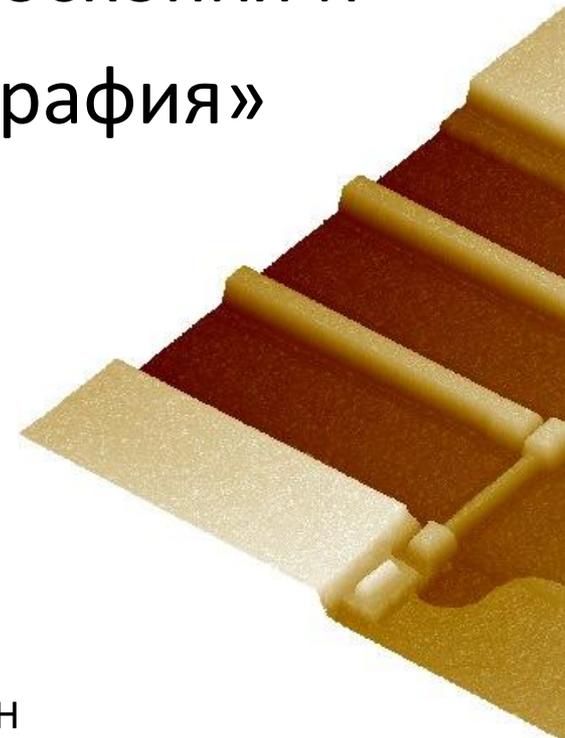


Фоминский М.Ю.<sup>1</sup>, н.с. « Электронная микроскопия и  
электронная литография»

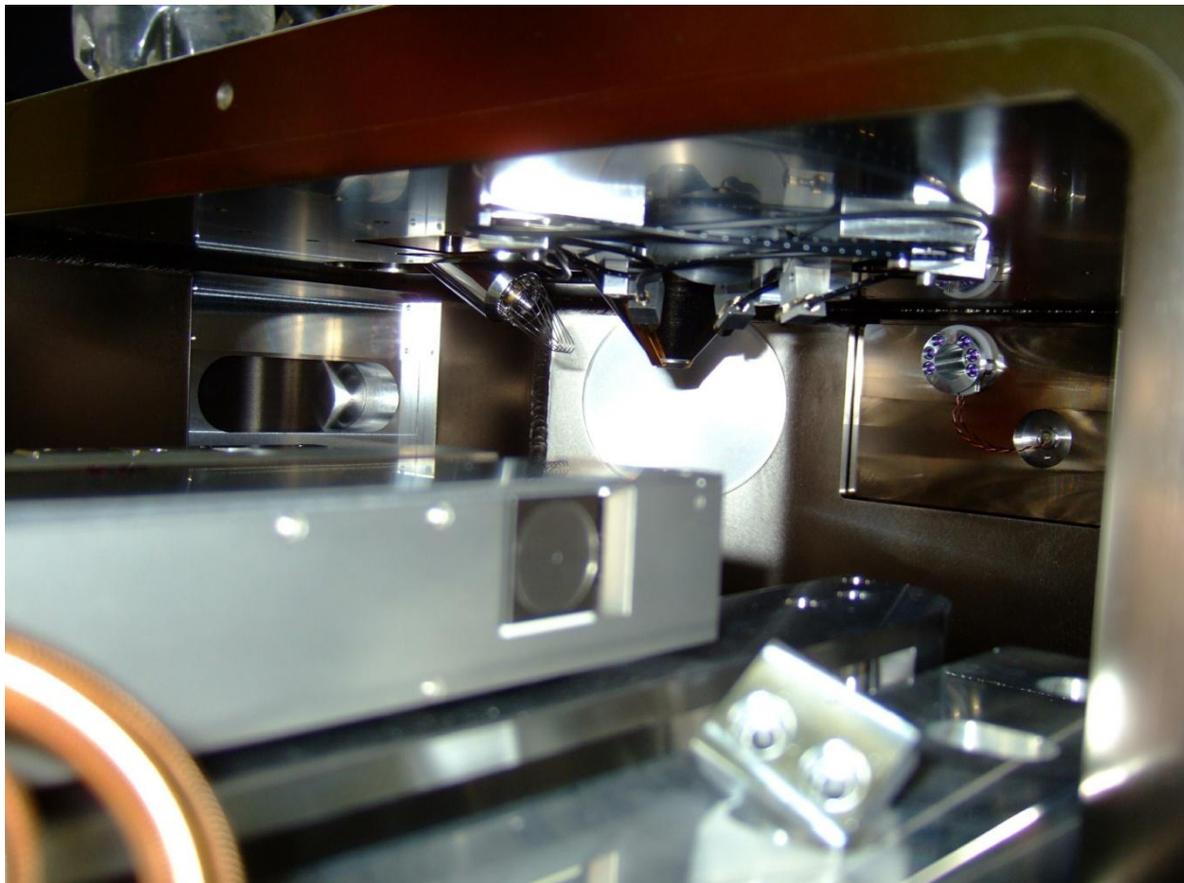


НОЦ ИРЭ РАН

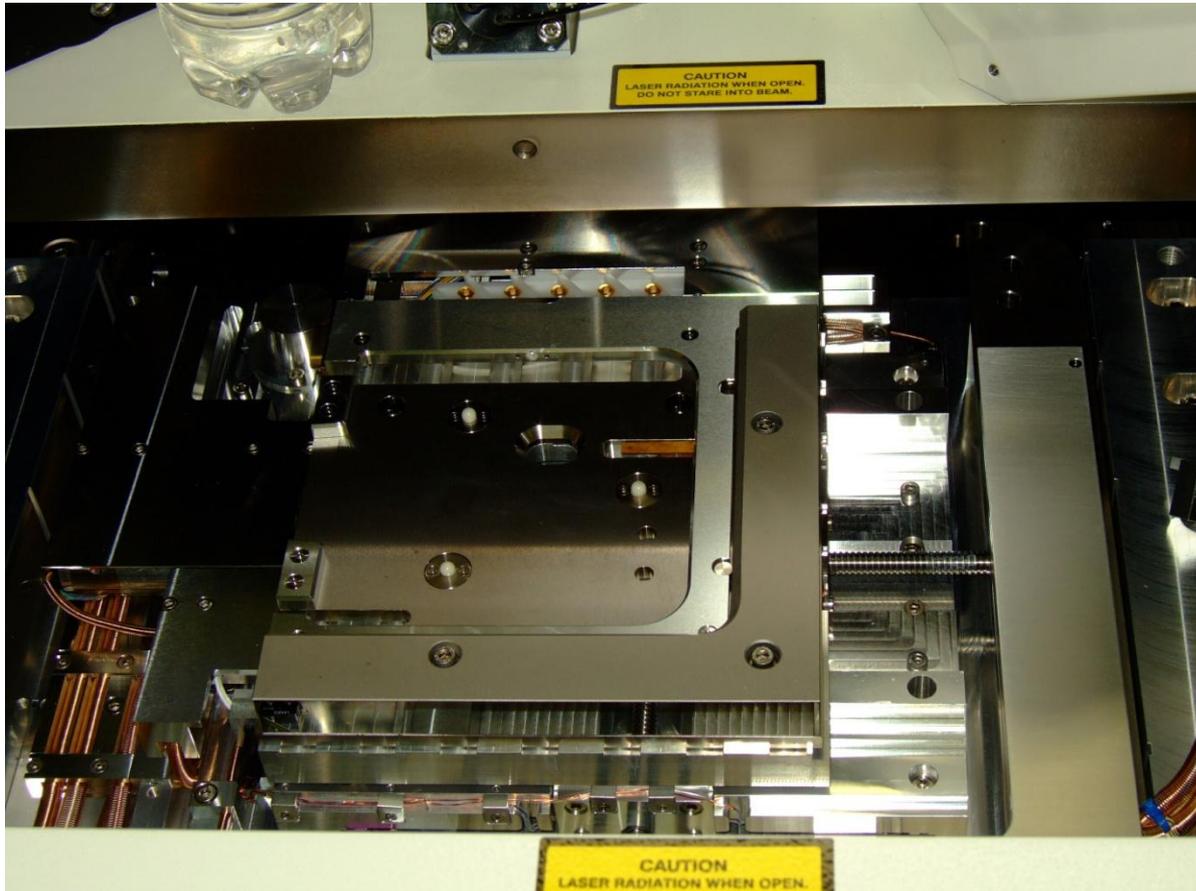
## Общий вид установки электронно-лучевой литографии Raith e-LiNE.



