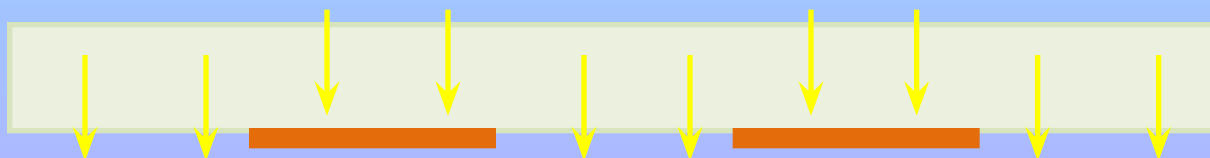
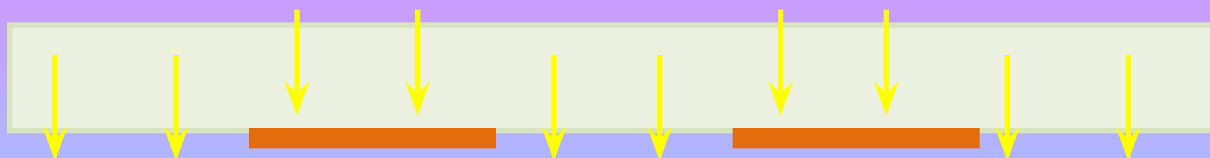


ЛИТОГРАФИЯ

- Фоторезист меняет свои химические свойства под действием излучения
- Фоторезист состоит из смолы, легко испаряющегося растворителя и фотоактивного соединения

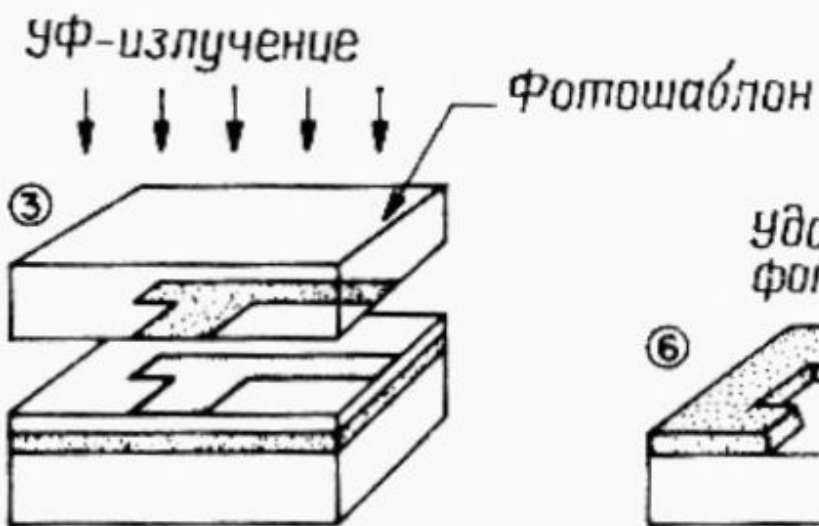
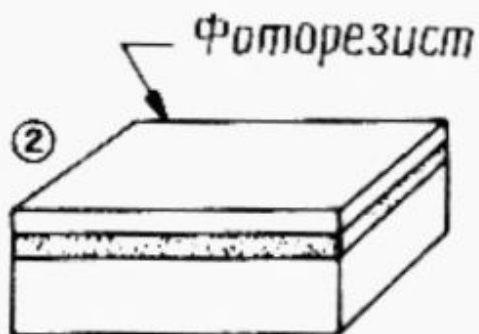
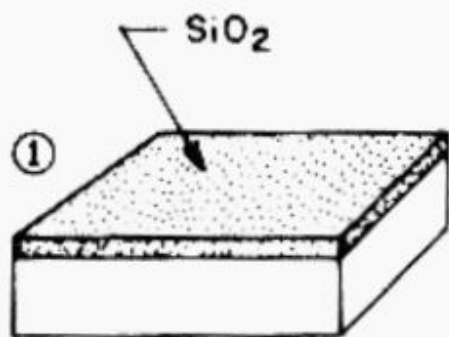


**Негативный
резист**

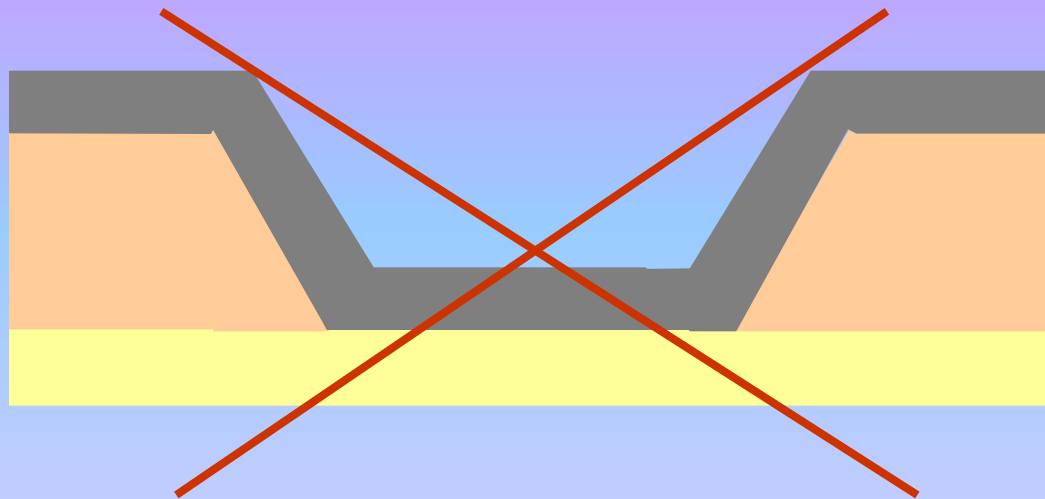


**Позитивный
резист**





Обратная (взрывная) литография



Характеристики фоторезистов

- Светочувствительность

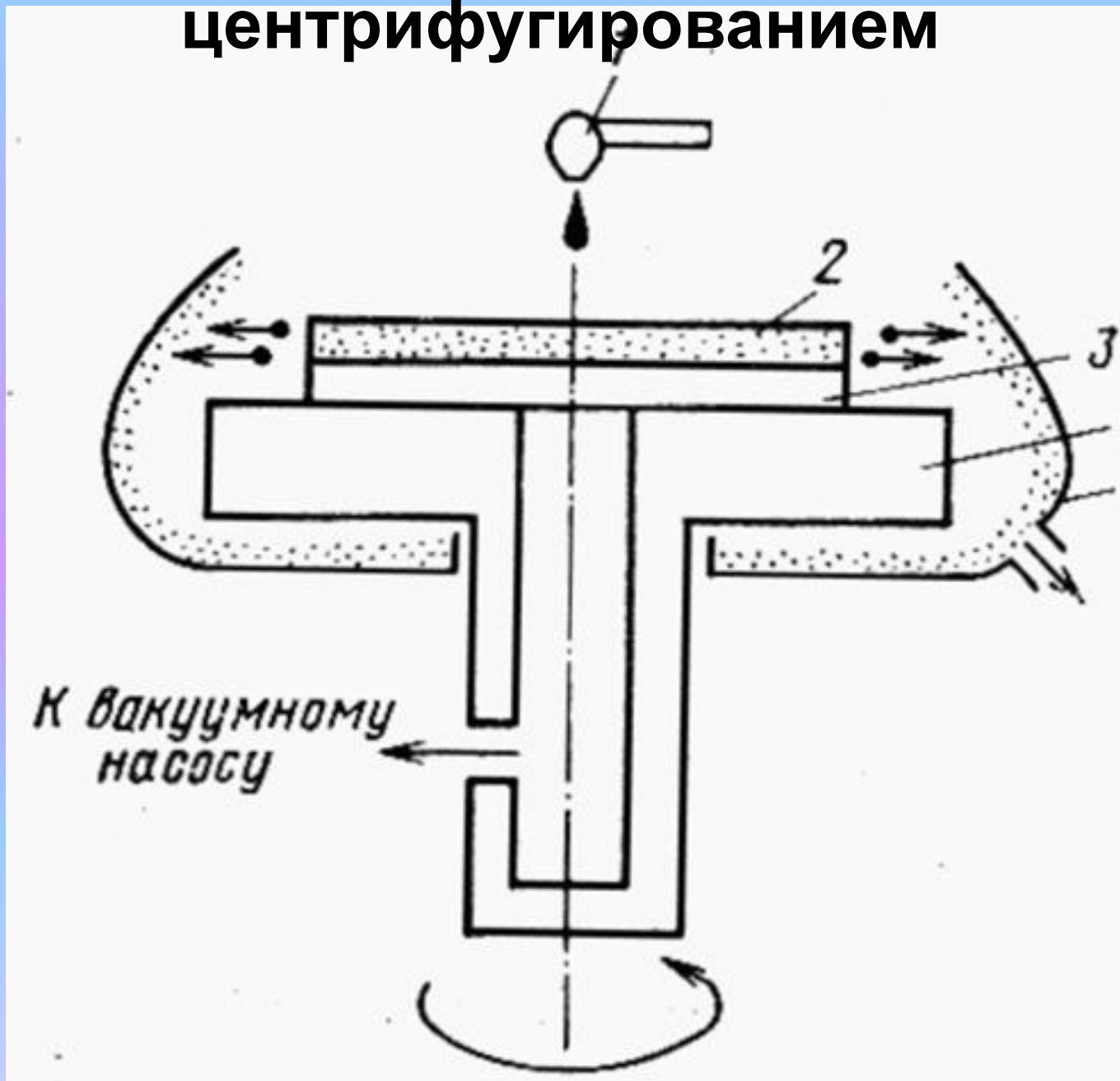
$$S = 1 / H = 1 / I t \quad (H [\text{Вт} \cdot \text{с} / \text{см}^2] \text{ – экспозиция,} \\ I [\text{Вт} / \text{см}^2] \text{ – интенсивность облучения)}$$

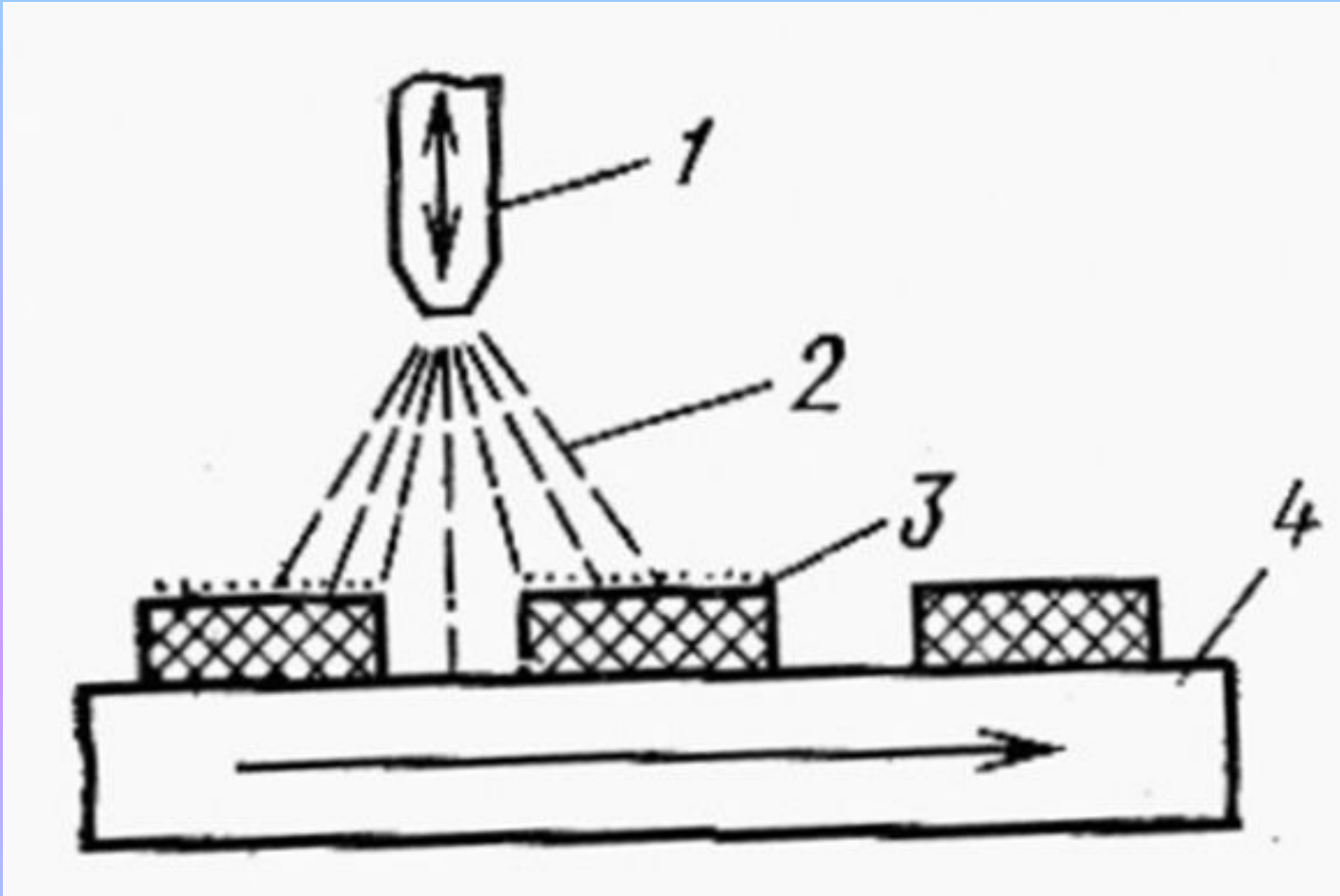
- Разрешающая способность

$$R = 1000 / 2 l \quad (l \text{ – ширина линии, мкм)}$$

- Контрастность
- Адгезия к подложке
- Устойчивость к химическим воздействиям
- Равномерность покрытия

