

Формирование и применение вторично эмиссионных сигналов в РЭМ

В.В. Казьмирук

Вторично эмиссионные сигналы в РЭМ

1. Формирование вторично эмиссионного сигнала в РЭМ

- шумовые характеристики сигнала**
- контраст сигнала**
- модель формирования сигнала от микрорельефа поверхности**

Контраст сигнала при низковольтном режиме РЭМ

2. Детектирование вторично эмиссионного сигнала в РЭМ

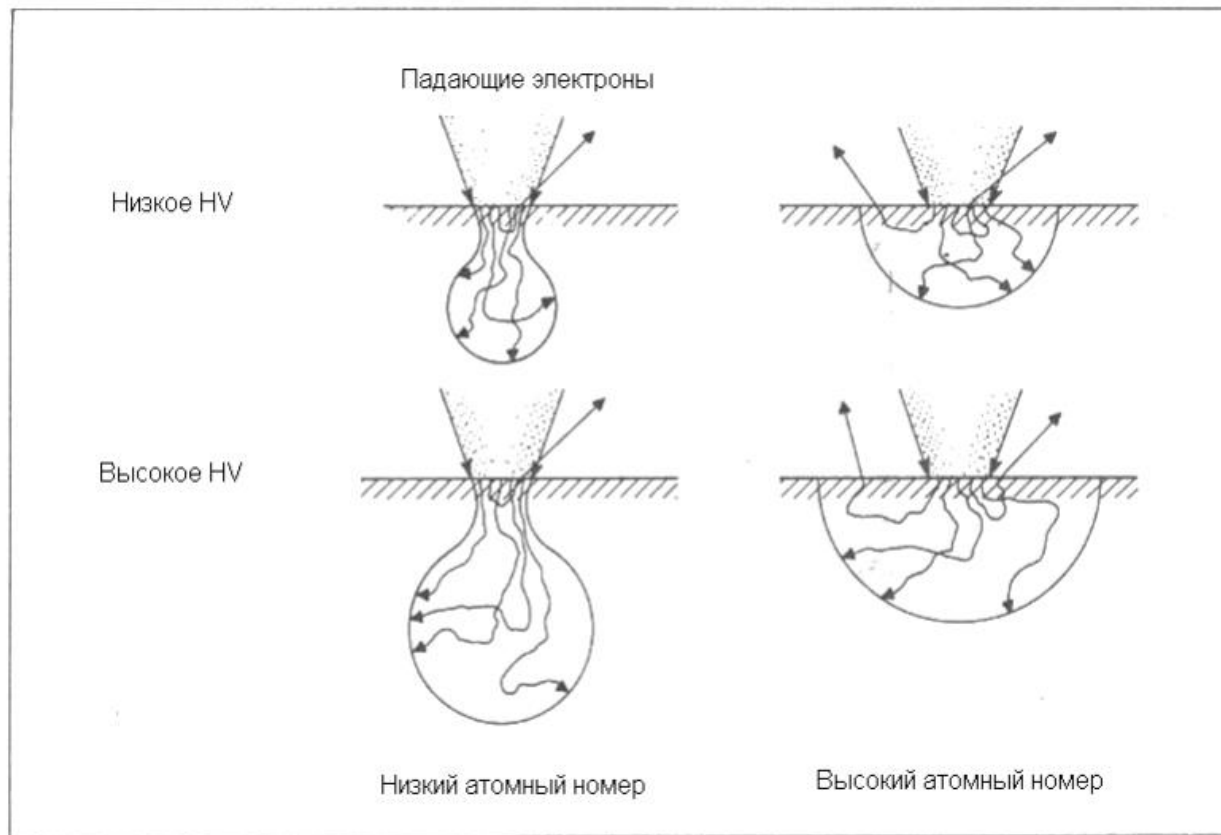
- детектор Эверхарта – Торнли**
- in lens детектор**
- through the lens детектор**

3. Формирование изображения в РЭМ

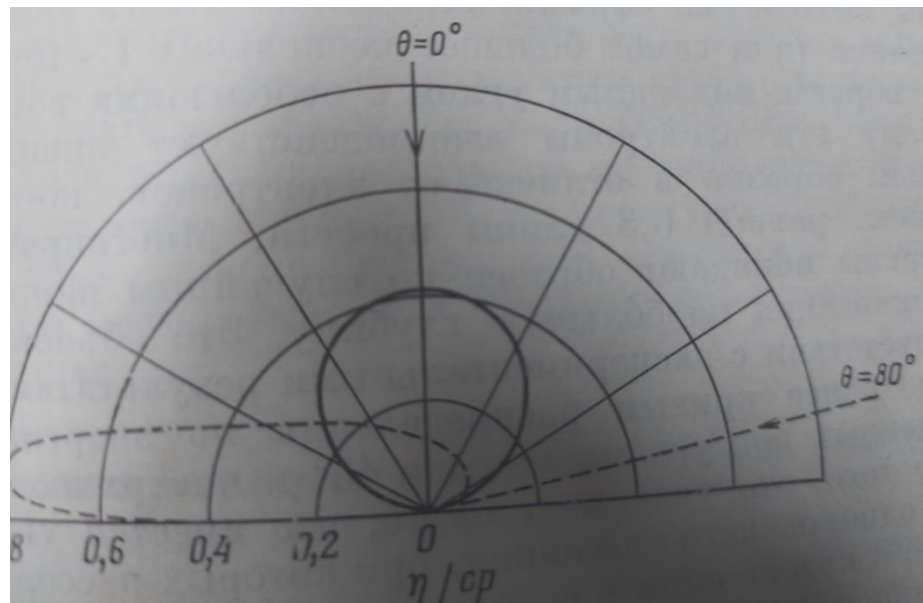
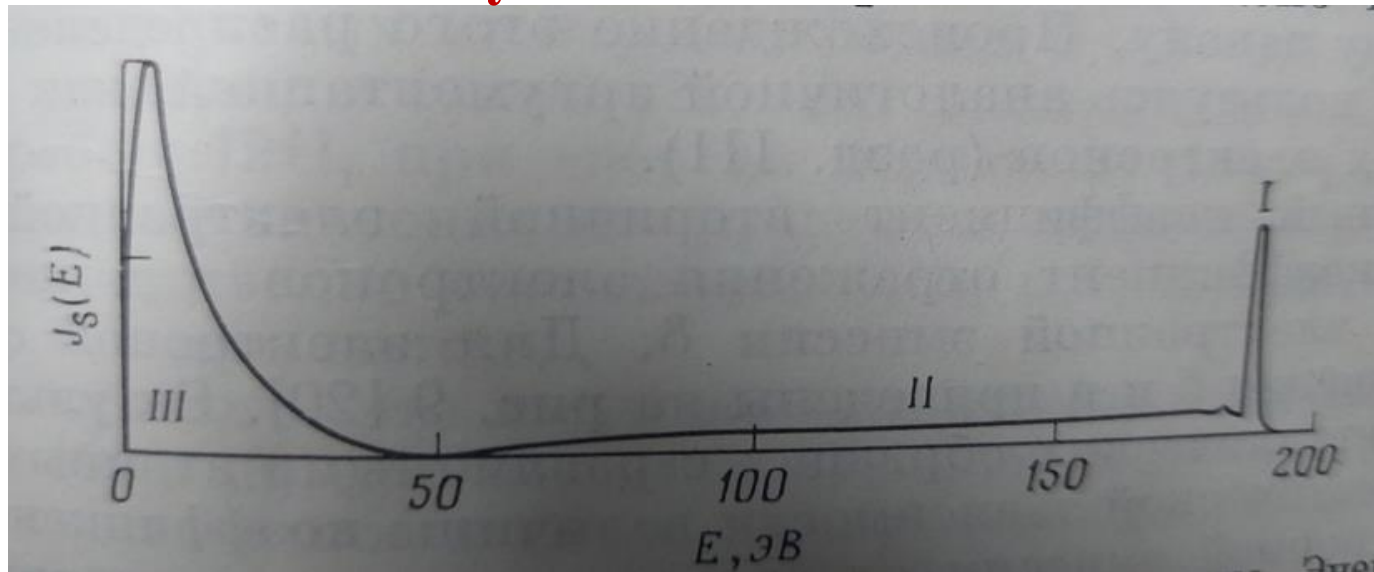
4. Измерение топологии микроструктур в РЭМ:

- 1D (CD), 2D, 2,5D, 3D**

Зависимость области генерации излучений от различных параметров
(величины ускоряющего напряжения и атомных номеров элементов образца)



Распределение ВЭ и ОРЭ по энергиям и углам вылета



Шумовые характеристики сигналов РЭМ.

Все процессы формирования сигналов в РЭМ, включая генерацию пучка, взаимодействие его с образцом и детектирование, имеют статистический характер.

Шумы пучка.

Ток пучка - заряд переносимый пучком за время t

$$I_b = Q/t \text{ (Кл/сек)} \quad 1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/сек} = 6,25 \times 10^{18} \text{ эл/сек}$$

Число электронов (сигнал) за время регистрации τ

$$N = 6.25 \times 10^{18} I_b \tau, \text{ при этом шум равен } \sqrt{N}, \text{ отношение с/ш} = n = \sqrt{N}$$

Шумы сигнала

Сигнал от гладкой поверхности на входе детектора

$$S = 6.25 \times 10^{18} I_b \sigma \alpha \tau,$$

где σ – сумма коэффициентов вторичной эмиссии всех компонентов сигнала

α – коэффициент сбора этих компонентов детектором

Поскольку $\sigma \alpha$ обычно меньше 1, то и отношение с/ш минимально и называется узким шумовым местом «noise bottleneck»

Контраст сигнала

Предположим, что сигнал от гладкой поверхности S вследствие наличия неоднородности изменился на некоторую величину ΔS
 Это изменение принято называть контрастом сигнала

$$C = \Delta S / S$$

Тогда отношение с/ш $n = \Delta S / \sqrt{N}$ Для вторично эмиссионного сигнала

$$n = C * (6.25 * 10^{18} * I_b \delta \alpha t)^{0.5}$$

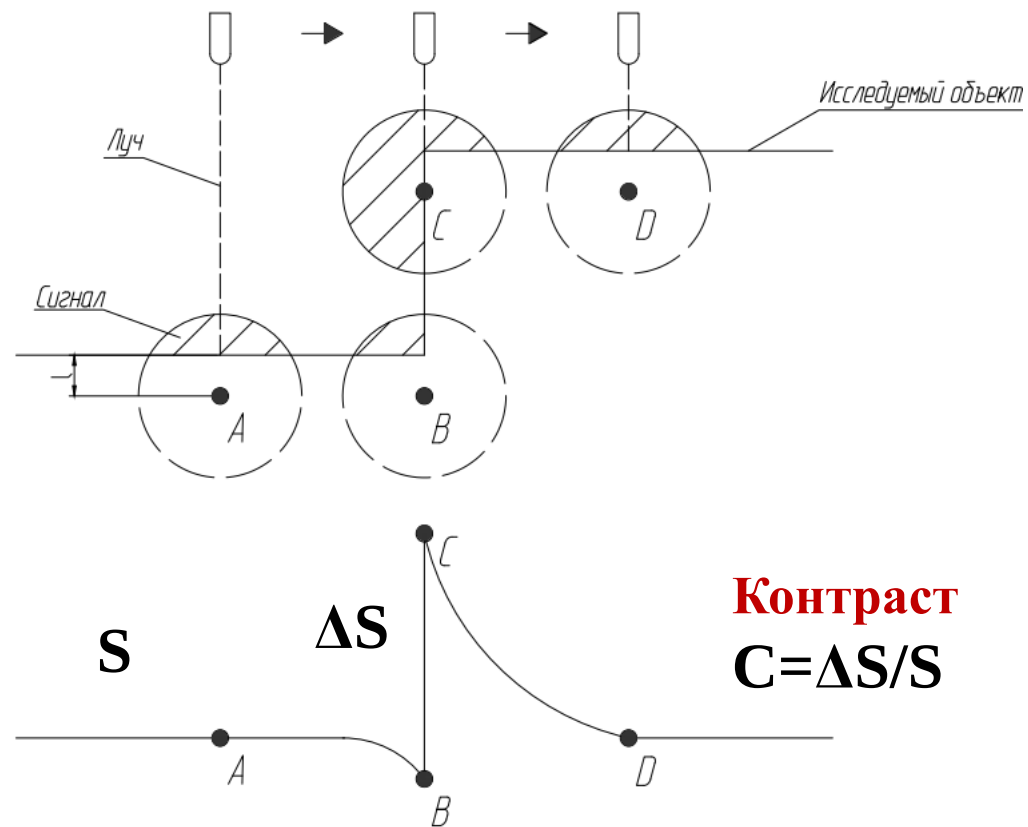
Для EBIC

$$n = C * (6.25 * 10^{18} * I_b t)^{0.5} \quad (1)$$

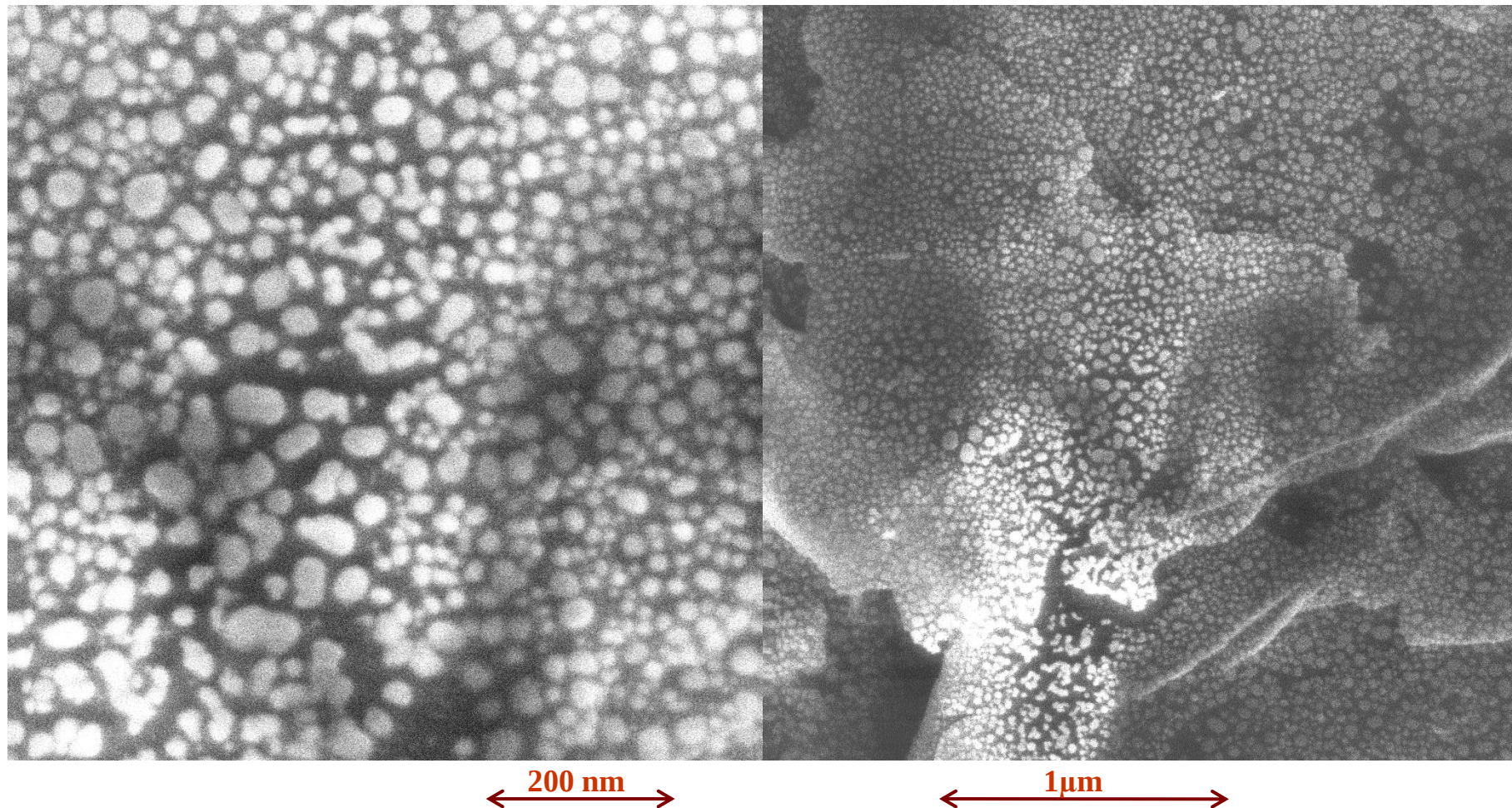
Пример. Оценим время регистрации сигнала EBIC для следующих условий:

$C = 1\%$, $n = 16$, $I_b = 10^{-9}$ А. Решая выражение (1) относительно t получим

$t = 400$ мксек, длительность кадра $1024 \times 1024 = 400$ сек.



Изображение 8192 x 8192 при частоте 200 МГц (5nsec/pixel)

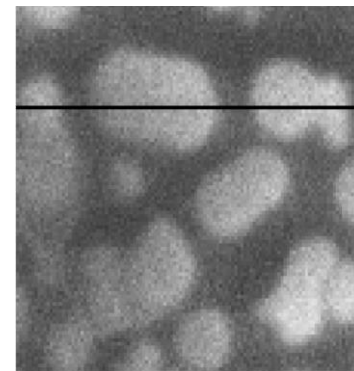
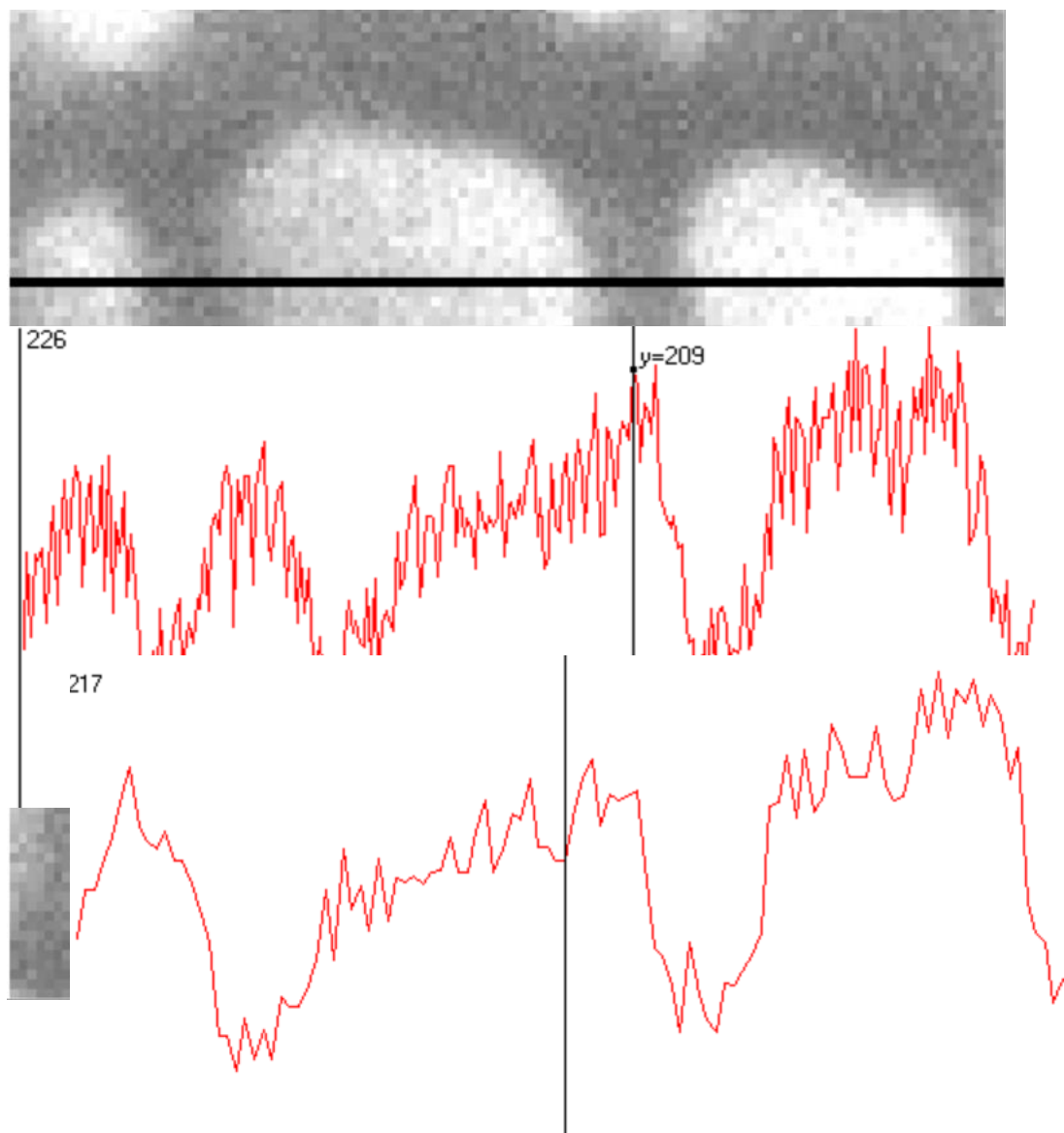


