

Коррекция эффекта близости как метод кардинального увеличения производительности электронной литографии (30 лет эксплуатации)

Гайфуллин Булат Накиевич, к.ф.-м.н.

(ООО «Интерфейс»)

Зайцев Сергей Иванович, д.ф.-м.н.

(ИПТМ РАН),

Свинцов Александр Александрович, к.ф.-м.н.

(ИПТМ РАН),

Содержание

- **Введение/Мотивация/Физические основы**
- **Подсистема корр. эфф. близости в NanoMaker**
 - Три параметра (двух-гауссовое приближение)
 - Метод простой компенсации
 - Гарантированная точность
 - 3Д коррекция
- **Экспериментальная проверка**
- **Измерение параметров (эксперимент/расчет)**
- **Коррекция оптического эффекта близости в динамической фотолитографии**
- **Ионно-лучевая литография/ Возможные проекты**
 - Преимущества ионно-лучевой литографии
 - Ионно-лучевой маск-райтер
 - Ионно-лучевой литограф
 - Литограф следующего поколения ?
- **Заключение**

Электронная литография =
= экспонирование + травление/проявление

Физические основы (НаноМейкера)

- модели взаимодействия быстрых электронов с веществом
- изотропное локальное травление (позитивные резисты)
- неоднородно-сшитый гель (негативные резисты)
- методы решения обратных задач (оптимальные дозы для 3D структурирования)

Электронная литография =
= **экспонирование** + травление/проявление

- Поглощенная энергия заряженных частиц изменяет свойства резиста (скорость растворения)
- Электроны теряют энергию медленнее, чем направление (импульс), режим диффузии, рассеяние назад
- Два вклада – прямо рассеянные и обратно-рассеянные электроны
- Исследование – метод Монте-Карло

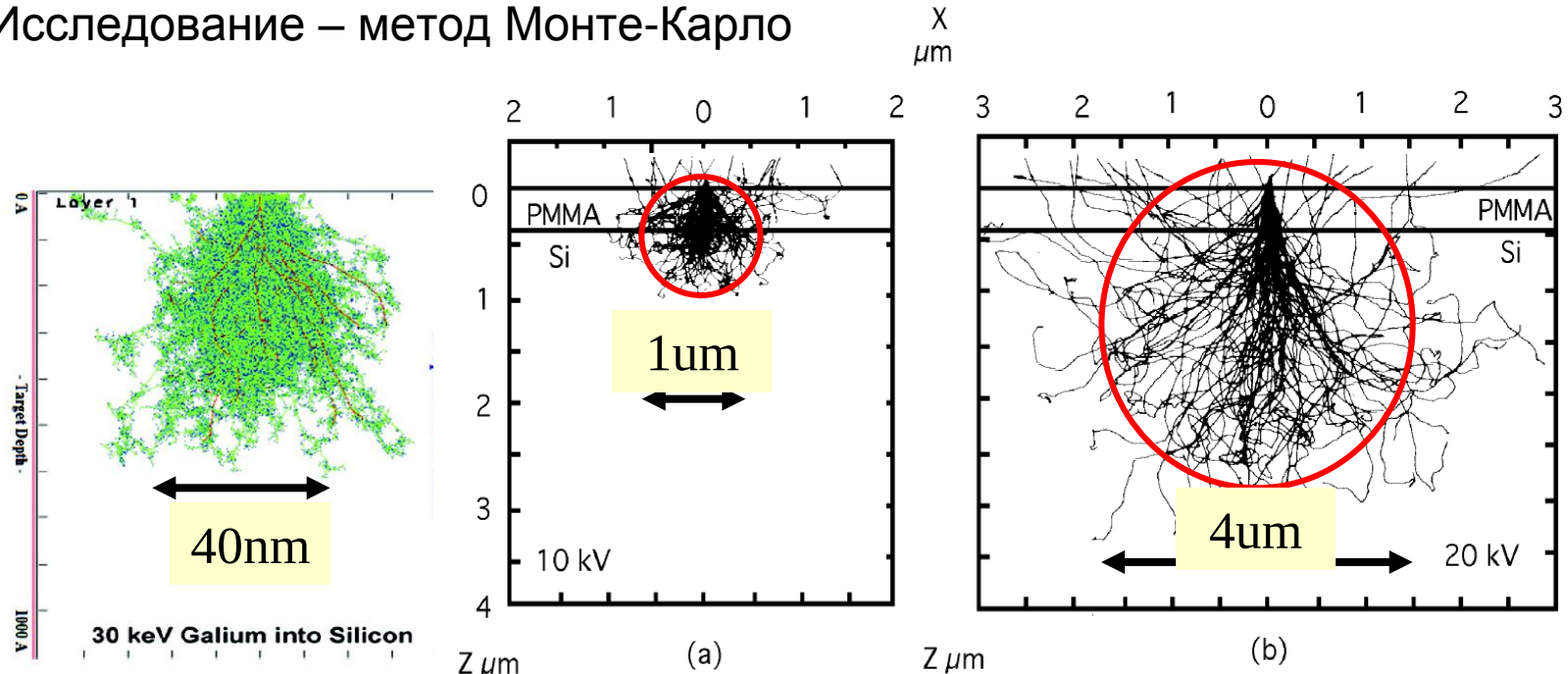


Figure 7: Interaction volume of 30keV Gallium

Введение/Мотивация/ Введение/Мотивация/Физические основы

Электронная литография =
= **ЭКСПОНИРОВАНИЕ** + травление/проявление

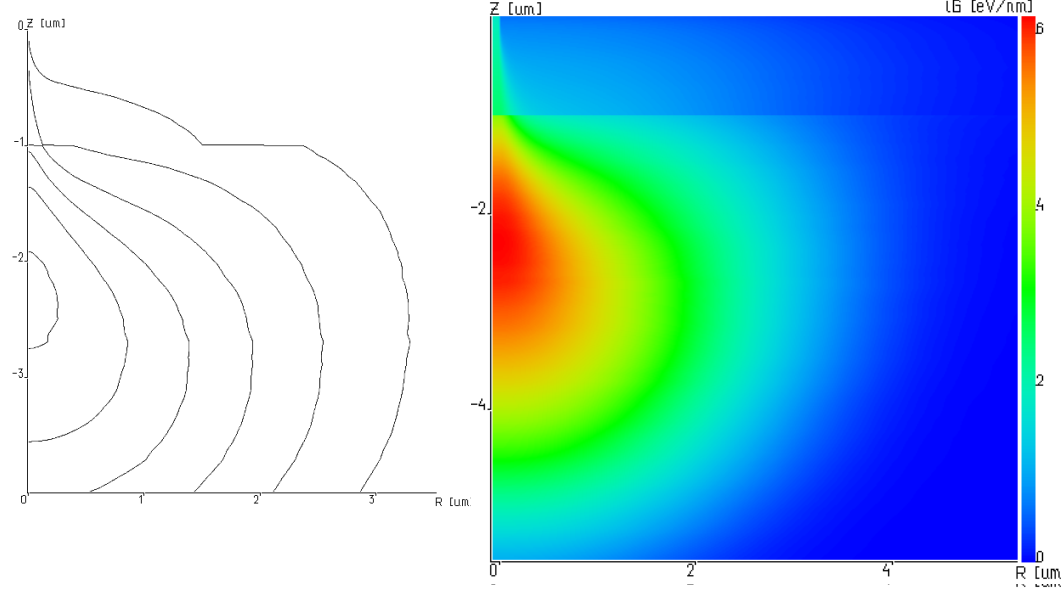
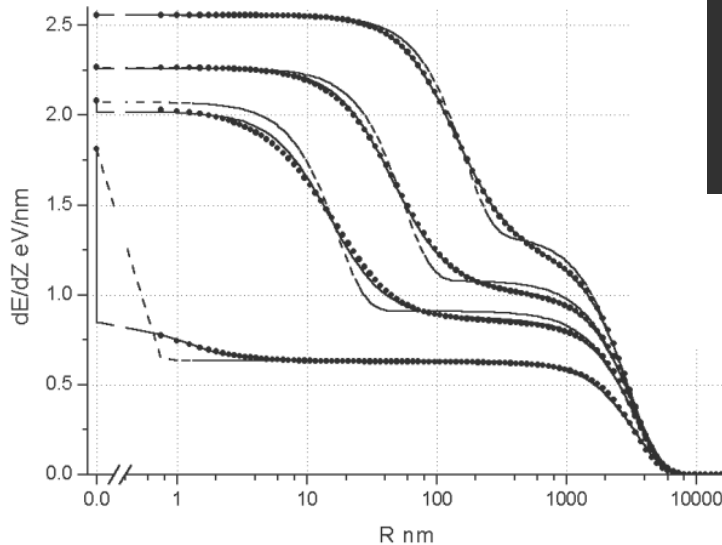
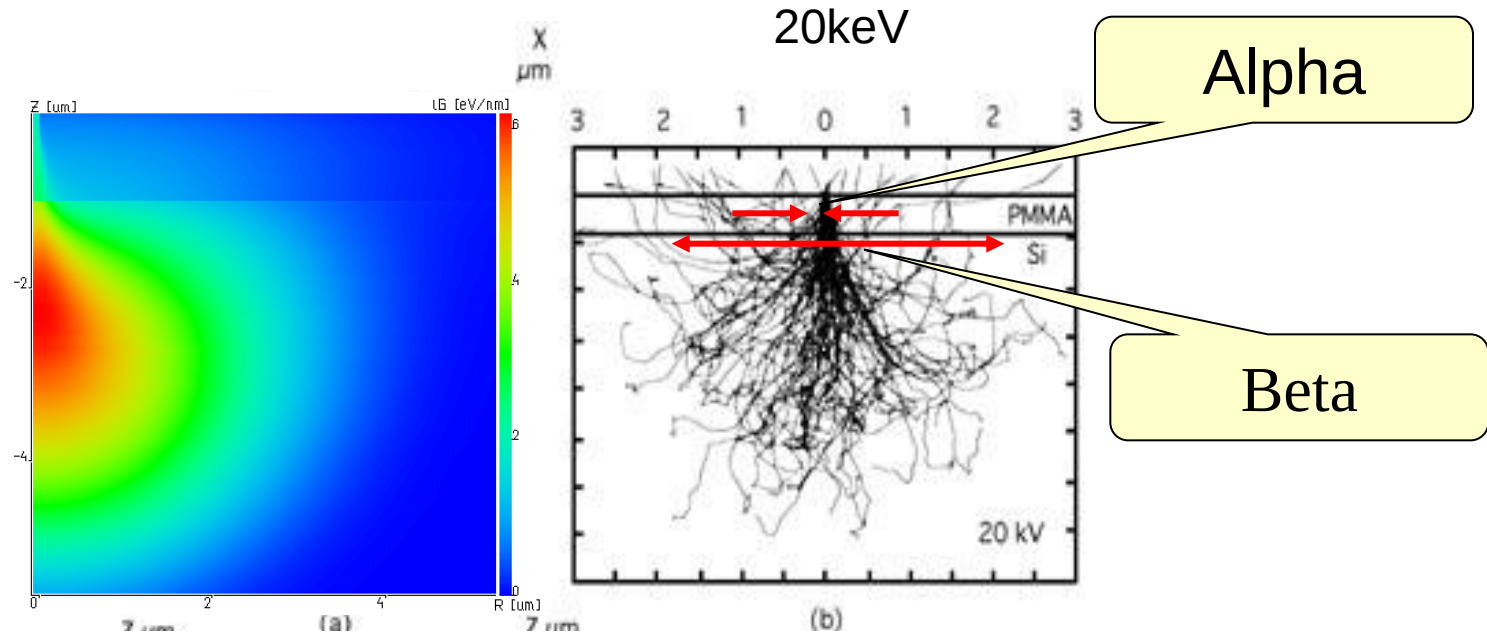


Рисунок 1 – Результаты расчета Монте Карло интегральной функции генерации $iG(r,z)=\int dr'G(r',z)$ (интеграл по r' от r до бесконечности). Цветом представлена различная плотность поглощенной энергии. Начальная энергия электронов - 25кэВ, подложка - Si, толщина ПММА разиста - 1мкм



Введение/Мотивация/ Введение/Мотивация/Физические основы



Electron trajectory and exposure simulation with Monte-Carlo method.

$$D(r) = \frac{D_1(r)}{1 + \eta} + \eta \frac{D_2(r)}{1 + \eta} = \frac{1}{1 + \eta} \left[\frac{\exp(-r^2 / \alpha^2)}{\pi \alpha^2} + \eta \frac{\exp(-r^2 / \beta^2)}{\pi \beta^2} \right]$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

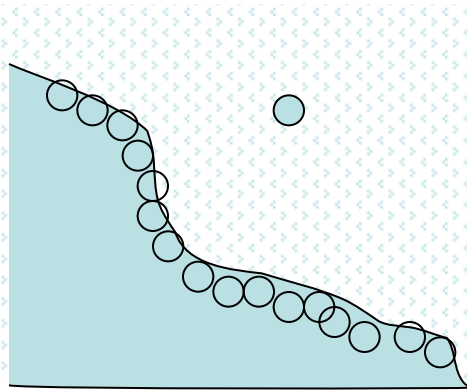
Beta: $\sim E^{5/3} / (Z\rho)_{\text{substr}}$