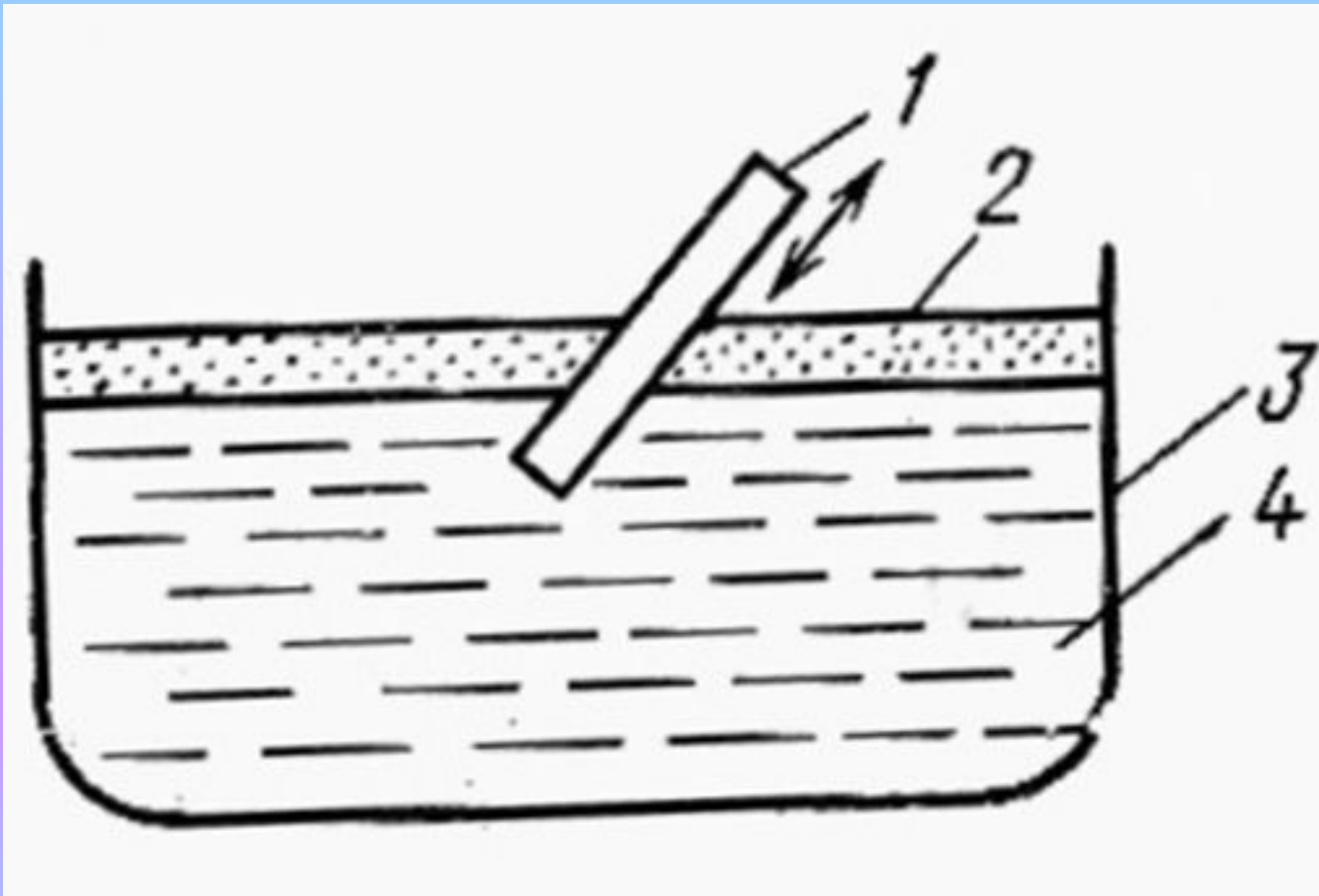
Нанесение слоя резиста центрифугированием





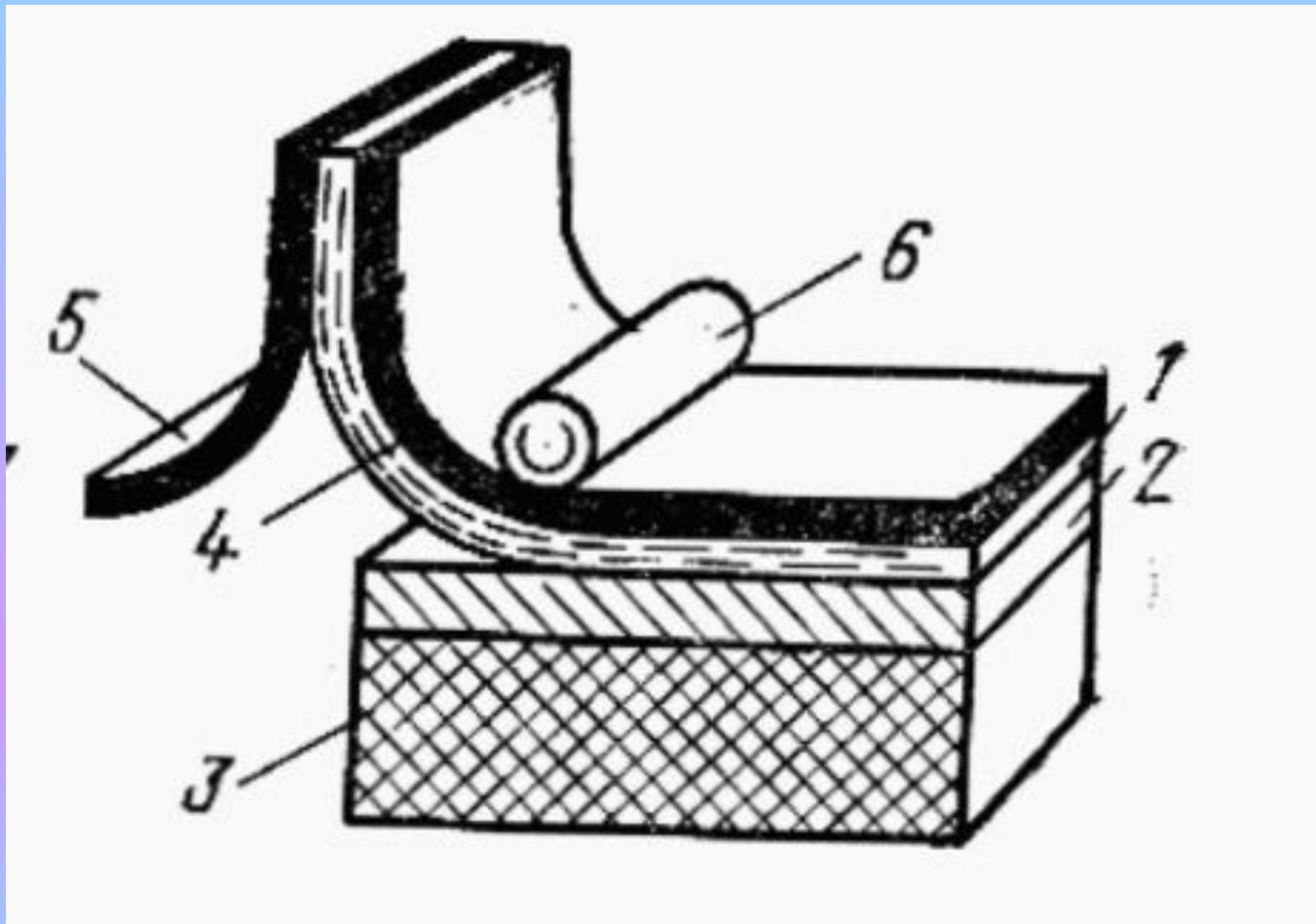
1 – сопло форсунки; 2 – диспергированный резист;
3 – подложка; 4 – стол установки

Нанесение слоя резиста распылением



1 – полложка; 2 – слой резиста; 3 -- ванна;
4 – вода или растворитель

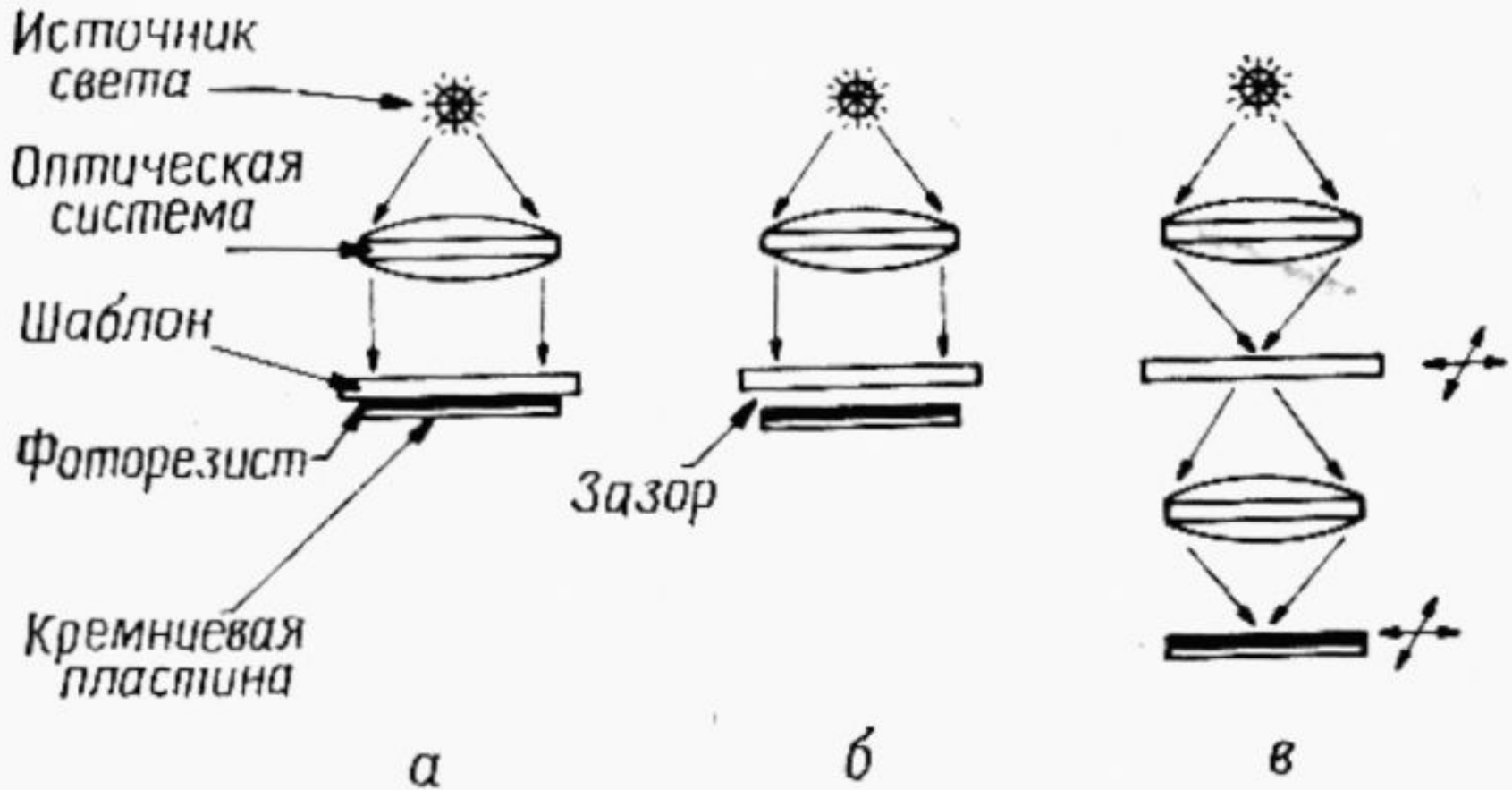
Нанесение слоя резиста окунанием



1 – пленочный резист; 2 – пленка на подложке 3;
4 – несущая полимерная пленка; 5 – защитная пленка; 6 – валик для накатки

