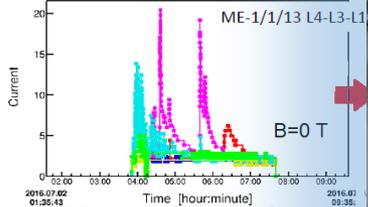
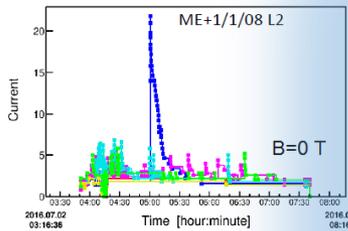


Природа источников спонтанного самоподдерживающегося тока в пропорциональных камерах экспериментов на БАК

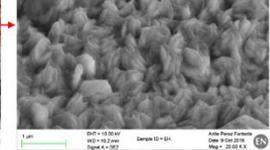
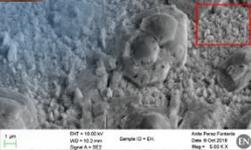
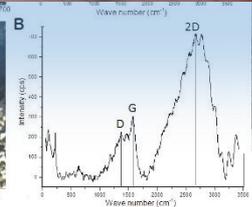
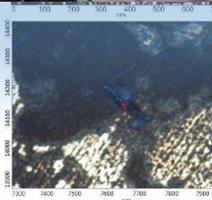
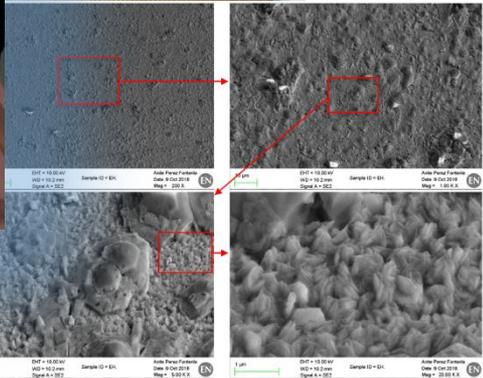
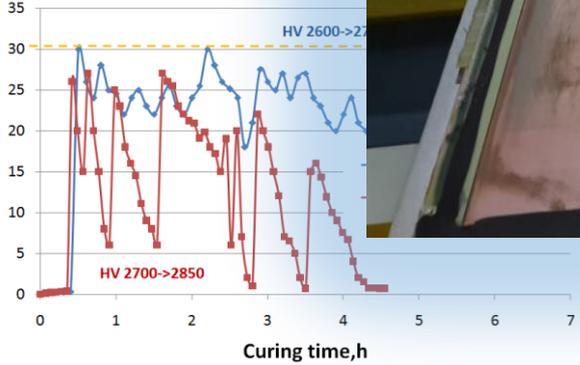
Fill 5068 (Lumi=8.1x10³³cm⁻²sec⁻¹), B=0T, p-p collisions

10% of ME1/1 layers showed Malter

Гаврилов Г.Е.



Curing process of C





План:

- Актуальность и мотивация работы
- Мюонные системы LHCb и CMS – спонтанные токи
- История исследований катодного старения и проблемы работы на LHC
- Цель и методы исследования
- Исследования прототипов МПК мюонной системы CMS
- Исследования поверхности катода МПК из LHCb
- Источники эмиссии на поверхности катода
- ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность и мотивация исследований

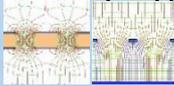
Газоразрядные детекторы с 70х годов XX века – ключевой прибор в ядерной физике и физике высоких энергий. Сегодня MWPC и DC постепенно утрачивают лидирующее положение в экспериментальных установках LHC и HL-LHC. Высокие энергии → высокие интенсивности...

Причины: а) низкая эффективность при нагрузках $F \geq 10^4 \text{ Hz} \cdot \text{cm}^{-2}$;

б) недостаточное координатное и временное разрешение;

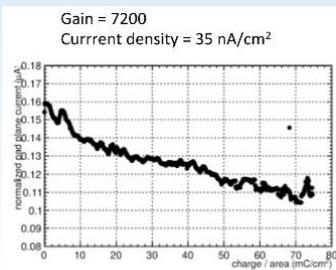
в) **старение.**

На смену приходят микроструктурные детекторы MSGC , MPGD =

= GEM + MICROMEAS  MiroGroove  MicroGap,

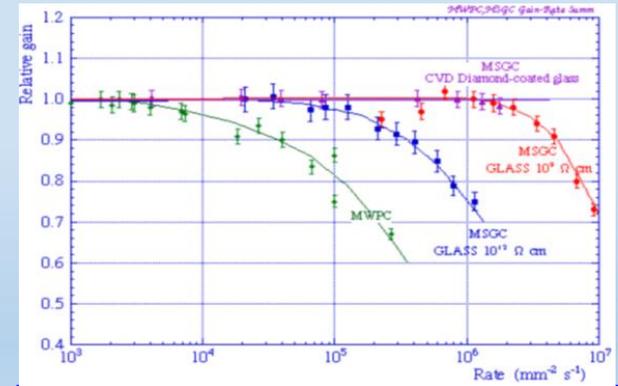
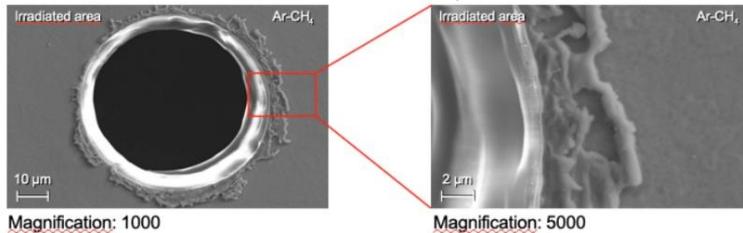
MicroPixel, Resistive Plate Well

Разделение зон газового усиления и считывания сигнала, меньшая напряженность поля E и КГУ дают надежду, что эффекты старения уменьшатся. Но опыта десятилетий эксплуатации в эксперименте у этих детекторов нет. А опыт старения уже есть: 60% LHCb GEM (24 шт) – короткое замыкание, МЭ, потеря эффективности.



30 % gain drop after 75 mC/cm²

ALICE TPC AGING in Ar-CH₄



Достоинства газовых детекторов:

- малая радиационная длина
- большие площади за малую цену
- гибкая геометрия
- хорошее пространственное и энергетическое разрешение

НО!

Скорость счёта ограничена объёмным зарядом, который определяется временем дрейфа ионов⁺

Решение:

- Уменьшить размер регистрирующей ячейки.
- Использовать технологию микроэлектроники.
- Сохранить структуру эл-го поля.

Timeline towards HL-LHC



Can we withstand the expected accumulated charge?

5 × increase in instantaneous luminosity
10 × increase in integrated luminosity



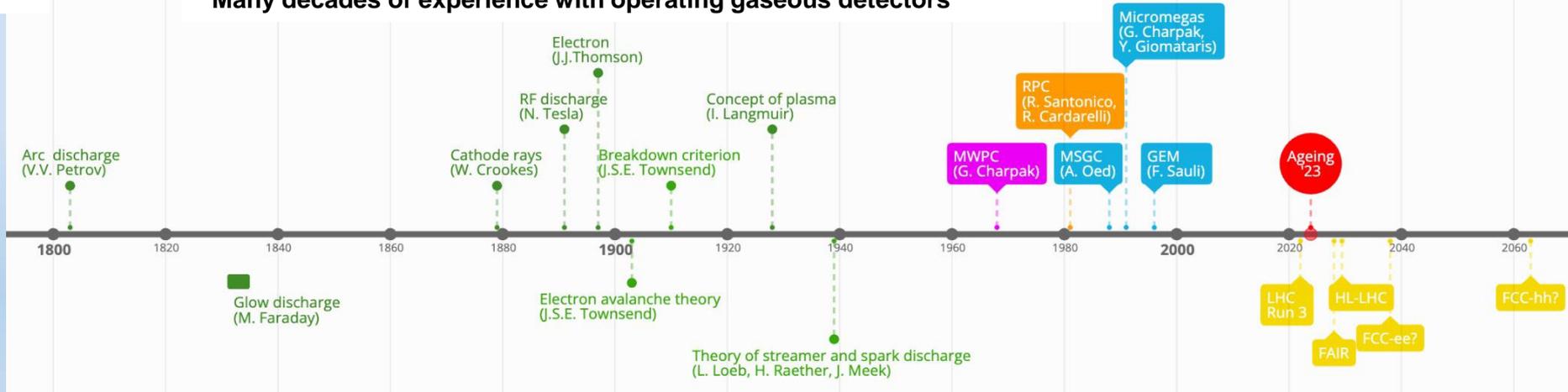
Aging 2023 - Longevity studies for the CMS Drift Tubes towards HL-LHC

До 2040 года исследования на HL-LHC будут проводиться с применением имеющихся MWPC, DC, GEM, sTGS

Вопрос устойчивости работы этих детекторов имеет жизненную важность для всех экспериментов на LHC и не только ...

Актуальность и Мотивация Исследований

More than 200 years of gas discharge physics
Many decades of experience with operating gaseous detectors



Aging Phenomena in Gaseous Detectors

Maksim Titov

Implicit assumption: aging rate is proportional only to the total accumulated charge

$$R = - (1/G)(dG/dQ) \quad (\% \text{ per C/cm}) \quad (\text{Kadyk '1985})$$

Aging phenomena depends on many highly correlated parameters:

Microscopic parameters:

- ✓ Cross-sections
- ✓ Electron or photon energies
- ✓ Electron, ion, radical densities
- ✓ ...

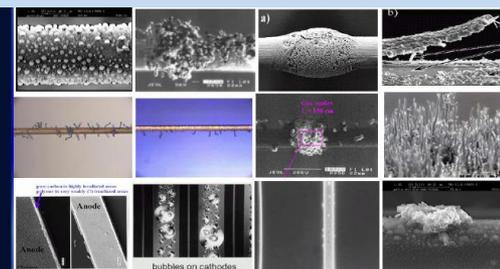
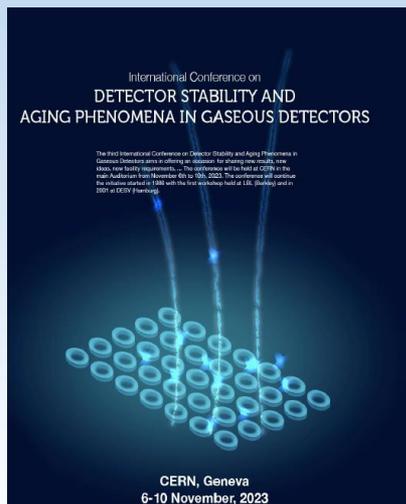


Macroscopic parameters:

- ✓ Gas mixture (nature of gas, trace contaminants) ~1980
 - ✓ Gas flow & Pressure
 - ✓ Geometry/material of electrodes & configuration of electric field
- CLASSICAL AGING:**
- ✓ Construction materials
 - ✓ Radiation intensity
 - ✓ Gas gain, ionization density
 - ✓ Size of irradiation area
- 'NEW AGING' EFFECTS:**
- ~2000

There are simply too many variables in the problem →

would be too naive to expect that one can express the aging rate using a single variable (C/cm)



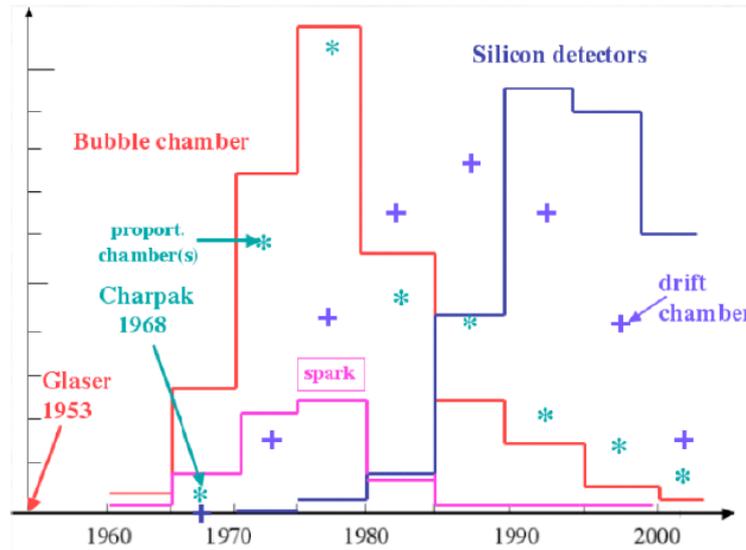
Gaseous Detectors and Radiation Hardness: Challenges from the Past & Requirements for the Next Generation of Experiments

Длительность работы современных экспериментов в физике составляет 10-20 лет. Стоимость установок и сложность «космические». → Устойчивость работы детекторов вышла на передний план, замены модулей невозможны → Опыт организации и обеспечение стабильности работы экспериментов LHC важен всем.

Временная шкала «жизни» не верна для классических газоразрядных детекторов

History of detectors (ex. trackers)

- **Cloud Chambers** dominating until the 1950s
→ now very popular in public exhibitions related to particle physics
- **Bubble Chambers** had their peak time between 1960 and 1985
→ last big bubble chamber was BEBC at CERN (Big European Bubble Chamber), now in front on the CERN Microcosm exhibition
- **Wire Chambers** (MWPCs and drift chambers) started to dominate since 1980s
- Since early 1990s solid state detectors are in use started as small sized vertex detectors
→ now ~200 m² silicon surface in CMS tracker



До 2040 MWPC, DC, sTGS останутся ключевыми детекторами установок HL-HLC и должны обеспечить интегральную светимость 4000 fb⁻¹

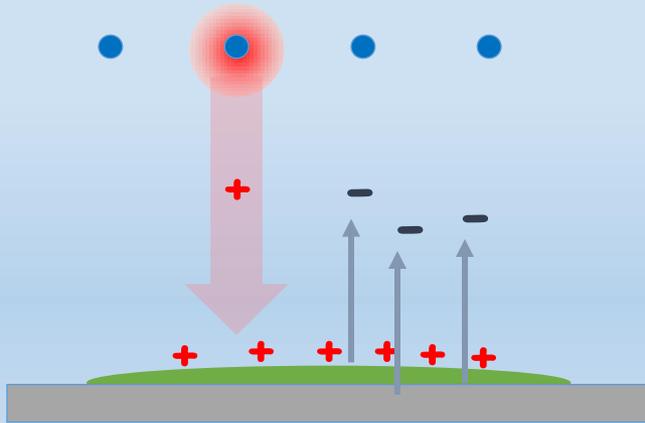
Уже сегодня успешное применение этих детекторов в экспериментах физики высоких энергий и ядерной физики имеет длительность до 20 лет!

До середины XXI века газоразрядные детекторы, скорее всего, будут успешно применяться по всем лабораториям мира.

Но проблемы старения надо решать сегодня.

Сегодня единственный признак деградации для МПК в LHCb и CMS Под контролем ?? Нет !

Cathode Field Emission - Malter Effect



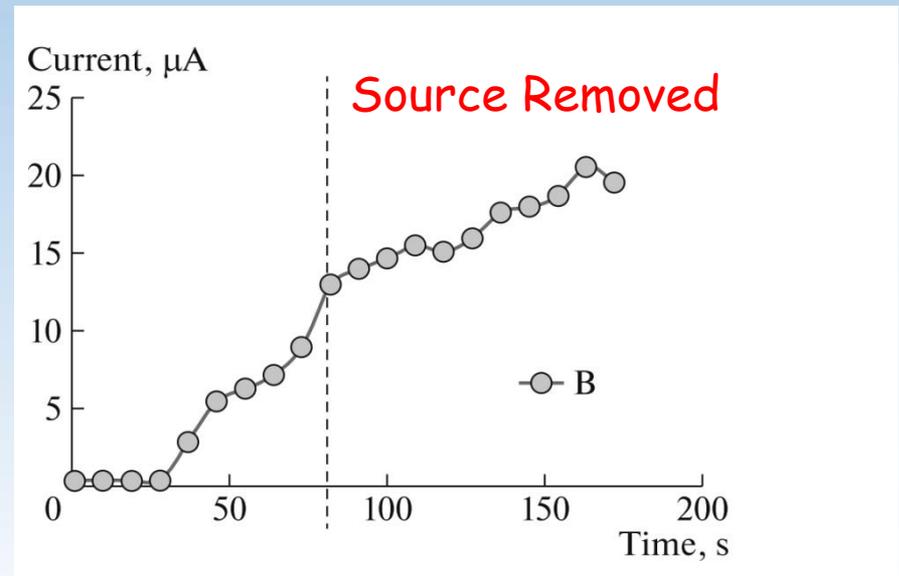
Positive Ions Deposit on the Thin Insulating Layer and Create an Electric dipole Field Extracting Electrons

Self-Sustained Effect Leading to Current Increase and Discharge

- Rate Dependent
- Enhanced Sensitivity to Light

The Current Increase due to Malter Effect continues after removal of source

LHCb Muon MWPC:

