

УДК 538.56:538.971

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ КАМЕРЫ ПОСЛЕ РАБОТЫ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ НА БОЛЬШОМ АДРОННОМ КОЛЛАЙДЕРЕ

© 2022 г. Г. Е. Гаврилов¹ *, М. Э. Бузоверя², И. А. Карпов², М. В. Таценко², М. В. Ткаченко², А. А. Дзюба¹, О. Е. Маев¹, П. В. Середин³, Д. Л. Голощапов³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение

“Петербургский институт ядерной физики имени Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”, Гатчина, Россия

²Федеральное государственное унитарное предприятие

Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, Саров, Россия

³Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования
“Воронежский государственный университет”, Воронеж, Россия

*E-mail: gavrilov_ge@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 08.04.2022 г.

Принята к публикации 22.04.2022 г.

Комплексному исследованию подвергнут катод многопроволочной пропорциональной камеры, прошедшей длительное облучение в эксперименте на БАК. Информация о структурно-фазовом состоянии медной фольги на катоде получена методами ядерно-сканирующей микроскопии, атомно-сканирующей микроскопии, рамановской спектроскопии и рентгенофазового анализа. В зоне возникновения спонтанной эмиссии электронов на электроде обнаружены наноструктурные образования углерода.

DOI: 10.31857/S0367676522080075

ВВЕДЕНИЕ

Радиационная стойкость многопроволочных пропорциональных камер (МПК) в экспериментах на Большом адронном коллайдере (БАК) сегодня остается актуальной темой. Это вызвано, почти, десятикратным ростом светимости коллайдера, запланированным после его реконструкции. Поэтому обеспечение стабильности МПК на следующие 10 лет работы БАК при ожидаемом скачке тока ионизации и уже наблюдаемых появлениях спонтанного самоподдерживающегося тока (Мальтер-эффект (МЭ)) [1] стали ключевой мотивацией исследований.

Спонтанные токи, возникая в МПК, в десятки раз превышают по величине ток от столкновения пучков протонов в коллайдере и достигают 30–40 мкА [2]. Это затрудняет работу регистрирующей электроники и перегружает ее ложными срабатываниями. При этом ток МЭ, локализованный в точке на катоде, вызывает ускоренное старение анодных проволочек, находящихся рядом.

Цель исследования поверхности катода многопроволочной пропорциональной камеры —

установление причины возникновения токов МЭ для выработки методов их подавления.

ОБРАЗЦЫ КАТОДА МПК

Для изучения был выбран модуль пропорциональных камер мюонного детектора эксперимента LHCb – тип M5R4_FIR037 [2], проработавший на БАК длительное время ($T \approx 3.2 \cdot 10^7$ с). В этом модуле, состоящем из четырех регистрирующих плоскостей (Gap A, B, C, D) МПК, только плоскость Gap D регулярно демонстрировала спонтанные самоподдерживающиеся токи. Поэтому именно из этой плоскости были взяты образцы катода, которые представляют собой диски с радиусом 23 мм и высотой 1мм.

В результате работы на БАК с рабочей газовой смесью Ar(40%)/CO₂(55%)/CF₄(5%) анодные проволочки МПК в модуле M5R4_FIR037 аккумулировали заряд $Q \sim 1$ мКл · см⁻¹ (или ~ 2.5 мКл · см⁻²). После демонтажа из мюонного детектора этот модуль исследовался дополнительно на облучательном стенде GIF++ [3] с использованием газовой смеси Ar(40%)/CO₂(58%)/CF₄(2%). В ре-

