β -источником ^{90}Sr с максимальной энергией электронов $E_e = 2.28 \text{ МэВ}$ и интенсивностью загрузки по 15 МГц на детектор. Пятно облучения составляло 3.5 см вдоль анодной проволоки. Во избежание проникновения внутрь счетчиков straw воздуха и воды из атмосферы, модули продувались аргоном.

При восстановлении в straw использовалась газовая смесь — $80\%CF_4 + 20\%CO_2$ с прежней скоростью продува. Для облучения в этом случае использовался источник γ -квантов ^{55}Fe , обеспечивавший загрузку 3.5 кГц в каждом из счетчиков.

Изменения рабочих характеристик облучаемых straw отслеживалась каждый раз после набора заряда 0.13 Кл/см. Величина КГУ в straw оценивалась по положению пика амплитудного спектра поглощения в аргоне γ -квантов от коллимированного до 2 мм источника ^{55}Fe ($E_\gamma = 5.9 \text{ кэВ}$). Для исключения влияния на результаты колебаний атмосферного давления и температуры, сравнивались данные straw двух одинаковых модулей. Первый использовался как облучаемый тестовый образец, а второй, как контрольный. До появления признаков старения в облучаемых детекторах отношение амплитуд сигналов в обоих модулях остается постоянным и не зависит от окружающей среды. Степень деградации straw в результате старения оценивалась по изменению отношения амплитуд сигналов от ^{55}Fe в облучаемом и контрольном модуле. Исследования старения проводились при рабочих напряжениях $V = 1.73 \text{ кВ}$, $V = 1.83 \text{ кВ}$ и $V = 1.92 \text{ кВ}$, что обеспечило широкий диапазон КГУ и плотности ионизационных токов: $2.5 \cdot 10^4$, $5 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$ и 0.38 мкА/см , 0.97 мкА/см , 1.98 мкА/см , соответственно.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТАРЕНИЯ ДЕТЕКТОРА STRAW

Суммарный заряд, накопленный на аноде тестовой straw в одном цикле облучения, равнялся примерно 1.5–1.8 Кл/см, что вызывало 10–15% падения амплитуды сигнала. Ни в одном из 20-ти проведенных тестов не было обнаружено “классического” старения, вызванного загрязнением газовой смеси. Зато во всех случаях, независимо от КГУ и токов ионизации, наблюдалось распухание анода. Процесс старения развивался только в зоне облучения straw. По-видимому, радикалы, образующиеся в лавине разряда вблизи проволоки, из-за поляризации в сильном электрическом поле не успевали распространяться в газовом потоке вдоль длины straw.

Поверхность состаренных проволок исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа SEM (Scanning Electron Microscop-

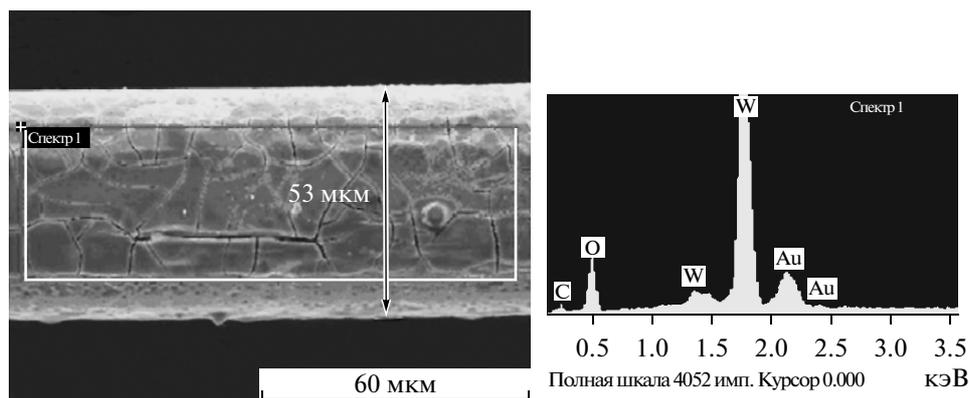


Рис. 1. Слева: SEM снимок состаренной анодной проволоки ($Q = 1.69$ Кл/см) в центре зоны облучения. Рамкой выделена зона для XEM анализа. Справа: спектр рентгенофлуоресцентного анализа, видно наличие на поверхности окислов вольфрама WO_x .