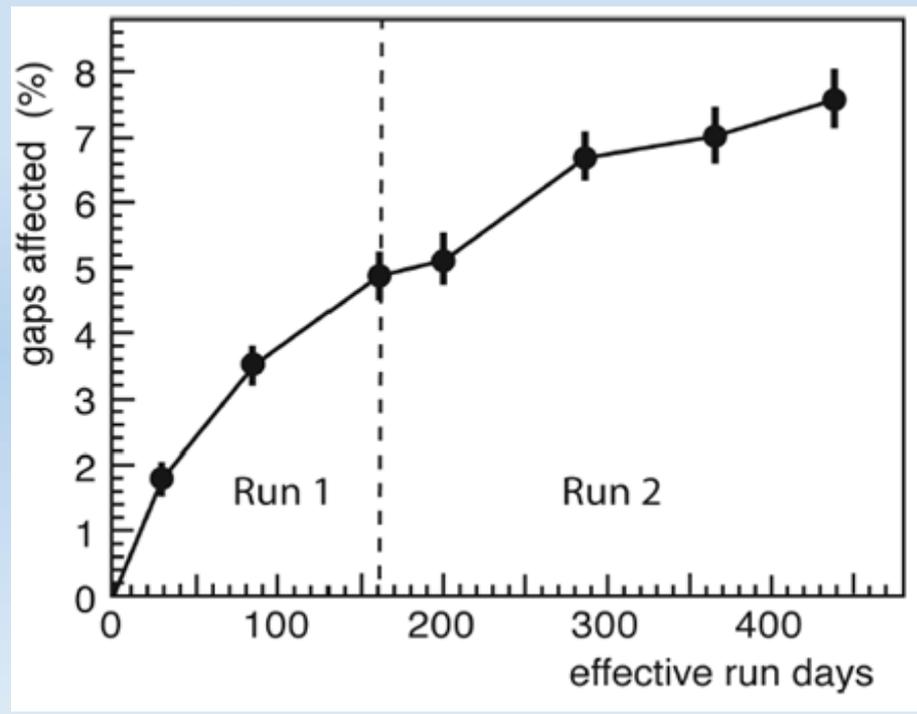


*G. Gavrilov et al,
Phys. Atomic Nuclei 82(2019)1273*



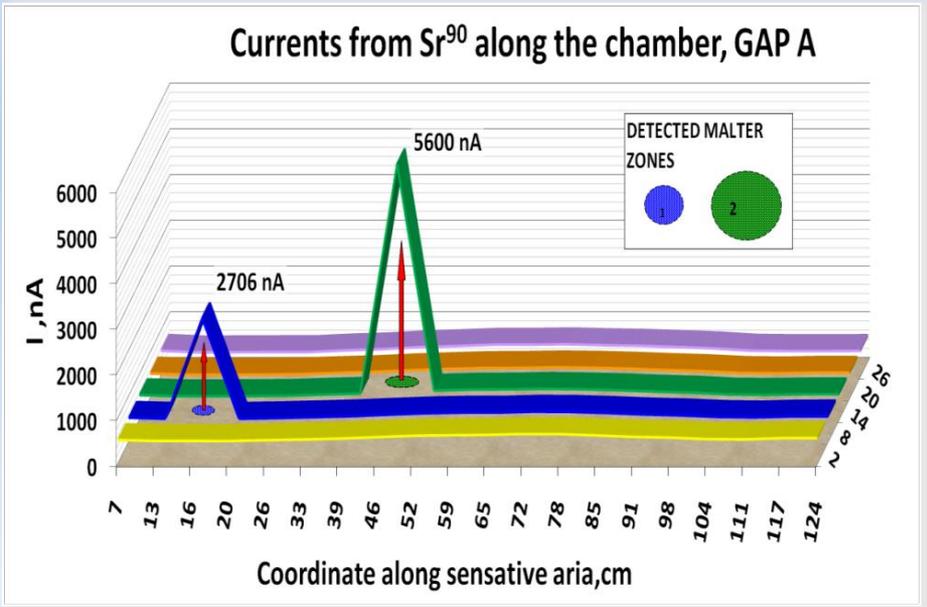
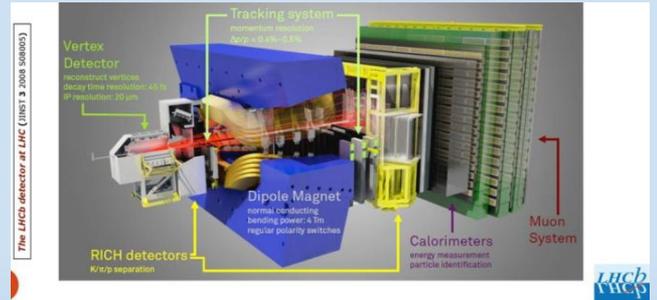
Мюонная система LHCb – спонтанные токи

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



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
1368 модулей по четыре МПК площадью 435 м²
Рабочая газовая смесь: **Ar(40%)/CO₂(55%)/CF₄(5%)**

L = 2.5mm, Анод: s = 2mm, Ø 30μm Au+W;
Катод Си фольга # 35μm
HV ~ 2.7÷2.8 kV → E_{cath} ≈ 5 kV/cm

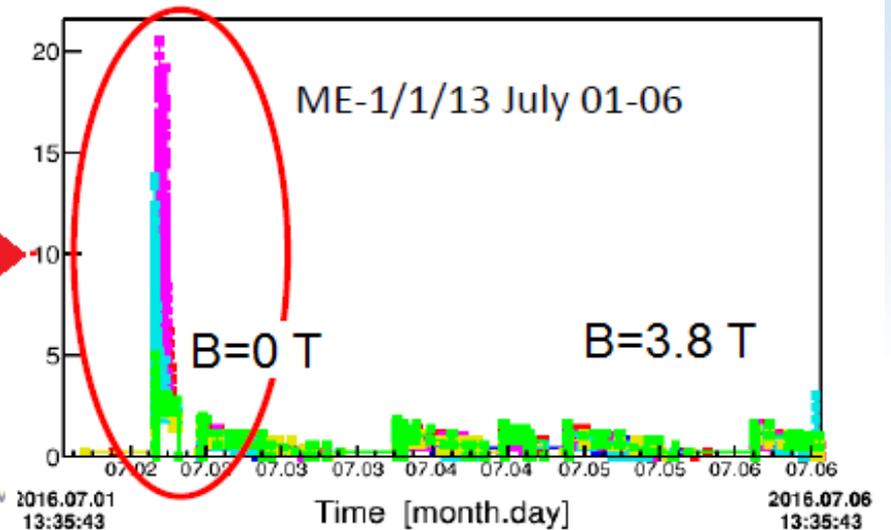
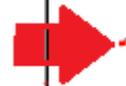
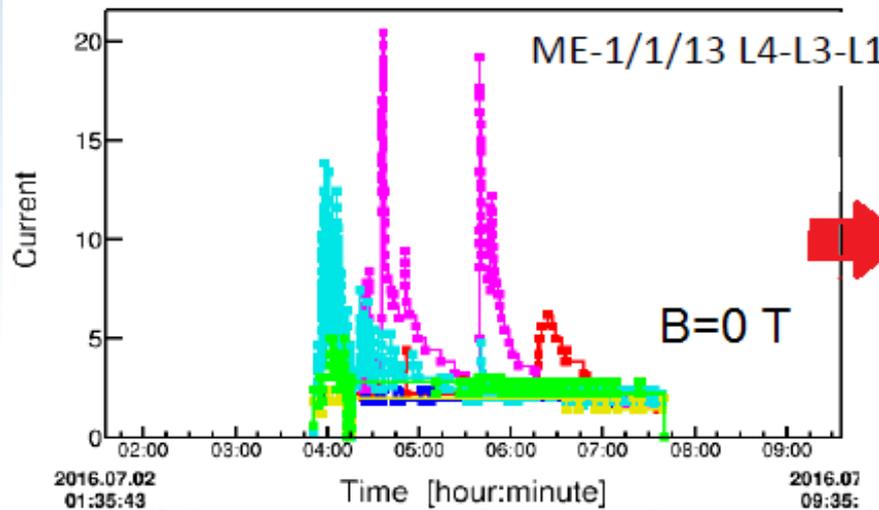
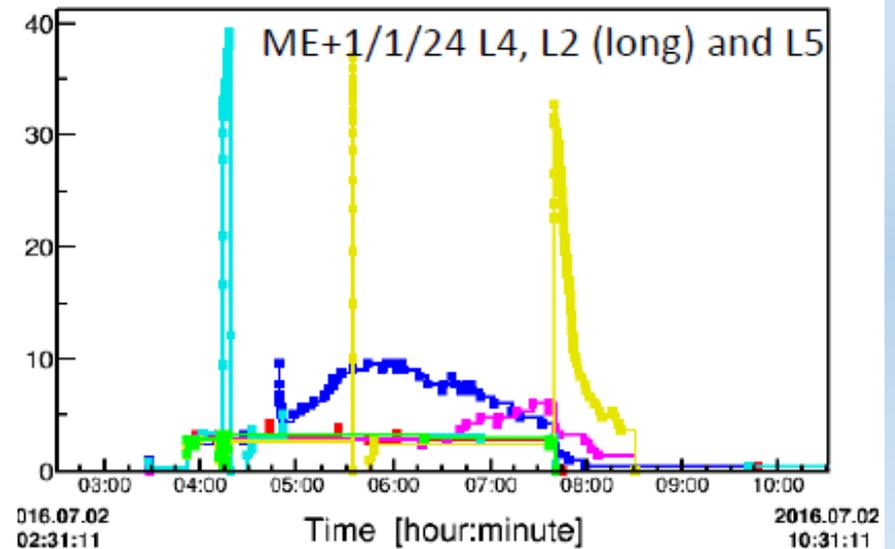
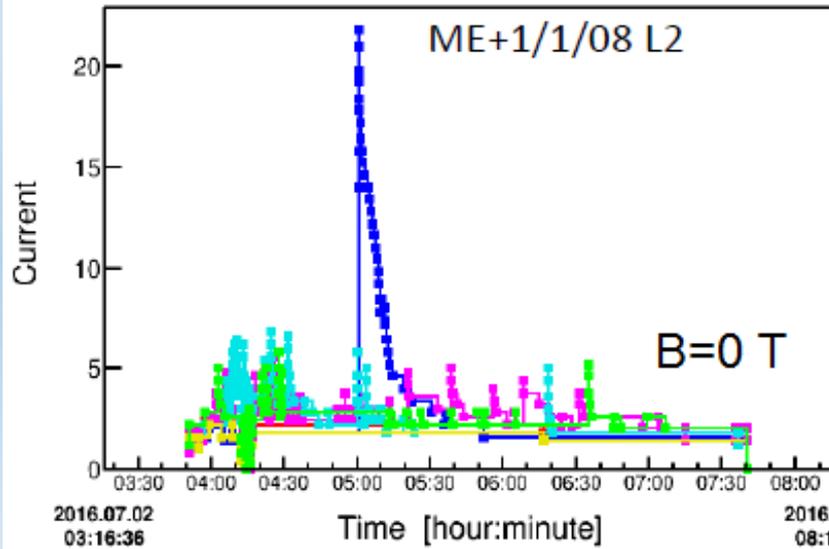
Мюонная система CMS – спонтанные токи



Fill 5068 ($Lumi=8.1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$), $B=0\text{T}$, p-p collisions

V. Perelygin

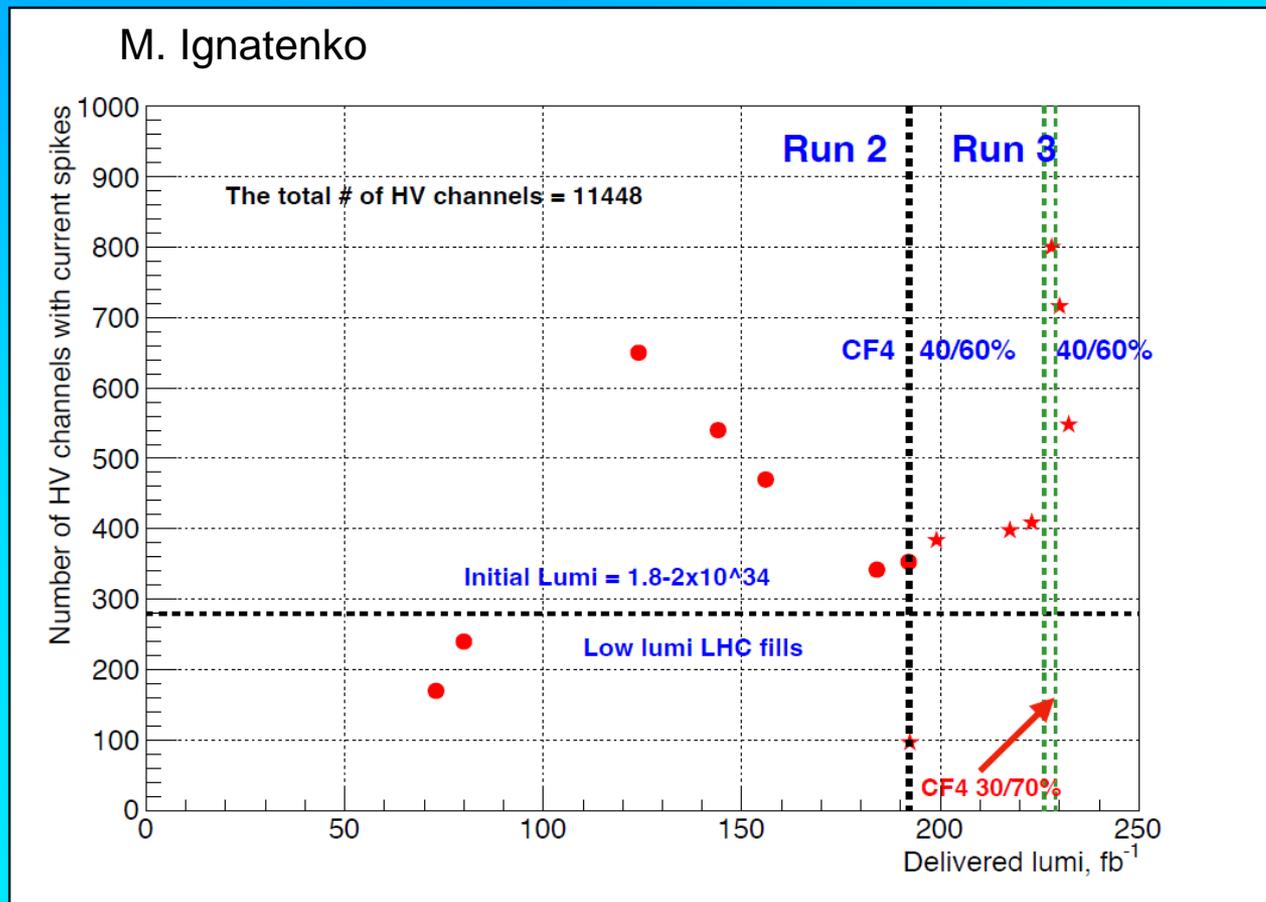
10% of ME1/1 layers showed Malter





Malter current effects ...

Run 2 and Run 3 history of the number of unstable HV channels



- The number of observed unstable HV channels in 2022 run doesn't contradict the Run2 observation.
- There is one exception - once CSC switched to 30% fresh and 70% recuperated CF4 the number of unstable channels jumped 2 times.
- After CSC switched back to 40% fresh and 60% recuperated CF4 the number of unstable HV channels start decreasing.
- **CSC don't like recuperated CF4.**



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

$\langle Q \rangle = 0.20 \text{ C/cm}$

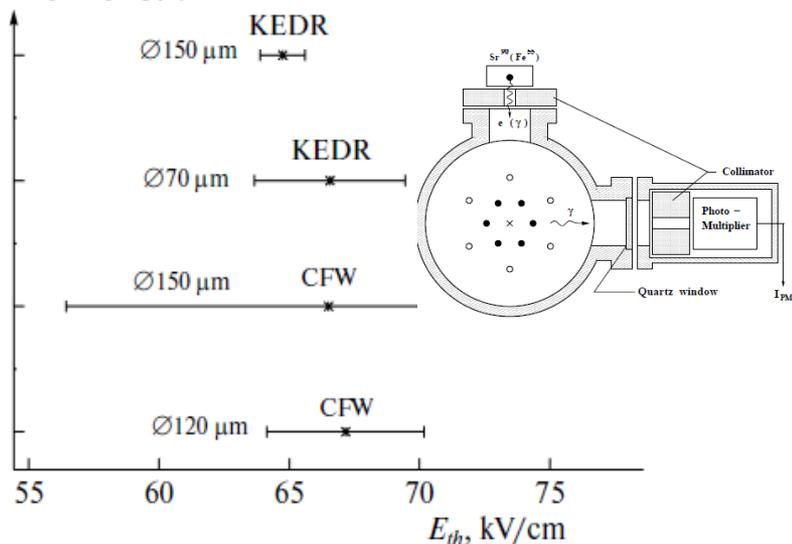


Fig. 16. Measured threshold electric field strengths on the cathode wire surface for different types of wires.

$\text{He}(80\%)/\text{iC}_4\text{H}_{10}(20\%)$

Возникновение МЭ $Q \sim 150\text{-}220 \text{ mC/cm}$

$E_{th} = 67 \pm 3 \text{ kV/cm}$ (120 µm CFW, 70 µm KEDR)

$E_{th} = 67 \pm 10 \text{ kV/cm}$ (150 µm CFW)

$E_{th} = 67 \pm 1.0 \text{ kV/cm}$ (150 µm KEDR)

Г.Е. Гаврилов



Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 591 (2008) 353–366

NUCLEAR
INSTRUMENTS
& METHODS
IN PHYSICS
RESEARCH
Section A

www.elsevier.com/locate/nima

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

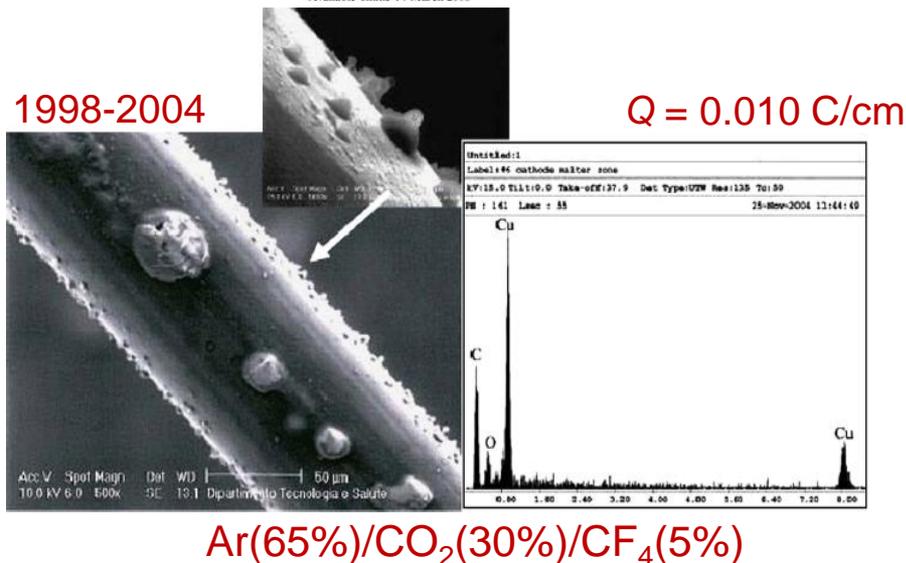
S. Belostotski^a, S. Frullani^b, G. Gavrilov^{a,*}, O. Miklukho^a, L. Shchipunov^a,
D. Veretennikov^a, V. Vikhrov^a

^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



S. Belostotski et al. / Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 591 (2008) 353–366

363

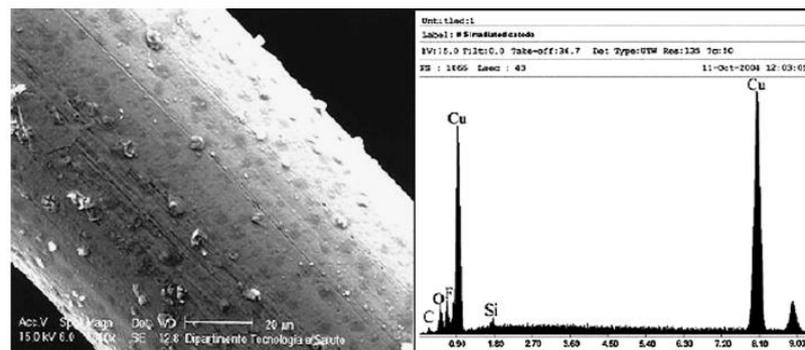


Fig. 12. SEM micrograph of the irradiated in the fifth test point (see Fig. 6) cathode wire after accumulation of $Q_{\text{cathode}} = 4.75 \text{ mC/cm}$ and XEM spectra of the deposits on the surface.