Alpha: $\sim (Z\rho^3)_{\text{resist}} / E^2$

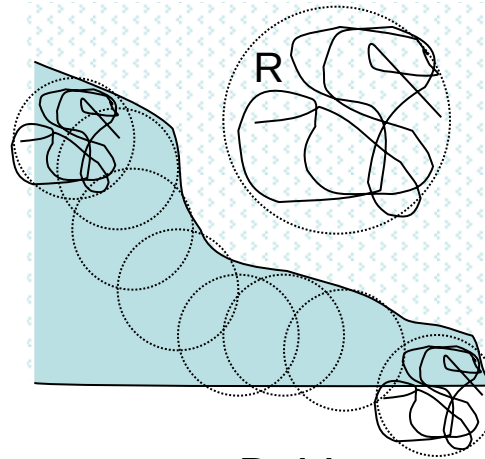
Eta: $\uparrow (Z\rho)_{\text{substr}}$

Database in NanoMaker, 10 substrates, one resist

solids



polymers



$$R \sim M^{1/2}, \text{ coil !}$$
~~$$R \sim M^{1/3}, \text{ globe}$$~~

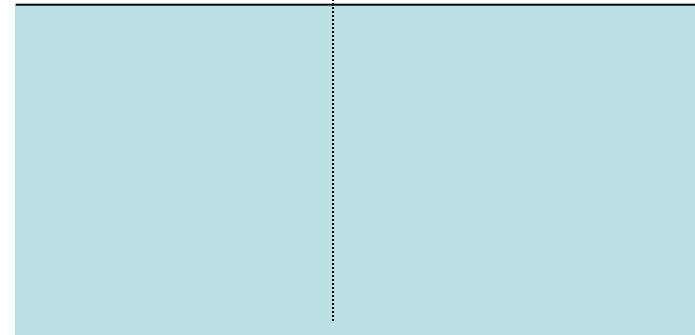
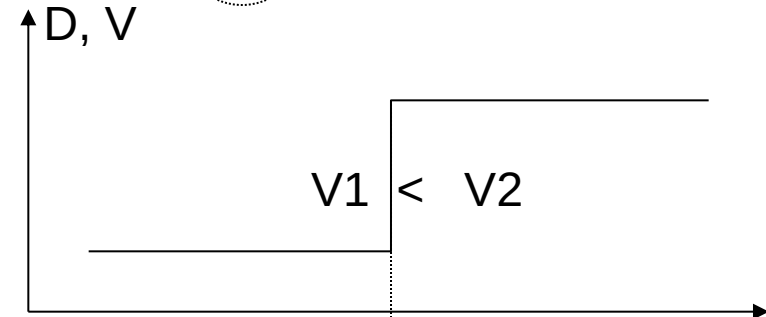
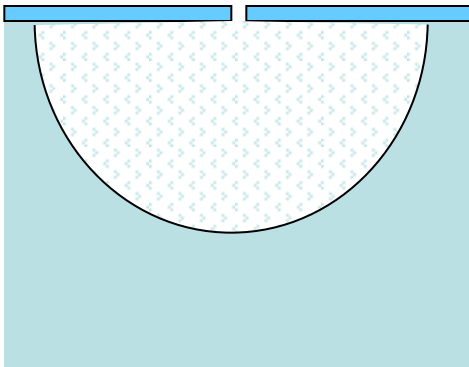
- coil state, Flory
- reptation model, ДеЖён
- dissolving time (diffusion) depends on molecular weight

MODEL:

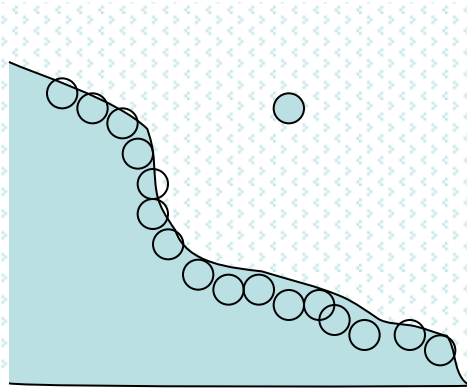
"Small" particle

Isotropic local etching

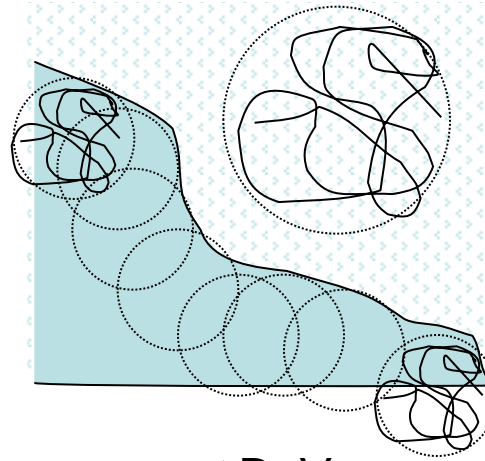
1985, Свинцов. Зайцев



solids

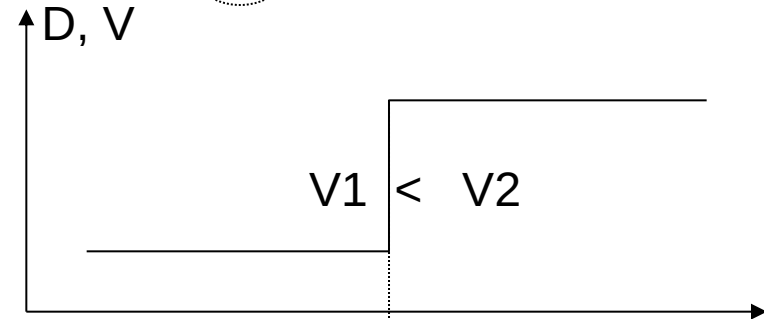
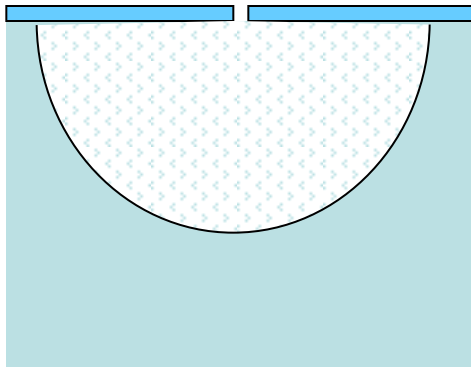


polymers

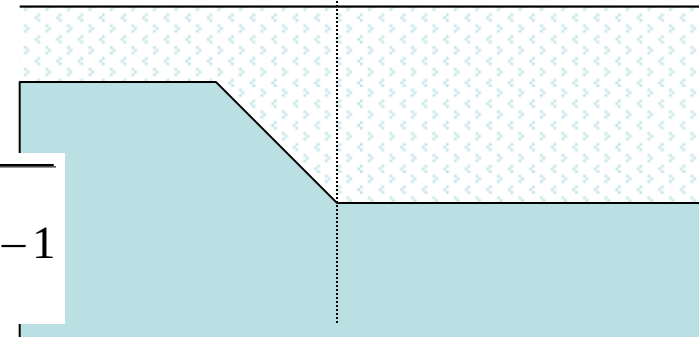


- coil state, Flory
- reptation model, DeJean
- dissolving time (diffusion) depends on molecular weight

MODEL:
"Small" particle
Isotropic local etching



$$\operatorname{tg} \theta = \sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 - 1}$$

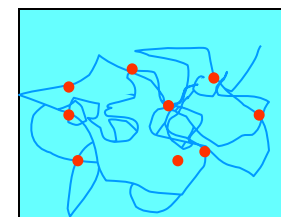
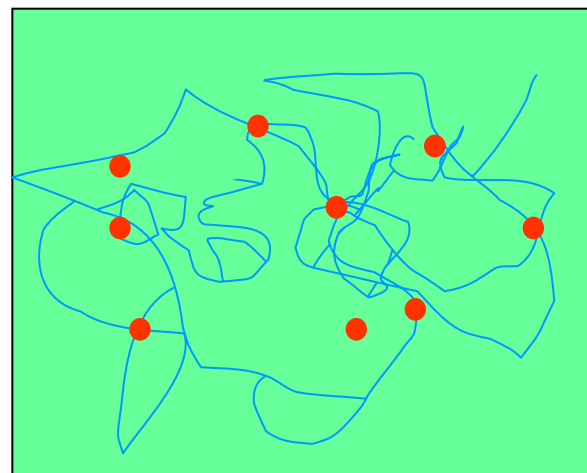
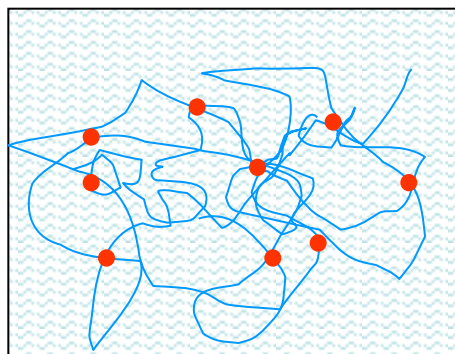


Negative resists

exposure

solvent

backing



monomer

Gel + zol

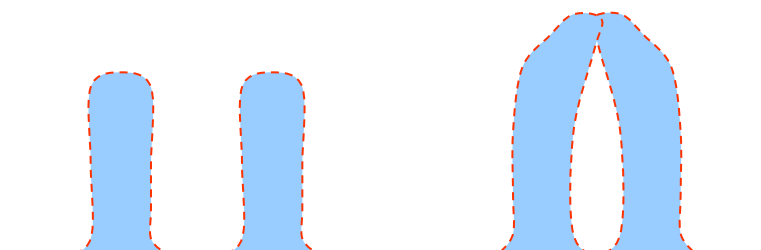
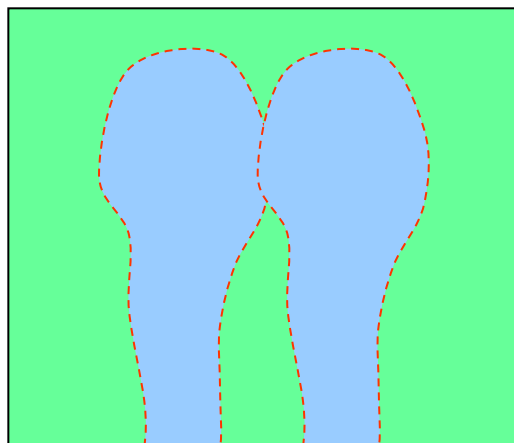
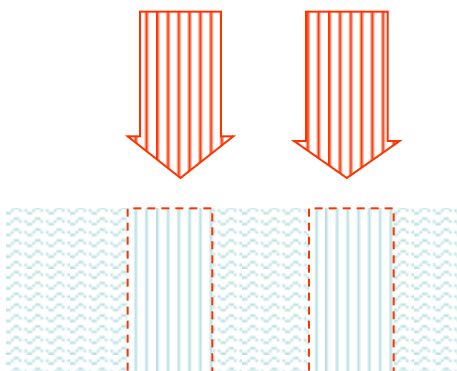
exposure

Swolled gel

Zol dissolving

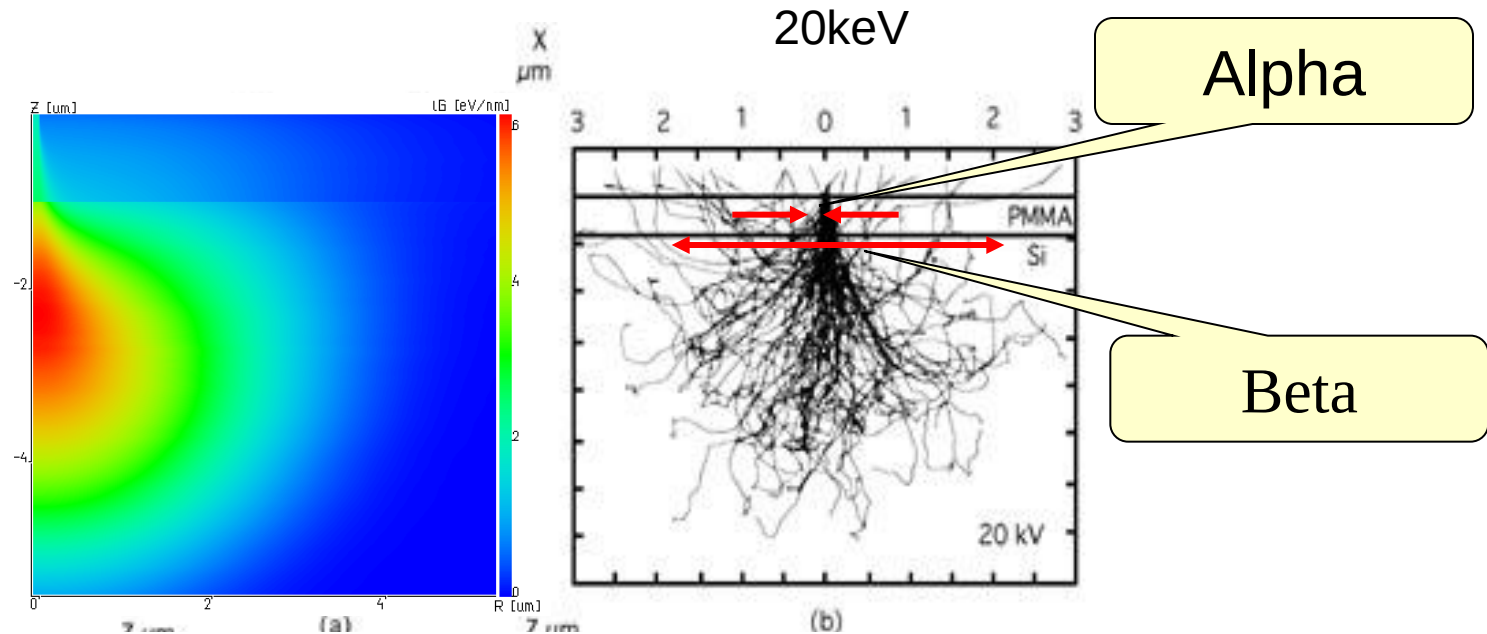
Solid gel

Solid gel



Подсистема корр. эфф. близости в NanoMaker

Три параметра (двух-гауссовое приближение)



Electron trajectory and exposure simulation with Monte-Carlo method.

$$D(r) = \frac{D_1(r)}{1 + \eta} + \eta \frac{D_2(r)}{1 + \eta} = \frac{1}{1 + \eta} \left[\frac{\exp(-r^2 / \alpha^2)}{\pi \alpha^2} + \eta \frac{\exp(-r^2 / \beta^2)}{\pi \beta^2} \right]$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

Beta: $\sim E^{5/3} / (Z\rho)_{\text{substr}}$

Alpha: $\sim (Z\rho^3)_{\text{resist}} / E^2$

Eta: $\uparrow (Z\rho)_{\text{substr}}$

Подсистема корр. эфф. близости в NanoMaker

Метод простой компенсации

- Определения:

$T(r)$ – доза экспонирования ($\sim$ время экспонирования * сила тока)

$D(r)$ – поглощенная доза - $\sim$ плотность повреждений (разрывы или сшивки)

Связь через функцию близости $I(r)$

$$D(\rho) = \int d^2 \rho' I(\rho - \rho') T(\rho') = I_1 * T + I_2 * T$$

Обратная задача: D -задано, найти T

- Метод Фурье, но

-что делать с отрицательными решениями

-плохо обусловленная задача (Фредгольм 2-ого рода, высокочастотный шум)