ру) и методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии XEM (X-ray Emission Measurement). В результате была получена информация о морфологии поверхности и ее атомарном составе. Типичные результаты SEM/XEM исследования состаренной анодной проволоки представлены на рис. 1. На снимке показана поверхность проволоки в центре зоны облучения и соответствующий XEM спектр. Обнаруженные на золотом покрытии вольфрам и кислород подтверждают предположение о том, что причиной старения стало распухание анода [3]. Произошедшее увеличение диаметра проволоки на ~ 3 мкм хорошо объясняет падение амплитуды сигналов, наблюдаемое в ходе измерений. Очевидно, что для восстановления рабочих характеристик состаренной straw с поверхности проволоки необходимо удалить образования WO_x . Не разбирая детектор, это можно сделать только путем сухого травления в разряде галогеносодержащего газа, подобно тому, как были удалены осадки на проволочках в работах [4, 5].

С целью подробного изучения состояния поверхности состаренной анодной проволоки был применен метод сканирующей атомно-силовой микроскопии (АСМ). Исследование поверхности проводилось с использованием атомно-силового микроскопа Solver P47-PRO с кантилевером HA-NC, позволяющим измерять рельеф поверхности. Шаг сканирования определялся выбором линейных размеров области сканирования и используемым числом шагов (256×256). Результаты сканирования поверхностей необлученной и состаренной в результате облучения проволоки представлены на рис. 2.

Хорошо видно различие рельефа поверхностей необлученной (вверху) и состаренной (внизу) проволочек. До облучения немногочисленные

образования на поверхности проволочки не превышают по высоте 0.1 мкм, а разброс высот микро-неоднородностей составляет всего около 0.01 мкм. После облучения, на проволочке образовалось множество выступов с высотой, достигающей 0.5 мкм и более. Гладкие участки на поверхности отсутствуют. Радиусы вершин выступов, полученные при измерении профилей рельефа, составили $r \sim 0.1\text{--}0.5$ мкм. Таким образом, образовавшиеся на проволочке выступы можно представить, как острия параболической формы с радиусами r , которые находятся напротив плоскости на расстоянии равном радиусу straw $R = 2000$ мкм. В такой геометрии ($r \ll R$) напряженность электрического поля у вершины острия можно оценить по формуле $E_{\max} \approx 2V/[r \cdot \ln(2R/r)]$. Величина E_{\max} достигает значений более 10^7 В/см при $V \sim 2000$ В. Очевидно, что процессы развития газового коронного разряда должны начинаться именно на таких участках поврежденной старением проволочки.

4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОСТАРЕННОЙ АНОДНОЙ ПРОВОЛОЧКИ

4.1. Процесс восстановления

Метод очистки поверхности анодной проволоки позаимствован из технологии производства полупроводниковых компонент. Уже много лет ВЧ-плазма на основе CF_4/O_2 используется для травления соединений кремния и вольфрама при изготовлении микросхем. Процесс происходит в тлеющем разряде у поверхности образца, к которому приложен отрицательный потенциал. Положительные ионы, накапливаясь у поверхности, ускоряются в сильном электрическом поле и бомбардируют ее, стимулируя процесс. Образующиеся в разряде радикалы (F^* , CF_3^* , O^* , CO^*) взаимодействуют с вольфрамом и его окислами, создавая

