

## НЕИНВАЗИВНЫЙ МЕТОД ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГАЗОРАЗРЯДНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПОСЛЕ ДЕГРАДАЦИИ В ИНТЕНСИВНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЯХ

*Г. Е. Гаврилов* \*, *В. А. Андреев*, *А. Г. Крившич*,  
*Д. А. Майсузенко*, *А. А. Фетисов*, *Н. Ю. Швецова*

Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова  
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Описывается неинвазивный метод восстановления газоразрядных детекторов, деградировавших в результате работы в интенсивных радиационных полях. Основой представленных технологий являются плазмохимические реакции, происходящие при тренировке детекторов в газовом разряде специальных восстановительных газовых смесей. Приведены результаты восстановления рабочих параметров для пропорциональных камер и счетчиков.

A method of noninvasive recovery of gas discharge detectors degraded due to operation in the intensive radiation fields is described. The plasma-chemical reactions are the basis of the given techniques and occur during the detectors training at gas discharge of special recovering gas mixtures. Results of recovery of the operating parameters for the proportional chambers and counters are presented.

PACS: 00.07.77.Ka; 00.29.40.Cs

### ВВЕДЕНИЕ

При подготовке к экспериментам БАК в ЦЕРН усилиями многих исследовательских групп было продемонстрировано, что при накоплении заряда  $0,1\text{--}1 \text{ Кл}\cdot\text{см}^{-1}$  старение газоразрядных детекторов, использующих газовые смеси Ar, CO<sub>2</sub> и CF<sub>4</sub>, имеет два основных типа. Первый — появление на поверхности анодных проволочек кремниевых осадков, источником которых являются конструкционные материалы и элементы системы газообеспечения детектора [1]. Второй — аномальная эмиссия электронов через диэлектрические пленки (кремниевые, органические или окисные), образовавшиеся на катоде.

---

\*E-mail: gennady.gavrilov@pnpi.spb.ru

Если загрязнения кремнием в детекторе нет, то при накоплении заряда более  $1 \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-1}$  может происходить распухание проволочек, что вызывается окислением под золотым покрытием основного материала проволочки — вольфрама [2]. Во всех случаях старения анодных проволочек их диаметр увеличивается и падает коэффициент газового усиления (КГУ).

Диэлектрические пленки на катоде обычно становятся причиной возникновения эффекта Мальтера [3, 4] — спонтанного самоподдерживающегося тока в детекторе, который инициируется электронной эмиссией с поверхности катода. Разработанный в ПИЯФ неинвазивный метод очистки поверхности катода и анодных проволочек от соединений органики, кремния или вольфрама базируется на плазмохимических реакциях травления, применяемых в микроэлектронике. Восстановление детектора после старения без разборки для ремонта актуально для многих физических экспериментов, так как создание детектора, работающего при накопленном заряде  $10\text{--}20 \text{ Кл} \cdot \text{см}^{-1}$ , до сих пор является проблемой.

### 1. МАЛЬТЕРОВСКИЙ ЭФФЕКТ НА КАТОДЕ

Для восстановления многопроволочных пропорциональных камер (МПК) мюонного трекера эксперимента LHCb на БАК от спонтанно возникающих мальтеровских токов была испытана рабочая газовая смесь  $55\% \text{ Ar} + 40\% \text{ CO}_2 + 5\% \text{ CF}_4$  с добавлением  $2\%$  кислорода. Полученные в газоразрядной плазме у проволочки радикалы кислорода и озон эффективно взаимодействуют с органическими и кремниевыми пленками на катоде, образуя летучие соединения, которые удаляются продувом газа [5, 6]. На рис. 1 приведены

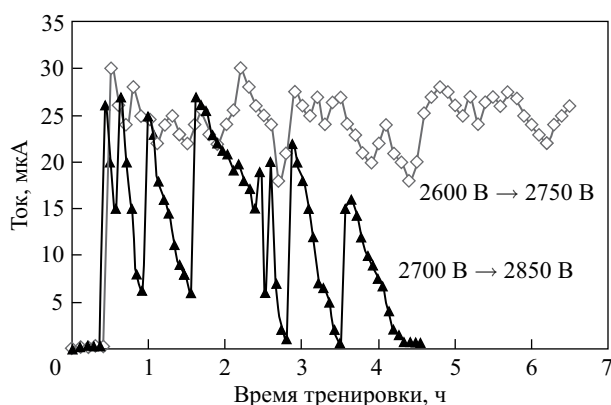


Рис. 1. Мальтеровский ток в МПК в процессе восстановления:  $\diamond$  — тренировка в рабочей газовой смеси;  $\blacktriangle$  — тренировка в рабочей газовой смеси с добавлением  $2\% \text{ O}_2$

зависимости мальтеровского тока от времени тренировки модулей МПК. Ток на уровне 25 мкА возбуждался облучением  $\beta$ -источника  $^{90}\text{Sr}$  при напряжении 2600–2700 В и поддерживался увеличением напряжения до 50 В, спадая по мере удаления образований на катоде. Видно, что за 4 ч тренировки в газовой смеси с 2 % кислорода мальтеровский ток в МПК практически исчезает. Тогда как при тренировке МПК в рабочей газовой смеси ток остается на прежнем уровне и через 6 ч. Подобной методикой удалось восстановить четыре модуля МПК, не поддававшиеся восстановлению, при тренировке в рабочей газовой смеси.