- Метод «простой компенсации», $\alpha=30\text{nm}$, $\beta=3\mu\text{m}$

$\alpha \ll \beta$, $I_1(\rho) = \text{дельта-функция}$

$$D = T + I_2 * T$$

-устойчивая задача,

-итерации

$$T_0 = D(1 + \eta); T_1 = D - \eta D \dots$$

Подсистема корр. эфф. близости в NanoMaker

Гарантированная точность

Уникальное свойство (уникальное исследование)

Доказано (!),
метод простой компенсации обладает гарантированной точностью

$$\Delta r \sim 0.4 \text{ Alfa}$$

Подсистема корр. эфф. близости в NanoMaker

3Д коррекция

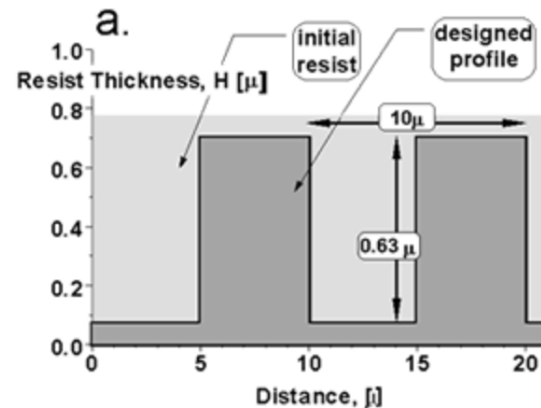
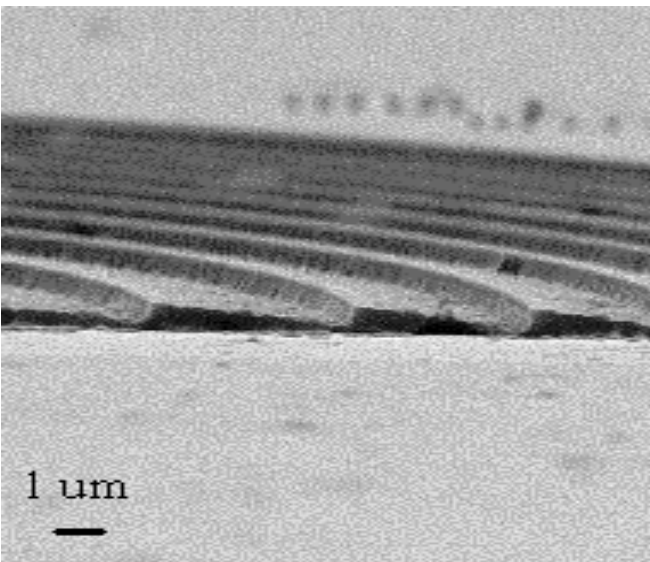


Fig.1a - A height of a designed simple grating should be of 0.63 μm ($=l/(n-1)$) to provide phase shift equal to π

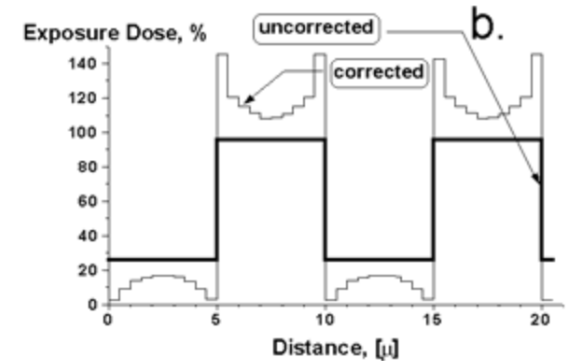


Fig.1b - Even for a grating with period 10 μm the proximity correction (after PROXY) gives remarkable contribution and nontrivial distribution of exposure

Нужно создать переменную высоту $h(r)$, высота пересчитывается в дозу $D/D_0 = 1 - (h(r)/h_0)^{1/\gamma}$

After that an improved exposure time T^1 was calculated

$$T^1(x, y) = (1 + \eta) D(x, y) - \eta \int dx' dy' I_2(x - x', y - y') D(x', y')$$

We used such a procedure in iteration.

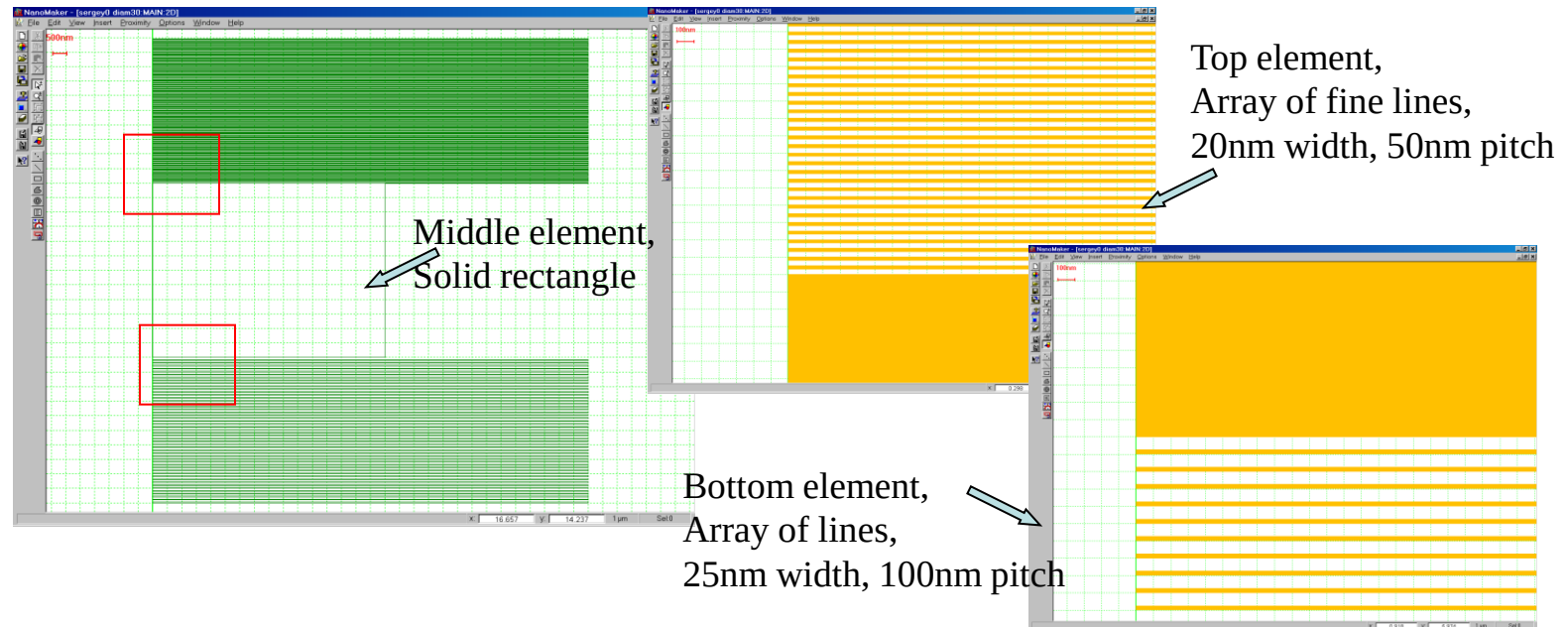
$$T^2(x, y) = (1 + \eta) D(x, y) - \eta \int dx' dy' I_2(x - x', y - y') T^1(x', y')$$

...

$$T^{k+1}(x, y) = (1 + \eta) D(x, y) - \eta \int dx' dy' I_2(x - x', y - y') T^k(x', y')$$

Экспериментальная проверка коррекции

Proximity effect in SiO₂ substrate with HSQ resist and its correction with NanoMaker (with S. Rigonda, W. Hu, UTD)

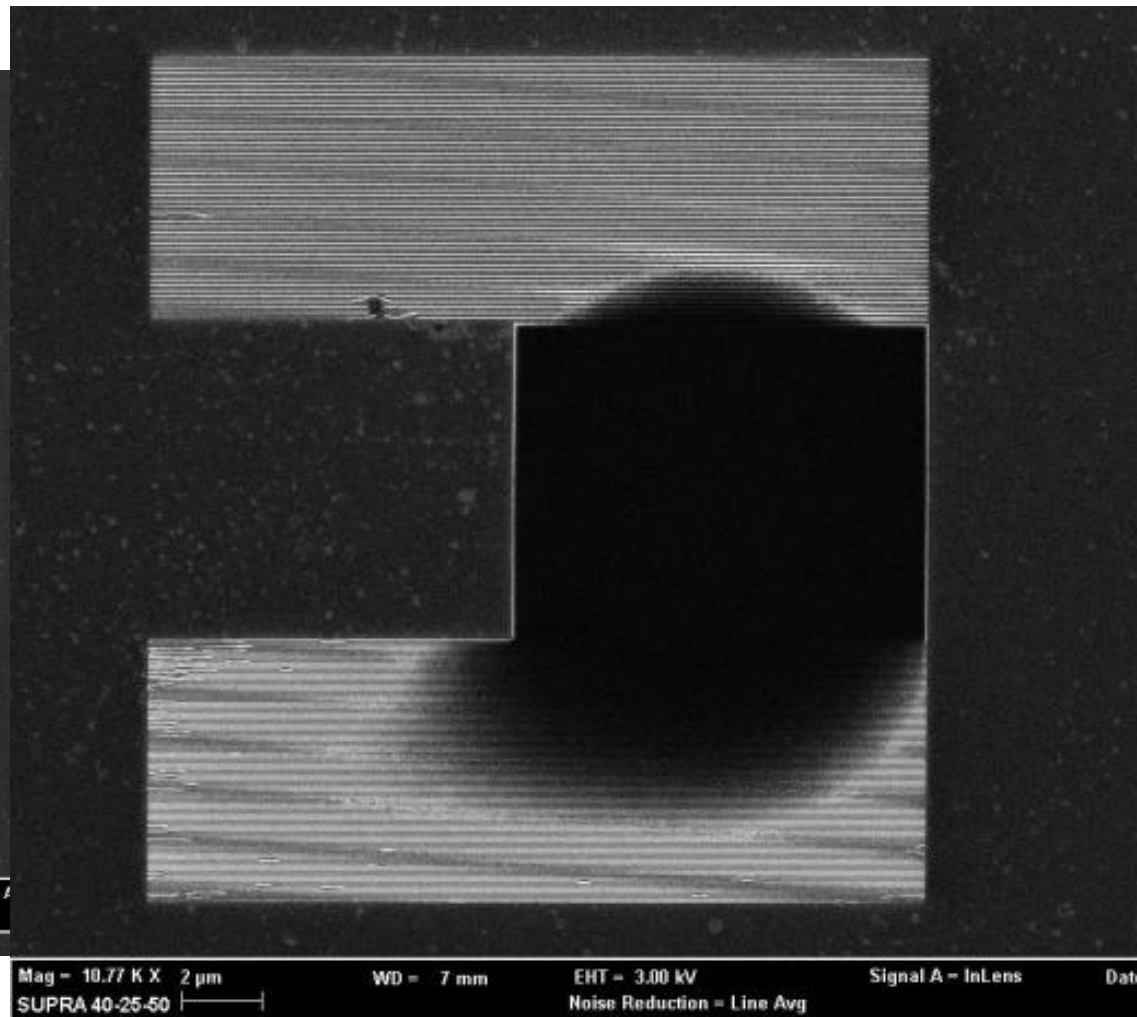
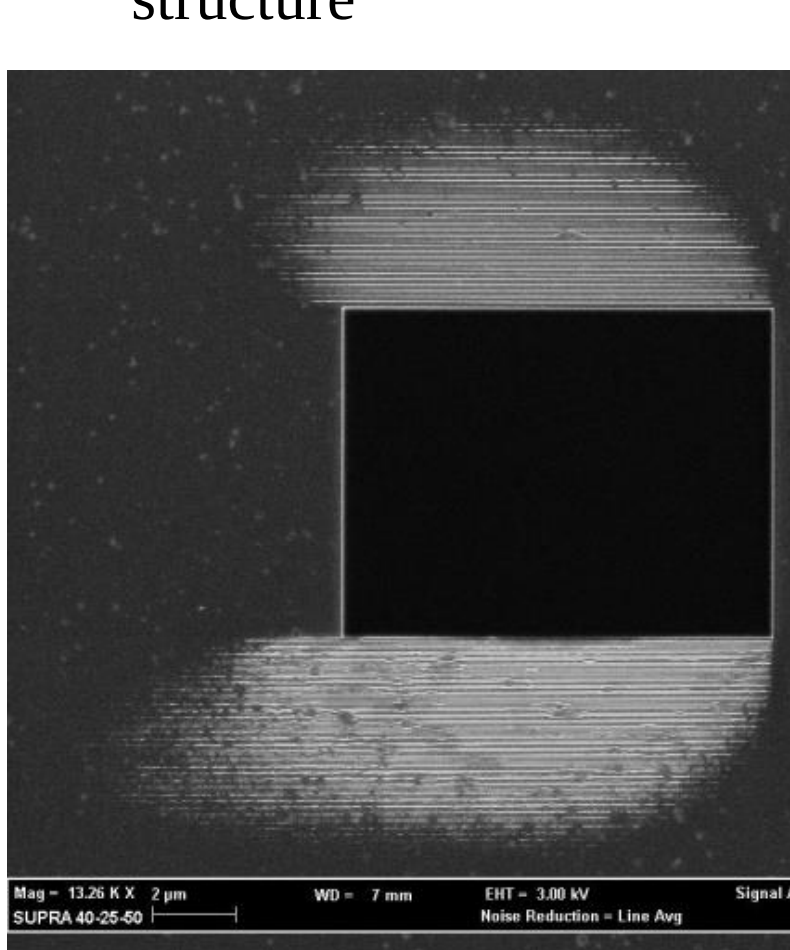


- Test-structure consists of three elements two arrays of fine lines with solid rectangle in the middle.
- Exposure without correction means exposure (dwell) time is constant for each point of the structure