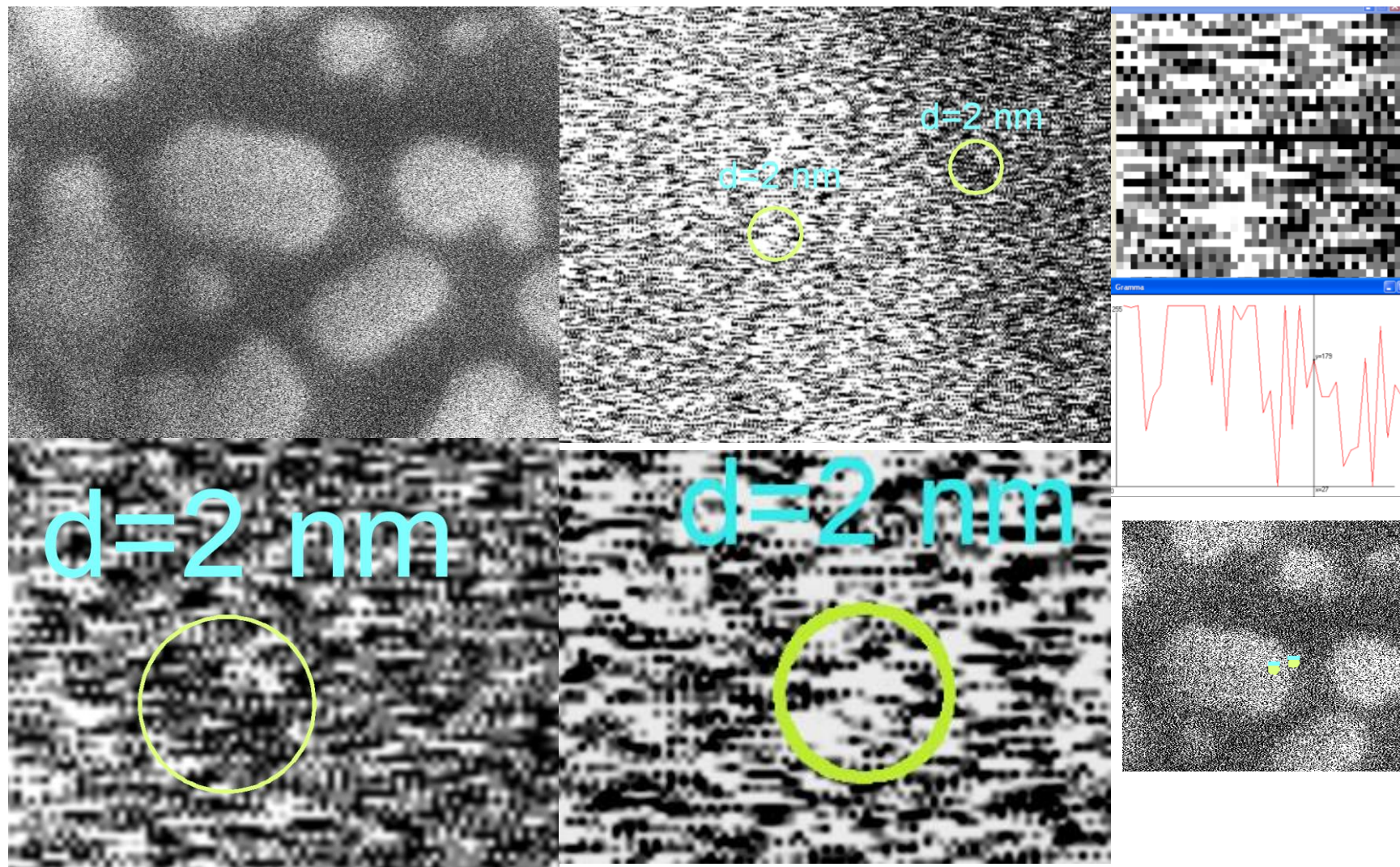
Параметры регистрации сигнала

1. Диаметр пучка- 2 нм
2. Размер пиксела – 0,08 нм (12 пикс/нм)
3. Ток пучка 840 пА
4. Число электронов/пиксел – 25
5. Доза/пиксел $100 \mu\text{K}/\text{cm}^2 = 6,25 \text{ эл}/\text{нм}^2$

Отношение с/ш при изменении скорости развертки

Шумовые характеристики сигнала РЭМ

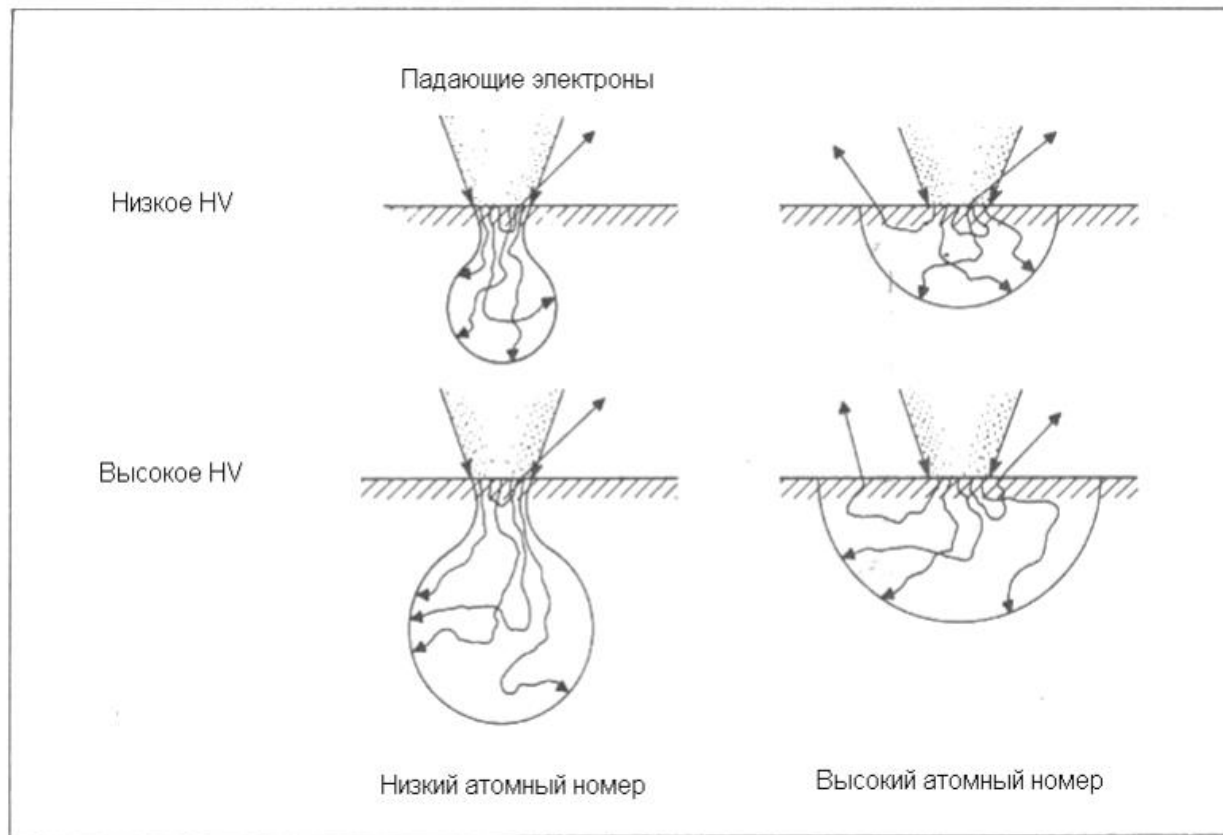


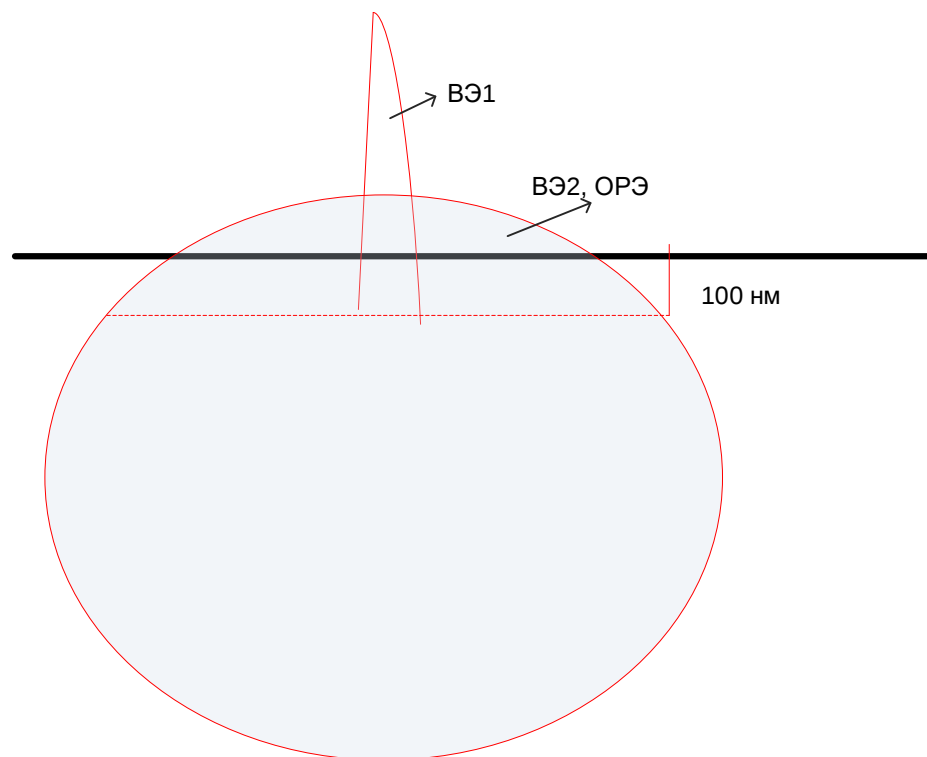


Временные характеристики всех элементов видеоканала
сцинтиллятор, ФЭУ, предусилитель, АЦП позволяют регистрировать
сигналы с длительностью до 2,5 нсек

Формирование сигнала РЭМ

Зависимость области генерации излучений от различных параметров
(величины ускоряющего напряжения и атомных номеров элементов образца)





Считалось, что разрешение РЭМ не может быть лучше чем область выхода.

Для повышения разрешающей способности необходимо выделить из сигнала ВЭ1

Signal Formation of Backscattered Electrons by Microinhomogeneities and Surface Relief in a SEM

V. V. ARISTOV, N. N. DREOMOVA, A. A. FIRSOVA, V. V. KAZMIRUK, A. V. SAMSONOVICH, N. G. USHAKOV,
S. I. ZAITSEV

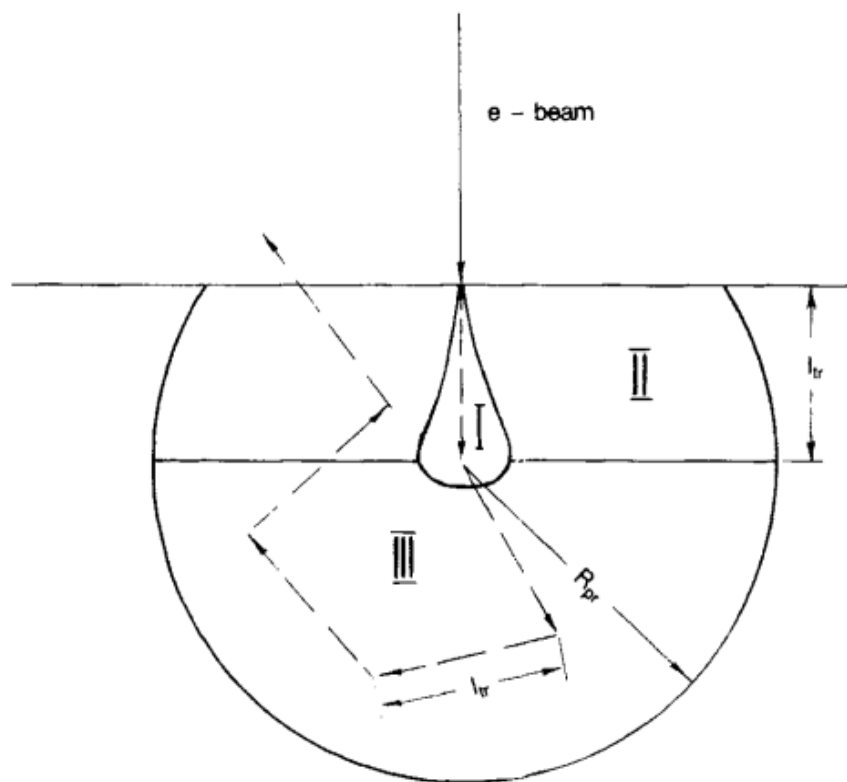
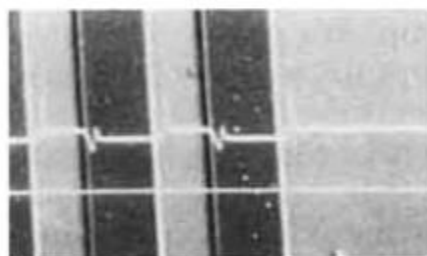
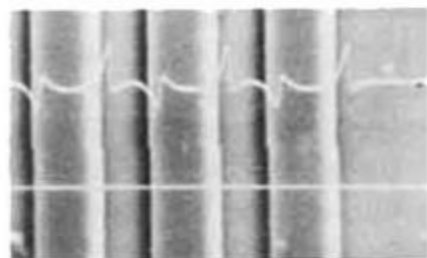
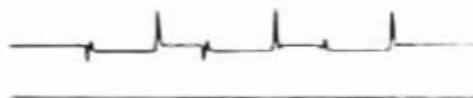


FIG. 1 Fast electron movement in the medium and the three zones of microinhomogeneity signal formation.



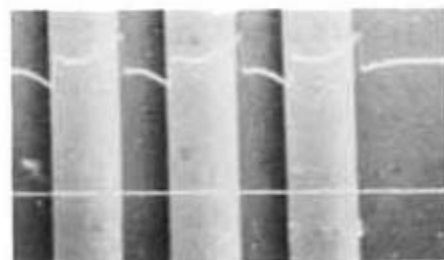
5 keV

10nm



15 keV

10nm



25 keV

10 nm



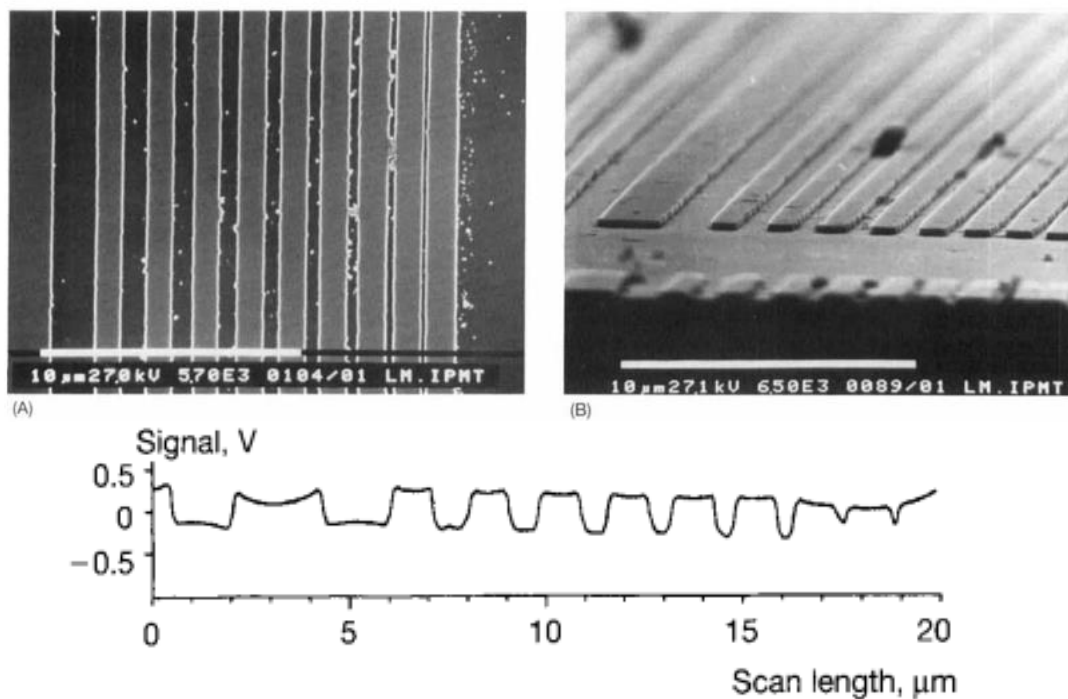
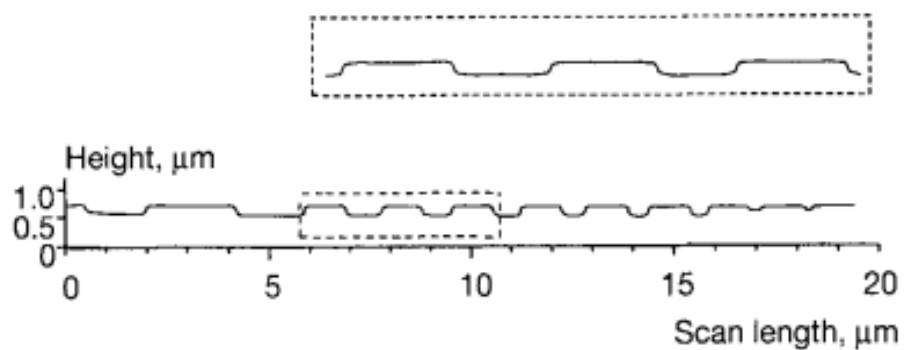
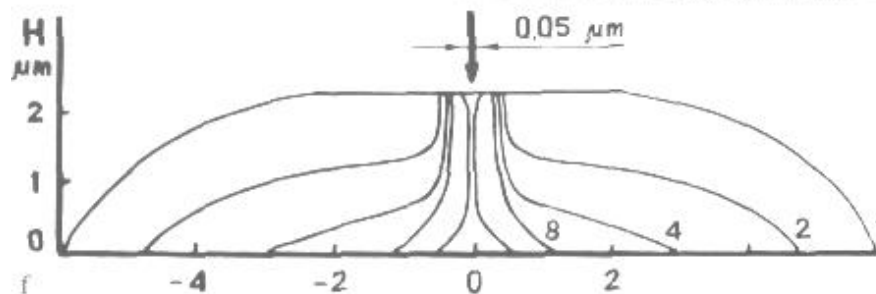
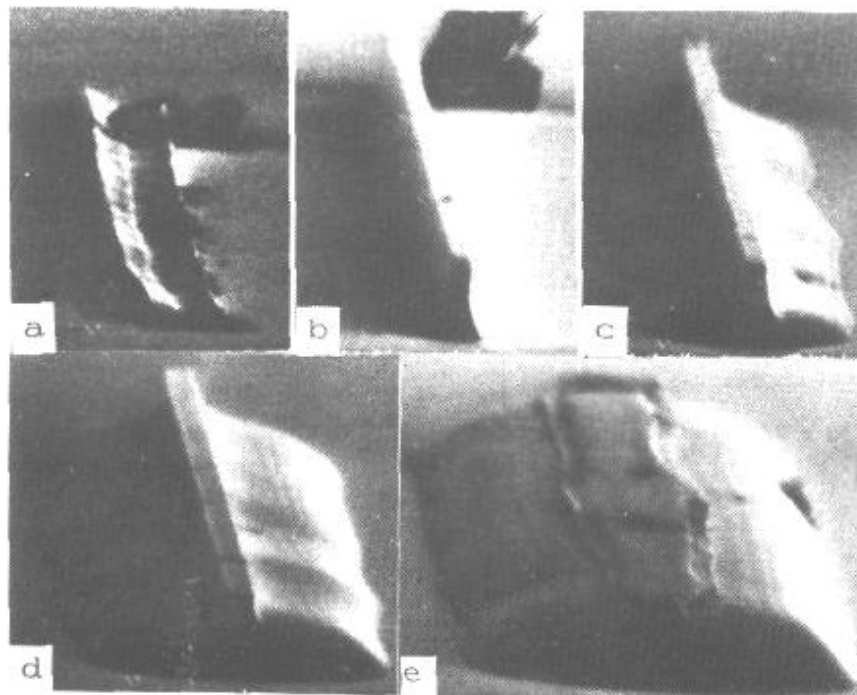


FIG. 3 The BSE line scan taken from specimen shown in Figure 2.



Экспериментальное изучение распределения дозы облучения в толстом резисте

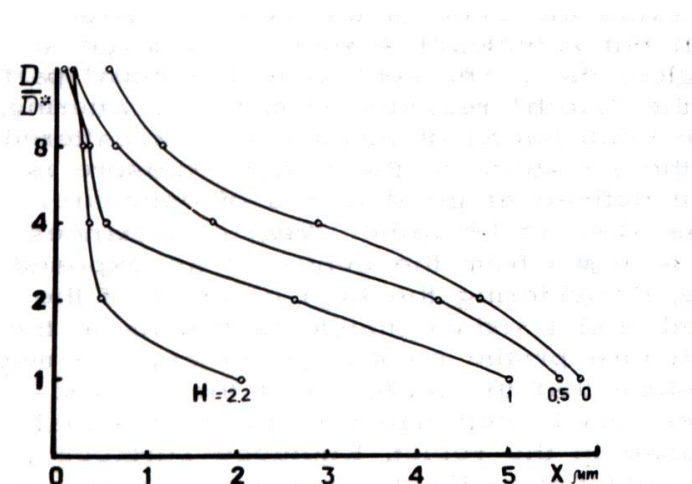


Diazo-type positive photoresist
used as negative electron resist

Thickness = $2.2 \mu\text{m}$.