Нанесение слоя резиста накаткой



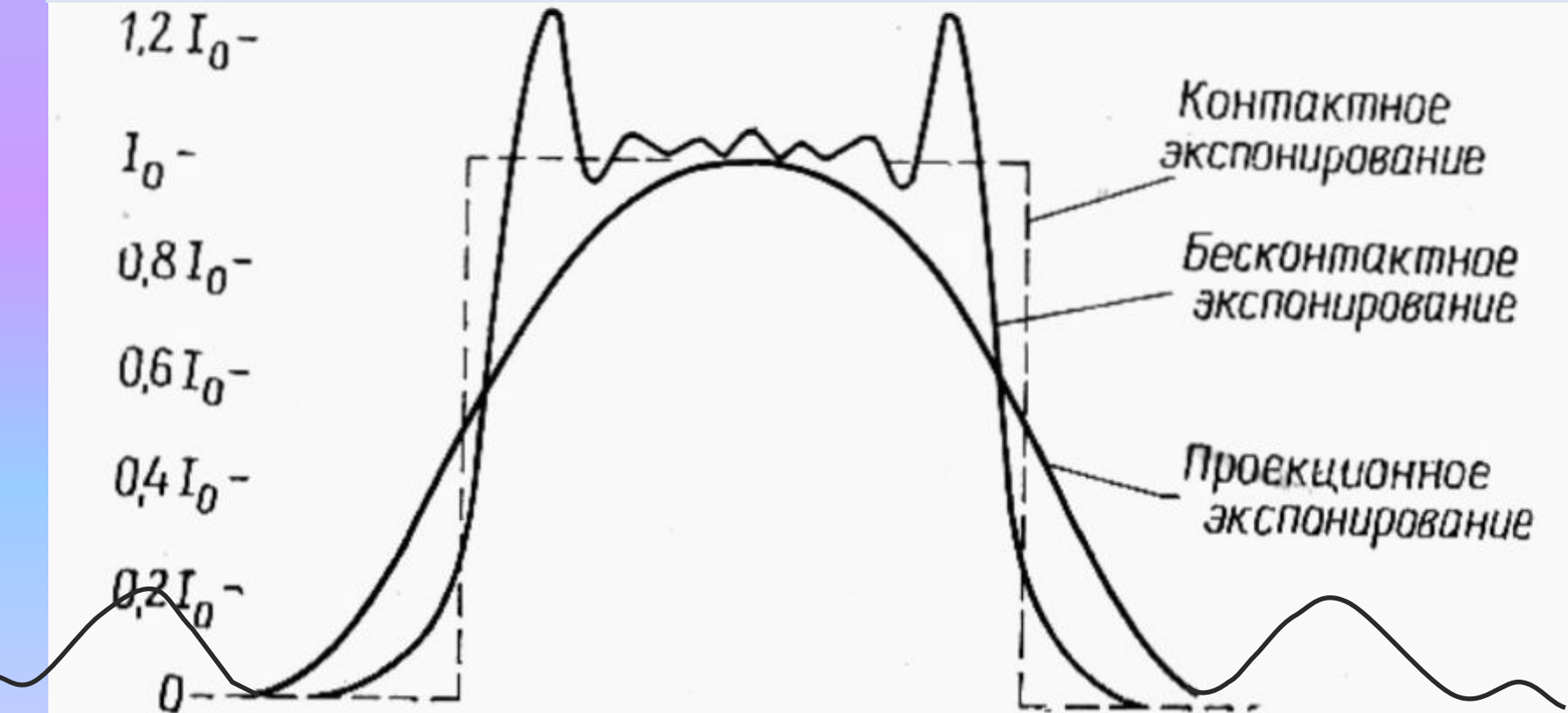


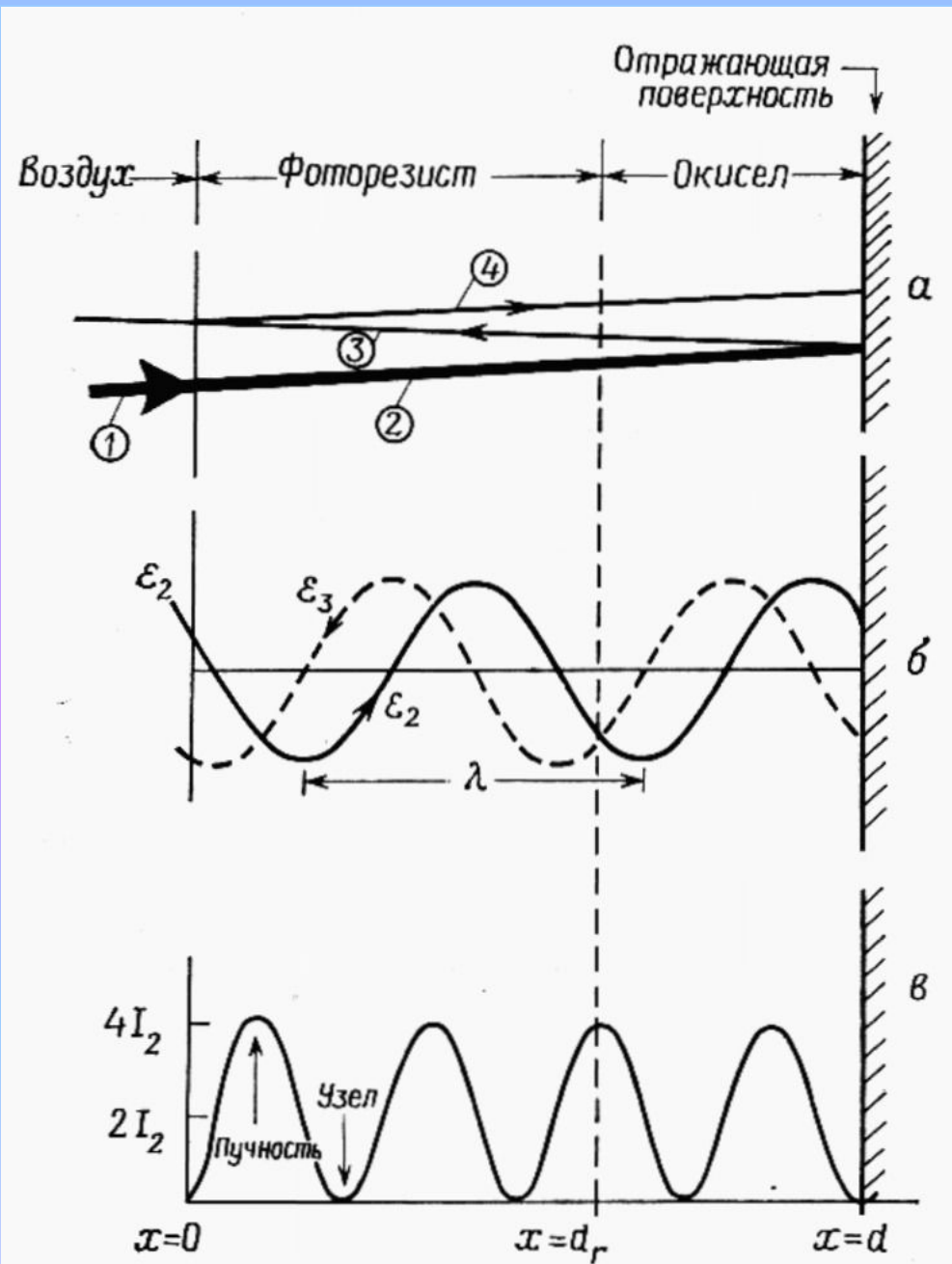
Методы оптической литографии

а – контактный, *б* – бесконтактный, *в* – проекционный

Контактное экспонирование:
разрешение пропорционально $(\lambda g)^{1/2}$

Проекционное экспонирование:
разрешение пропорционально λ .





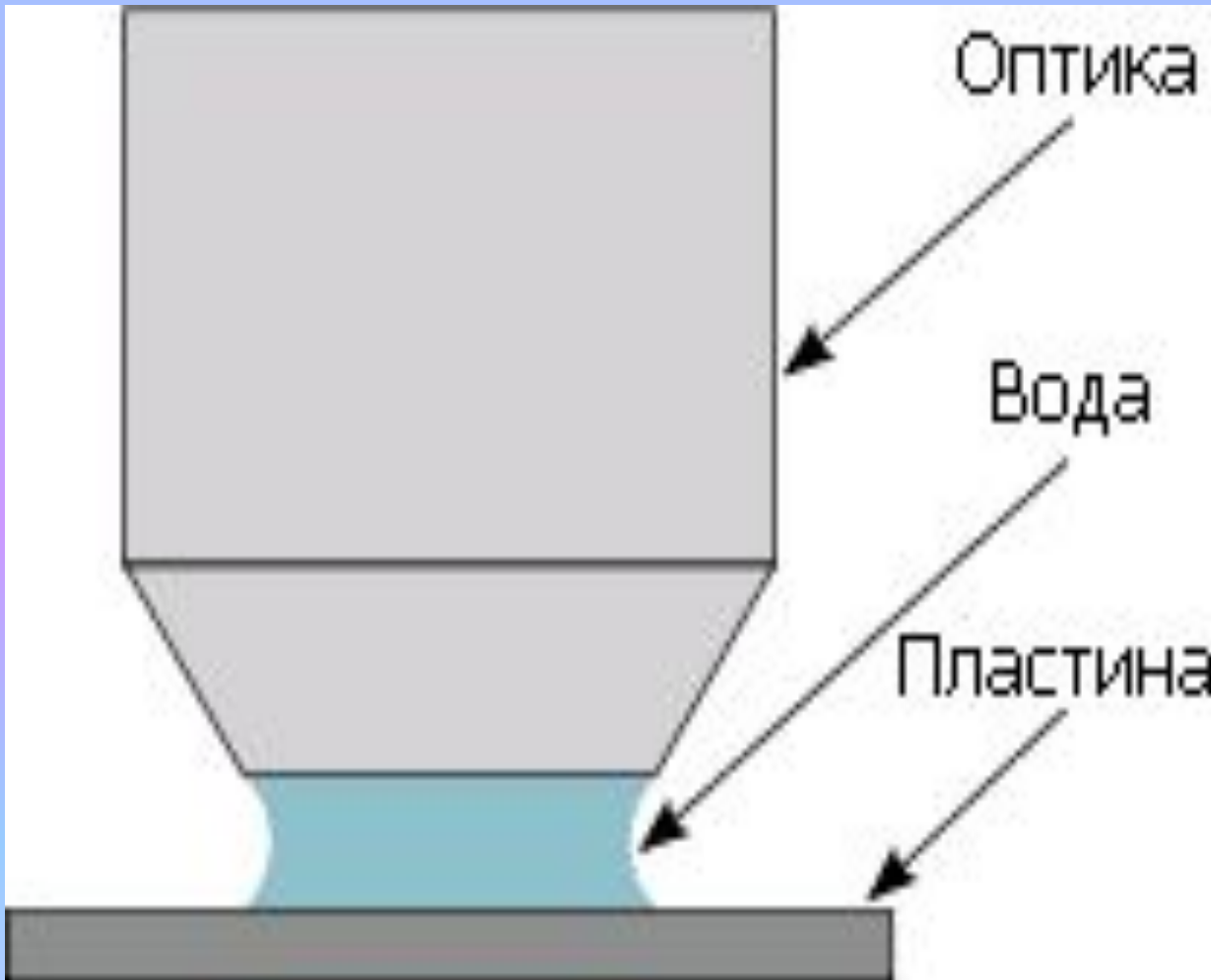
Интерференция



Ртутные газоразрядные лампы (436, 405 или 365 нм)

Эксимерный лазер 248 (KrF), 193 (ArF) и 157 нм

Иммерсионная литография



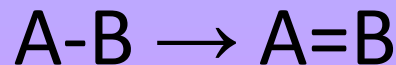
улучшает разрешение на 30–40% ввиду большего коэффициента преломления жидкости