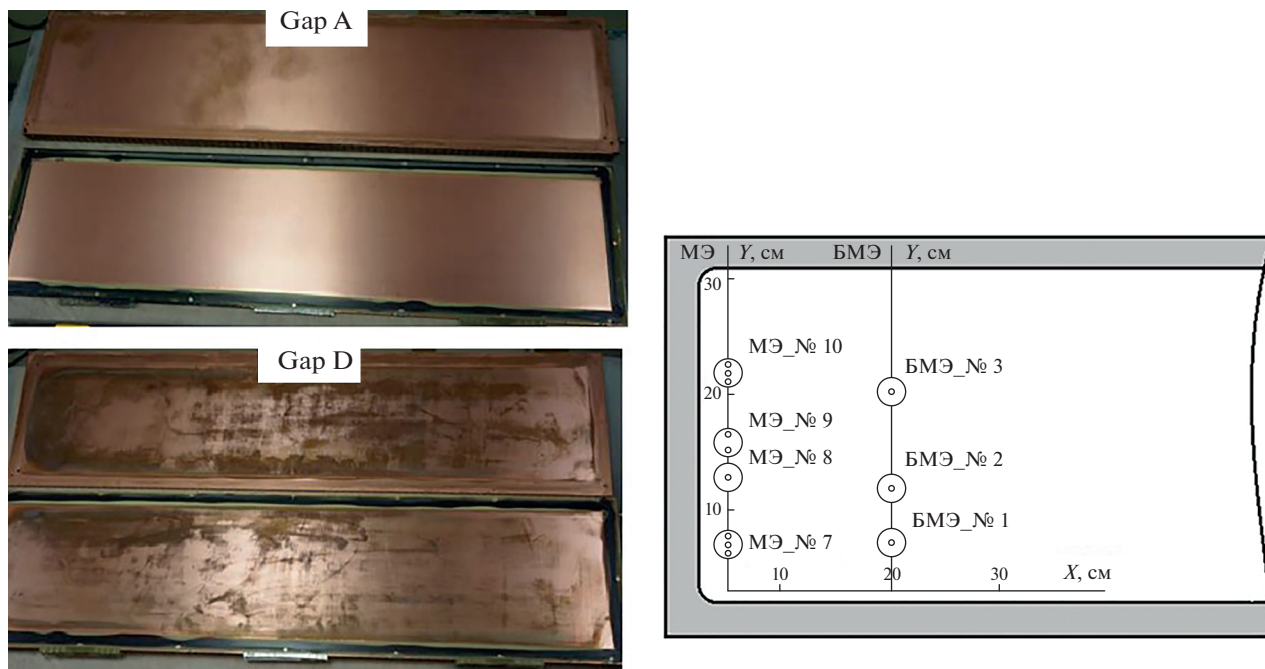


Рис. 1. Слева фотоснимки катодных плоскостей Gap A и Gap D после разборки МПК. Справа – схема расположения образцов (кружки) на катоде.

зультате на проволочках был дополнительно аккумулирован заряд $Q_1 \sim 0.5 \text{ мКл} \cdot \text{см}^{-1}$.

Необходимо отметить, что заряд Q_1 был набран за очень короткое время (ток в регистрирующих плоскостях МПК был выше на два порядка, чем во время работы в составе мюонного детектора). При этом содержание CF_4 в рабочей смеси составило 2%, а проток газа через объем был понижен на 30%. Несмотря на ужесточившиеся условия испытаний, новых зон спонтанной эмиссии электронов в МПК не было обнаружено. Имевшаяся уже зона МЭ сохранилась на прежнем месте.

На одну из плоскостей МПК – Gap A при работе на коллайдере (и на стенде) не подавалось высокое напряжение. Но, как и все остальные, эта плоскость находилась под облучением заряженными частицами с интенсивностью $R \sim 350 \text{ Гц} \cdot \text{см}^{-2}$. В Gap A из-за отсутствия электрического поля катоды не подвергались плазмо-химическому воздействию продуктов диссоциации компонент газовой смеси. Поэтому образцы, взятые на этой плоскости, называются далее по тексту контрольными. Они использовались для сравнения с образцами из Gap D, которые испытали весь комплекс радиационного и плазмохимического воздействия. Интегральный флюэнс облучения плоскостей МПК составил $F \approx 5 \cdot 10^{13}$ МИП-частиц. В итоге, доза на медной фольге катода (толщина 35 мкм), рассчитанная с помощью про-

граммного пакета GEANT4, оказалась на уровне $D \approx 1.3 \text{ Гр}$.

Для выделения зоны генерации токов МЭ в МПК на стенде GIF++ при облучении были измерены счета загрузки объединенных в группы анодных проволочек Gap D. В результате, зона генерации была локализована по группе проволочек с аномально высоким счетом. Далее по тексту образцы катода, взятые вдоль этих проволочек, обозначены как МЭ-образцы, а вне зоны высокого счета обозначены, как БМЭ-образцы.