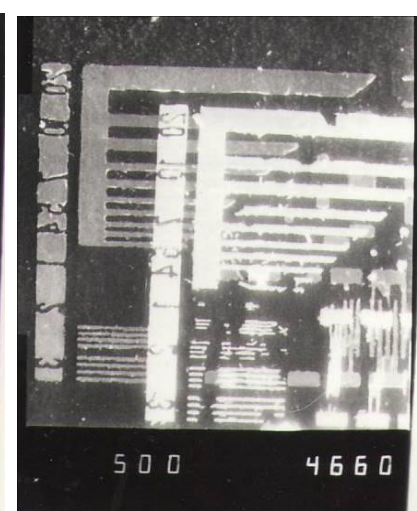
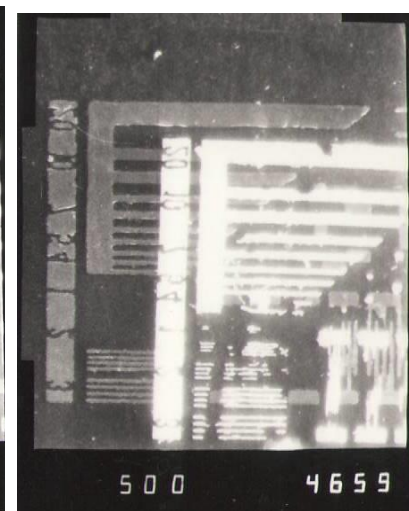
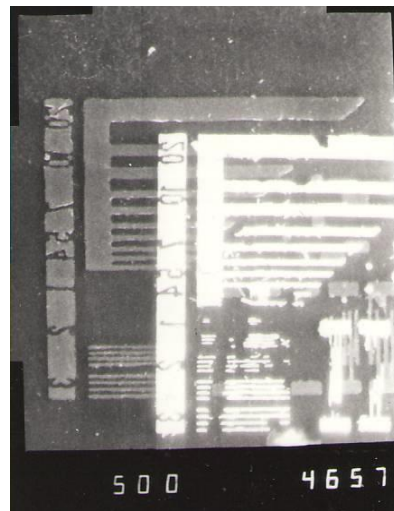
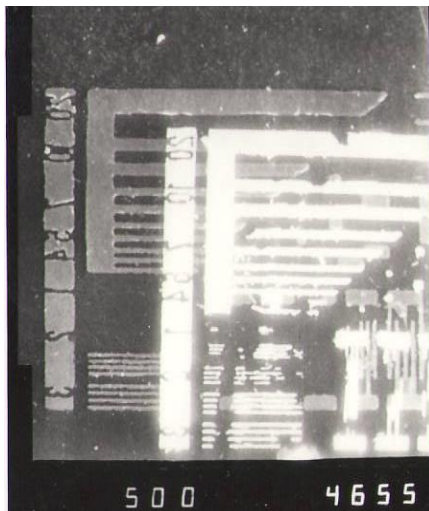
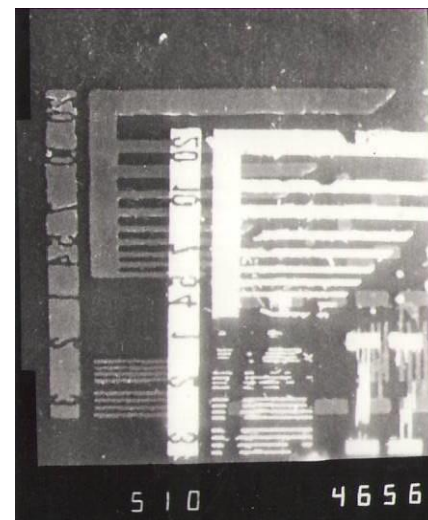
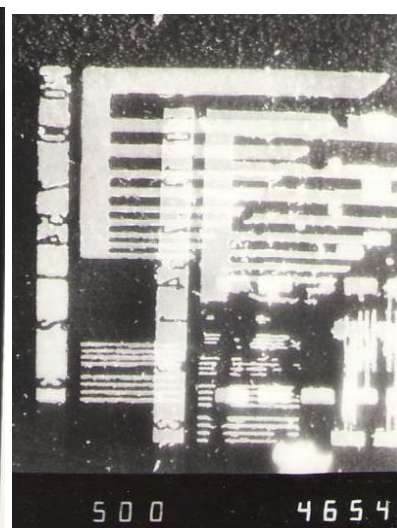
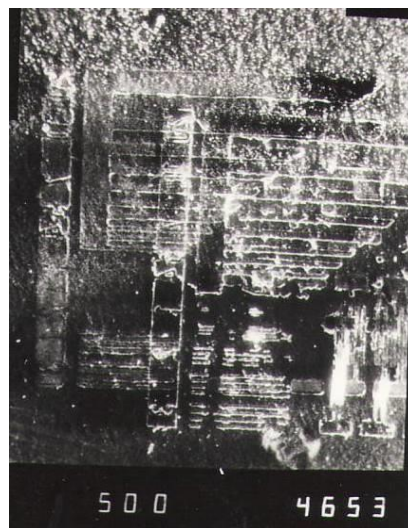
$D_b = 0.05 \mu\text{m}$, $V = 30 \text{ kV}$

The exposure dose was doubled for
each next line.



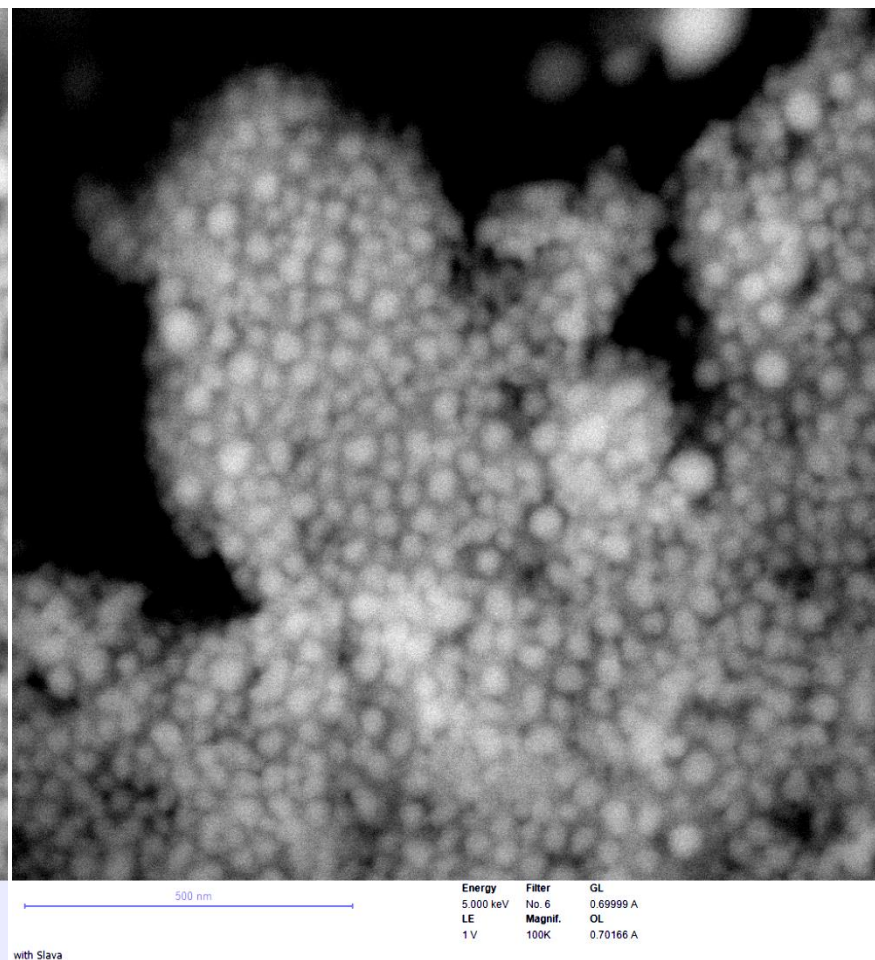
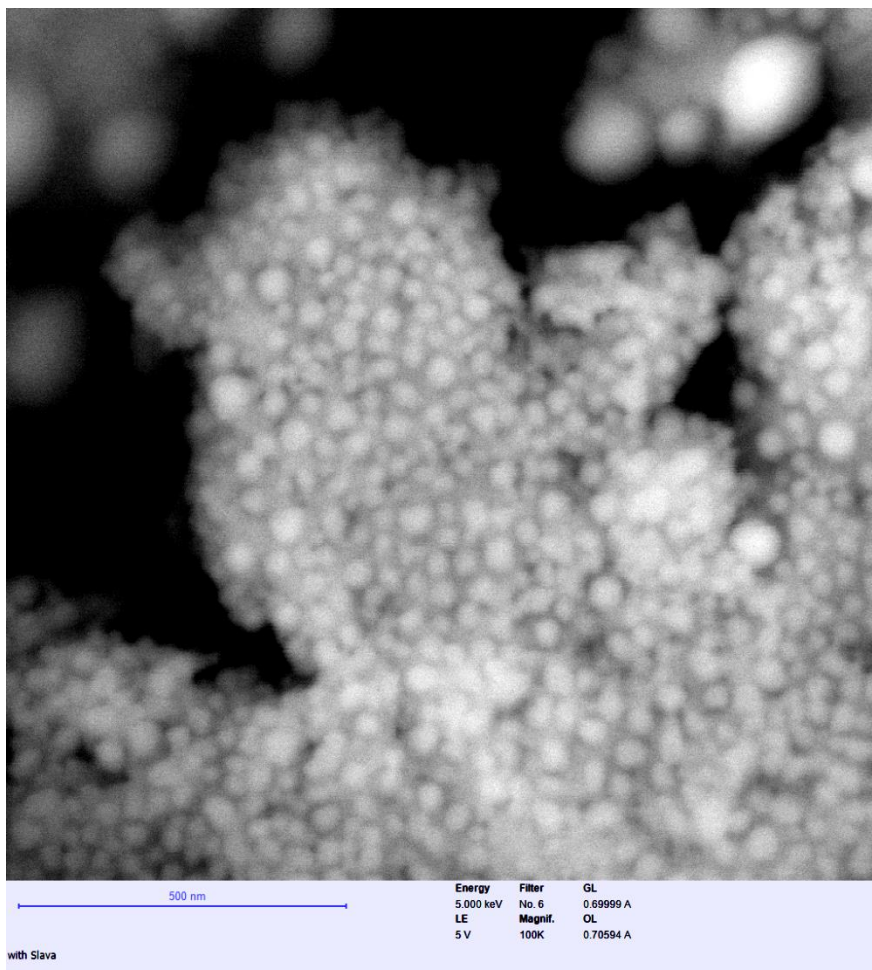
The dependence of a relative exposure
dose of the distance from the line
center at 0, 0.5, 1 and $2.2 \mu\text{m}$ from the
substrate.

Послойный просмотр структур



Изображение при энергии электронов 5 эВ и 1эВ

• Низковольтный режим



ПОВЫШЕНИЕ КОНТРАСТА ПРИ НИЗКИХ ЭНЕРГИЯХ ЭЛЕКТРОНОВ

• Низковольтный режим

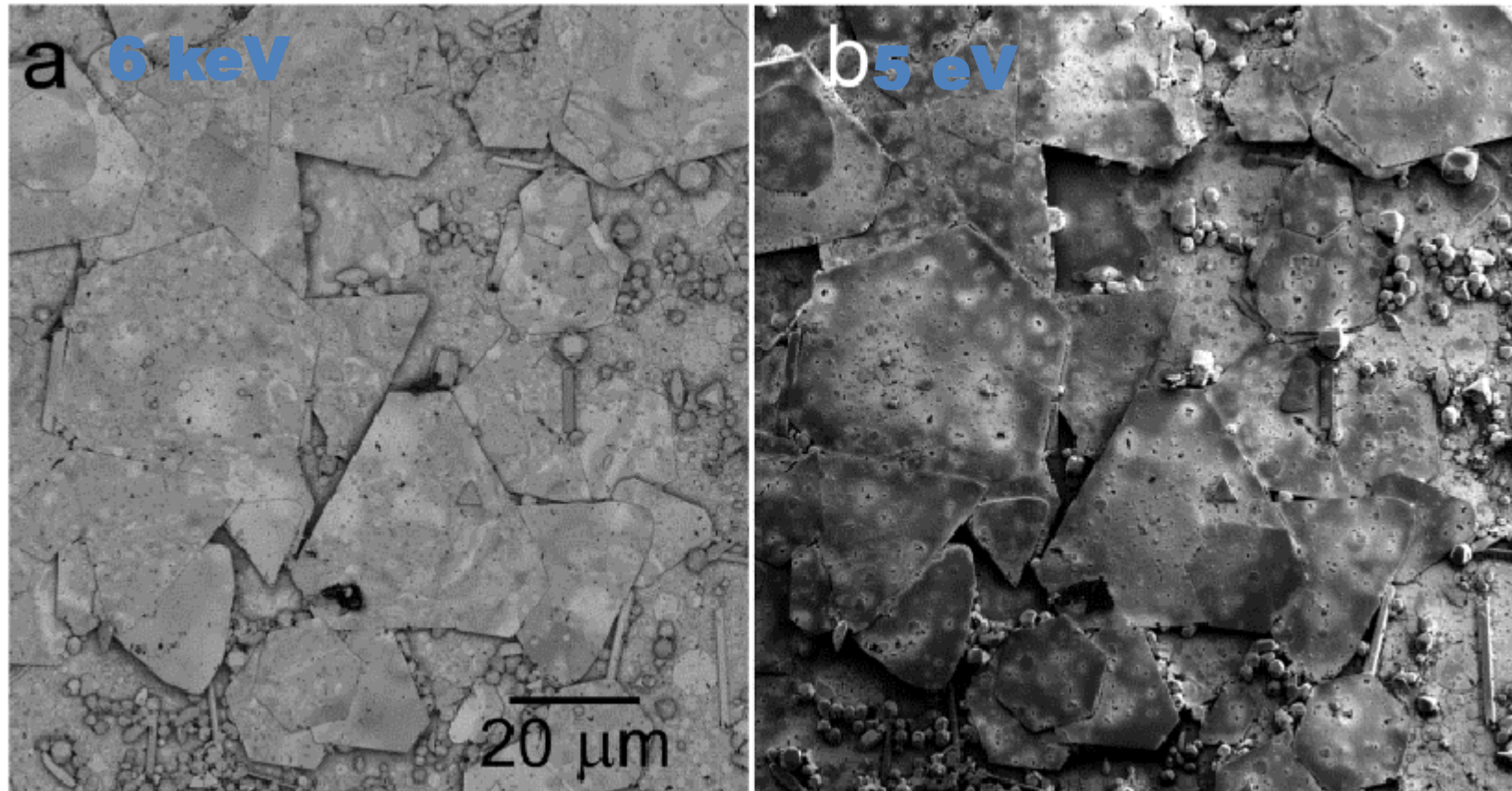
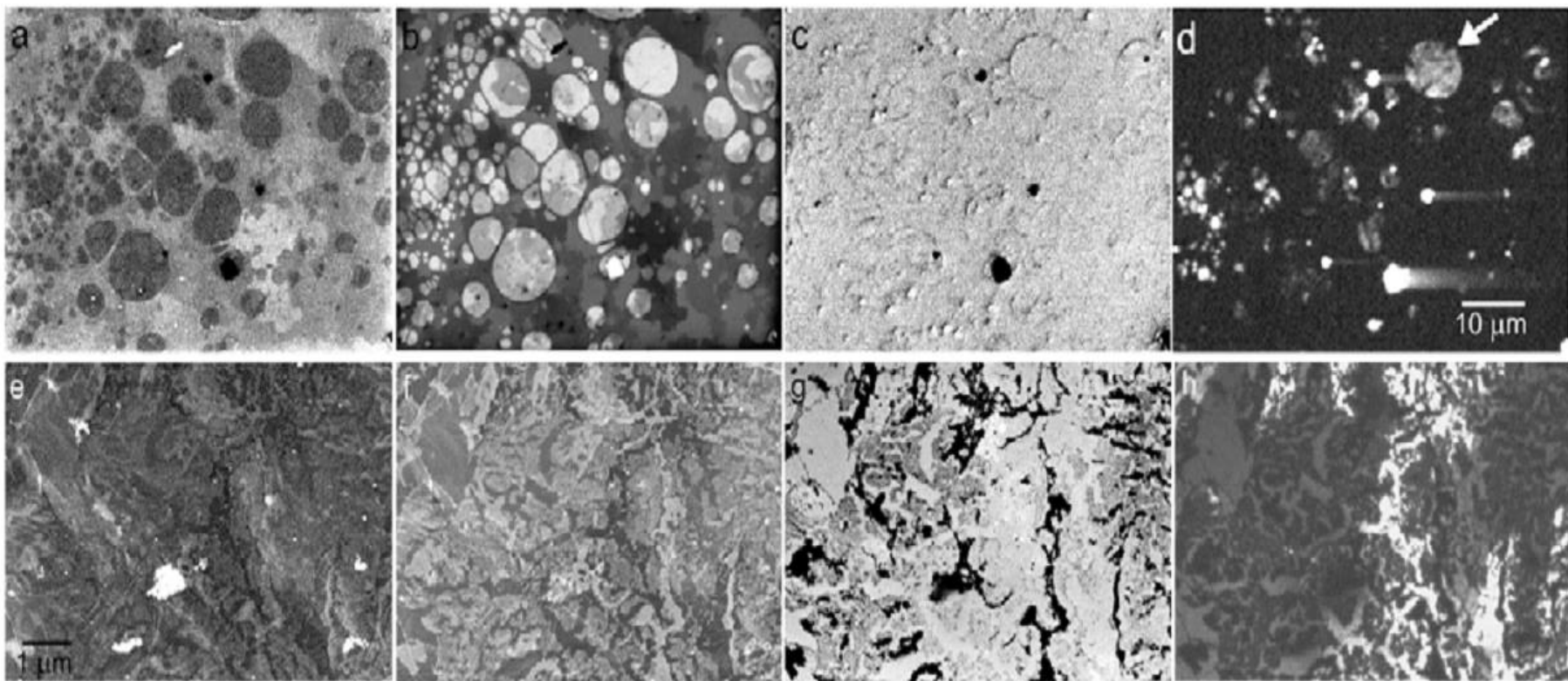


Figure 3. Microcrystalline Au deposited on glass. (a) Standard BSE imaging at 6 keV;
(b) Sample in 1 kV/mm, landing energy of electrons 5 eV.

ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАФЕНА

• Низковольтный режим



Micrographs of two graphene samples in combined reflection and transmission modes.

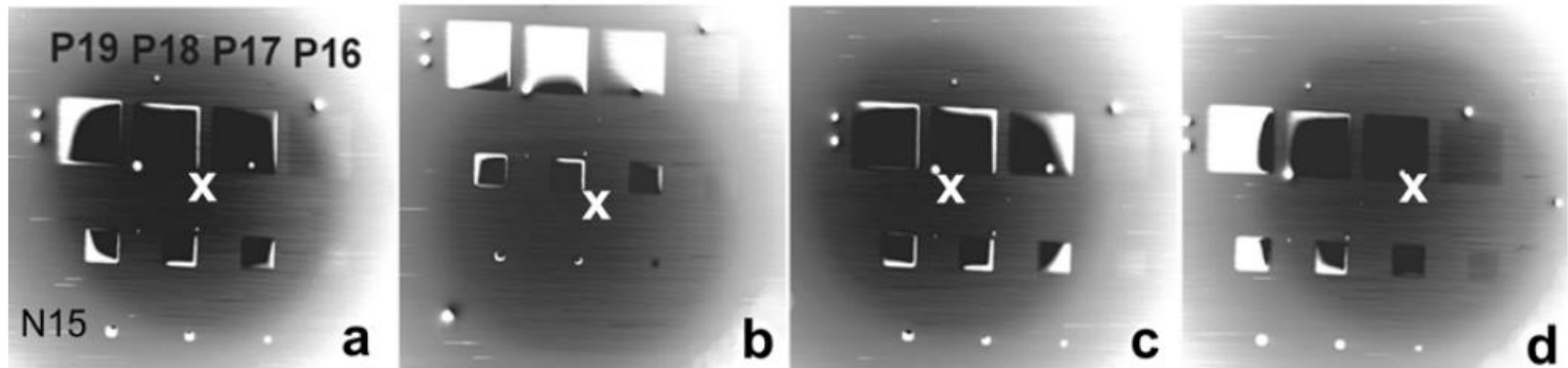
(a) sample A, BSE at 3 keV; (b) sample A, TE at 3 keV; (c) sample A, BSE at 4 eV; (d) sample A, TE at 4 eV;
(e) sample B, BSE at 5 keV; (f) sample B, BSE at 1 keV;
(g) sample B, TE at 500 eV; (h) sample B, TE at 20 eV.

*Sample A was purchased as the CVD graphene TM,

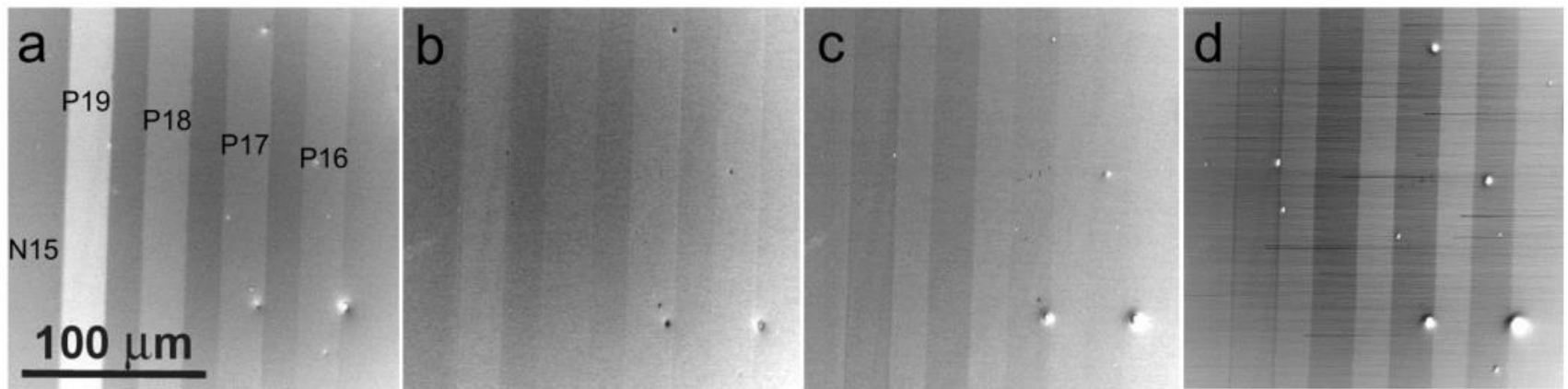
**sample B was provided by K. Novoselov, University of Manchester.)



