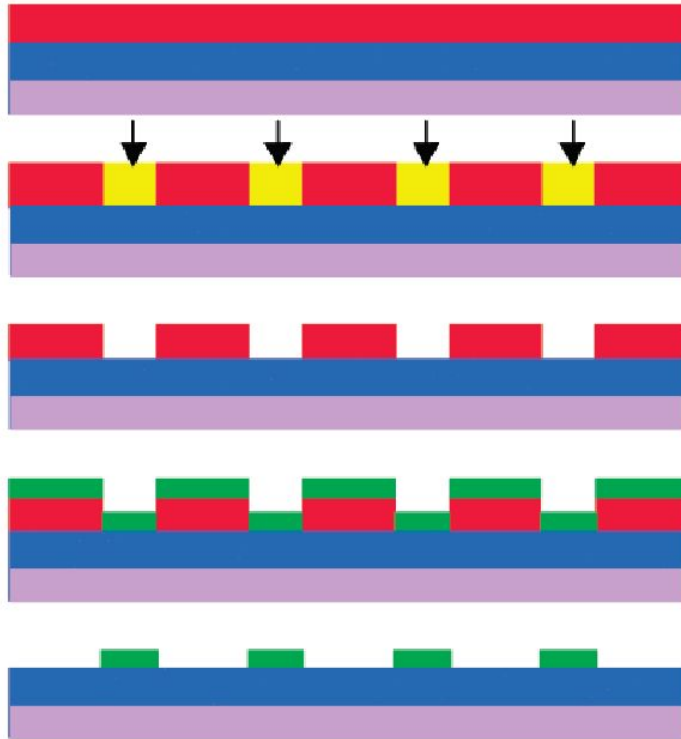

Электронно-лучевая литография

Сканирующая электронная лучевая литография



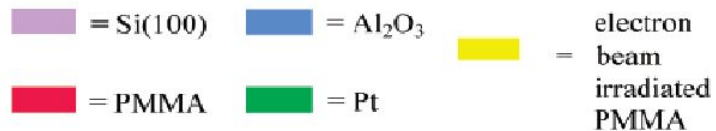
1. Нанесение электронного резиста (PMMA)

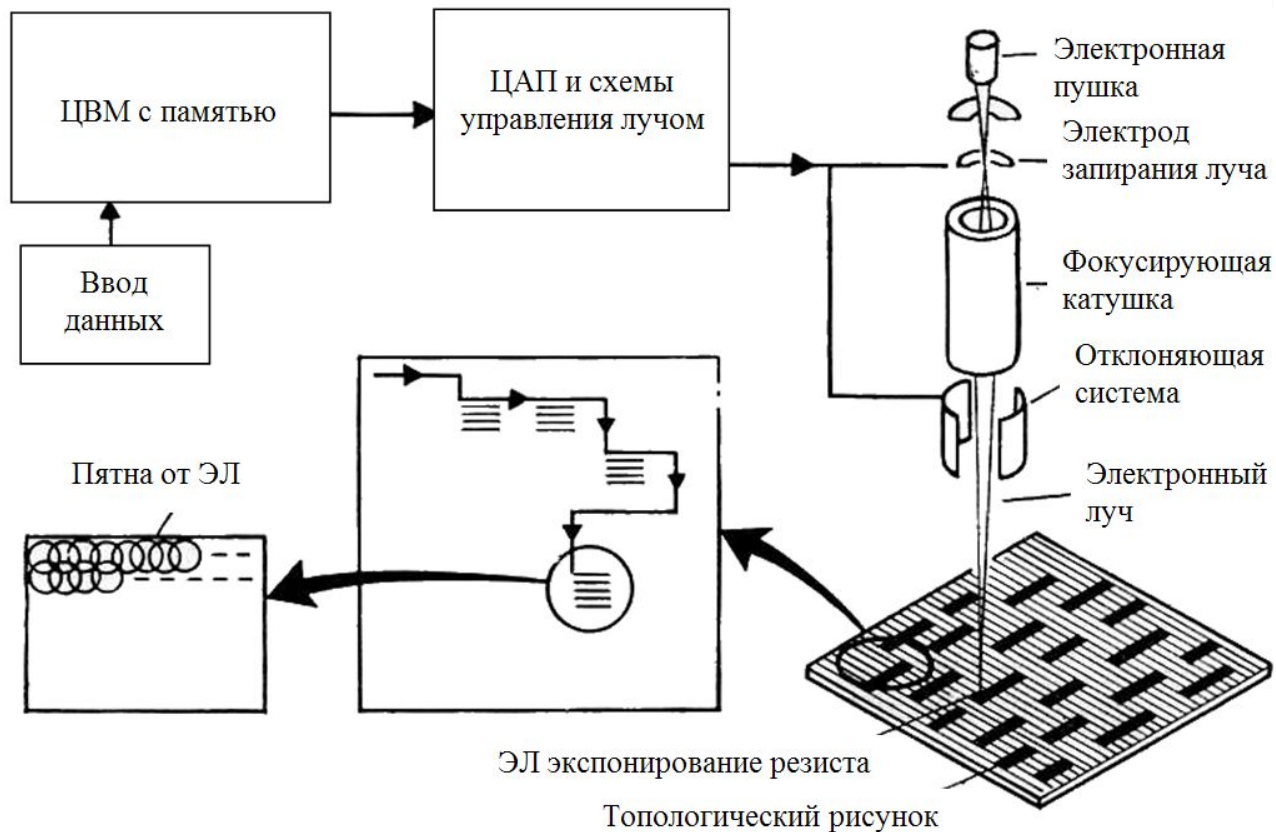
2. Экспонирование резиста электронным пучком