Система электронной литографии объединяет в себе сканирующий электронный микроскоп (произведенный компанией Carl Zeiss с использованием колонны для формирования электронного пучка Gemini) и систему электронной литографии производства Raith (состоящей из лазерной интерферометрической платформы и цифро-аналогового преобразователя для управления отклонением электронного луча). Размер электронного пучка составляет 2 нм для ускоряющего напряжения 20 кВ. Минимальный размер структуры для резиста с ультравысоким разрешением HSQ составил 20 нм. Система электронной литографии Raith e\_LiNE может использоваться как для исследования топографии и электронных свойств микро- и нанообъектов, так и для создания объектов с предельными размерами ~20 нм в режиме прямой литографии и в режиме создания фотошаблонов.

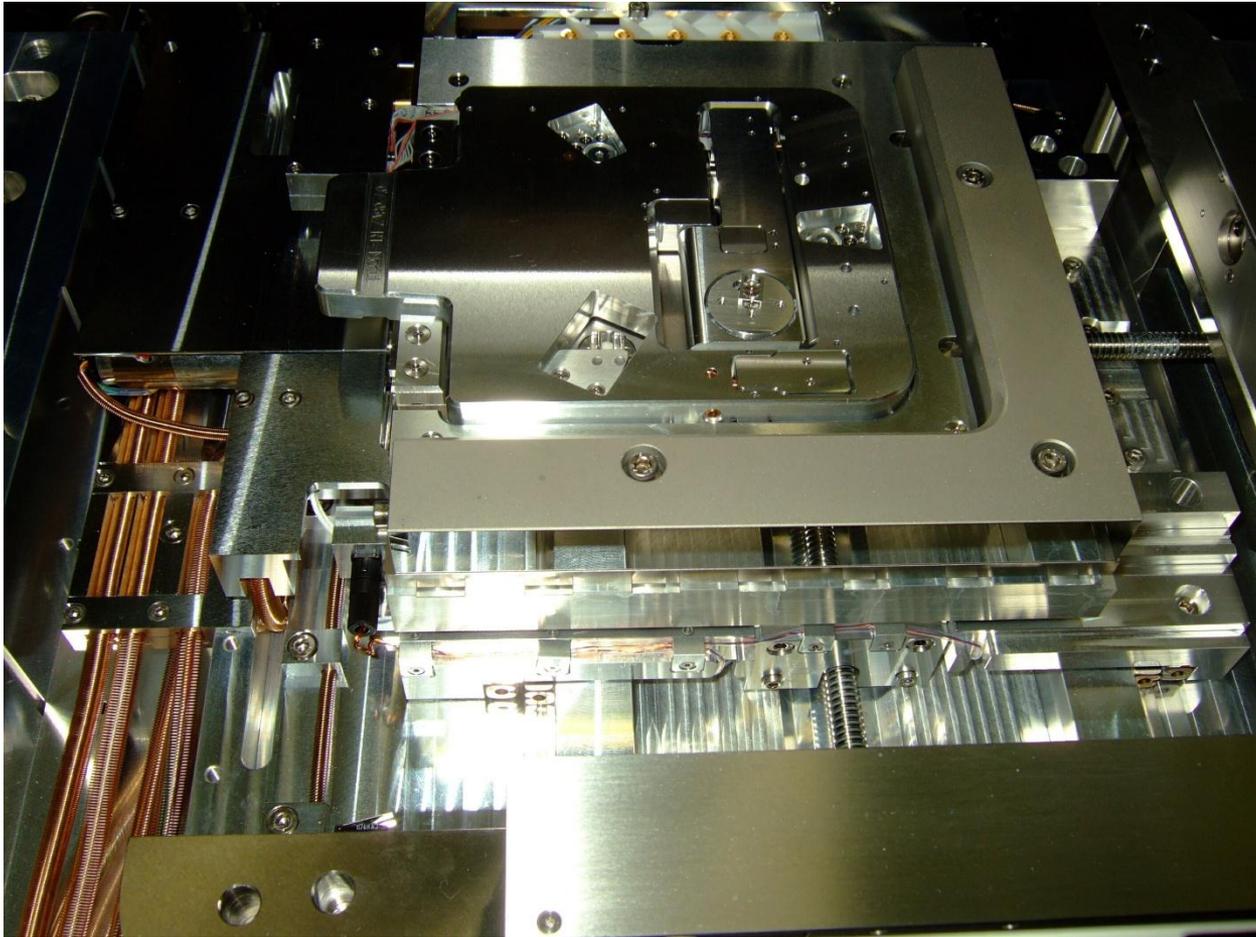


Вид камеры и электронная пушка.



Подвижная платформа для прецизионного перемещения образца.

- Диапазон перемещения: 100x100мм → возможность изготовления фотошаблонов размером до 4".
- Точность перемещения платформы: 50нм.
- Точность считывания координат: 2нм.



Подвижная платформа для прецизионного перемещения с установленным столиком для образца (оборудованный поворотным механизмом).

## Терминал управляющего компьютера.



Основные параметры  
установки:

- размер электронного пучка 4 нм (1 кэВ; апертура 30 мкм);
- ток катода 5 пА - 20 нА;
- ускоряющее напряжение 100 В - 30 кВ;
- совместимость с форматами GDSII, DXF, CIF, ASCII, BMP;
- минимальный размер воспроизводимых структур 20 нм.

## Оптическая литография

Структуры с характерным размером  
~1μм и более

Высокая скорость (параллельная  
экспозиция)

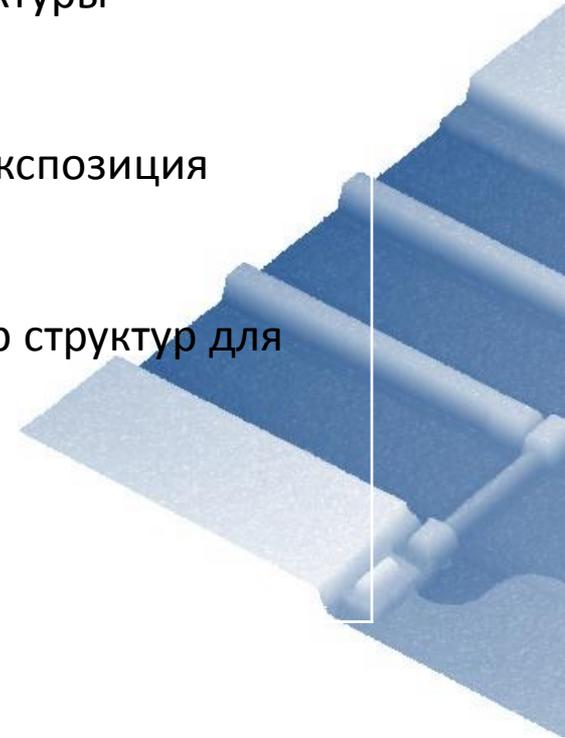
Ограничение по минимальному  
размеру структур (предел по  
дифракции, ~50нм)