КОНТРАСТ ЛЕГИРУЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ



P-type doped rectangles on the n-type Si substrate $E = 1.6 \text{ eV}$



2,5 keV

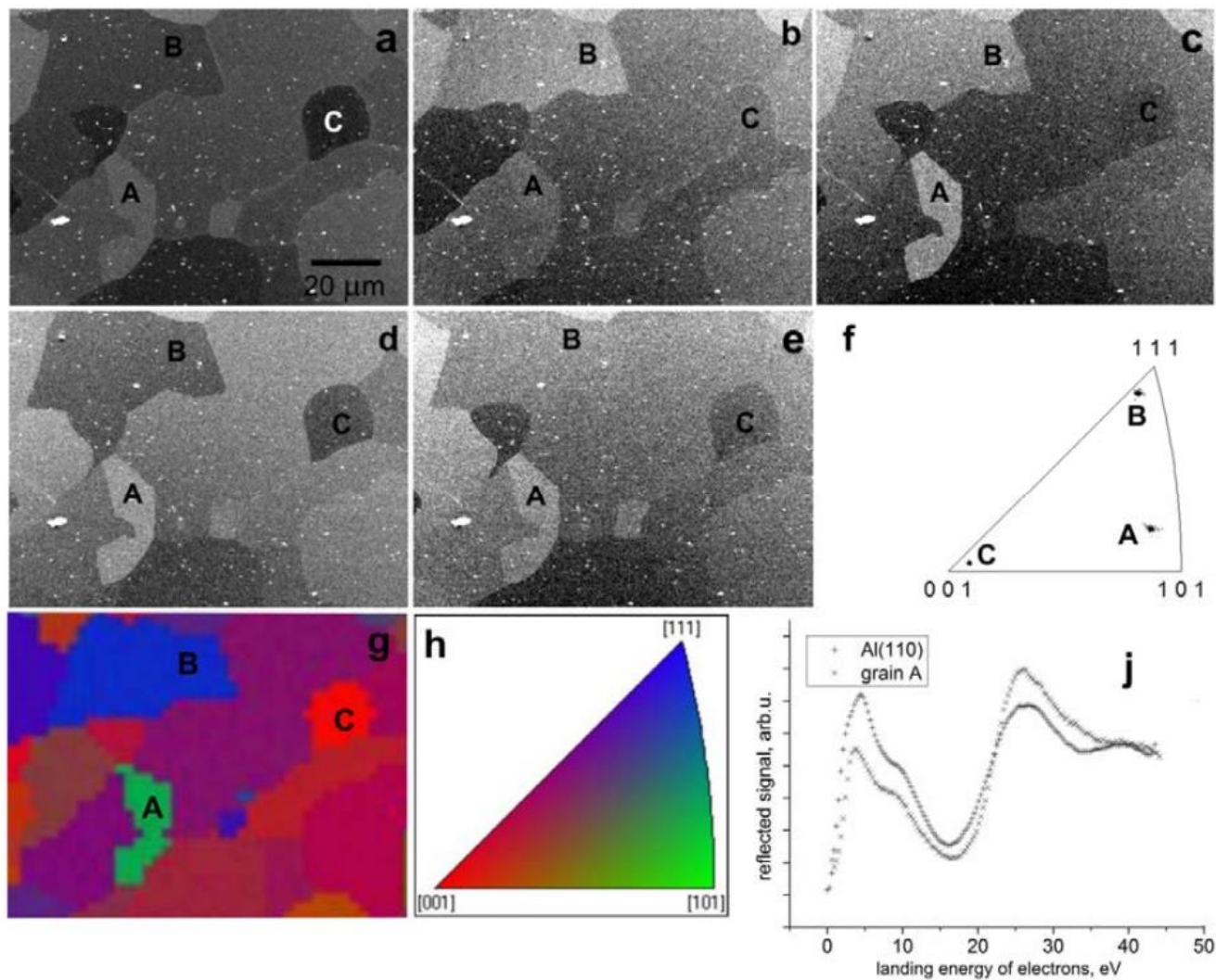
1keV

100 eV

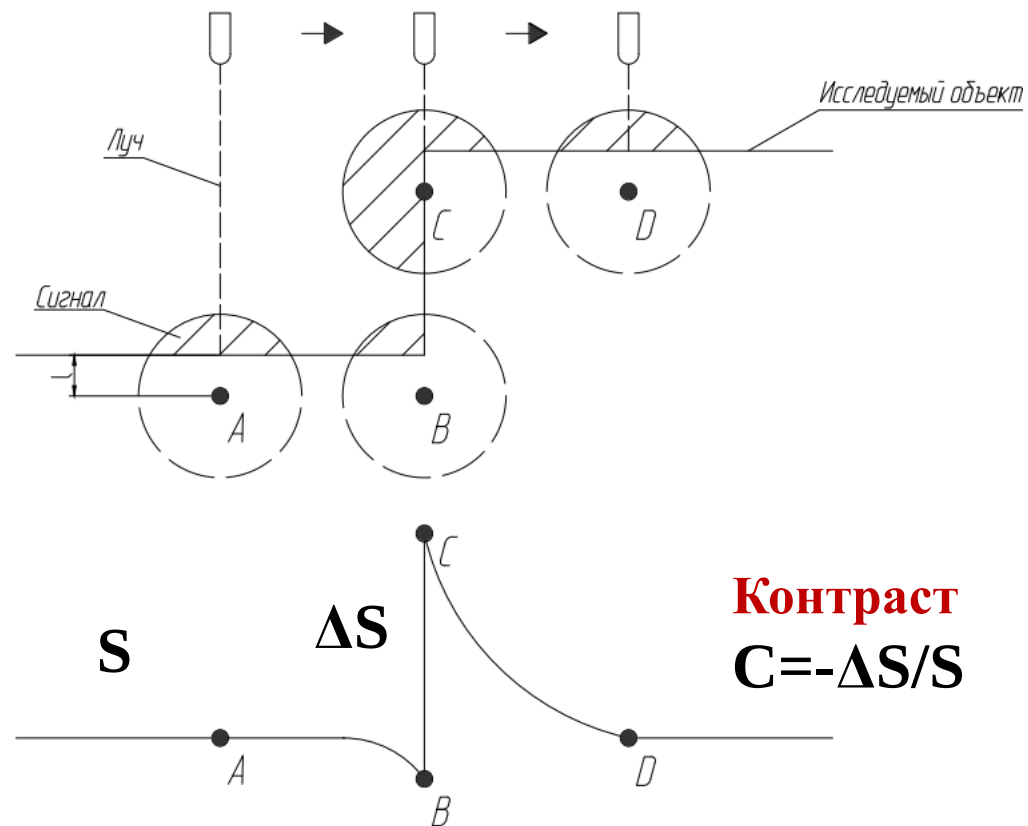
2,3 eV

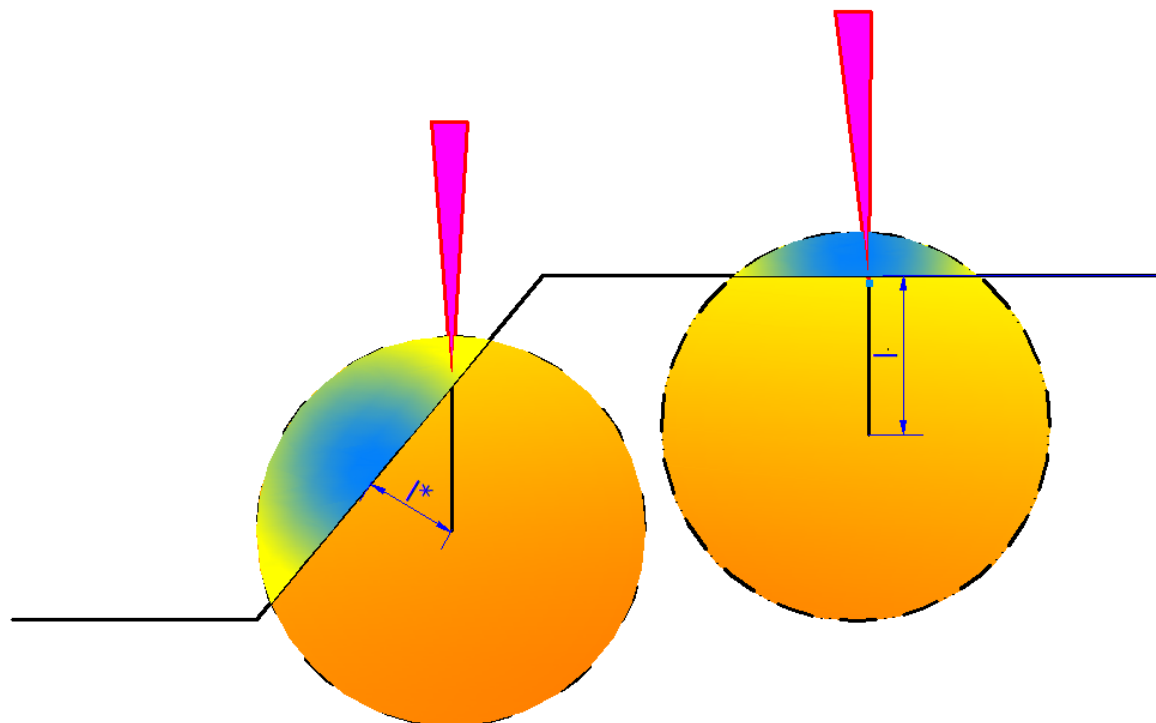
• Низковольтный режим

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТАЦИИ



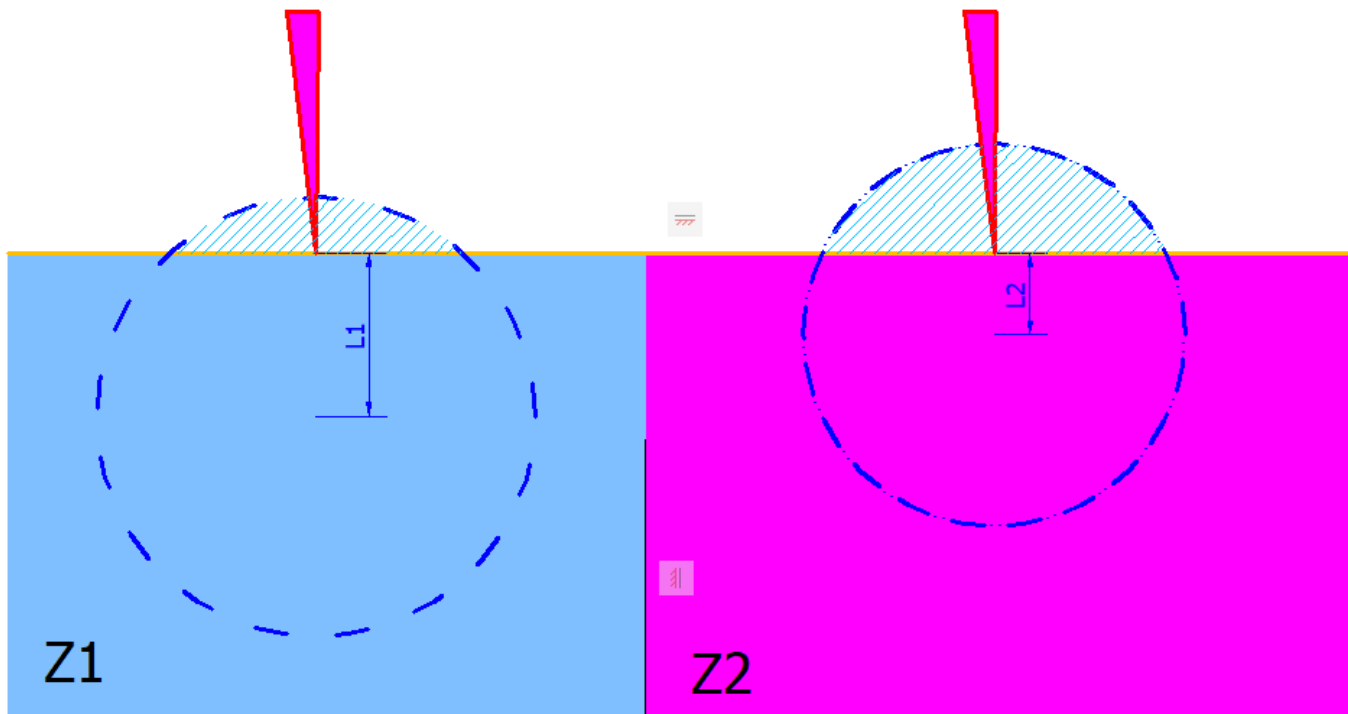
ОБРАЗЕЦ - Al

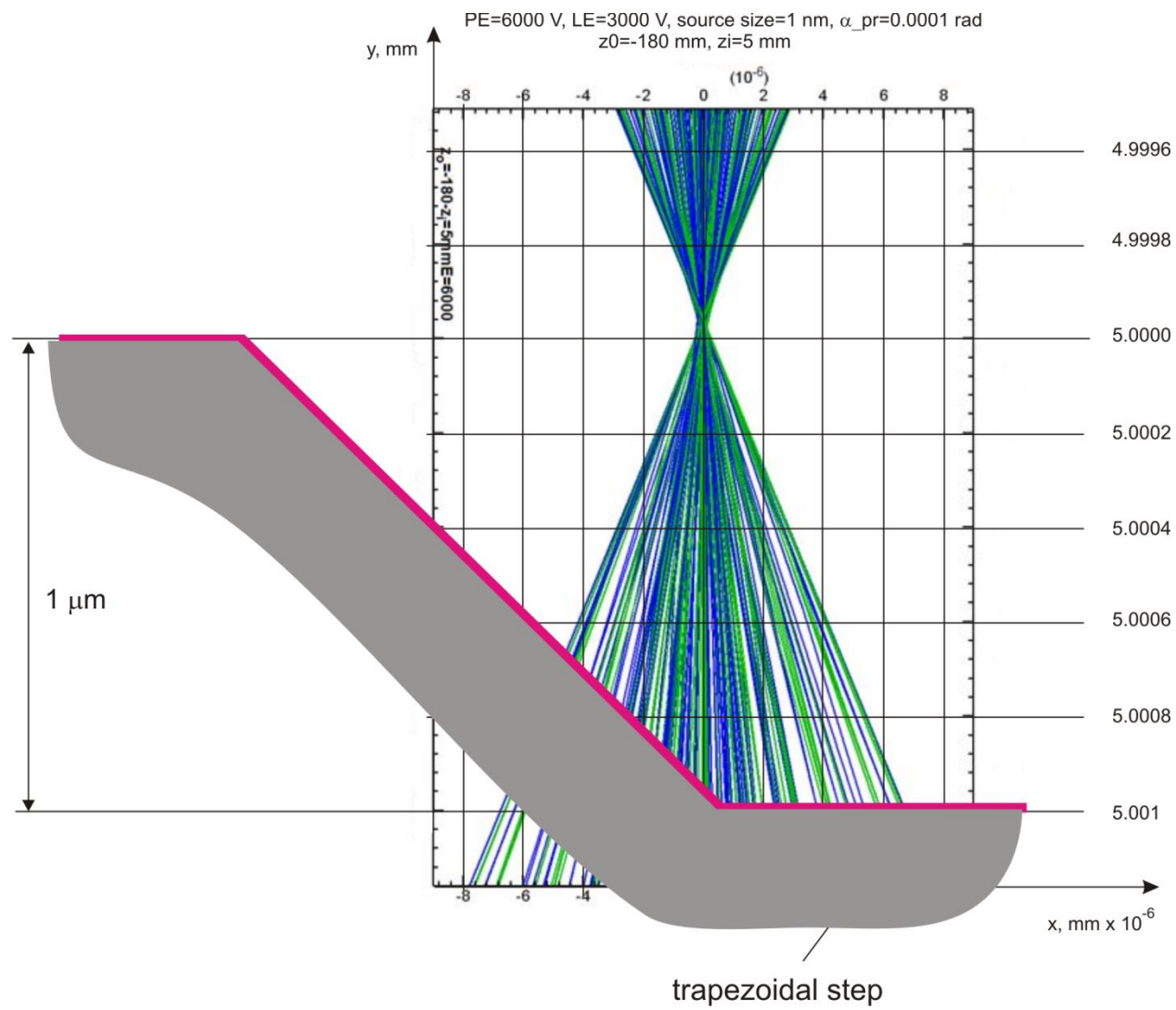


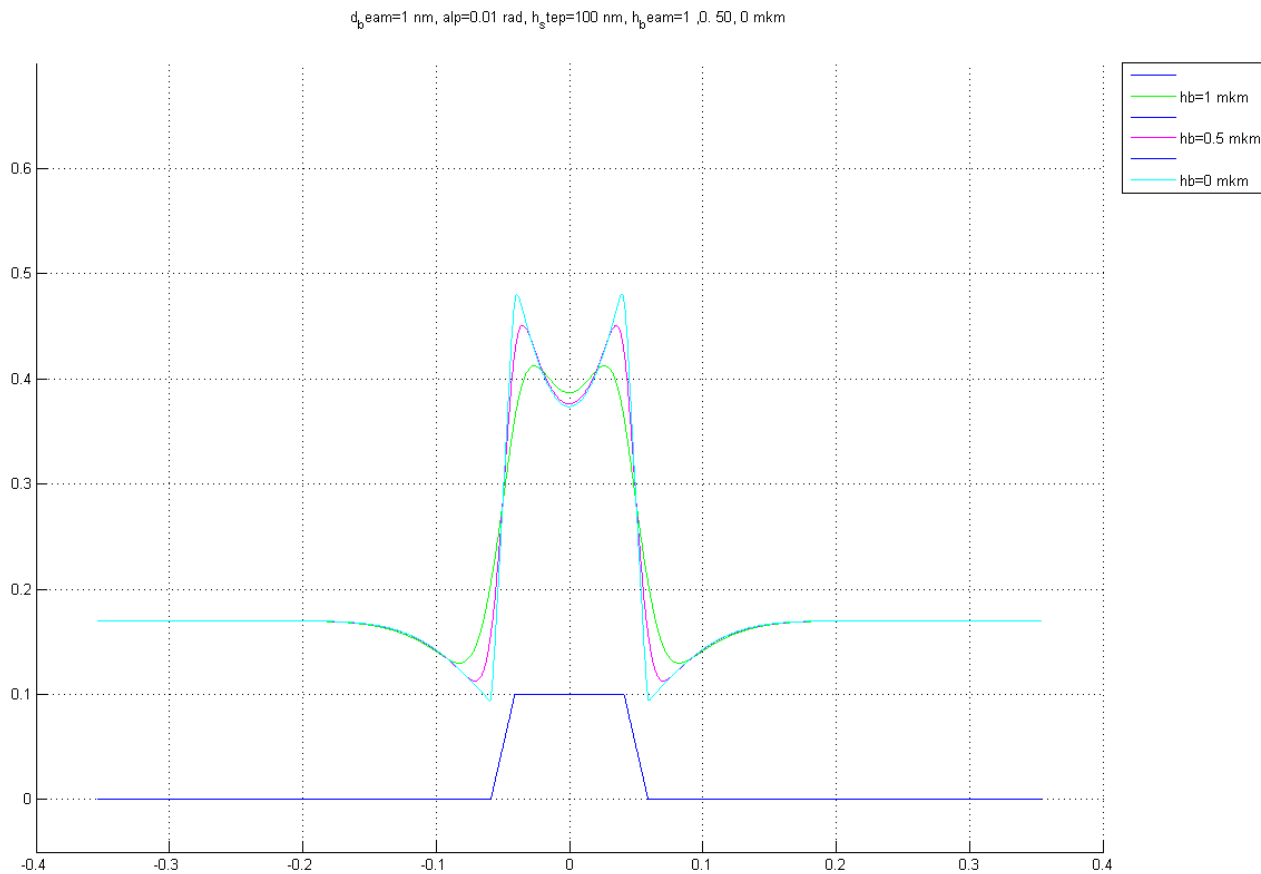


Изменение сигнала от наклонных участков поверхности

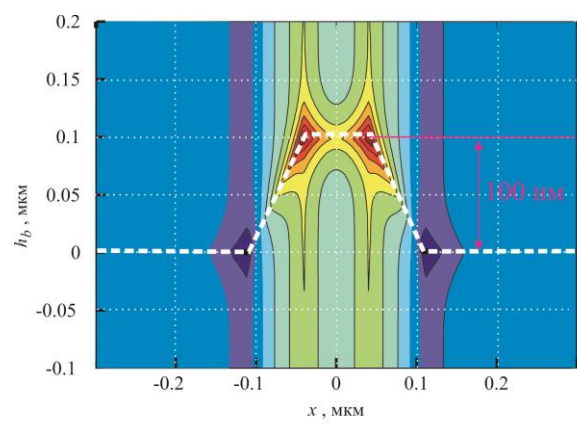
Контраст ОРЭ за счет атомного номера (Z контраст) $Z2 > Z1$



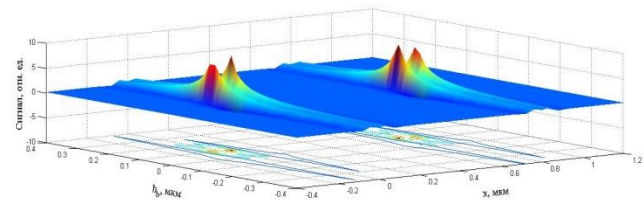




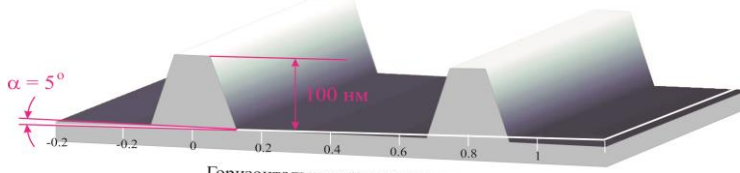
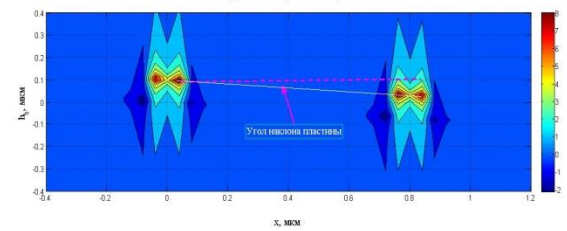
Сигналы ОРЭ от полосы для трех различных значений высоты точки фокусировки электронного зонда:



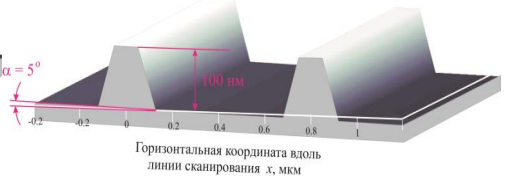
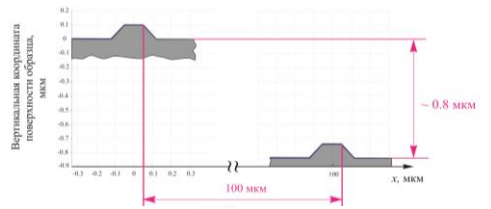
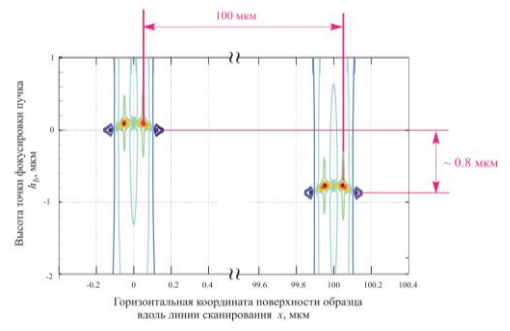
Карта сигнала для 2-х наклонных выступов высотой 0,1 мкм, угол наклона поверхности 5 град.