3. Проявление резиста

4. Осаждение плёнки металла

5. «Взрыв» резиста

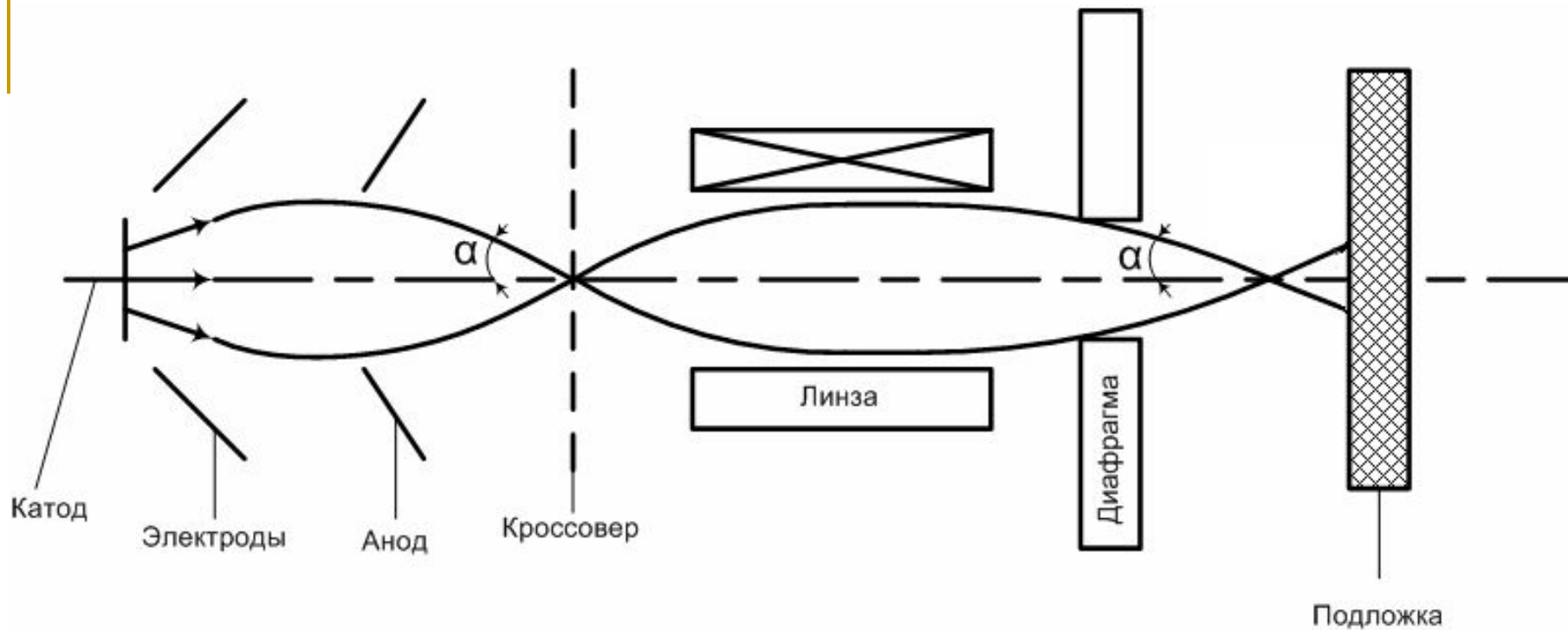




Время экспонирования

$$t = n \cdot t_{\text{опт}} + \sum t_{\text{л}}$$

где n - полное число приходящихся на данный участок элементов разложения;
 $t_{\text{опт}}$ - оптимальное время экспонирования элемента разложения;
 $\sum t_{\text{л}}$ - время перемещения луча.



Длина волны электрона:

$$\lambda = h / \sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U_0}$$

где h - постоянная Планка;
 m , e - масса и заряд электрона;
 U_0 - ускоряющее напряжение.

Плотность тока пятна :

$$j_{\text{max}} = j \left(1 + \frac{eU_0}{kT_K} \right) \sin^2 \alpha$$

где k - постоянная Больцмана;
 T_K - температура катода.

Яркость источника:

$$B = \frac{1}{\pi} \frac{e}{k} \frac{j_K \cdot U}{T_K}$$

«Гауссовский» диаметр пятна

$$d_G = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{4k T_K I_0}{\pi e j_K U_0} \right)^{1/2} = \frac{1}{\alpha} \cdot \left[\frac{I_0}{3,08 \cdot B} \right]^{1/2}$$

где I_0 – ток луча.