## Электронная литография

Субмикронные структуры

Последовательная экспозиция

Достижимый размер структур для  
Raith e-LiNE ~20нм



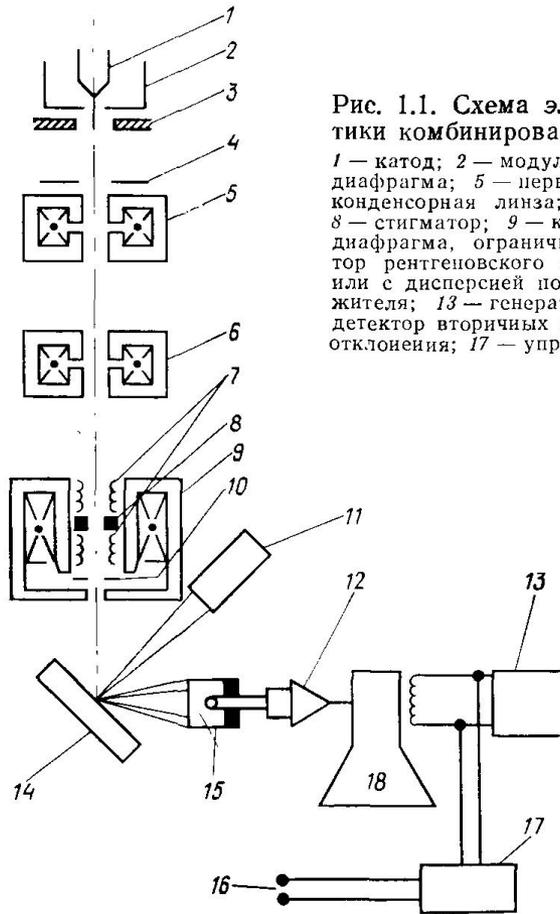
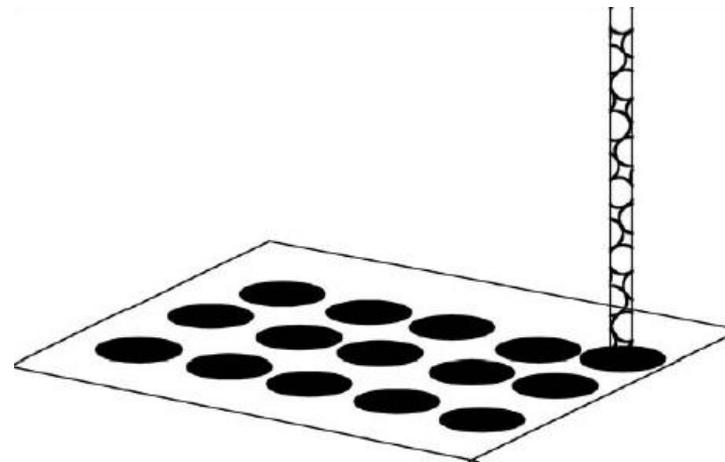
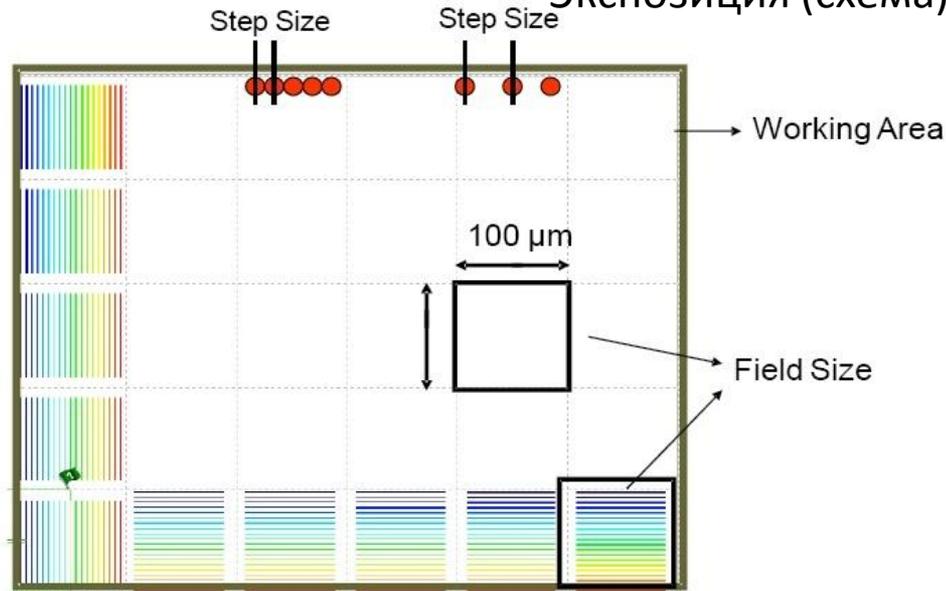


Рис. 1.1. Схема электронной и рентгеновской оптики комбинированного РЭМ — РМА.

1 — катод; 2 — модулятор; 3 — анод; 4 — ограничивающая диафрагма; 5 — первая конденсорная линза; 6 — вторая конденсорная линза; 7 — катушка двойного отклонения; 8 — стигматор; 9 — конечная (объективная) линза; 10 — диафрагма, ограничивающая размер пучка; 11 — детектор рентгеновского излучения (кристалл-дифракционный или с дисперсией по энергии); 12 — усилитель фотоумножителя; 13 — генераторы развертки; 14 — образец; 15 — детектор вторичных электронов; 16 — к катушке двойного отклонения; 17 — управление увеличением; 18 — ЭЛТ.



Экспозиция (схема).

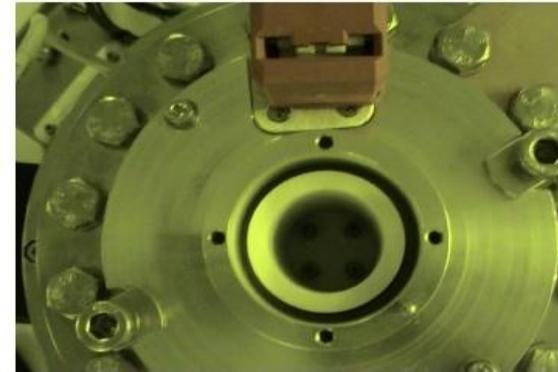
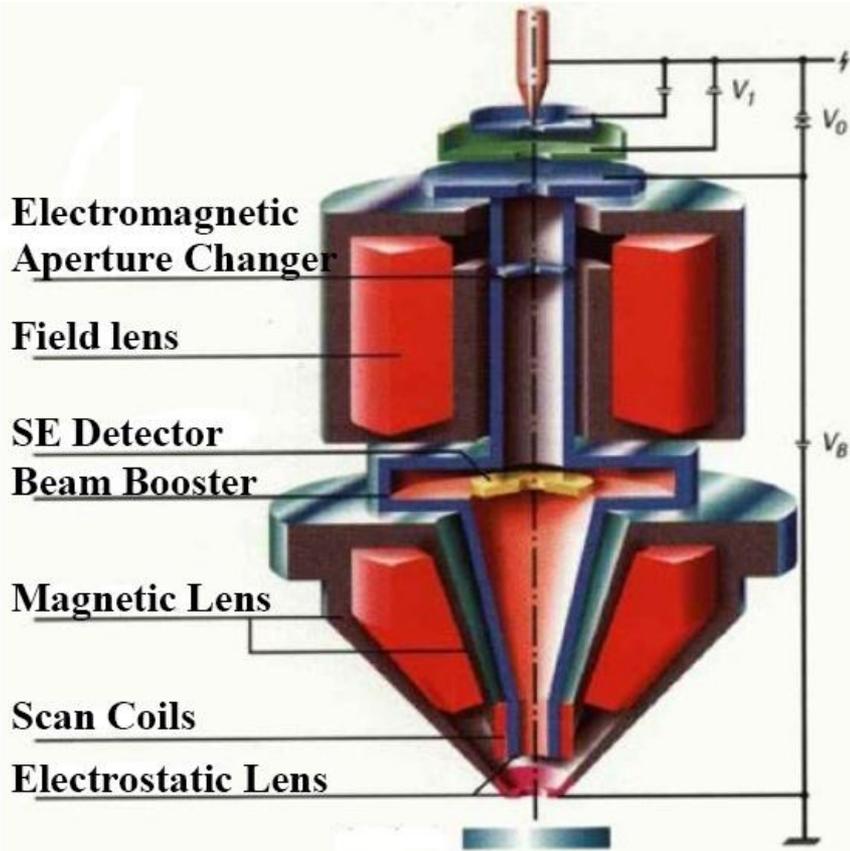


$$\text{Area Dose} = \frac{I_{\text{beam}} \cdot T_{\text{dwell}}}{s^2} \quad \text{Unit is } \mu\text{As/cm}^2$$