Области уровня поверхности карты сигнала



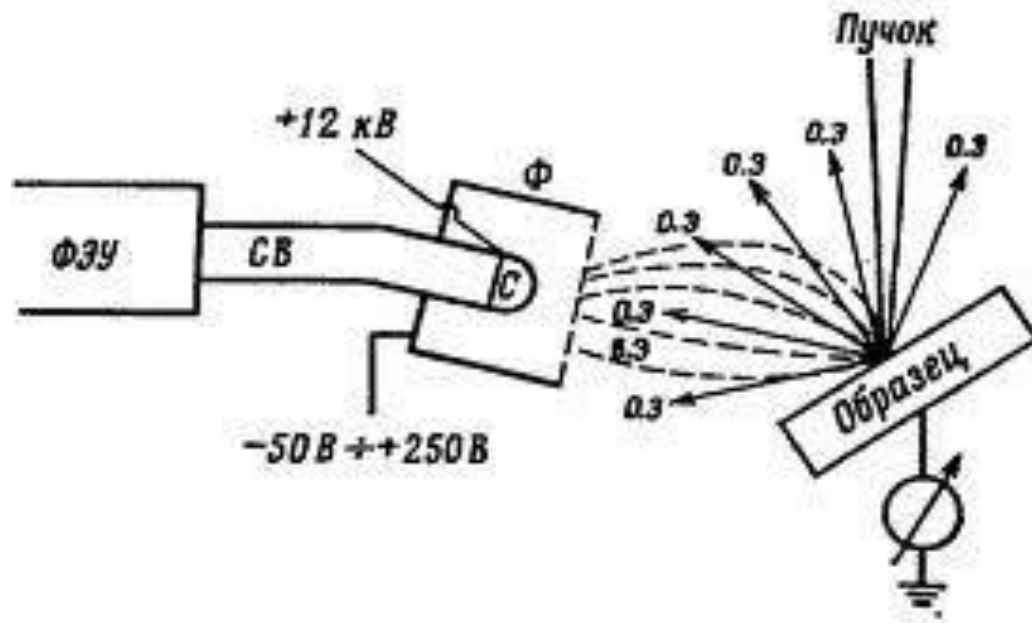
Горизонтальная координата вдоль линии сканирования x, мкм



Горизонтальная координата вдоль линии сканирования x, мкм

Детектирование вторично эмиссионного сигнала в РЭМ

Детектор Эверхарта - Торнли



Недостатки :

1. Низкий коэффициент сбора ОРЭ; низкий коэффициент усиления при низких ускоряющих напряжениях
2. Большой рабочий отрезок (снижение разрешения)

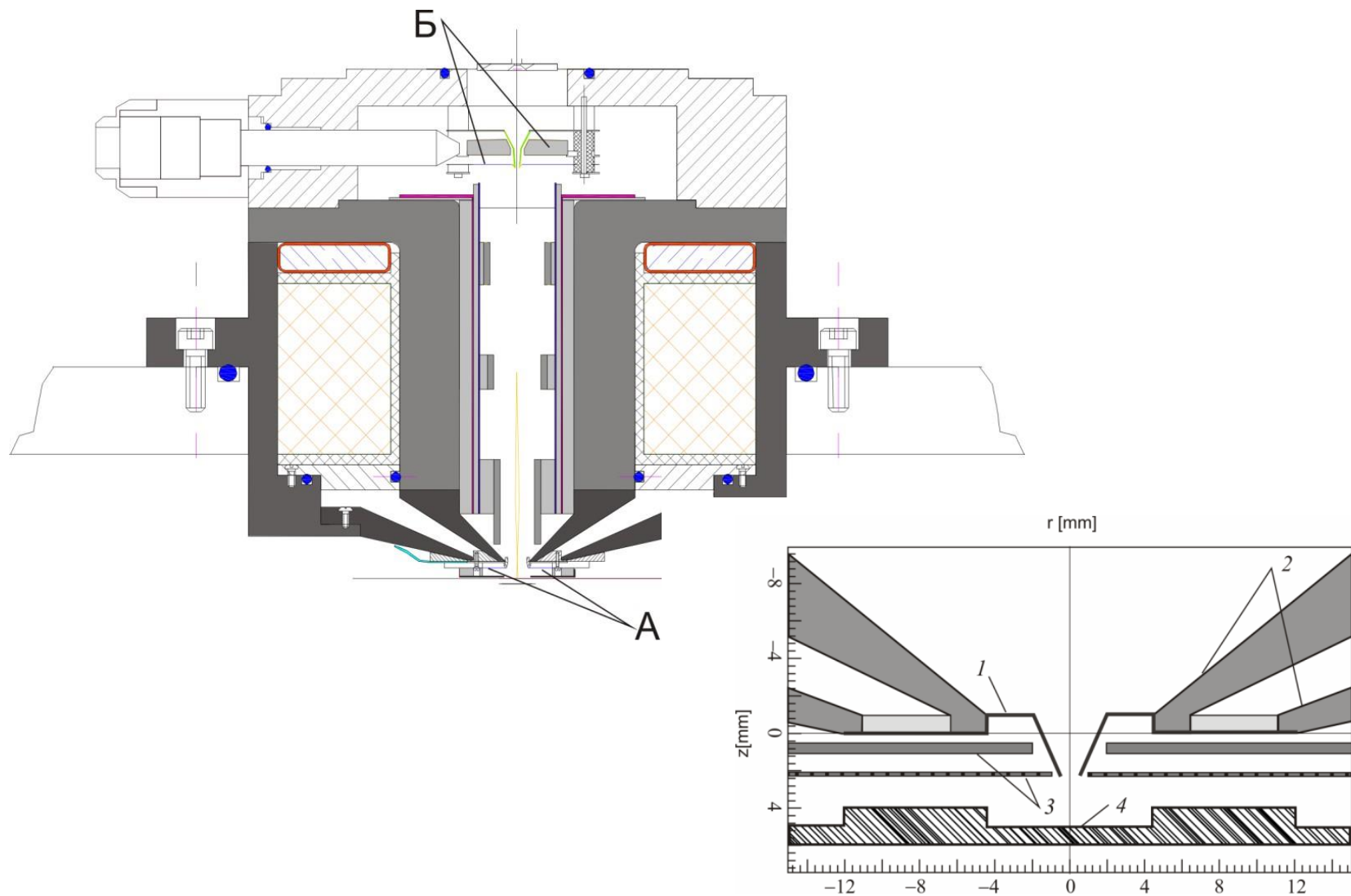
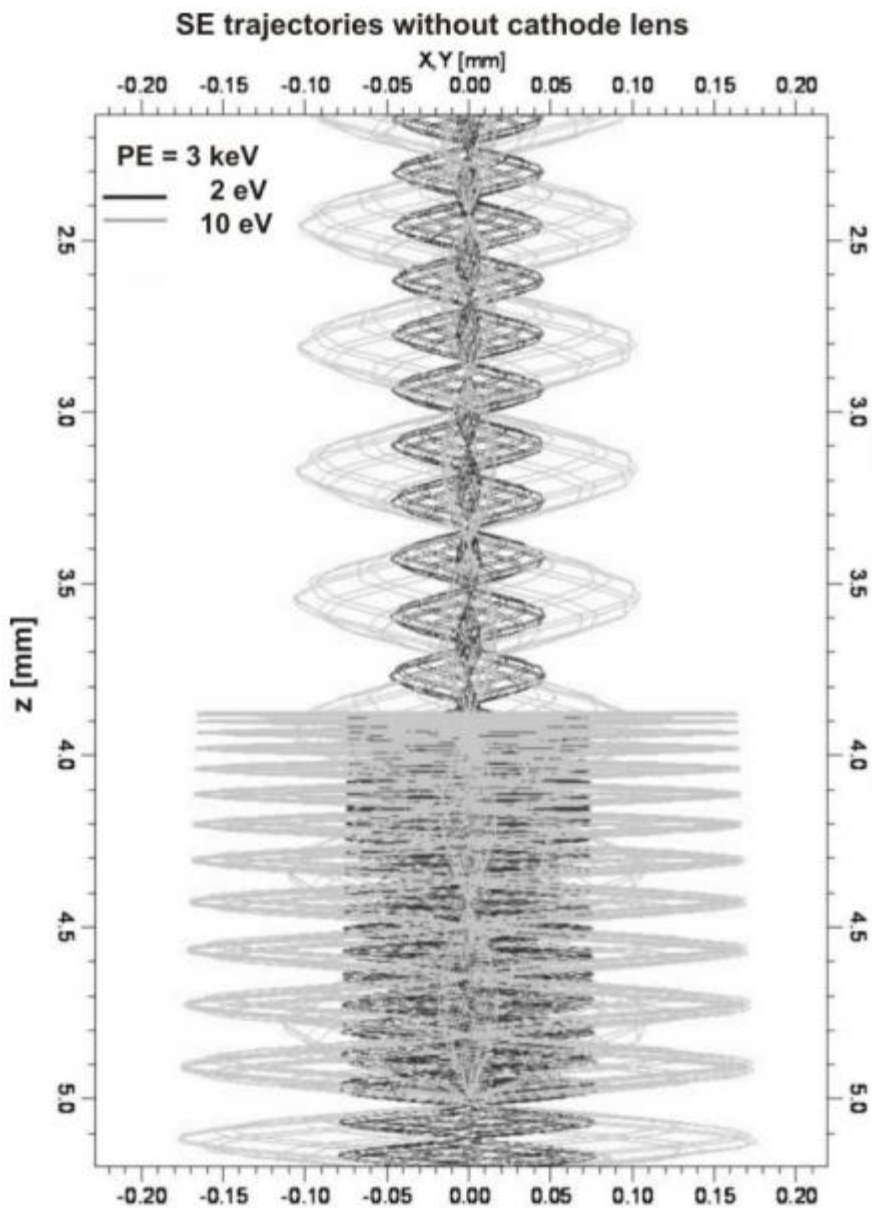
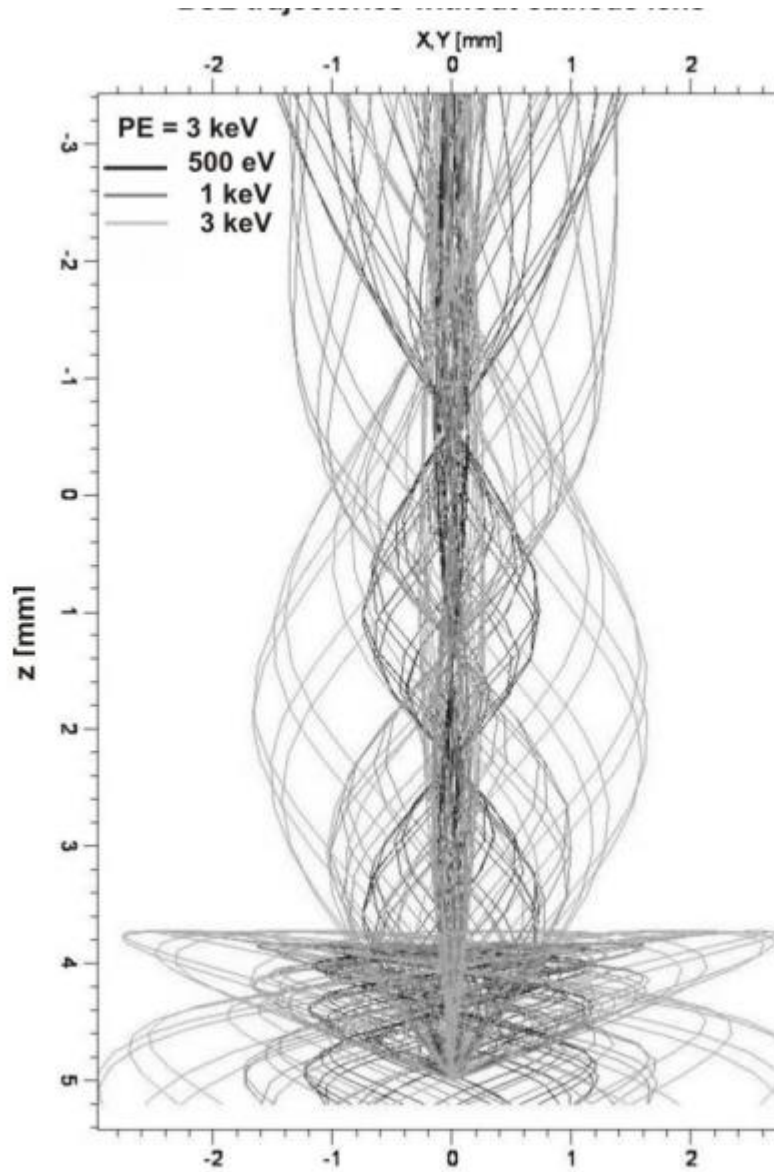
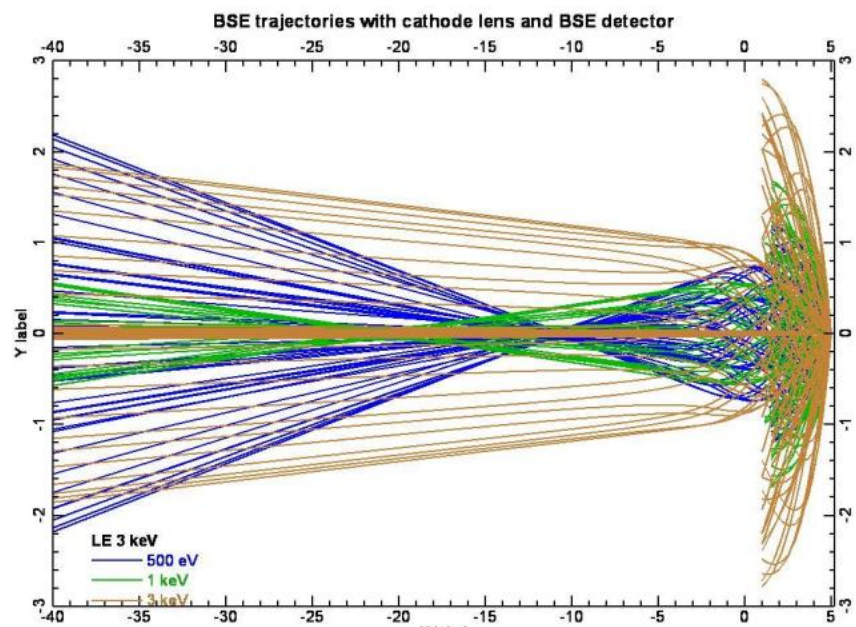
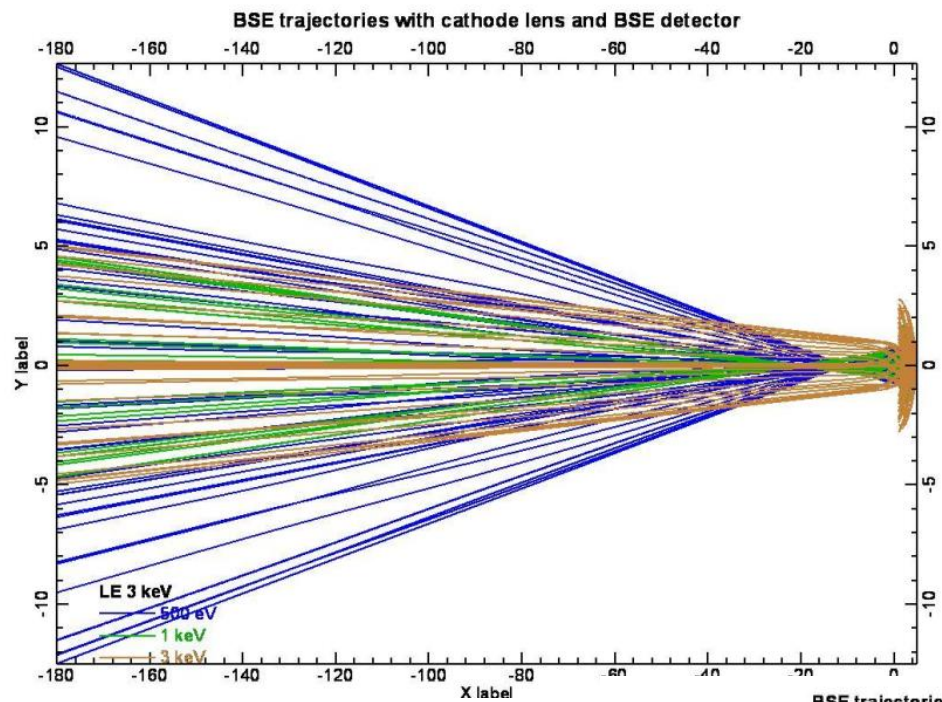
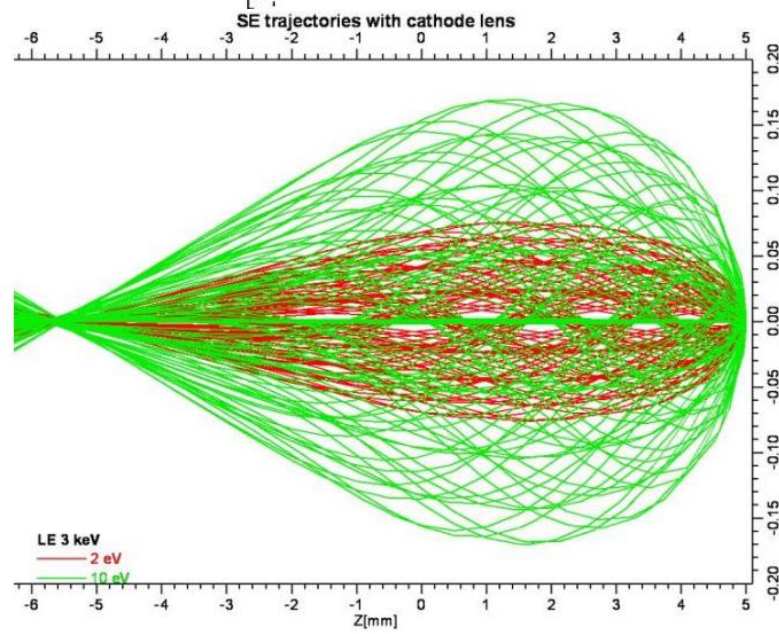
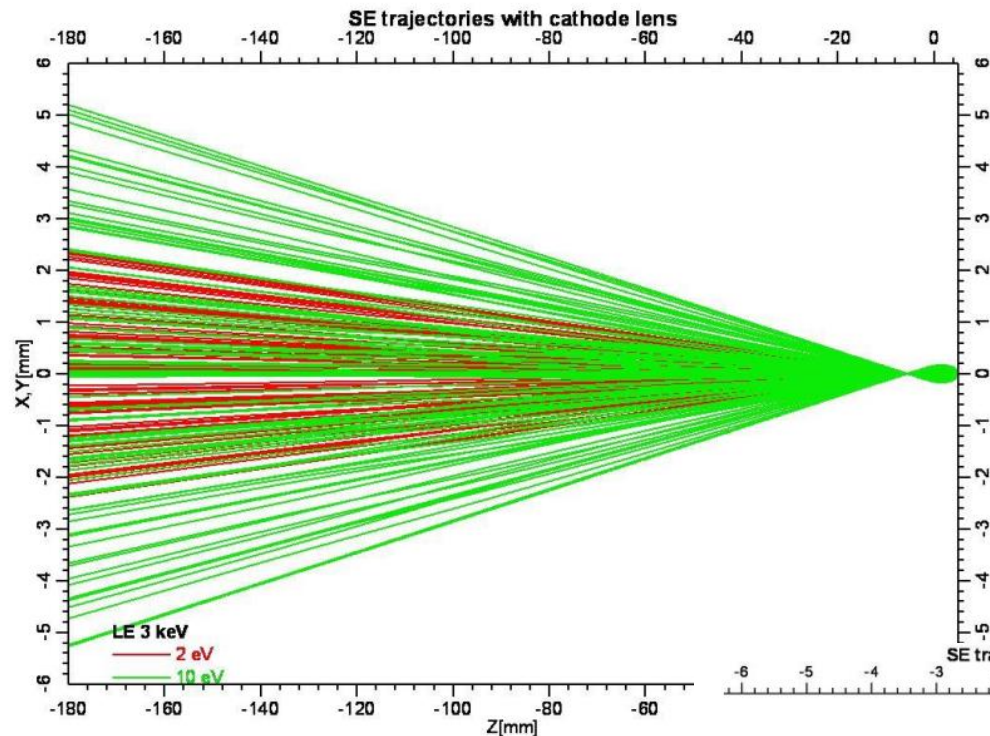


Рис. 2. Аксиальное сечение нижней части формирующей линзы. 1 — вытягивающий электрод, 2 — полюсные наконечники, 3 — нижний детектор с расположенной под ним сеткой, 4 — образец.

