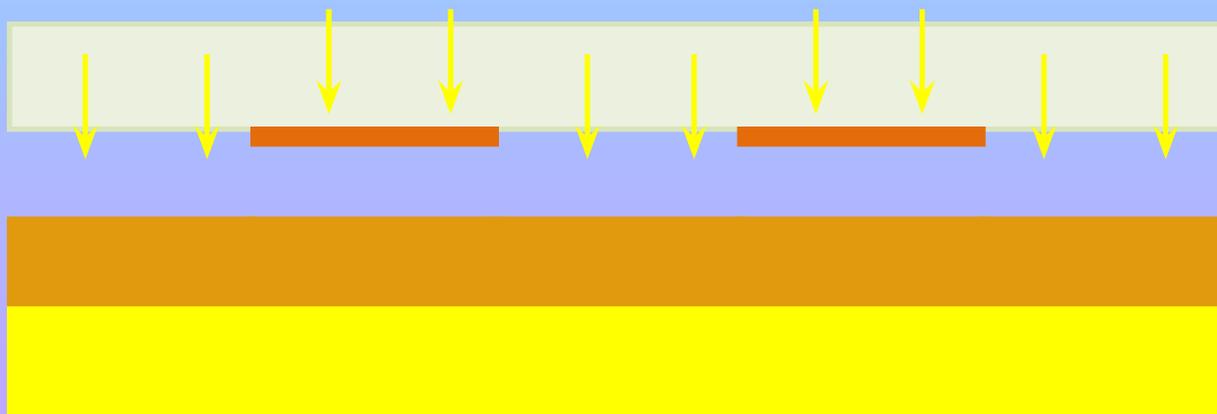
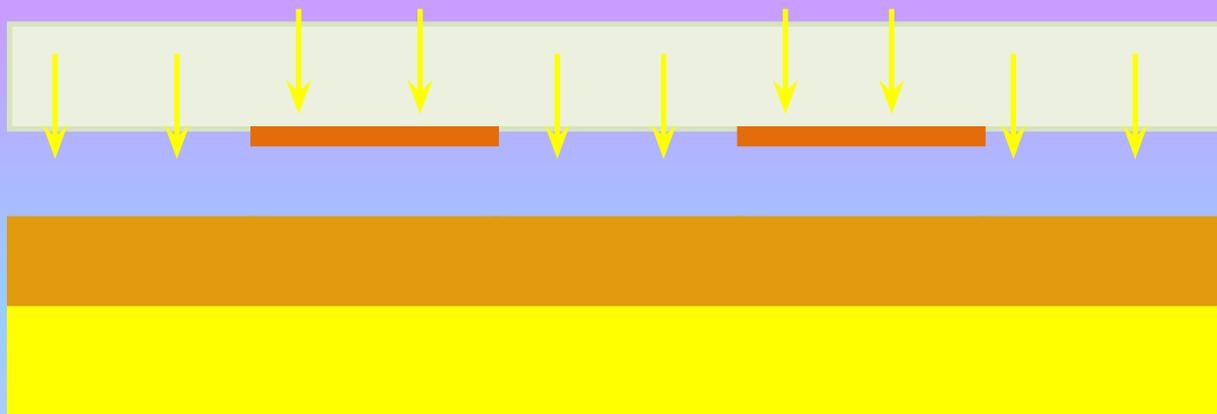


