

Новый источник спонтанных самоподдерживающихся токов в многопроводочных пропорциональных камерах - опыт БАК

Г.Е. Гаврилов¹, М.Э. Бузоверя², Н. Бегович³ Д.Б. Богданович³, А.А. Дзюба¹, И.А. Карпов²,
О.Е. Маев¹, М.В. Таценко², А. Радулович³

¹ Петербургский институт ядерной физики НИЦ «Курчатовский институт», Гатчина

² Российский Федеральный Ядерный Центр, Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Экспериментальной Физики, Саров

³ Институт общей физико-химии, Белград, Сербия



ПЛАН

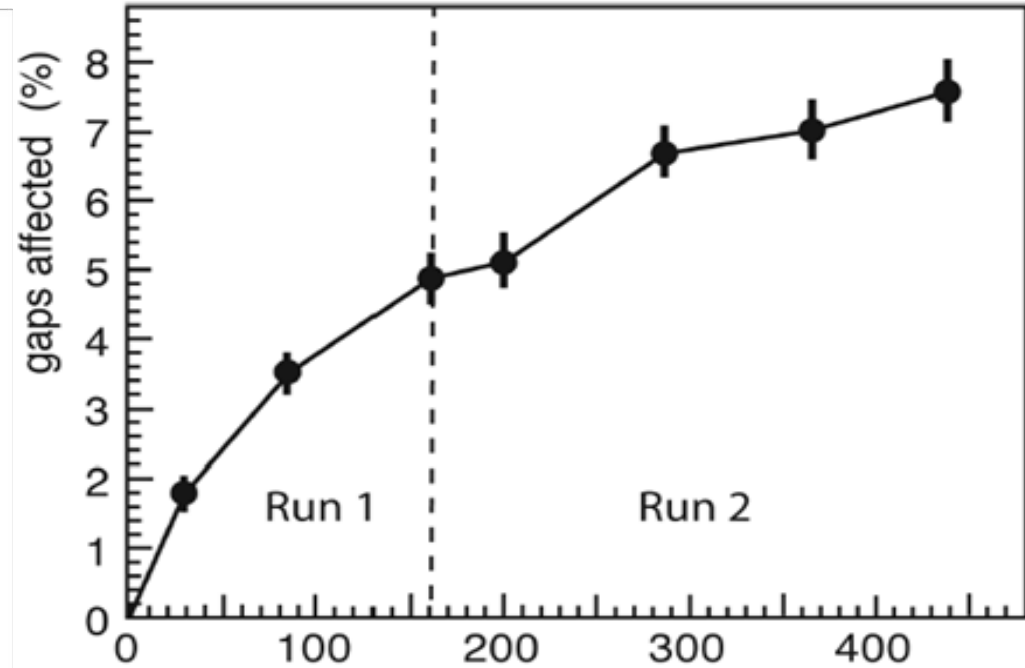
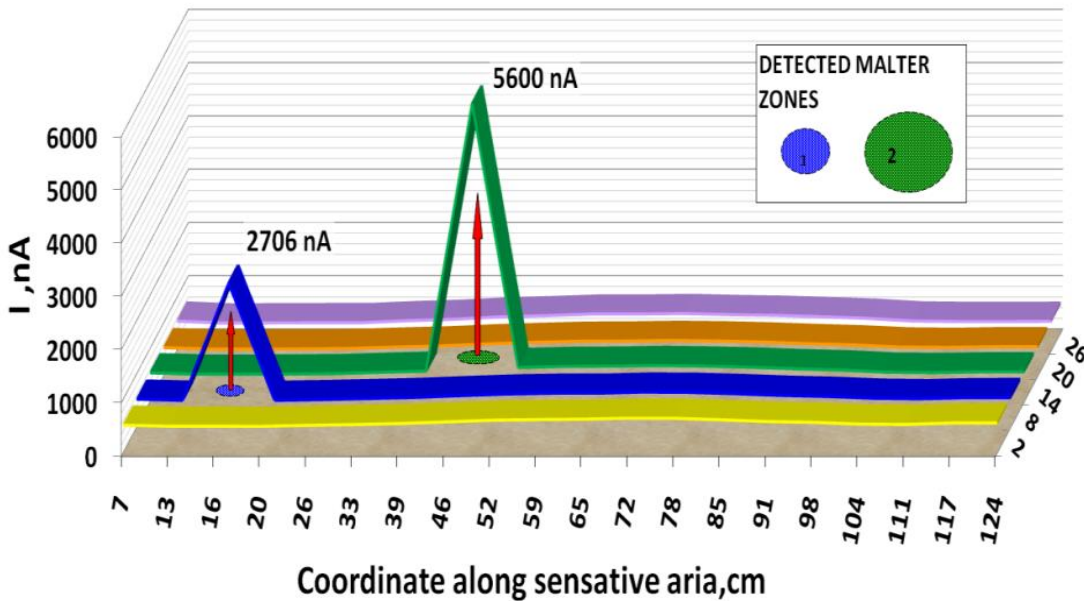
- ❑ Проблемы МПК при работе в радиационных условиях БАК
- ❑ История изучения спонтанных самоподдерживающихся токов в МПК для БАК
- ❑ Поиск источников спонтанных токов в МПК из эксперимента LHCb
- ❑ Результаты исследований катода МПК методами РОР, Рамановской спектроскопии, АСМ (топография, растекание заряда, ВАХ)
- ❑ Заключение



Проблемы работы МПК радиационных условиях БАК

МПК мюонной системы LHCb
(The Large Hadron Collider beauty experiment)

Currents from Sr⁹⁰ along the chamber, GAP A



Зависимость отношения числа МПК, подверженных аварийным скачкам тока, к общему количеству МПК, от длительности работы на пучке БАК за 2010-2018 годы.

F.P. Albicocco, Long-term operation of the multi-wire-proportional-chambers of the LHCb muon system, Journal of Instrumentation (2019), JINST 14 P11031

Мюонная система: 5 станций-слоев из 1368 модулей по четыре МПК с общей площадью 435 m².

Рабочая газовая смесь: **Ar(40%)/CO₂(55%)/CF₄(5%)**

L = 2.5mm, Анод: s = 2mm, Ø 30µm Au+W;

Катод Cu фольга # 35µm

HV ~ 2.7÷2.8 kV → E_{cath} ≈ 5 kV/cm

A Study of Cathode Aging and the Threshold of Autoemission from Cathode Wires in Drift Chambers

V. E. Blinov and V. G. Prisekin

Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
pr. Akademika Lavrent'eva 11, Novosibirsk, 630090 Russia
e-mail: V.E.Blinov@inp.nsk.su
e-mail: V.G.Prisekin@inp.nsk.su

Received May 10, 2011

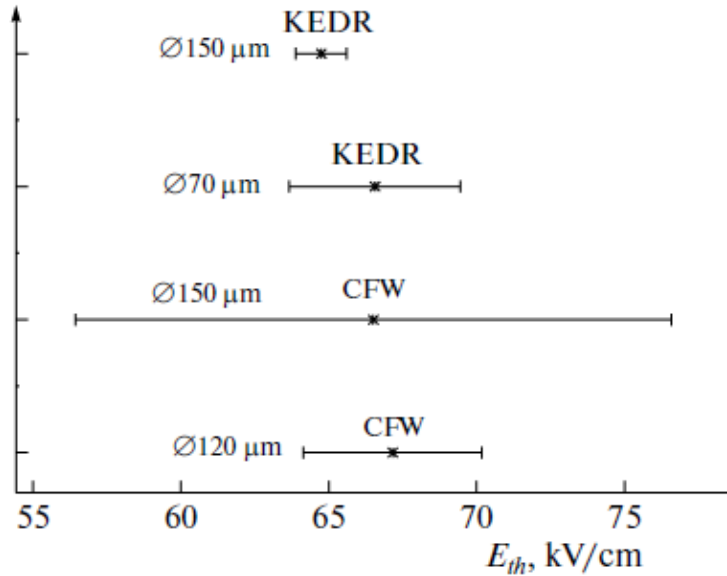


Fig. 16. Measured threshold electric field strengths on the cathode wire surface for different types of wires.



Extension of the operational lifetime of the proportional chambers in the HERMES spectrometer

S. Belostotski^a, S. Frullani^b, G. Gavrilov^{a,*}, O. Miklukho^a, L. Shchipunov^a,
D. Veretennikov^a, V. Vikhrov^a

^aPetersburg Nuclear Physics Institute, Russian Academy of Science, Gatchina, St. Petersburg district 188350, Russia

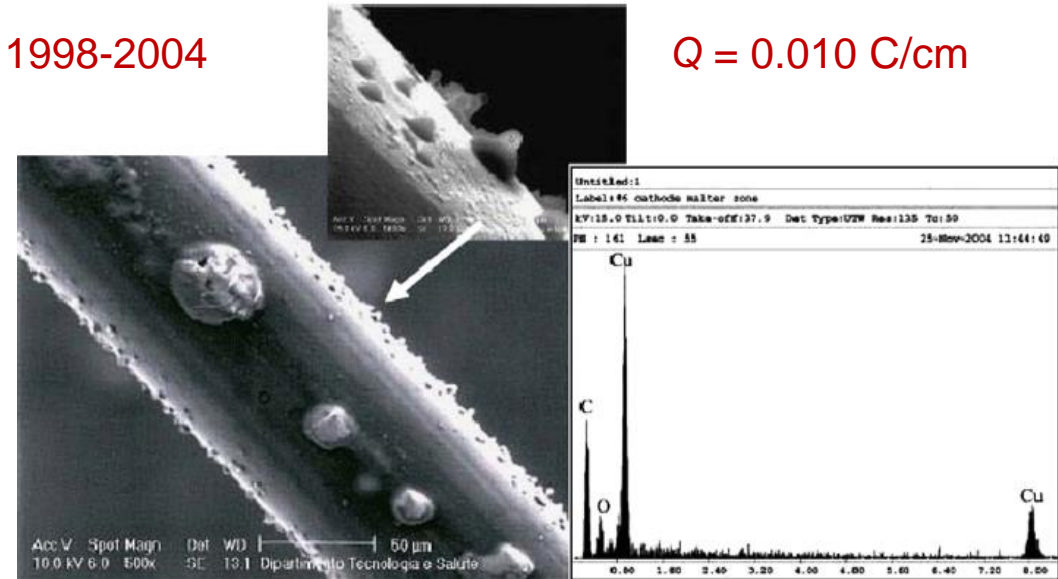
^bPhysics Laboratory, Istituto Superiore di Sanità and INFN Sezione di Roma-gruppo Sanità, viale Regina Elena 299, Rome I-00161, Italy

Received 1 October 2007; received in revised form 1 February 2008; accepted 2 March 2008

Available online 14 March 2008

1998-2004

$Q = 0.010 \text{ C/cm}$



История изучения спонтанных самоподдерживающихся токов в МПК для БАК

токов Мальтера нет !