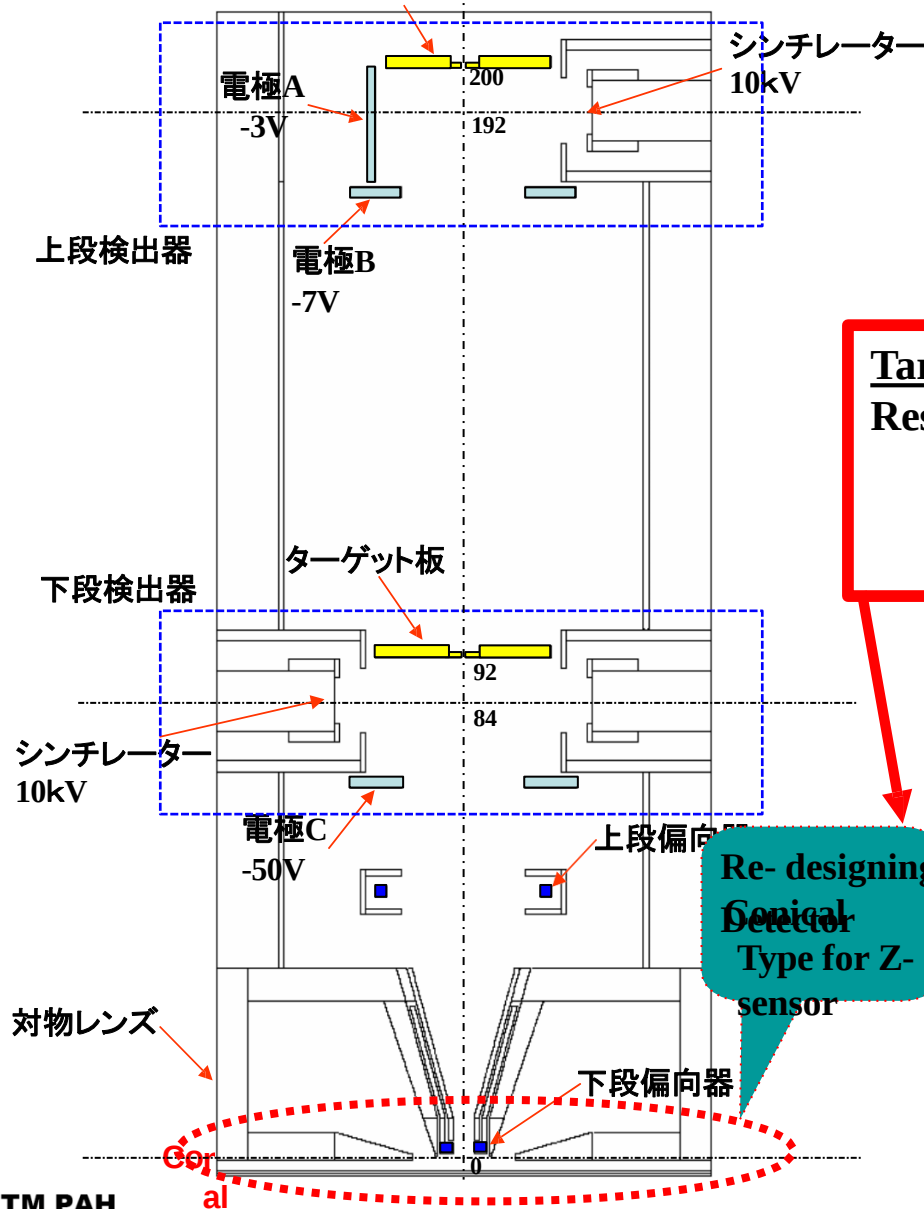






Throw the lens detector

ターゲット板



Simulating condiiyon

Resolution: 1~2

FOV : 50 μ m

distortion : <0.1%

Static Scan : +/-

60V

Target Specs.

Resolution

WD 2mm

Static Plate length

2mm Detection ratio

Without mesh

Top
detector Target
plate

Position
Diameter 200mm

0.5mm ϕ

Position

192mm Upper

Position 49mm

Diameter

30mm ϕ Length

2mm

Bottom
detector

92mm

1.5mm

ϕ

84mm

Lower

deflector

2.5mm

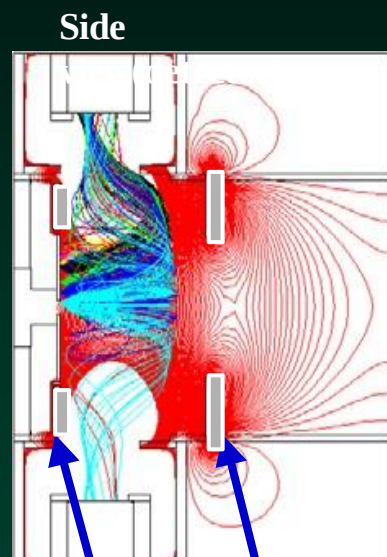
4mm

ϕ

2mm

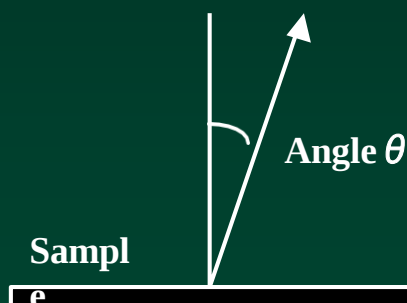
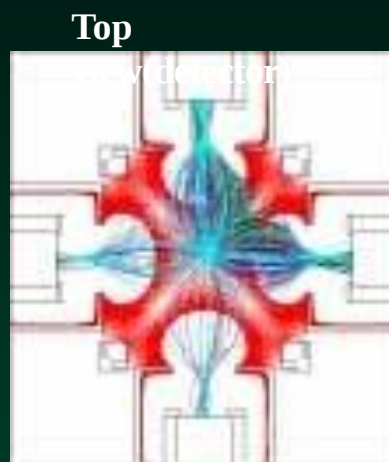
Оптимизация детектора

Simulation of secondary Electron Pass to the Detector



Top
Plate

Bottom
Plate



Condition

Detection Ratio; 100

% Top Plate

; -100V

Bottom Plate; -10V

Secondary Electron

Energy 3eV

Angle θ

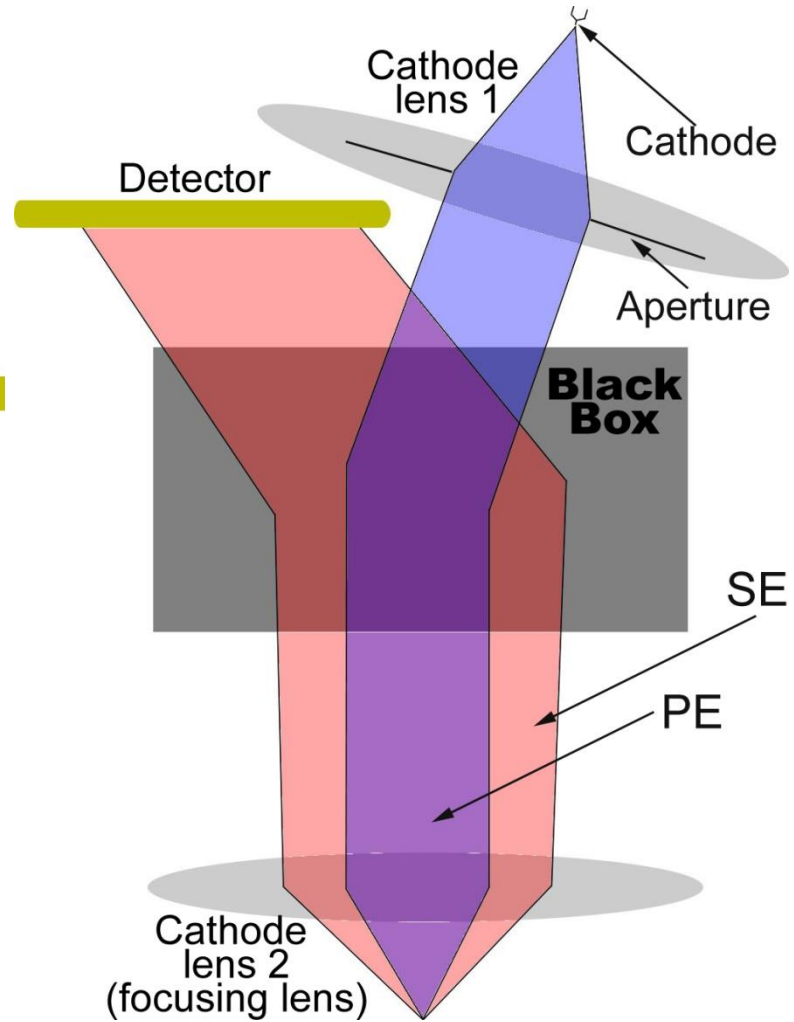
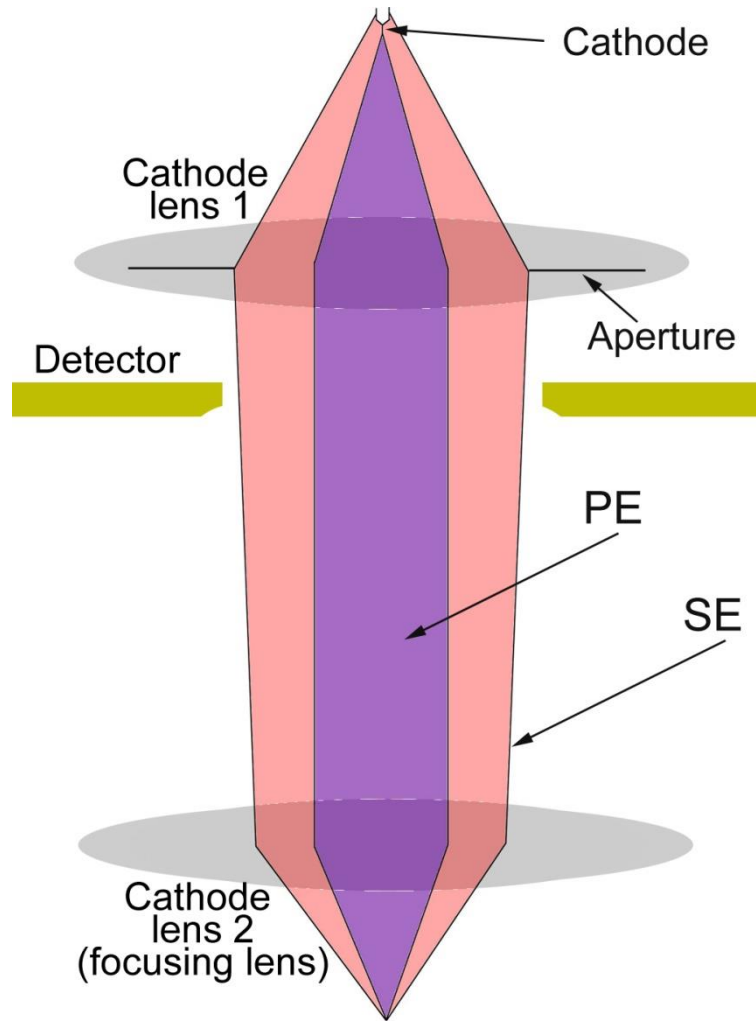
$0^\circ \sim 90^\circ$



Доработка колонны

низковольтный режим (0,5 – 100 эВ)

• Доработка электронно-оптической системы



Формирование изображения в РЭМ

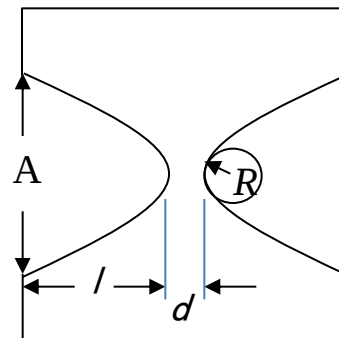
Single bi-concave refractive lens

A - aperture

R - radius of parabola apex

l - length of parabola

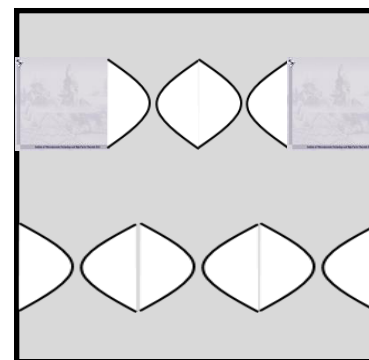
d - web size



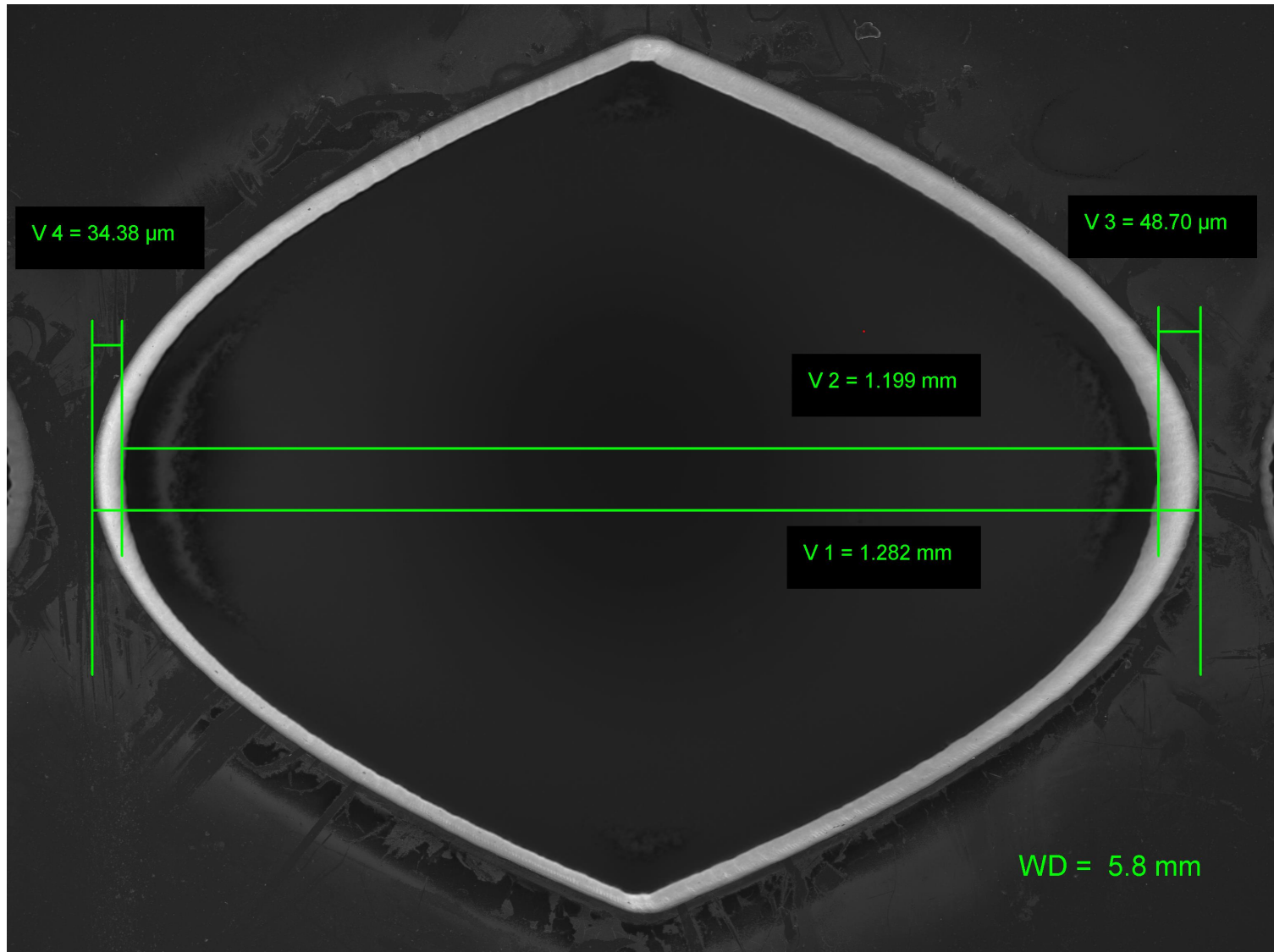
Радиусы (R) и допуски изготовления преломляющих профилей линз (δ)

- $R = 500 \mu\text{m}$, $A = 1000 \mu\text{m}$, $L = 250 \mu\text{m}$, $\delta = 5 \mu\text{m}$
- $R = 200 \mu\text{m}$, $A = 1000 \mu\text{m}$, $L = 625 \mu\text{m}$, $\delta = 2 \mu\text{m}$
- $R = 6.25 \mu\text{m}$, $A = 50 \mu\text{m}$, $L = 50 \mu\text{m}$, $\delta = 62 \text{ nm}$
- $R = 3.75 \mu\text{m}$, $A = 30 \mu\text{m}$, $L = 30 \mu\text{m}$, $\delta = 37 \text{ nm}$
- $R = 1.25 \mu\text{m}$, $A = 10 \mu\text{m}$, $L = 10 \mu\text{m}$, $\delta = 12 \text{ nm}$

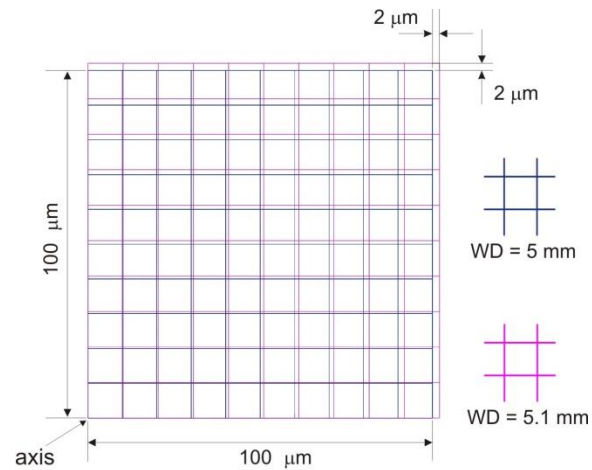
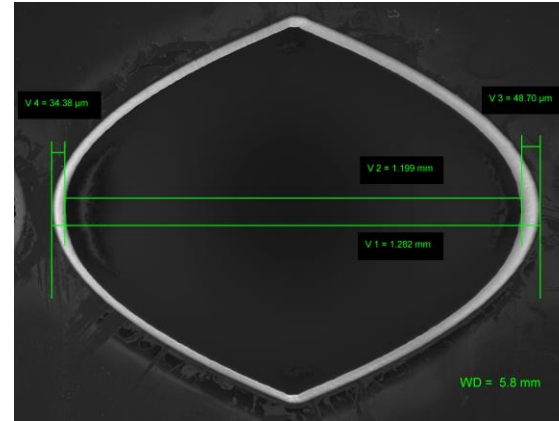
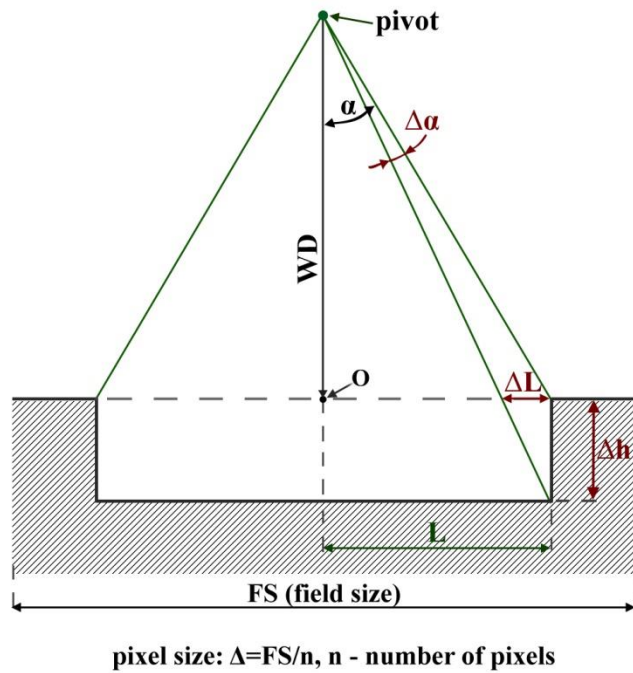
Planar lenses



ИЗОБРАЖЕНИЕ РЕНТГЕНОВСКОЙ ЛИНЗЫ



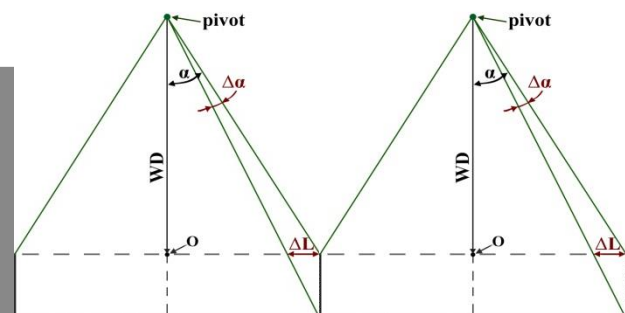
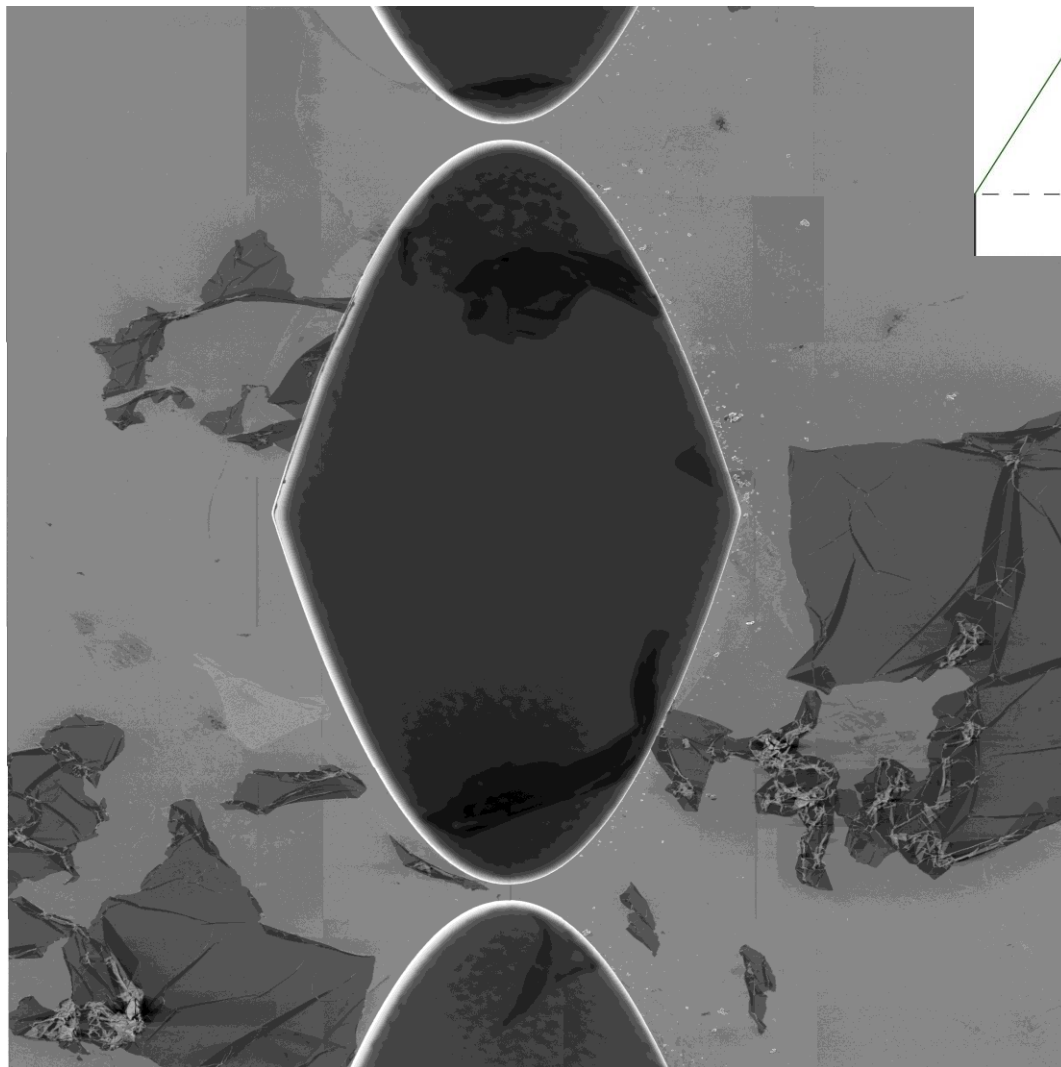
•Коррекция увеличения