История изучения спонтанных самоподдерживающихся токов в МПК для БАК

Токов Мальтера не наблюдалось!

1998



$$Q_{\text{wire}}^{\text{prototype}} = k \times Q_{\text{wire}}^{\text{LHC}} \times \frac{S^{\text{total}}}{S^{\text{irrad}}} \approx 12 \text{ C/cm}$$

where $Q_{\text{wire}}^{\text{LHC}} \approx 0.08 \text{ C/cm}$ is the expected charge per unit of wire length in 10 LHC years

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



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

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. Clare^h, D. Cline^c, R. Cousins^c, T. Cox^c, S. Dolinsky^a, S. Durkin^g, D. Eartly^h, Yu. Ivanov^d, T. Ferguson^a, 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^g, W. Ko^c, A. Korytov^a, 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^g, 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. Terentev^l, M. Tripathi^c, S. Vavilov^d, S. Volkov^c, A. Vorobyov^d, I. Vorobyov^l, L. Wang^h, V. Yarba^b, L. Zhou^k, Z. Zhu^k

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

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

$$Q = 0.39 \text{ C/cm}$$

$$Q = 1.36 \text{ C/cm}$$

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



токов Мальтера нет

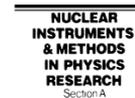


ELSEVIER

Available online at www.sciencedirect.com



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

2004

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

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

$$E_{\text{cath}} \approx 5000 \text{ V/cm}$$

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 Vysokaya 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

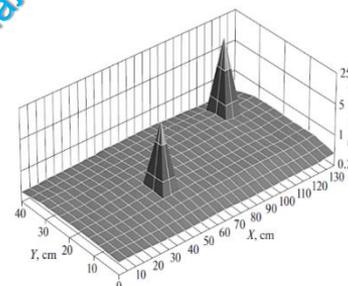
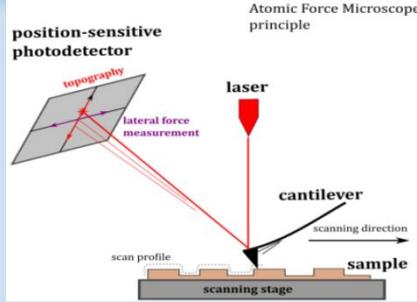


Fig. 4. The distribution of ionization current from the ⁹⁰Sr β-source and Malter currents obtained via scanning the registering MWPC plane.

Г.Е. Гаврилов, Семинар ОФВЭ

- **Атомно-силовая микроскопия (AFM) на СЗМ «Solver Next» производства ОАО «НТ-МДТ» г. Зеленоград**, Использовались токопроводящие кантилеверы (зонды) серии NSG10/TiN. Режим сопротивления растекания позволял получать локальные ВАХ в точке контакта зонда. Рабочее напряжение в режиме сопротивления растекания составляло $U = 6$ В. Особенностью установки СЗМ «Solver Next» является возможность проводить весь комплекс измерений в полуконтактной и контактной модах, не меняя кантилевер и установку образца.
- **Сканирующая электронная микроскопия — SEM (Scanning Electron Microscopy), JEOL JSM 6460 LV (Япония)**. Изучение морфологии и элементного анализа образцов. Электронное изображение поверхности изучалось при различных увеличениях в интервале от $\times 160$ до $\times 2000$.
- **Микроэлементный EDS-анализ (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)** проводился с использованием EDS-Noran System Six200 в выбранных точках и областях. Для анализа распределения отдельных элементов проводился картографический анализ EDS. Чувствительность SEM/EDS по глубине составила 2 мкм.
- **Метод обратного резерфордского рассеяния (Rutherford backscattering spectroscopy - RBS) на установке «Микрозонд»** комплекса Микрозонд - ЭГП-10 применялся для элементного анализа по поверхности и на глубине (до 20 μm). Энергия пучка - до 4 MeV; Ток протонов на образцах - 0.01 nA; Размер пучка на образце - 30 \times 30 μm . Площадь сканирования - 300 \times 300 μm . (Абрамович С.Н., Зимин Е.В., Иванин И.А. // Труды ВНИИЭФ. 2010. № 15. С. 486)
- **Рентгеновский дифракционный анализ - X-Ray Diffraction (XRD)**. Измеряет угол луча, рассеянного от кристаллических плоскостей, тем самым предоставляя информацию о периодических атомных расположениях в данном материале, которая используется для идентификации кристаллических фаз в материале. **Анализ элементного состава на поверхности катода выполнен на рентгеновском дифрактометре «Shimadzu XRD-7000»**
- **Метод Рамановской спектроскопии - анализ структурного состава микрообъектов и субстанций на поверхности**
В ТИЯФ: Раман-микроскоп РамМикс M532® совмещающий Раман-анализатор EnSpectr R532® Scientific Edition и микроскоп Olympus CX-41. Лазер с излучением $\lambda = 532$ nm, мощностью пучка на поверхности составляла 30 mW, диаметр пучка 4 μm , экспозиция 1000 ms.
В ИОФХ: Раман-микроскоп DXR (Thermo Fisher Scientific, Массачусетс, США) с диодным лазером с длиной волны 532 нм и мощностью 10 мВт, диаметр пучка 1,1 мкм. Спектры рамановского рассеяния света обрабатывались для коррекции фона флуоресценции с использованием метода коррекции базовой линии полиномом 5-го порядка, встроенного в программное обеспечение Omnic (OMNIC for Dispersive Raman 9.2.41). Глубина анализирующей способности метода ~ 1 мкм.



Исследование прототипов МПК мюонной системы CMS

Atomic Force Microscopy (AFM)

- ❑ Видны радиационно-стимулированные изменения топографии поверхности. Степень деградации зависит от поглощенной дозы
- ❑ Высота микропиков на поверхности достигает 2-2.5 μm , электрическое поле на вершинах достигает $\sim 10 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$
- ❑ **Мальтер эффект не наблюдался !**

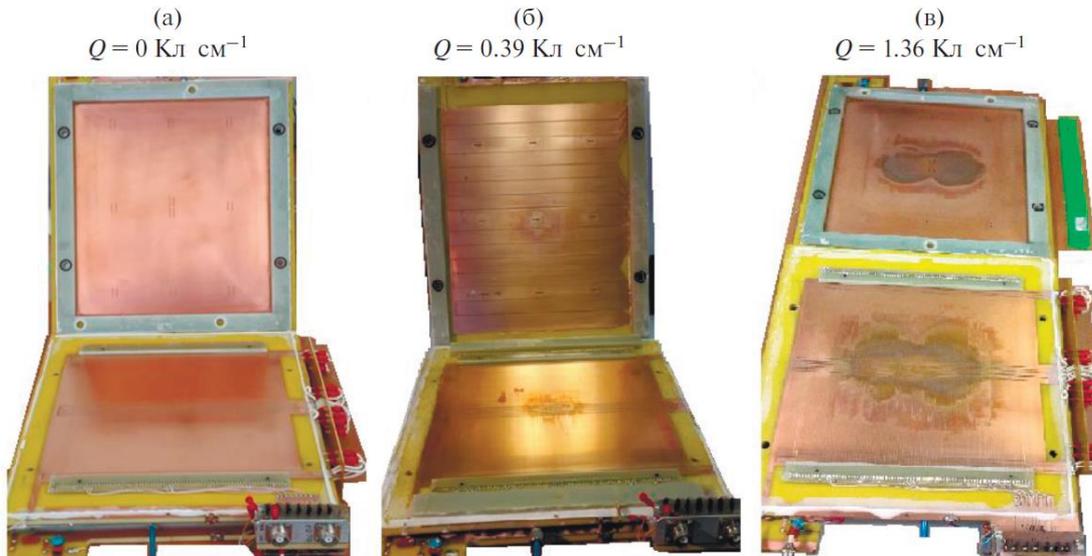
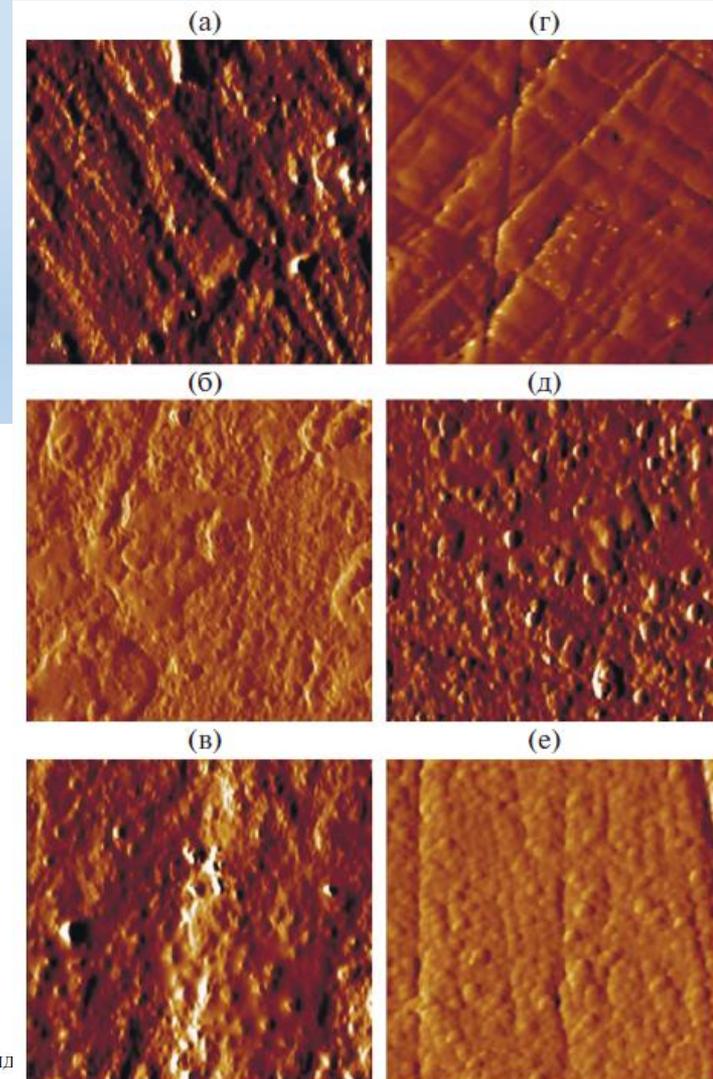
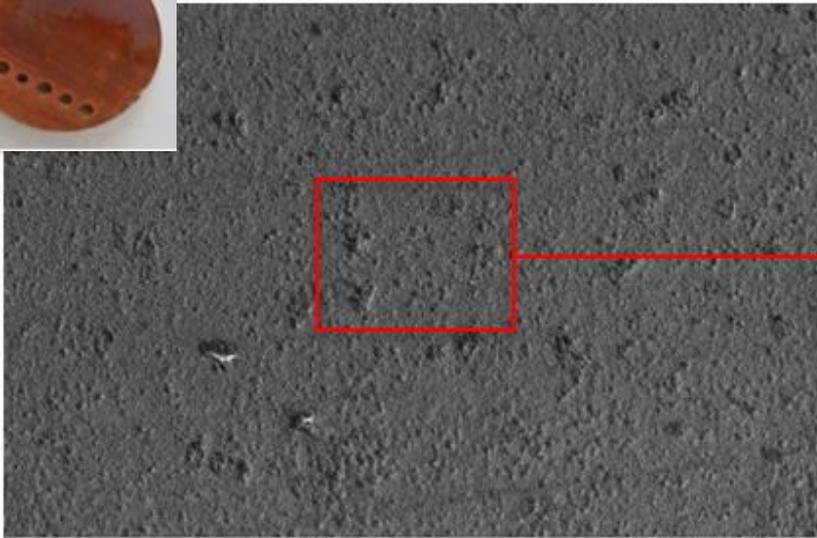


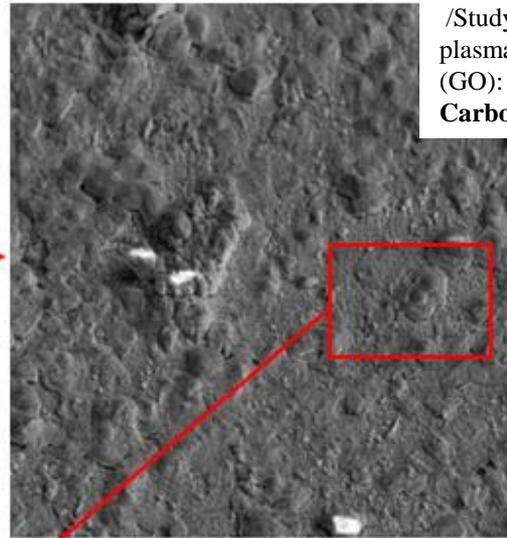
Рис. 3. Катодные плоскости прототипов КСК: (а) до начала ресурсных испытаний; (б) после аккумулярования заряда 0.39 Кл см^{-1} , (в) после аккумулярования заряда 1.36 Кл см^{-1} .

Рис. 6. АСМ – изображения образцов, размер $30 \times 30 \text{ мкм}$, серия 1: (а) Н, (б) Е-Н, (в) E_f ; серия 2: (г) Н, (д) Е-В, (е) E_h .

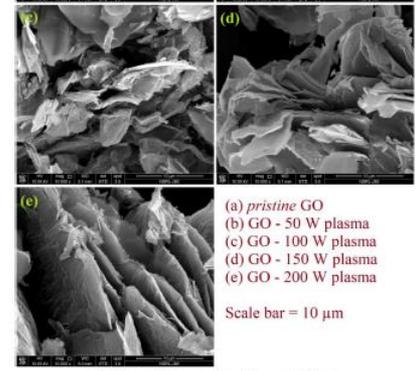
Mohammad Moeen Hasan Raza et al.
 /Study the electron field emission properties of plasma-based reduction of graphene oxide (GO): An ex-situ plasma approach//
Carbon Trends 5 (2021) 100127



100 μ m EHT = 10.00 kV Sample ID = EH. Anite Perez Fontenia Date :9 Oct 2018 Mag = 200 X EN

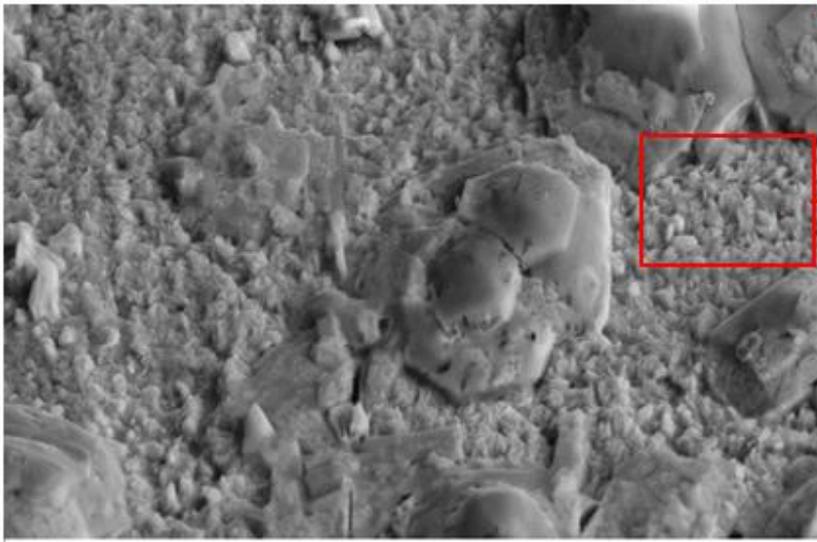


10 μ m EHT = 10.00 kV Sample ID = EH. Anite Perez Fontenia Date :9 Oct 2018 Mag = 1.00 K X EN

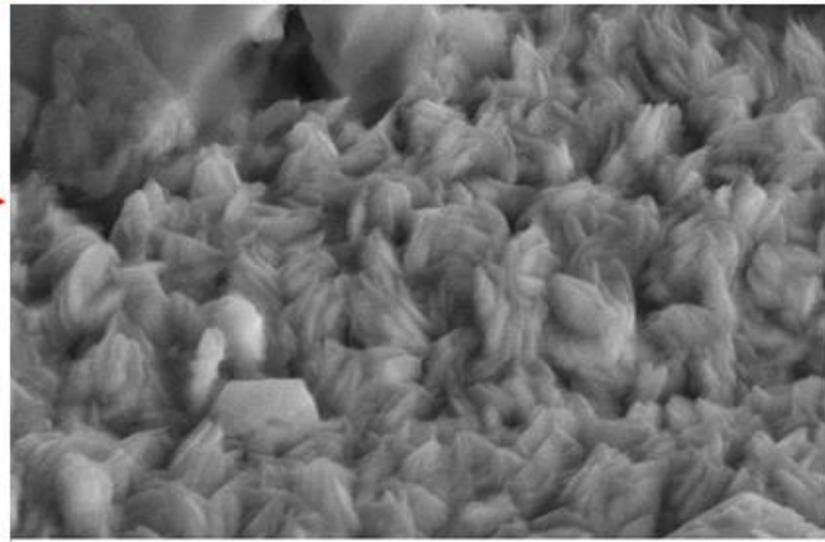


(a) pristine GO
 (b) GO - 50 W plasma
 (c) GO - 100 W plasma
 (d) GO - 150 W plasma
 (e) GO - 200 W plasma
 Scale bar = 10 μ m

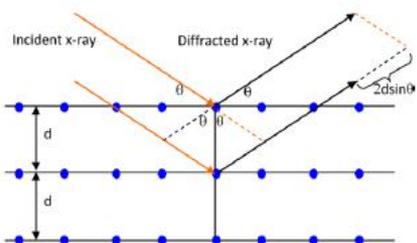
Fig. 2. SEM micrographs of the as-prepared graphene and plasma treated GO based resonator.