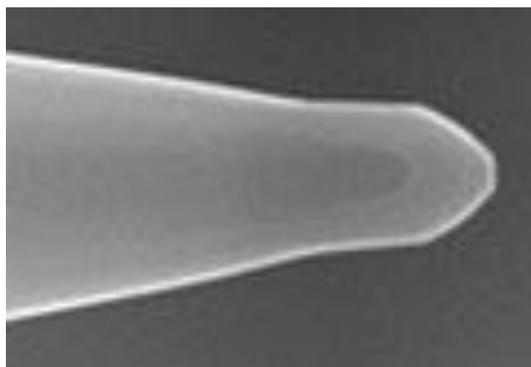
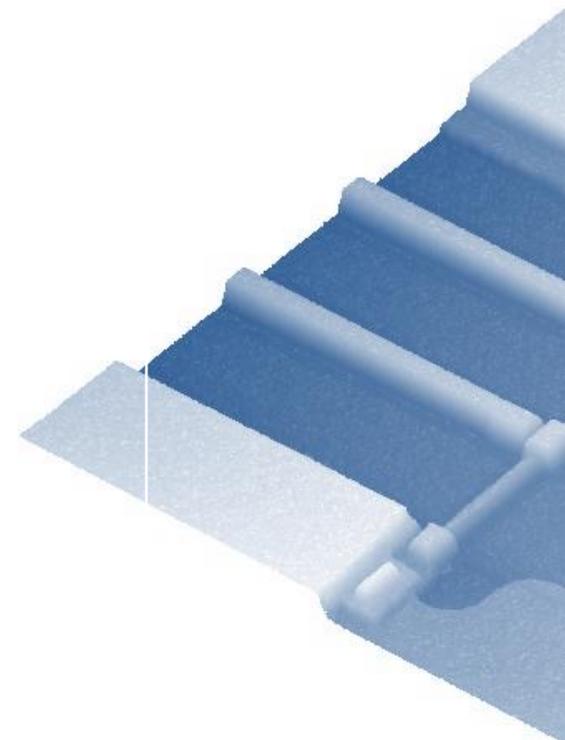
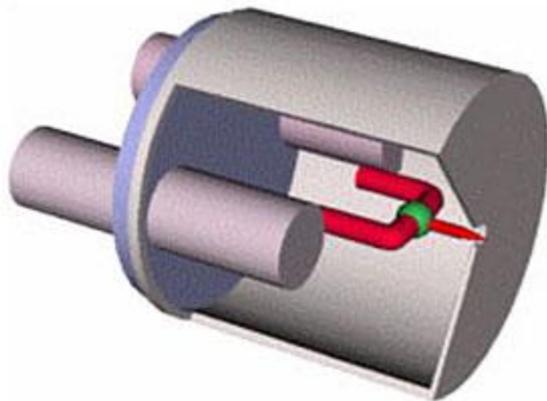
$$\text{Line Dose} = \frac{I_{\text{beam}} \cdot T_{\text{dwell}}}{s} \quad \text{Unit is pAs/cm}$$

$$\text{Dot Dose} = I_{\text{beam}} \cdot T_{\text{dwell}} \quad \text{Unit is pAs}$$

[www.cplire.ru](http://www.cplire.ru)



Колонна (схема). Верхняя часть колонны (фото) и ионно-гетерный насос  $10^{-9}$ тбар (фото).

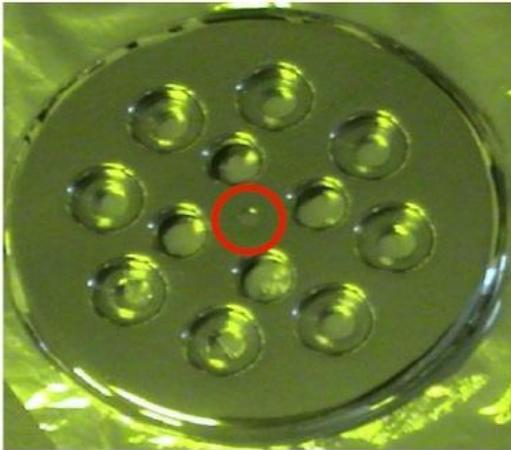


### YPS-174 TFE source

Туннельная эмиссия (field emission).

Материал – вольфрам/оксид циркония.

Размер эмиттера  $\sim 0.3\mu\text{m}$ .



Aperture (um)	Beam Current (nA)
7.5	0.016
10	0.036
20	0.116
30	0.23
60	0.998
120	4.028

Апертуры:

30μm – стандарт, для большинства приложений;

7.5,10,20μm – высокие разрешения или образцы чувствительные к заряду;

60,120μm – высокая плотность тока (электронная литография).

Апертура уменьшает aberrации и задает ток пучка.

Emitter Type	Thermionic	Thermionic	Schottky FE	cold FE
Cathode material	W	LaB <sub>6</sub>	ZrO/W (100)	W(310)
Operating temperature [K]	2,800	1,900	1,800	300
Cathode radius [nm]	60,000	10,000	< 1,000	< 100
Effective source radius [nm]	15,000	5,000	15 (*)	2.5(*)
Emission current density [A/cm <sup>2</sup> ]	3	30	5,300	17,000
Total emission current [μA]	200	80	200	5
Normalized brightness [A/cm <sup>2</sup> .sr.kV]	1 x 10 <sup>4</sup>	1 x 10 <sup>5</sup>	1 x 10 <sup>7</sup>	2 x 10 <sup>7</sup>
Maximum probe current [nA]	1000	1000	10	0.2
Energy spread @ cathode [eV]	0.59	0.40	0.31	0.26
Energy spread @ gun exit [eV]	1.5 - 2.5	1.3 - 2.5	0.35 - 0.7	0.3 - 0.7
Beam noise [%]	1	1	1	5 - 10
Emission current drift [%/h]	0.1	0.2	< 0.5	5
Operating vacuum hPa/mbar <sup>1</sup>	< 1 x 10 <sup>-5</sup>	< 1 x 10 <sup>-6</sup>	< 1 x 10 <sup>-9</sup>	< 1 x 10 <sup>-10</sup>
Typical Cathode life [h]	100	> 1000	> 5000	> 2000
Cathode regeneration	not required	not required	not required	every 6 to 8 hours
Sensitivity to external influence	minimal	minimal	low	high

Сканирующая электронная микроскопия применяется для исследования структуры поверхности материалов. Взаимодействие электронов сфокусированного пучка с атомами образца может приводить как к их рассеянию (используется для получения изображения в просвечивающих электронных микроскопах), так и к появлению различных вторичных явлений, несущих информацию о свойствах поверхности материала.

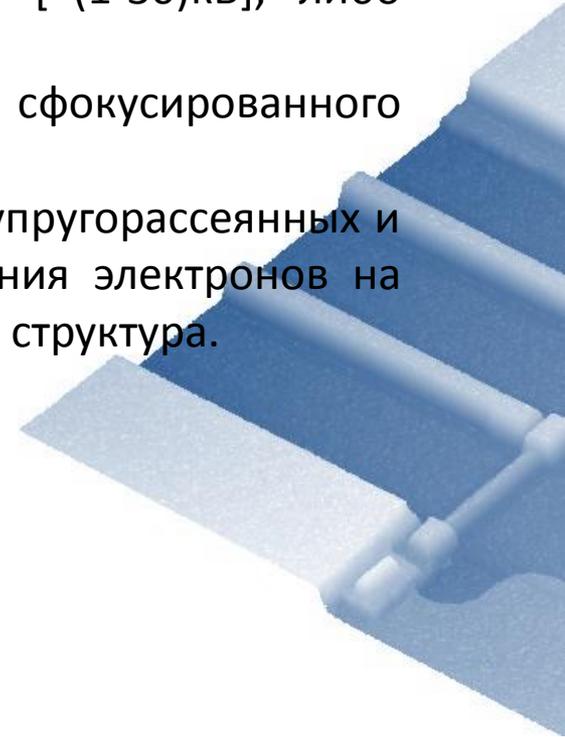
Взаимодействия можно разделить на 2 класса:

1. Упругие процессы, воздействующие на траектории электронов пучка внутри образца без существенного изменения энергии
  2. Неупругие процессы, при которых происходит передача энергии твердому телу (вторичные электроны  $\sim 0-50\text{эВ}$ , оже-электроны, характеристическое и непрерывное рентгеновское излучение, колебания решетки(фононы), волны в «свободном электронном газе» (плазмоны)  $\sim 15\text{эВ}$ ).
-

Для создания изображения в сканирующем электронном микроскопе регистрируются упругорассеянные первичные электроны [ $\sim(1-30)$ кВ], либо вторичные электроны [ $\sim$ эВ].

Изображение поверхности создается благодаря развертке сфокусированного пучка электронов по поверхности исследуемого образца.

Контраст, возникающий при регистрации отраженных (т.е. упругорассеянных и вторичных электронов), в основном связан с углом падения электронов на образец, то есть на изображении выявляется поверхностная структура.