EQUAL DWELL TIME PER EACH EXPOSURE POINT

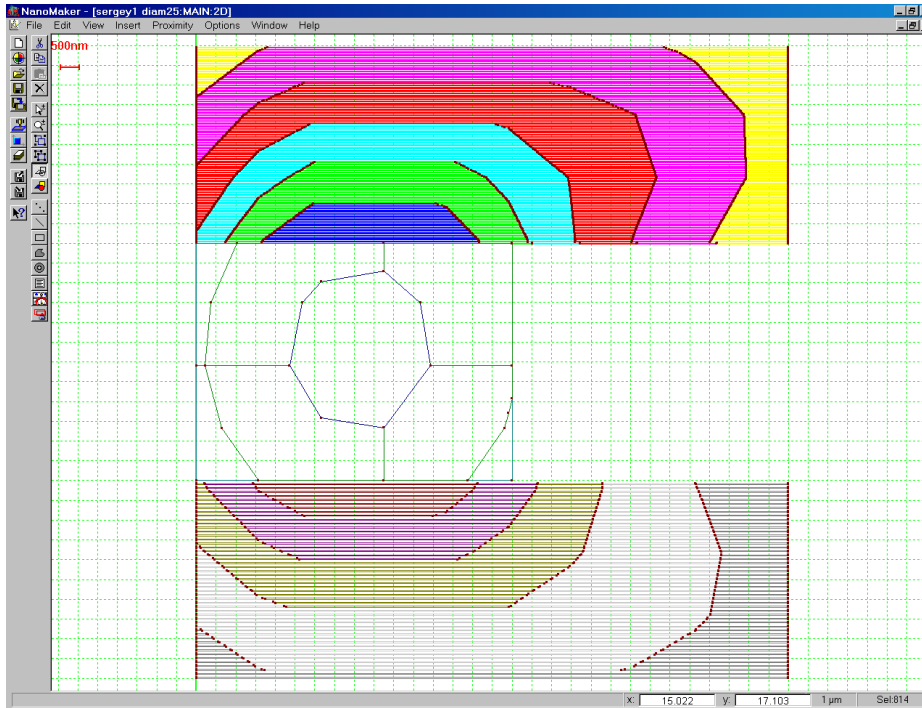
Conclusion:

due to proximity effect it is not possible to fabricate the designed structure

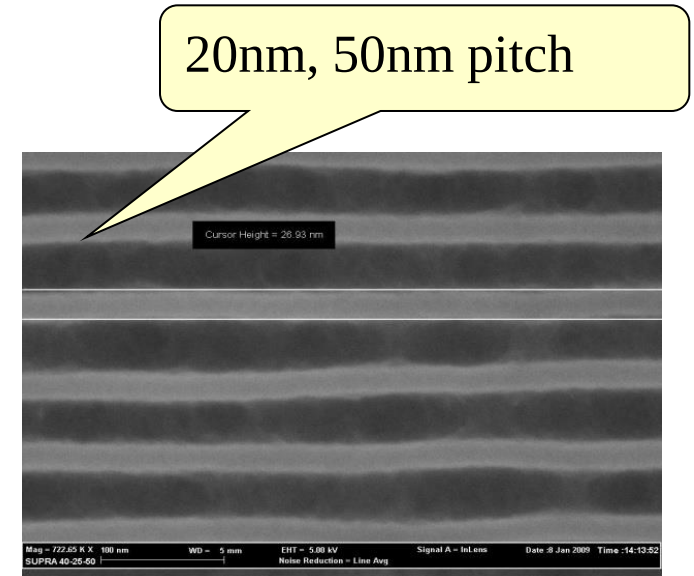
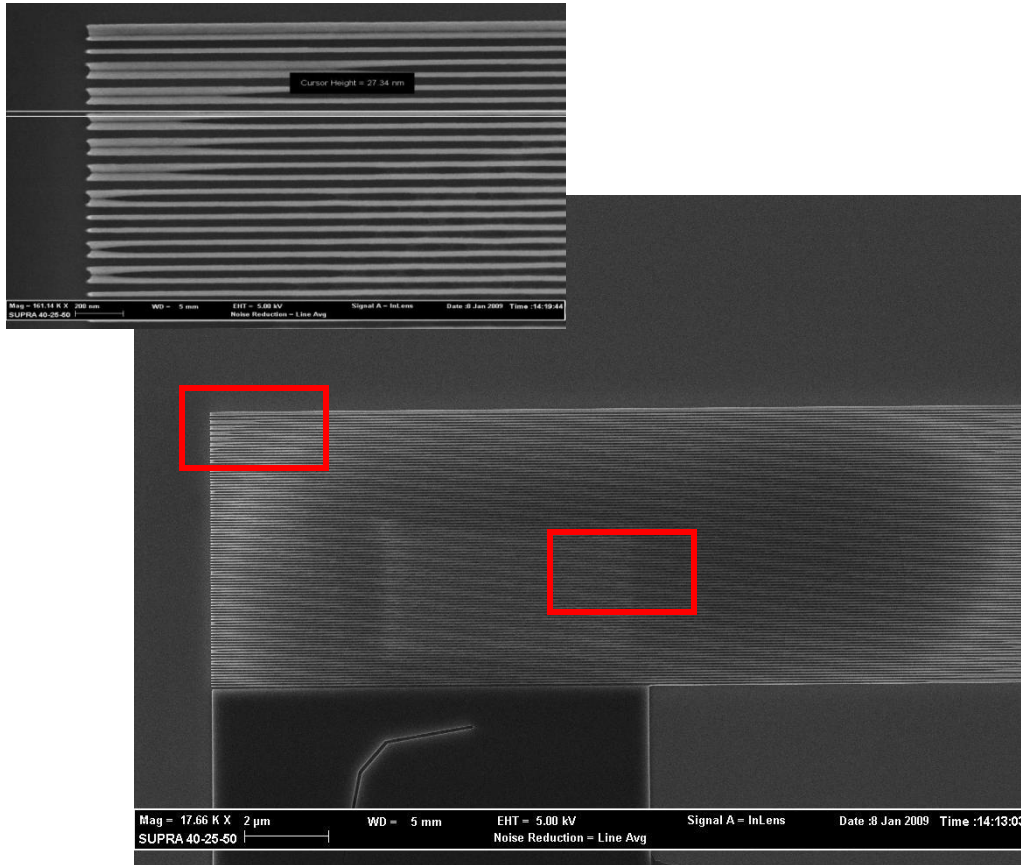


Solution is delivered by NanoMaker

Optimal doses are calculated automatically considering proximity parameters accumulated in implemented data base

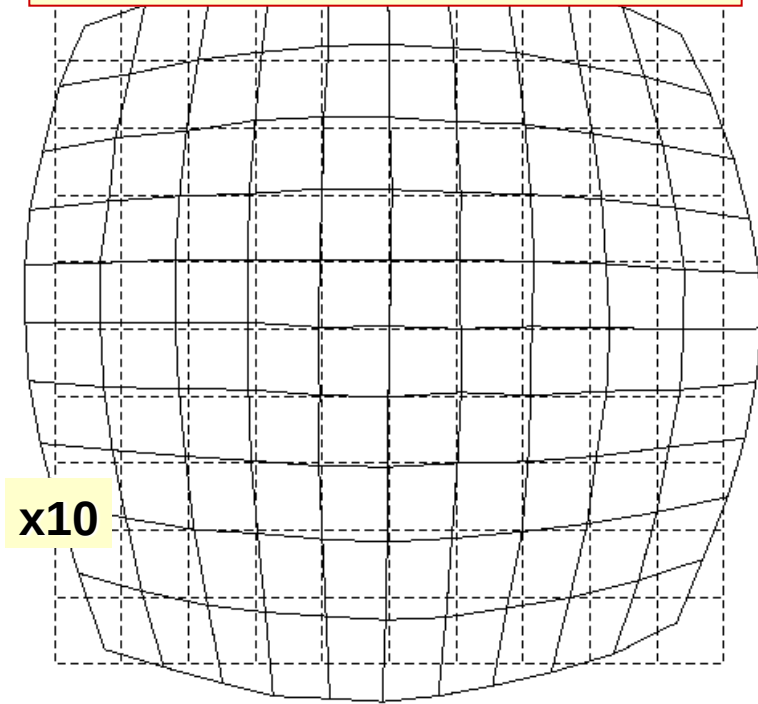


Exposure with proximity corrected data allows to fabricate perfect lines everywhere (in vicinity of the solid rectangle and at periphery) as well as the rectangle as well



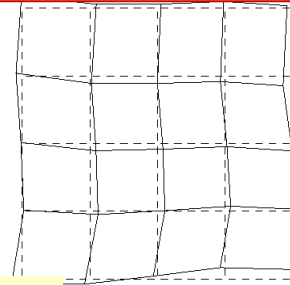
Distortion Compensation (static)

Jeol JSM840, max.distortion~40um



Zeiss (EVO50)

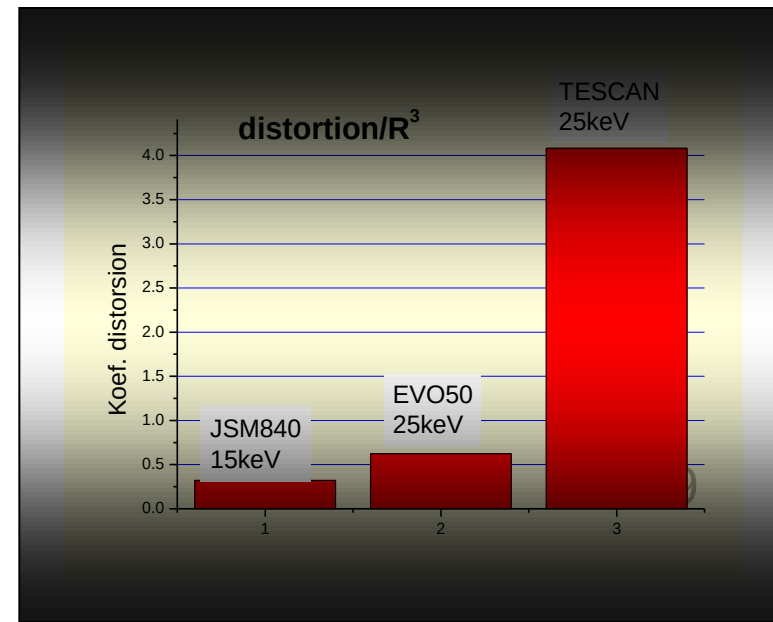
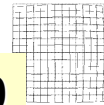
Max.distortion=5um



TESCAN Mira?

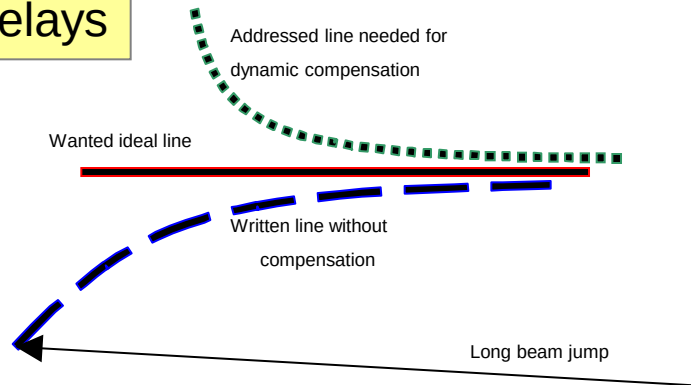
Max.distortion=1.4

x20

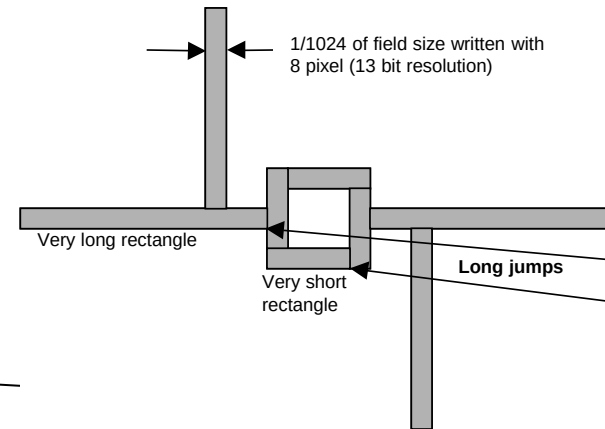


1. Proximity effect
2. Distortion
3. Dynamic delays

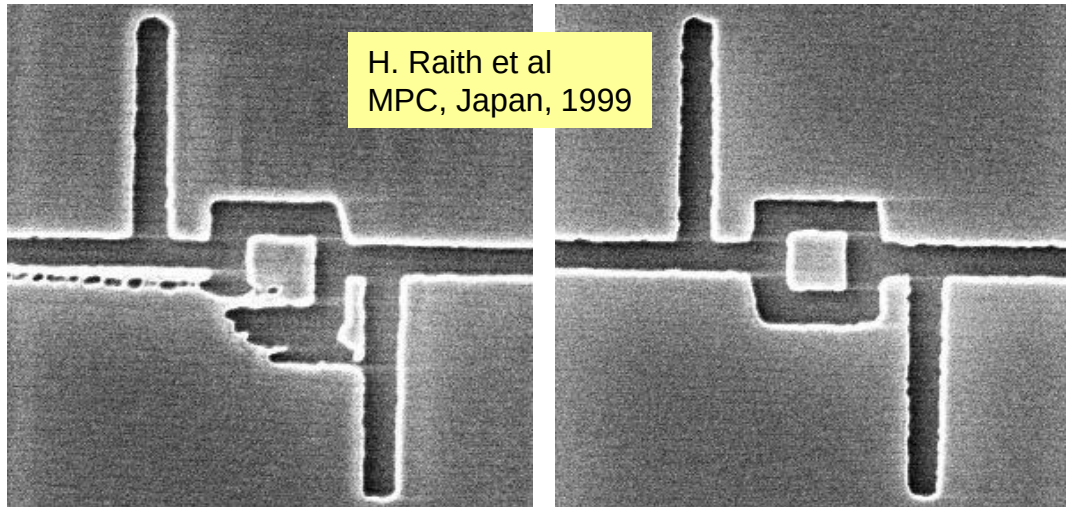
Accuracy losses in SEM's



Working principle of dynamic compensation



Test pattern for recognizing dynamical effects



H. Raith et al
MPC, Japan, 1999

Pattern written with JSM 6400 **without** beam blanker.
Left side without and right side with dynamic compensation.

Измерение параметров (эксперимент/расчет) fitting before measurements

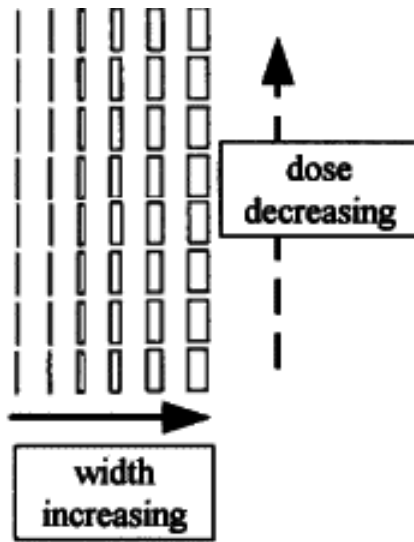


FIG. 1. Test pattern used for **Alfa** determination.