1 μ m EHT = 10.00 kV Sample ID = EH. Anite Perez Fontenia Date :9 Oct 2018 Mag = 5.00 K X EN



1 μ m EHT = 10.00 kV Sample ID = EH. Anite Perez Fontenia Date :9 Oct 2018 Mag = 20.00 K X EN



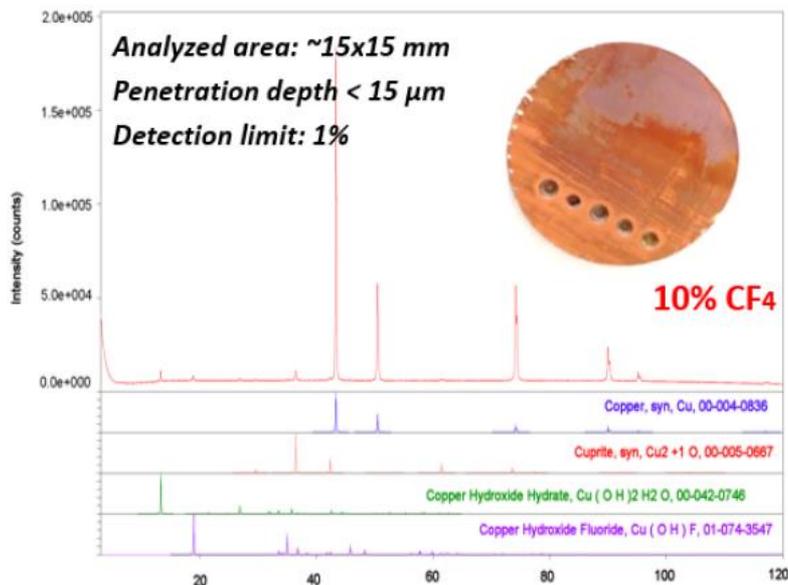
X-Ray Diffraction (XRD)

Long range order in crystal structures:

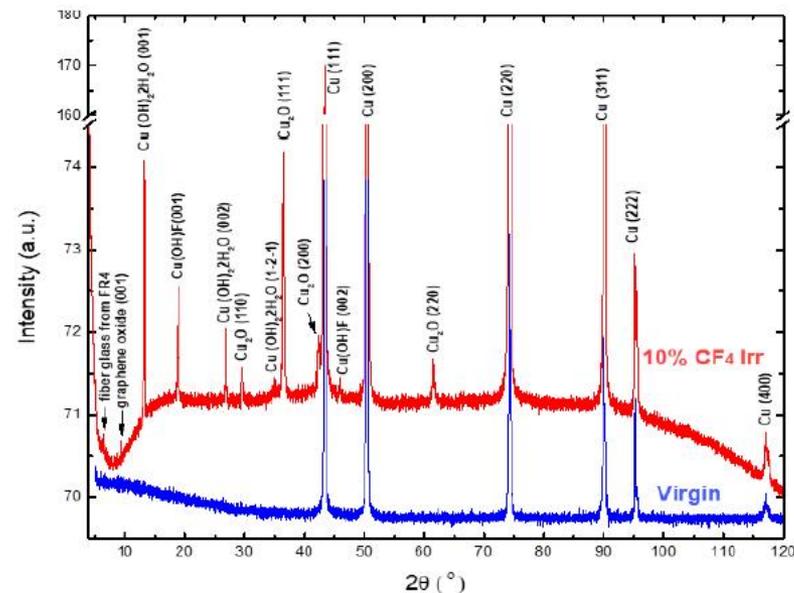
- measures the angle of the beam scattered from crystal planes thus giving the information on periodic atomic arrangements in a given material, which is used for **identification of crystal phases** in material.



Crystal phase identification



Comparison of XRD patterns of virgin and aged 10% CF₄ cathode



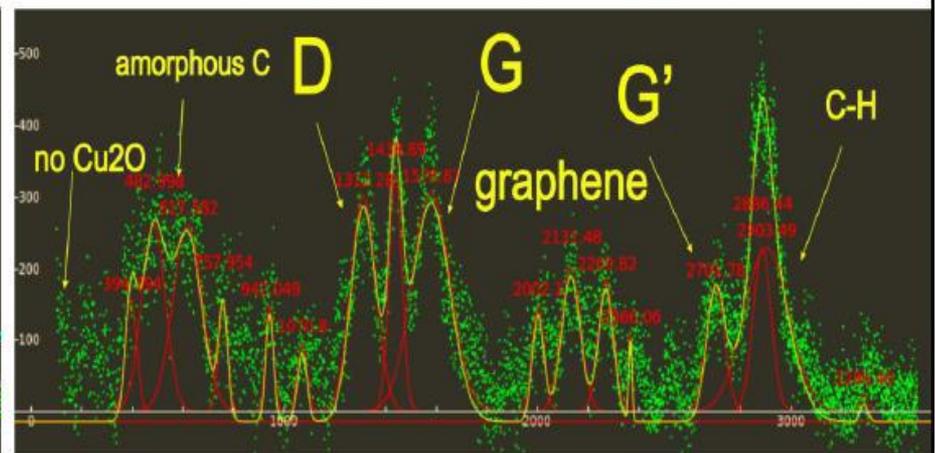
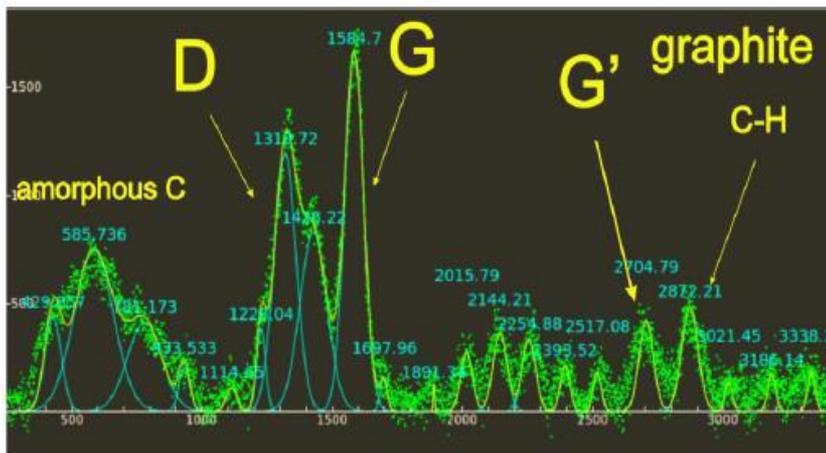
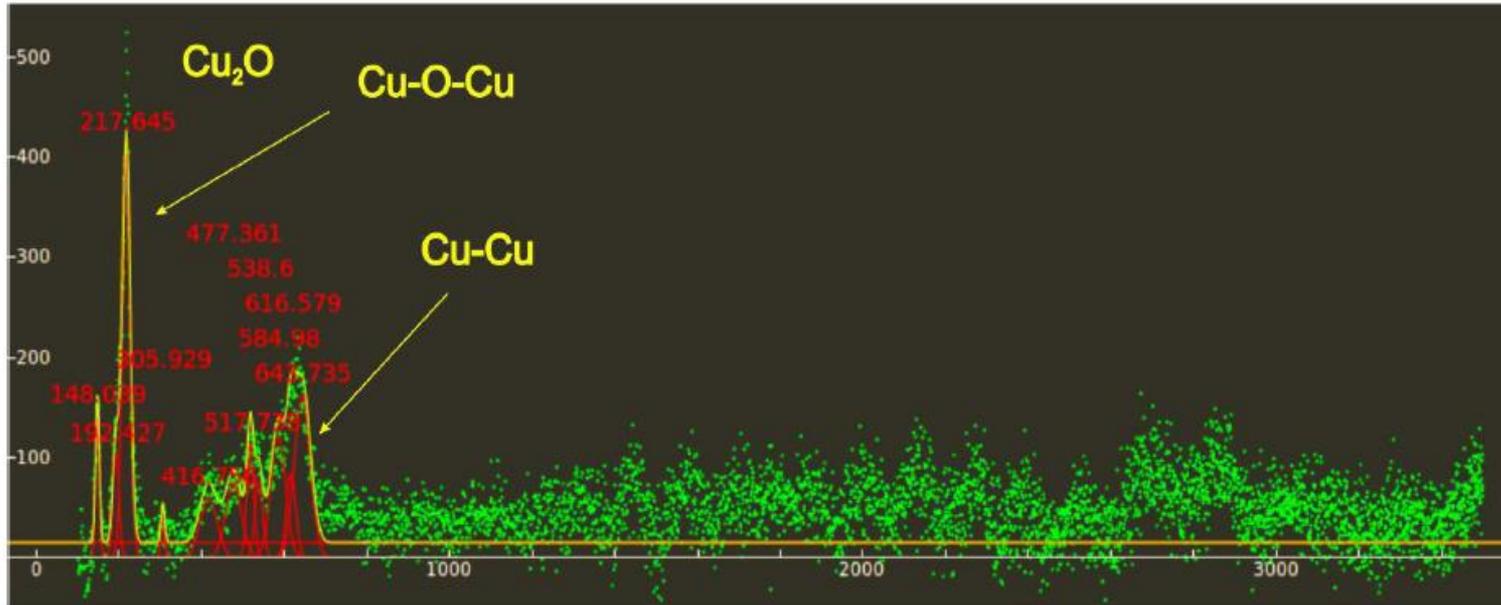
N.Begovic, O.Kovacevic, A. Radulovic

**The Institute of General and Physical Chemistry
 University of Belgrade**

Identified crystalline phases: Cu, Cu₂O, Cu(OH)₂·H₂O, Cu(OH)F



Micro-Raman Spectroscopy of different regions on cathode surface

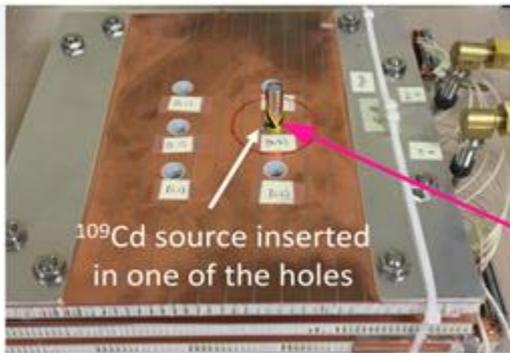
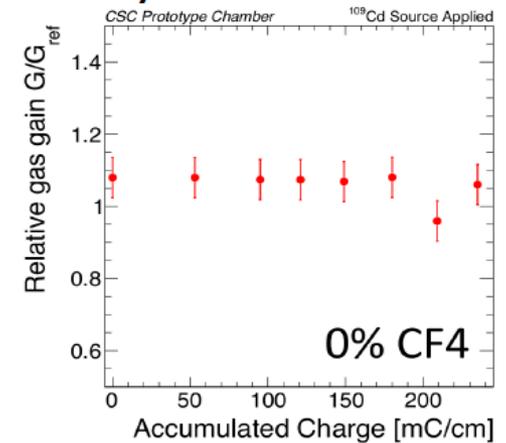
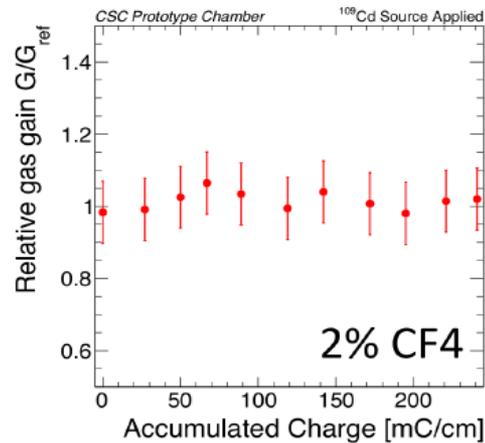
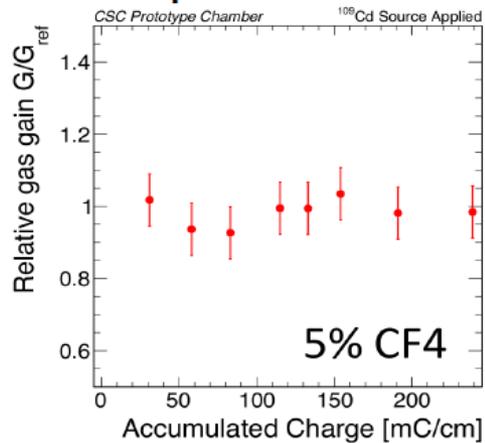


Deconvolution and assignation of vibrational modes in Raman spectra

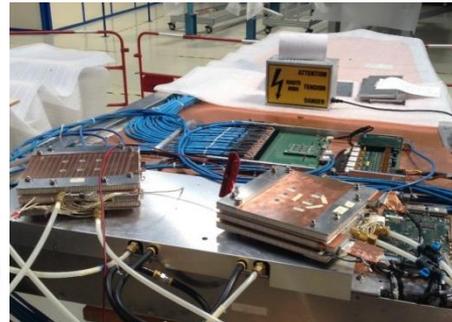
Reduction of CF4

Accelerated local irradiation of miniCSCs (ME2/1 type) with ^{90}Sr :

- 5, 2 and 0% CF4 - performed at 904 and GIF++ up to 0.24 C/cm ($1.8 \times Q_{\text{HL-LHC}}$ for ME2/1)
- 10%CF4 was performed in PNPI up to 1.3 C/cm with high acceleration factor
- **no significant performance degradation was seen up in any of these longevity tests (gas gain, dark rate and current, interstrip resistance)**
- cathode and anode surfaces were investigated after the tests (CERN, University of Belgrade, Sarov)
- cathode surface modification is seen in all cases
- **anode depositions are clearly seen for 2 and 0 %CF4 even with a naked eye**



Irradiation (^{90}Sr)



E. V. Kuznetsova



Лабораторные исследования старения прототипов МПК (CSC CMS muon system) в ПИЯФ и CERN (bld.904 stand) для газовых смесей с 5%CF₄ и 10%CF₄ показали:

- Значительное окисление поверхности катодной фольги
- Появление радиационных дефектов на меди : блистеры, кратеры, флейки
- Микропики < 2.5 микрон, шероховатость ~ 400 нм. Нити отсутствуют.
- Идентифицированы кристаллические фазы меди с высокой резистивностью:



- Основными элементами образованными на медном катоде являются **С, О и F** (не кремний !)

Но ! Ни в одном тестовом облучении в ПИЯФ и CERN , с рабочими газовыми смесями Ar /CO₂ / CF₄, содержащими CF₄ в диапазоне 0% , 2%, 5% и 10%, не обнаружено возникновения спонтанных токов Мальтер эффекта.



Исследование поверхности катода МПК из LHCb

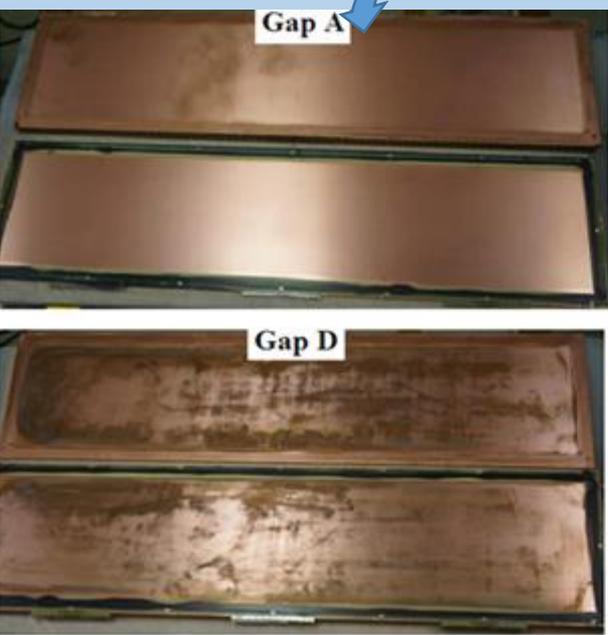
2018 г - первая доступная для исследования МПК из эксперимента !!!

Исследована многопроволочная пропорциональная камера (МПК), отработавшая в эксперименте LHCb LHC в режиме облучения $T \approx 366$ дней $\approx 3.2 \times 10^7$ s при загрузке ~ 350 Hz cm^{-2} .