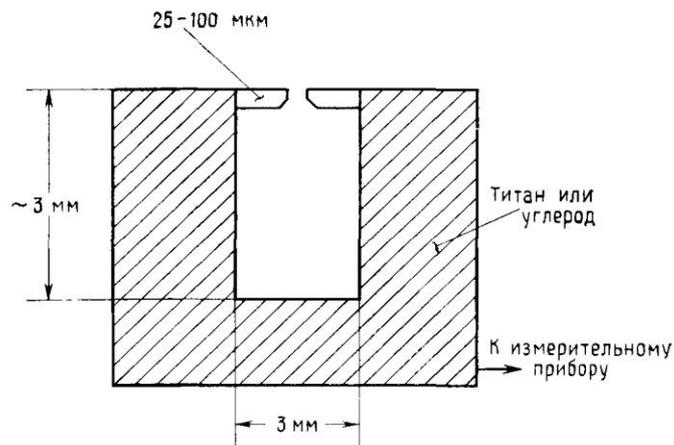
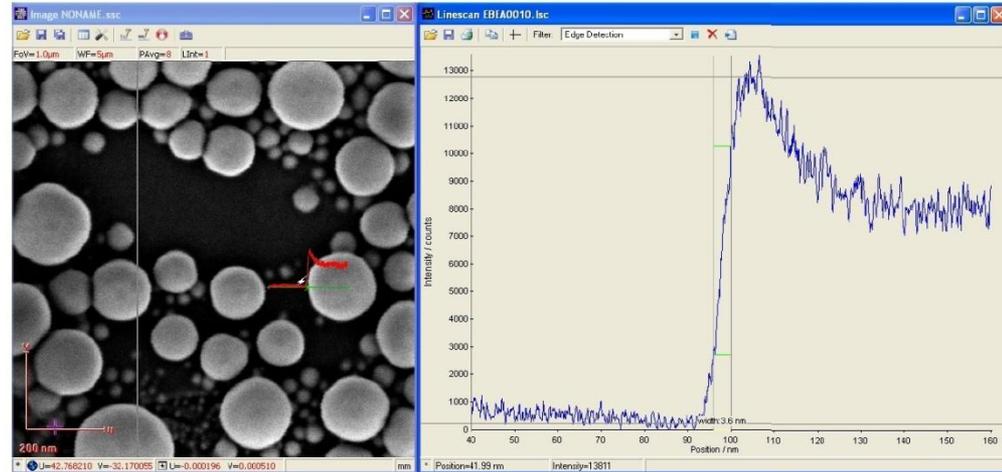
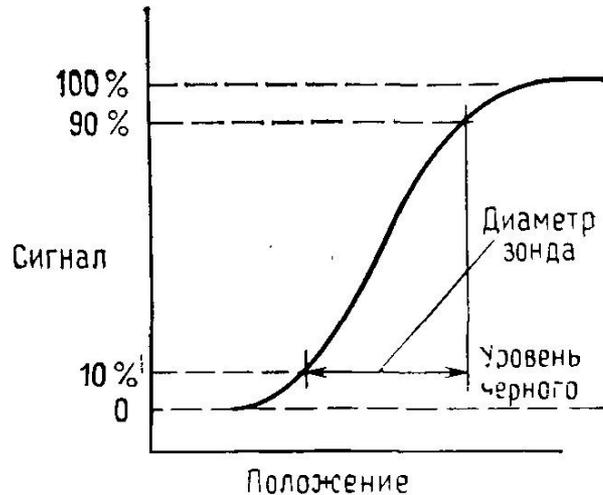


Рис. 2.2. Схема поперечного разреза цилиндра Фарадея, используемого для измерения тока зонда  $i$ . Диаметр входной диафрагмы 25—100 мкм.

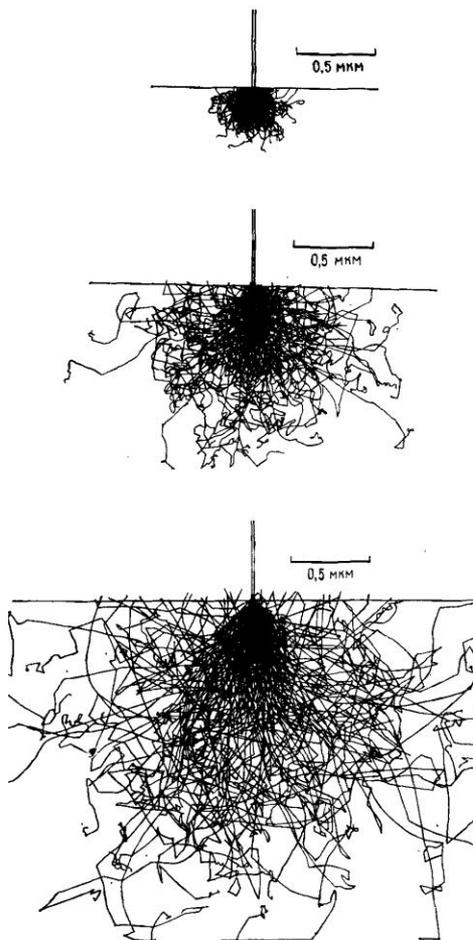
Конструкция цилиндра Фарадея не позволяет выходить наружу отраженным и вторичным электронам. Ток, текущий на землю, в точности равен току падающего пучка и измеряется пикоамперметром постоянного тока.



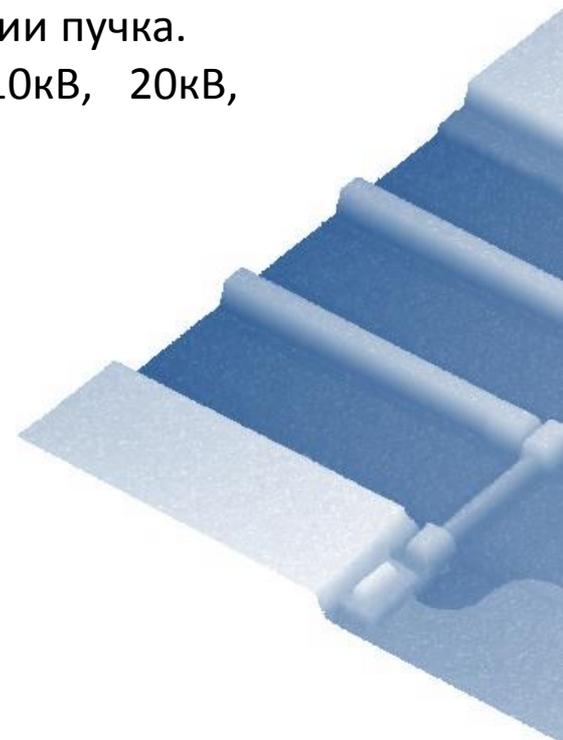
Форма электронного сигнала при прохождении гауссовского электронного пучка поперек непрозрачного для электронов резкого края. За диаметр принимается расстояние, на котором происходит изменение уровня сигнала от 10% до 90% (25%-75% при наличии шумов).

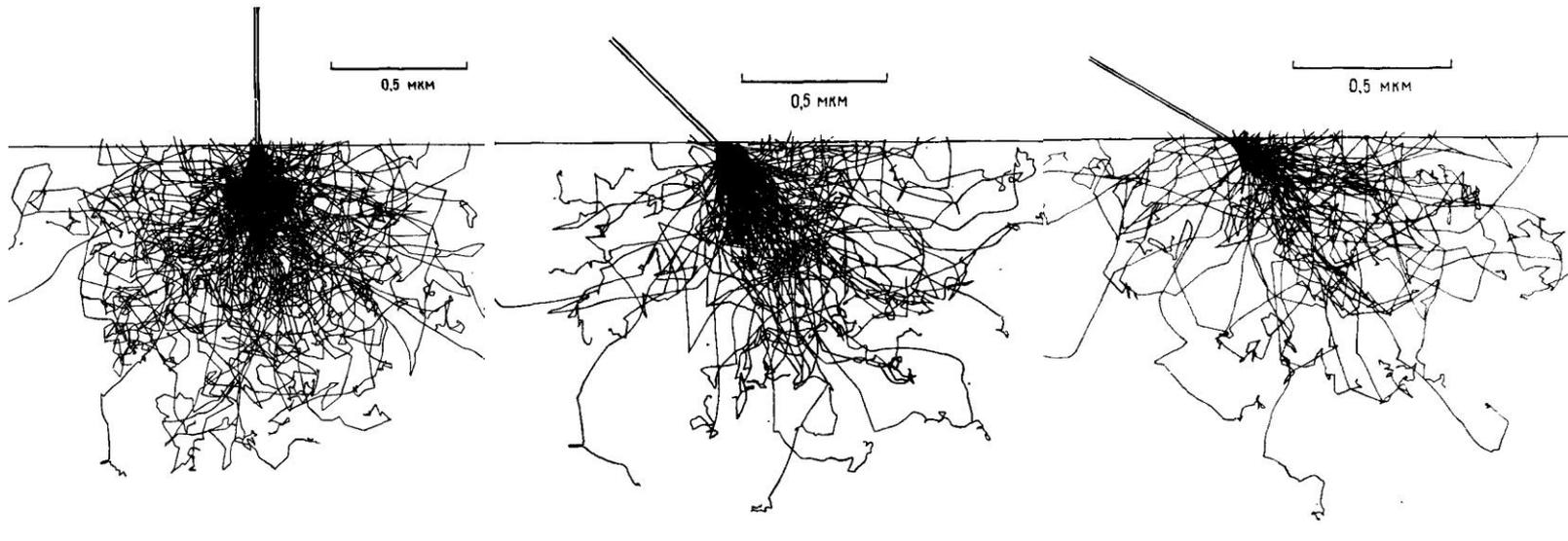


Расчет области взаимодействия в твердом теле (Монте-Карло) для углерода, железа, серебра и урана соответственно. В образцах с высоким атомным номером электроны испытывают больше упругих соударений на единицу длины и средний угол рассеяния больше.