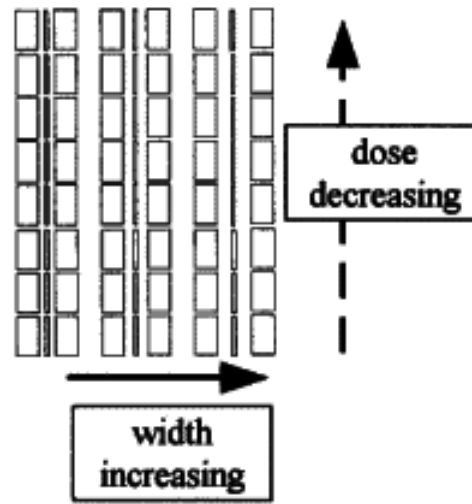


FIG. 3. Test pattern design for **Beta** determination

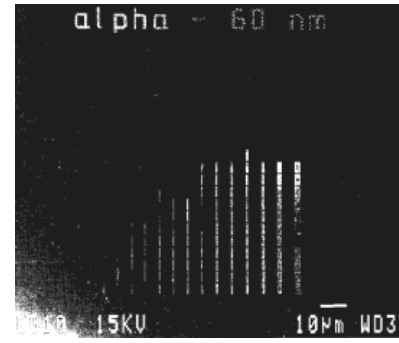
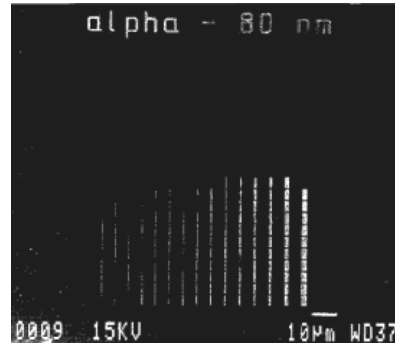
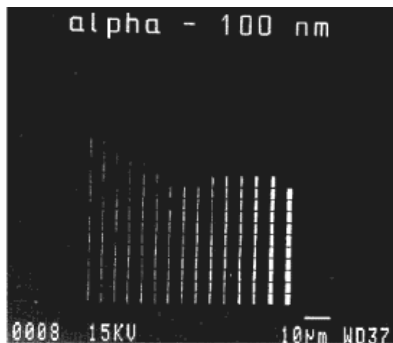


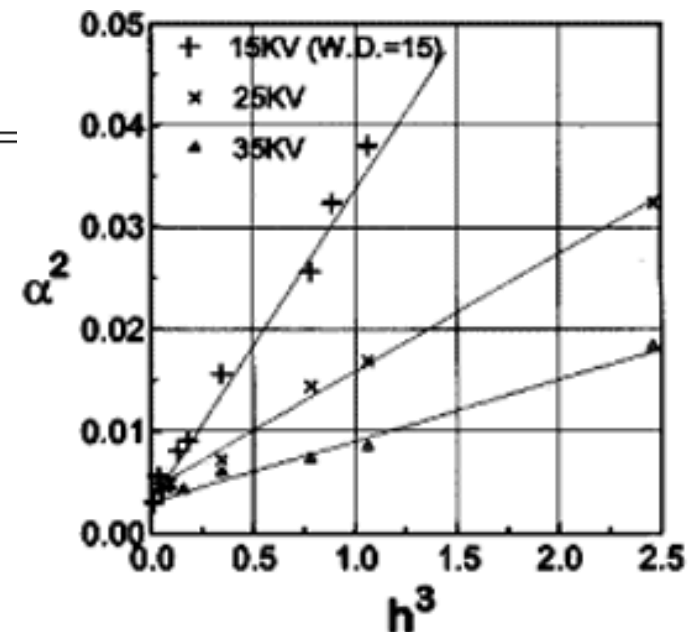
FIG. 2. (a) Part of an experimental image with the pattern designed for a beam spot equal to 100 nm. It is seen that real beam spot is smaller. (b) Part of an experimental image with the pattern designed for beam spot equal to 80 nm. The real beam spot is very close to the one used in the calculation. (c) Part of an experimental image with the pattern designed for a beam spot equal to 60 nm. There is no a straight line and the real beam spot is higher

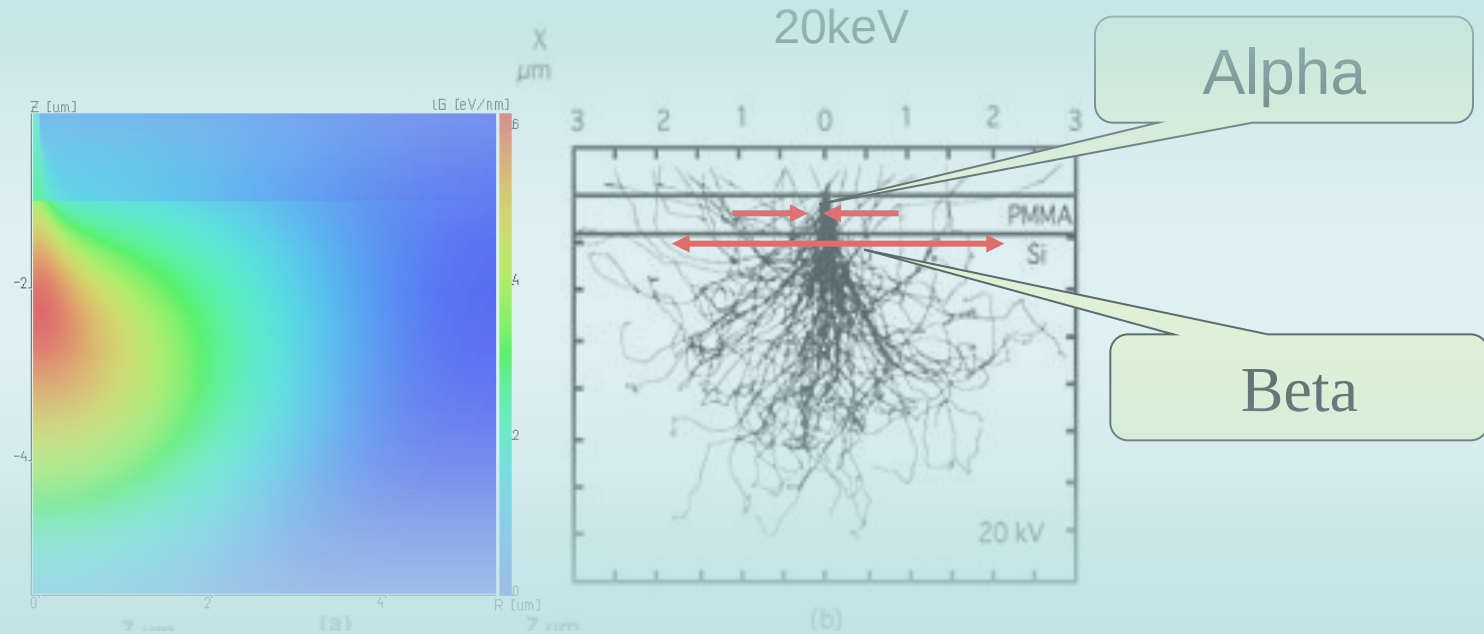
Измерение параметров (эксперимент/расчет)

E (keV)	β (μm)						
	Si	SiO ₂	Mica	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	InAs	GaAs
11	0.9	0.85	0.75	...	...		
15	1.5	1.3	1.2	1	0.8	0.7	...
20	2.2	2	2	...	1.3	1.1	1.2
25	3.1	2.8	2.7	2	1.8	1.3	1.5
30	4	3.9	3.7	...	2.4	1.7	2
35	5.8	5.2	4.8	3.4	3.2	2.2	2.3
39	...				...	2.6	2.6
$\beta = K \cdot E^p$							
p	1.55	1.56	1.6	1.61	1.5	1.36	1.34
$p_{\min}$	1.46	1.48	1.55	1.56	1.36	1.22	1.22
$p_{\max}$	1.65	1.64	1.64	1.67	1.65	1.5	1.46
K	0.0185	0.0193	0.016	0.0102	0.0166	0.0189	0.0185
$K_{\min}$	0.0126	0.0151	0.014	0.0086	0.0104	0.0119	0.0126
$K_{\max}$	0.0273	0.0246	0.0182	0.0121	0.0266	0.03	0.0273
The accuracy of the η measurement is about 20%.							
η	0.7	0.5	0.5	0.8	1	1.4	1.4

Table I. Proximity parameters (as function of electron energy E) and h for different substrates. The fitting procedure based on the formula $\beta = K \cdot (E/1 \text{ keV})^p$ gives the mean values of p and K with the confidence interval ($p_{\min}, p_{\max}$) and ($K_{\min}, K_{\max}$) at a confidence probability of 95%.

Fig. 7. Dependence of electron beam spreading σ^2 as function of resist thickness h^3 measured for three different electron energies shows the power dependence expected from the theory of small-angle scattering.





Electron trajectory and exposure simulation with Monte-Carlo method.

$$D(r) = \frac{D_1(r)}{1 + \eta} + \eta \frac{D_2(r)}{1 + \eta} = \frac{1}{1 + \eta} \left[\frac{\exp(-r^2 / \alpha^2)}{\pi \alpha^2} + \eta \frac{\exp(-r^2 / \beta^2)}{\pi \beta^2} \right]$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

Beta: $\sim E^{5/3} / (Z\rho)_{\text{substr}}$

Alpha: $\sim (Z\rho^3)_{\text{resist}} / E^2$

Eta: $\uparrow (Z\rho)_{\text{substr}}$

Зависимости подтверждены экспериментом и совпадают с физикой рассеяния

Database in NanoMaker, 10 substrates, one resist

Измерение параметров (эксперимент/расчет)

Experimental, Monte Carlo & Ions Recommende... ? X

Experimental MonteCarlo

Proximity parameters

Beam Size [μm]: 0.05 Voltage [kV]: 25

Resist Name: PMMA (> 5 kV) Substrate Name: Si (> 5 kV)

Modify Resist...

H0 [μm]: 0.5 Beta [μm]: 3.2

Alpha0 [μm]: 0.05 Eta0: 0.7

Alpha [μm]: 0.0632 Eta: 0.7

Dwell Times recommended

Beam Current [nA]: 0.01

Dwell Time [μs] for

Area: 2e+03

Line: 3.76e+03

Point: 4.27e+03

Exposure Step [μm]

X Area: 0.1

Y Area: 0.1

Line: 0.1

Sensitivity [$\mu\text{A}^*\text{s}/(\text{cm}^2)$]: 200

Line Dose [$\text{pA}^*\text{s}/\text{cm}$]: 3.76e+03

Point Dose [pA^*s]: 0.0427

OK Отмена Справка

Эксперимент
Si
GaAs
ZnO2
Mica
Ge
SiO2
Al2O3
InAs
Diamond, C

Расчет Монте-Карло
-любые слоистые
подложки
-автоматическое
вычисление

Experimental, Monte Carlo & Ions Recommende... ? X

Experimental MonteCarlo

Proximity parameters

Beam Size [μm]: 0.05 Voltage [kV]: 25

Resist Name: PMMA Substrate Name: Si

Data Records: Material(H0[μm],Density[kg/m³])[Attribute]/...

PMMA(0.1;1190)/Si(300;2330)s/Tri=100094

Import... Delete... Calculate...

H0 [μm]: 0.1 Beta [μm]: 2.82

Alpha0 [μm]: 0.05 Eta0: 0.499

Alpha [μm]: 0.05 Eta: 0.582

Dwell Times recommended

Beam Current [nA]: 0.01

Dwell Time [μs] for

Area: 2e+03

Line: 2.78e+03

Point: 2.49e+03

Exposure Step [μm]

X Area: 0.1

Y Area: 0.1

Line: 0.1

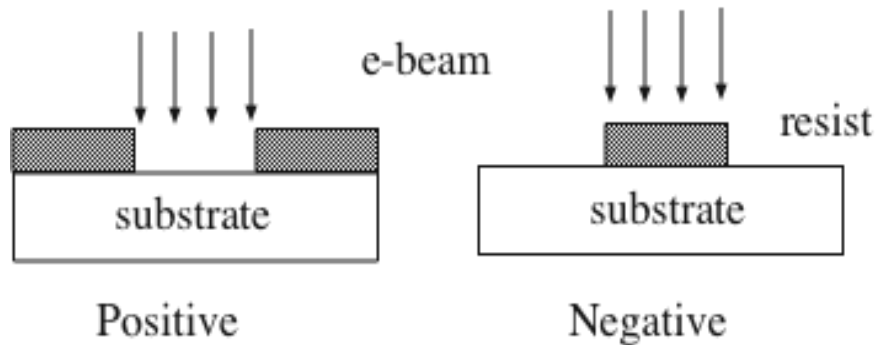
Sensitivity [$\mu\text{A}^*\text{s}/(\text{cm}^2)$]: 200

Line Dose [$\text{pA}^*\text{s}/\text{cm}$]: 2.78e+03

Point Dose [pA^*s]: 0.0249

OK Отмена Справка

E-beam sensitive resists

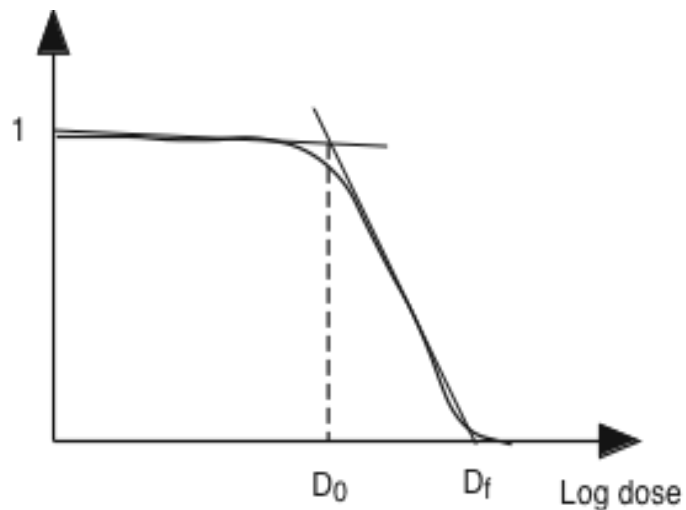


Electron beam sensitive resists are usually polymers.