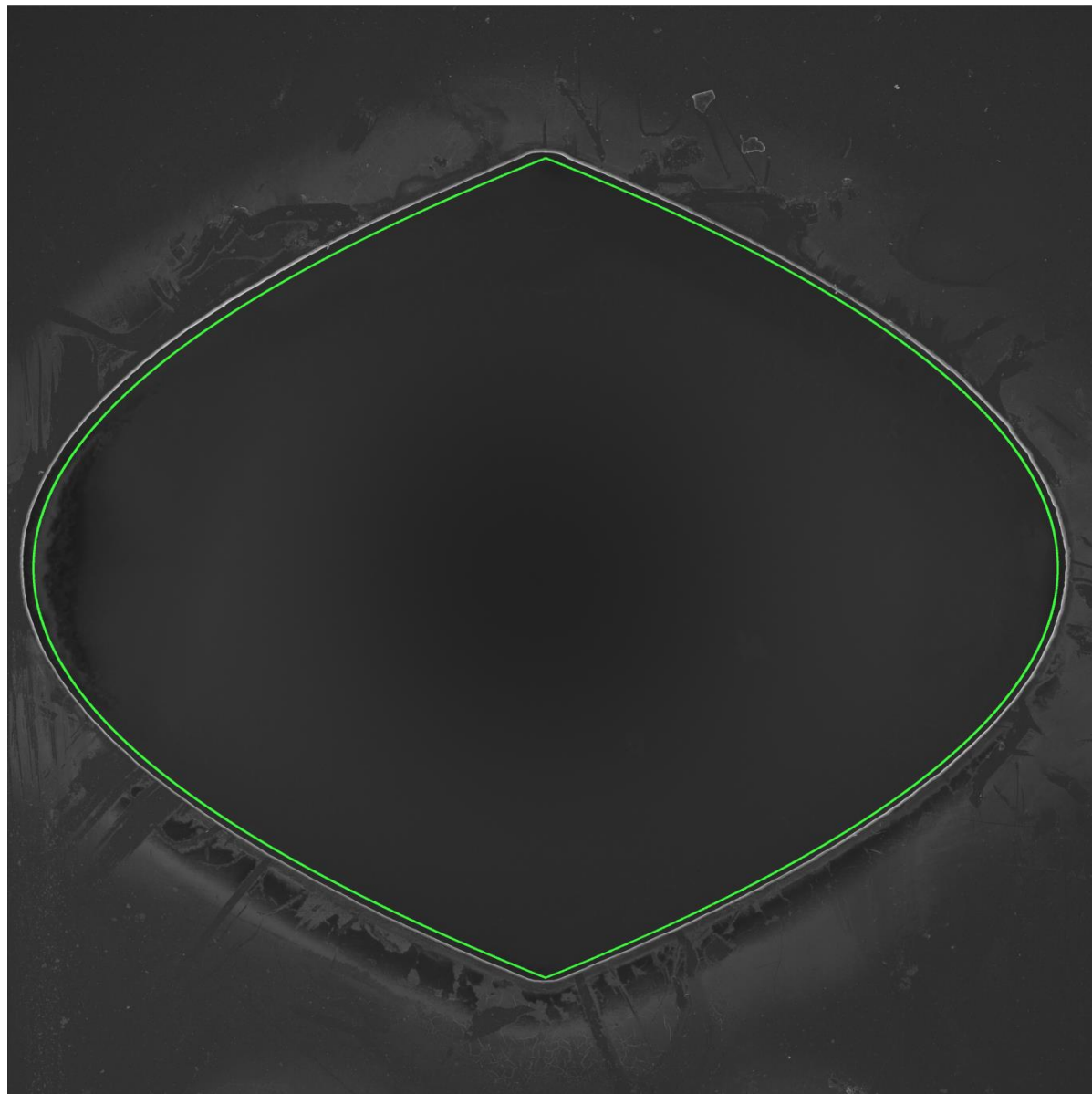
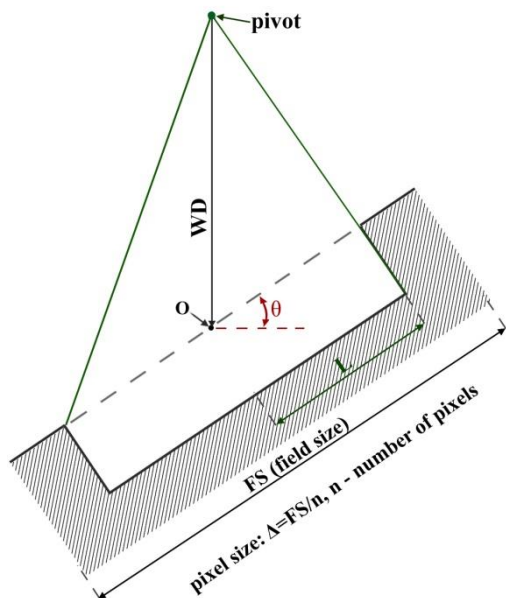
Magnification $k=1.02$

Формирование СЭМ изображения от канавки на поверхности объекта

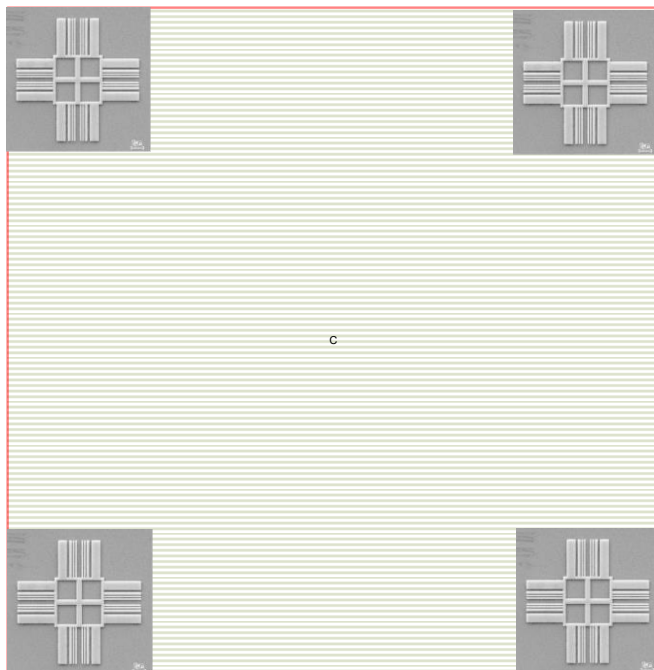
Композитное изображение



Изображение, составленное из 4-х квадрантов



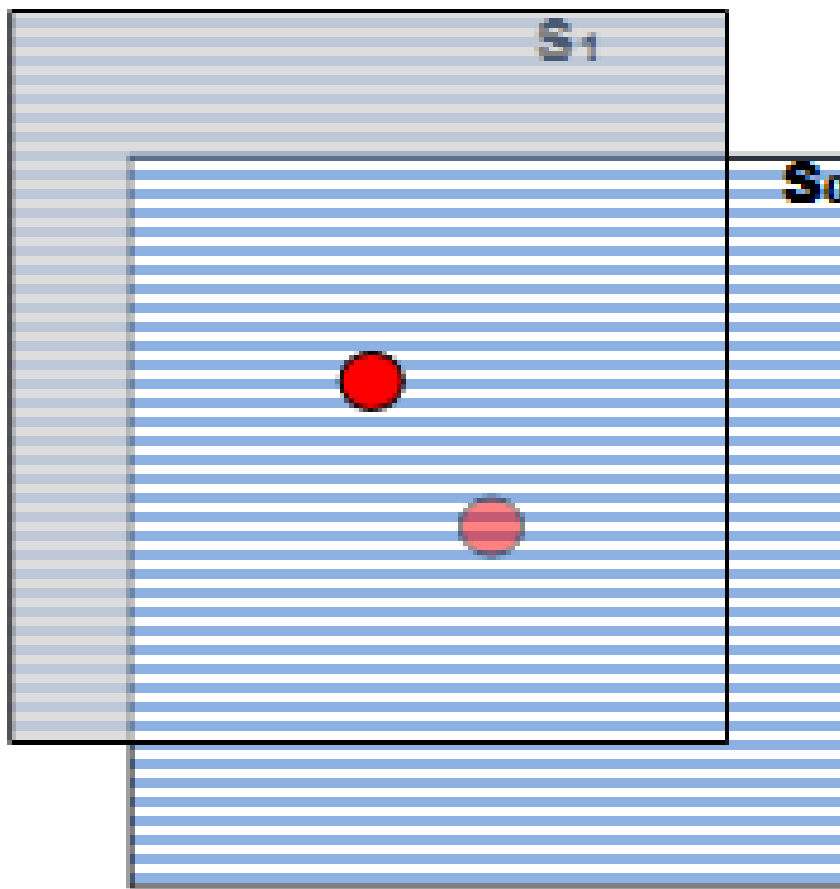
Эталонный участок для коррекции РЭМ изображения



c

Совмещение полей

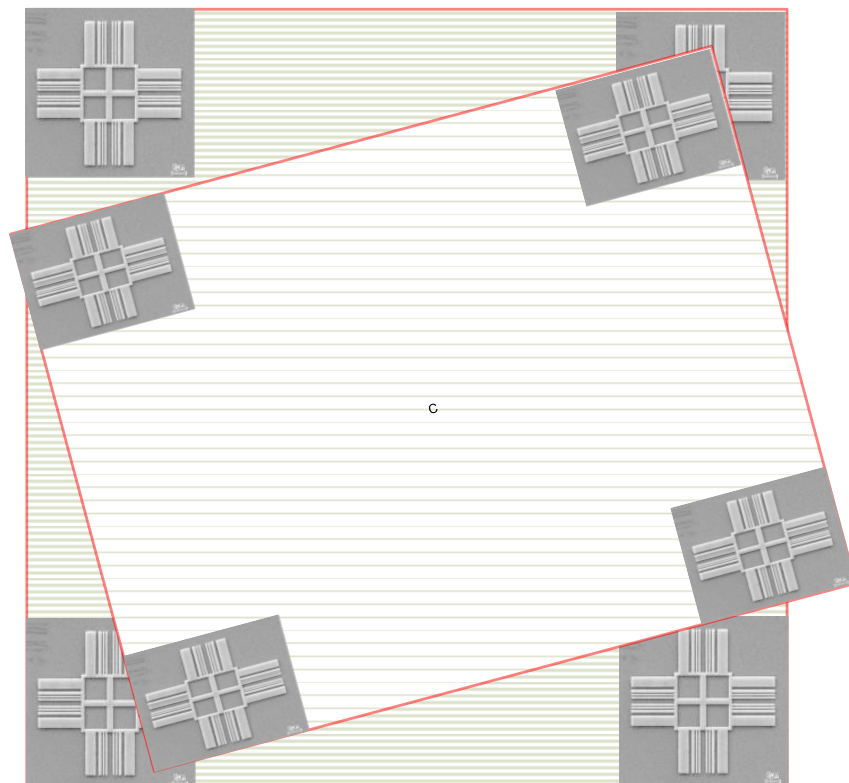
Смещение РЭМ изображения при наклоне оси ОЛ



Совмещение полей



РЭМ изображение после совмещения центра

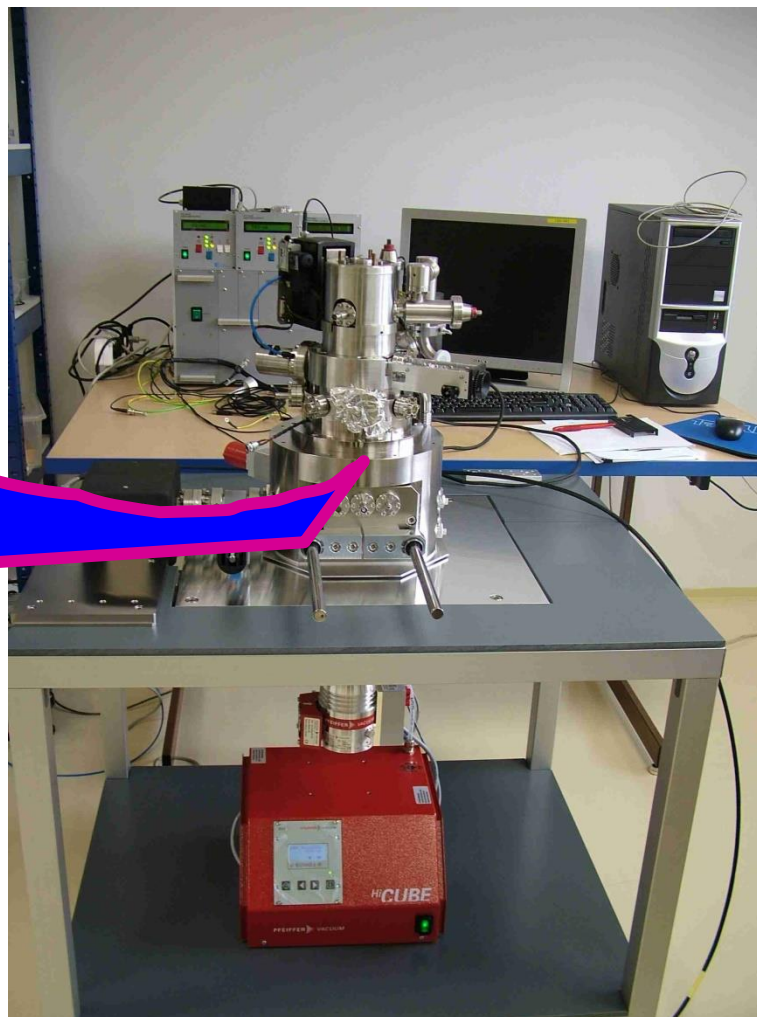


Совмещение полей



Измерения топологии микроструктур в РЭМ

Перенос эталона длины в РЭМ



ГОСТ Р 8.628-2007

Группа Т88.1

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

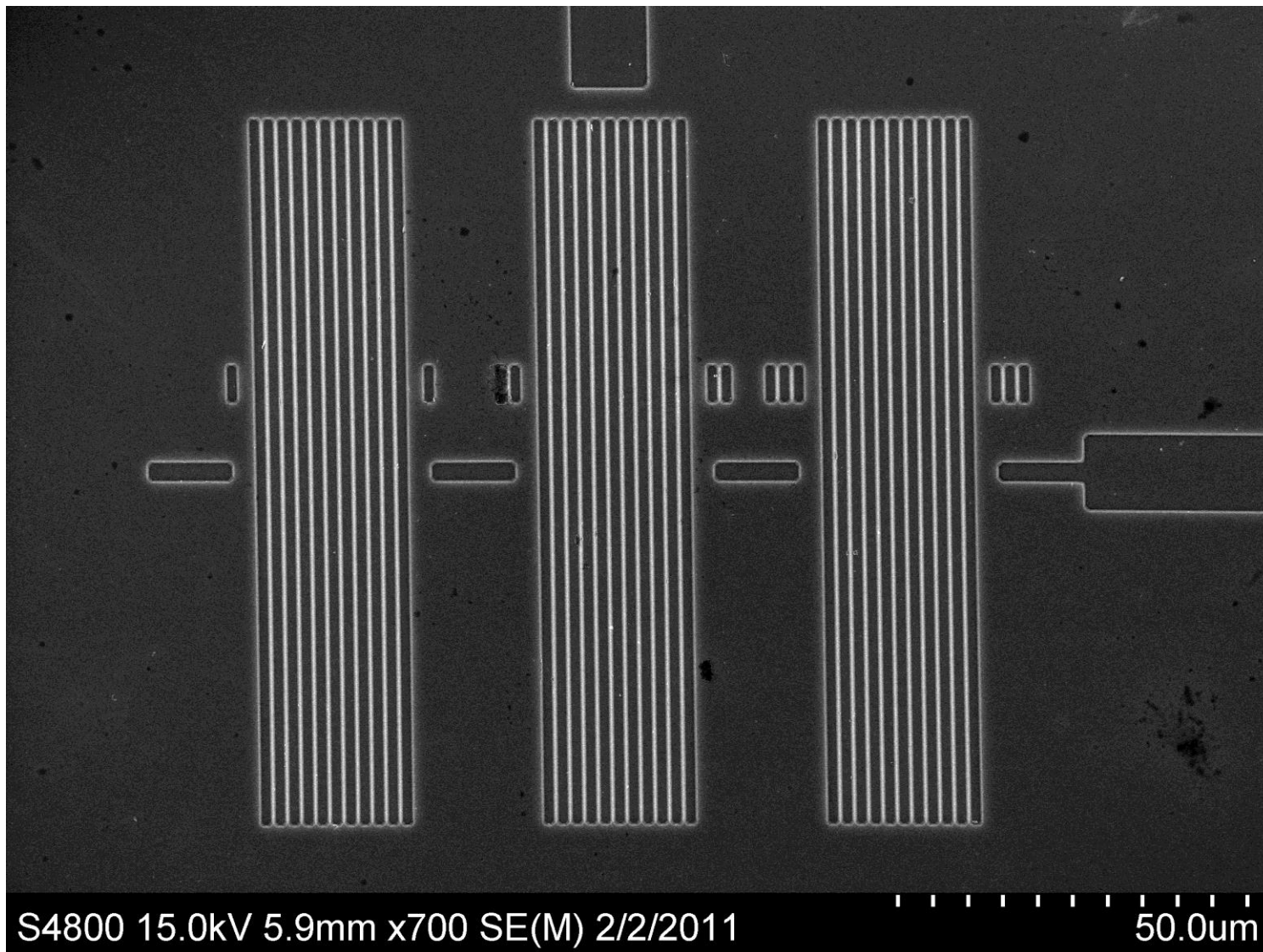
МЕРЫ РЕЛЬЕФНЫЕ НАНОМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ИЗ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору
материала для изготовления

State system for ensuring the uniformity of measurements. Single-crystal silicon
nanometer range relief measures. Requirements for geometrical shapes, linear sizes
and manufacturing material selection

ОКС 17.040.01

МШПС 2,0



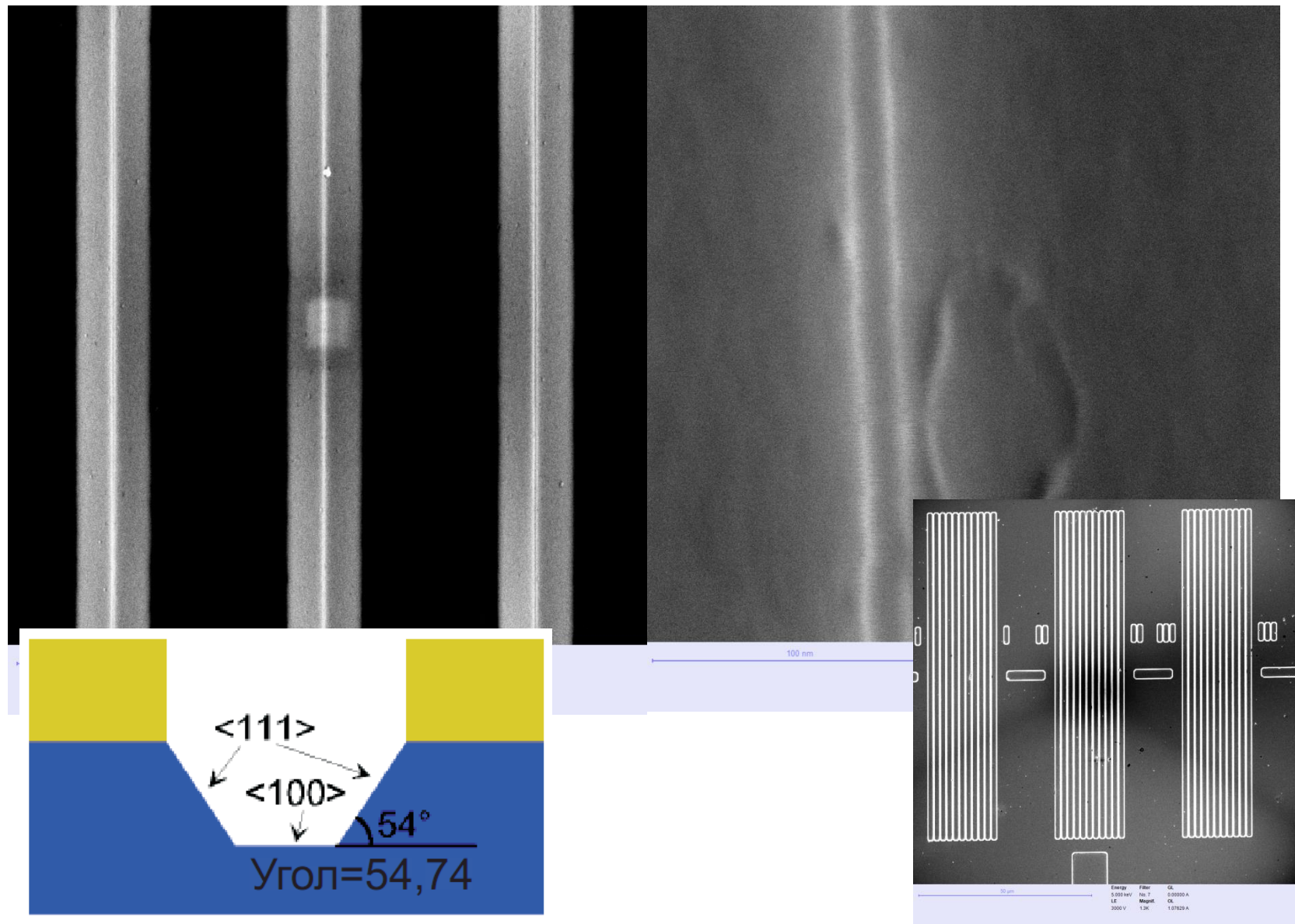
Измерения



ИПТМ РАН

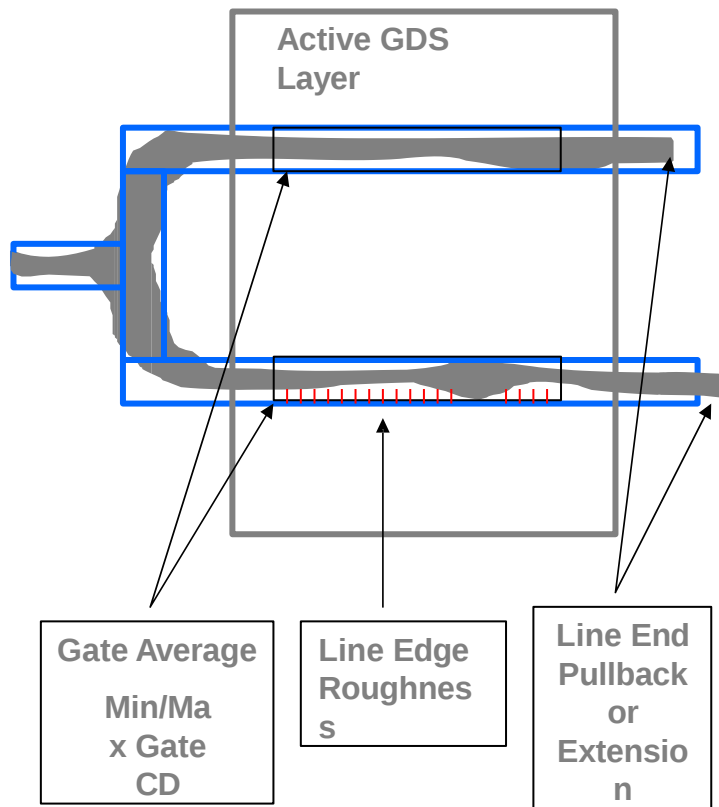
КОНТРОЛЬ ТРЕХМЕРНЫХ СТРУКТУР - 2,5D И 3D