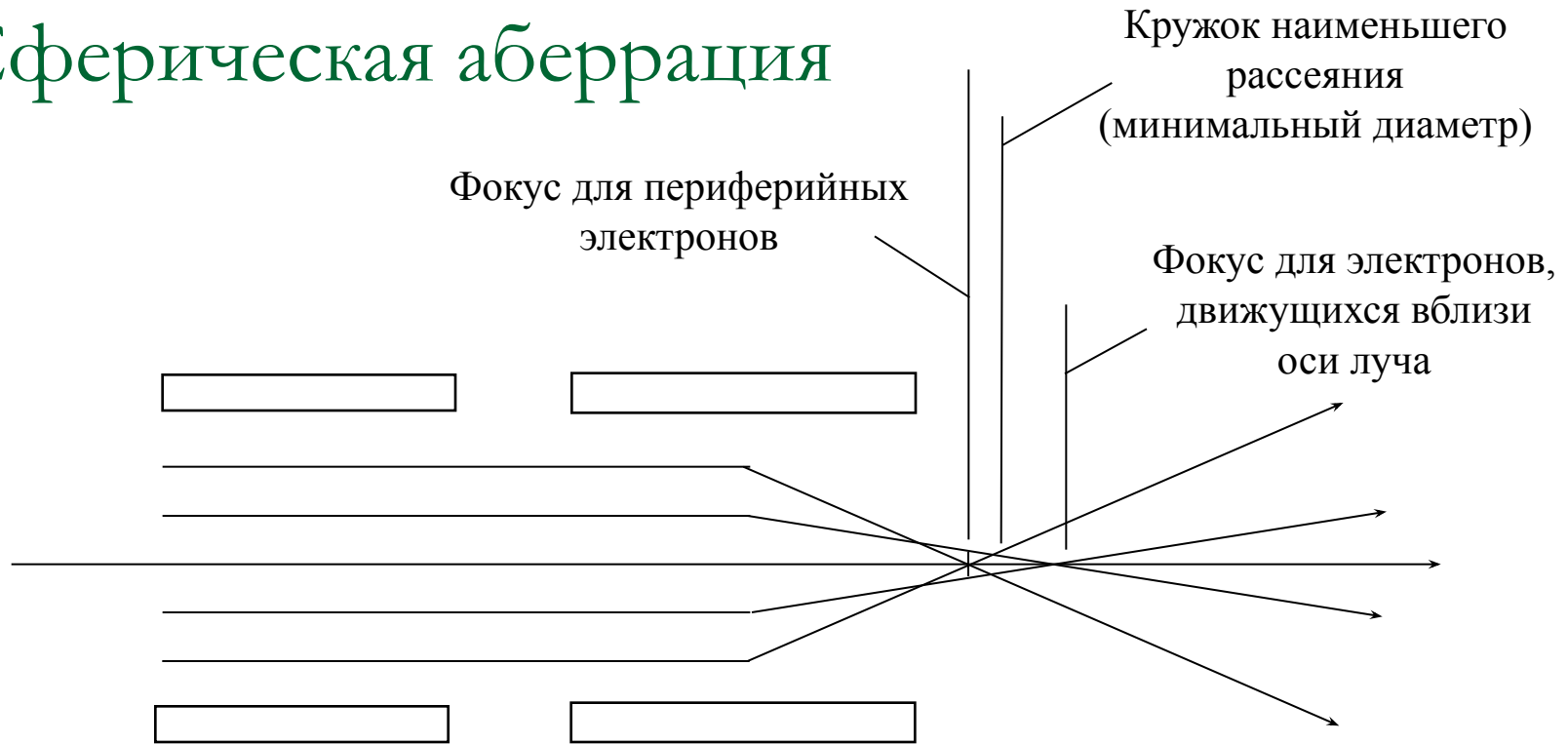
Яркость различных источников:

Термокатод **W**: $B = 5 \cdot 10^4 \text{ cp} / (\text{ }^2 \cdot \text{)}$

Термокатод **LaB₆**: $B = 1 \cdot 10^6 \text{ cp} / (\text{ }^2 \cdot \text{)}$

Термополевой катод: $B = 1 \cdot 10^8 \text{ cp} / (\text{ }^2 \cdot \text{)}$

Сферическая абберация



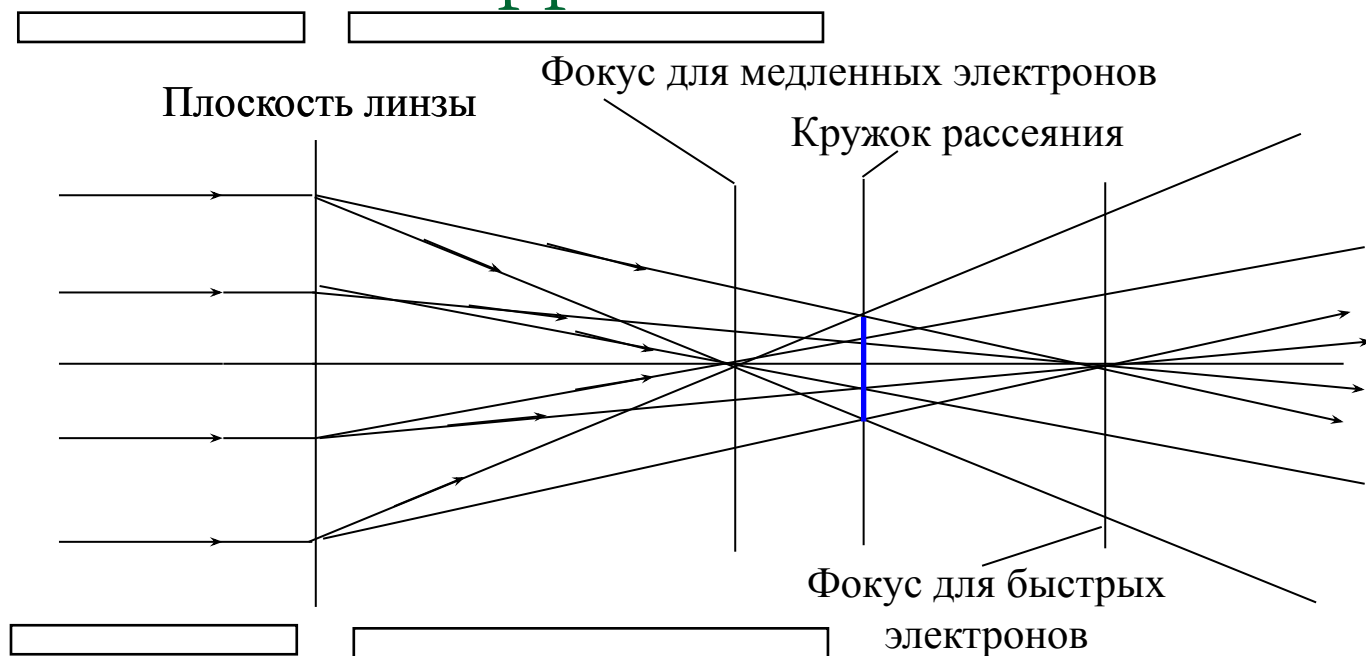
Диаметр кружка наименьшего рассеяния, возникающего вследствие сферической абберации:

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \cdot \alpha^3,$$

где C_s - коэффициент сферической абберации, связанный с фокусным расстоянием линзы f .

$$C_s = K_s f, K_s \quad 0,5 < K_s < 1,5.$$

Хроматическая aberrация



Диаметр кружка наименьшего рассеяния, возникающего вследствие хроматической aberrации:

$$d_c = C_c \cdot \alpha \Delta U / U, \text{ где } C_c = K_c f \text{ [} K_c = 0,75 \div 1 \text{]}.$$

$$d_c = C_c \cdot \alpha (2 \Delta H / H - \Delta U / U).$$

колебания магнитного поля

разброс энергий электронов

Дифракция:

$$d_d = \frac{0,6}{\alpha} \frac{h}{\sqrt{2m \cdot e \cdot U}}$$

$$d_M^2 = d_G^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2$$

Оптимальный угол сходимости:

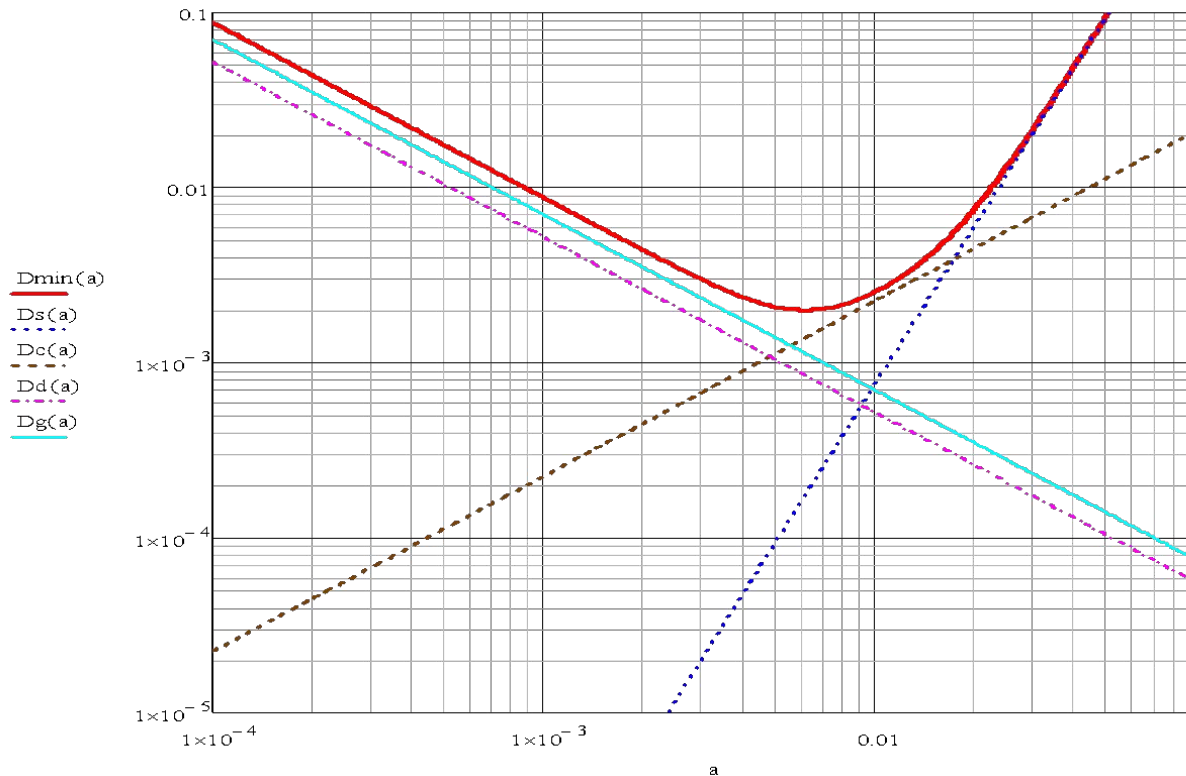
$$\alpha_{opt} = \left[\frac{I_0}{2,31 \cdot B \cdot C_s^2} \right]^{1/8}$$