На рис. 1, вверху, показаны снимки катодных плоскостей M5R4_FIR037 после разборки. Слева – снимки плоскостей Gap A и Gap D. Справа – схема расположения образцов на катоде. МЭ-образцы брались последовательно вдоль оси Y длиной 30 см, параллельной анодным проволочкам, с максимально высоким счетом. БМЭ-образцы также взяты вдоль оси Y , но со смещением от зоны спонтанных токов на ~ 20 см. Визуальный осмотр модуля МПК после разборки показал, что катоды всех плоскостей МПК, кроме Gap A, подвержены значительному окислению, нижний снимок на рис. 1. Но, поскольку МЭ наблюдался только на плоскости Gap D, можно предположить, что процессы окисления и восстановления меди все же не являются достаточной причиной для возникновения эмиссионных токов на катоде [4, 5]. Хотя известно, что островковый характер окисления медной поверхности с образованием Cu_2O в электрическом поле $E \geq 50 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$, с

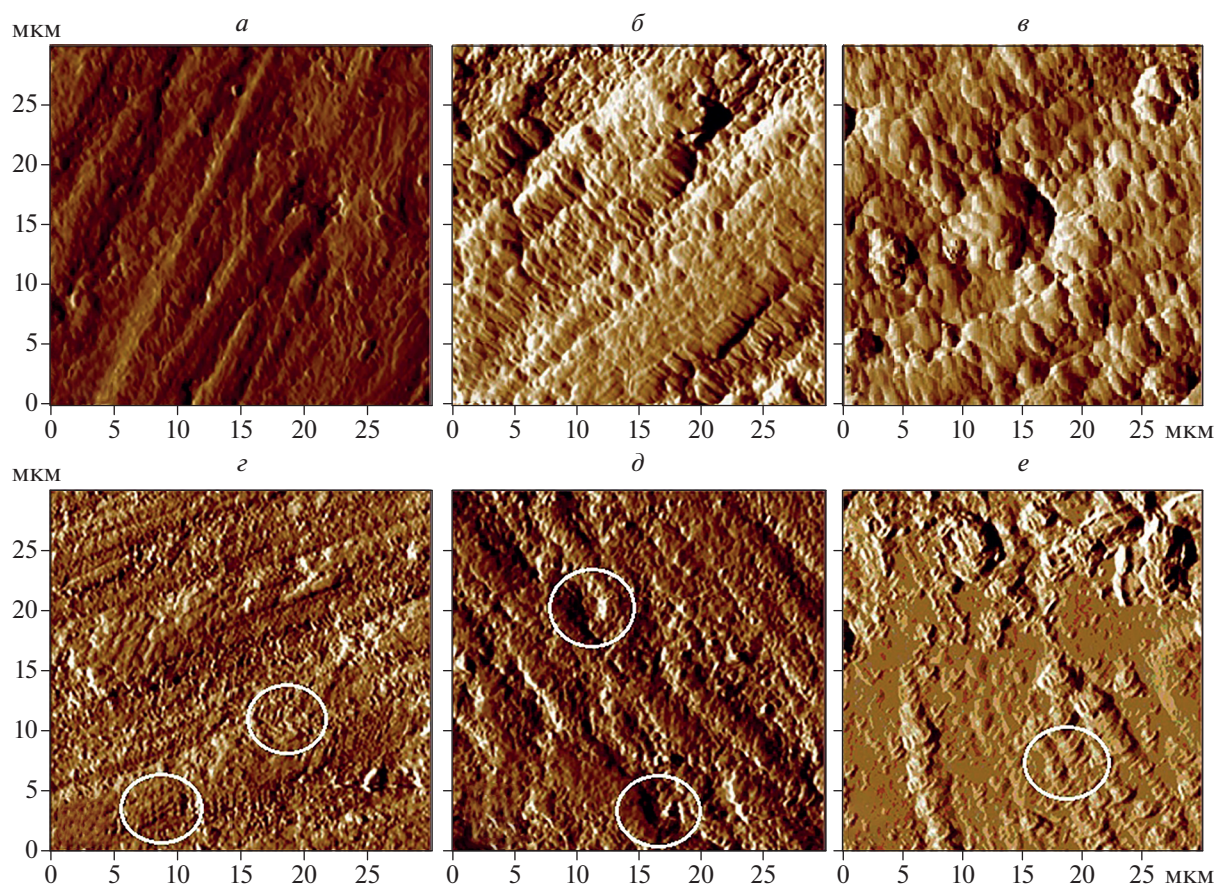


Рис. 2. АСМ-скан поверхности образцов с размером поля сканирования 30×30 мкм: контрольный (а); БМЭ_№ 1 (б); БМЭ_№ 2 (в); МЭ_№ 5 (г); МЭ_№ 8 (д); МЭ_№ 10 (е).

большой вероятностью приводит к возникновению эмиссионных токов [6].

МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования морфологии поверхности образцов катода проводились методом атомно-силовой микроскопии на СЗМ “Solver Next” ОАО “НТ-МДТ”, г. Зеленоград. Поверхности сканировались кантилеверами серии NSG10/TiN в полуконтактной моде (tapping-mode) – режимы топографии и фазы; в контактной моде – режим токовой спектроскопии на воздухе при нормальных условиях.