1998

$Q = 12 \text{ C/cm}$

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 488 (2002) 240–257



Aging studies of CMS muon chamber prototypes

T. Ferguson^a, G. Gavrilov^b, A. Korytov^c, A. Krivchitch^{b,*}, E. Kuznetsova^b,
E. Lobachev^b, G. Mitselmakher^c, L. Schipunov^b



Available online at www.sciencedirect.com



Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 515 (2003) 226–233

1999

$Q = 0.4 \text{ C/cm}$

Aging tests of full-scale CMS muon cathode strip chambers

D. Acosta^a, G. Apollinari^b, K. Arisaka^c, N. Bondar^d, R. Breedon^e, A. Bujak^f,
B. Bylsma^g, N. Chester^h, R. Clareⁱ, D. Cline^c, R. Cousins^c, T. Cox^e, S. Dolinsky^g,
S. Durkin^g, D. Eartly^h, Yu. Ivanov^d, T. Ferguson^g, G. Gavrilov^d, J. Gilmore^g,
J. Gu^g, L. Gutay^f, F. Hannⁱ, R. Hartmut^h, J. Hauser^c, K. He^k, M. Ignatenko^c,
S. Ilie^l, C. Jiang^k, W. Ko^c, A. Korytov^g, A. Krivshich^d, K. Kuznetsova^d, J. Layter^h,
R. Lee^f, P. Levchenko^d, T.Y. Ling^g, D. Loveless^l, S. Lusin^c, K. Maeshima^b,
A. Madorsky^a, C. Matthey^c, M. Matveev^m, M. von der Mey^c, G. Mitselmakher^a,
S. Otwinowski^c, P. Padley^m, I. Pal^f, Yu. Pischalnikov^c, O. Prokofiev^{b,*},
V. Razmyslovich^d, D. Reeder^l, J. Roberts^m, L. Schipunov^d, I. Smirnov^d,
V. Souvorov^d, J. Stasko^a, H. Sun^k, V. Sytnik^h, N. Terentyev^l, M. Tripathi^c,
S. Vavilov^d, S. Volkov^c, A. Vorobyov^d, I. Vorobyov^l, L. Wang^k, V. Yarba^b,
L. Zhou^k, Z. Zhu^k

ISSN 1062-8738, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2020, Vol. 84, No. 10, pp. 1280–1285. © Allerton Press, Inc., 2020.
Russian Text © The Author(s), 2020, published in Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk, Seriya Fizicheskaya, 2020, Vol. 84, No. 10, pp. 1488–1494.

2015-2018

Microstructural Analysis of Cathode Strip Chamber Samples after Lifetime Tests

G. E. Gavrilov^{a,*}, M. E. Buzoverya^b, A. A. Dzyuba^a, and I. A. Karpov^a

^aPetersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center “Kurchatov Institute,”
Gatchina, Leningrad oblast, 188300 Russia

^bAll-Russian Research Institute of Experimental Physics, Russian Federal Nuclear Center,
Sarov, Nizhny Novgorod oblast, 607188 Russia

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

Received May 11, 2020; revised June 2, 2020; accepted June 26, 2020

$= 0.39 \text{ C/cm}$

$= 1.36 \text{ C/cm}$

токов Мальтера нет !



Available online at www.sciencedirect.com

2004



$Q = 0.25 \text{ C/cm}$

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 535 (2004) 221–225



www.elsevier.com/locate/nima

Time resolution and aging properties of the MWPCs for the LHCb Muon System

Gaia Lanfranchi^{*}, on behalf of the LHCb Muon Group

Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN, Via Enrico Fermi 40, Frascati 00044 (Rome), Italy

Available online 12 August 2004



ISSN 1063-7789, Physics of Atomic Nuclei, 2019, Vol. 82, No. 9, pp. 1273–1280. © Pleiades Publishing, Ltd., 2019.
Russian Text © The Author(s), 2018, published in Yadernaya Fizika i Inzhiniring, 2018, Vol. 9, No. 4, pp. 358–366.

ENGINEERING DESIGN OF NUCLEAR PHYSICS EQUIPMENT

2010-2015

$Q = 0.2 \text{ C/cm}$

Recovery of LHCb Detector Muon Chambers for Malter Effect Elimination

G. E. Gavrilov^{a,*}, O. E. Maev^a, D. A. Maisuzenko^a, and S. A. Nasybulin^a

^aPetersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center Kurchatov Institute,
Gatchina, Leningrad oblast, 188300 Russia

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

Received May 21, 2018; revised May 28, 2018; accepted July 8, 2018

RECOVERY OF LHCb DETECTOR MUON CHAMBERS

I.

ЕСТЬ ток Мальтера

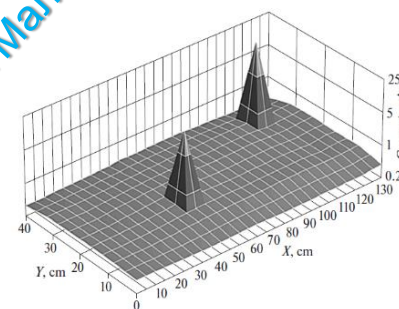
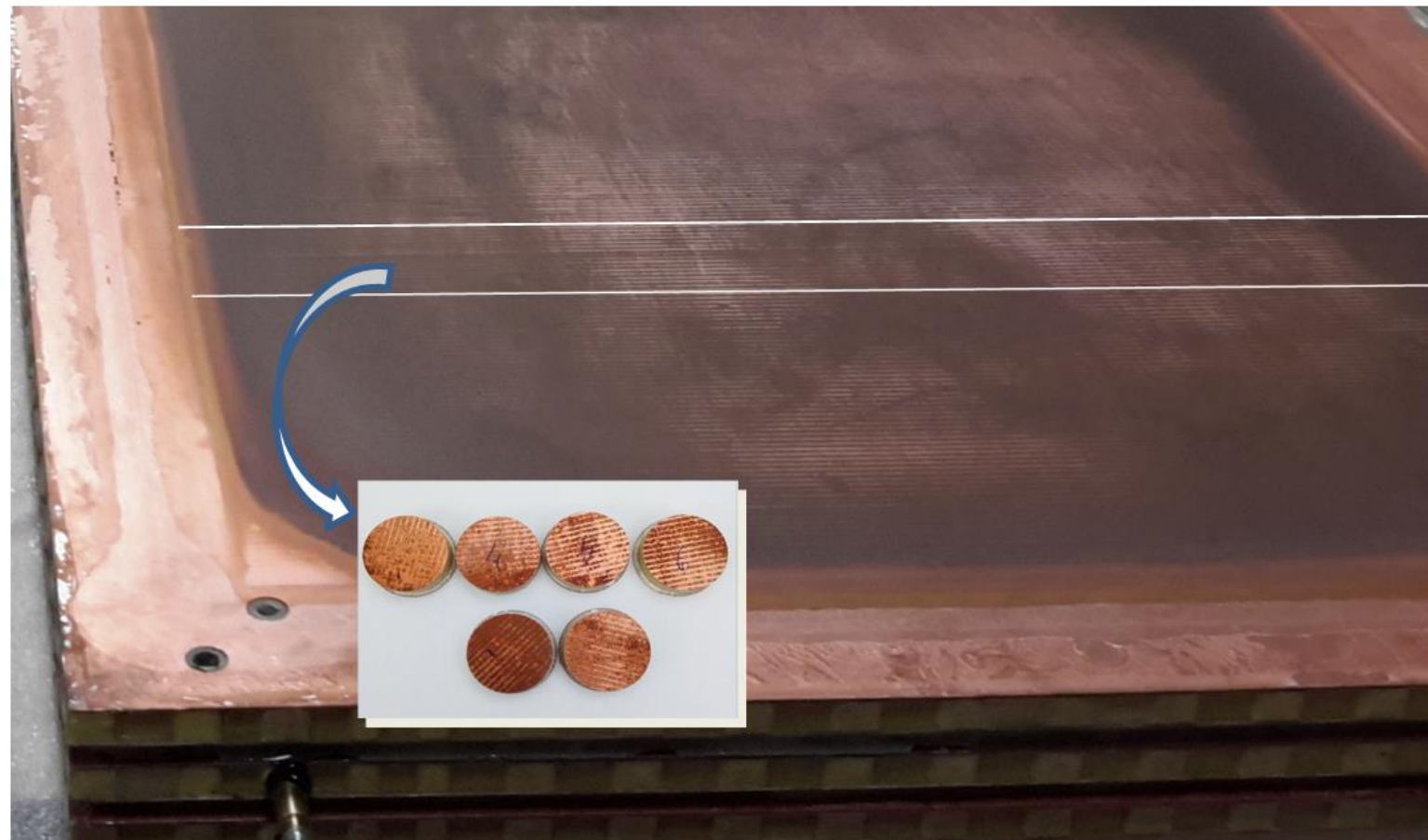


Fig. 4. The distribution of ionization current from the ⁹⁰Sr β-source and Malter currents obtained via scanning the registering MWPC plane.

01.04.2024

Г.Е. Гаврилов, Дубна, 2024



Катодная панель МПК после разборки.

Белые линии – зона, где находится центр эмиссии электронов.

Вставка внизу – снимок образцов катода со следами осадков.

Медная фольга под микроскопом выглядит рыхлой.

→

В электрическом поле у катода $E_{\text{катод}} \sim 5 \text{ кВ см}^{-1}$ на катоде происходит хемоабсорбция диссоциировавших молекул газовой смеси CO_2 , CF_4

→ **вдоль анодных проволочек на катоде образуются полосы осадков**

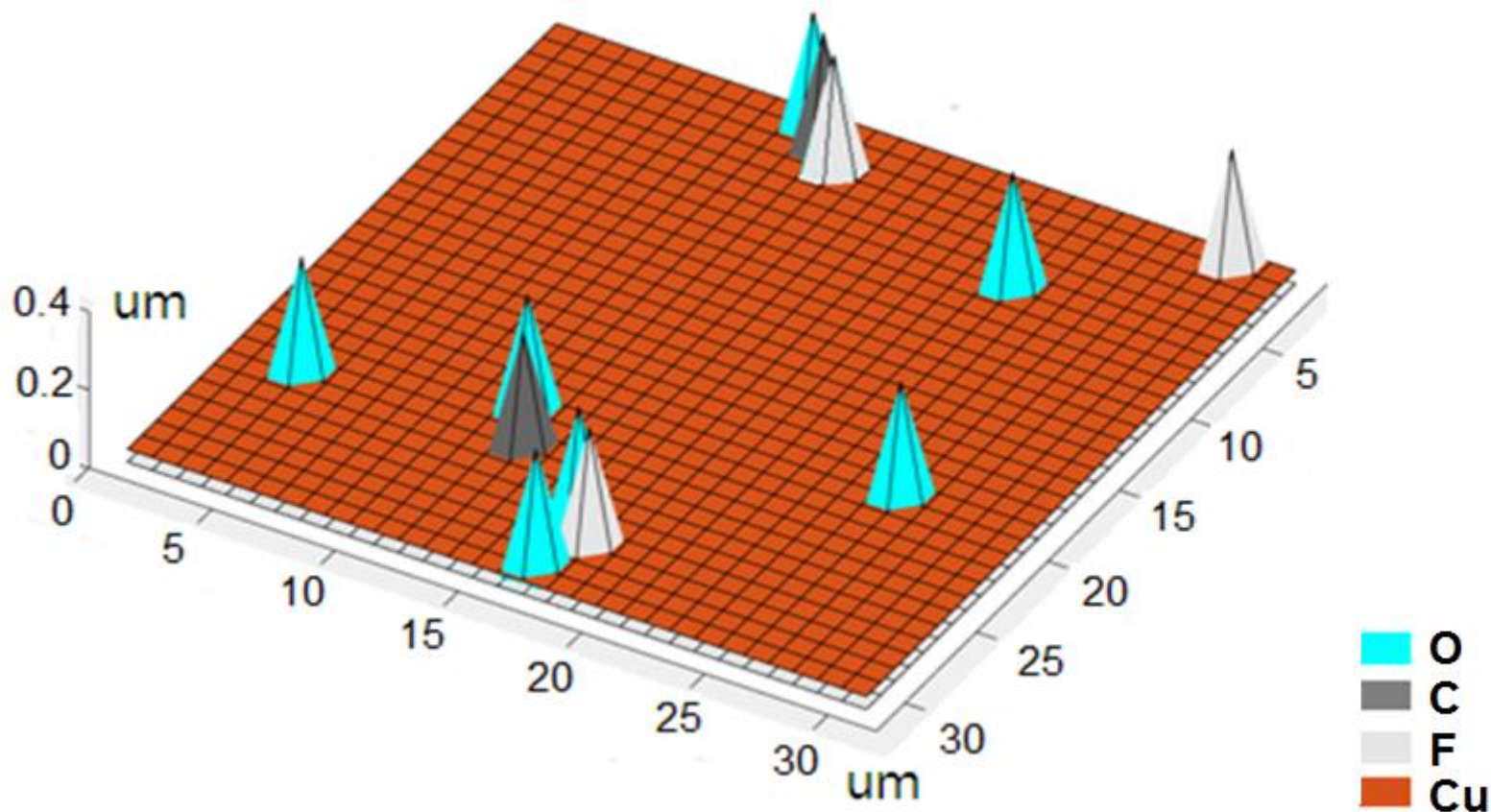
→ → **источник образований – плазмохимия газового разряда на аноде !**