Диаметр пятна при α_{opt} :

$$d_{min} = 0,79 \cdot (I_0 / B)^{3/8} \cdot C_s^{1/4}$$

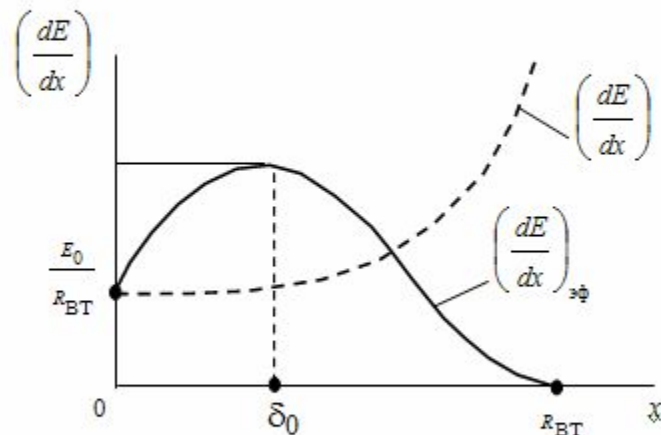
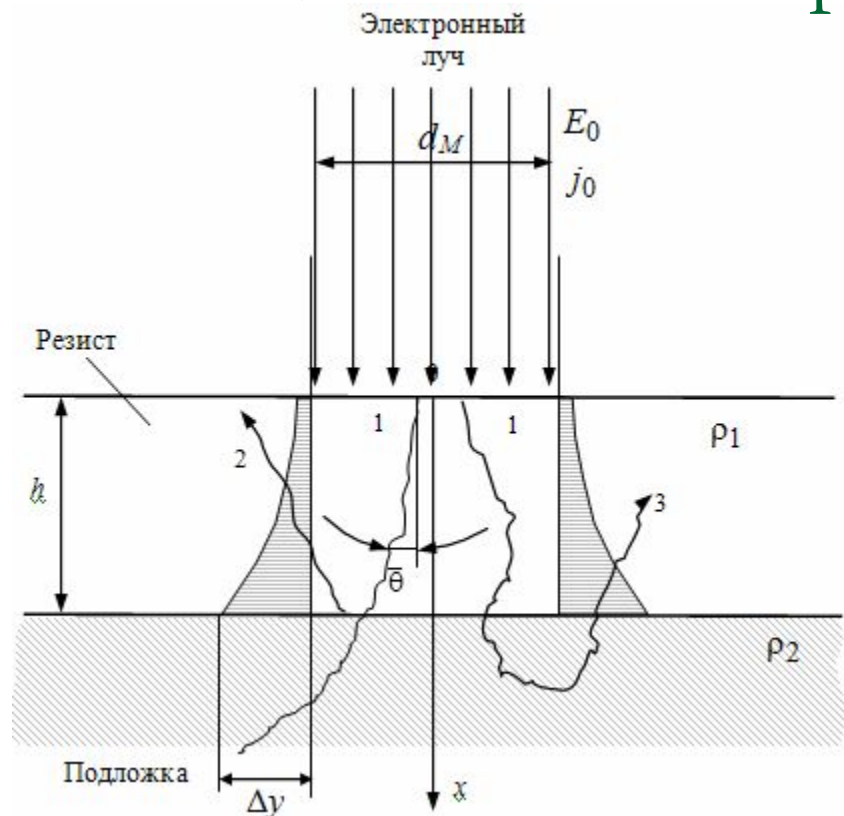
Плотность тока луча при α_{opt} :

$$j = 1,94 \cdot d_{min}^{2/3} \cdot B / C_s^{2/3}$$



При токе пучка электронов 600 пА и ускоряющем напряжении 100 кВ может быть получен диаметр пучка на уровне 3 нм.

Взаимодействие электронов с твердым телом



$\bar{\theta}$ – средний угол рассеяния электронов

Траектории движения электронов:

- 1 – рассеивающихся в резисте;
- 2 – претерпевших неупругое отражение на границе раздела;
- 3 – вернувшихся в объем пленки резиста .

Основные формулы:

Объемная удельная энергия:

$$Q = \frac{dE}{dx} j t \frac{1}{e}, \text{ где } dE/dx - \text{ потери энергии электронами.}$$