## 2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ АНОДНОЙ ПРОВОЛОЧКИ

Травление образований на аноде происходит в плазме газового разряда восстановительной смеси 80 %  $\text{CF}_4$  + 20 %  $\text{CO}_2$  у поверхности проволоочки, к которой приложен отрицательный потенциал. Основой процесса является плазмохимическое травление активными радикалами фтора соединений кремния или вольфрама в газовом разряде у проволоочки. Результатом взаимодействия является образование летучих соединений. В процессе восстановления поврежденная зона облучается источником  $^{55}\text{Fe}$ . Рентгеновские фотоны с энергией 6 кэВ поддерживают ионизацию в плазме газового разряда и обеспечивают десорбцию продуктов травления [7–9].

Изучение травления образований кремния и вольфрама проводилось с использованием пропорциональных счетчиков типа строу (straw — соломинка, трубочка). Результаты восстановления строу от кремниевых образований показаны на рис. 2. Диаметр анодной проволоочки в строу составлял 50 мкм, диаметр катода — полиамидной трубки с углеродным напылением — 4 мм. При старении строу в газовой смеси 60 %  $\text{Ar}$  + 30 %  $\text{CO}_2$  + 10 %  $\text{CF}_4$  облучались  $\beta$ -источником  $^{90}\text{Sr}$  с общей интенсивностью 15 МГц. Анодные проволоочки строу трижды старелись в загрязненной кремнием газовой смеси до падения амплитуды на  $\sim 35\%$  и восстанавливались каждый раз в 80 %  $\text{CF}_4$  + 20 %  $\text{CO}_2$ . На рис. 2, а представлены снимки сканирующего микроскопа и спектры рентгенофлуоресцентного анализа (SEM/XEM) поверхности проволоочки до и после трех фаз «старение–восстановление». Зависимость КГУ от накопленного заряда показана на рис. 2, б.

Для достижения эффекта распухания анода использовалась чистая газовая система. Выполнено два цикла измерений с тремя фазами «старение–восстановление». В первом цикле строу облучались до падения амплитуды сигнала на  $\sim 6\%$ , а во втором на  $\sim 3\%$  [10]. Полученные данные измерений приведены на рис. 3. Результаты SEM/XEM анализа поверхности проволоочки показаны на рис. 3, а, а зависимости КГУ от накопленного заряда — на рис. 3, б.

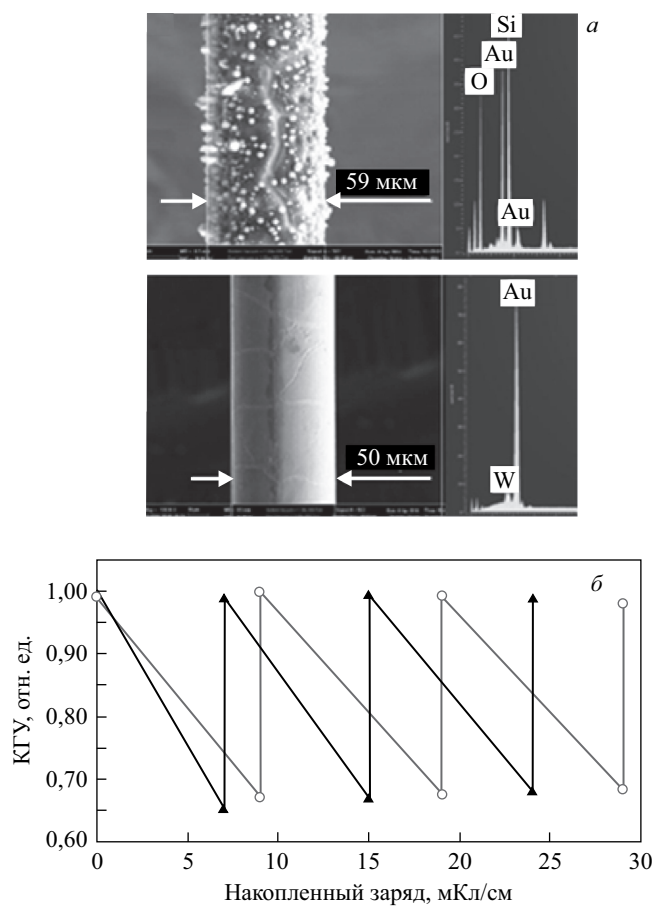


Рис. 2. *а*) Результаты SEM/XEM анализа поверхностей состаренной (вверху) и восстановленной травлением (внизу) анодных проволочек. *б*) Зависимости газового усиления от накопленного заряда в процессе многократного восстановления двух счетчиков: строу № 1 (▲) и строу № 2 (○); наклонные линии — падение КГУ при облучении; вертикальные линии — восстановление КГУ при травлении [9]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение плазмохимического травления в газовом разряде для восстановления МПК в несколько раз увеличивает время жизни детектора. Применение данного метода восстановления, возможно, может стать решением проблемы старения для будущих экспериментов.