# ЛИТОГРАФИЯ

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

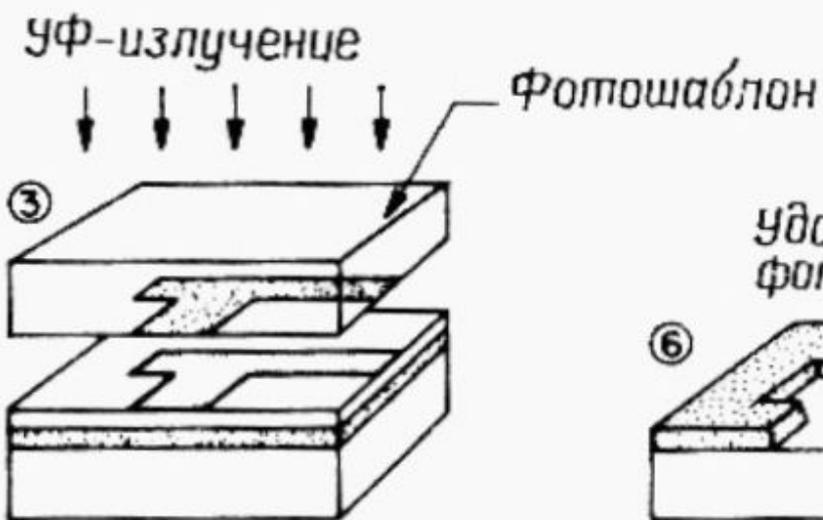
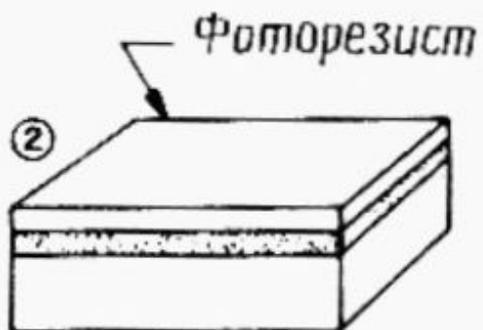
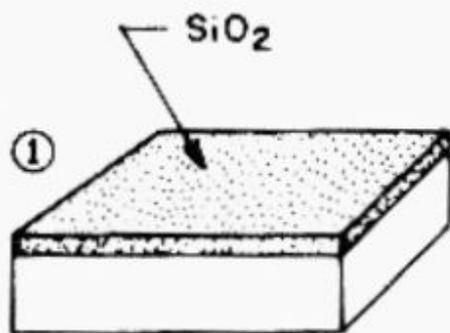


**Негативный  
резист**

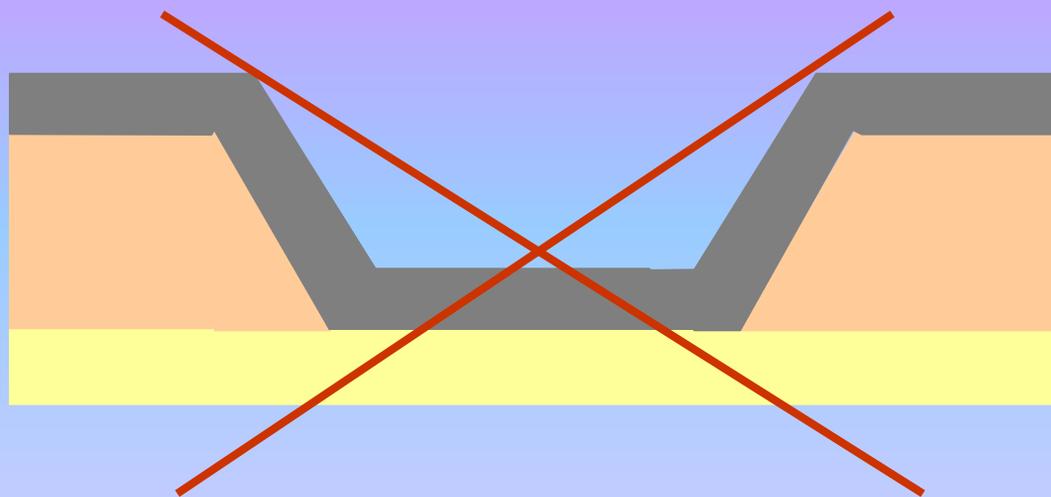
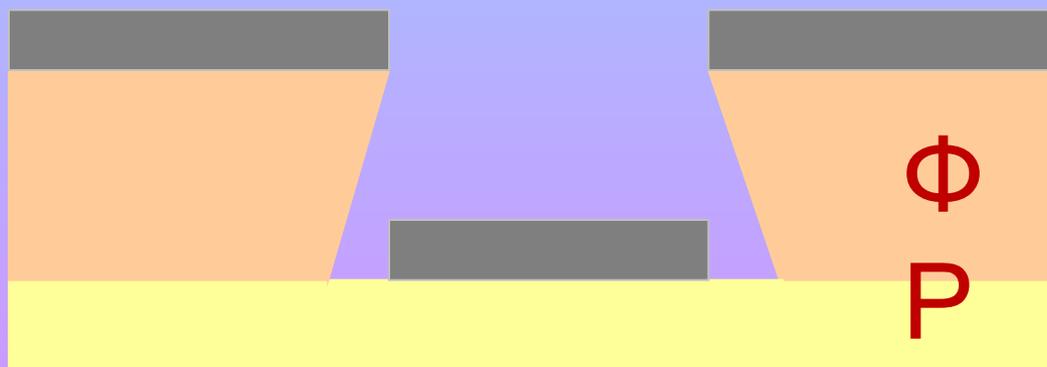