МПК демонтированная из мюонного детектора для исследования причины появления спонтанных токов ! **2018 г**

Г. Е. Гаврилов, М. Э. Бузоверя, И. А. Карпов, М. В. Таценко, М. В. Ткаченко, Известия Российской академии наук. Серия физическая» № 8, том 86, стр 1152-1158, 2022.



RBS элементный анализ по поверхности - картирование



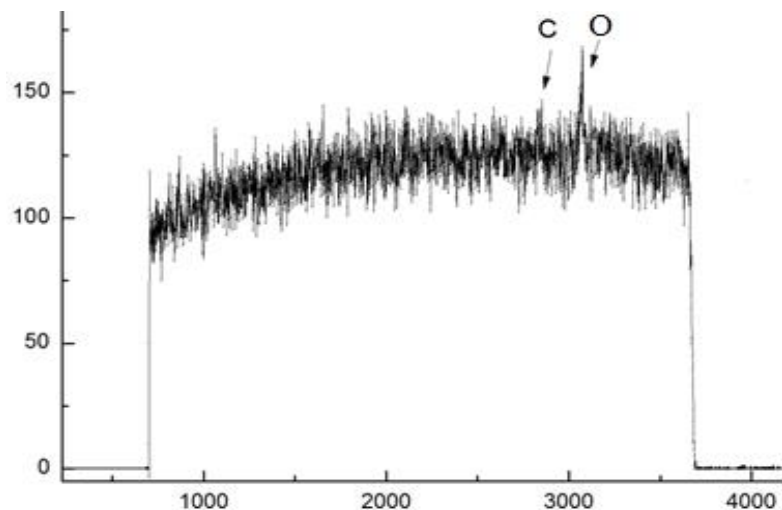
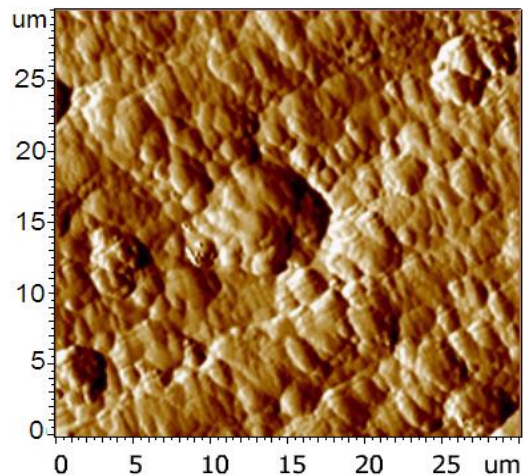
Анализ поверхности катода на установке «Микрозонд» – ЭГП-10 методом RBS (Rutherford backscattering spectroscopy)

Пучок протонов

- энергия 4 МэВ (ток на образце 0.01 нА; размер – 30 × 30 мкм),
- шаг сканирования 5 мкм по поверхности площадью 300 × 300 мкм.

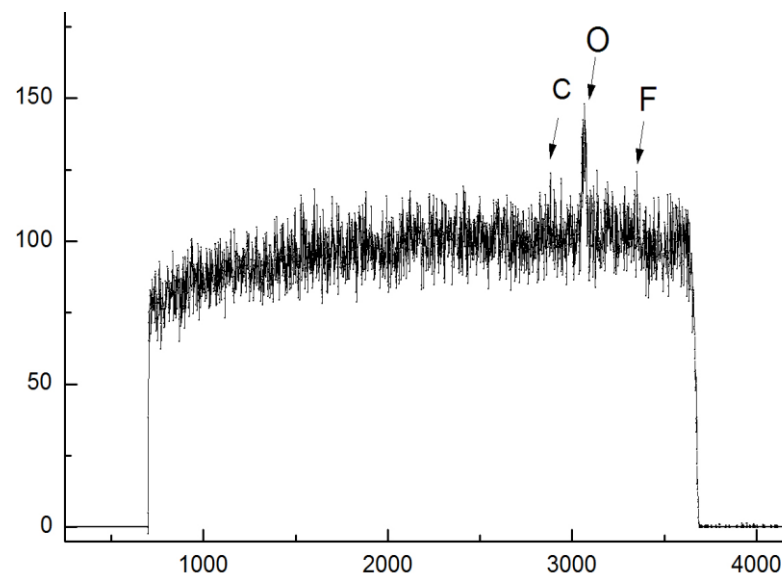
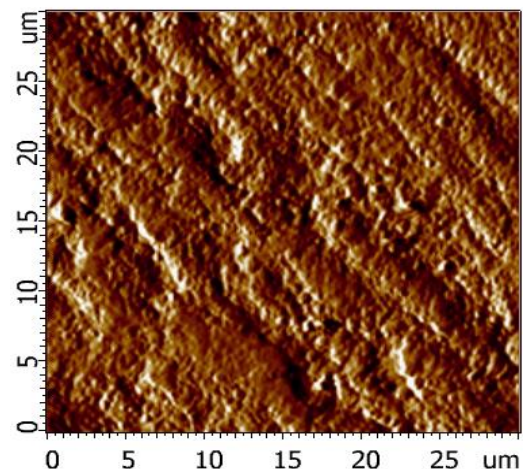


БМЭ - образец



Элемент	1 слой ат. %	2 слой ат. %	3 слой ат. %
Cu	15	25	100
O	80	65	-
C	5	10	-
Толщина, μm	0.2	1.8	23

МЭ - образец



Элемент	1 слой ат. %	2 слой ат. %	3 слой ат. %
Cu	10	30	100
O	70	60	-
C	15	10	-
F	5	-	-
Толщина, μm	0.4	1.6	23

Морфология поверхности образцов исследовалась методом атомно-силовой микроскопии на СЗМ «Solver Next» ОАО «НТ-МДТ» г. Зеленоград в *полуконтактной* моде (tapping-mode) в режиме топографии при нормальных условиях.

Вольт-амперные характеристики были измерены в *контактной* моде режима *токовой спектроскопии* для различных точек на катодных образцах. Все исследования выполнялись токопроводящими зондами NSG10/TiN.

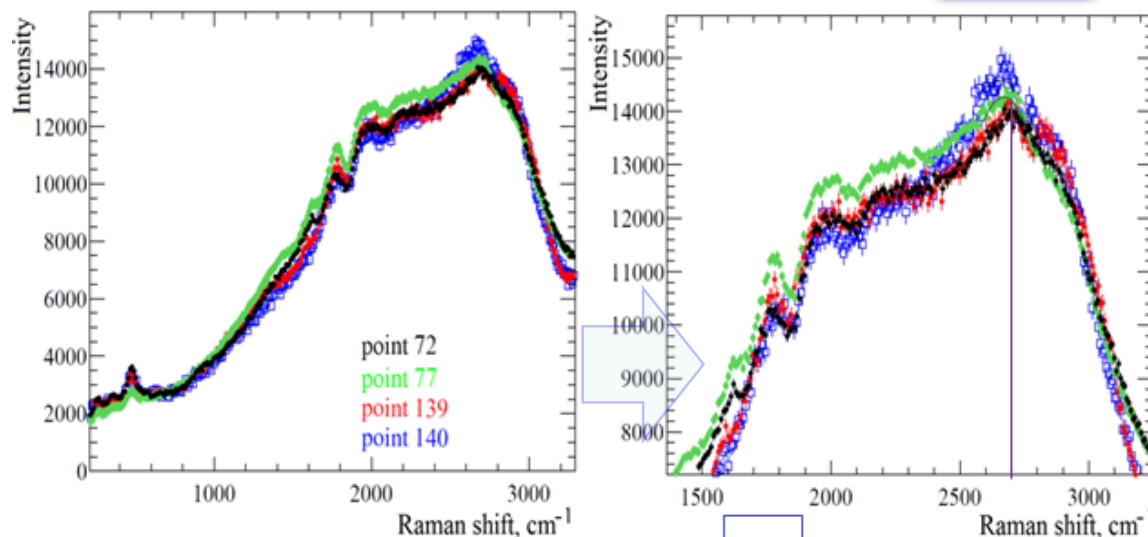


Рамановская спектроскопия поверхности

Вверху слева: диапазон 0-3200 cm^{-1} , спектры в точках, где были обнаружены нанотуглеродные структуры: т.е. возможно наличие эмиссионных центров.

справа: диапазон 1400-3200 cm^{-1} .

Точка анализа	2D - пик
Point 72	2700
Point 77	2644
Point 139	2703
Point 140	2666

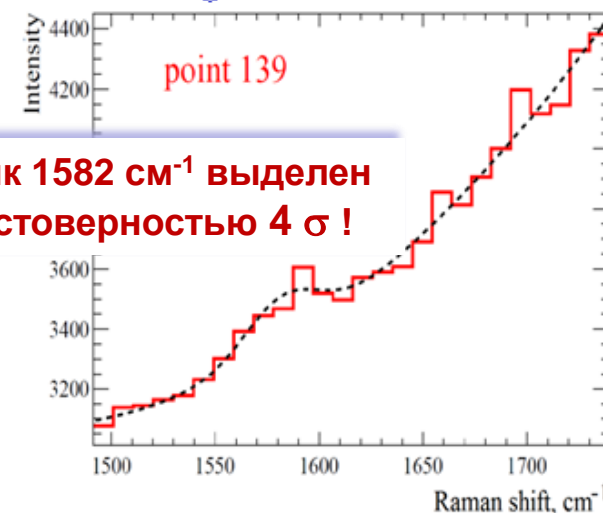


Внизу: диапазон 1500-1800 cm^{-1} , в точке (point 139).

Пики

G – 1580 cm^{-1} и 2D – 2680 cm^{-1} – сигнатура нанотуглеродных образований т.е. возможного центра спонтанной эмиссии электронов

G-пик 1582 cm^{-1} выделен с достоверностью 4 σ !



Рамановский спектральный анализ состава микрочастиц и микроструктурированных объектов на образцах катода выполнен прибором Ntegra-Spectra. Длина волны лазера - 532 нм, мощность 22 мВт.