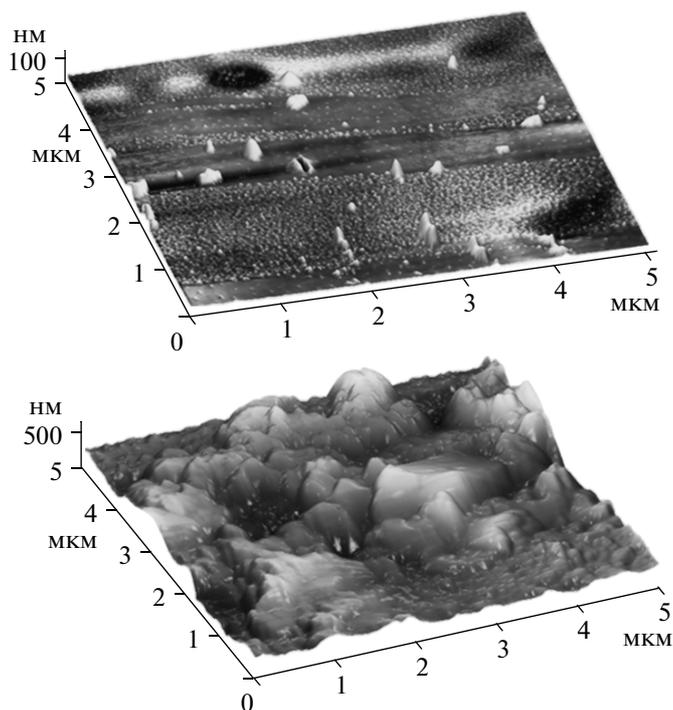


Рис. 2. Вверху: Снимок поверхности необлученной анодной проволоки. Внизу: снимок поверхности состаренной анодной проволоки ($Q = 1.56$ Кл/см) в центре зоны облучения. Хорошо видны множественные выступы, образованные окислами вольфрама WO_x .

летучие соединения WF_6 , которые удаляются газовым потоком. Как правило травление происходит при давлении ниже атмосферного в электрических полях порядка $10\text{--}50$ В/см · Торр с энергией положительных ионов от 0 до 100 эВ. В нашем случае электрическое поле у поверхности проволоки в straw и других газоразрядных детекторах в 10 раз больше и обычно составляет $300\text{--}400$ В/см · Торр. [2]. Именно поэтому мы предположили, что травление поверхности состаренной проволоки возможно также и при атмосферном давлении [5].

Поскольку радикалы и ионы кислорода из газоразрядной плазмы хорошо взаимодействуют с углеродными соединениями, для предотвращения разрушения углеродного напыления стенок straw, кислород в газовой смеси CF_4/O_2 был заменен на CO_2 . В этом случае основная часть радикалов кислорода рождается в результате диссоциации CO_2 в сильном электрическом поле возле проволоки, на которую подается отрицательный потенциал. Легко поляризуясь, радикалы осаждаются на проволоку, не достигая стенок детектора straw.

Как показано в работе [6] наиболее эффективное для травления отношение атомов фтора и углерода (F/C) в восстановительной газовой смеси находится в диапазоне $0.8 < F/C < 4.0$. Исходя из этого соотношения, и был выбран состав газовой

смеси для восстановления — $80\%CF_4 + 20\%CO_2$, где $F/C = 3.2$.

Восстановление состаренных straw происходит в режиме тлеющего диффузионного разряда, который развивается в области повреждений на поверхности проволоки, к которой приложен отрицательный потенциал $U \sim -2700$ В. Покрытая в зоне облучения окислами вольфрама шероховатая поверхность проволоки является хорошим источником электронов эмиссии в газе. Известно также, что вольфрам является хорошим эмиттером электронов вторичной эмиссии, а золото, которое покрывает неповрежденную поверхность проволоки, широко применяется, как антиэмиссионное покрытие. Принимая во внимание характер рельефа поверхности проволоки, показанный на рис. 2, можно уверенно сказать, что развитие первичных коронных разрядов на микроостриях и дальнейший их переход, с ростом напряжения, в тлеющий диффузионный разряд может происходить, прежде всего, в поврежденной области проволоки [7]. При типичной для режима тлеющего разряда напряженности электрического поля в straw на проволоке $E \approx 2.5 \cdot 10^5$ В/см, на микроостриях поле может достигать величин порядка $10^7\text{--}10^8$ В/см. В таких условиях слой окислов вольфрама является источником тока, как вторичных электронов, так и

автоэмиссии. Последнее значительно стимулирует производство радикалов и ионов в непосредственной близости от проволоочки.