Измерения

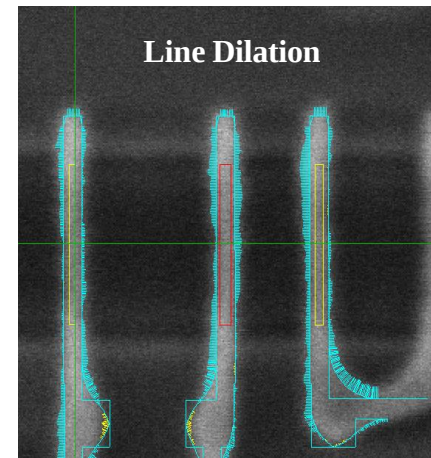
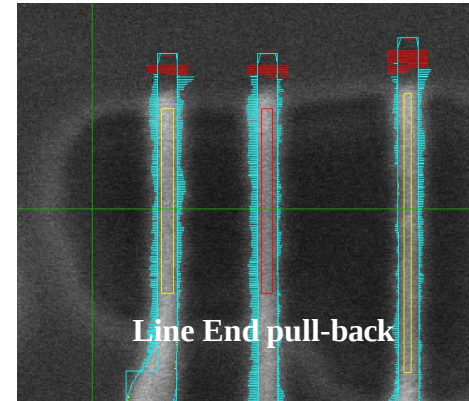


Gate Verifier Concept

Измерения 1D (CD)



NGR2100 GDS SEM
Mode



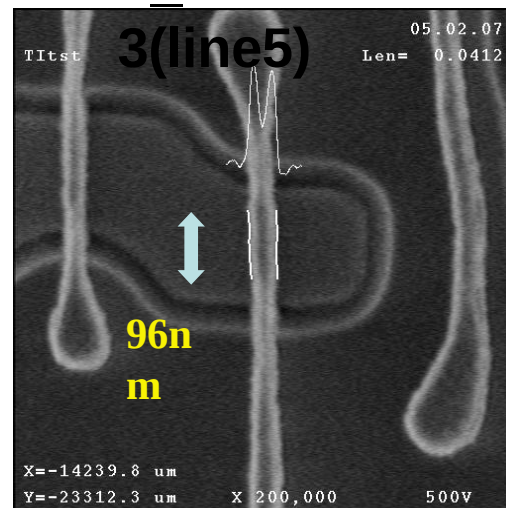
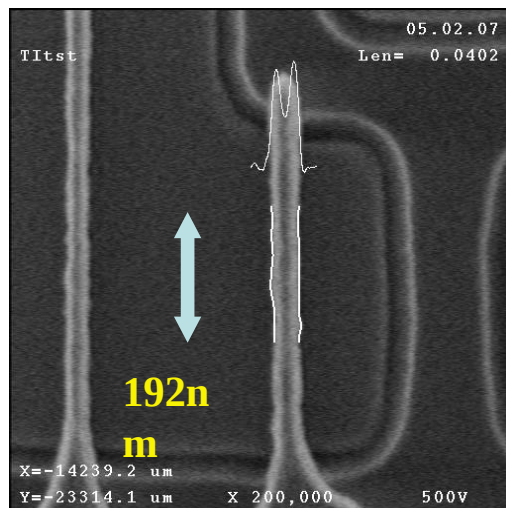
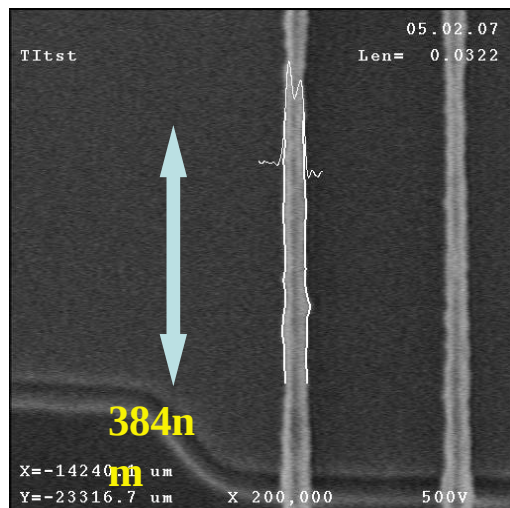
Freud1-3 (0.75um FOV) CD-SEM

image F_1-3(line1)

F_1-3(line3)

F_1-

3(line5)



F_1-

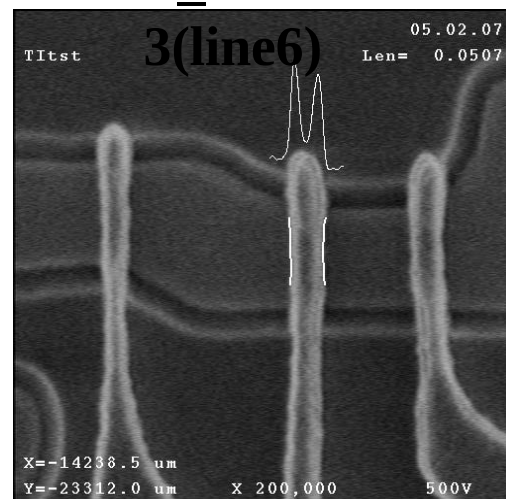
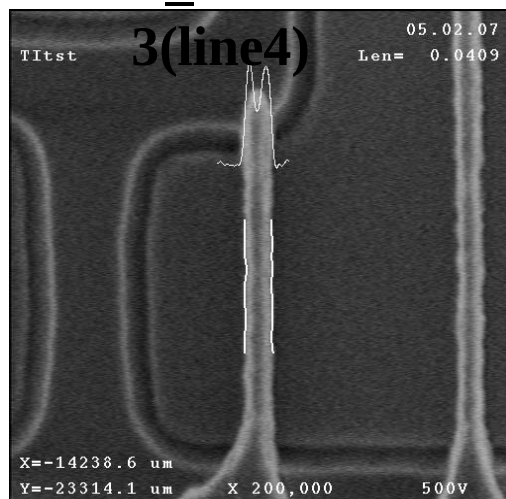
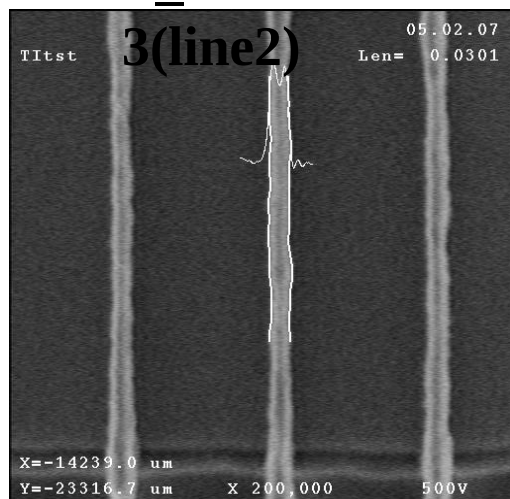
3(line2)

F_1-

3(line4)

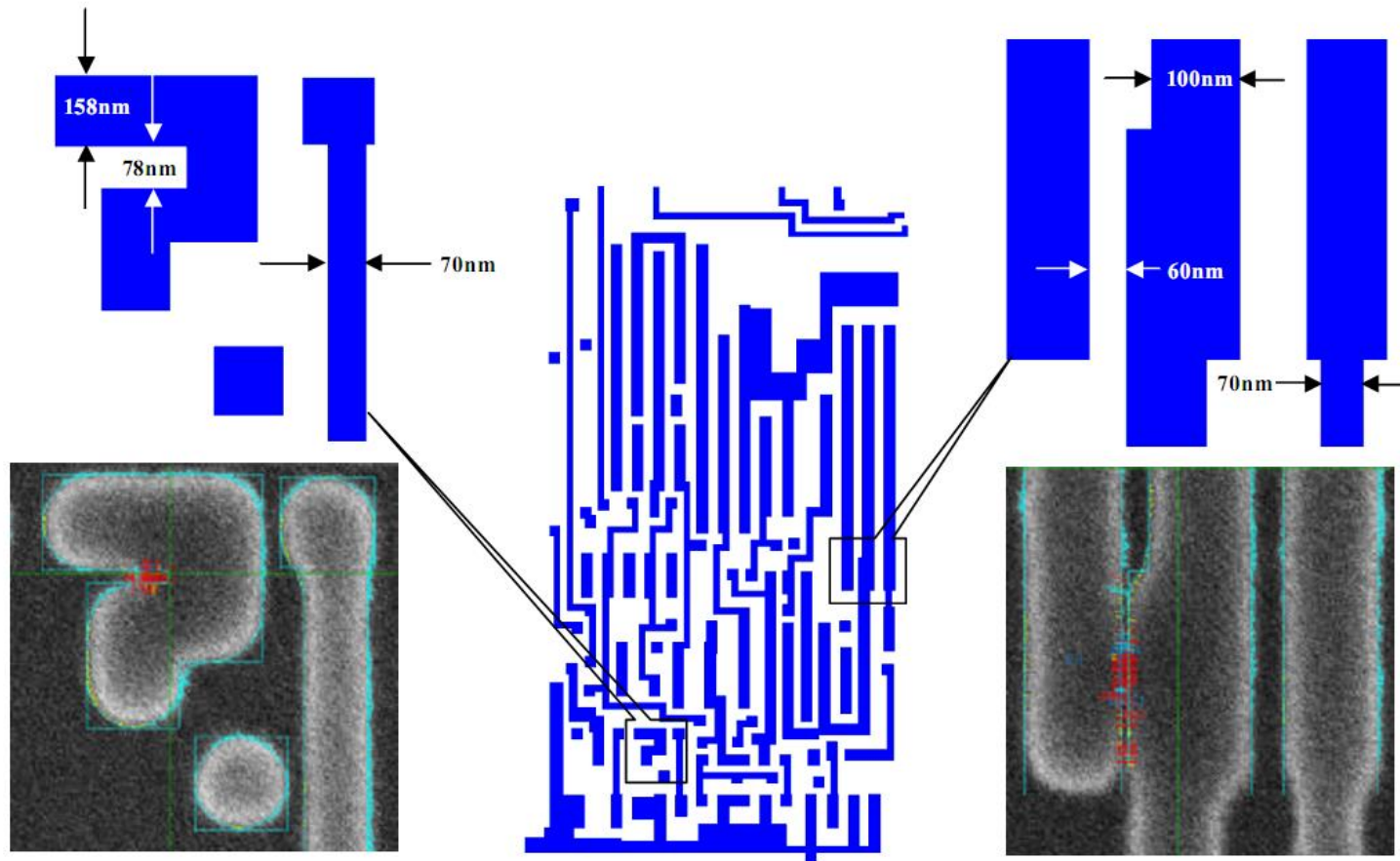
F_1-

3(line6)

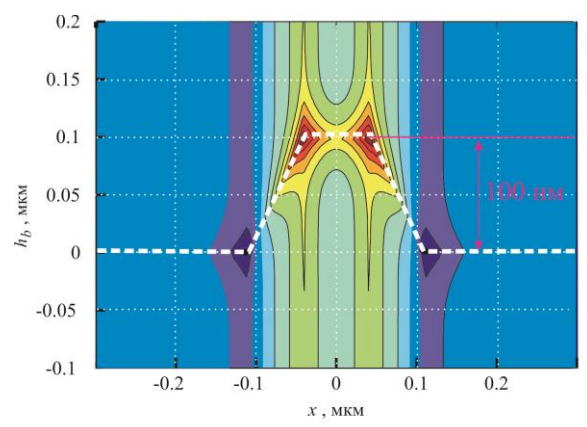


Измерения 1D (CD)

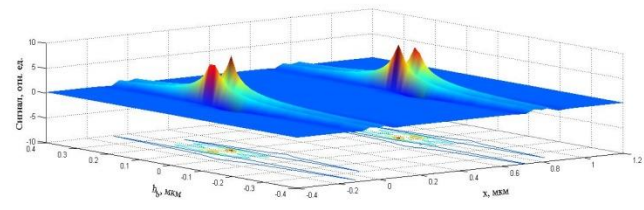
Electron Beam Die to Database Verification System (DDVS)



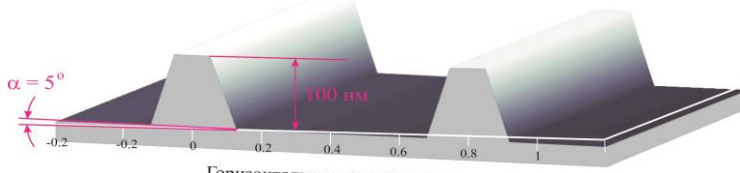
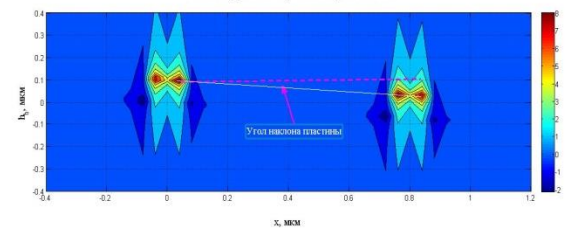
Imprinted 70 nm Logic CAD drawing (middle) and problem area magnifications on left (feature 1) and right (feature 2).



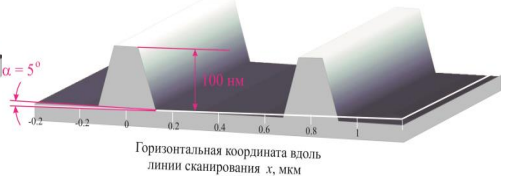
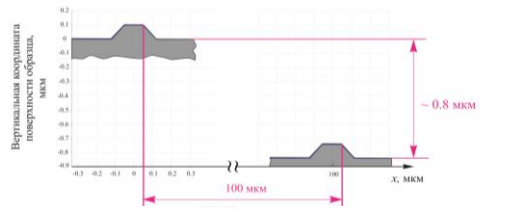
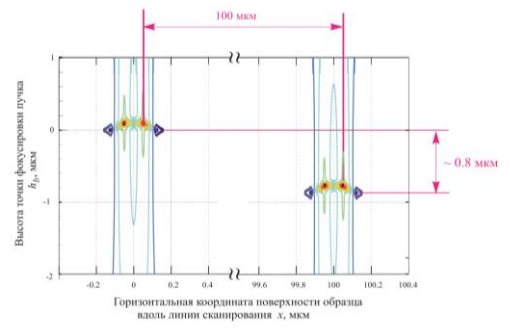
Карта сигнала для 2-х наклонных выступов высотой 0,1 мкм, угол наклона поверхности 5 град.



Области уровня поверхности карты сигнала



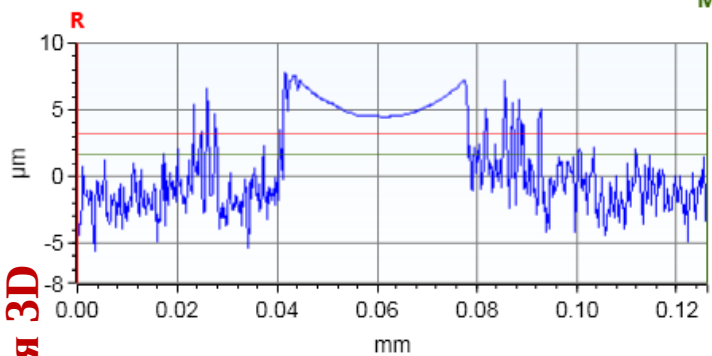
Горизонтальная координата вдоль линии сканирования x , мкм



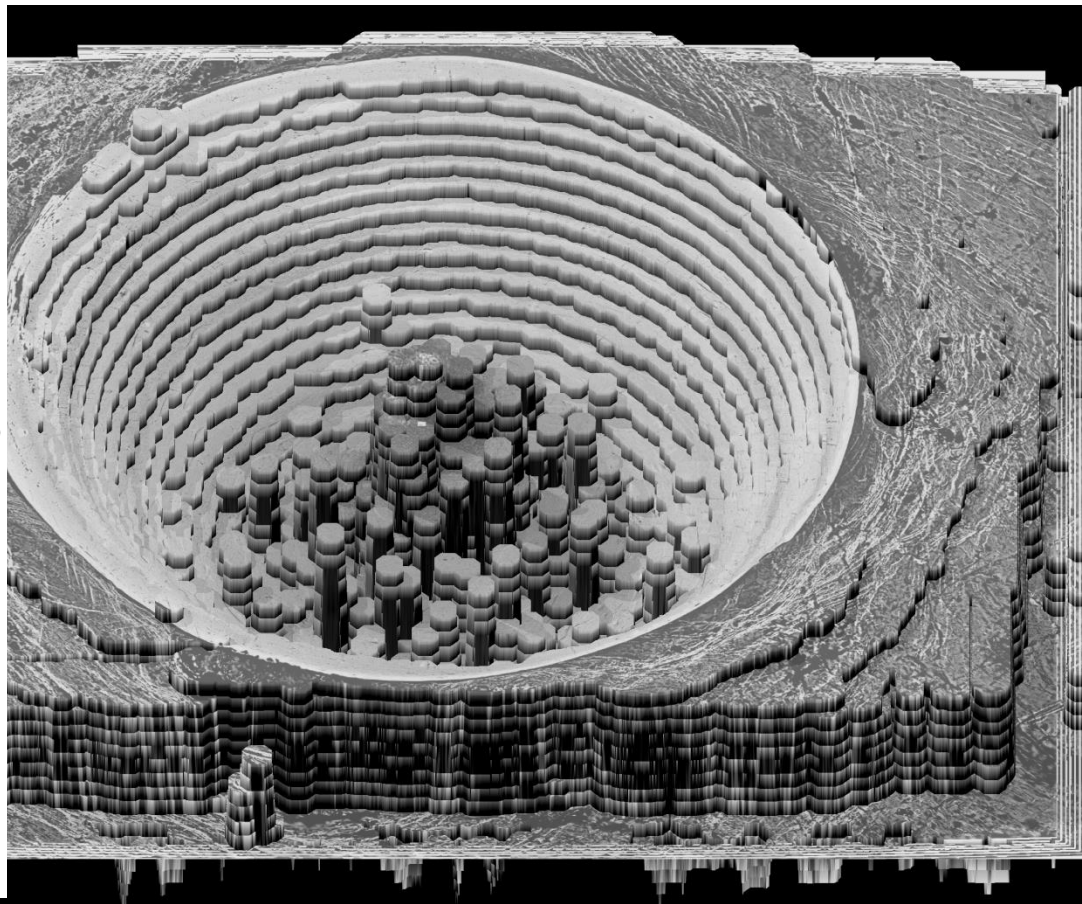
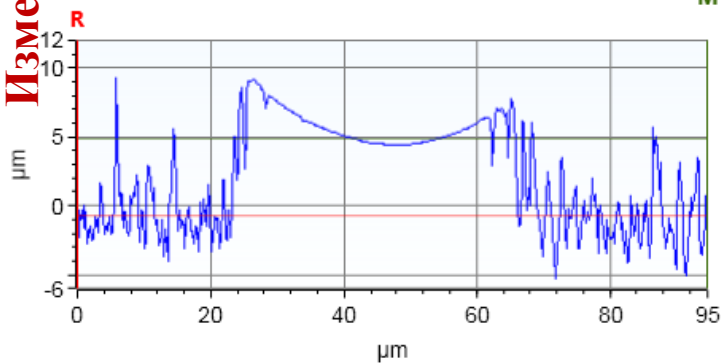
Горизонтальная координата вдоль линии сканирования x , мкм



X Profile: $\Delta X=0,1261$ mm; $\Delta Z=-1,5673$ μm



Y Profile: $\Delta X=94,5395$ μm ; $\Delta Z=5,6111$ μm



Спасибо за внимание