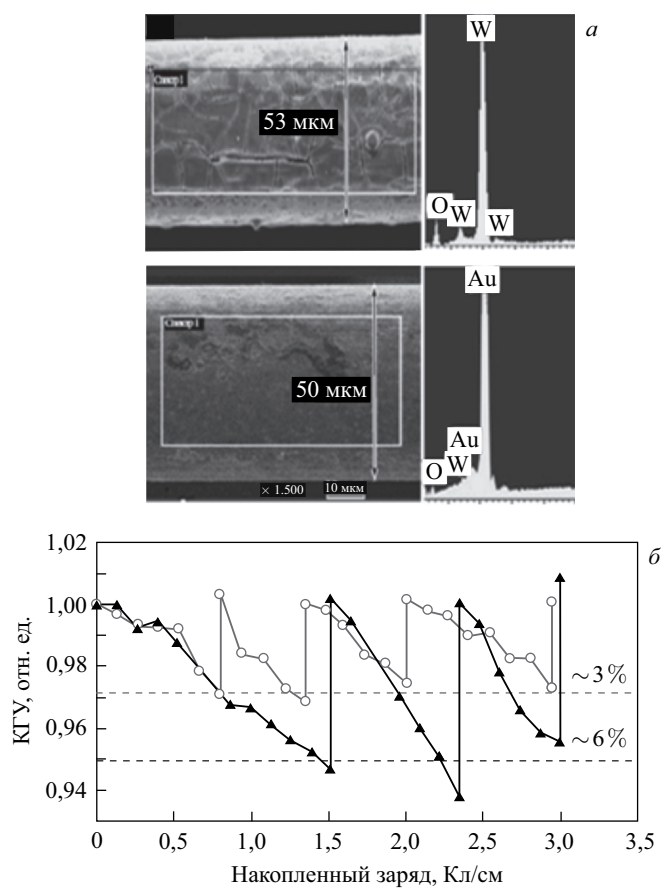


Рис. 3. а) Результаты SEM/XEM анализа поверхностей состаренной (вверху) и трижды очищенной (внизу) анодных проволочек. б) Зависимости КГУ от накопленного заряда в процессе многократного восстановления счетчиков: строю № 1 (▲) и строю № 2 (○) [10]

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Capeans M.* Aging and Materials: Lessons for Detectors and Gas Systems // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. P. 73.
2. *Ferguson T., Gavrilov G. et al.* Swelling Phenomenon in an Anode Wire Aging under High Accumulated Dose // Ibid. P. 266.
3. *Malter L.* Thin Film Field Emission // Phys. Rev. 1936. V. 50. P. 48–58.

4. *Va'vra J.* Physics and Chemistry of Aging — Early Developments // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. P. 1–14.
5. *Григорьев Ф. И.* Плазмохимическое и ионно-химическое травление в технологии микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. М., 2003. 48 с.
6. *Boyarsky A. M.* Polymer Growth Rate in a Wire Chamber with Oxygen, Water, or Alcohol Gas Additives // Nucl. Instr. Meth. A. 2009. V. 604. P. 573–577.
7. *Zhuze V. P., Kurchatov B. V.* The Electrical Conductivity of Copper Oxid // Phys. Z. Sowjetunion. 1932. V. 2. P. 453–467.
8. *Belostotski S., Frullani S. et al.* Extension of the Operational Lifetime of the Proportional Chambers in the HERMES Spectrometer // Nucl. Instr. Meth. A. 2008. V. 591. P. 353–366.
9. *Гаврилов Г. Е., Вахтель В. М.* Увеличение временного ресурса газоразрядных детекторов методом ПХТ осадков кремния в 80 % CO<sub>2</sub> + 20 % CF<sub>4</sub>. Препринт НИЦ КИ ПИЯФ № 2983. Гатчина, 2015. 15 с.
10. *Gavrilov G. E., Aksenov D. A. et al.* Using an 80 % CF<sub>4</sub> + 20 % CO<sub>2</sub> Gas Mixture to Recover Aged Anode Wires in Proportional Chambers // Nucl. Instr. Meth. A. 2012. V. 694. P. 167–172.