They are similar to optical resists, but the structural changes are induced by e-beam.

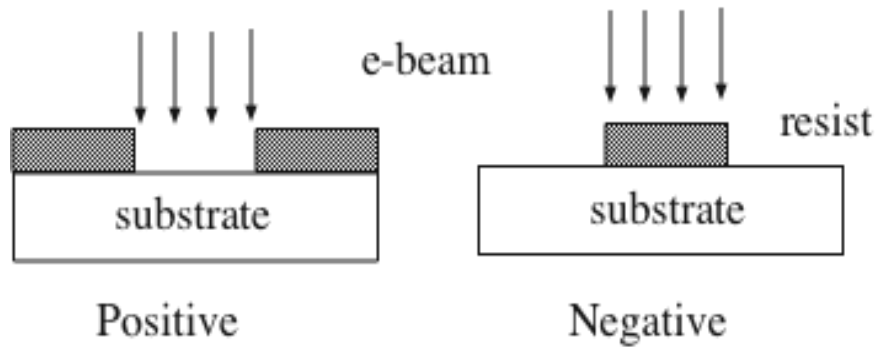
Main characteristics of resist:

- sensitivity (electron dose per unit area needed for complete development, $\mu\text{C}/\text{cm}^2$)
- resolution (≈ 10 nm for PMMA)
- contrast (γ) - determines slope of characteristic curve
- stability, adhesion



Characteristic curve of a positive resist (thickness vs dose)

E-beam sensitive resists

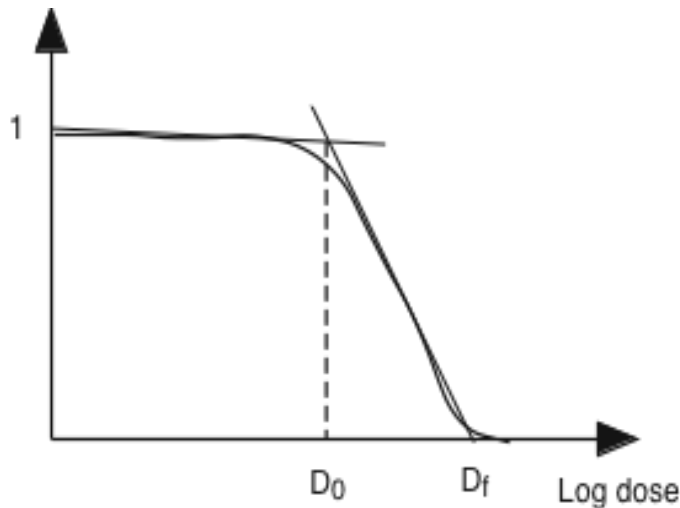


Electron beam sensitive resists are usually polymers.

They are similar to optical resists, but the structural changes are induced by e-beam.

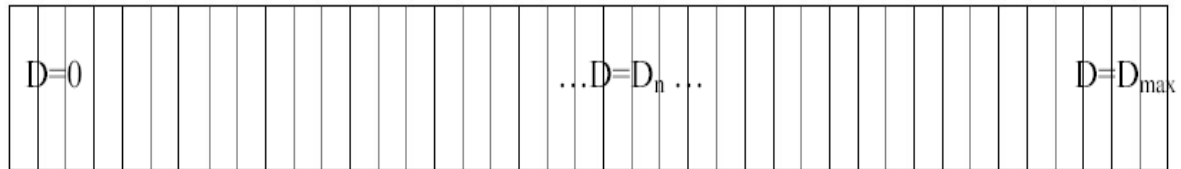
Main characteristics of resist:

- $\frac{h}{h_0} = 1 - \left(\frac{D}{D_0} \right)^\gamma$ area needed for
- contrast (γ) - determines slope of characteristic curve
- stability, adhesion

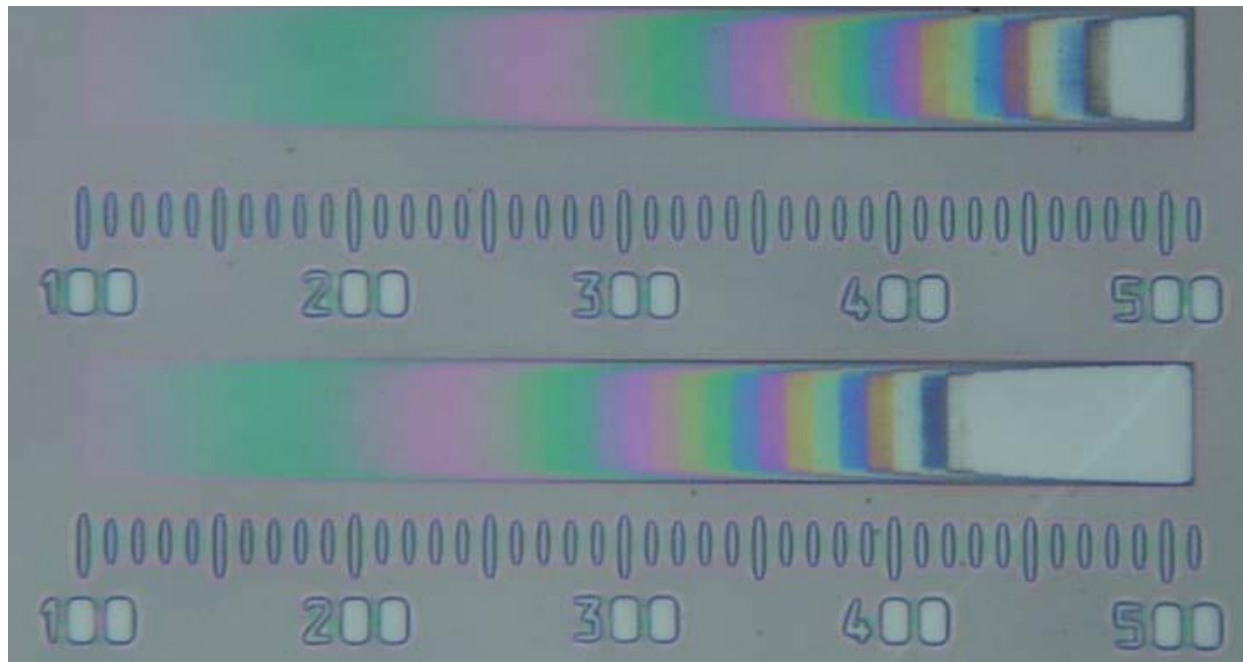


Characteristic curve of a positive resist (thickness vs dose)

Sensitivity

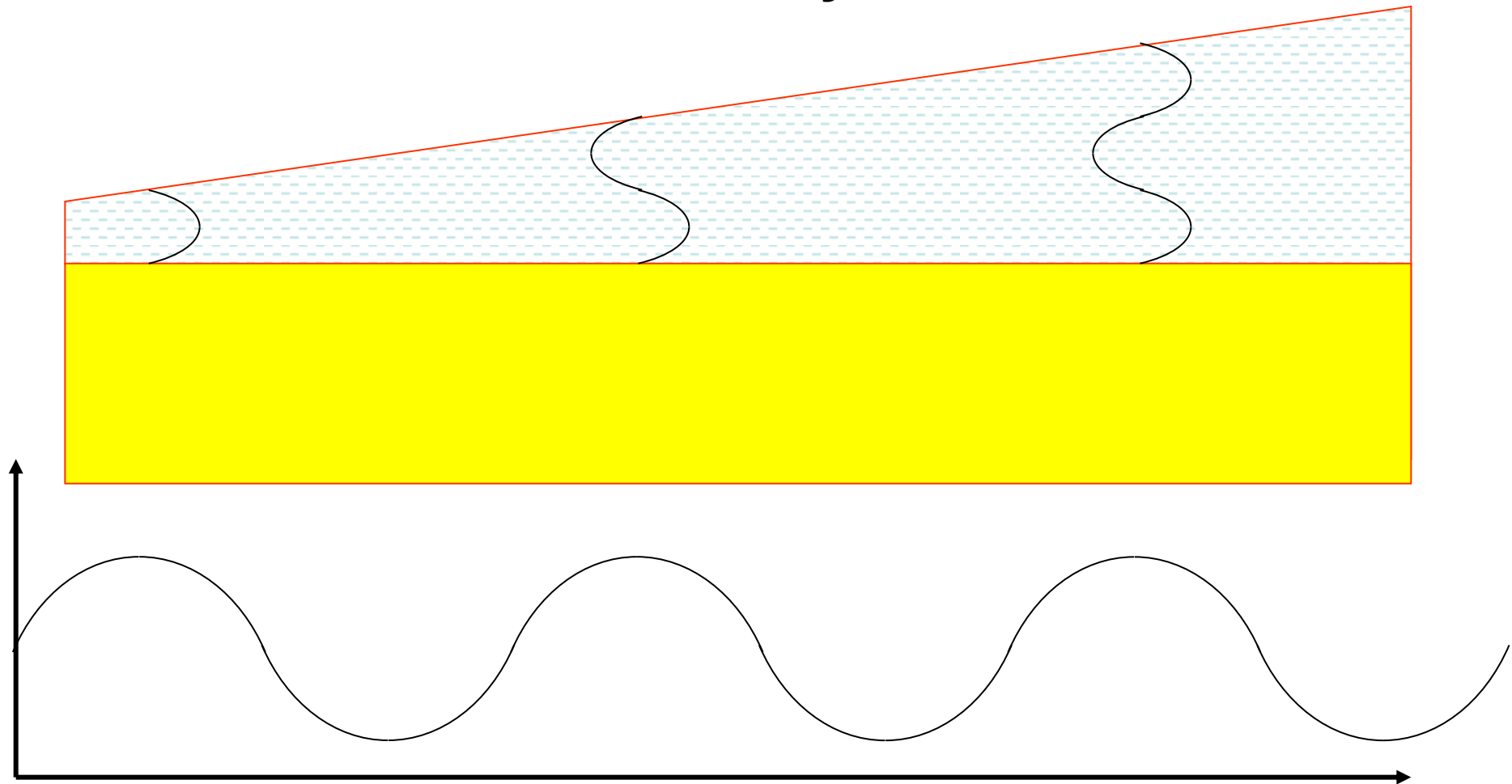


Dose wedge design



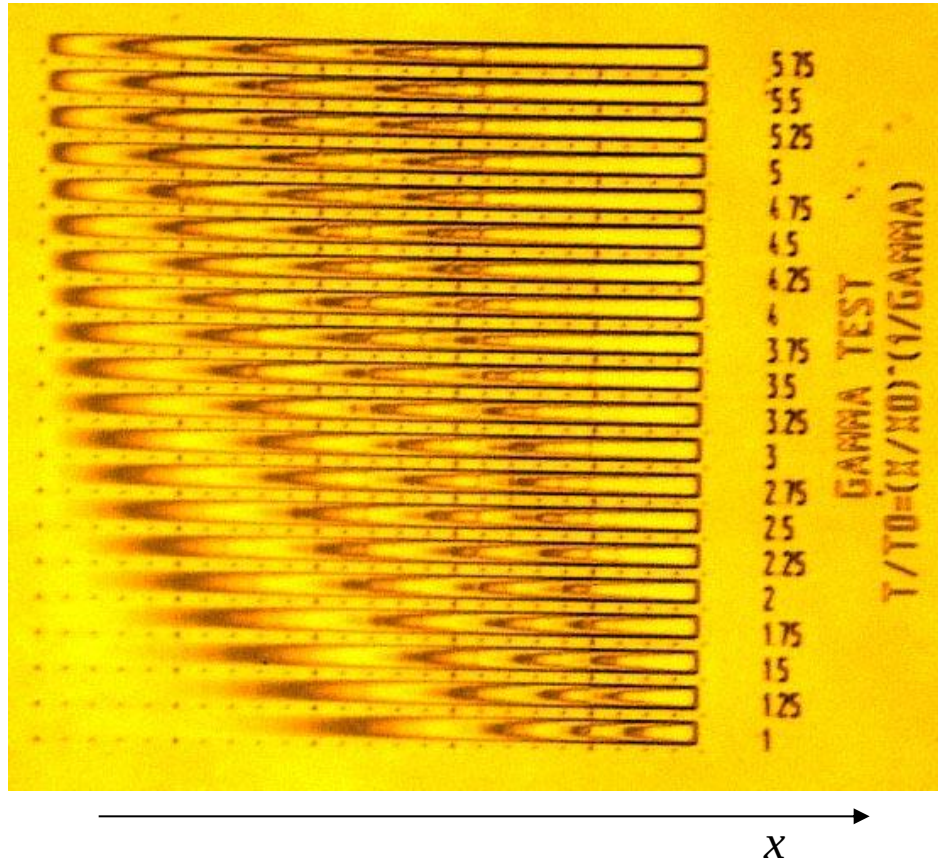
Dose wedge exposure

Resist thickness by color method



Contrast

Gamma-test with 3D e-lithography by “fitting before measurement”



$$\frac{D}{D_0} = \left(\frac{x}{x_0} \right)^{1/\gamma}$$

T is exposure time
 x is a distance

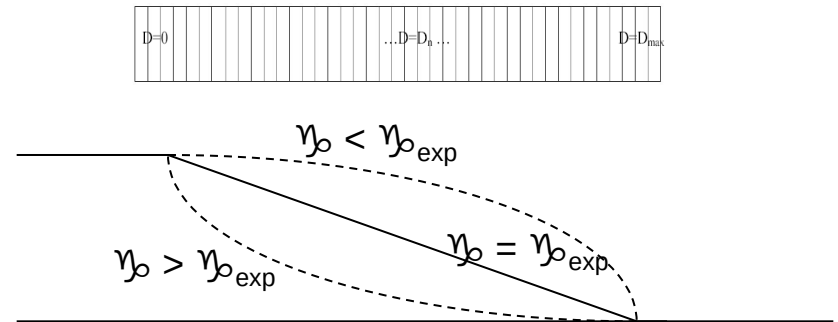
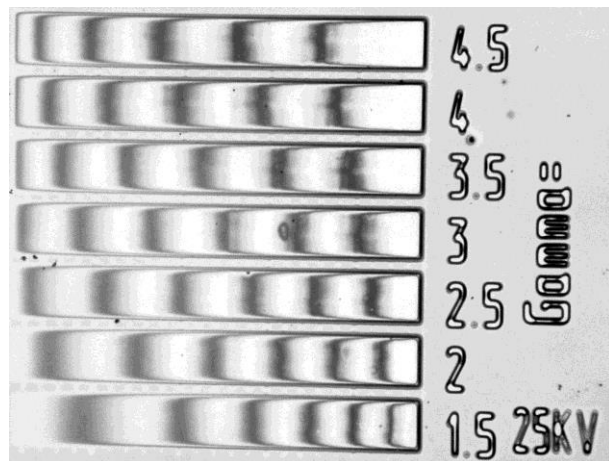