**Позитивный  
резист**





# Обратная (взрывная) литография



# Характеристики фоторезистов

- Светочувствительность

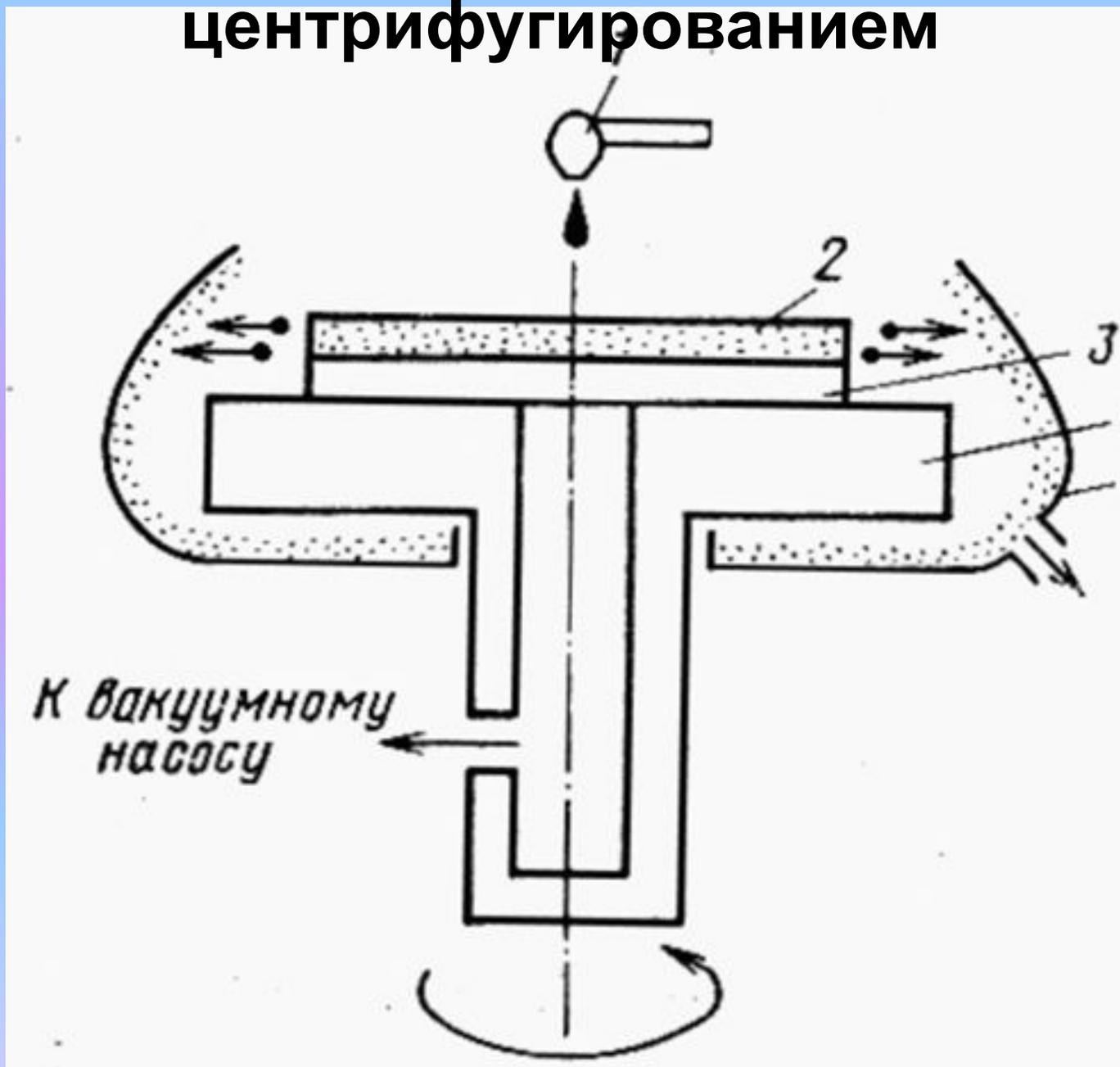
$$S = 1 / H = 1 / I t \quad (H [\text{Вт} \cdot \text{с} / \text{см}^2] - \text{экспозиция,} \\ I [\text{Вт} / \text{см}^2] - \text{интенсивность облучения})$$