Ferrari A.C., Meyer J.C., Scardaci V., et al. // Phys. Rev. Lett.. 2006. V.97. P. 187401. doi:10.1103/PhysRevLett.97.187401.

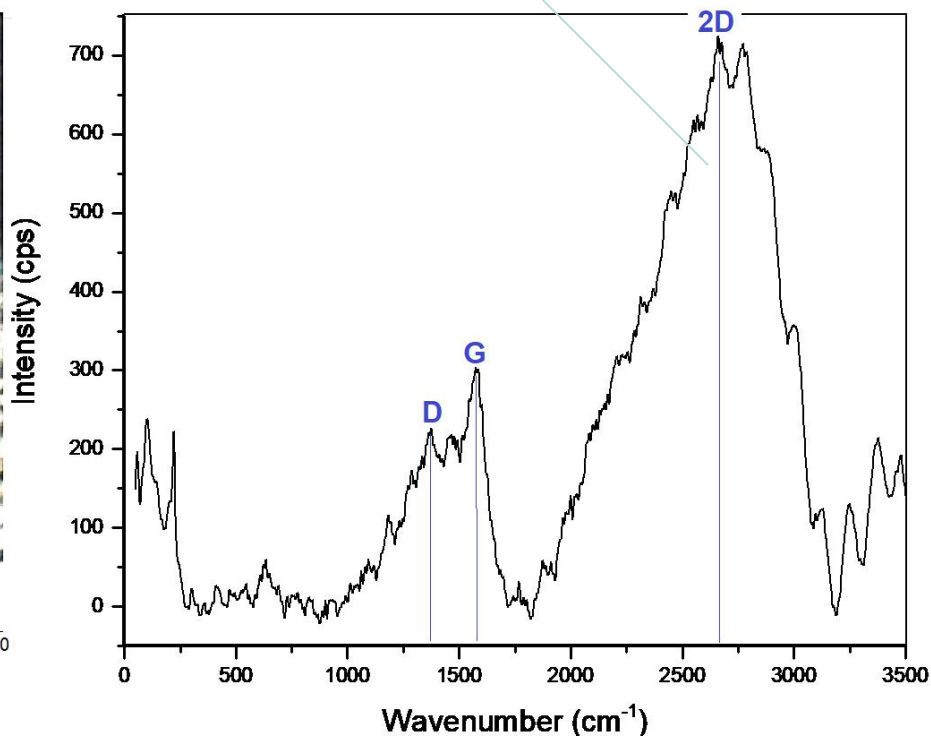


Рамановская спектроскопия поверхности

Рамановские спектры получены с помощью DXR Рамановского микроскопа (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA). Образец облучался диодным лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт, который фокусировался в пятно на поверхности 1.1 μm .

Спектры для подавления люминесцентного фона обработаны при помощи полинома 5-го порядка с использованием встроенного программного пакета Omnic software (OMNIC for Dispersive Raman 9.2.41.)

Увеличение микроскопа $\times 500$. Анализируемая точка 1.1 μm выделены красными кружками.

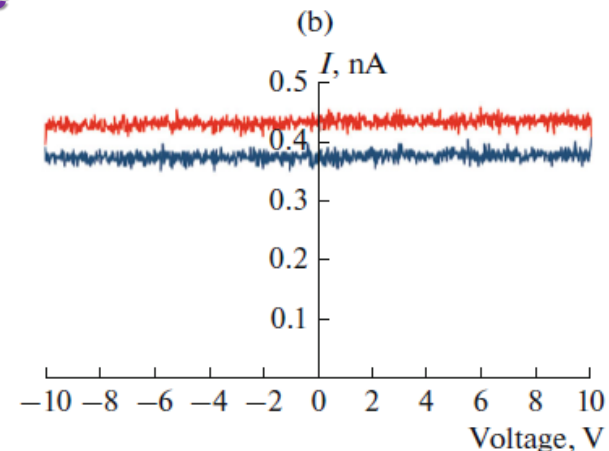
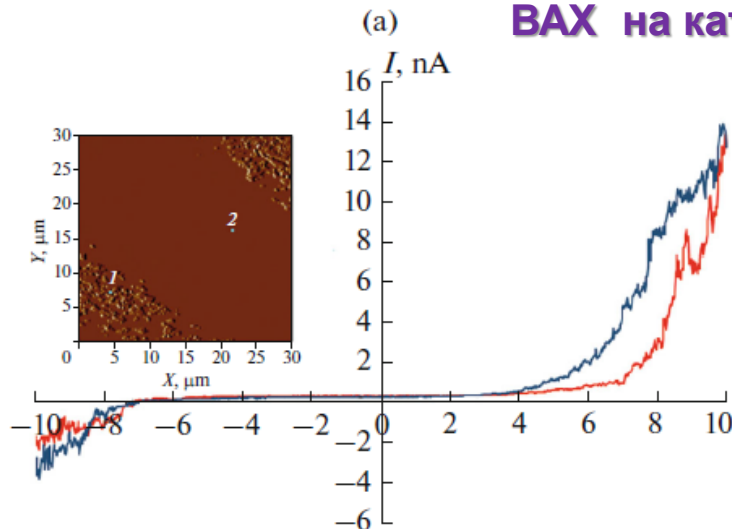
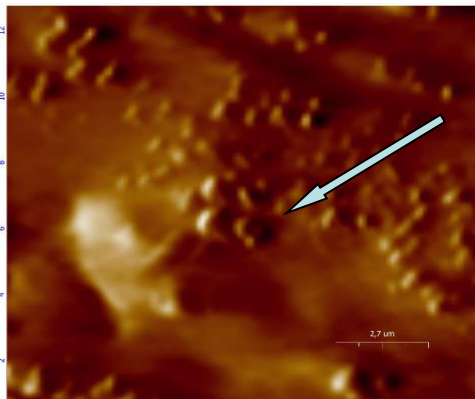


- ❑ На поверхности катода в переходной области присутствуют образования наногرافита или графена
- ❑ Разрешение пиков не позволяет однозначно определить вид образования: графен / графит

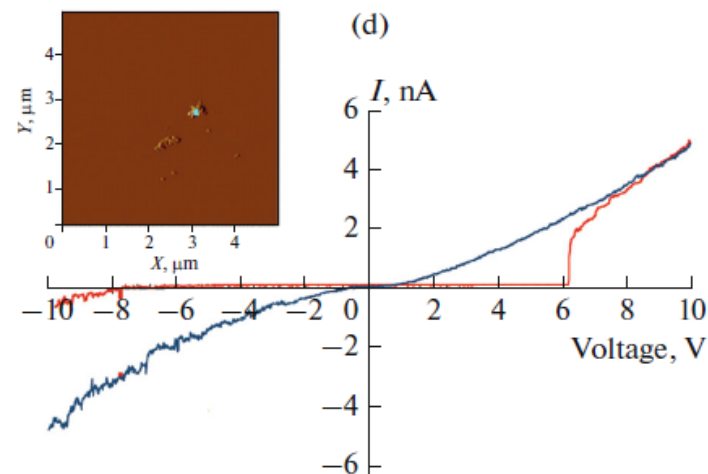
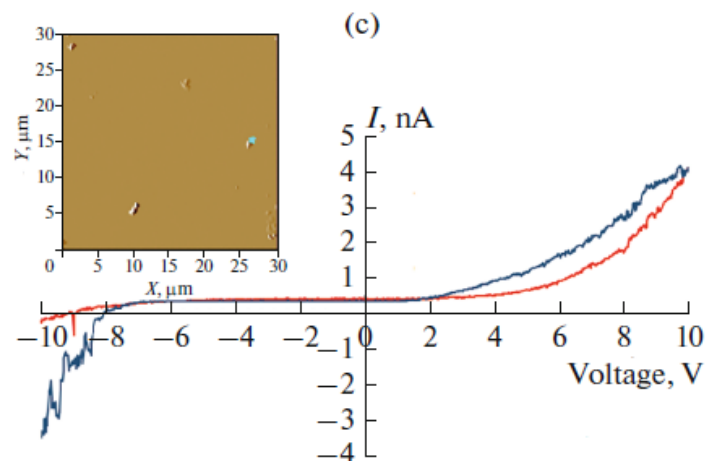
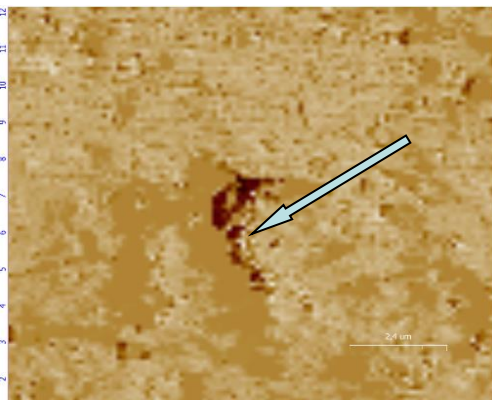
G – 1580 cm^{-1}
2D – 2680 cm^{-1}
D – 1325 cm^{-1}