Электроны эмиссии с поверхности проволоочки, ускоряясь в сильном электрическом поле, достигают энергии достаточной для развития лавины $E_e > > 5$ эВ всего на нескольких длинах свободного пробега. Согласно оценкам, сделанным с использованием программного пакета GARFIELD, газовое усиление вблизи проволоочки достигает более 10^5 , что приводит к появлению большого положительного объемного заряда у поверхности.

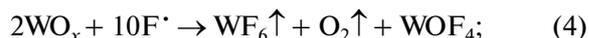
Важную роль при восстановлении состаренной straw играет облучение поврежденной зоны γ -источником ^{55}Fe (3.5 кГц). Гамма кванты поддерживают ионизацию в плазме тлеющего разряда, обеспечивают десорбцию продуктов травления и разрушают химические связи соединений, покрывающих проволоочку, ускоряя процесс восстановления.

Образование радикалов, участвующих в травлении, происходит вблизи проволоочки, где электроны, ускоренные сильным электрическим полем взаимодействуют с молекулами газовой смеси. Наиболее вероятны следующие реакции электронной ударной диссоциации [8]:



Диссоциативная ионизация (1) дает малый вклад в процесс травления, поскольку реализуется при энергиях электронов выше пороговой $E_{\text{пор}} \geq 16$ эВ. В свою очередь диссоциация молекул с образованием радикалов (2, 3) происходит при энергиях электронов 3–6 эВ. Поэтому количество радикалов в разряде значительно больше чем ионов.

Образованные при атмосферном давлении радикалы (1–3) интенсивно взаимодействуют друг с другом, молекулами газовой смеси и с соединениями на поверхности, осуществляя травление WO_x . В электрическом поле радикалы подходят к проволоочке, абсорбируются и вступают во взаимодействие с соединениями вольфрама, образуя летучие продукты, как показано в реакциях:



Как отмечалось в [9], при травлении WO_x во фторсодержащей плазме, на поверхности накапливаются соединения WF_4 , WF_5 и F_2 , которые

останавливают травление. Поэтому бомбардировка проволоочки ионами и гамма облучение необходимы для десорбции этого пассивирующего слоя. Энергия положительных ионов в тлеющем разряде практически тепловая из-за множества упругих столкновений с окружающими атомами и молекулами. Только на последней длине свободного пробега у проволоочки положительные ионы разгоняются электрическим полем до энергии выше тепловой. Средняя энергия ионов CF_3^+ , ускоренных в CF_4 электрическим полем $E \sim 250$ – 300 кВ/см, может быть оценена по формуле [10]:

$$\bar{\varepsilon}_i \approx \frac{(M_{\text{CF}_4} + M_{\text{CF}_3})^{3/2}}{2M_{\text{CF}_4}\sqrt{M_{\text{CF}_3}}} e^- E \cdot \ell \approx 2.5 \text{ эВ}, \quad (8)$$

где $M_{\text{CF}_4} = 1.46 \cdot 10^{-22}$ г; $M_{\text{CF}_3} = 1.15 \cdot 10^{-22}$ г – массы молекул; $e = 1.60 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; величина ℓ – длина свободного пробега иона которая определяется как

$$\ell = \frac{1}{\sqrt{2}N\pi \cdot (r_{\text{CF}_3} + r_{\text{CF}_4})^2} = 0.63 \cdot 10^{-5} \text{ см},$$

где $N = 2.685 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ – число Лошмидта, $r_{\text{CF}_3^+} = 1.32 \cdot 10^{-8}$ см и $r_{\text{CF}_4} = 2.35 \cdot 10^{-8}$ см – радиусы молекул CF_3^+ и CF_4 . Согласно (8) энергия ионов CF_3^+ вдвое меньше энергии диссоциации соединений вольфрама. Однако на остриях образований WO_x (рис. 2), в зоне облучения, ионы могут легко достигать необходимый для диссоциации уровень энергии 4–6 эВ. Таким образом, процесс травления начинается, прежде всего, со сглаживания образований WO_x .