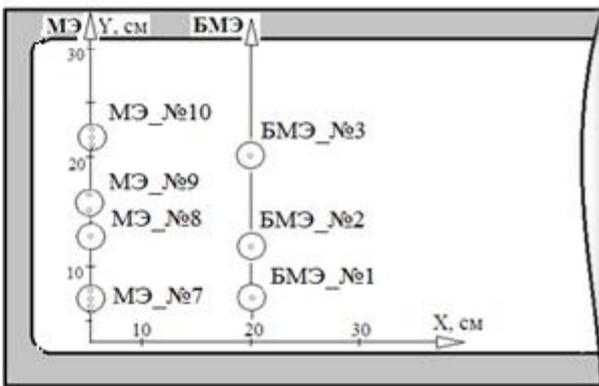
Аккумулированный заряд на проволочках анода $Q \approx 1$ mC/cm

Для сравнения: наибольшая доза в МПК LHCb $Q \approx 0.6$ C/cm. Доза на Cu-фольге катода $D \approx 1.3$ Gy

Из 4-х плоскостей: Gap A, Gap B, Gap C, Gap D. Только плоскость **Gap D** регулярно демонстрировала спонтанные самоподдерживающиеся токи на уровне 30-40 μm



Плоскость **Gap A** аккумулировала такую же радиационную дозу $D \approx 1.3$ Gy, как и остальные.
Но без HV ($Q \approx 0$ mC/cm) плазмохимическое воздействие на фольгу отсутствовало



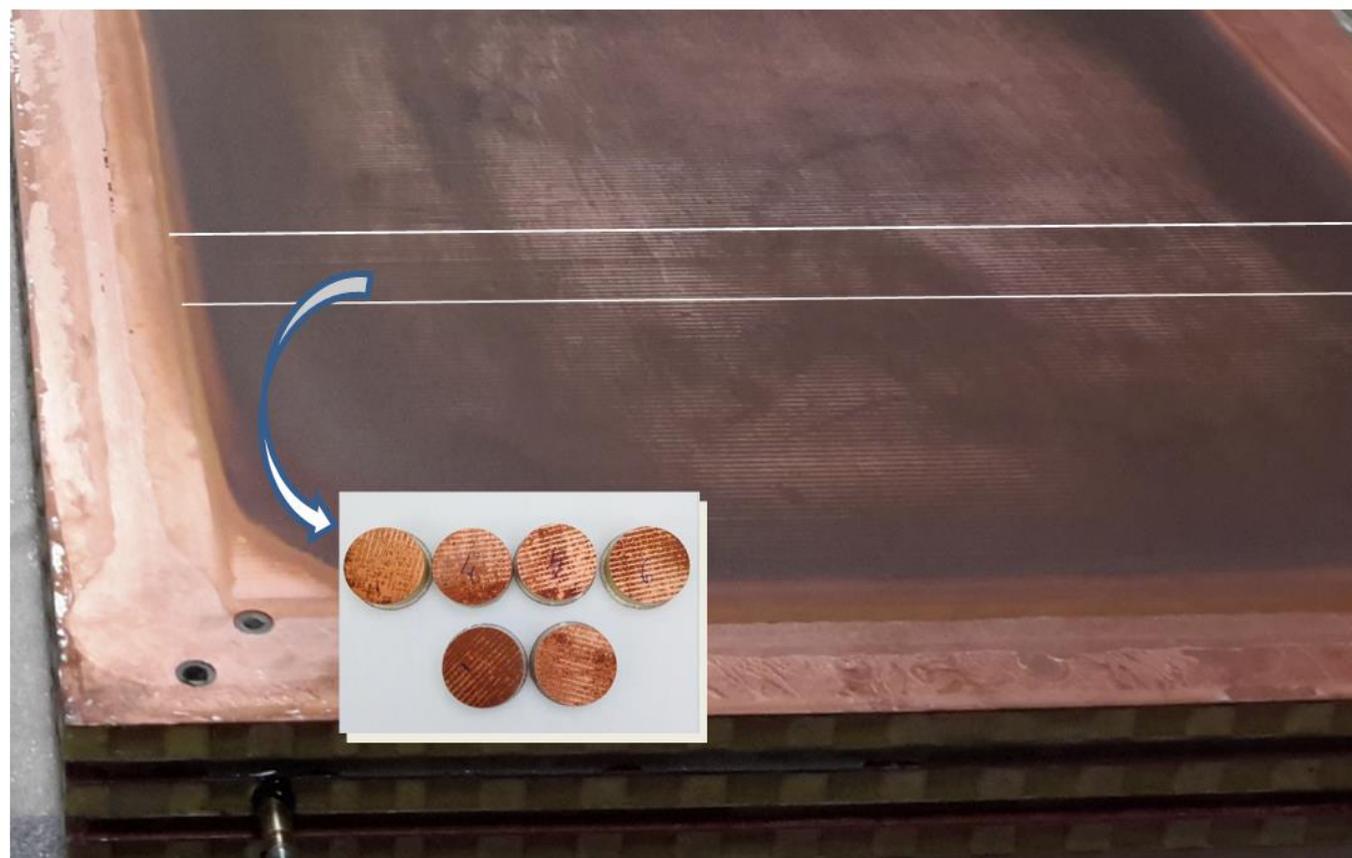
При полной засветке МПК на GIF++ по аномально высокому счету выделена зона полевой эмиссии МЭ (с точностью ~ 8 cm) на катоде

МЭ-образцы брались последовательно вдоль оси Y длиной 30 cm, параллельной анодным проволочкам.

БМЭ-образцы взяты вдоль оси Y со смещением от зоны спонтанных токов на ~ 20 cm



Исследование поверхности катода МПК из LHCb



Катодная панель МПК

Белые линии – зона, где находится центр эмиссии электронов.

Вставка внизу – снимок образцов катода со следами осадков.

Медная фольга под микроскопом выглядит рыхлой.

→ При $E_{\text{катод}} \sim 5 \text{ кВ см}^{-1}$ на катоде происходит хемоабсорбция продуктов диссоциации компонент газовой смеси CO_2 , CF_4

→ вдоль анодных проволочек на катоде образуются полосы осадков

→ источник образований – плазмохимия в газовом разряде на аноде !

МПК демонтированная из мюонного детектора LHCb

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.*

Исследование поверхности катода МПК из LHCb

Центром автоэмиссии электронов в МПК могут быть:

1) отдельные микропики на поверхности Cu-фольги катода (35 мкм , $\rho_{\text{Cu}} = 8.96 \text{ г/см}^3$) с аспектным отношением – $f \geq 100$ (коэффициент увеличения электрического поля на острие);

Исследование на ОМ, SEM & AFM микроскопах не обнаружило. AFM скан образцов: высота микропиков на Cu-фольге $h_{\text{max}} \sim 1 \text{ мкм}$ шероховатость $S \sim 0.4-0.5 \text{ мкм}$.

2) пленочные образования из кремния-Si или его окислов- Si_2O (толщиной $10 - 20 \text{ ангстрем}$);

Напряженность поля в МПК $E \approx 5 \text{ кВ/см}$, а для Si и Si_2O : $E_{\text{порог}} \sim 67 \text{ кВ/см}$.

3) образование островковых образований из высокорезистивных окислов меди Cu_2O ($\rho_{\text{Cu}_2\text{O}} = 6.1 \text{ г/см}^3$).

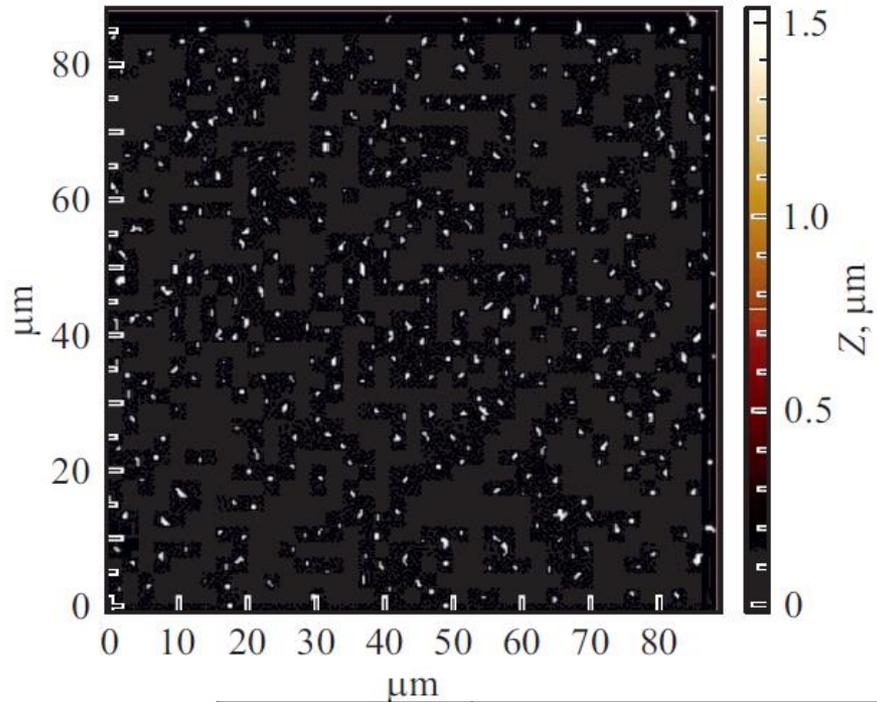
Напряженность поля у катода $E \approx 5000 \text{ В/см}$, а для автоэмиссии из Cu_2O требуется $E_{\text{порог}} \geq 50 \text{ кВ/см}$. Для образования нитей Cu_2O нет температурных процессов $T \sim 600 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$

4) образование углеродных наноструктур - результат абсорбции продуктов диссоциации CO_2 и CF_4 из лавин на аноде радикалов (CF_n^\bullet , F^\bullet , O^\bullet , CO^\bullet и др.) и положительных ионов (CF_3^+ , F^+ , CO_2^+ , O^+ и др.).

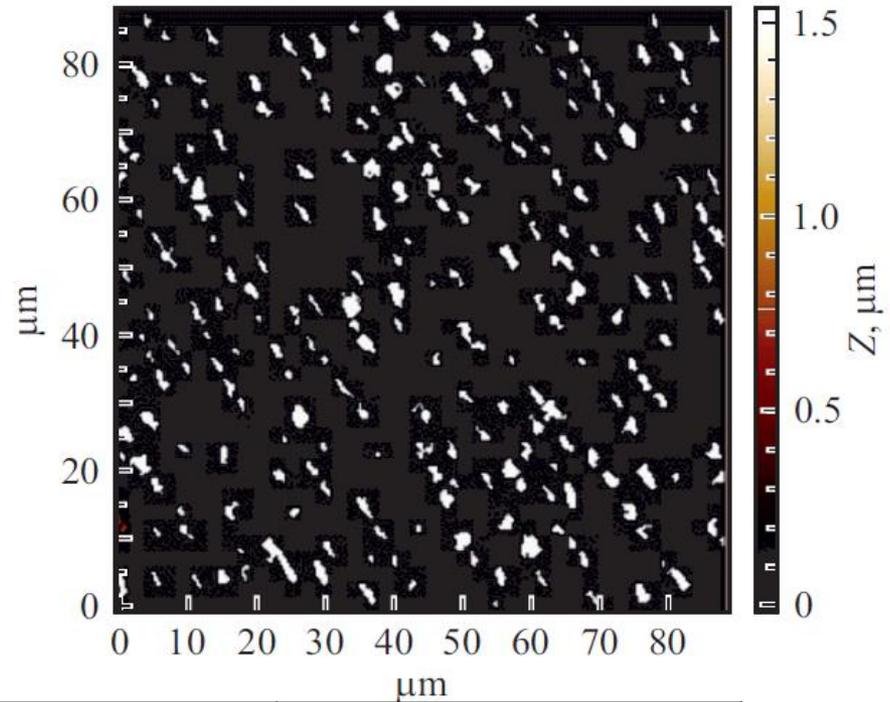
Наиболее вероятный механизм возникновения спонтанных токов - эмиссия электронов наноуглеродными структурами. Указанием является совпадение величин тока эмиссии с катода в МПК: $0.5 - 3 \text{ нА}$ и автоэмиссионных эмиттеров целевым способом полученных из наноуглерода в лабораториях: $0.5 - 10 \text{ нА}$



Sample №5
ME manifestation zone



Sample №2
Zone without ME

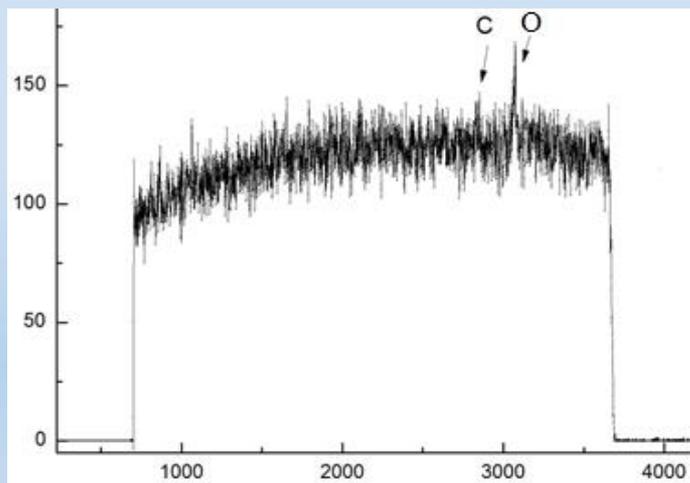
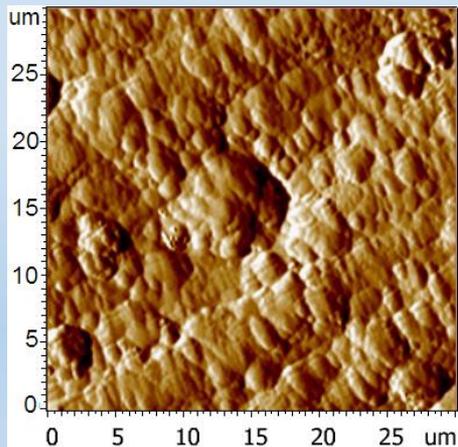


Samples	Topography			Phase contrast	
	Number of micropeaks	Average height, μm	Transverse dimation, μm	Number of micropeaks	Transverse dimation, μm
№2 (БМЭ)	230	1.1	1.2	286	0.4
№5 (МЭ)	415	0.6	0.5	455	0.5
Laboratory test sample E-D	122	2.3	0.6	295	0.35



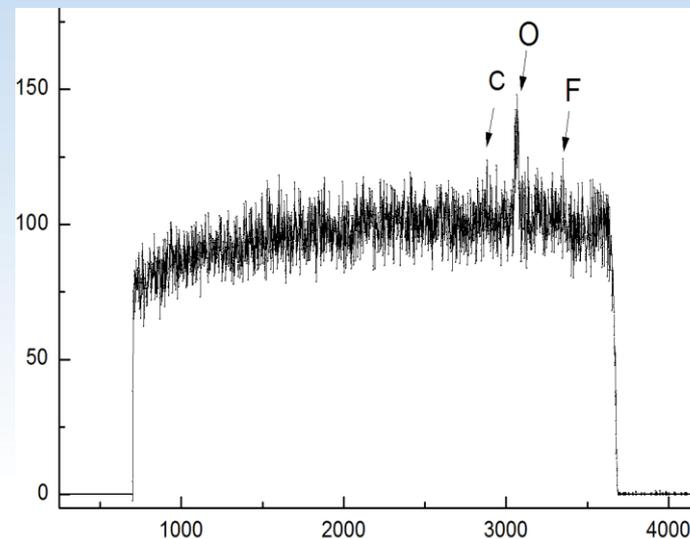
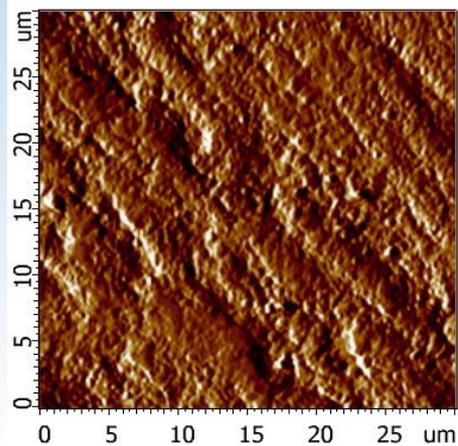
AFM + RBS элементный анализ поверхности

БМЭ - образец

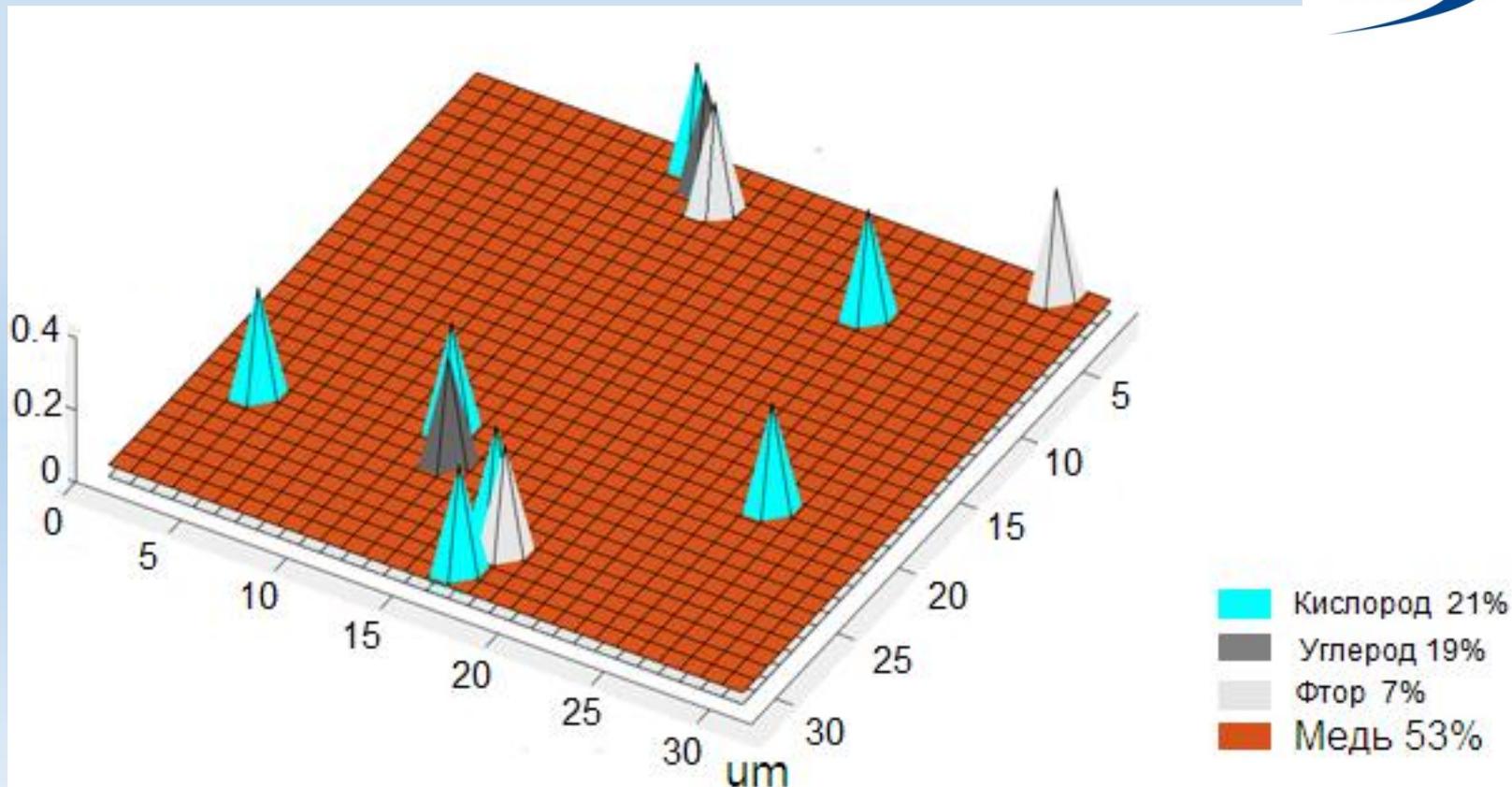


Элемент	1 слой ат. %	2 слой ат.,%	3 слой ат., %
Cu	15	25	100
O	80	65	-
C	5	10	-
Толщина, μm	0.2	1.8	23

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



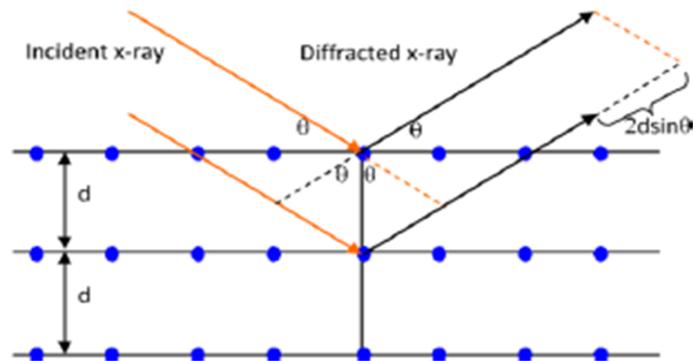
Элементный анализ поверхности катода (установка «Микрозонд» – ЭГП-10) методом RBS (Rutherford backscattering spectroscopy)

Пучок протонов

- энергия 3 МэВ (ток на образце 0.01 нА; размер – 30 × 30 мкм),
- шаг сканирования 5 мкм по поверхности.