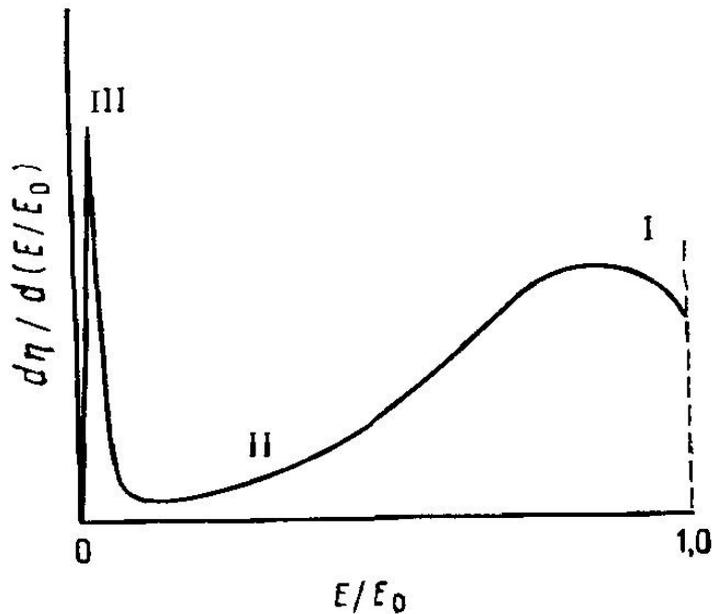
Расчет области взаимодействия в железе  
(Монте-Карло) для разной энергии пучка.  
На рисунке соответственно, 10кВ, 20кВ,  
30кВ.



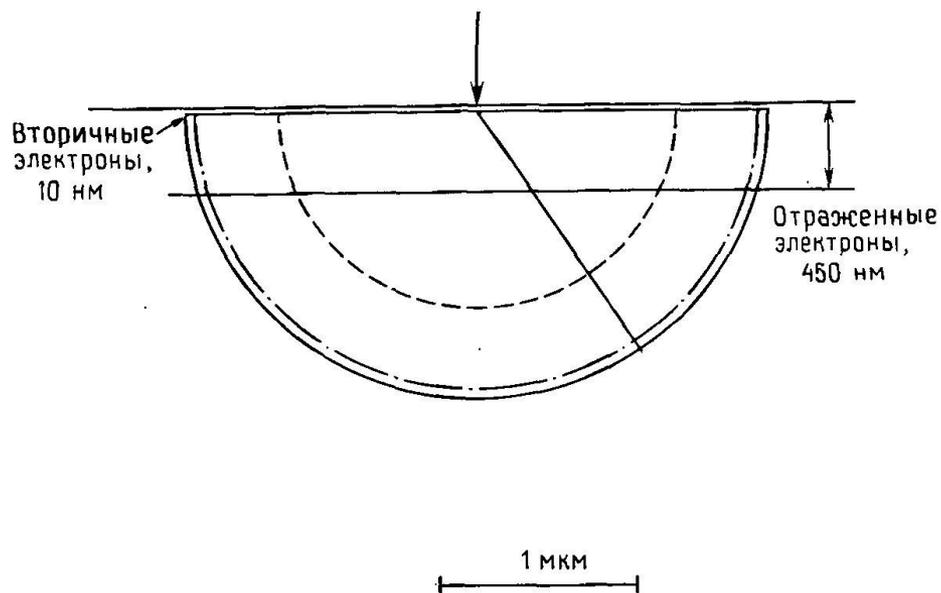


Расчет области взаимодействия в железе (Монте-Карло) для разного угла падения пучка. На рисунке соответственно,  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ .

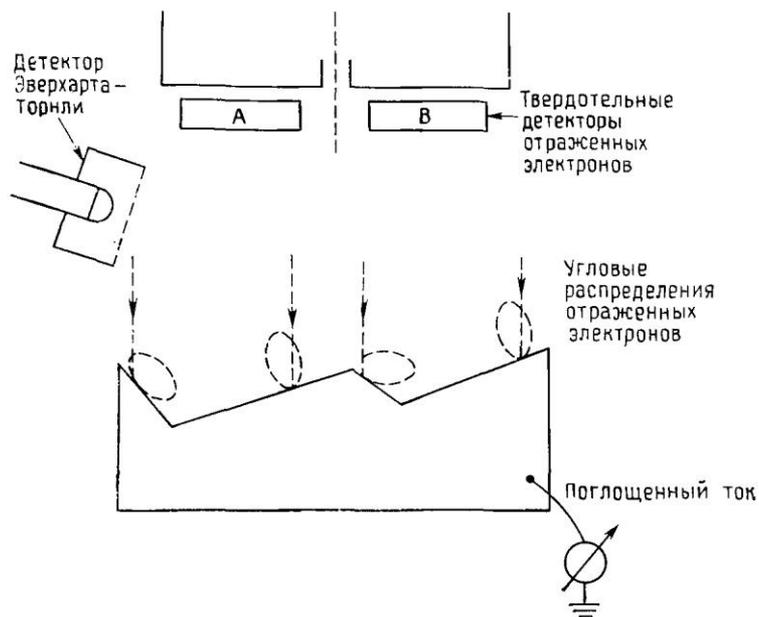
Для заданного среднего угла рассеяния при нормальном падении электрон стремится продолжить движение внутрь твердого тела, если же образец наклонен, электроны могут покидать его непосредственно после соударения.



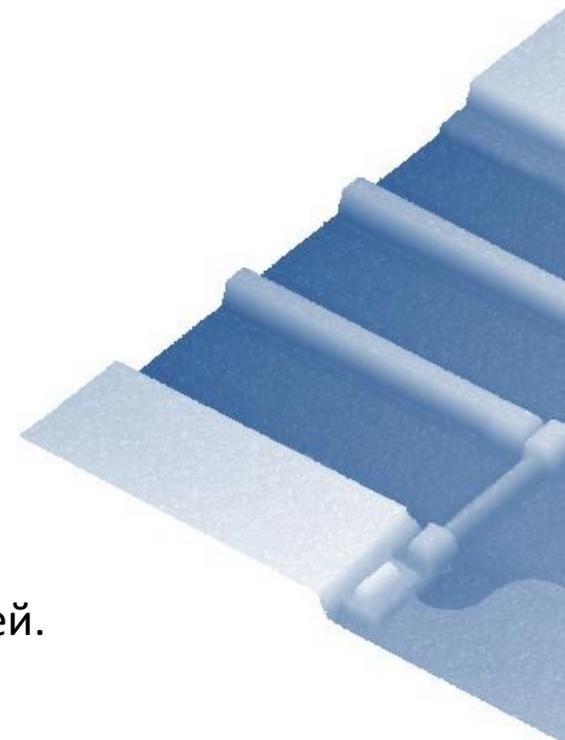
Распределение по энергиям электронов, эмитированных из образца.  
Отраженные электроны (области I,II) и вторичные электроны (область III).  
Для вторичных электронов максимум при энергии  $\sim 3-5$ эВ, для  
отраженных потери энергии порядка 40% от начальной энергии  
падающего пучка.



Область взаимодействия электронов пучка с энергией 20кэВ с медью(Cu): полусфера с радиусом средней длины пробега, глубина выхода вторичных и отраженных электронов.



Сбор электронов со случайно наклоненных поверхностей.