Элементный анализ поверхности образцов проводился на установке “Микрозонд” комплекса Микрозонд – ЭГП-10 методом обратного ретерфордовского рассеяния (Rutherford backscattering spectroscopy – RBS). При исследовании комплекс Микрозонд – ЭГП-10 работал в следующем режиме: энергия пучка – 4 МэВ; ток протонов на образцах – 0.01 нА; размер пучка на образце – 30×30 мкм. Площадь сканирования – 300×300 мкм.

Фазовый состав изучаемых образцов определялся на рентгеновском дифрактометре “Shimadzu XRD-7000” с использованием излучения медного анода (длина волны 1.542 Å), $V = 40$ кВ, $I = 30$ мА.

Анализ состава микрочастиц и микроструктурированных объектов проведен методом Рамановской спектроскопии. Для этого использовался Раман-микроскоп РамМикс М532[®], совмещающий возможности Раман-анализатора EnSpectr R532[®] Scientific Edition и микроскопа Olympus CX-41.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Структурные исследования

Анализ структуры поверхности образцов, взятых с различных участков катода на плоскости Гар D, показал неравномерность протекания процессов радиационного старения. На рис. 2а, вверху, показан скан поверхности контрольного образца – плоскость Гар А. Далее на рис. 2б, 2в показаны сканы БМЭ-образцов № 2 и № 3 – плоскости Гар D. Поверхность контрольного образца имеет слабо структурированный волокни-

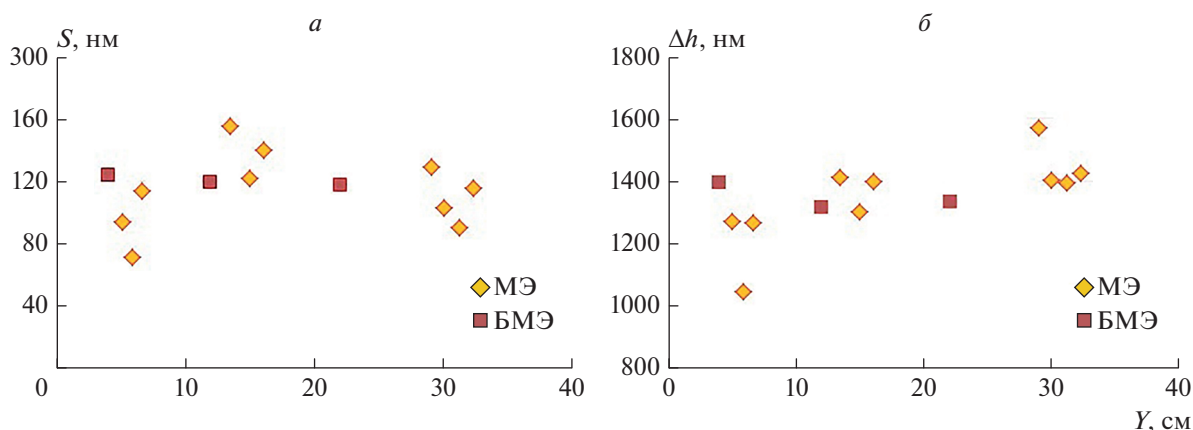


Рис. 3. Распределение шероховатости S (а) и высоты пиков Δh (б) на поверхности МЭ-образцов (◆) и БМЭ-образцов (■) вдоль осей Y , расположенных, как в зоне спонтанных токов, так и вне ее.

стый рельеф с зонами разупорядоченности (технологические дефекты) и единичными пиками. Первичные дефекты наиболее вероятно образуются на катоде при склейке медной фольги со стеклопластиком в процессе производства.

Помимо радиационного воздействия, поверхность образцов БМЭ и МЭ подвергалась воздействию продуктов диссоциативной ионизации молекул газовой смеси — радикалов O^* , F^* , CF_n^* , CO^* ($*$ — количество непарных электронов на внешней оболочке), которая происходит в МПК у анодных проволочек [7]. В результате, на катодах сформировался иной, по сравнению с контрольным образцом, морфологический тип поверхности — террасные структуры с выделенными ячейками. Как видно на рис. 2б и 2в, помимо образования террасных структур, для БМЭ-образцов характерно появление областей расслоения.