Фотохимические реакции

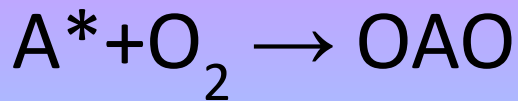
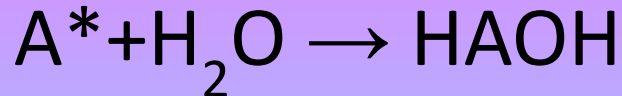
- Фотораспад (фотолиз) $A-B \rightarrow [A-B]^* \rightarrow A\cdot + B\cdot$



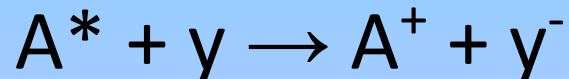
- Фотоперегруппировка



- Фотоприсоединение $A^* + A \rightarrow A_2$



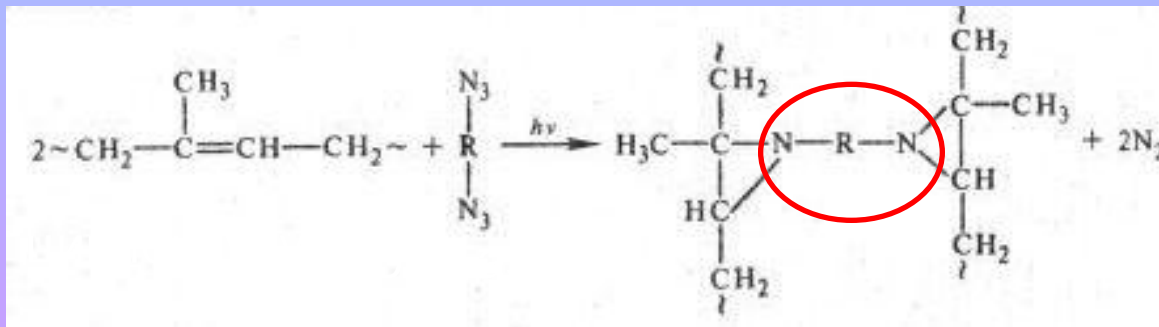
- Фотоперенос электрона $A^* + X \rightarrow A^- + X^+$



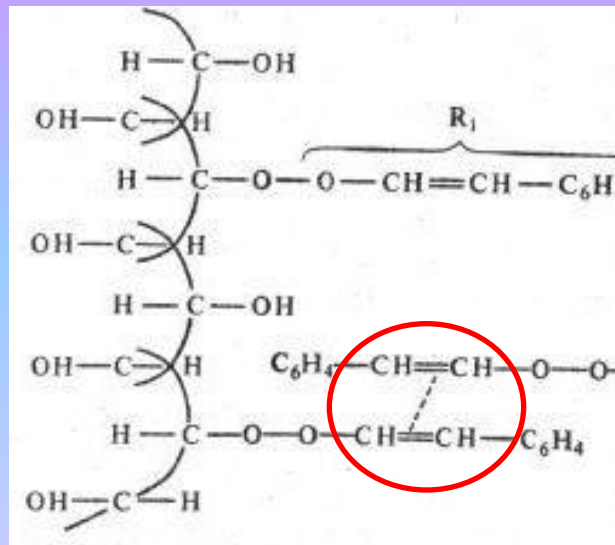
- Фотосенсибилизация $A^* + M \rightarrow A + M^*$

Негативные резисты

- на основе каучуков



- на основе поливинилциннамата (ПВЦ)



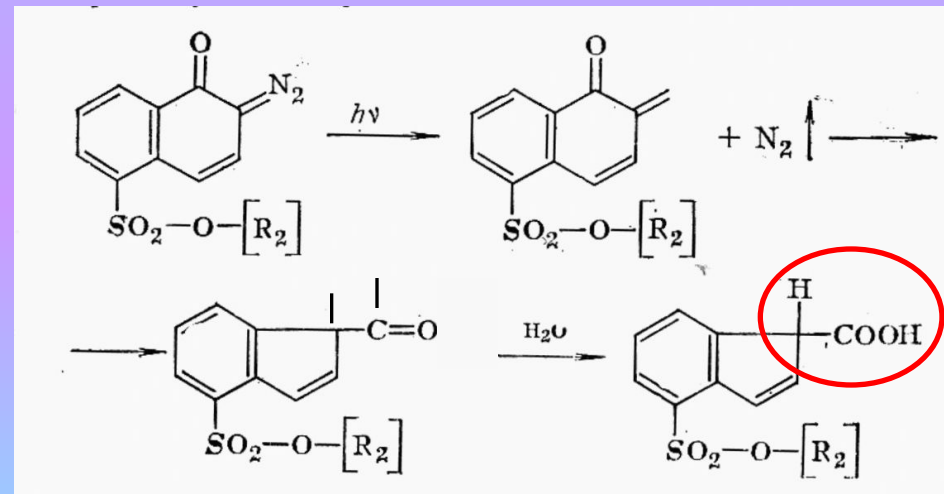
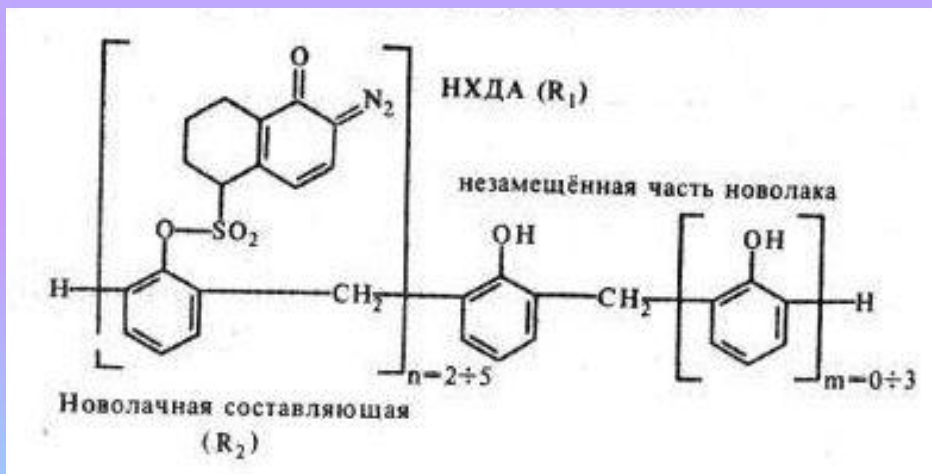
разрыв
двойной связи
C=C

(200-250 нм)

Позитивные резисты

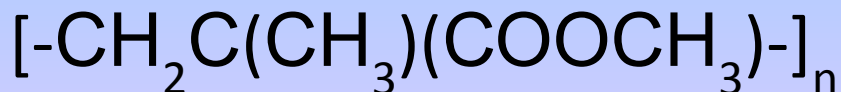
- Сенситизаторами являются производные диазокетонов или хинондиазидов

R1-O-R2, где R1 и R2 – светочувствительная и полимерная части, O – соединяющий их атом кислорода

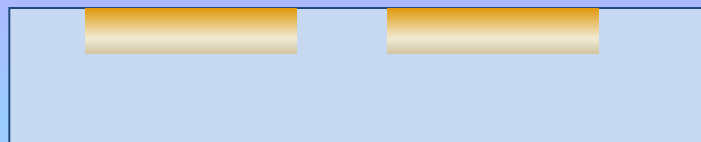
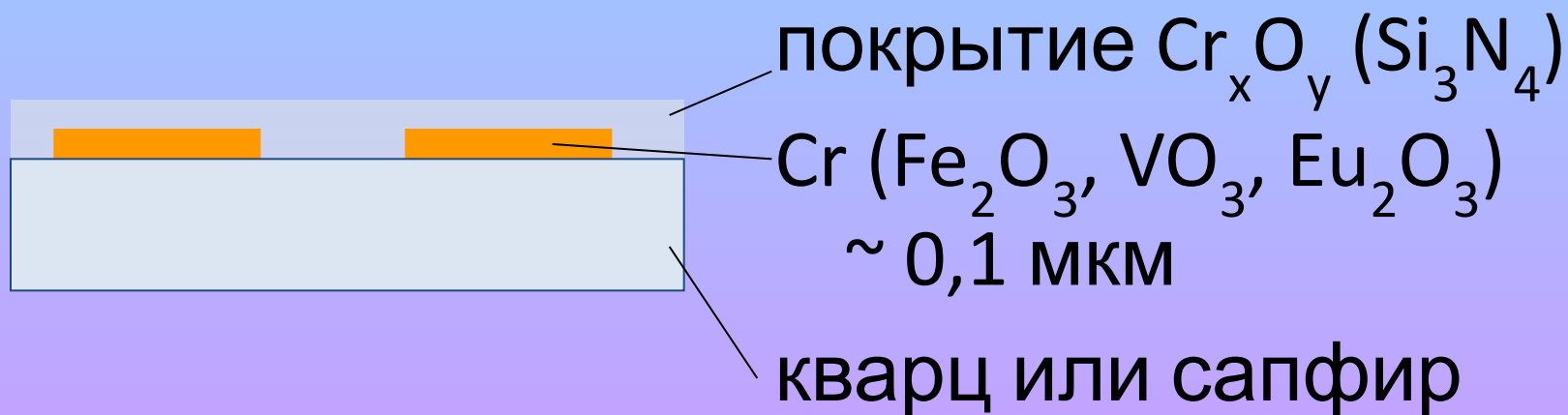


Нафтохинондиазид (HХДА) разрыв связи C=N₂ с отщеплением N₂

- Полиметилметакрилат (ПММА)

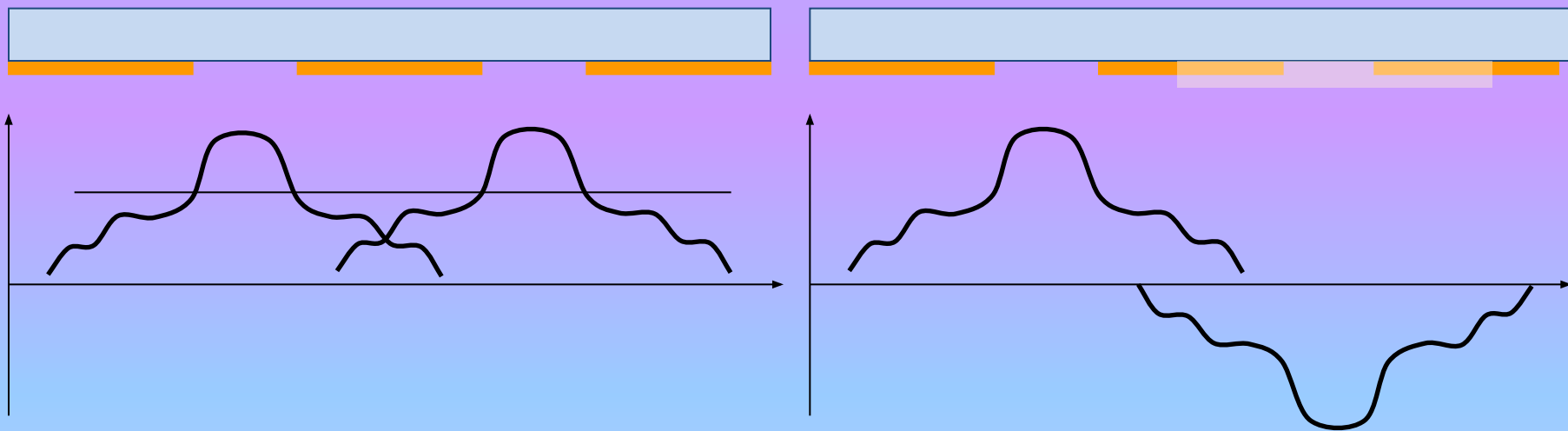


Фотошаблоны



Диффузионный ФШ

Фазоповорачивающее покрытие



Как сделать первый фотошаблон?