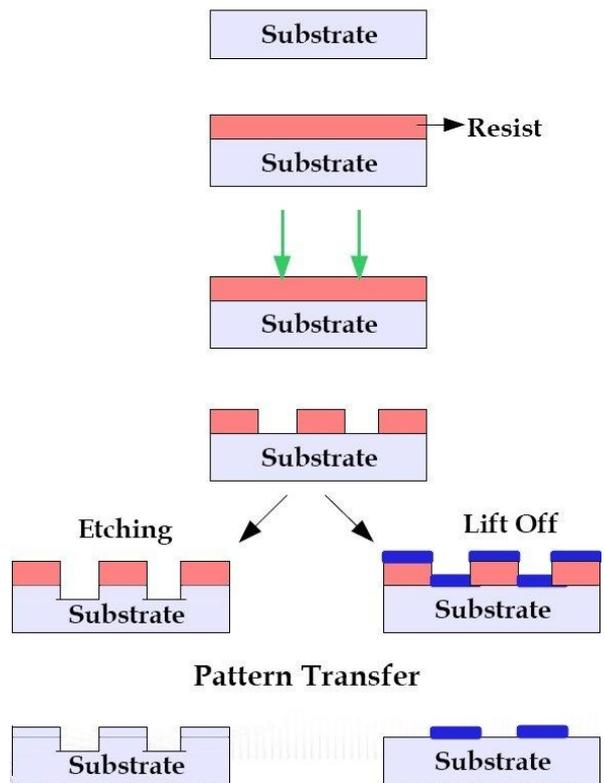
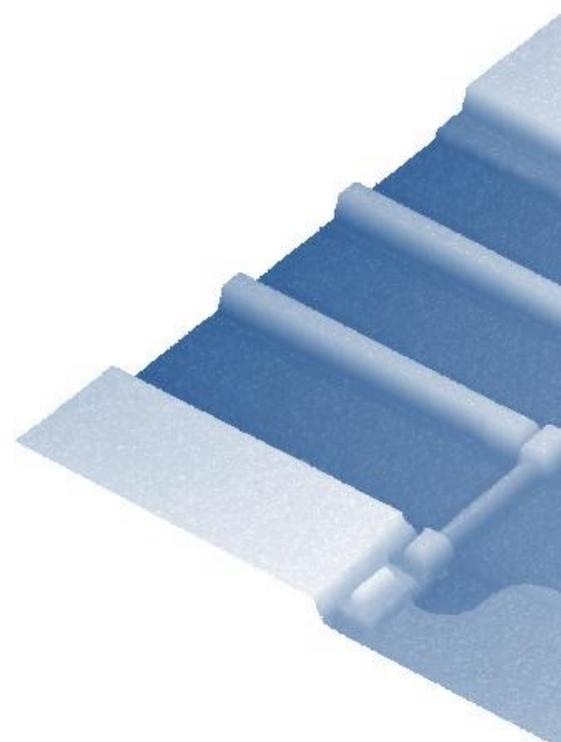


Схема электронной литографии.



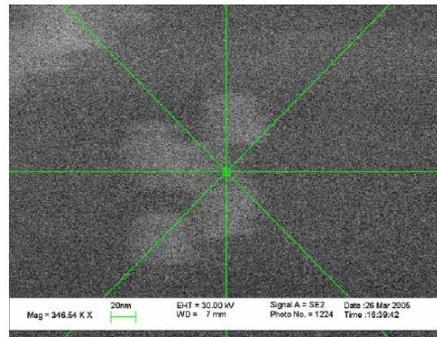
## Схема фокусировки на образце.

### Good focusing is critical to minimize the e-beam size

- Au particle focusing
- Contamination spot burning
  - Focusing is more difficult due to reduced beam current and focusing length

### Focusing on Au particle:

- By adjusting stigmatism and aperture alignment
- **Criteria:** 30-50nm, clear and round shape



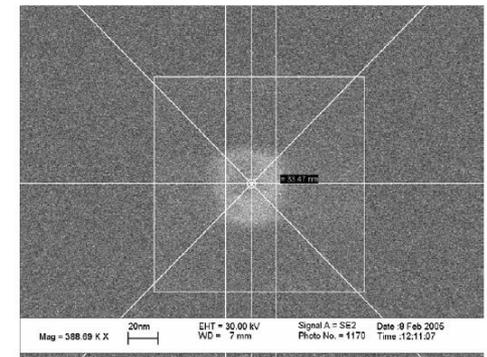
### Contamination spot - Control point for writing single pixel line consistently

### Contamination spot burning

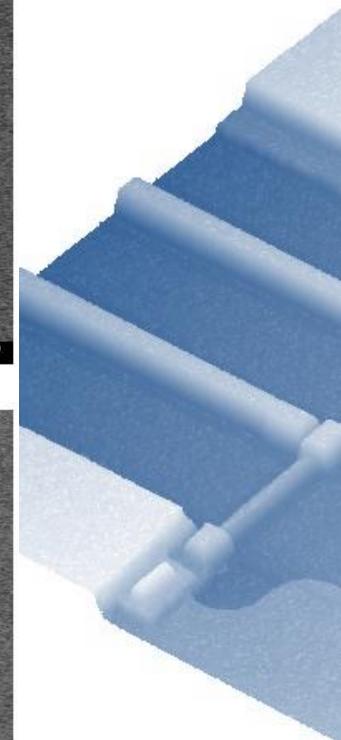
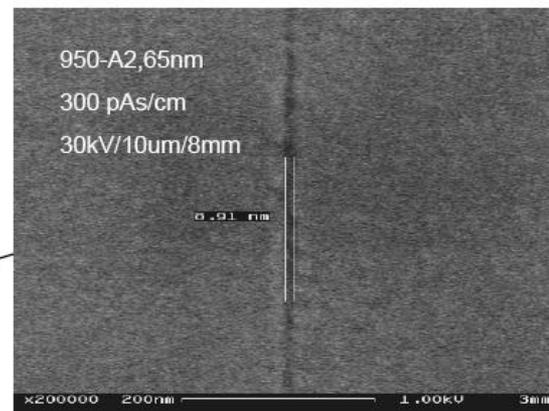
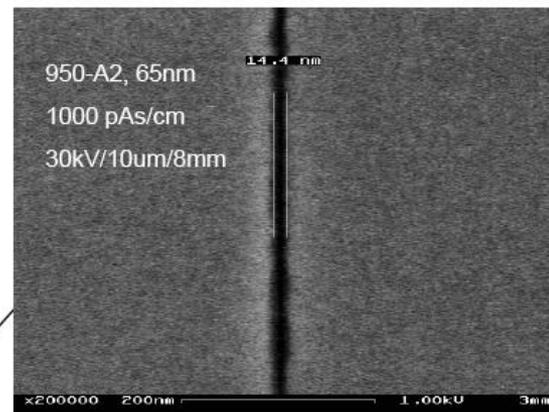
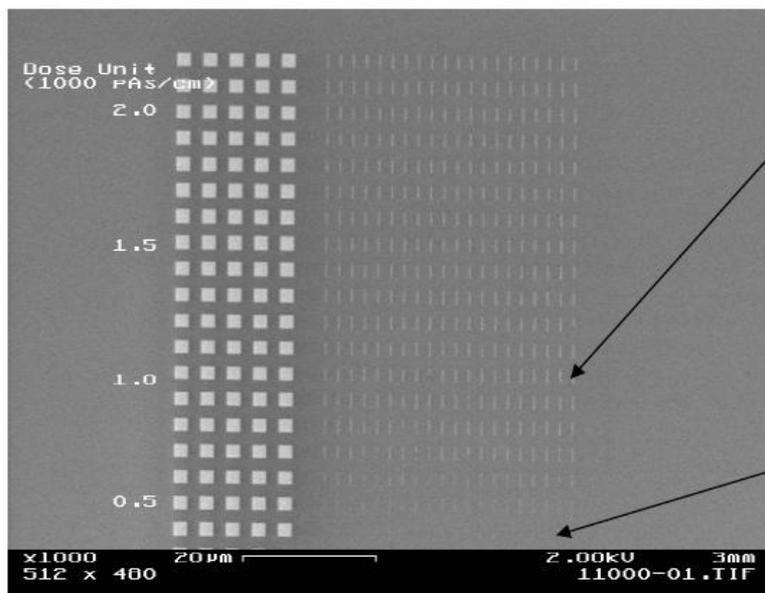
- Approach:
  - Near to the writing filed,
  - 10 sec burning, (~50K X ),
  - Zoom in, and check the burn spot size and the shape

### Criteria: <35nm, clear and round shape!!

- Adjust the stigmatism and focusing
- Move to another place, and burn again



Тестовые структуры для подбора оптимальной дозы экспонирования.