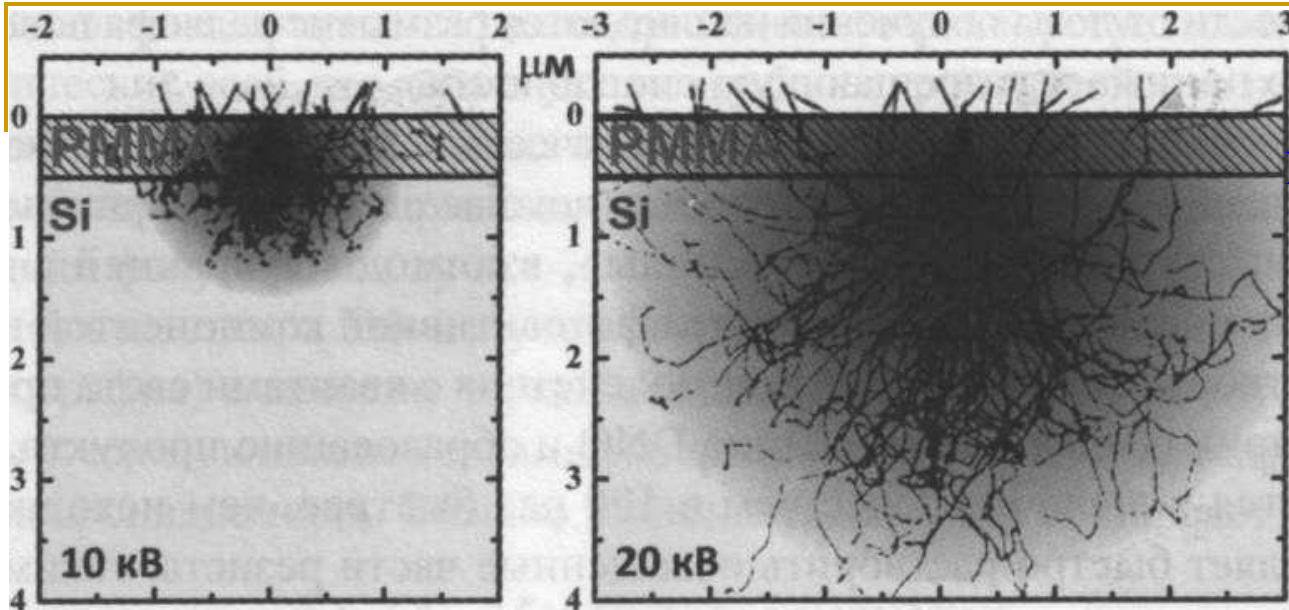
□ Зная, что удельная энергия и плотность тока являются функциями глубины:

$$Q(x) = \left(\frac{dE}{dx} \right) \frac{j(x)}{j_0} \cdot \frac{j_0 t}{e} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{эф}} \frac{j_0 t}{e},$$

где $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{эф}} = \frac{dE}{dx} \cdot \frac{j(x)}{j_0}$ - эффективные энергетические потери электронов.

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{эф}} = \frac{E_0}{R_{\text{В-Т}}} \left(1 - \frac{x}{R_{\text{В-Т}}} \right)^{5/4} \left(3 - 2e^{-\frac{Z+8}{4} \cdot \frac{x}{R_{\text{В-Т}}}} \right),$$

где Z - атомный номер атома подложки.



Вклад упругого рассеяния:

$$\Delta y_1 = h \cdot \bar{\theta}.$$

Проекционный пробег электронов по формуле Виддингтона-Томсона:

$$R_{В-Т} = \frac{E_0^2}{(\rho b_1)}$$

где b_1 - экспериментально определенная постоянная;
 ρ - плотность резиста.

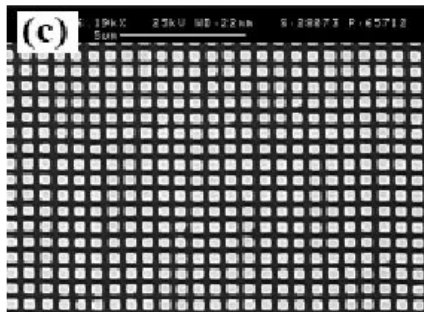
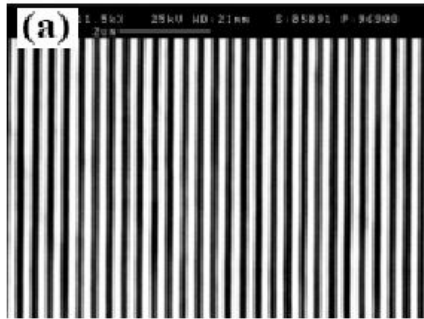
Уширение за счет вторичных электронов:

$$\Delta y_{отр} = h \cdot \sqrt{\sqrt{\frac{E_0 \cdot Q_0 \cdot \eta}{E_h \cdot Q_{пор}}} - 1},$$

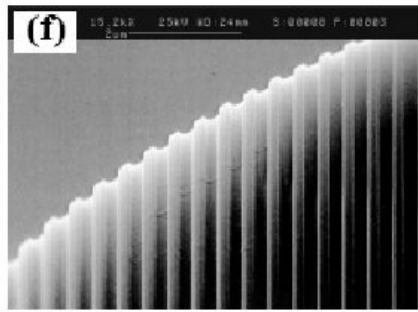
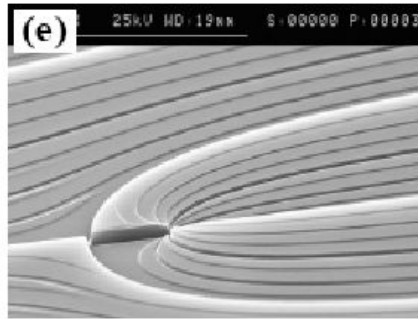
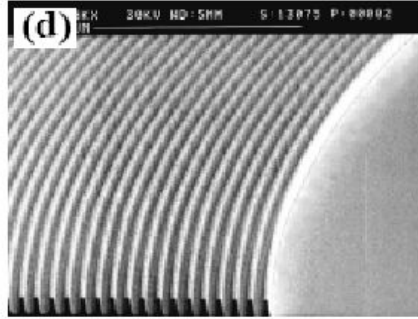
где E_h - энергия электронов, прошедших резист толщиной h ;
 η - коэффициент неупругого отражения электронов.