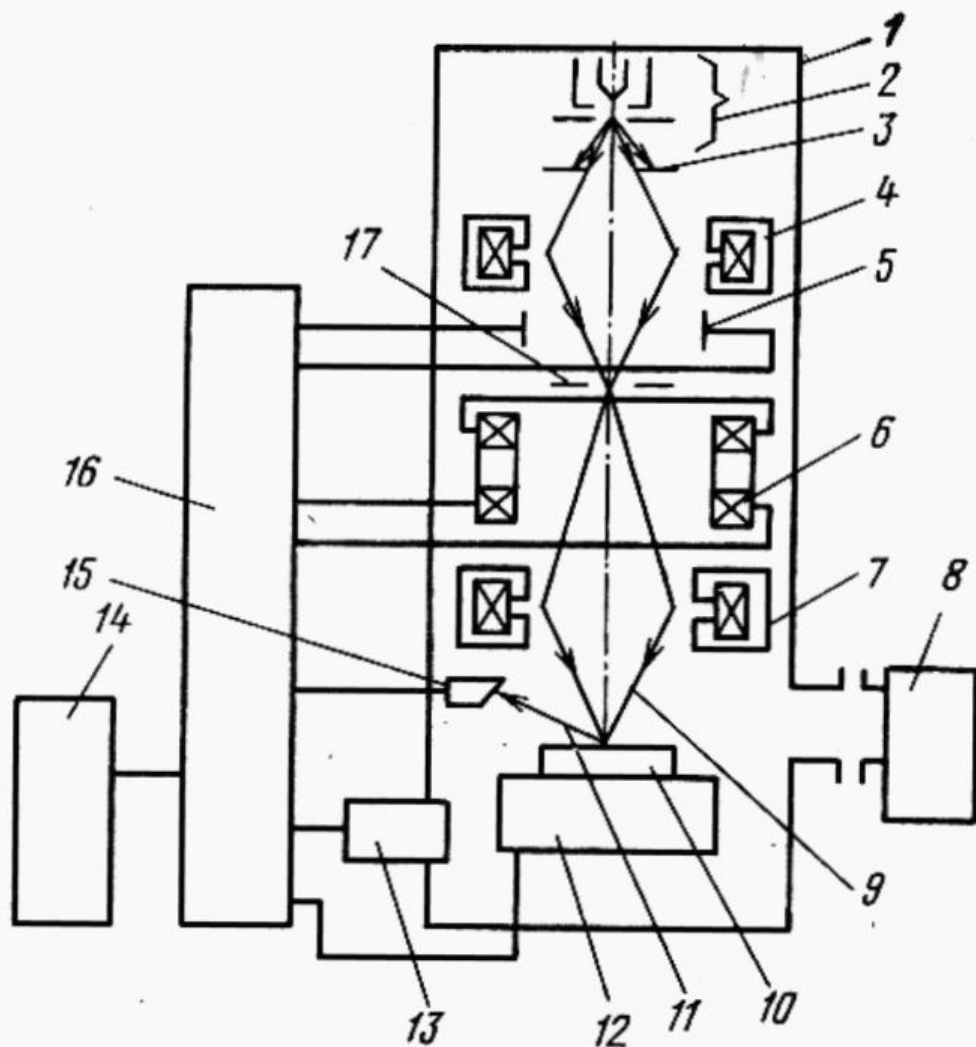


Достоинства электронно-лучевой литографии:

- Отсутствие дифракции (высокая разрешающая способность). При ускоряющих напряжениях от 10^2 до 10^4 В длина волны электрона меняется от 0,1 до 0,01 нм.
$$\lambda = h / \sqrt{2 \cdot m \cdot q \cdot U} \cong 1,24 / \sqrt{U}$$
- Высокая глубина резкости (снижает требования к плоскостности подложек).

Недостатки электронно-лучевой литографии:

- малая производительность по сравнению с оптической;
- сложность и высокая стоимость оборудования



- 1 – вакуумная камера;
- 2 – электронная пушка;
- 3 – квадратная диафрагма;
- 4 – линза;
- 5 – отклоняющие пластины гашения луча;
- 6 – отклоняющие обмотки;
- 7 – проекционная линза;
- 8 – вакуумная система;
- 9 – электронный луч;
- 10 – подложка;
- 11 – вторичные электроны;
- 12 – система перемещений подложки;
- 13 – прецизионный датчик перемещений;
- 14 – устройстве ввода информации;
- 15 – датчик вторичных электронов;
- 16 – система управления; 17 – диафрагма

Схема вакуумной установки для сканирующей ЭЛГ

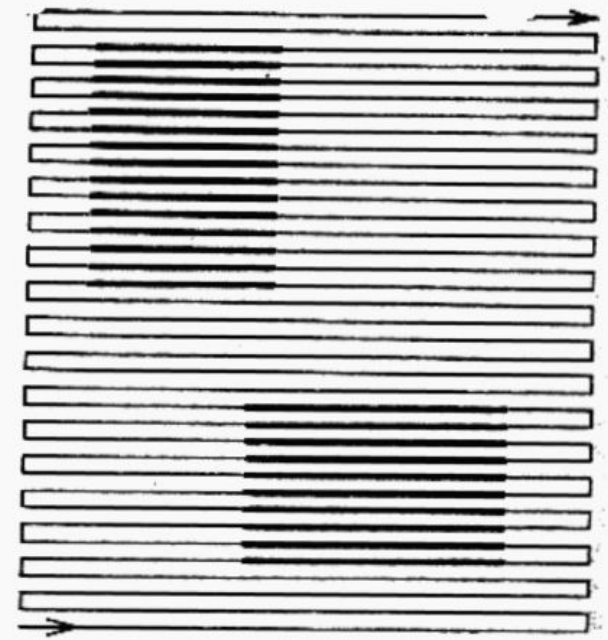
Схема растрового (а) и векторного (б) сканирования луча

Фокусировка электронного луча

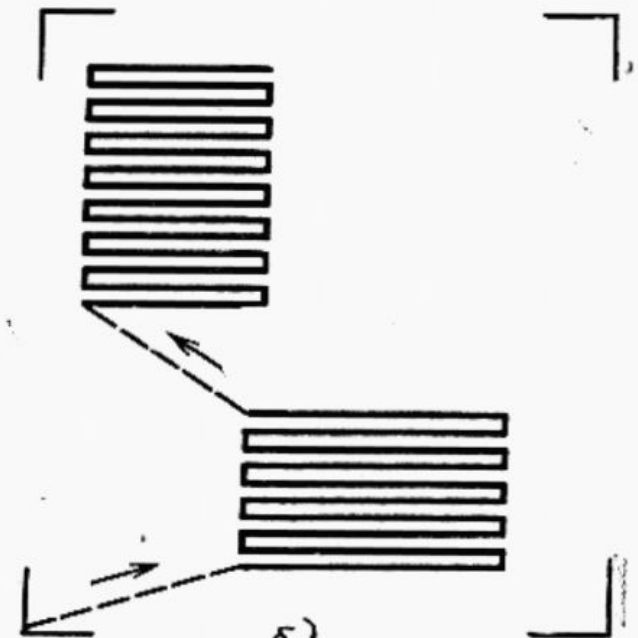
Ограничения:

- ток $\varphi \sim j^{3/2}$;
- время пролета $\varphi \sim 1/\sqrt{E}$;
- дисперсия начальных скоростей.

$j \approx 10^{-6} - 10^{-7} \text{ А/см}^2$, $E \approx 10$
кэВ, $\Delta E \approx 1 \text{ эВ}$ $\varphi \approx 0,01$
МКМ

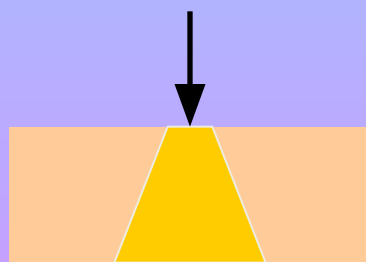
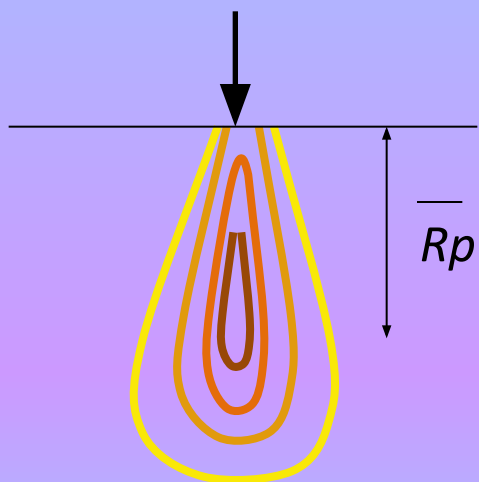


а)

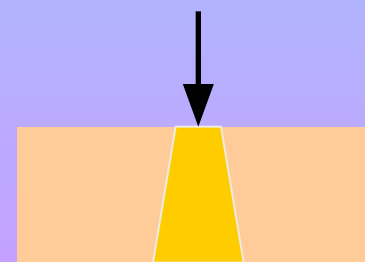


б)