Внизу, на рис. 2г, 2д и 2е, показаны АСМ-сканы МЭ-образцов № 5, № 8 и № 10. Здесь большая часть поверхности подвержена значительной эрозии. Общим для этих образцов являются террасные структуры, подобные тем, что обнаружены у БМЭ-образцов. На рис. 2г, 2д и 2е они выделены белыми овалами. Изменения морфологии поверхности МЭ-образцов обусловлены такими радиационными дефектами, как блистеры, кратеры, а также мелкодисперсные структуры, характерные для оксида меди Cu_2O . На рис. 2г и 2д эти структуры хорошо видны. Здесь на поверхности присутствуют вспенивание, вызванное множеством мелких блистеров (рис. 2г), и кратерообразование (рис. 2д) без зон оплавления.

Зоны структурно-фазовых переходов — окисления и оплавления хорошо видны на рис. 2е. Наблюдаемый эффект сглаживания из-за оплавления распределен по всей площади изображения 30×30 мкм, что, по-видимому, вызвано термическим воздействием токов эмиссии высокой плот-

ности на медную фольгу катода. Оплавление поверхности может происходить в медной фольге также и вдоль траекторий быстрых заряженных частиц, вызывающих каскады и субкаскады движущихся вакансий и межузельных атомов. Однако, подобные эффекты при сравнительно малой интенсивности облучения ($R \sim 350$ Гц · см⁻²) должны носить точно локализованный характер [8].

Вместе с тем, из-за абсорбции медью из газовой смеси молекул, содержащих кислород, углерод и фтор, на поверхности катода происходит рост островков диэлектрического оксида Si_2O [2, 6] и формирование нанокремниевых и фторокремниевых пленок [9–11]. Для подобных образований в электрическом поле возможна точечная эмиссия электронов, способная разогреть поверхность до температуры плавления. Неоднородность распределения точек эмиссии на катоде может быть вызвана турбулентностью газового потока в узком (5 мм) зазоре МПК вблизи входа и выхода газовой смеси [2].

На рис. 3 приведены результаты анализа основных характеристик поверхности образцов: шероховатости (S , нм) и перепадов высоты пиков (Δh , нм). Данные для четырех МЭ-образцов и трех БМЭ-образцов представлены в зависимости от их координат вдоль оси Y . Причем, на МЭ-образцах № 7, № 9 и № 10 ($Y \approx 6$ см, $Y \approx 15$ см и $Y \approx 32$ см, соответственно) поверхность исследована в нескольких точках.

На контрольном образце величина шероховатости составила $S \sim 90 - 100$ нм, а разброс высот пиков в разных точках составил $\Delta h \sim 1100 - 1200$ нм, что довольно близко к значениям этих величин на рис. 3. Здесь, на поверхности Гар D, в зонах с эмиссией и без эмиссии электронов, неровность поверхности по сравнению с контрольным образцом выше: шероховатость колеблется в диапазоне

$S \sim 100\text{--}140$ нм, а разброс высот пиков $\Delta h \sim 1300\text{--}1450$ нм. По-видимому, это следствие плазмо-химического и радиационного воздействия на медную фольгу, которое обычно приводит к окислению на границах кристаллитов и выносу материала с поверхности [4].

Заметное сглаживание поверхности произошло только в образце МЭ_№ 7 (рис. 1, $Y \sim 6$ см), где шероховатость и высота пиков уменьшились точно до $S \sim 70\text{--}100$ нм и $\Delta h \sim 1000\text{--}1250$ нм и стали сопоставимы с контрольным образцом. По-видимому, именно в области, где был взят образец МЭ_№ 7, происходила эмиссия электронов, вызвавшая локальный разогрев фольги до температуры плавления и выгорание пиков, сформированных радиационной эрозией [9, 10]. Подтверждением этого предположения стал анализ в зоне образования пор образца МЭ_№ 7. Оценка количества пор (n) на двух полях (30×30 мкм) АСМ-сканирования различается в образце почти вдвое, возрастая с $n = 768$ до $n = 1327$. Это говорит о высокой неоднородности эрозии поверхности по механизму блистеринга. В поле с наиболее интенсивным порообразованием АСМ-сканирование показало формирование губчатой поверхности, где дальнейшее образование блистеров уже не возможно [12].