4.2. Результаты восстановления состаренных проволоочек

Тренировка состаренной straw в газовом разряде с током 1.2 мкА/см в течении 5–6 часов обеспечила полное восстановление характеристик детектора. На рис. 3а показана динамика процесса восстановления КГУ вдоль длины проволоочки в зависимости от времени травления. Поскольку спектр поглощения от ^{55}Fe в восстановительной смеси 80% CF_4 + 20% CO_2 имеет достаточно узкий пик, он был использован при мониторинге газового усиления в ходе восстановления.

Представленные на рисунке распределения КГУ вдоль straw измерялись каждые два часа. Видно, что травление происходит только в поврежденной зоне проволоочки, которая при этом облучается γ -квантами ^{55}Fe . На рис. 3б представлены распределения КГУ, измеренные в рабочей га-

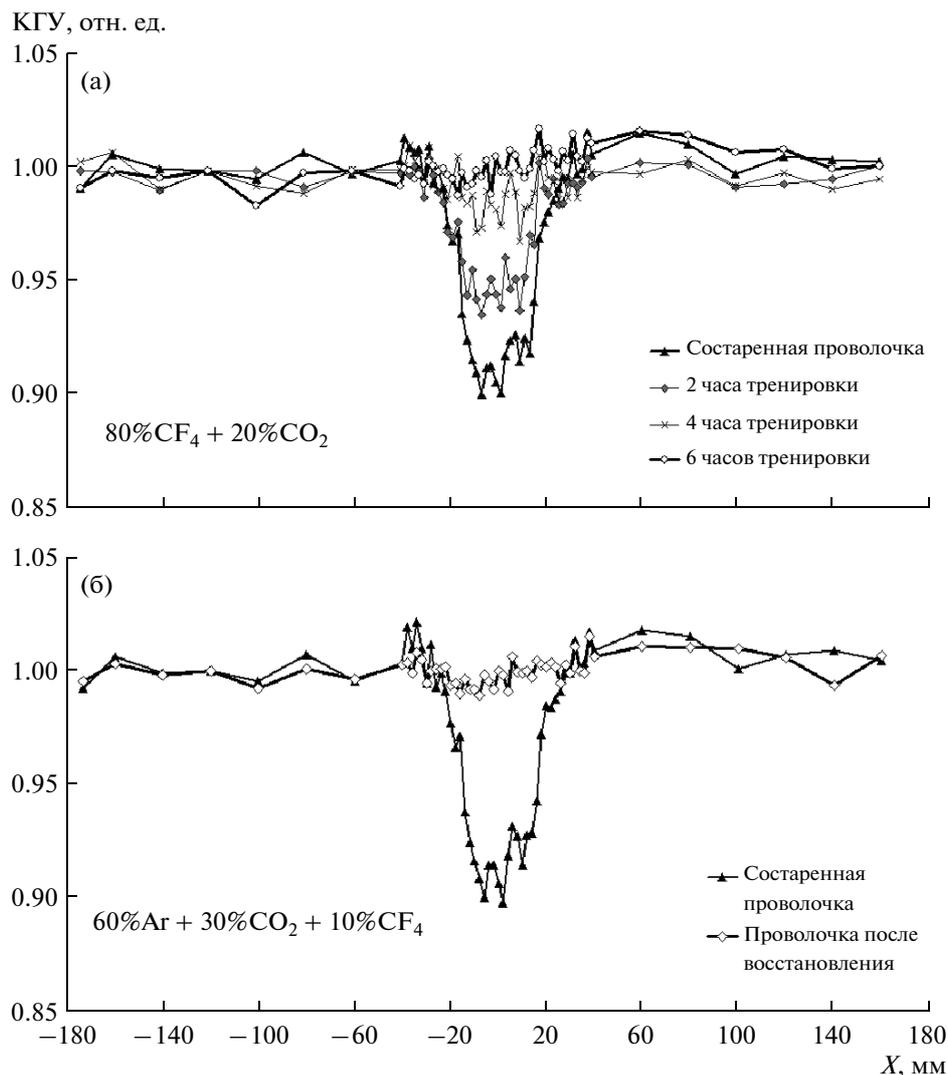


Рис. 3. (а) Коэффициент газового усиления вдоль straw, измерявшийся каждые 2 часа травления в восстановительной смеси CF_4/CO_2 ; (б) коэффициент газового усиления вдоль straw, измеренный для состаренной, а затем восстановленной straw в рабочей смеси $\text{Ar}/\text{CO}_2/\text{CF}_4$.