Примеры структур

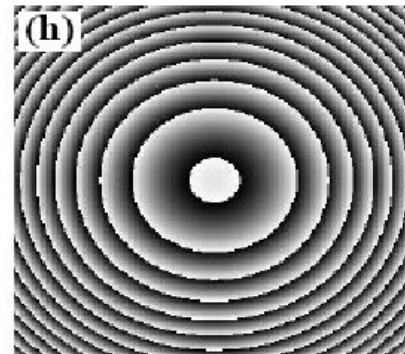
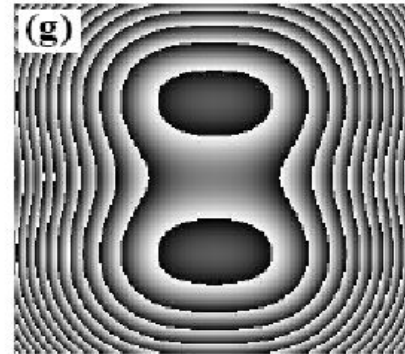
binary mask writing



binary direct writing



gray tone mask writing



variable dose writing

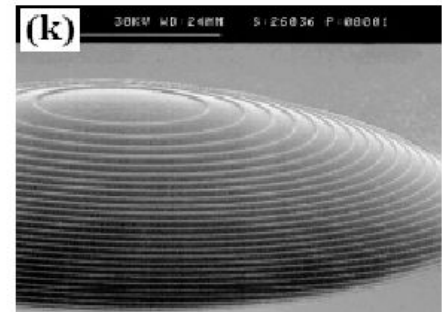
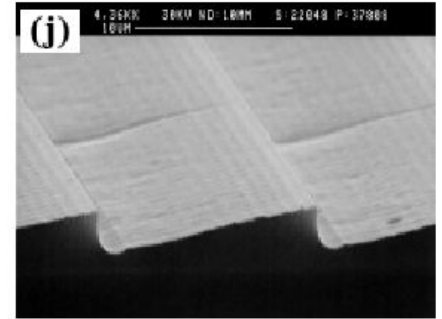
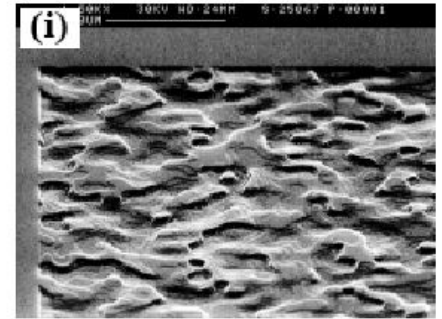
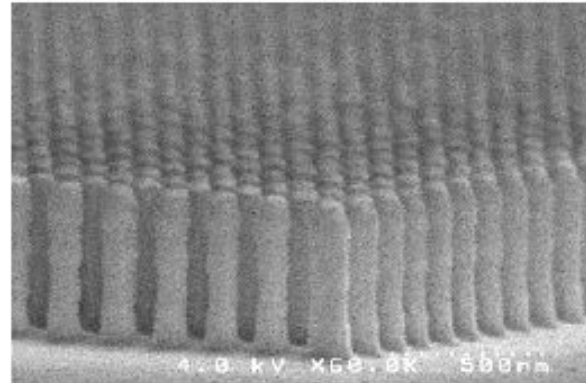
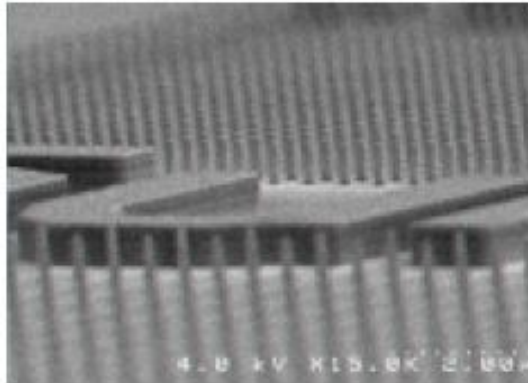
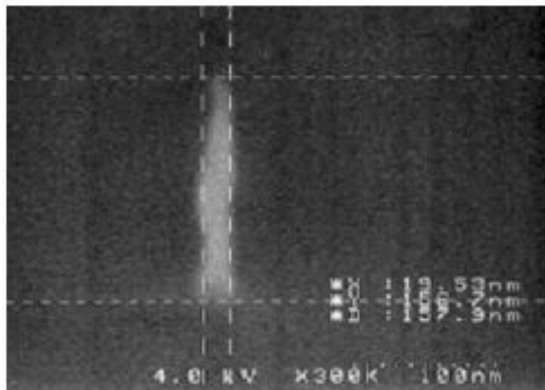


Fig. 1: Application of E-Beam writing: examples of fabricated micro- and nanostructures