В ходе исследований при помощи АСМ были выявлены новые для газоразрядных детекторов структурные эффекты, которые могут быть источником спонтанной эмиссии электронов в МПК. Оказалось, что во впадинах и межструктурных пространствах медной фольги МЭ-образцов образуются наноразмерные углеродные пленки. На рис. 4, сверху, представлен фрагмент АСМ-изображения МЭ_образца № 8 с графитоподобной пленкой толщиной ~ 20 нм. Пленка расположена во впадине на поверхности и имеет характерную структуру, схожую с изображением нанографитных пленок, полученных в лабораторных условиях методом конденсации углерода из газовой фазы [10]. Внизу, на рис. 4, представлена вольт-амперная (ВАХ) характеристика, снятая в области образования нанографитной пленки. Красные точки – ВАХ при нарастании напряжения (U) от -10 до $+10$ В. Синие точки – ВАХ при понижении напряжения от $+10$ до -10 В. Наблюдаемый гистерезис тока демонстрирует механизм резистивных переключений, типичный для многих наноуглеродных образований. Пороговая величина напряженности поля для эмиссии электронов в подобных структурах составляет $E_f \sim 10$ кВ \cdot см $^{-1}$ [13, 14].

В отличие от лабораторных экспериментов формирование наноуглеродной пленки на медной фольге катода МПК происходит неконтролируемо. Процесс происходит при атмосферном давлении в газовой смеси Ar/CO $_2$ /CF $_4$, при дли-

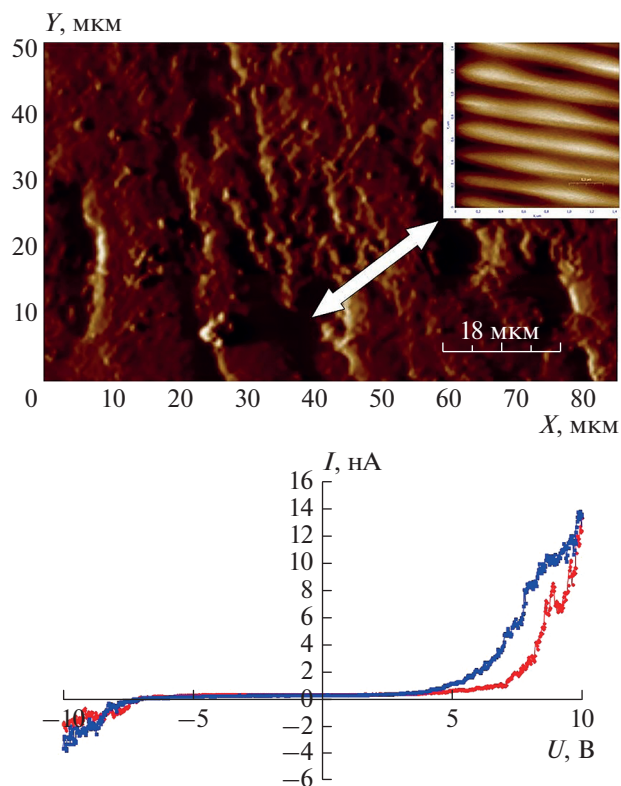


Рис. 4. Вверху: АСМ-скан МЭ_8, размер поля 90×90 мкм, вставка размер 1.5×1.5 мкм. Внизу: вольт-амперная (ВАХ) характеристика, снятая в области нанографитной пленки. Красные точки – ВАХ при нарастании напряжения (U) от -10 до $+10$ В. Синие точки – ВАХ при понижении напряжения от $+10$ до -10 В.

тельном радиационном воздействии и плазмохимических реакциях с медью в электрическом поле МПК ($E_{\text{катод}} \approx 5$ кВ \cdot см $^{-1}$) активных радикалов и ионов – продуктов диссоциации CO $_2$ и CF $_4$. На АСМ-сканах зоны с наноуглеродной пленкой наиболее часто встречаются у стенок кратеров.

Итак, структурный анализ образцов катода МПК показал, что для БМЭ-образцов характерна ячеистая структура с локальными зонами эрозии. В МЭ-образцах радиационная эрозия проявляется сильнее. Эти образцы структурно неоднородны, их поверхность сглажена в результате оплавления, здесь наблюдаются каскады мелких кратеров (рис. 2д), хорошо видны пористые зоны со множеством мелких пиков и блистеров. Именно на границах сглаженных участков с рыхлыми, дефектными областями и во впадинах между микроволокнами в МЭ-образцах обнаружены наноразмерные углеродные пленки. Наблюдаемые морфологические типы поверхности обусловлены структурно-фазовыми превращениями и термическими процессами, которые происходят на поверхности катода, как под действием заряжен-

ных частиц, так и в точечных зонах эмиссии электронов [10].