зовой смеси $60\%\text{Ar} + 30\%\text{CO}_2 + 10\%\text{CF}_4$, до начала процесса восстановления и после него. Хорошо видно, что 10% падение КГУ в центре зоны облучения ($X = 0$ мм) путем тренировки удалось вернуть к исходному значению.

Для SEM/XEM анализа поверхности проволочки в зоне облучения, straw демонтировалась из блока и разбиралась, из нее извлекалась анодная проволочка. Таким образом, сравнительный анализ поверхности одной и той же проволочки до и после восстановления был невозможен. Поэтому проволочки из “восстановленных” straw обычно сравнивались с проволочками, которые были состарены в straw с рабочей газовой смесью в идентичных условиях.

На рис. 4 представлены результаты SEM/XEM анализа поверхности не облученной (слева) и восстановленной после распухания (справа) проволочек.

На обоих снимках проволочки имеют одинаковый диаметр — 50 мкм. Золотое покрытие необлученной проволочки не имеет существенных дефектов. Поверхность восстановленной проволочки покрыта небольшими белыми пятнами, которые XEM анализ идентифицирует, как следы вольфрама и его соединений. Интересно отметить также, что трещины, через которые на поверхность поступал окисленный вольфрам, малозаметны — произошло стягивание трещин на золотом покрытии. По-видимому, это является результатом травления не только на поверхности

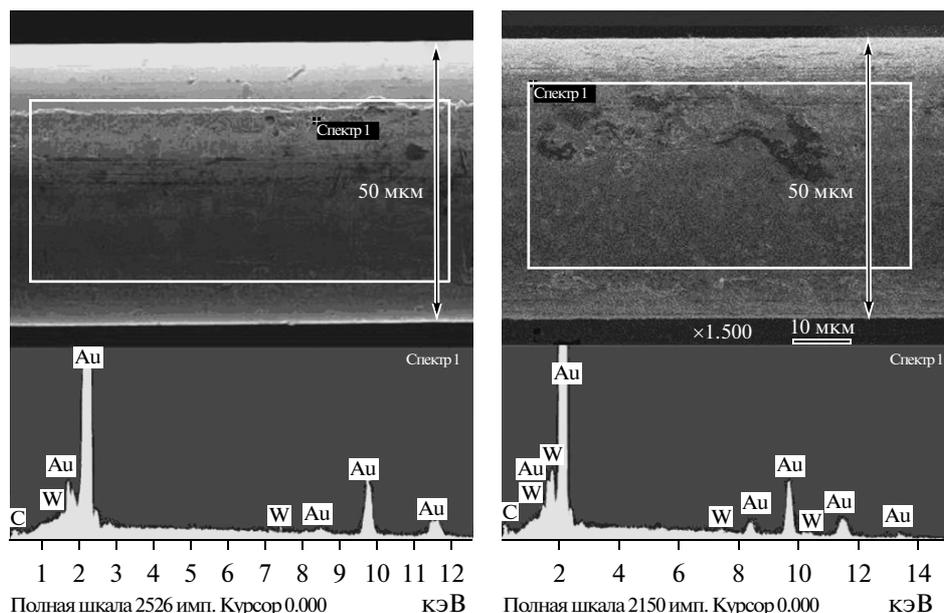


Рис. 4. SEM снимок поверхности и соответствующий XEM спектр для не облученной проволочки (слева) и центральной части восстановленной проволочки (справа).