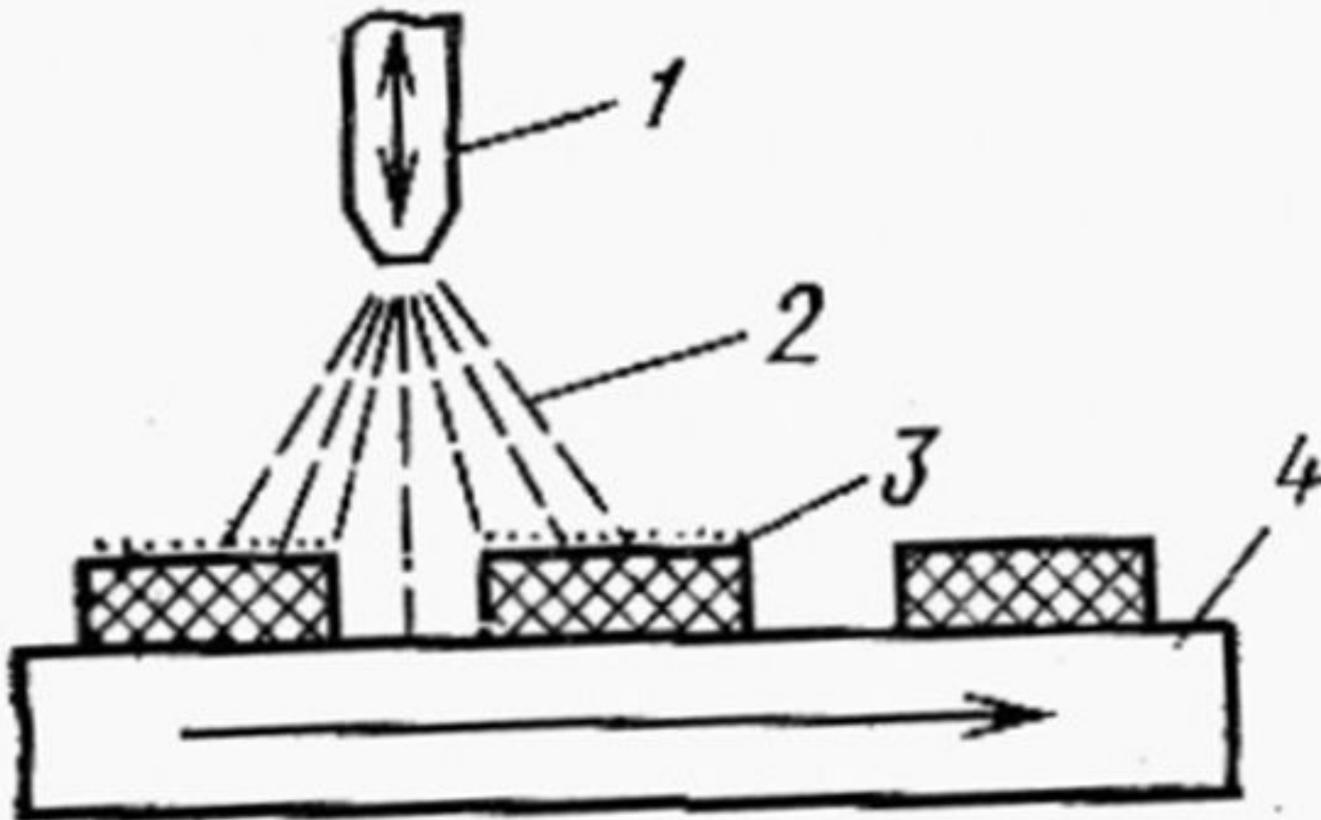
- Разрешающая способность

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