Элементно-фазовый состав поверхностного слоя

Послойный анализ интегральных спектров обратного резерфордского рассеяния — RBS был выполнен для всех типов образцов на площадках 300×300 мкм. Измеренная глубина проникновения кислорода и углерода в образцах не превысила 2 мкм. Содержание кислорода в приповерхностном слое (≤ 0.4 мкм) оказалось сопоставимым как у МЭ-образцов — 70%, так и у БМЭ-образцов — 80%. Зато содержание углерода у МЭ-образцов — 15% оказалось в три раза больше, чем у БМЭ-образцов — 5%. Повышенное содержание углерода на поверхности МЭ-образцов служит хорошим объяснением появления на них графитоподобных пленочных образований (рис. 4).

Еще одним важным различием образцов оказалось наличие фтора. В RBS-спектрах МЭ-образцов, благодаря высокой чувствительности метода, помимо углерода и кислорода удалось выявить присутствие фтора на уровне 5%. Поэтому можно предположить наличие на поверхности катода структур, содержащих фтор-углеродные соединения CF_n .

Рентгено-фазовый анализ образцов катода также подтвердил, что основными фазами в образцах БМЭ и МЭ являются медь и ее оксид Cu_2O . Дифрактограммы МЭ и БМЭ образцов оказались, практически, не различимы. Образцы, прошедшие радиационное и плазмохимическое воздействие в детекторе, отличаются от контрольного образца присутствием окислов меди.

Результаты исследования образцов методом Рамановской спектроскопии оказались в хорошем согласии с рентгенофазовым анализом. По всей анализируемой поверхности МЭ и БМЭ образцов выявлено явное присутствие оксидной фазы Cu_2O , а также углеродных образований. Это объясняется последовательным продувом газовой смеси через все четыре плоскости МПК. В результате газовый поток перераспределяет активные радикалы в рабочем объеме МПК по всем катодным поверхностям [2].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Присутствие фазы оксида Cu_2O на поверхности катода в МПК мюонного детектора ЛНСб находится в согласии с результатами исследований прототипов детектора. Так в работе [4] после лабораторных ресурсных испытаний прототипов МПК с газовой смесью $Ag/CO_2/CF_4$ также было установлено, что основной фазой поверхностных слоев образцов катода является Cu_2O .

Оксид меди является полупроводником p -типа, как все полупроводниковые материалы, он чувствителен к наличию дефектов и микропримесей. Их присутствие приводит к возникновению локальных энергетических уровней в запрещенной зоне и изменению таких параметров, проводимости, как концентрация носителей и подвижности. Наличие микрогранул оксида Cu_2O на поверхности катода в электрическом поле МПК пороговой напряженностью $E_t \geq 50$ кВ · см⁻¹, может быть причиной возникновения множества центров эмиссии электронов и фотонов с длиной волны $\lambda \approx 600$ нм [6]. Но из-за поглощения электронов в материале катода уже на глубине ~ 1 мкм эмиссия электронов в газовый объем детектора становится невозможна. Из опыта наблюдения МЭ в газоразрядных детекторах известно, что для появления токов эмиссии толщина диэлектрика на поверхности катода не должна превышать нескольких десятков нанометров [7]. То есть, спонтанные токи в МПК возможны из-за гранул Cu_2O , только если они образовались на поверхности катода в виде микропиков с аспектным фактором (отношение высоты к диаметру острия) электрического поля на катоде ($E_{\text{катод}} \approx 5$ кВ · см⁻¹) больше 10. Ток электронов через подобный микрообъект приводит к нагреву до температуры плавления ($T_{Cu_2O} = 1235^\circ C$). В результате с изменением электрохимических свойств материала эмиссия электронов прекратится.

Следующим возможным механизмом возникновения МЭ является эмиссия электронов нанографитными структурами. Полученные результаты демонстрируют конденсацию на катоде МПК углеродосодержащих и фторсодержащих молекул, образованных в газоразрядной плазме у анодной проволоочки. Примером таких структур являются нанографитные пленки, образующие кристаллиты высотой 1–2 мкм. Из-за малых толщин аспектные отношения этих структур могут достигать 1000. Пороговое значение поля для эмиссии электронов нанографитными пленками составляет $E_t \sim 10$ кВ · см⁻¹. Такая напряженность поля легко достижима в зонах радиационных повреждений на катоде МПК [9–11, 13].