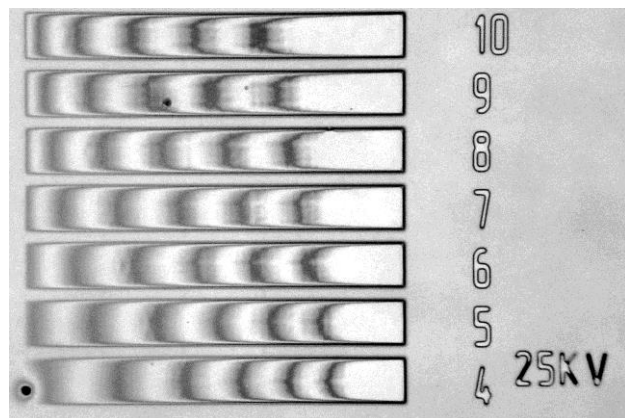
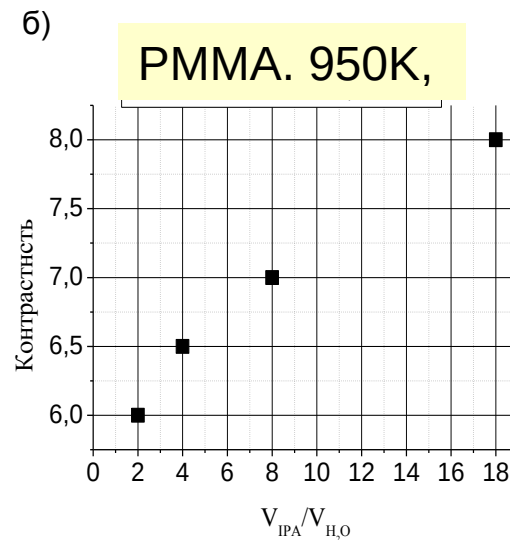
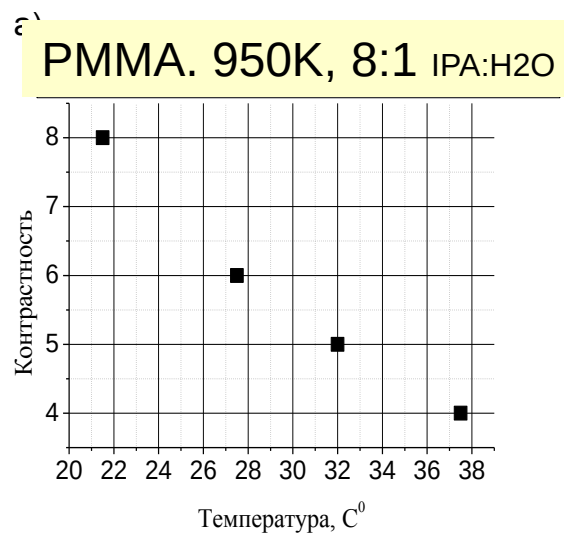
Fig.6 Gamma-test. Test pattern for contrast characterization by “fitting before measurements” approach. Operator should find a horizontal strip with equal distances between minima and read value of contrast at the right.

Contrast

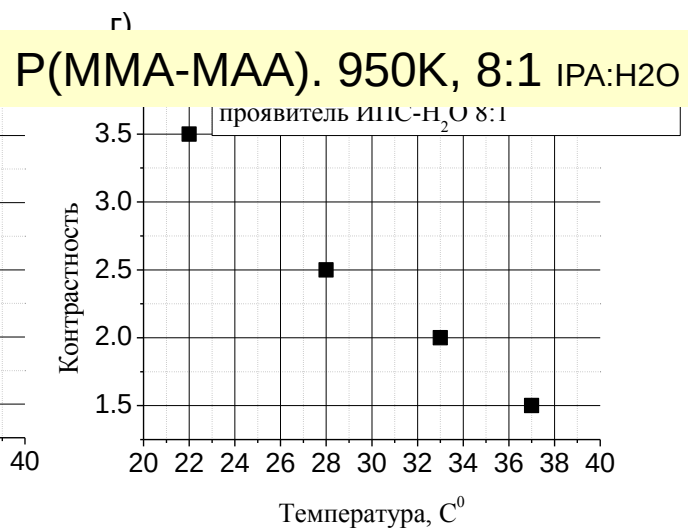
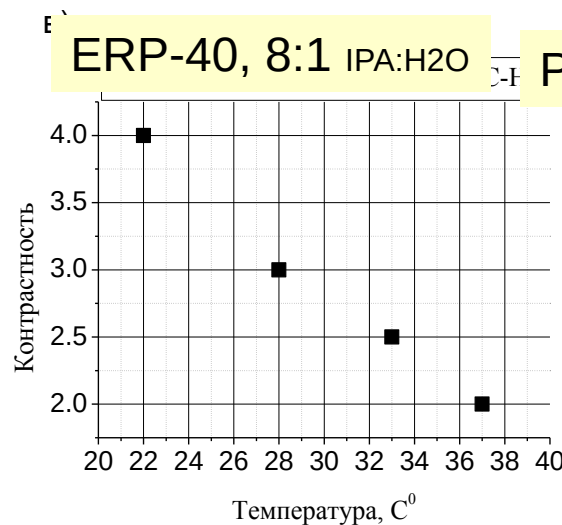
Gamma-test with 3D e-lithography by “fitting before measurement”



P(MMA-MAA)

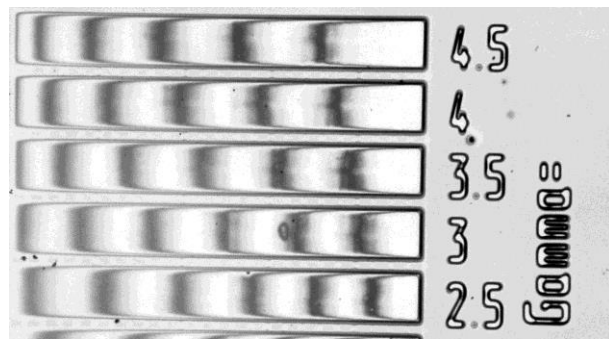


PMMA, 950K

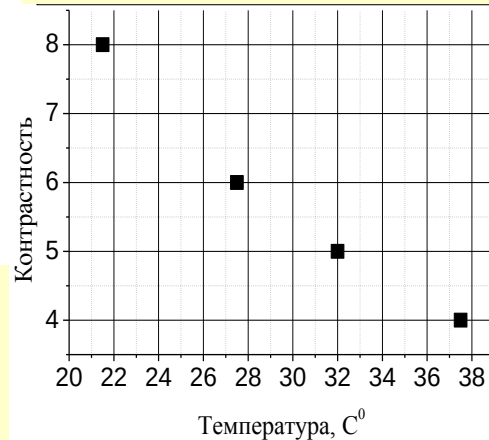


Contrast

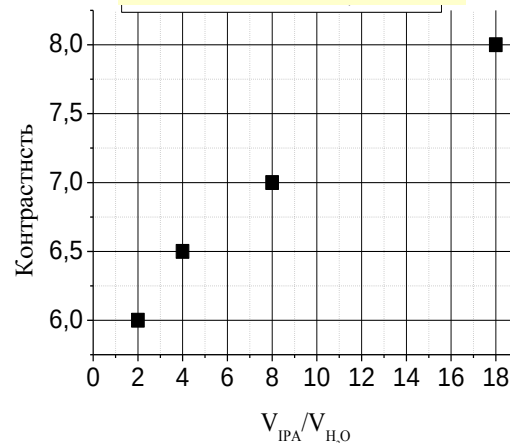
Gamma-test with 3D e-lithography by “fitting before measurement”



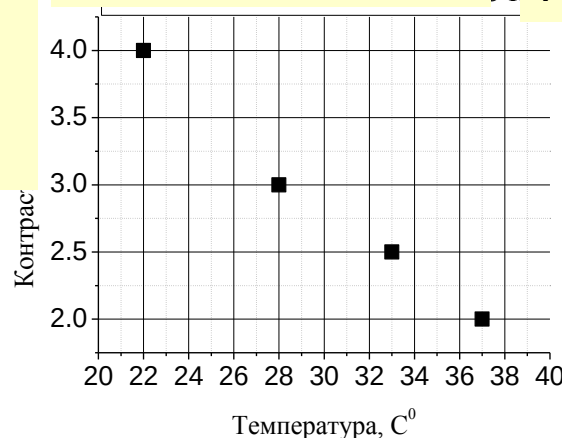
а) PMMA. 950K, 8:1 IPA:H₂O



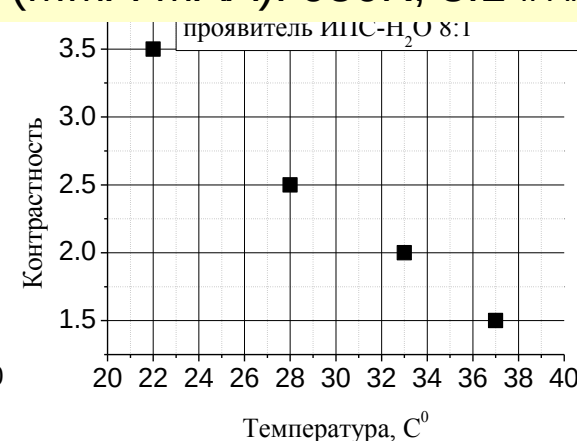
б) PMMA. 950K,



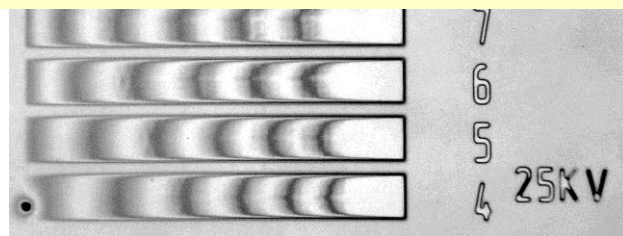
в) ERP-40, 8:1 IPA:H₂O



г) P(MMA-MAA). 950K, 8:1 IPA:H₂O



- Очень быстрый способ
- Измерены зависимости от
- типа резиста
- температуры
- состава проявителя



PMMA, 950K

Коррекция оптического эффекта близости в динамической фотолитографии

Главное отличие от фотолитографии с масками-»серые» пиксели
+»динамическая» маска



Коррекция оптического эффекта близости в динамической фотолитографии

Динамическая фотолитография

I.

- ЖК экран -> «серый» пиксель, новая коррекция оптического эфф. близости
- востребованная технология
- сокращает затраты на изготовление фотомасок
- 2000, оценка мировой потребности
- защитные голограммы

Мы были бы заинтересованы в реализации такого проекта



II.

- DUV литография (Нижегородский проект)
- НаноМейкер обеспечит проектирование, подготовку данных, согласованное управление экспонированием и движением стола

Готовы продолжить участие

Ионно-лучевая литография/ Возможные проекты

Преимущества ионно-лучевой литографии

Ионно-лучевой маск-райтер

Ионно-лучевой литограф

Литограф следующего поколения ?

«Забытая» технология

1980 год, четыре литографии

- фото
- электронная

Через 10 лет в промышленности остались только две

1980

крит. размеры ~1 μm

- > аспектное отношение ~1
- > толщина резиста ~1 μm
- > ускоряющее напряжение ионов ~сотни кВ

2010

крит. размеры ~20-30 нм

- > аспектное отношение ~1
- > толщина резиста ~20-30 нм
- > ускоряющее напряжение ионов ~десятки кВ

Возвращение ИЛЛ

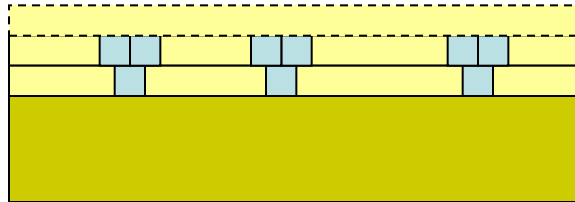
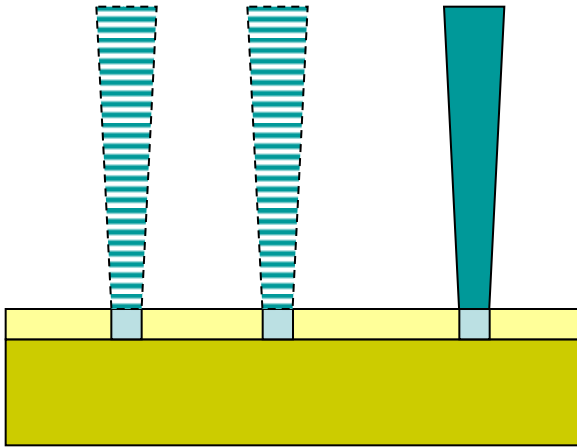
«Забытая» технология- Возвращение ИЛЛ

Преимущества

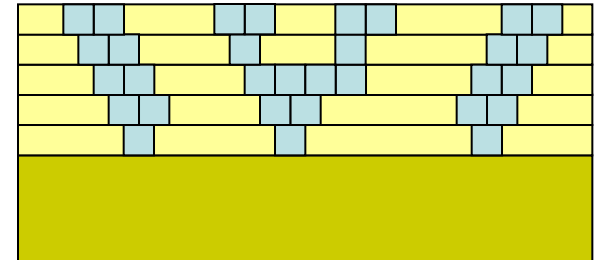
- чувствительность -> производительность ~1000X
- разрешение (нет вторичных электронов) <10nm
- стерео-литография (прямой синтез 3D-приборов)
- уникальное свойство
- вовлечение абсолютно новых резистов (функциональных материалов)