Корреляция дефектов топографии, фазы, токов растекания и ВАХ на катоде

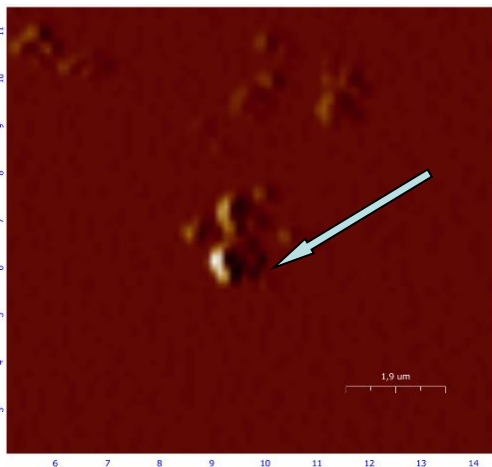
Топография



Фаза



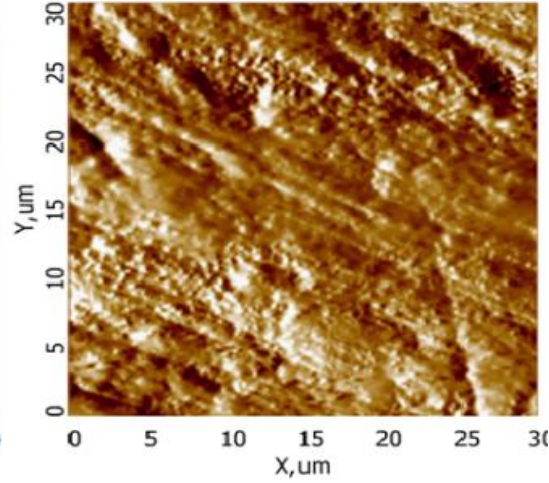
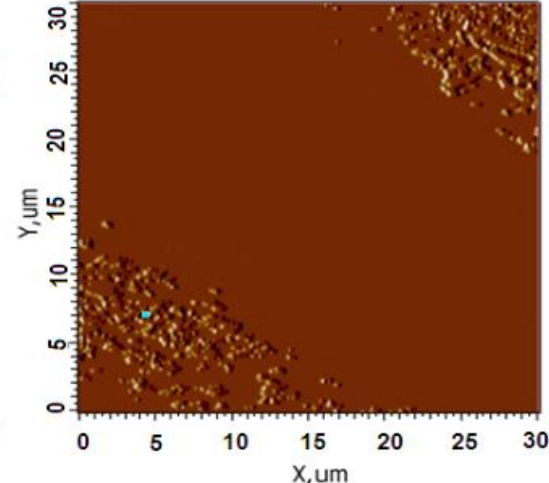
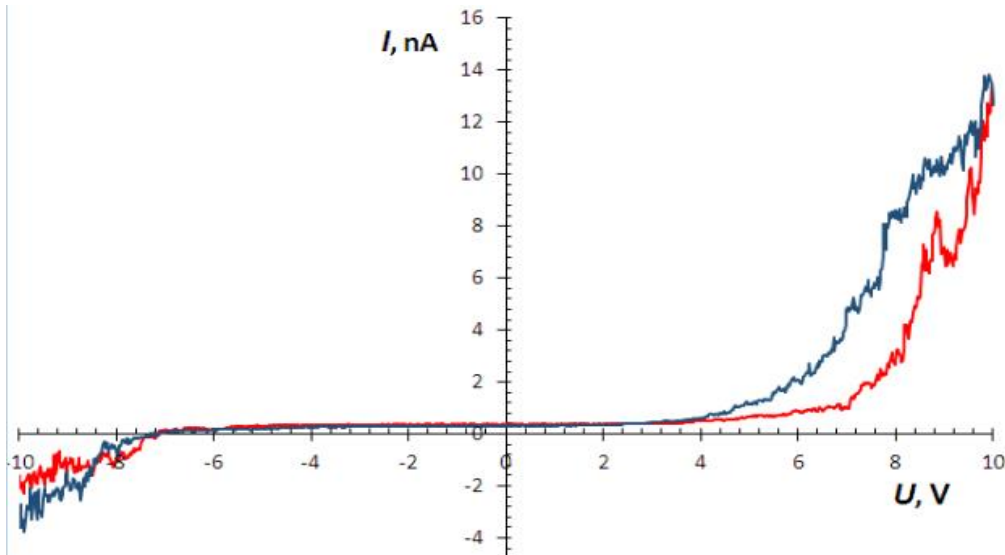
Токи



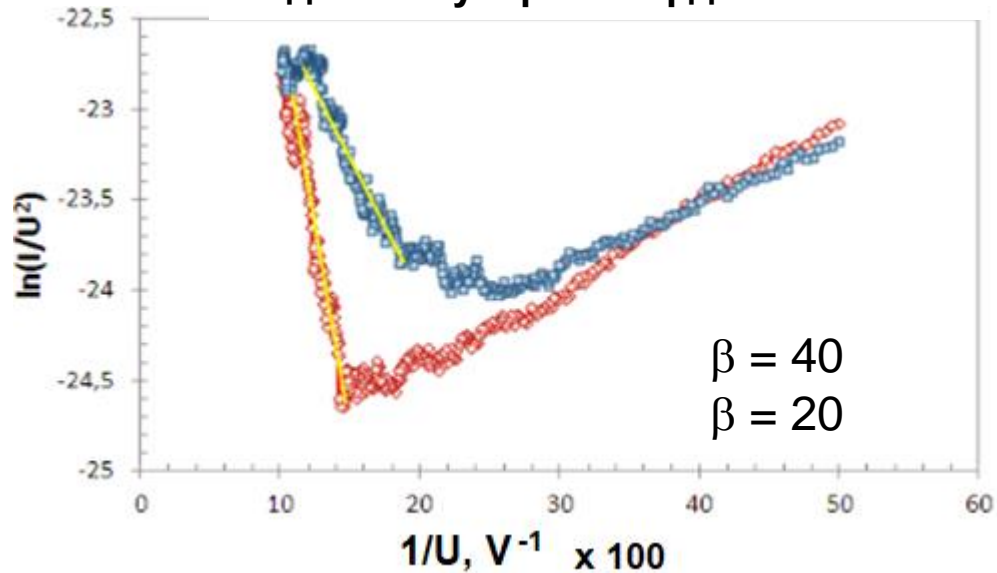
Точка «расщепления» кривых $V \sim 2-4$ V при толщине углеродных соединений $L \approx 2$ μm позволяет оценить поле $E \sim 10 - 20$ kV/cm, когда начинается эмиссия электронов с поверхности. E совпадает с $E_{lab} \sim 1-5$ V/ μm - порогом возникновения низкопороговой эмиссии электронов в эмиттерах, созданных в лабораториях.



Поиск центра эмиссии на поверхности образцов катода МПК

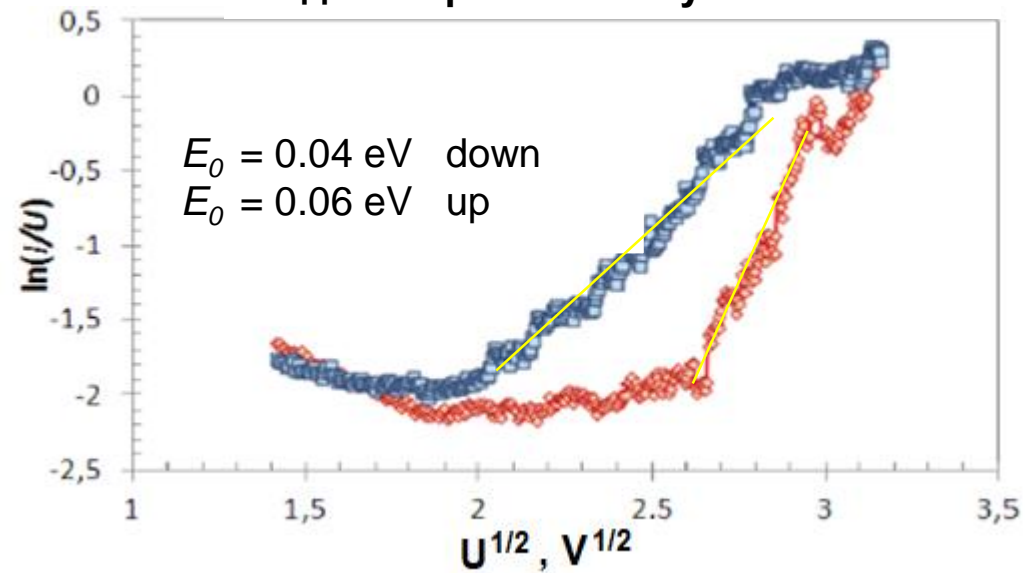


Модель Фаулера – Нордгейма:



β - коэффициент усиления электрического поля

Модель Френкеля – Пула:

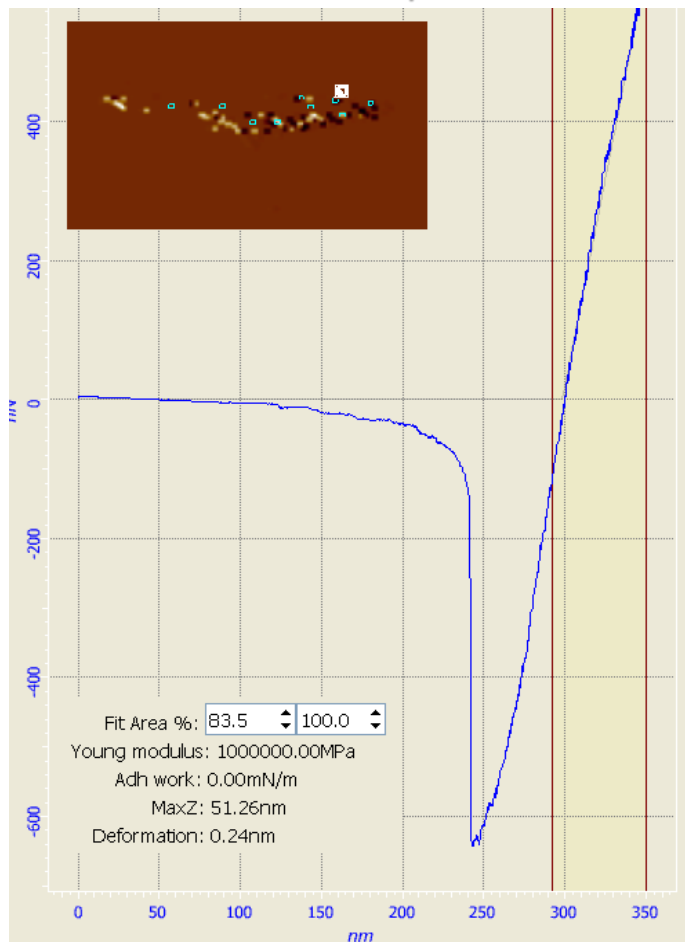


E_0 – энергия активации примесных центров

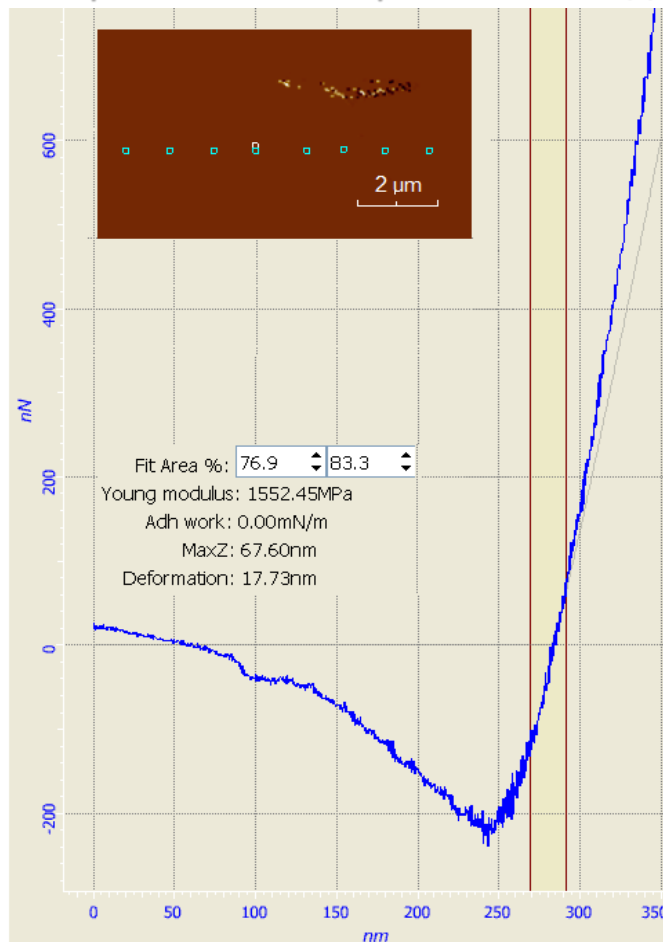


Контактная мода АСМ

Изображения силовых кривых на поверхности катода



Силовая кривая в точке (белый квадрат на вставке), находящейся в области повышенных токов индукции. Модуль Юнга 1.0×10^{12} Pa.



Типичная силовая кривая для точек (синие квадраты на вставке), удаленных от области повышенных токов индукции. Модуль Юнга в точке 1.55×10^9 Pa.