Исследование поверхности катода МПК из LHCb

XRD analysis of cathode samples



Identified crystalline phases by XRD:

A1 – Cu, Cu₂O, Cu(OH)₂*H₂O, Cu(OH)F, SiC

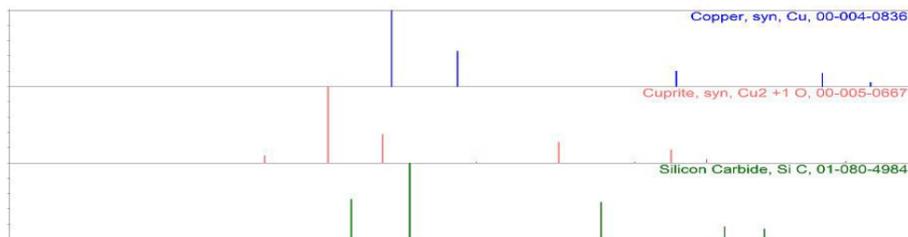
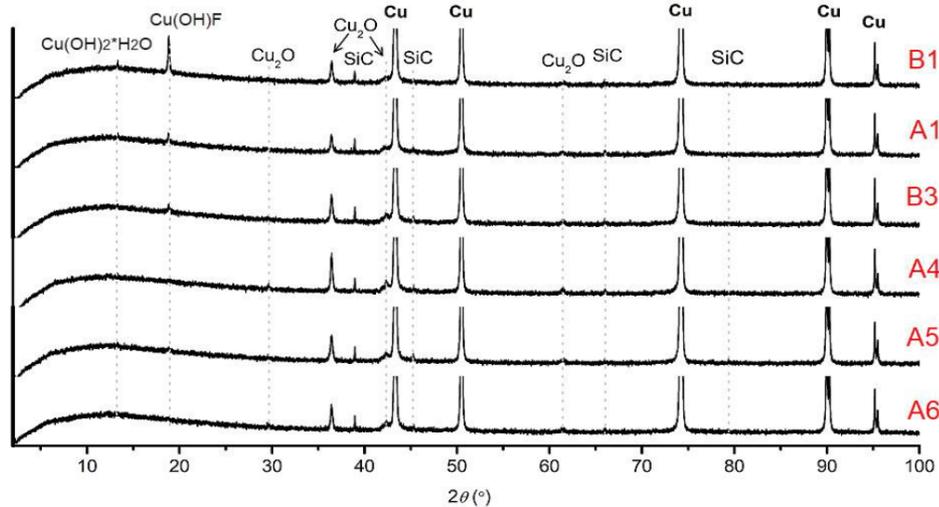
A4 – Cu, Cu₂O, SiC

A5 – Cu, Cu₂O, Cu(OH)F, SiC

A6 – Cu, Cu₂O, SiC

B1 – Cu, Cu₂O, Cu(OH)₂*H₂O, Cu(OH)F, SiC

B3 – Cu, Cu₂O, Cu(OH)F, SiC



Источники эмиссии и АСМ измерения на поверхности катода

Измерение электрофизических свойств поверхности

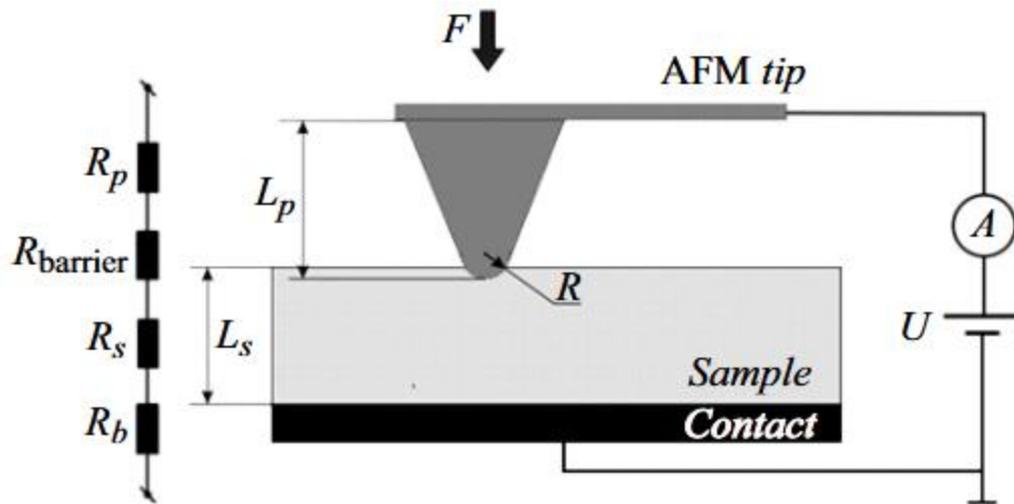
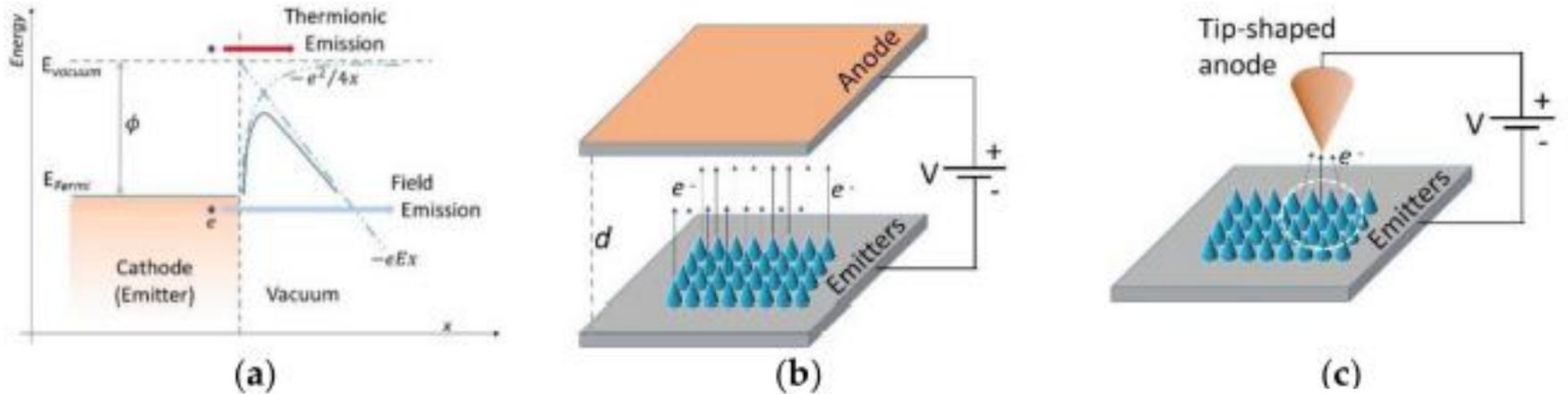


Рис. 1. Схематическое изображение определения электрических параметров полупроводниковых материалов методом АСМ ОСР.

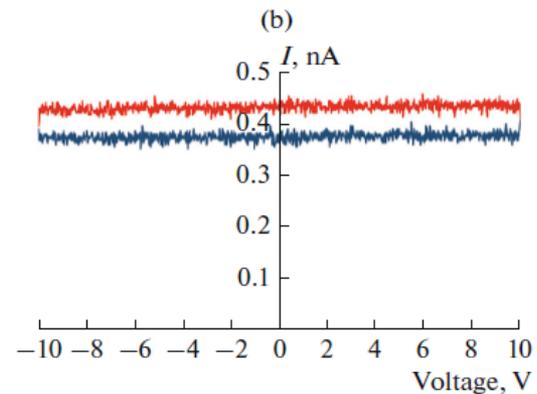
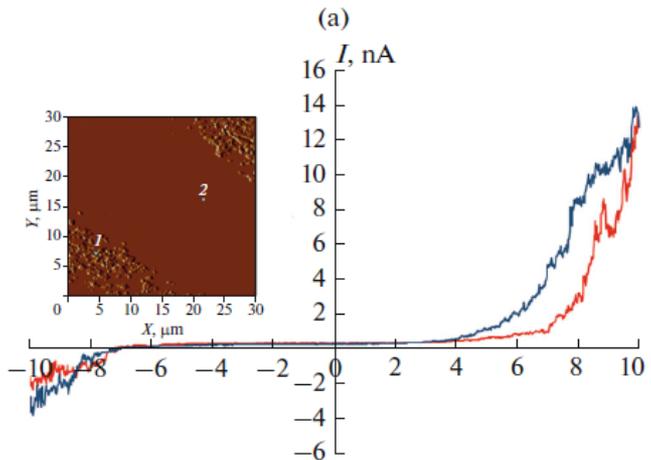
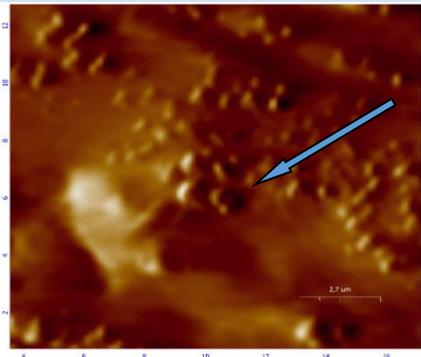
Сканирование напряжения в контактном режиме АСМ велось в диапазоне от -10 В до +10 В с шагом 0.02 В. Длительность измерения в точке составляла 5 миллисекунд.

Источники эмиссии и АСМ измерения на поверхности катода

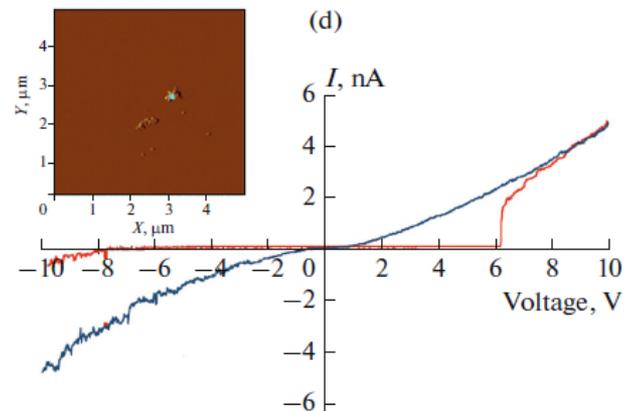
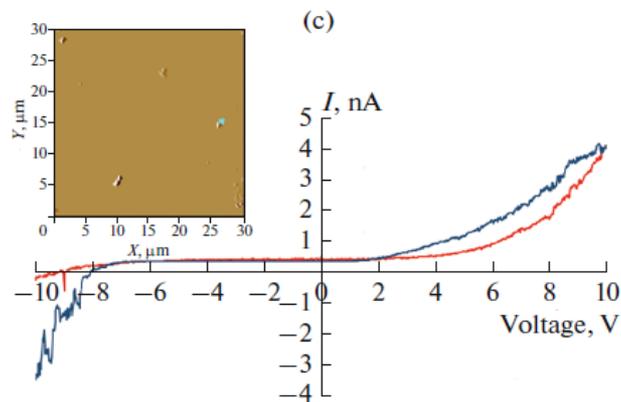
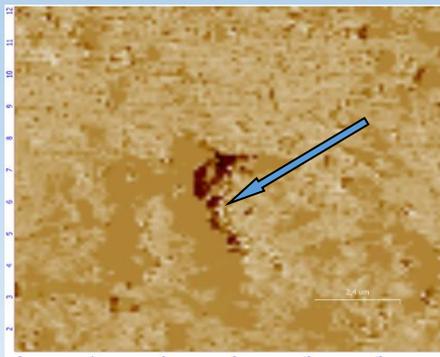
Корреляция дефектов топографии, фазы, токов растекания и ВАХ на катоде



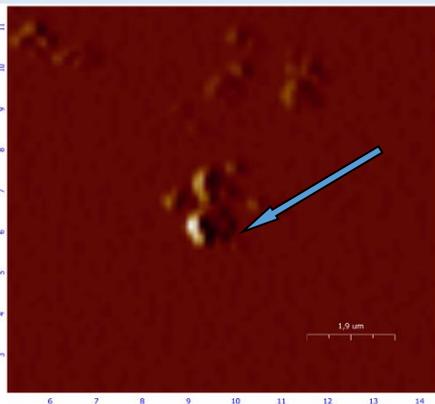
Топография



Фаза



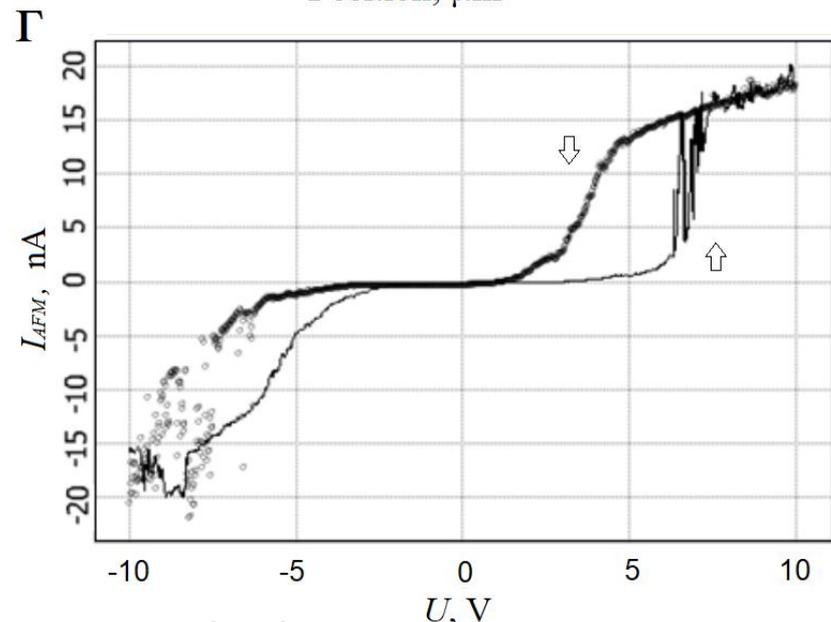
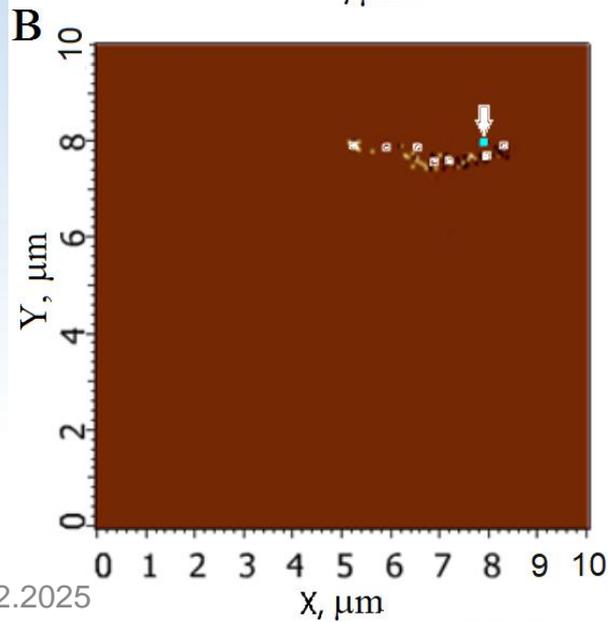
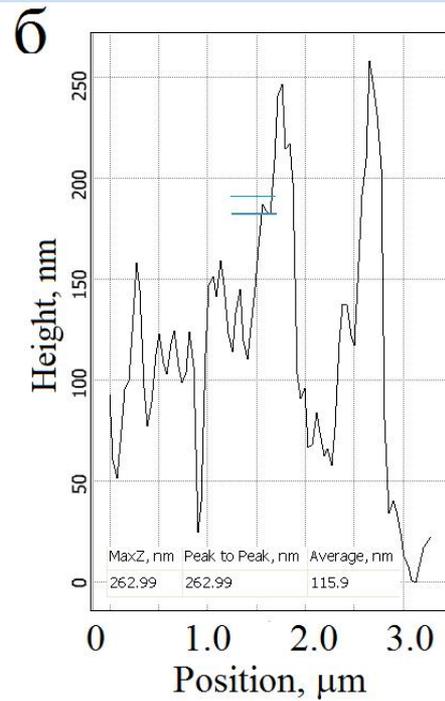
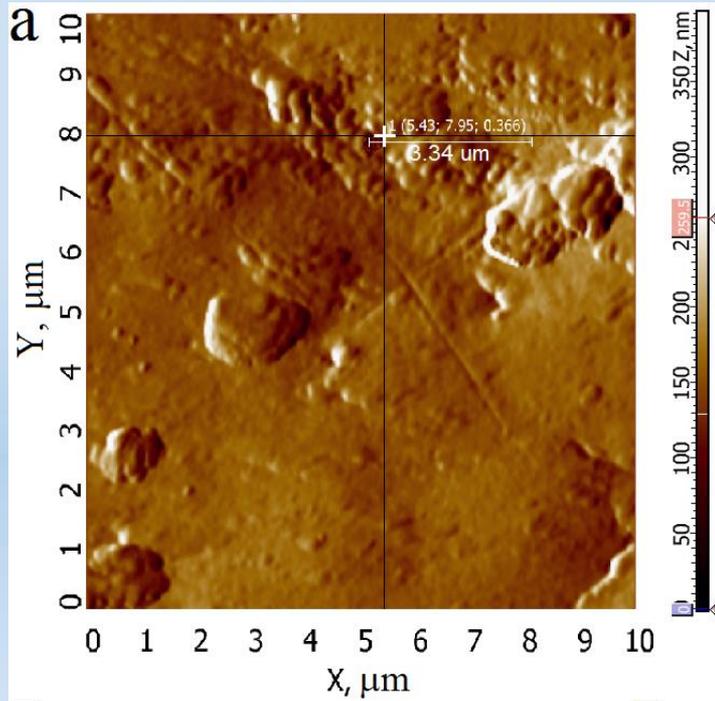
Токи



Точка «расщепления» кривых $V \sim 2-4$ V при глубине проникновения углерода $L \sim 2 \mu\text{m}$ позволяет оценить поле $E \sim 10 - 20$ kV/cm (или $E \sim 1-2$ V/ μm), появления эмиссии e^- в точке измерения.