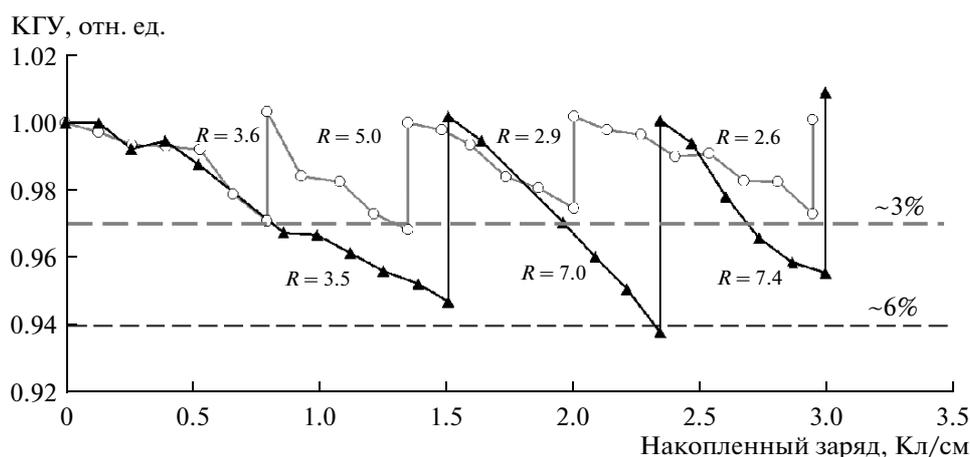


Рис. 5. Зависимость относительного газового усиления от накопленного заряда на единицу длины проволочки. Белые кружки (○) соответствуют тесту, где падение амплитуды при старении достигало 3%, черные треугольники (▲) — циклы с падением амплитуды до 6%; R — скорость старения.

проволочки, но и внутри трещин. Используя описанную методику, было полностью восстановлено восемь детекторов straw, состаренных до 10% падения амплитуды сигнала.

5. МНОГОКРАТНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ СОСТАРЕННЫХ АНОДНЫХ ПРОВОЛОЧЕК

Для проверки радиационной стойкости восстановленных straw было проведено два теста по многократному старению—восстановлению. Ста-

рение straw происходило с использованием рабочей газовой смеси 60%Ag + 30%CO₂ + 10%CF₄ при КГУ 5×10^4 , а для восстановления состаренного детектора использовалась, описанная выше восстановительная смесь. В первом тесте максимальное падение амплитуды в результате старения ограничивалось 3%, а во втором тесте 5–6%. Обычно такой уровень деградации детектора соответствует накопленным зарядам 0.8 Кл/см и 1.5 Кл/см или 1–2 годам работы в физическом эксперименте на БАК.

Результаты обоих тестов приведены на рис. 5, где показаны зависимости относительного газового усиления от заряда, накопленного на единицу длины анодной проволоочки.

Для каждого цикла “старение—восстановление” на рисунке приведена скорость старения $R = -dG/G \times 1/dQ$, где G — исходное газовое усиление, dG/G — относительное падение КГУ за один цикл облучения (%), а dQ — соответствующий накопленный заряд на единицу длины проволоочки (Кл/см) [11].

Сравнивая результаты двух тестов видно, что при тестах с падением амплитуды — 6% скорость старения возрастает вдвое. По-видимому, это связано с накоплением не поддающихся восстановлению дефектов на проволочке. Но, наоборот, в тесте с падением амплитуды — 3% параметр R становится даже меньше.