Jin-Wu Jiang // Physical Review B 80, 113405 2009.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.0906.5237>

Заключение

Комплексное исследование образцов катода МПК LHCb показало, что в условиях работы на БАК, новым источником МЭ являются нанокуглеродные структуры sp^2 -гибридизации с примесями sp^3 -гибридизации, сформировавшие на поверхности центры низкопороговой эмиссии электронов. Обнаруженные центры обладают уникальными характеристиками:

- ❑ формируются при комнатной температуре и атмосферном давлении в условиях постоянного радиационного облучения заряженными частицами; величина токов эмиссии в точке на катоде варьируется от 1-5 нА и зависит от рабочего напряжения МПК;
- ❑ появление центров стабильной эмиссии обусловлено длительной работой системы МПК в условиях облучения, поэтому их изучение в лабораторных условиях затруднено;
- ❑ центры эмиссии электронов стабильны в режиме максимальных токов при тренировках МПК, которые длятся от недели до двух месяцев.

Полученные результаты имеют хорошую повторяемость спустя длительные (до 1 года !) промежутки времени между измерениями, что означает хорошую устойчивость спонтанно-образованных эмиссионных нанокуглеродных структур в МПК.



1. Бузоверя М.Э., Завьялов Н.В., Карпов И.А., Ткаченко М.И., Гаврилов Г.Е., Дзюба А.А., Майсузенко Д.А., Насыбулин С.А., Гречкина М.В. «Исследование радиационных повреждений катода в прототипе многопроволочной пропорциональной камеры эксперимента CMS» **Ядерная физика и инжиниринг, 2018, том 9, №4, С.328-339 DOI: 10.1134/S2079562918040036 .**
2. Гаврилов Г.Е., Бузоверя М.Э., Дзюба А.А., Карпов И.А., «Микроструктурный анализ образцов катодных стриповых камер после ресурсных испытаний». **Известия РАН. Серия физическая, 2020, том 84, №10, с. 1495–1501.**
3. Бузоверя М.Э., Гаврилов Г.Е., Маев О.Е. «Исследование радиационной эрозии в газоразрядном детекторе с помощью атомно-силовой микроскопии» Журнал технической физики, 2021, том 91, вып. 2
4. Коновалова Т.А., Бузоверя М.Э., Гаврилов Г.Е. «Отработка методики определения удельного сопротивления поверхности катода стриповых камер после эксплуатации на БАК». В сборнике: Математика и математическое моделирование. **Сборник материалов XV Всероссийской молодёжной научно-инновационной школы. Саров, 2021. С. 242-243.**
5. Гаврилов Г. Е., Бузоверя М. Э., Карпов И. А., Таценко М. В., Ткаченко М. В., Дзюба А. А., Маев О. Е., Середин П. В., Голощاپов Д. Л. «Комплексная оценка состояния поверхности катода пропорциональной камеры после работы в эксперименте на Большом адронном коллайдере», **Известия Российской академии наук. Серия физическая № 8, том 86, с. 1155-1161, 2022.**
6. Arkhipov A. A., Buzoverya M. E., Karpov I. A., Konovalova T. A., Gavrilov G. E., Dzyuba A. A. , Maev O. E., and Suyasova M. V. «Nanostructured Emission Current Sources in Multiwire Proportional Chambers» ISSN 1062-8738, **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2023. © Allerton Press, Inc., 2023.**

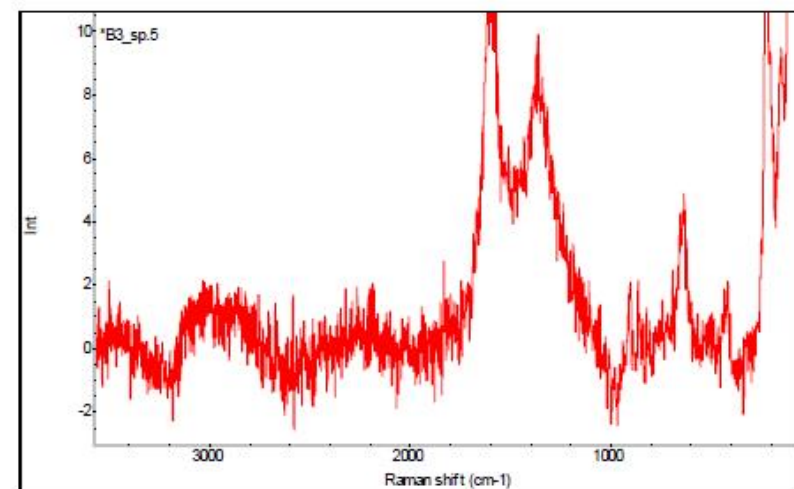
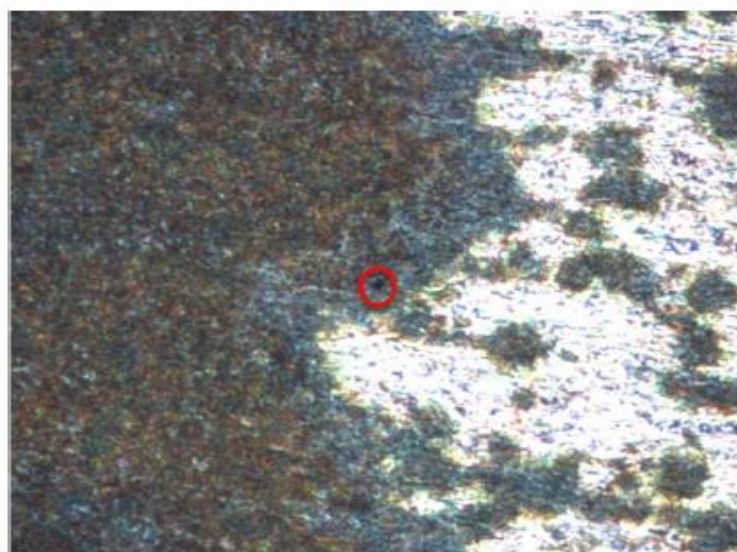
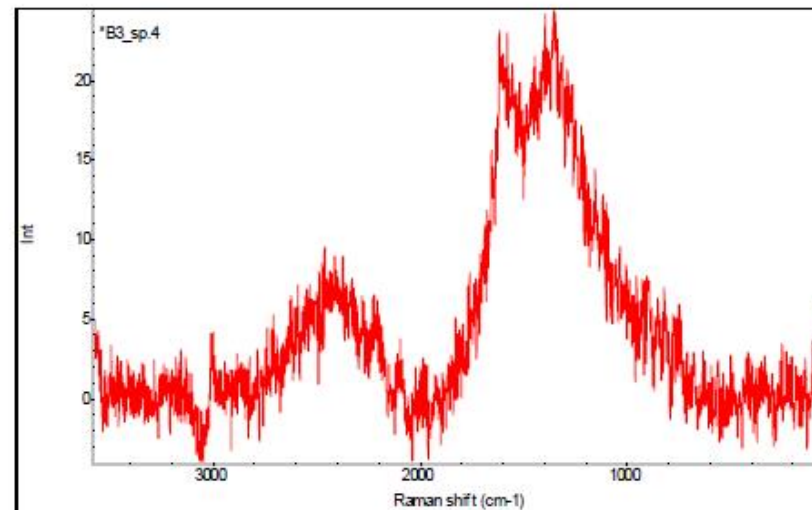


Рамановские спектры получены с помощью DXR Рамановского микроскопа (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA).

Образец облучался диодным лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт, который фокусировался в пятно на поверхности 1.1 μm .

Спектры для подавления люминисцентного фона обработаны при помощи полинома 5-го порядка с использованием встроенного программного пакета Omnic software (OMNIC for Dispersive Raman 9.2.41.).

Увеличение микроскопа x500. Анализируемые точки 1.1 μm выделены красными кружками.



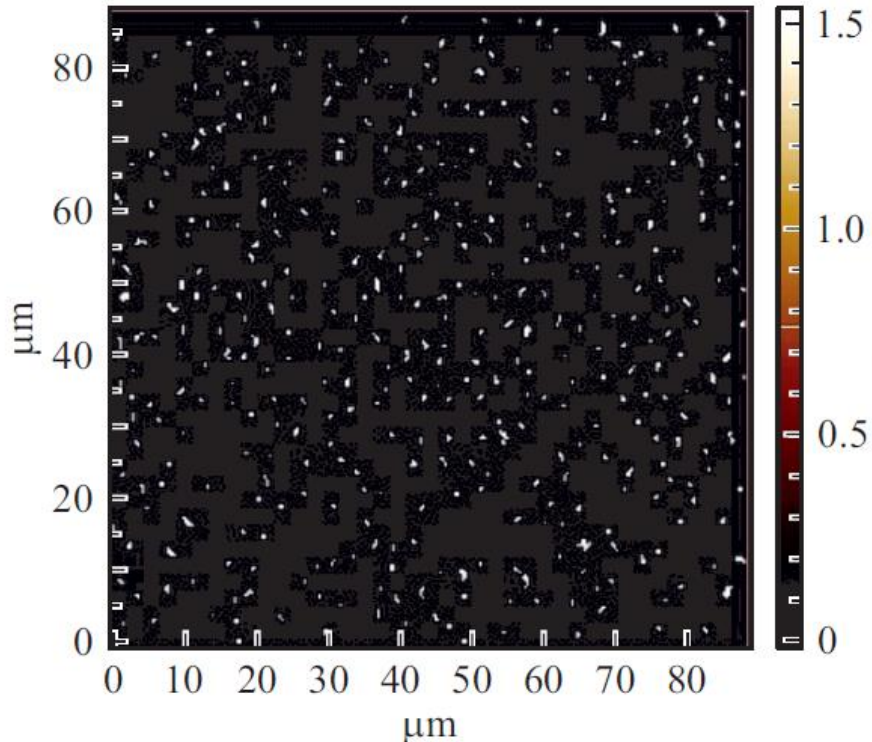
(a)

(b)

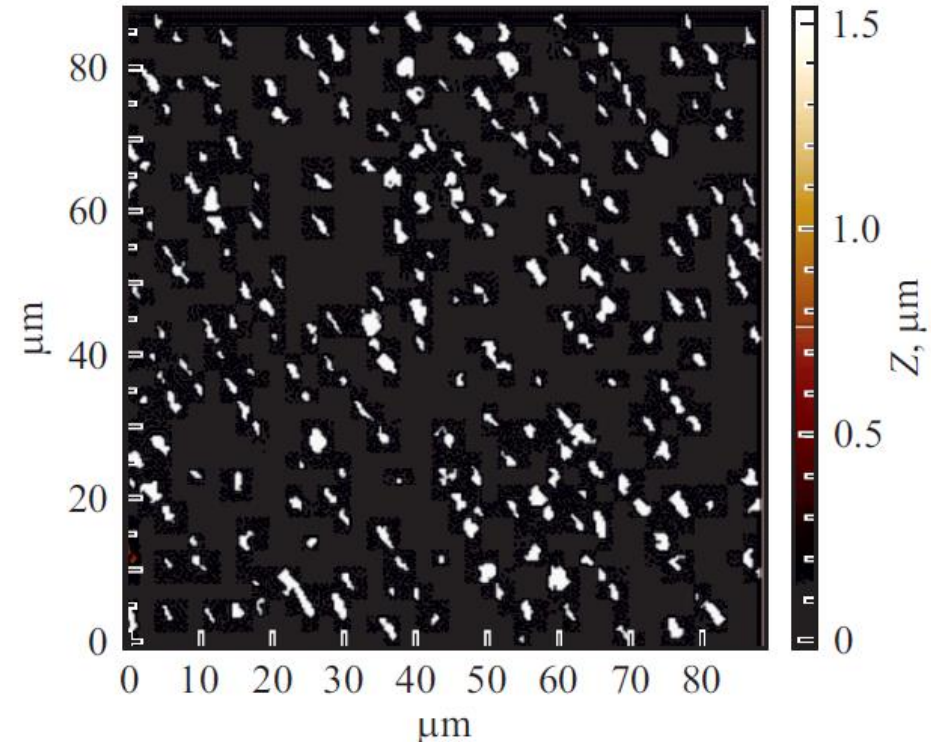
Figure 5. (a) Micrograph of the selected region on the cathode surface, magnification x500 and (b) Raman spectrum of selected spot.