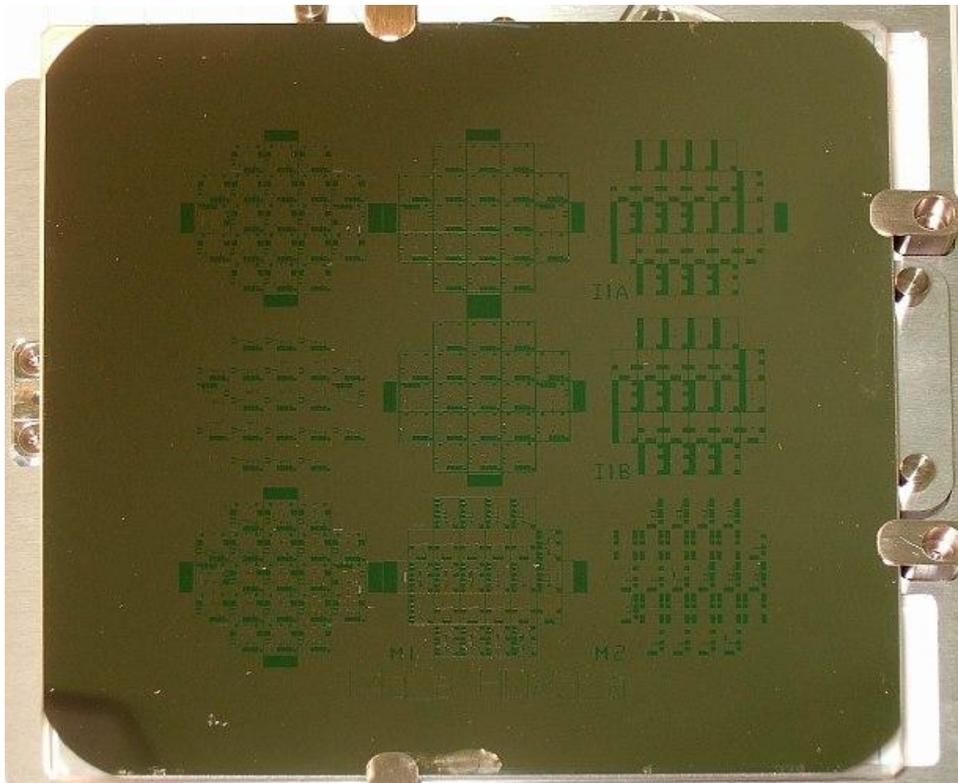
## Возможности электронной литографии



Изготовление фотошаблонов с использованием Shipley SAL-601 resist (*negative*)

- 1.Cleaning: Acetone, IPA2.Spin SAL601 @ 4000rpm, 1min
- 3.Bake @ oven, 90C, 30 min
- 4.Expose e-beam @ 30kV
- 5.Bake @ oven, 110C, 20 min
- 6.Develop @ MF322, 9 minutes
- 7.Rinse @ H2O. Blow dry
- 8.RIE @ ASH1: O2, 50W, 30 sec
- 9.Cr-etcher @ 1-2 minutes(visual inspection)
- 10.RIE @ STRIP1: O2, 250W, 2 min

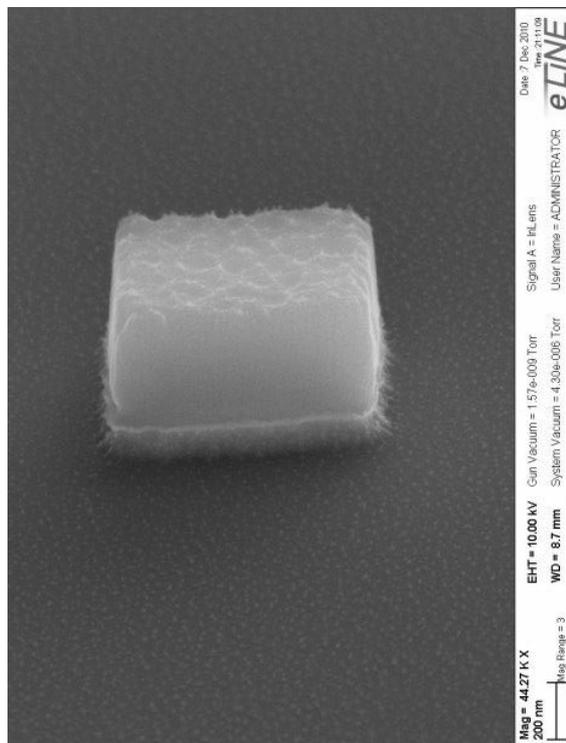
## Возможности электронной литографии



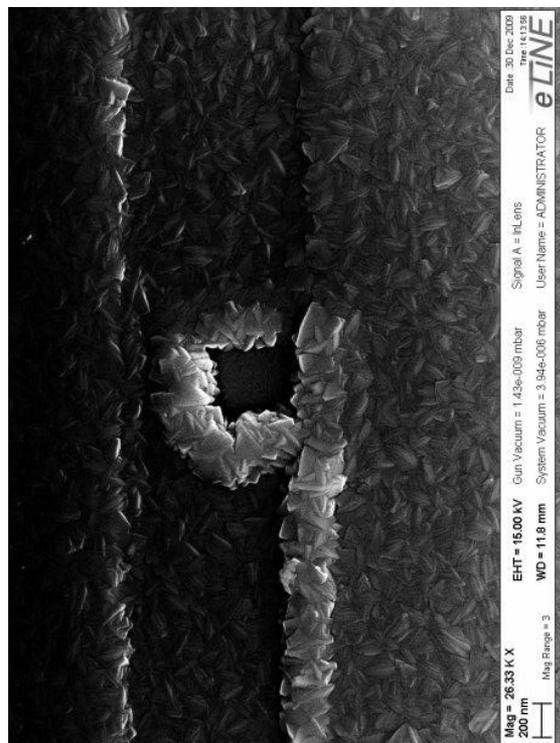
Изготовление фотошаблонов с использованием Shipley UV5 DUV resist (*positive*)

- 1.Cleaning: Acetone, IPA
- 2.Spin UV5 @ 4000rpm, 1min
- 3.Bake @ oven, 130C, 30 min
- 4.Expose e-beam @ 30kV
- 5.Bake @ oven, 130C, 20 min
- 6.Develop @ MF322, 2-3 minutes
- 7.Rinse @ H2O. Blow dry
- 8.RIE @ ASH1: O<sub>2</sub>, 50W, 30 sec
- 9.Cr-etcher @ 1-2 minutes
- 10.RIE @ STRIP1: O<sub>2</sub>, 250W, 2 min

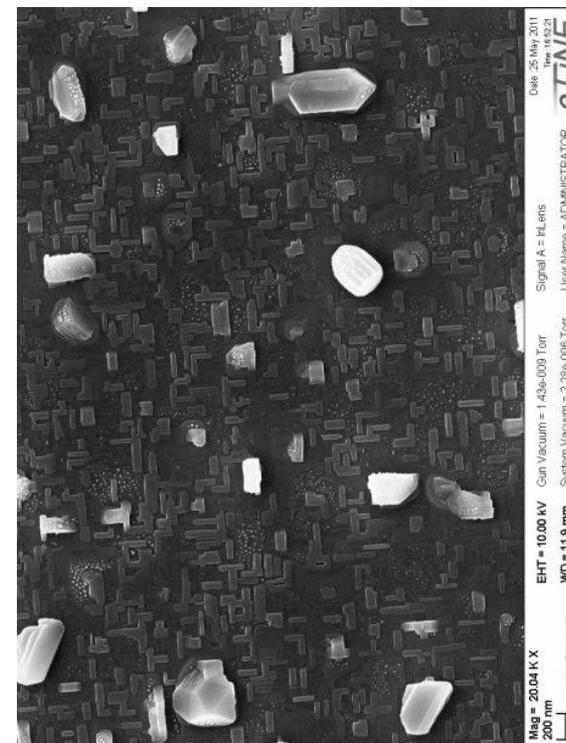
## Возможности использования установки в качестве электронного микроскопа



Резистивная маска SAL601 и подслой металла после травления



Туннельный переход на основе ниобия



Пленка YBCO