В обоих тестах straw удалось аккумулировать заряд около 3 Кл/см, но и в конце испытания газовое усиление осталось таким же, как и до начала облучения. Практически, это означает удвоение времени жизни детектора, работающего в экстремальных условиях при загрузке 15 МГц и токе облучения 0.97 мкА/см.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный метод увеличения времени жизни детектора эффективен, хотя и имеет определенные недостатки. Так, может оказаться затруднительной замена рабочей газовой смеси на восстановительную газовую смесь CF_4/CO_2 . Необходимо проверять стойкость материалов детектора на взаимодействие с CF_4 и его радикалами. С другой стороны, процессу травления могут помешать примеси паров насыщения, выделяемые конструкционными материалами. По той же причине должен быть оптимизирован и поток газовой смеси через детектор. Очевидно, что восстановление крупногабаритных детекторов может оказаться затруднительным из-за большой величины тока в процессе травления и необходимости использовать мощный широко-апертурный радиоактивный источник. Но обычно процесс распухания проволочек происходит в зоне аккумуляции большого заряда, то есть в локализованной области, подвергшейся облучению с большой интенсивностью. Например, вблизи оси пучка. Это означает, что для травления образований на проволочках не нужно облучать поверхность всего детектора, отчего возможность применения метода становится более реалистичной. Суммируя можно сказать:

- Разработан и успешно испытан метод восстановления газоразрядных детекторов, в кото-

рых старение вызвало распухание анодных проволочек. Метод позволяет без разборки детектора восстановить его рабочие характеристики путем тренировки в газовом разряде $80\%CF_4 + 20\%CO_2$.

- Изучение поверхности проволочек в восстановленных детекторах продемонстрировало надежность и эффективность метода. Повторно выполнять процедуры старения и восстановления можно несколько раз даже в условиях высокоинтенсивной радиационной загрузки до 15 МГц. Таким образом, становится возможным значительно увеличить время жизни детектора в эксперименте.

- Продемонстрированный метод обладает высокой селективностью. Процесс травления образований протекает только в поврежденной зоне проволочки, где произошло распухание. Для неповрежденных облучением проволочек данный метод восстановления безопасен.

- Наилучшие результаты по многократному восстановлению проволочек достигаются в начальной стадии развития старения при достижении падения амплитуды сигнала на 3–4%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Capeans M.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2003. V. 515. P. 73.
2. *Va'Vra J.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 2003. V. 367. P. 353.
3. *Ferguson T., Gavrilov G., Gratchev V. et al.* // Nucl. Instrum. And Methods Phys. Res. A. 2003. V. 515. P. 266.
4. *Openshaw R., Henderson R.S., Faszer W. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1987. NS-34. P. 528.
5. *Belostotski S., Gavrilov G., Miklukho O. et al.* // Nucl. Instrum. And Methods Phys. Res. A. 2008. V. 591. P. 353.
6. *Wise J., Kadyk J.A., Hess D.W.* // Journ. Appl. Physics. 1993. V. 74. P. 5327.
7. *Akisev Yu., Grushin M., Kochetov I. et al.* // Plasma Sources Sci. Technol. 2005. V. 14. P. 18.
8. *Данилин Б.С., Куреев В.Ю.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатом издат, 1987. С. 125.
9. *d'Agostino R., Fracassi F.* // Pure & Appl. Chem. 1994. V. 66. P. 1185.
10. *Райзер Ю.П.* Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. С. 99.
11. *Va'Vra J.* // Nucl. Instrum. and Methods Phys. Res. A. 1986. V. 252. P. 547.

New Method for the Recovery of an Aged Anode Wire by a Corona Discharge**G. E. Gavrilov, D. A. Aksenov, V. M. Vakhtel', A. G. Krivshich,
D. A. Maisuzenko, A. A. Fetisov, and N. Yu. Shvetsova***Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Centre Kurchatov Institute, Gatchina, 188300 Russia*

Received November 3, 2011

A method has been proposed for the multiple recovery of an aged anode wire of a proportional counter by its training in a corona discharge in the 80% CF₄ + 20% CO₂ gas mixture. The detector was aged through irradiation by ⁹⁰Sr β source with the 60% Ar + 30% CO₂ + 10% CF₄ working gas mixture. According to experiments, the swelling of anode wires, which leads to a decrease in gas amplification, is responsible for aging in this gas mixture in the absence of impurities. Electron scanning microscopy analysis and X-ray fluorescence analysis of the surface of the recovered wire show that the surface is well cleaned from aging-induced structures.

Keywords: aging of gas-discharge detectors, etching in a gas discharge, recovery of gas-discharge detectors, swelling of an anode wire