Рассеяние электронов

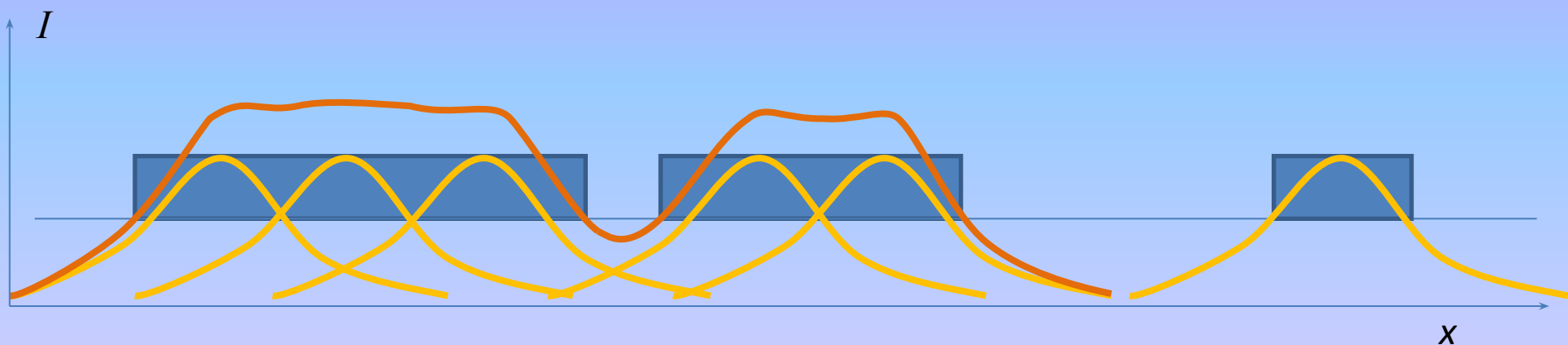


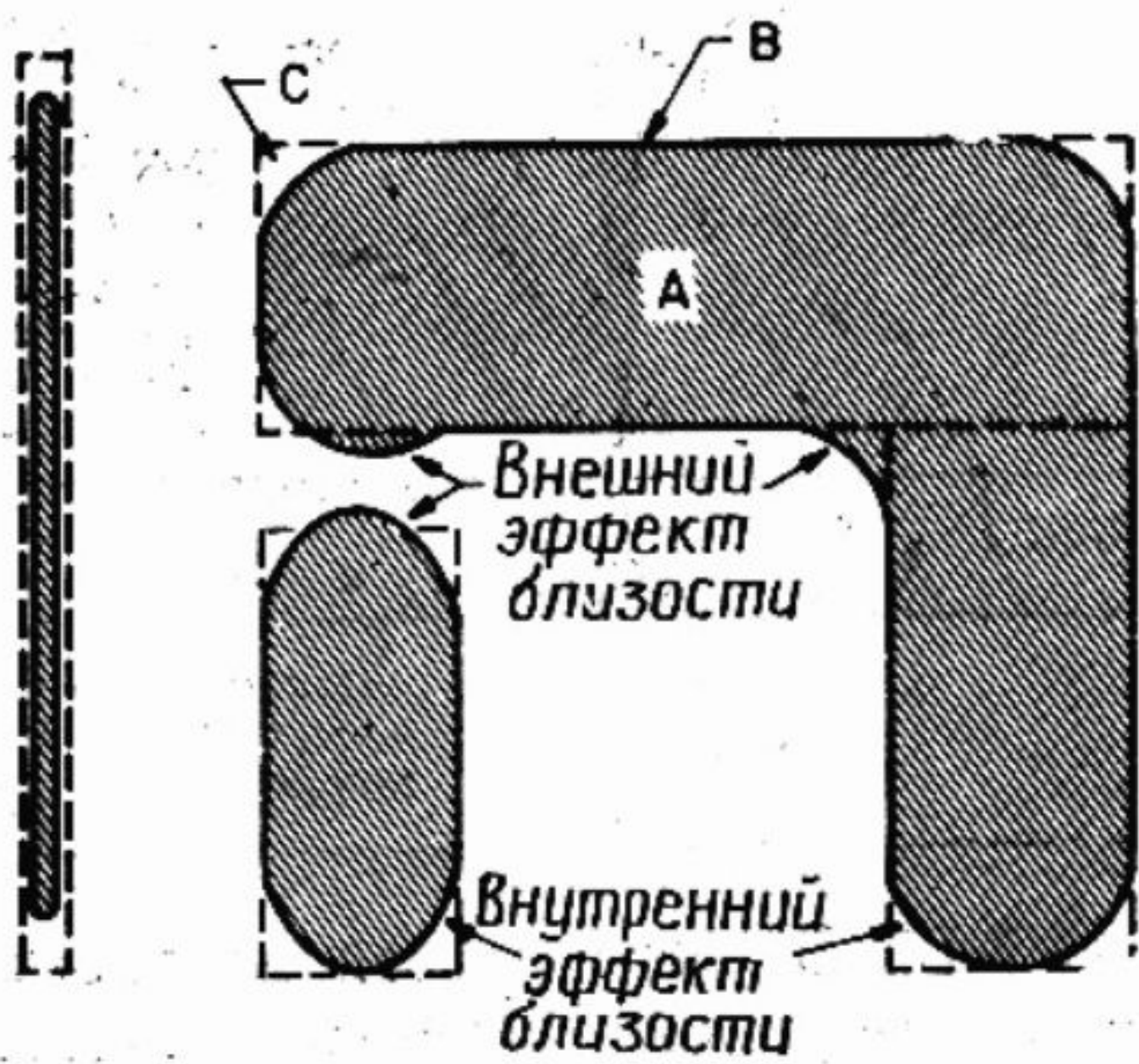
энергия мала



энергия велика

$10^{-4} - 10^{-6}$ Кул/см²





Достоинства рентгеновской литографии

- Применение излучения с малой длиной волны уменьшает дифракцию и позволяет получать малый размер элементов;
- частицы пыли из веществ с малым атомным весом пропускают рентгеновские лучи и, следовательно, не передаются на резист;
- слой экспонируется равномерно по глубине, что способствует получению рисунка с вертикальными стенками;
- РИ не чувствительно к электрическому заряду на шаблоне и подложке.

Недостатки РЛГ

- **сложное оборудование** (рентгеновский источник, защита оператора от излучения),
- **отсутствие оптики**, фокусирующей рентгеновские лучи,
- **сложность изготовления** рентгеношаблонов;
- **малая интенсивность** стандартных источников РИ;
- **малая чувствительность** резистов;
- **для получения субмикронных размеров элементов** необходимо пошаговое экспонирование, так как процесс становится чувствительным к стабильности плоскостности поверхностей подложек и геометрических размеров шаблонов

Источники рентгеновского излучения

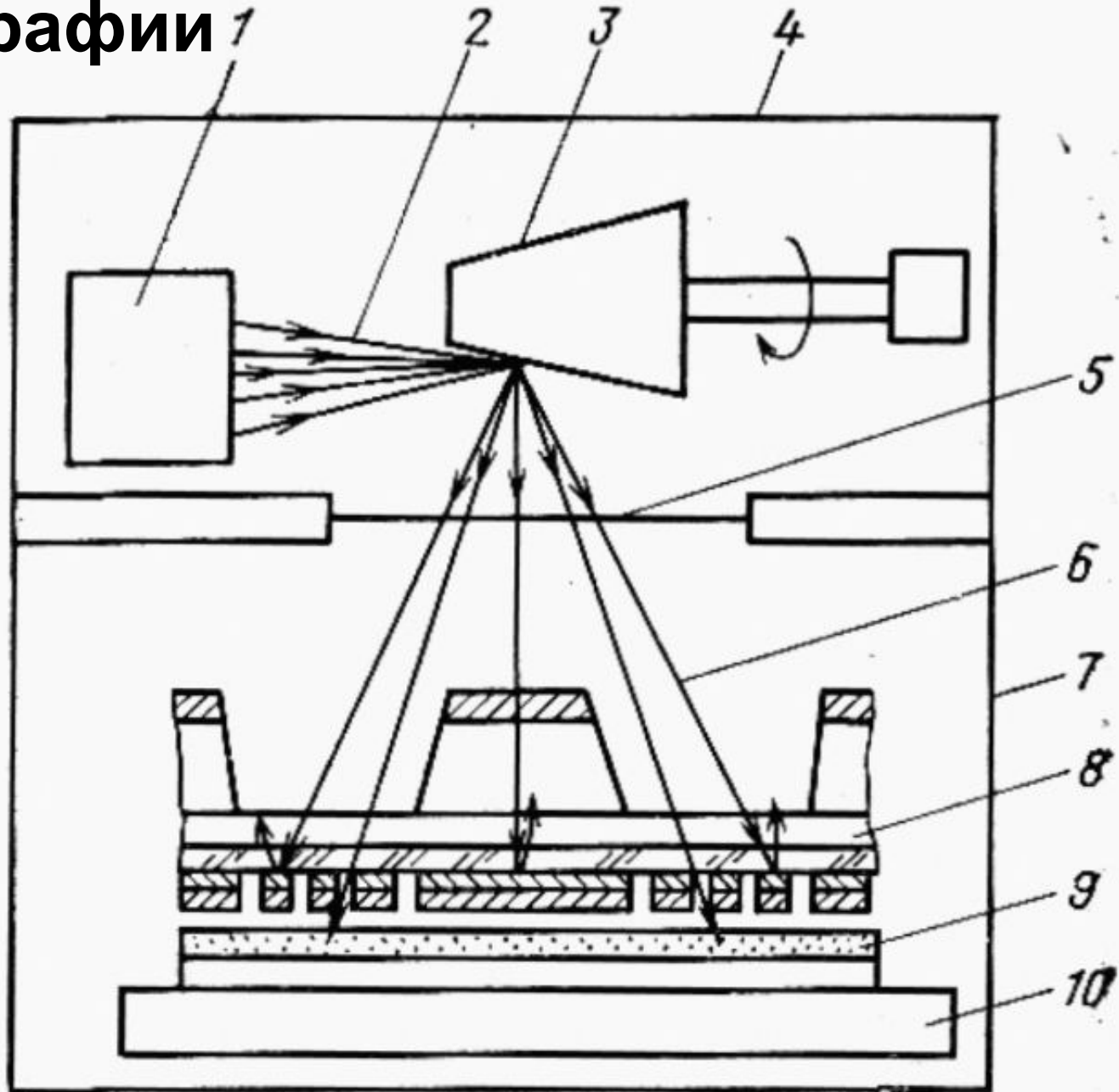
Стандартный источник РИ –
металлическая мишень, бомбардируемая
ускоренными до 10... 20 кэВ электронами.
Длина волны РИ 0,4...5 нм

Шаблоны для РЛГ

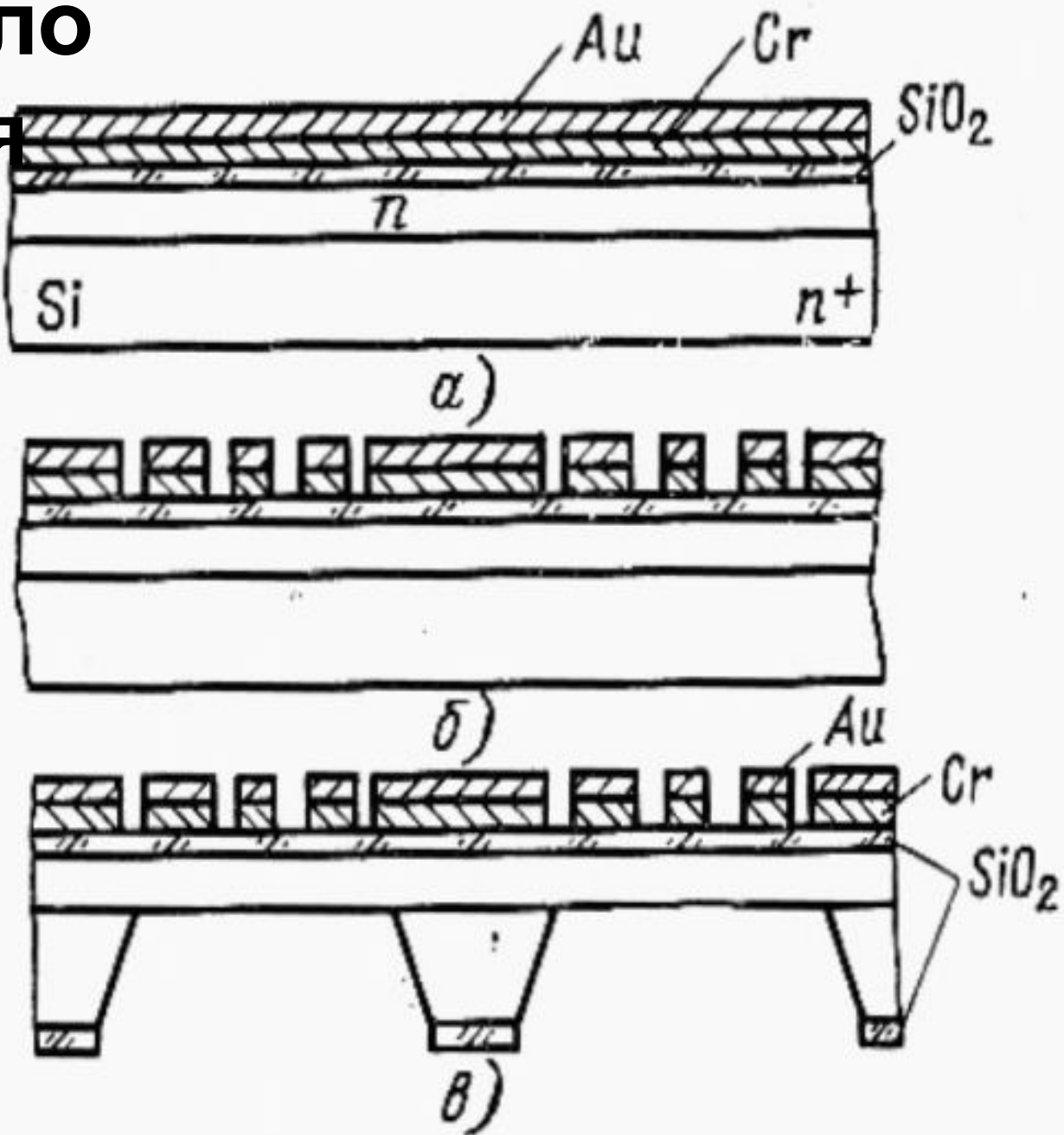
при $\lambda < 0,4$ нм поглощение РИ мало, нет
оптимального материала для маскирующего
слоя (применяют Au)

при $\lambda > 5,5$ нм все материалы сильно поглощают
РИ, нет подходящего материала для основы
шаблона (толщина основы шаблонов 1...10 мкм)

Схема установки для рентгеновской литографии



Шаблон для РЛГ



Ионно-лучевая литография

- *Преимуществами* этого метода являются **меньшее рассеивание ионов** вследствие их массы и следовательно **большее разрешение** по сравнению с ЭЛГ.
- Как и рентгеновское излучение, ионы с большой энергией не подвержены дифракции.
- Для ионно-лучевого экспонирования требуются дозы облучения во много раз меньшие, чем в ЭЛГ.
- В ионном луче значительно слабее взаимное отталкивание, чем в электронном луче.