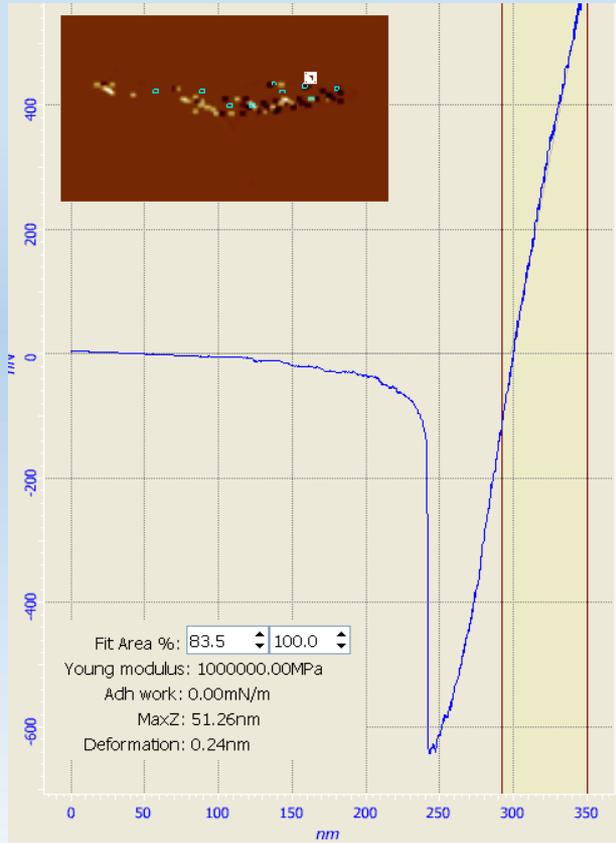
E совпадает с $E_{lab} \sim 1-5$ V/ μm - порогом возникновения низкопороговой эмиссии электронов в нанотрубчатых эмиттерах, создаваемых в лабораториях.

Источники эмиссии и АСМ измерения на поверхности катода

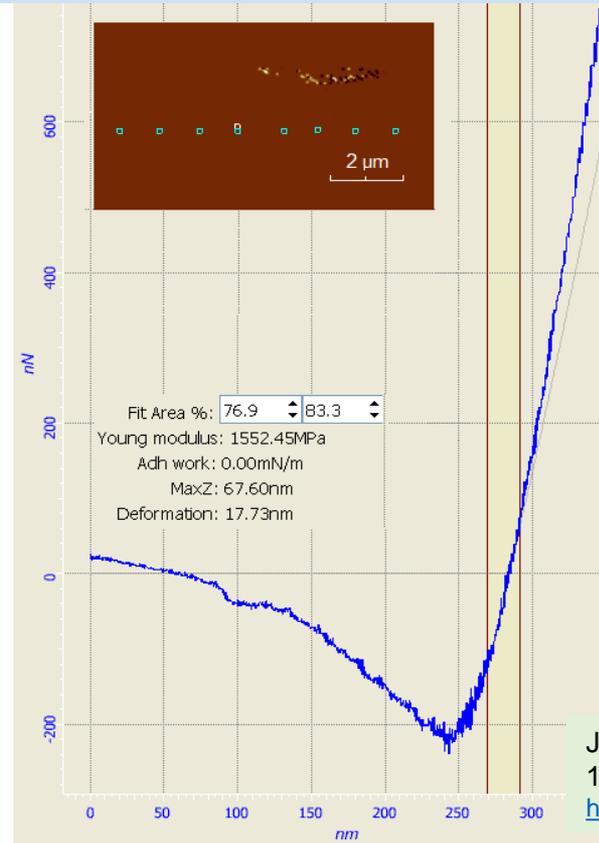




Контактная мода АСМ Изображения силовых кривых на поверхности катода



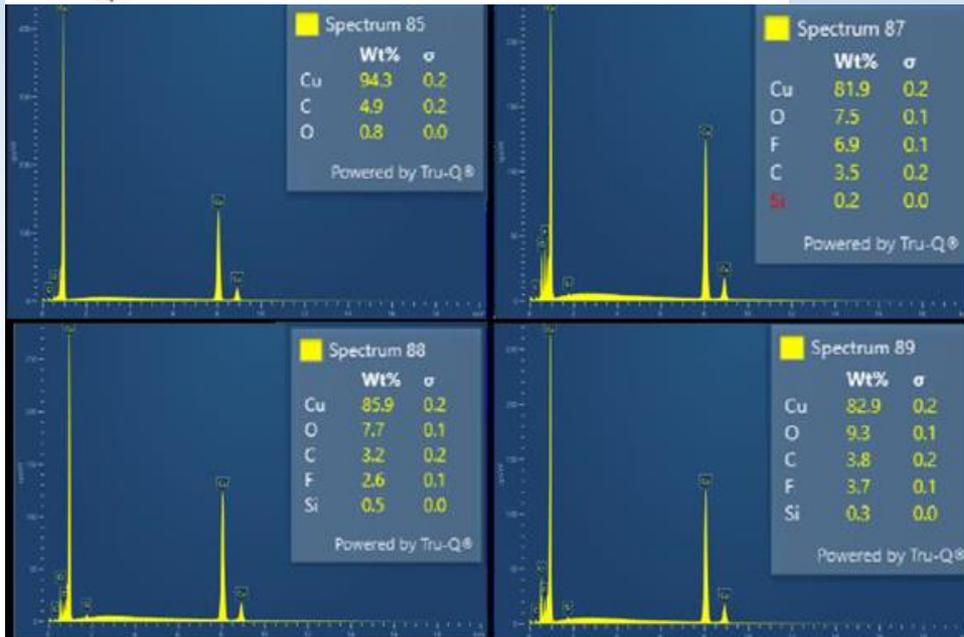
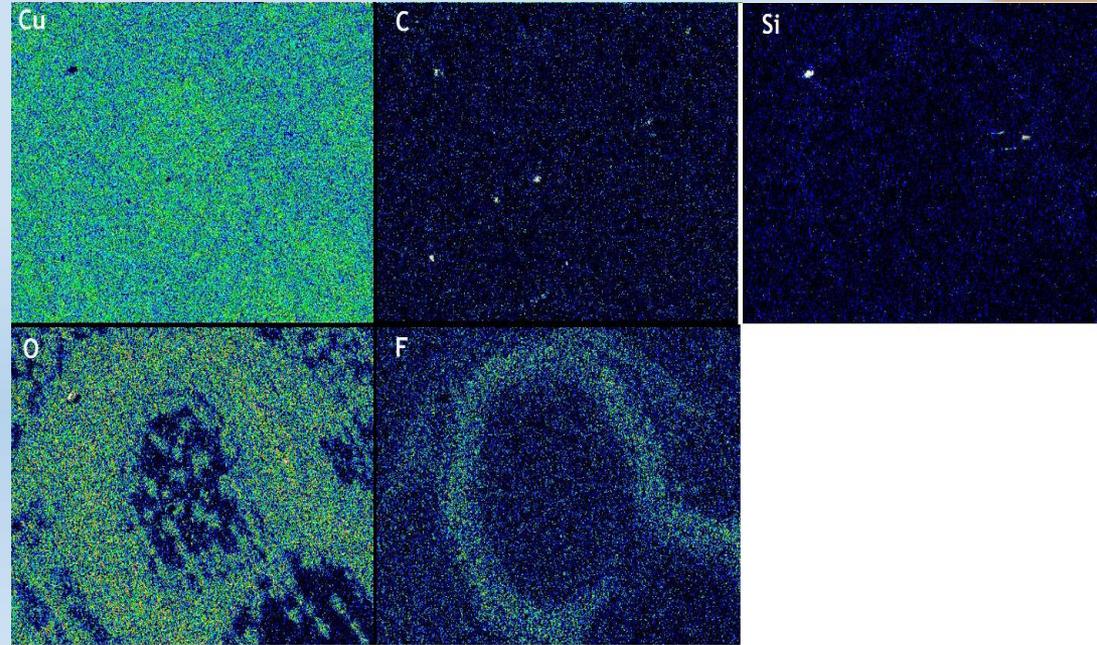
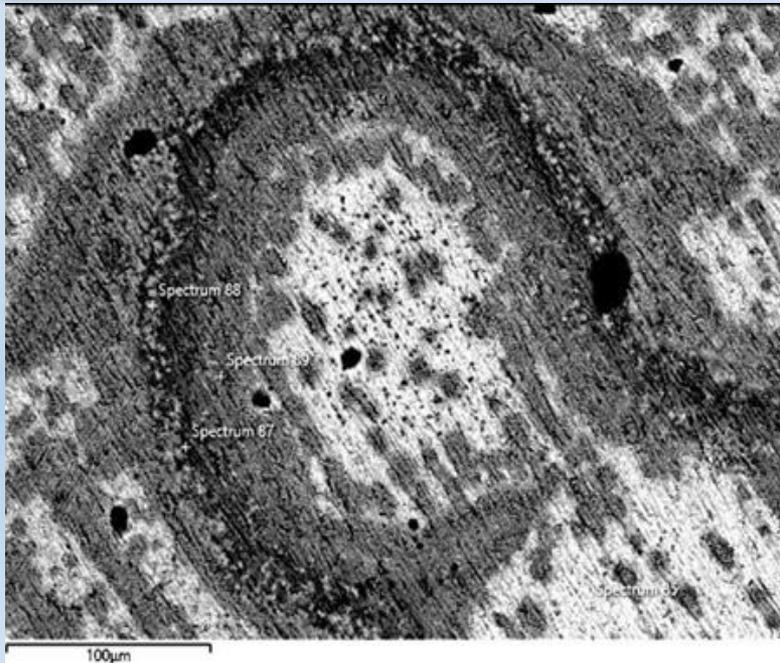
Силовая кривая в точке (белый квадрат на вставке), находящейся в области повышенных токов индукции. Модуль упругости 1.0×10^{12} Pa.



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

ЯДРО-2024, Дубна

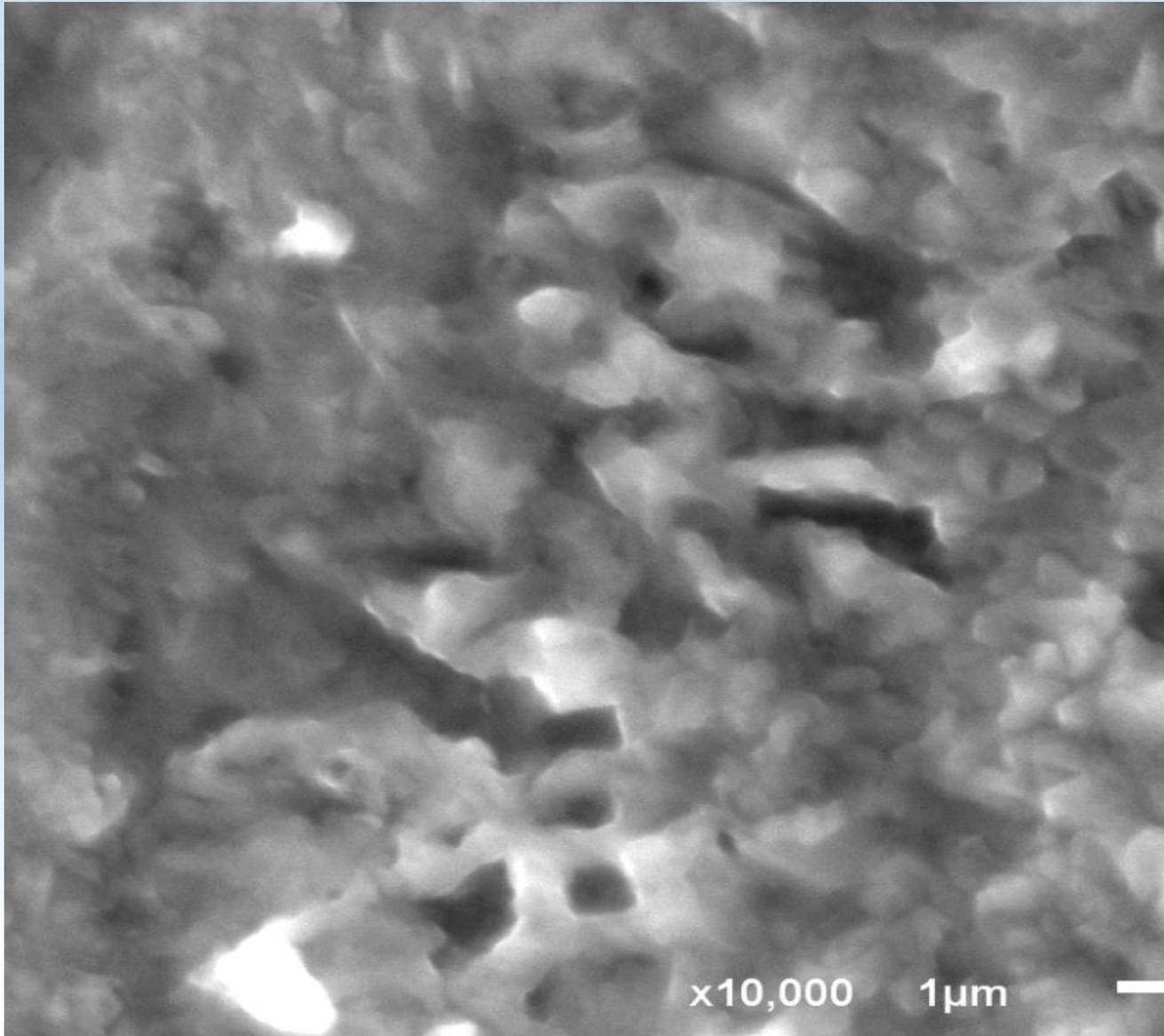
Jin-Wu Jiang // Physical Review B 80, 113405 2009.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.0906.5237>



Вверху – SEM изображение и EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy analysis) карта распределения элементов в поле микроскопа

Внизу – EDS карта элементов на поверхности

Источники эмиссии и SEM/EDS измерения на поверхности катода



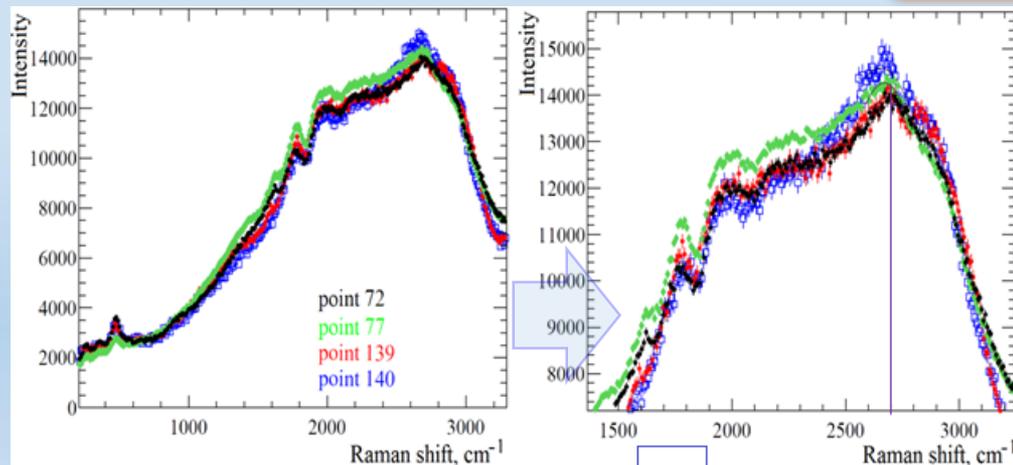
Поверхность на
склоне
кратерного
образования



Вверху слева: диапазон 0-3200 cm^{-1} , спектры в точках, где были обнаружены наноглеродные 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 наноглеродных образований т.е. возможного центра спонтанной эмиссии электронов



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

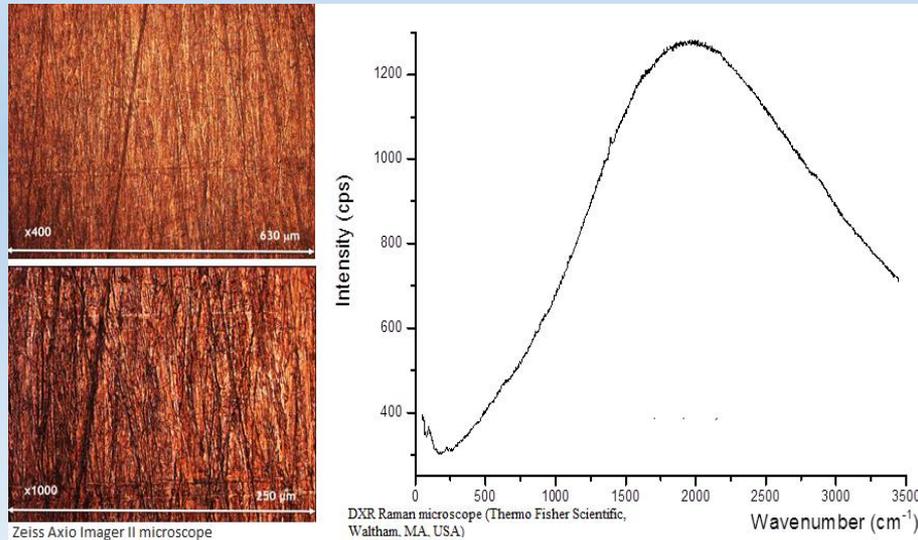
G. E. Gavrilov, ... A. A. Dzyuba, ... O. E. Maev, and M.V. Suyasova "Searching for Point Emission Centers by Atomic Force Microscopy Methods on the Cathode of a Multi-Wire Proportional Chamber", *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2024, Vol. 88, No. 8, pp. 1271–1278.