Sample №5 ME manifestation zone



Sample №2 Zone without ME

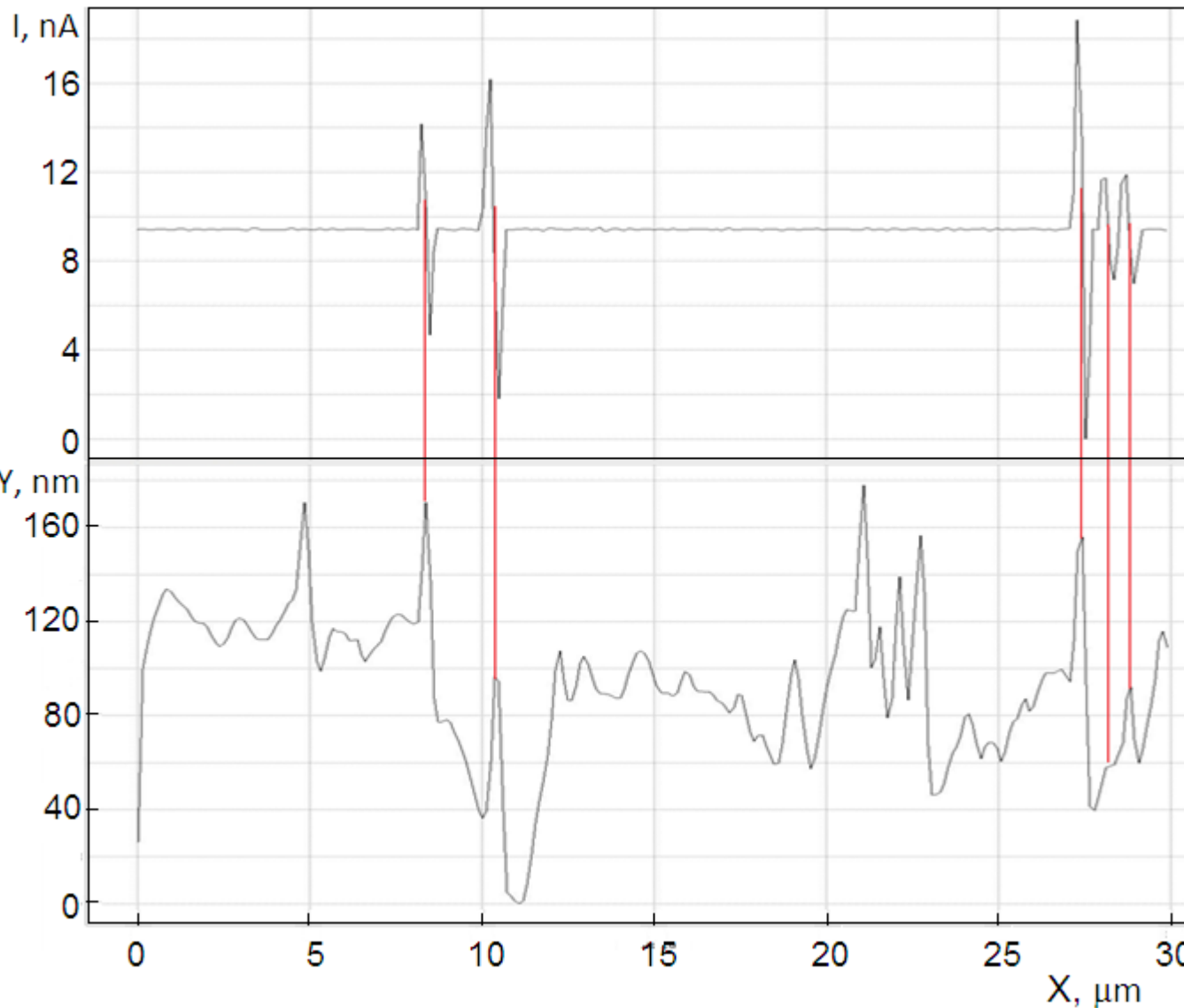
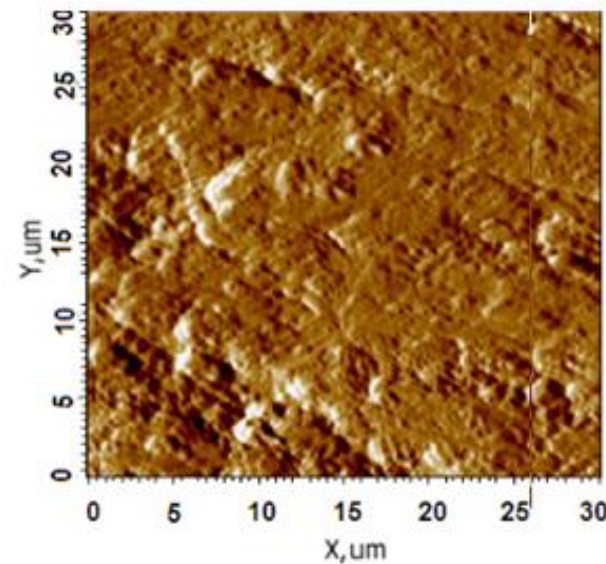
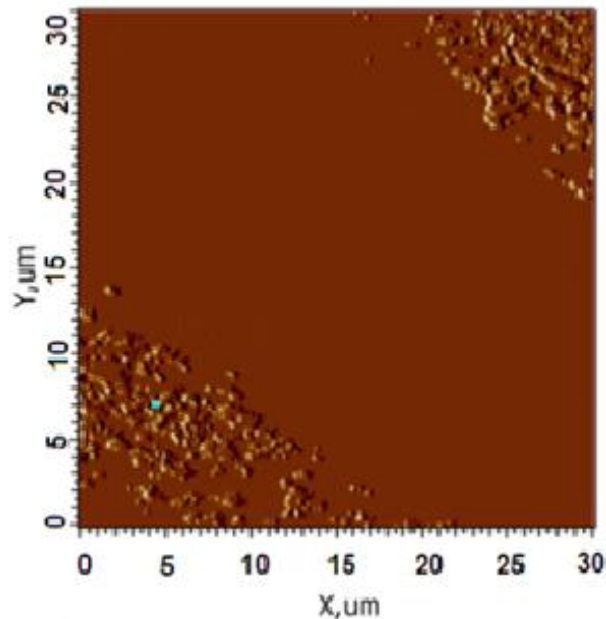


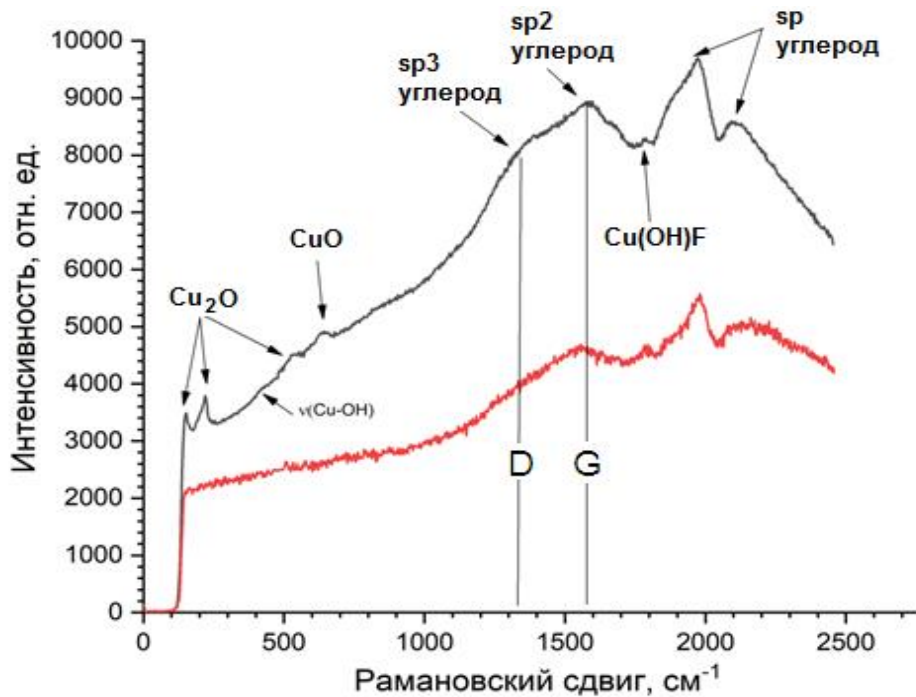
Samples	Topography			Phase contrast	
	Number of micropeaks	Average height, μm	Transverse dimation, μm	Number of micropeaks	Transverse dimation, μm
№2 (БМЭ)	230	1.1	1,2	286	0.4
№5 (МЭ)	415	0.6	0.5	455	0.5
Laboratory test sample E-D	122	2.3	0.6	295	0.35



Контактная мода АСМ

Корреляция дефектов и токов растекания на катоде МПК





□ 100-700 см^{-1} моды колебаний оксидов меди CuO , Cu_2O и $\text{Cu}(\text{OH})_2$.

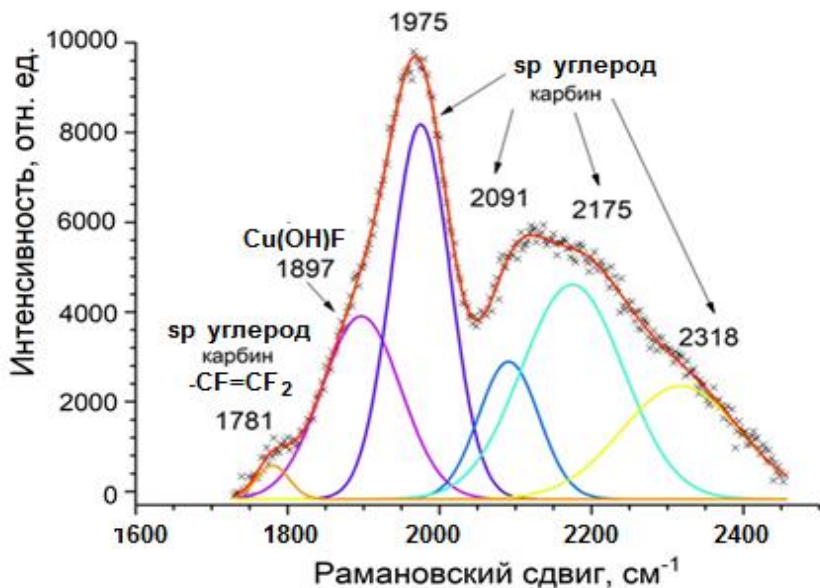
□ 1300-1600 см^{-1} полосы D и G
D(Diamond) – полоса малоразмерных областей упорядочения - алмазоподобный углерод.