Фокусированные ионные пучки можно использовать для экспонирования резистов, исправления дефектов фотошаблонов, а также в безрезистной литографии и для непосредственного травления оксида кремния

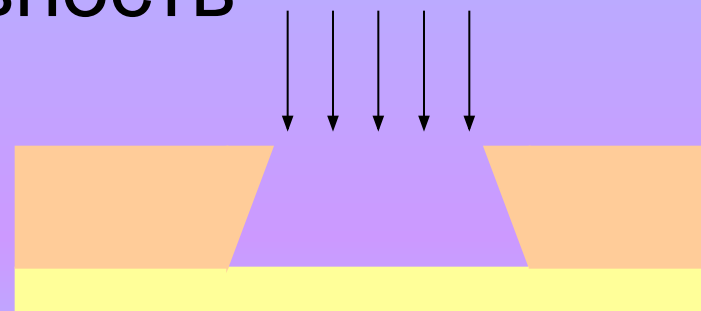
Форма края фоторезиста

Проблема при плазменном
проявлении – низкая

селективность



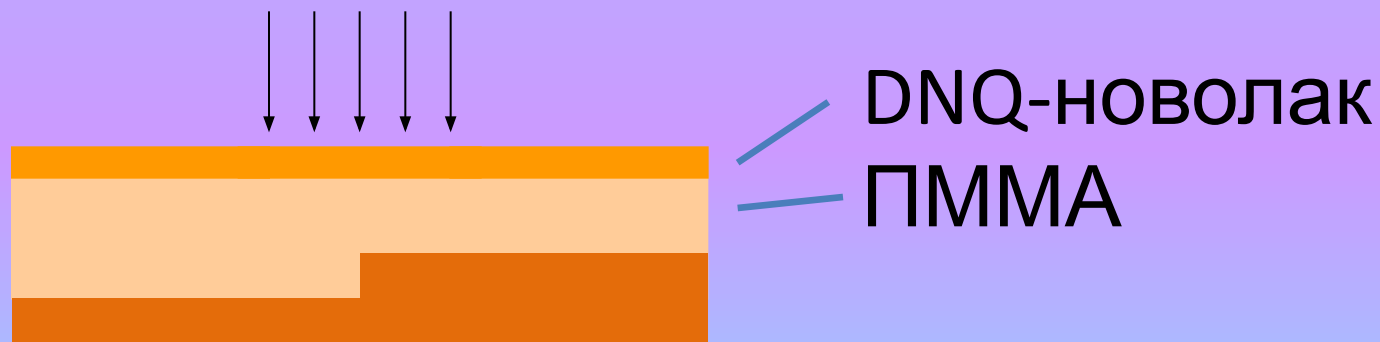
Фотолитография,
жидкостное проявление



Электронная литография,
плазменное проявление

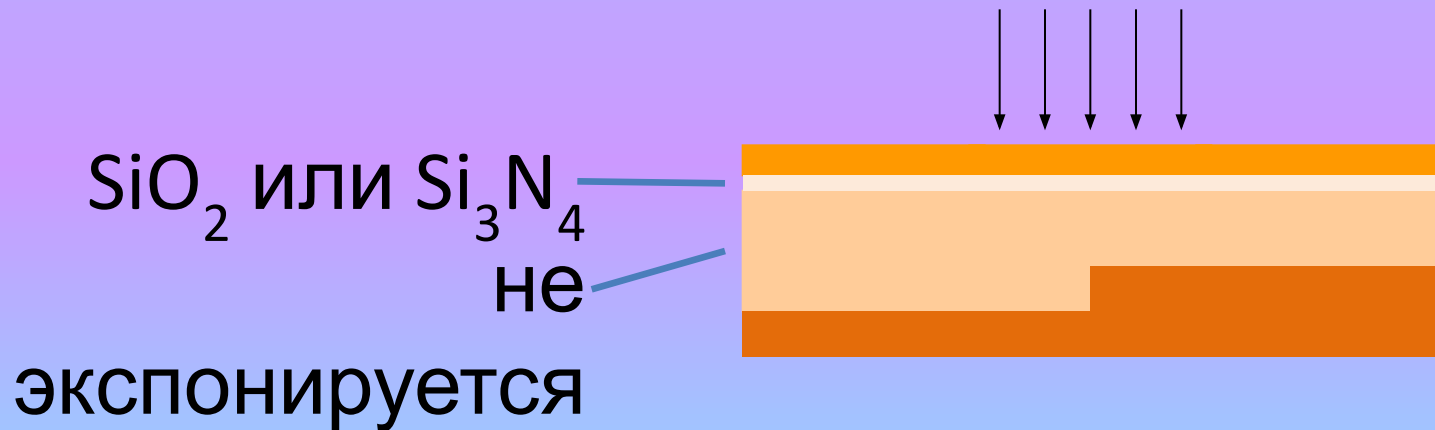
(кислородная плазма)

Многослойные резисты



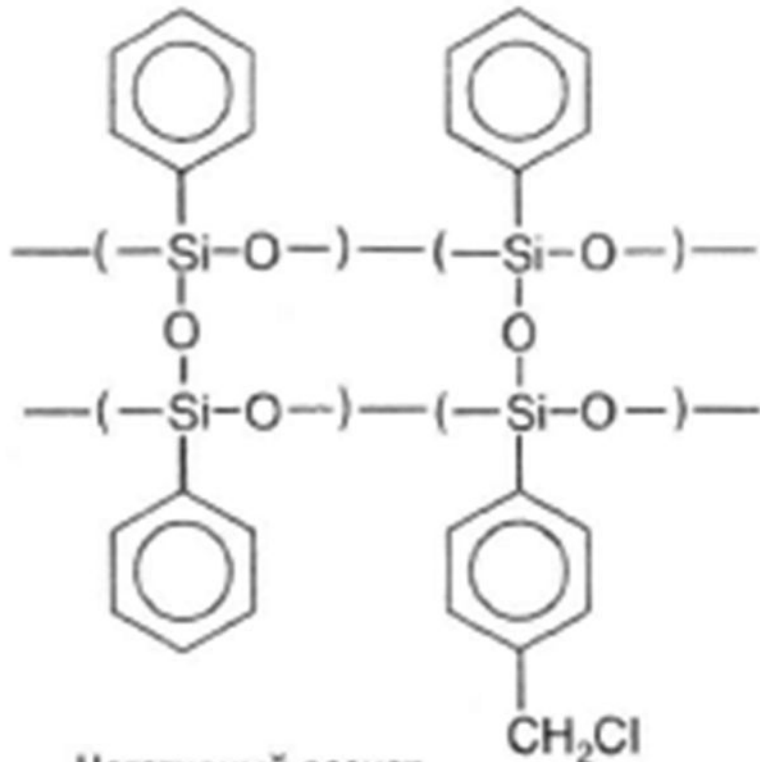
Верхний слой является маской (ФС) при экспонировании нижнего

Многослойные резисты

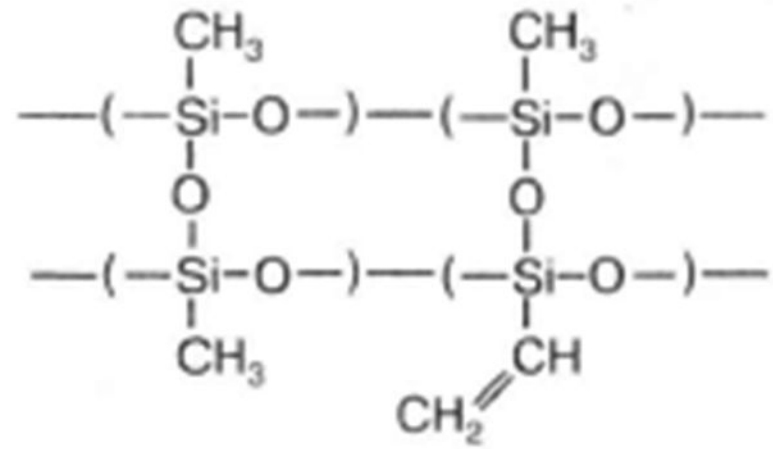


Неорганический слой является маской при травлении нижнего слоя

Негативные двухслойные резисты с кремнием



Негативный резист
с кремнием (SNR)



Винил-силсесквиоксан

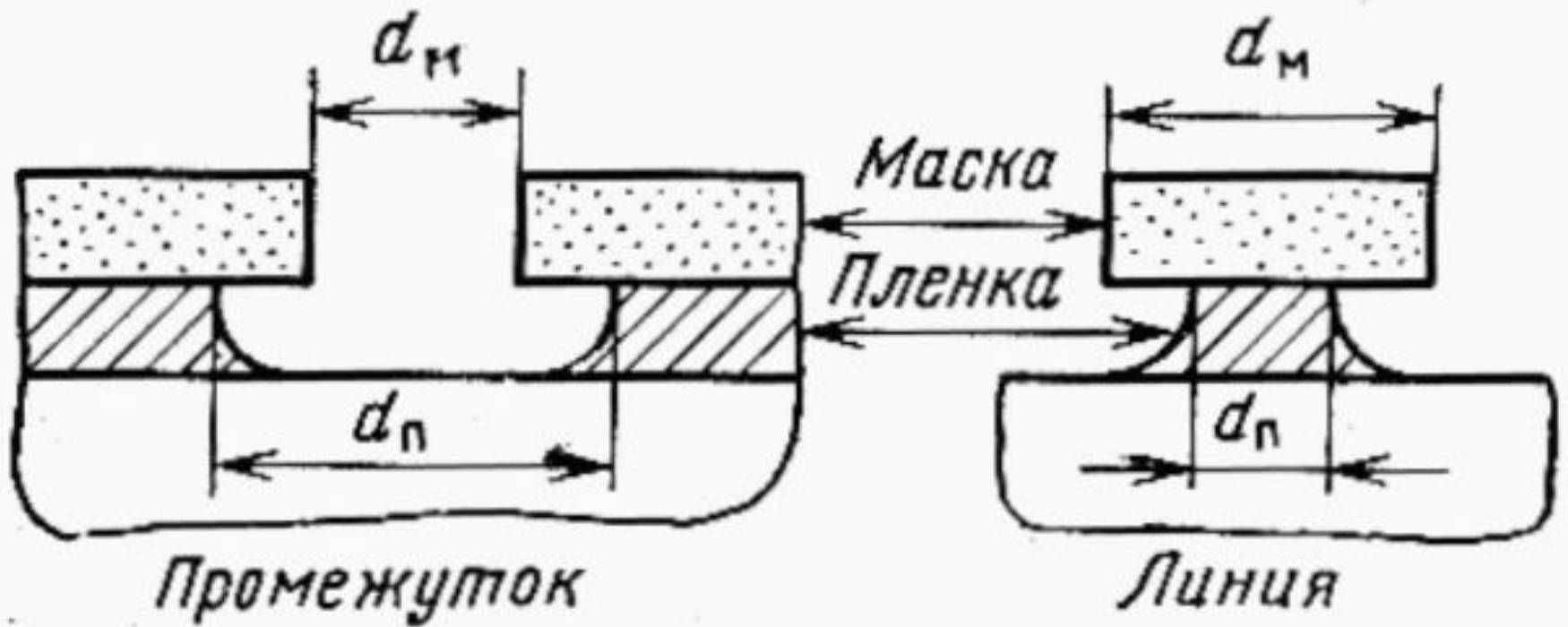
Верхний слой содержит Si, который в кислородной плазме превращается в SiO_2

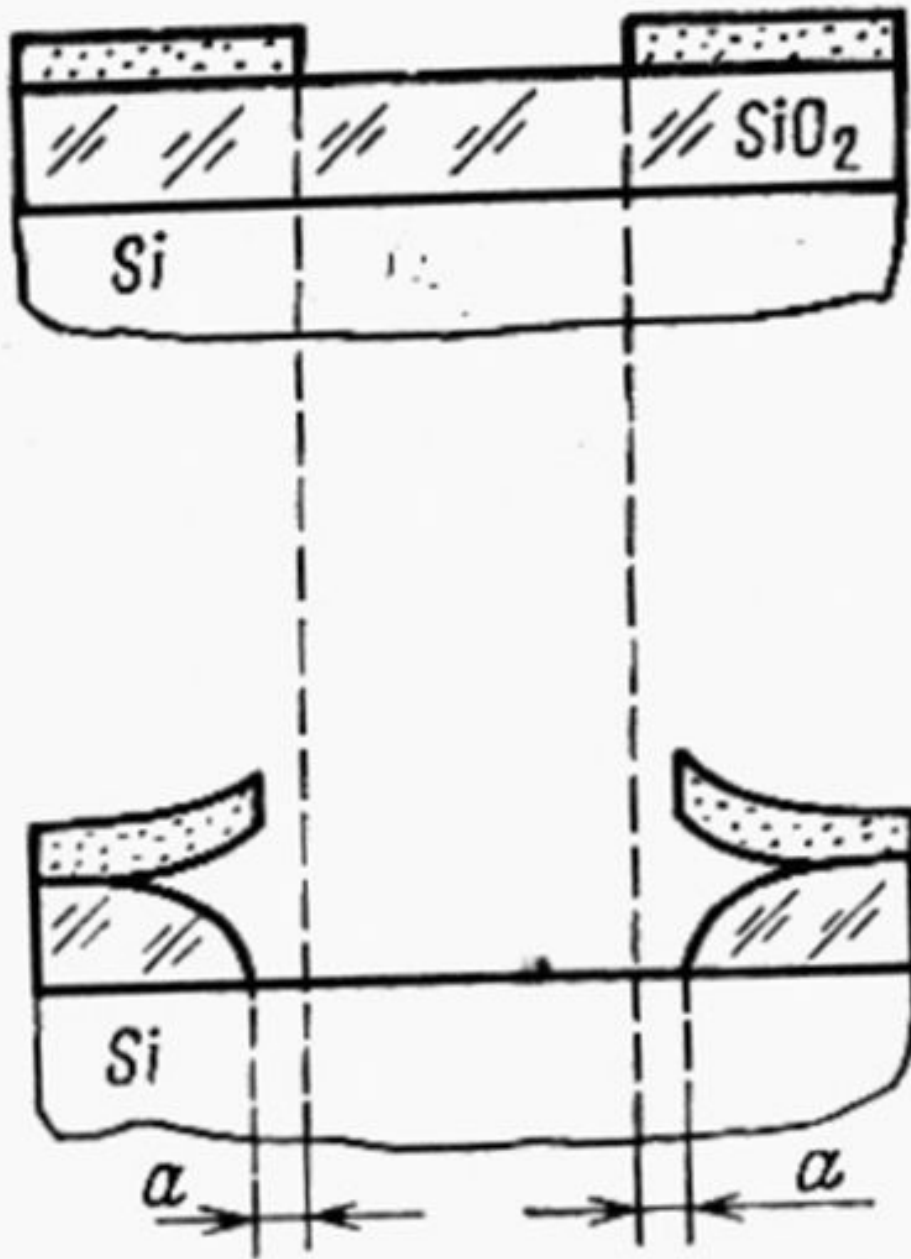
Силилирование

селективное внедрение кремния в участки скрытого изображения в резисте непосредственно в процессе или после завершения процесса экспонирования