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

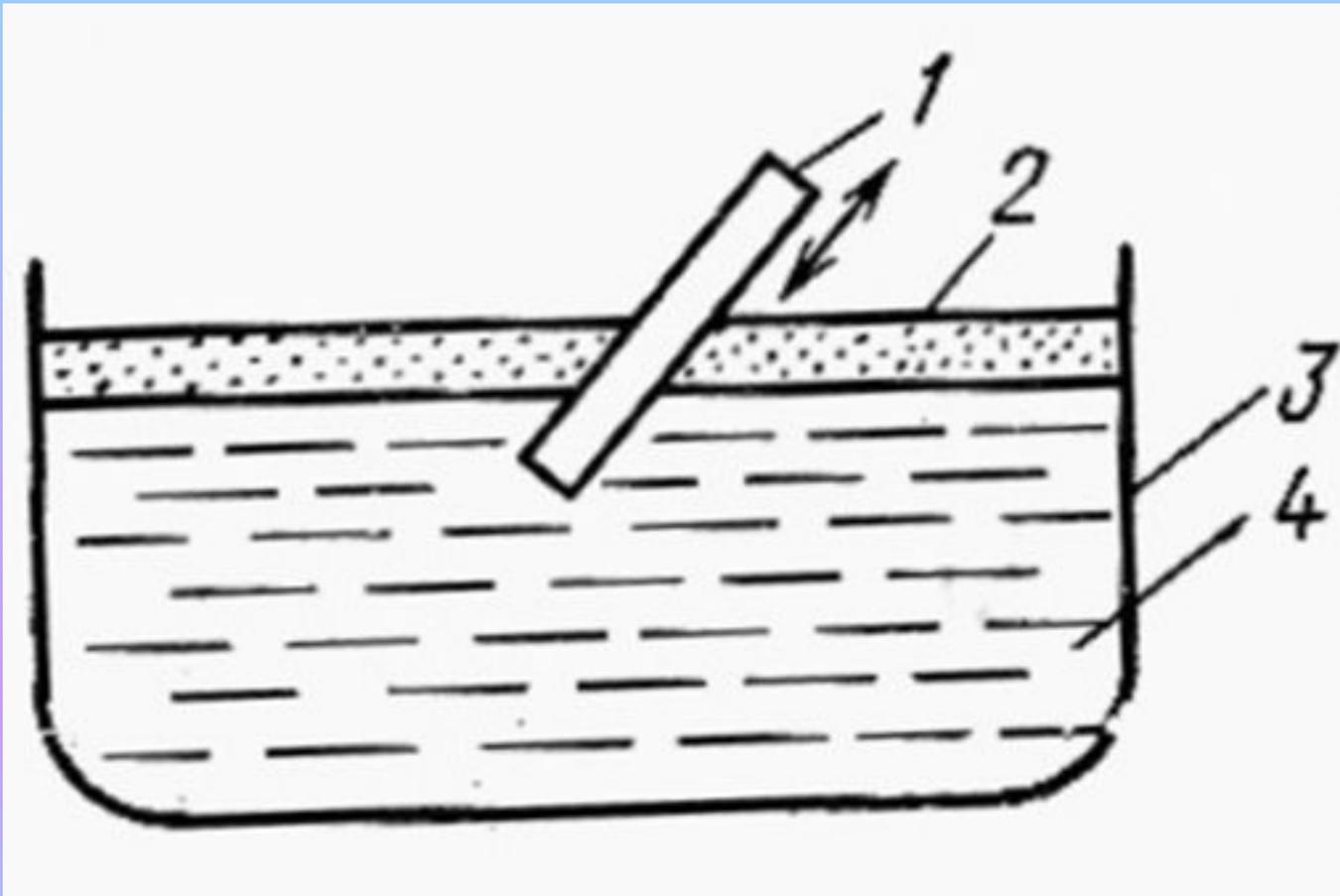
# Нанесение слоя резиста центрифугированием