G (Graphite) – полоса графита с sp^2 гибридизацией

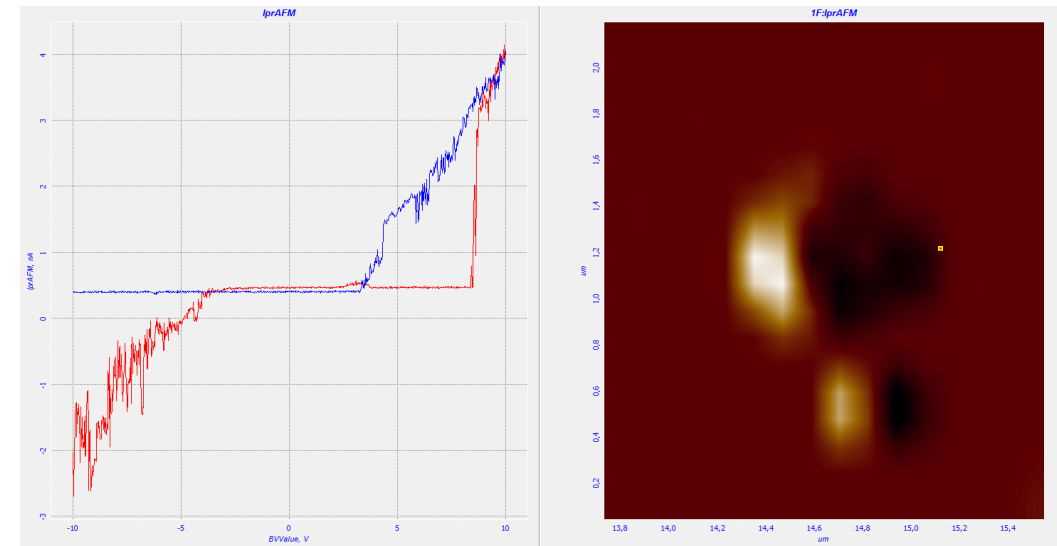
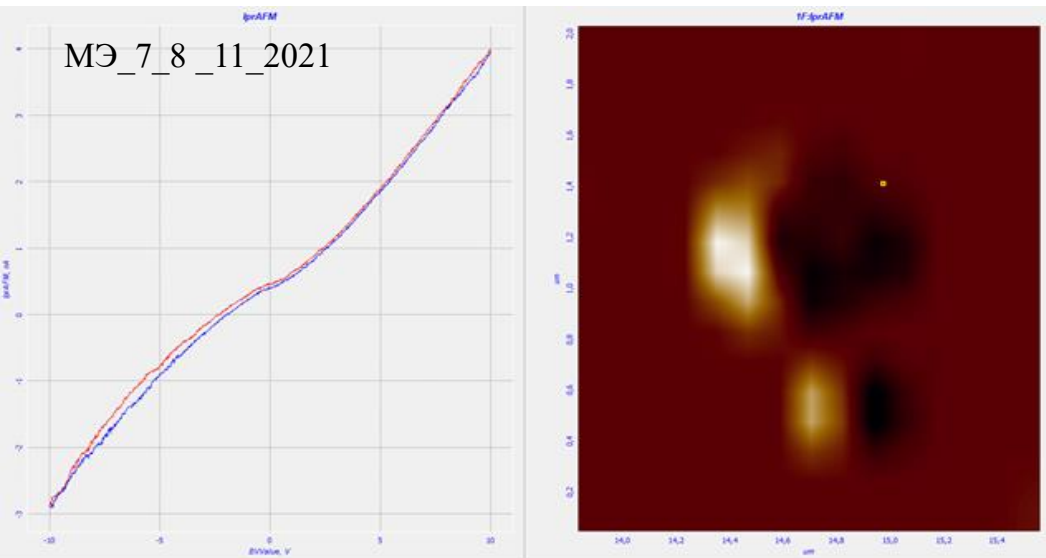
□ 1700-2000 см^{-1} структуры с содержанием фтора: $-\text{CF}=\text{CF}_2$ и $\text{Cu}(\text{OH})\text{F}$ результат процессов фторирования

□ 2000-2200 см^{-1} асимметрия спектральной области - карбин в sp^2 графите, катализ углеродных соединений на меди

Casari, C. S et al. (2004). *Chemical and thermal stability of carbyne-like structures in cluster-assembled carbon films*. *Physical Review B*, 69(7). doi:10.1103/physrevb.69.075422

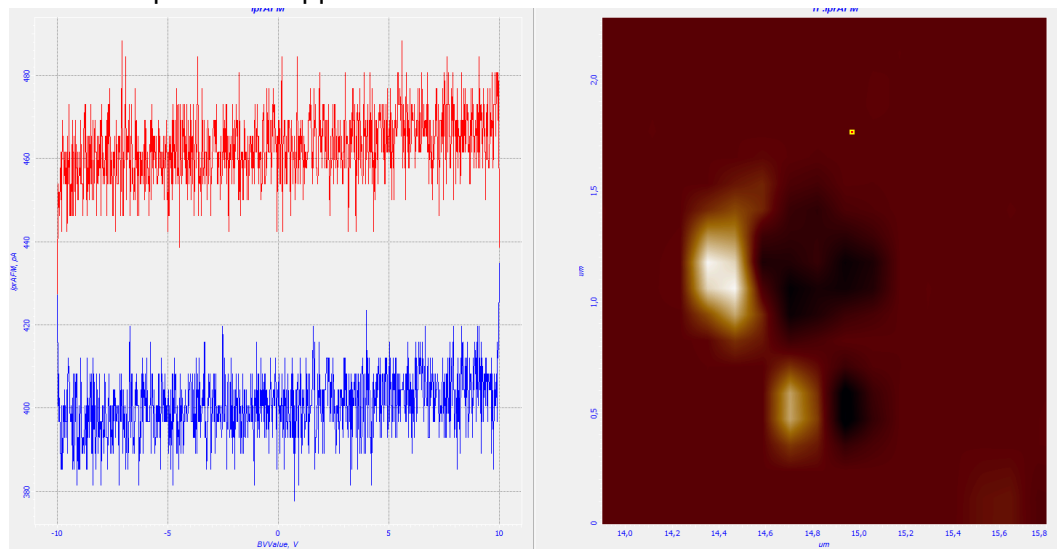
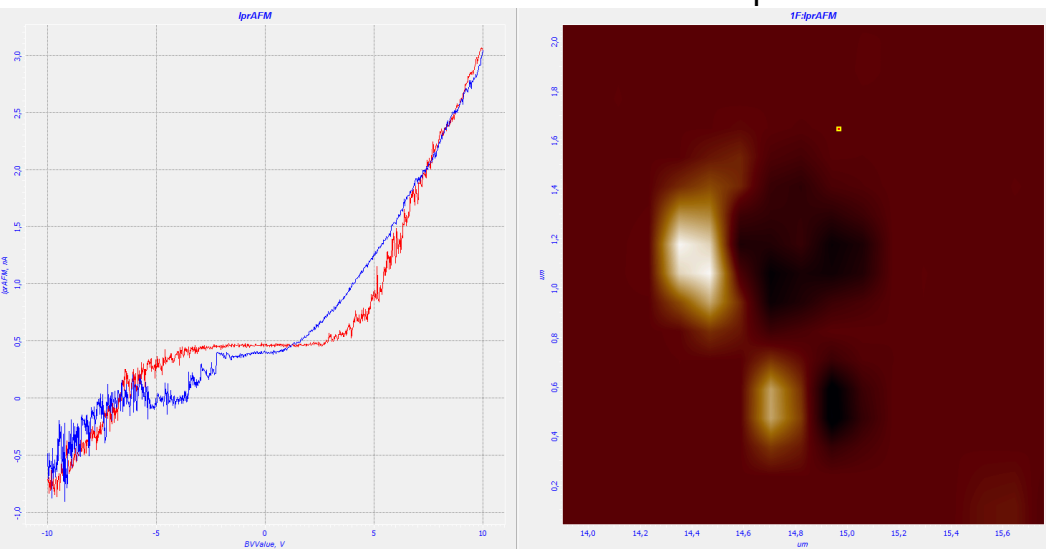


Поиск центра эмиссии на поверхности образцов катода МПК



Приблизительно линейная зависимость, почти омический контакт. Область с нелинейными ВАХ- 0.4мкм. Нет переключения

Всплеск тока с 0.4 до 3.5 нА при $U=8$ В. Разность потенциалов недостижимая в МПК

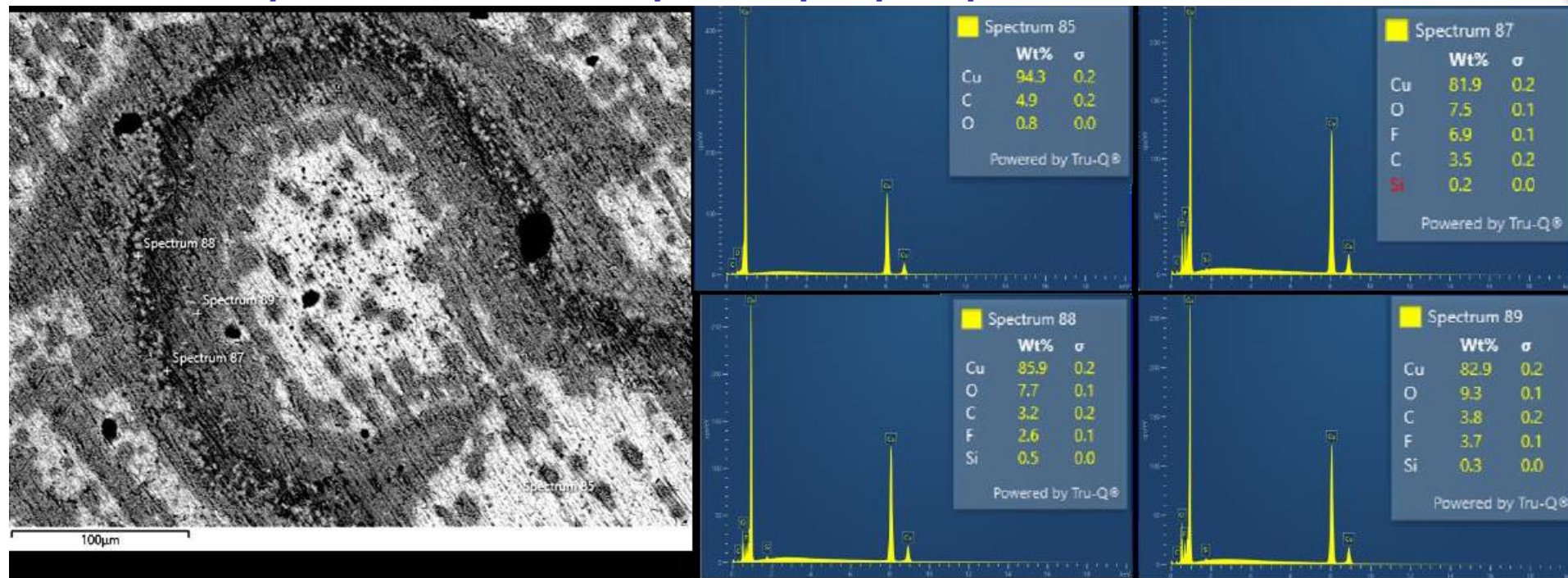


Начало роста тока при 4В Сильный рост при 5В. Обратный ток при 4В выше 1нА по сравнению с прямым - 0.4нА

Длительность измерения в точке касания зонда ~ 5 мс



Распределение химических элементов на поверхности катода: ХЕМ изображение, EDS спектры и карта распределения элементов



Вверху – ХЕМ изображение и EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy analysis) элементный анализ поверхности

Внизу – карта распределения элементов в поле микроскопа