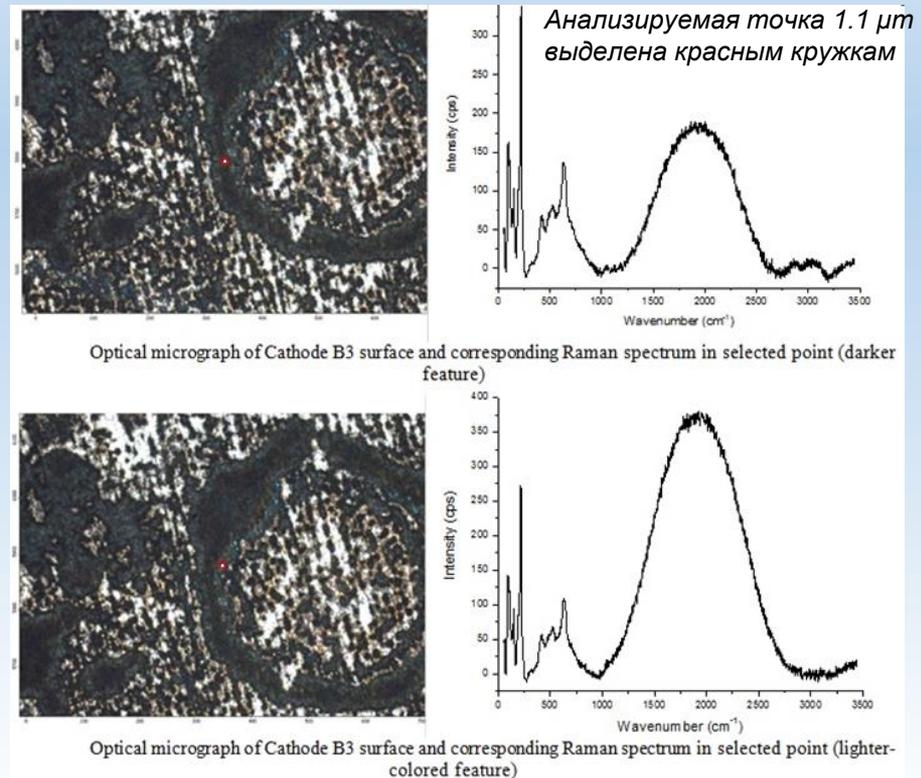
Рамановская спектроскопия поверхности

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



Оптическое изображение ($\times 400$, $\times 1000$) медного покрытия FR4 (слева) и рамановский спектр поверхности контрольного образца FR4 (справа).



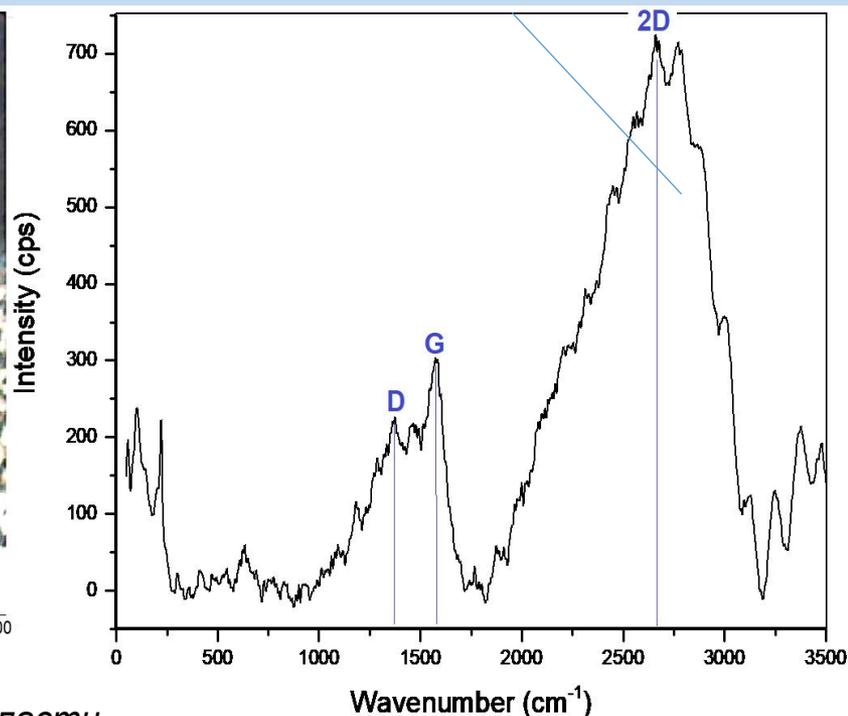
Оптическое изображение ($\times 500$) поверхности медного покрытия катода (слева) после работы MWPC в LHCb и рамановский спектр (справа) в точках дефектов



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 $\times 500$. Анализируемая точка 1.1 μm выделена красным кружком.



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

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

Заключение

Комплексное исследование образцов катода из МПК показало, что источником МЭ являются наноуглеродные графеноподобные структуры, формирующие в детекторе 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;
- ❑ появление центров стабильной эмиссии обусловлено длительной работой системы МПК в условиях облучения, поэтому их изучение в лабораторных условиях затруднено;
- ❑ длительность эмиссии наноструктуры в детекторе может достигать 10^8 секунд, что в десятки раз больше, чем у известных на сегодня низкопороговых эмиттеров;
- ❑ центры эмиссии электронов стабильны в режиме максимальных токов при тренировках МПК, которые длятся от недели до двух месяцев.

Перспективы:

Известно, что быстрое (~4-5 часов) подавление эмиссионных токов достигается высоковольтной тренировкой МПК в газовой смеси $\text{Ar}(38\%)/\text{CO}_2(55\%)/\text{CF}_4(5\%)/\text{O}_2(2\%)$ (F.P. Albicocco, Long-term operation of the multi-wire-proportional-chambers of the LHCb muon system, *Journal of Instrumentation* (2019), JINST 14 P11031)

Необходимо исследовать возможность профилактики МЭ в эксперименте.

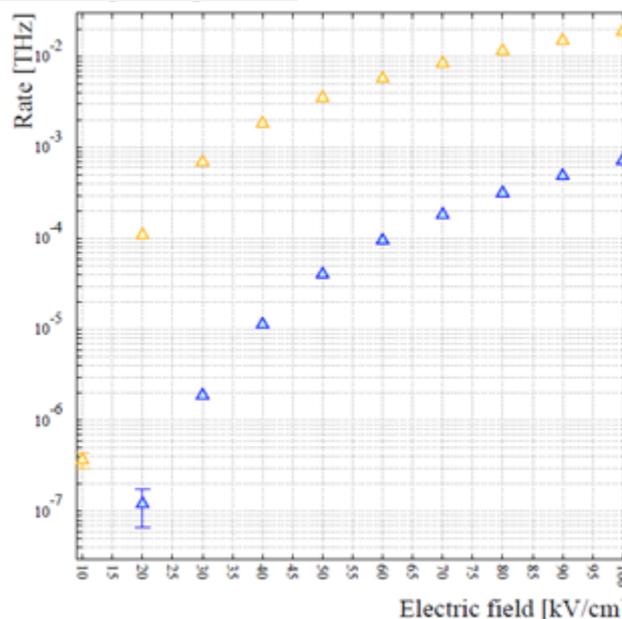
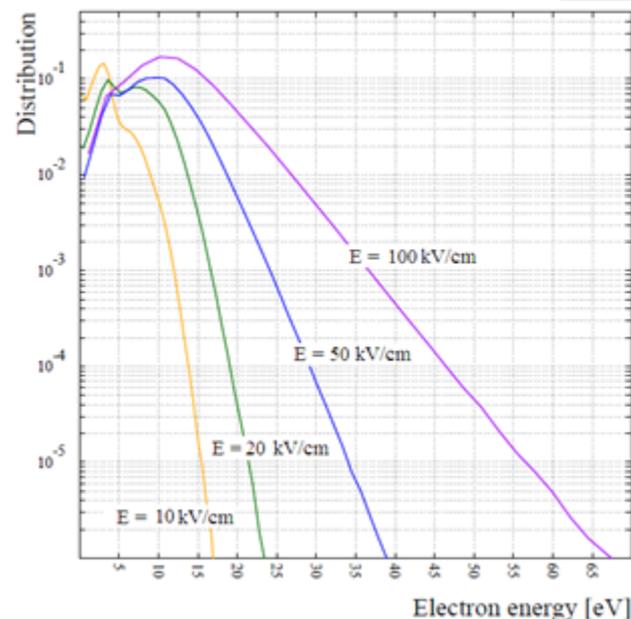
Публикации по теме :

1. Бузоверя М.Э., Завьялов Н.В., Карпов И.А., Ткаченко М.И., [Г.Е. Гаврилов*](#), [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. M.E. Buzoverya, N.V. Zavyalov, I.A. Karpov, M.I. Tkachenko, A.A. Dziuba, [D.A. Maisuzenko](#), [G.E. Gavrilo](#), [S.A. Nasybulin](#) and M.V. Grechkina. “Investigatiion of the Cathode Plane Radiation Damage in the Prototypes of Multiwire Proportional Chamber from the CMS Experiment”. **Physics of Atomic Nuclei**, 2019, V. 82, №9, P. 329-340. ISSN 1063-7788.
 2. [Г.Е. Гаврилов*](#), [Маев О.Е.](#), [Майсузенко Д.А.](#), [Насыбулин С.А.](#), «Восстановление функциональности мюонных камер детектора LHCb при возникновении в них Мальтер - эффекта» **Ядерная физика и инжиниринг**, том 9, №4, с. 358-366, 2018. DOI: 10.1134/S2079562916040072. [G. E. Gavrilo](#), [O.E. Maev](#), [D. A. Maysuzenko](#) and [S.A. Nasybulin](#), “Recovery of LHCb Detector Muon Chambers for Malter Effect Elimination”. **Physics of Atomic Nuclei** 2019, Vol. 82 №.9, 1273-1280
 3. F.P. Albicocco, ...[G. Gavrilo](#),... [O. Maev](#), [D. Maysuzenko](#),... [S. Nasybulin](#), [P. Neustroev](#), “Long-term operation of the multiwire proportional chambers of the LHCb muon system”, **Journal of Instrumentation** (2019), **JINST 14 P11031** <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/11/P11031>
 4. [Г.Е. Гаврилов*](#), М.Э. Бузоверя, [А.А. Дзюба](#), И.А. Карпов, «Микроструктурный анализ образцов катодных стриповых камер после ресурсных испытаний». **Известия РАН. Серия физическая**, 2020, том 84, №10, с. 1495–1501. [G. E. Gavrilo](#), [M. E. Buzoveria](#), [A. A. Dziuba](#), I. A. Karpov “Microstructural Analysis of Cathode Strip Chamber Samples after Lifetime Tests”, **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics**, 2020, Vol. 84, No. 10, pp. 1280–1285. © Allerton Press, Inc., 2020.
 5. [Г. Е. Гаврилов](#), М. Э. Бузоверя, И. А. Карпов, М. В. Таценко, М. В. Ткаченко, [А. А. Дзюба](#), [О. Е. Маев](#), П. В. Середин, Д. Л. Голощاپов «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. [G. E. Gavrilo](#) *, М. Е. Buzoverya, I. A. Karpov, M. V. Tatsenko, M. V. Tkachenko, [A. A. Dzyuba](#), [O. E. Maev](#), P. V. Seredin, and D. L. Goloshchapov “Comprehensive Study of a Proportional Chamber Cathode’s Surface after Its Operation in an Experiment at the Large Hadron Collider”, **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics**, 2022, Vol. 86, No. 8, pp. 956–961. © Allerton Press, Inc., 2022.
 6. М.Э. Бузоверя, [Г.Е. Гаврилов](#), [О.Е. Маев](#) «Исследование радиационной эрозии в газоразрядном детекторе с помощью атомно-силовой микроскопии» **Журнал технической физики**, 2021, том 91, вып. 2
M.E. Buzoveya, [G.E. Gavrilo](#), and [O.E. Maev](#) “Investigation of Radiation Erosion in a Gas Discharge Detector by Atomic-Force Microscopy” **Technical Physics**, 2021, Vol. 66, No. 2, pp. 356–366. © Pleiades Publishing, Ltd., 2021.
 7. A.A. Arkhipov, M. E. Buzoverya, I. A. Karpov, T.A. Konovalova, [G.E. Gavrilo](#) *, [A. A. Dzyuba](#), [O. E. Maev](#), and M.V. Suyasova “Nanostructured Emmision Current Sources in Multiwire Proportional Chambers”, **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics**, 2023, Vol. 87, No. 11, pp. 1737–1745. © Pleiades Publishing, Ldt 2023.
 8. [G. E. Gavrilo](#), M. E. Buzoverya, A.A. Arkhipov, [A. A. Dzyuba](#), I. A. Karpov, [O. E. Maev](#), and [M.V. Suyasova](#) “Searching for Point Emission Centers by Atomic Force Microscopy Methods on the Cathode of a Multi-Wire Proportional Chamber”, **Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics**, 2024, Vol. 88, No. 8, pp. 1271–1278. © Pleiades Publishing, Ldt 2024.
- [Г.Е. Гаврилов](#), М.Э. Бузоверя, А.Ю. Архипов, А.А. Дзюба, И.А. Карпов, [О.Е. Маев](#), [М.В. Суясова](#) «Поиск точечных эмиссионных центров методами атомно-силовой микроскопии на катоде многопроволочной пропорциональной камеры», **Известия Российской академии наук. Серия физическая № 8**, том 88, 2024. Принята в печать



CSC – oxygen & CO₂⁺ generation

Magboltz & GARFIELD simulation for Ar/CO₂/CF₄ :



Источник кислорода, окисляющего поверхность катода, – диссоциация CO₂ в лавине у анодной проволочки

Electron impact reactions considered for the reduced kinetic model.

Process	Reaction
CO ₂ Ionization	$e + \text{CO}_2 \rightarrow e + e + \text{CO}_2^+$
CO ₂ Ionization from CO ₂ [*]	$e + \text{CO}_2^* \rightarrow e + e + \text{CO}_2^+$
CO Ionization	$e + \text{CO} \rightarrow e + e + \text{CO}^+$
O Ionization	$e + \text{O} \rightarrow e + e + \text{O}^+$
O ₂ Ionization	$e + \text{O}_2 \rightarrow e + e + \text{O}_2^+$

$e + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CO}_2^+$	13.8 eV,
CO^+	19.5 eV,
O^+	19.1 eV,
C^+	27.8 eV,
CO_2^{++}	37.4 eV,
C^{++}	51.2 eV,
O^{++}	54.2 eV.

K. Anzai, H. Kato et al., Cross section data sets for electron collisions with H₂, O₂, CO, CO₂, N₂O and H₂O // [The European Physical Journal D](#) volume 66, Article number: 36 (2012)

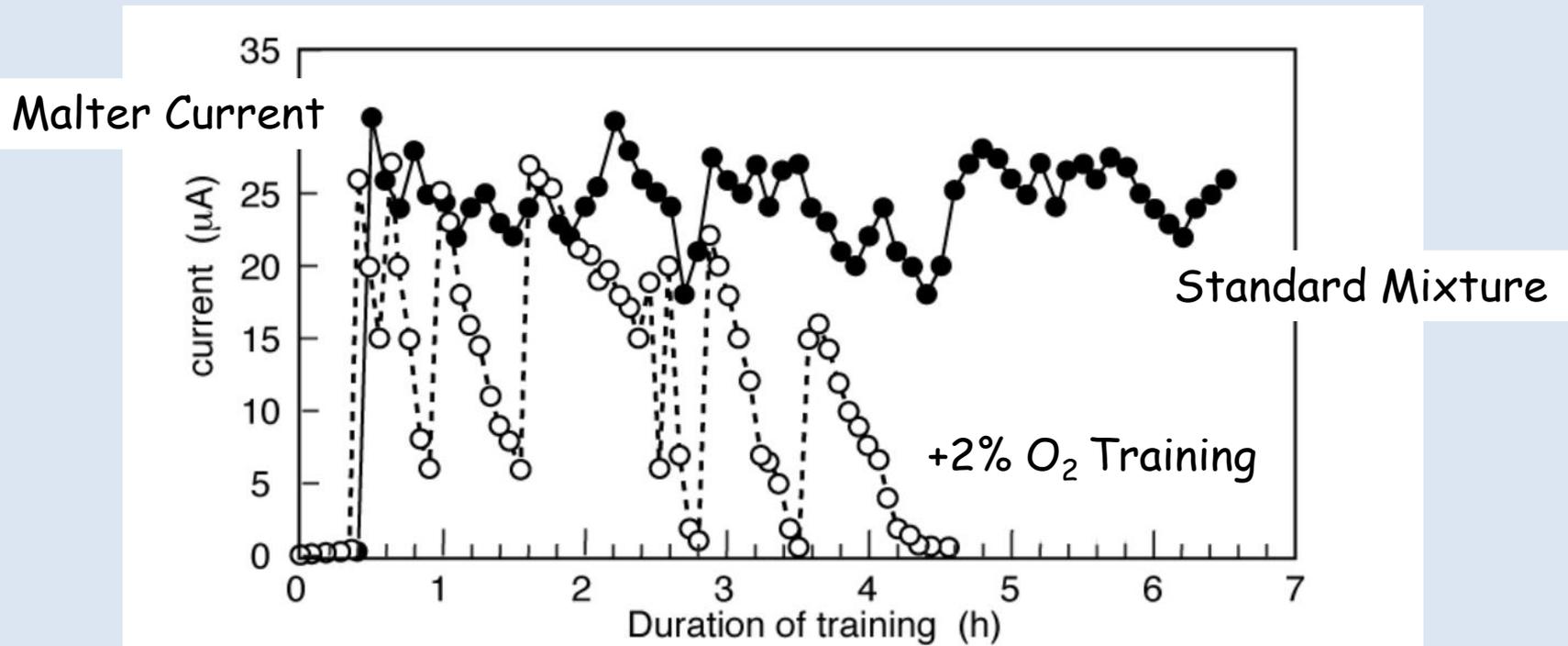
Yukikazu Itikawa, Cross Section for Electron Collisions With Carbon Dioxide // *J. Phys. Chem. Ref. Data*. Vol.31, N. 3, 2002

LHCb Muon Chambers : ~ 1400 MWPC with Ar-CO₂-CF₄

Operated for 9 years without gain reduction

~ 20% MWPC developed high current and HV trips, attributed to Mather effect on Cathodes

TRAINING : Reduction of Mather Current Adding O₂ to Ar-CO₂-CF₄



F. P. Albicocco et al, JINST 14(2019)P11031