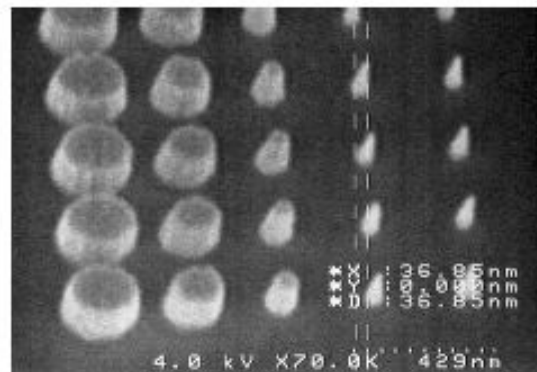
Примеры структур: наностолбики



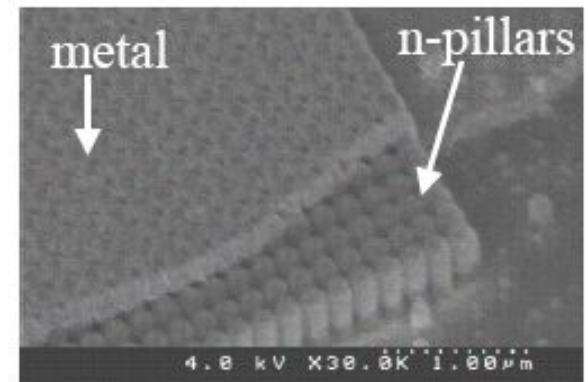
Accurate size control and placement after pattern transfer into Type-II InAs/GaSb superlattices.



GaSb nanopillar with 20 nm diameter.

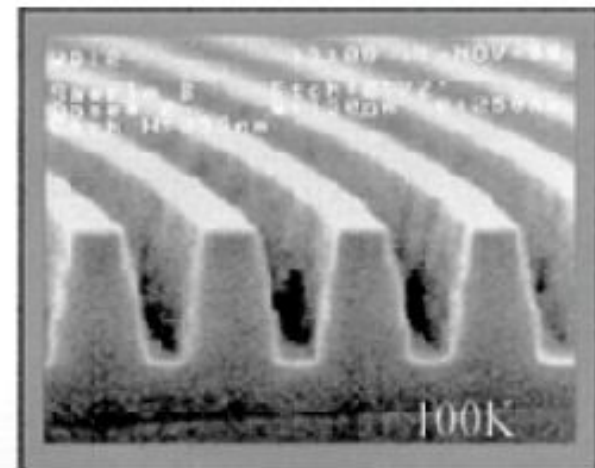
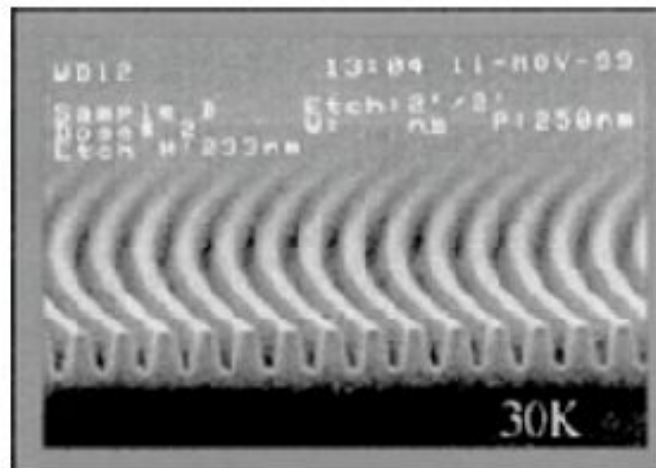
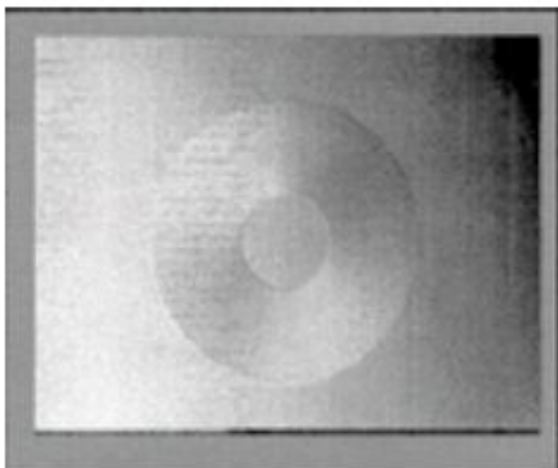


Metal etch mask after liftoff with diameters < 40 nm.



GaInAs/InP nanopillars photoconductors shown covered with a metal top contact.

Примеры структур: нанорешётки



Circular grating with 130 nm linewidth and a period of 250 nm at a beam energy of 5 keV and dry etch depth of 230 nm defined in GaAs. These grating structures find applications in VCSEL.

Установки электронной литографии

The LEO 1550VP

- Ultra-high resolution in high vacuum - 1nm at 20kV, 2.1nm at 1kV
- Superior resolution in VP mode, 2.0nm at 30kV
- Optimum secondary electron imaging in all modes
- Minimal specimen preparation for imaging and X-ray analysis



Raith150

- Beam size $\leq 2\text{nm}$ @ 20 keV
- Beam energy 100eV - 30 keV
- Minimum line width 20 nm
- Import file format GDSII, DXF, CIF, ASCII, BMP

Электронная проекционная литография