Присутствие фтора ($\sim 5\%$) на поверхности катода, где находится и нанографит, может привести к формированию диэлектрических фторуглеродных соединений, которые являются стабильным источником эмиссионных токов [14]. Наблюдаемые в МПК наноструктуры трудно однозначно отнести к одной из многих моделей механизма низкороговой эмиссии. Однако для установления причин МЭ в МПК важно, что, практически, все эти наноструктуры характеризуются явлением эмиссии электронов [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые поверхность катода МПК, после радиационного облучения в эксперименте ЛНСб на БАК, подвергнута комплексному исследованию для установления причин появления спонтанных самоподдерживающихся токов в детекторе. Методами АСМ, микрозонда, рентгеновской дифрактометрии и Рамановской спектроскопии на медной фольге катода обнаружены радиационная эрозия, сопровождаемая образованием оксида меди — Cu_2O , а также наноразмерных углеродных и фторуглеродных структур высокой резистивности.

Характерной особенностью углеродных и фторуглеродных наноструктур является низкопороговая эмиссия электронов. Величина порога напряженности электрического поля для наноструктур ($E_f \sim 10 \text{ кВ} \cdot \text{см}^{-1}$) в пять раз меньше, чем у Cu_2O , и в условиях радиационных повреждений меди она достижима на катоде. На этом основании углеродные и фторуглеродные наноструктуры выглядят наиболее реальным источником спонтанных токов в МПК.

Авторы благодарны сотрудникам ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров) за помощь в проведении исследований. При их активном участии был проведен весь комплекс исследований образцов. Мы также признательны за обсуждение материалов статьи ведущему научному сотруднику ФБГУ «ПИЯФ» К.Н. Ермакову. Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г. (внутренний номер 15.СИН.21.0021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malter L.* // Phys. Rev. 1936. V. 50. P. 48.
2. *Albicocco F.P., Anderlini L., Anelli M. et al.* // JINST. 2019. V. 14. Art. No. P11031.
3. *Pfeiffer D., Gorine G., Reithler H. et al.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2017. V. 866. P. 91.
4. *Бузоверя М.Э., Гаврилов Г.Е., Маев О.Е.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. №2. С. 365; *Buzoverya M.E., Gavrilov G.E., Maev O.E.* // Tech. Phys. 2021. V. 66. No. 2. P. 356.
5. *Zhou G., Wang L., Yang J.C.* // J. Appl. Phys. 2005. V. 97. Art. No. 063509.
6. *Hurley R.E.* // J. Phys. D. 1979. V. 10. Art. No. L195.
7. *Vávra J.* // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 2003. V. 515. P. 1.
8. *Акатьев В.А., Метелкин Е.В.* // Атомн. энерг. 2015. Т. 118. № 2. С. 105.
9. *Obraztsov A.N., Zakhidov A.I.* // Diamond Rel. Mat. 2004. V. 13. P. 1044.
10. *Obraztsov A.N., Kleshch V.I.* // J. Nanoelectron. Optoelectron. 2009. V. 4. P. 207.
11. *Елецкий А.В.* // УФН. 2002. Т. 172. № 4. С. 401.
12. *Гусева М.И., Мартыненко Ю.В.* // УФН. 1981. Т. 135. № 4. С. 671.
13. *Obraztsov A.N., Zolotukhin A.A., Ustinov A.O.* // Carbon. 2003. V. 41. No. 4. P. 836.
14. *Иванов А.И., Небогатикова Н.А., Куркина И.И., Антонова И.В.* // ФТП. 2017. Т. 51. № 10. С. 1357.
15. *Алешин А.Н., Белорус А.О., Врублевский И.А. и др.* Наночастицы, наносистемы и их применение. Сенсорика, энергетика, диагностика. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 273 с.

Complex estimation of cathode surface state of the proportional chamber after work in experiment at the Large Hadron Collider

G. E. Gavrilov^{a,*}, M. E. Buzoverya^b, I. A. Karpov^b, M. V. Tatsenko^b, M. V. Tkachenko^b, A. A. Dzyuba^a, O. E. Maev^a, P. V. Seredin^c, D. L. Goloshchapov^c

^a *Konstantinov Petersburg Nuclear Physics Institute of National Research Center Kurchatov Institute, Gatchina, 188350 Russia*

^b *Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, 607189 Russia*

^c *Voronezh State University, Voronezh, 394018 Russia*

*e-mail: gavrilov_ge@npni.nreki.ru

The cathode of a multiwire proportional chamber, that underwent long-term irradiation in the experiment at the LHC, was subjected to the complex study. Information on the structural-phase state of the copper foil on the cathode was obtained by nuclear scanning microscopy, atomic scanning microscopy, Raman spectroscopy, and X-ray phase analysis. In the zone of spontaneous emission of the electrons on the electrode, nanostructured formations of carbon have been found.