Толщина силилированного слоя 150-250 нм (5-10 нм в неэкспонированных областях)

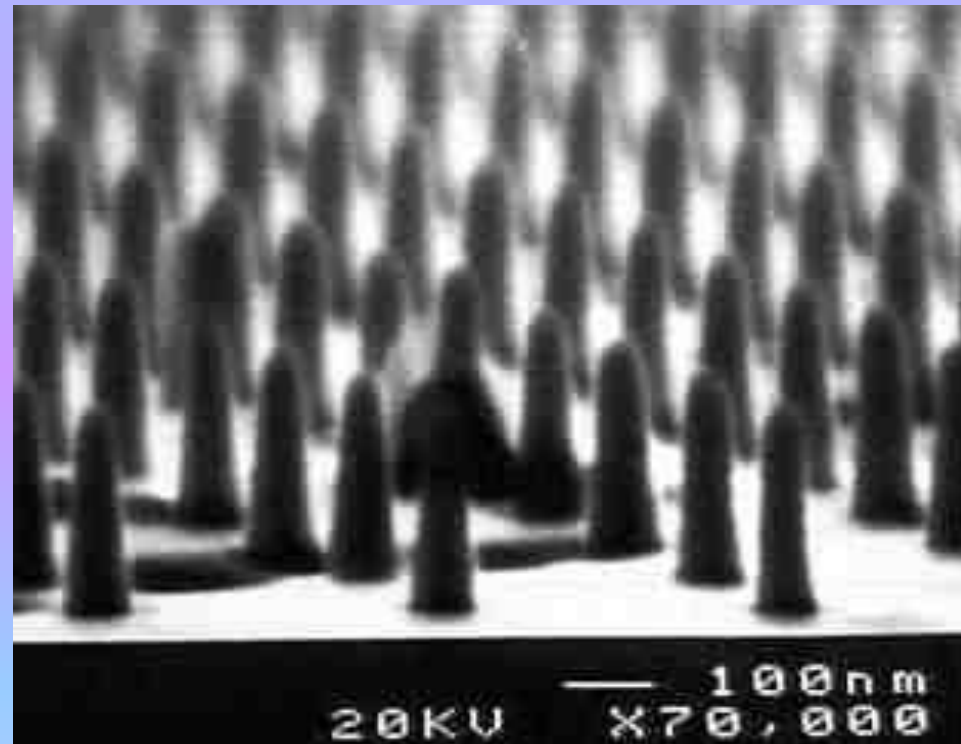
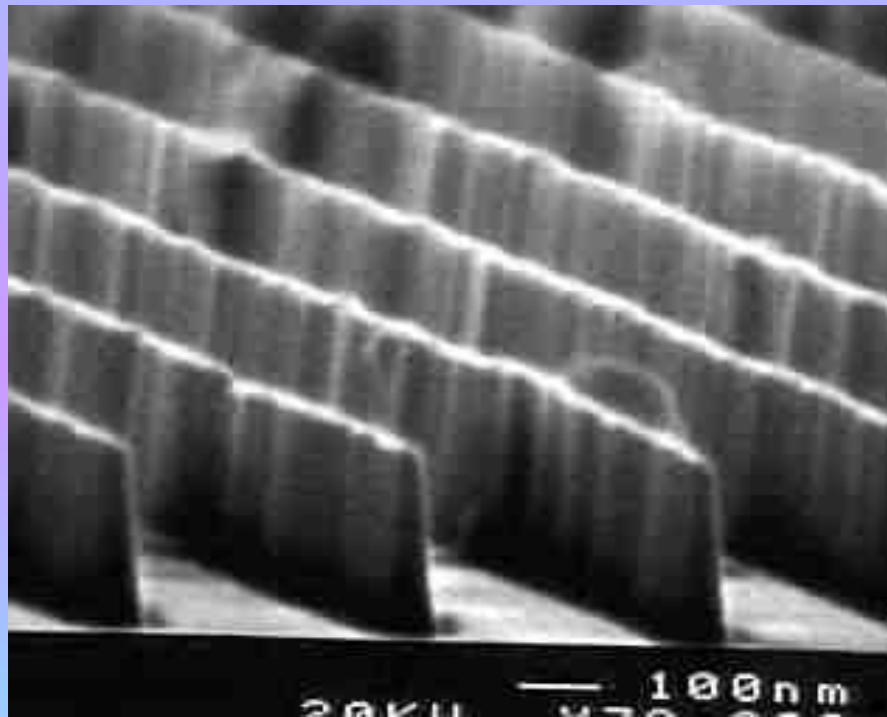
Изотропное травление





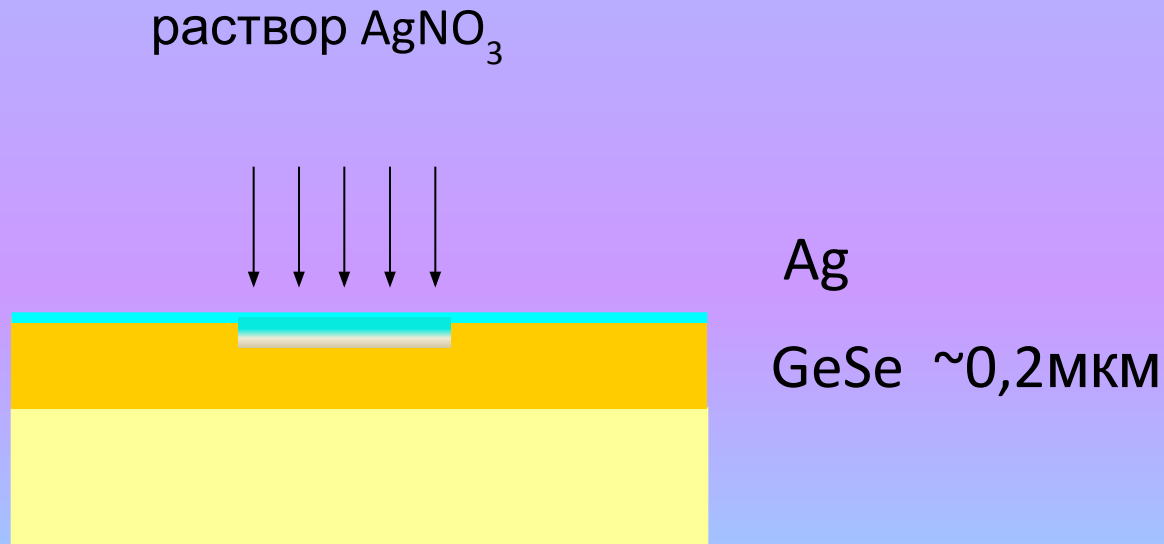
Клин
травления *a*
при передаче
рисунка с
фотомаски на
пленку SiO₂

Анизотропное травление



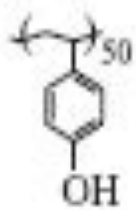
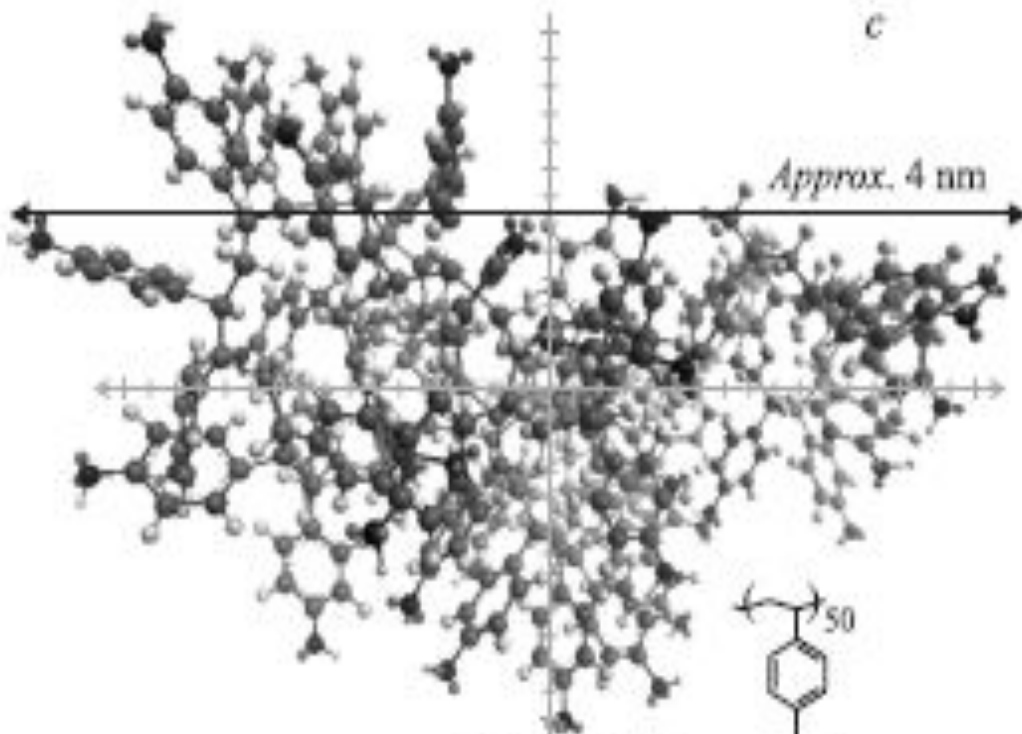
Реактивное ионное травление ZnSe

Неорганические резисты

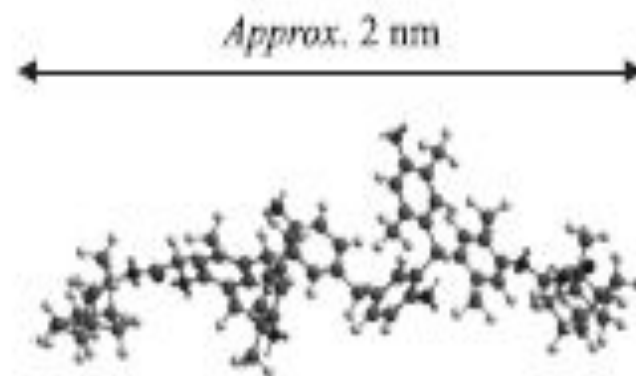
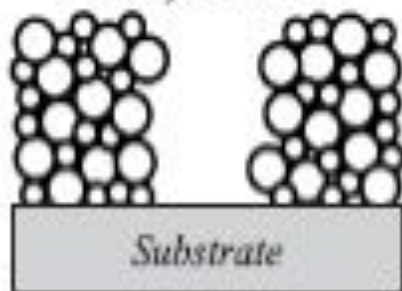


Полупроводниковые халькогенидные
стекла (нанесение в вакууме)

c

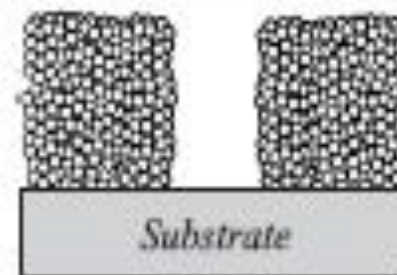


Polymer resists



Bond energy: 669.5 kcal/mol

Molecular resists (MG)



экспонирующее излучение 13,4 нм