Motivation2

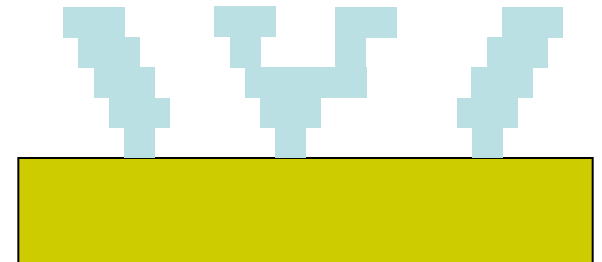
Main idea



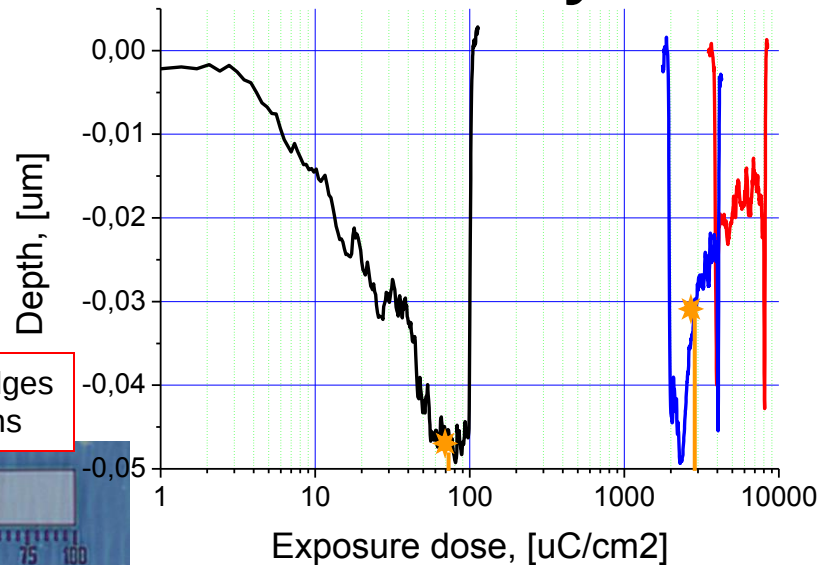
• • •



- Resist deposition+exposure
- Resist deposition+exposure
-
- Single development



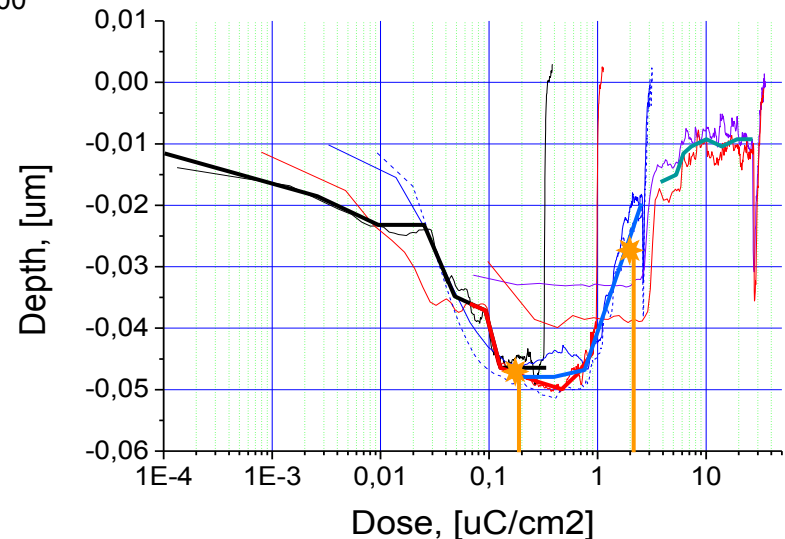
Sensitivity: Electrons vs Ions



КазНУ, ИПТМ РАН	Positive, [μC/cm²]	Negative, [μC/cm²]	Ratio, Pos/Neg
Electrons (30keV)	150	~5000	33
Ions (30keV)	0.15	2.2	15
Ratio, Ion/Elec	1000	2200	

Results:

- Resist 1000x sensitive to ions
- Pos/Neg smaller for ions

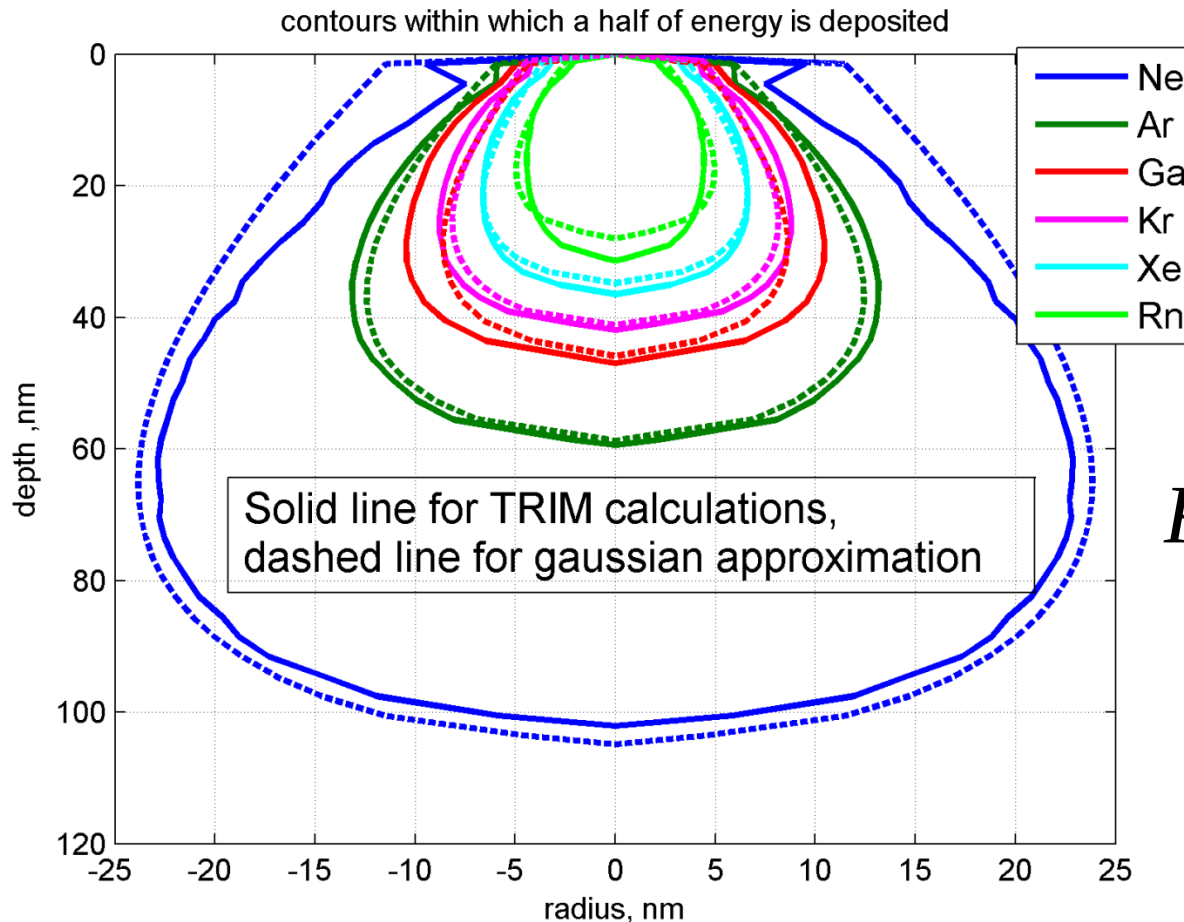


Dose wedges ions

Absorbed dose approximation

- fitting better than 10%
- describes all elements of Mendeleev table

$$E(r, z) = E_z(z)E_R(r, z) = \frac{A}{\pi R(z)^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2R(z)^2}\right) \exp\left(-\frac{(z/L_{energy} - B)^2}{2C^2}\right)$$



$$B \approx 0.47$$

$$C \approx 0.38$$

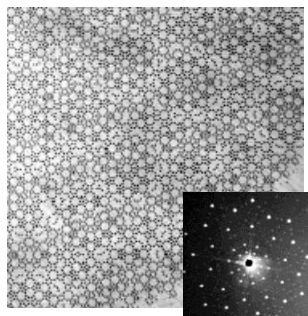
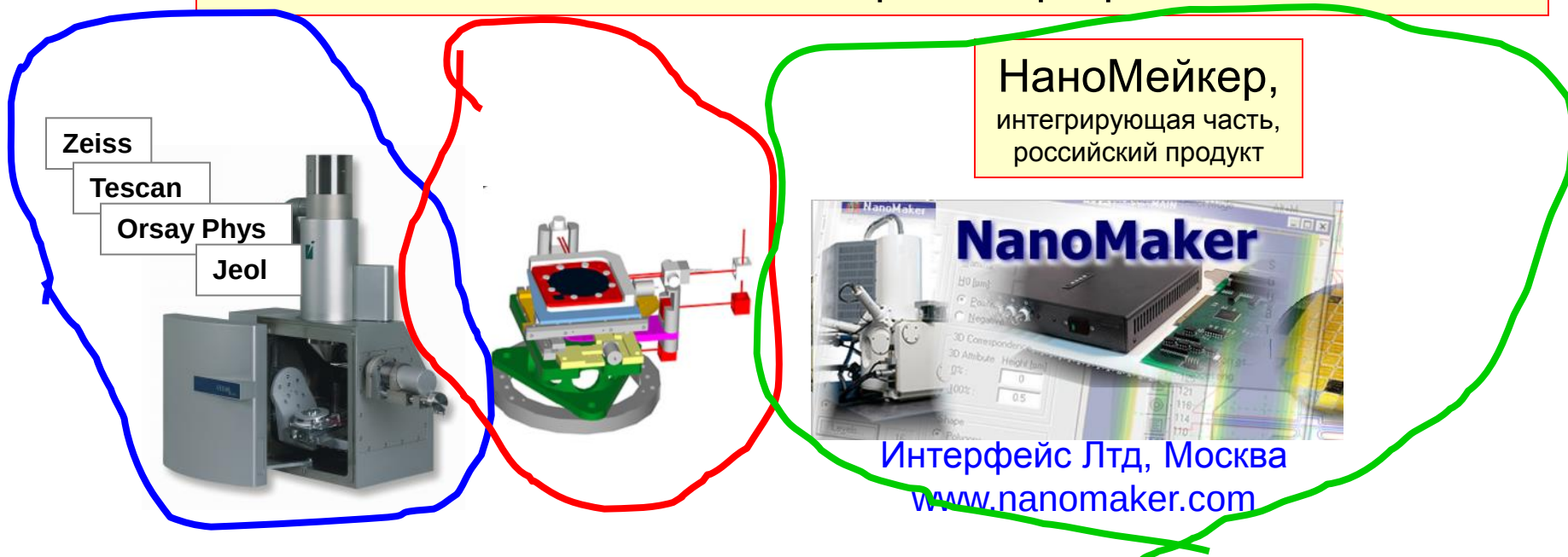
$$R(z) \approx 3.5 \frac{L_{transp}}{ZL_{energy}} z$$

Содержание

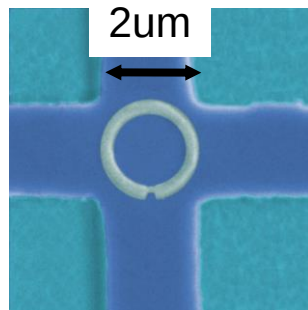
- **Введение/Мотивация/Физические основы**
- **Подсистема корр. эфф. близости в NanoMaker**
 - Три параметра (двух-гауссовое приближение)
 - Метод простой компенсации
 - Гарантированная точность
 - 3Д коррекция
- **Экспериментальная проверка**
- **Измерение параметров (эксперимент/расчет)**
- **Коррекция оптического эффекта близости в динамической фотолитографии**
- **Ионно-лучевая литография/ Возможные проекты**
 - Преимущества ионно-лучевой литографии
 - Ионно-лучевой маск-райтер
 - Ионно-лучевой литограф
 - Литограф следующего поколения ?
- **Заключение**

Производство ЭЛ/ФИП-литографов

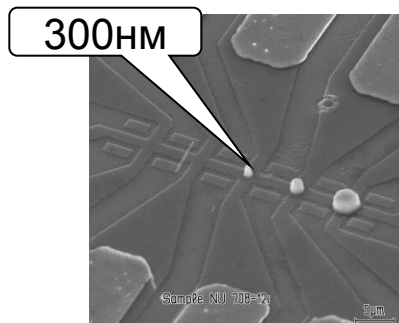
ФИП + столик + аппаратно-программный комплекс



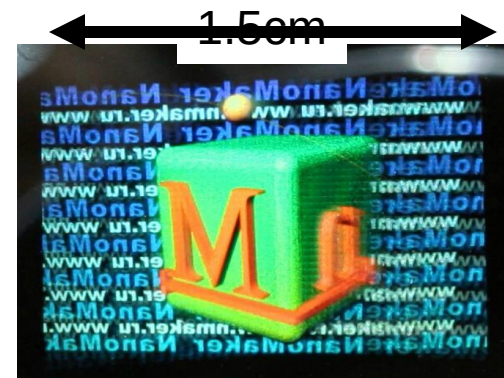
Фотонный
квази-кристалл,
ось 10ого порядка



Сверхпроводящее
кольцо над 2DEG



Gold contacts
Mesa electrodes (2DEG)
Ferromagnetic disks



Радужные голограммы
для защиты от подделки,
электронная литография

Заключение

NanoMaker 30-50 человеко-лет

- НаноМейкер, эл-луч. литограф

Исследовательская, лабораторная/полупромышленная система

На производстве - увеличение выхода годных, коррекция эффекта близости

Продвижение на (участие в) зарубежный рынок

*(2-3 года по 100Keuro,
потребность ~100установок в год)*

- НаноМейкер

Основа для коррекции оптического эффекта близости в динамической фотолитографии

(подготовка данных)

Производство установок динамической фотолитографии

*(100+100Keuro
потребность 2000 установок)*

- НаноМейкер

-основа будущих ионно-лучевых литографов

-например, ионно-лучевой маск-райтер

*(пластина 200мм за 40часов
500+200+300 Keuro, 1-2 года)*

- НаноМейкер

Можно использовать в ВУФ-литографах

(2-3 года 53млн руб.)

-проектирование структур

-подготовка данных

-управление литографией

- НаноМейкер

Подготовка данных и проектирование для системы MAPPER

(они просили 300Keuro)