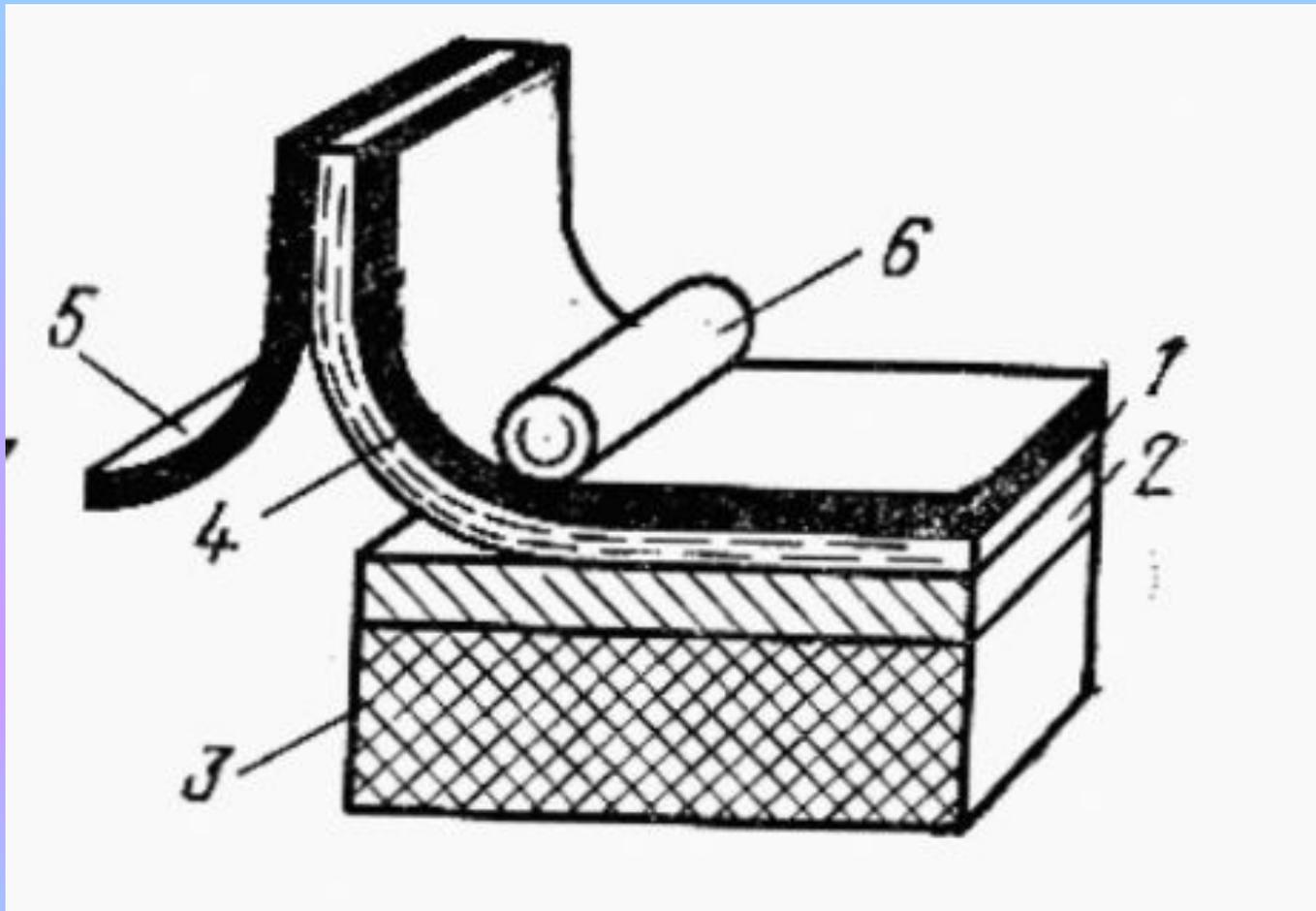
1 – сопло форсунки; 2 – диспергированный резист;  
3 – подложка; 4 – стол установки

**Нанесение слоя резиста распылением**



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

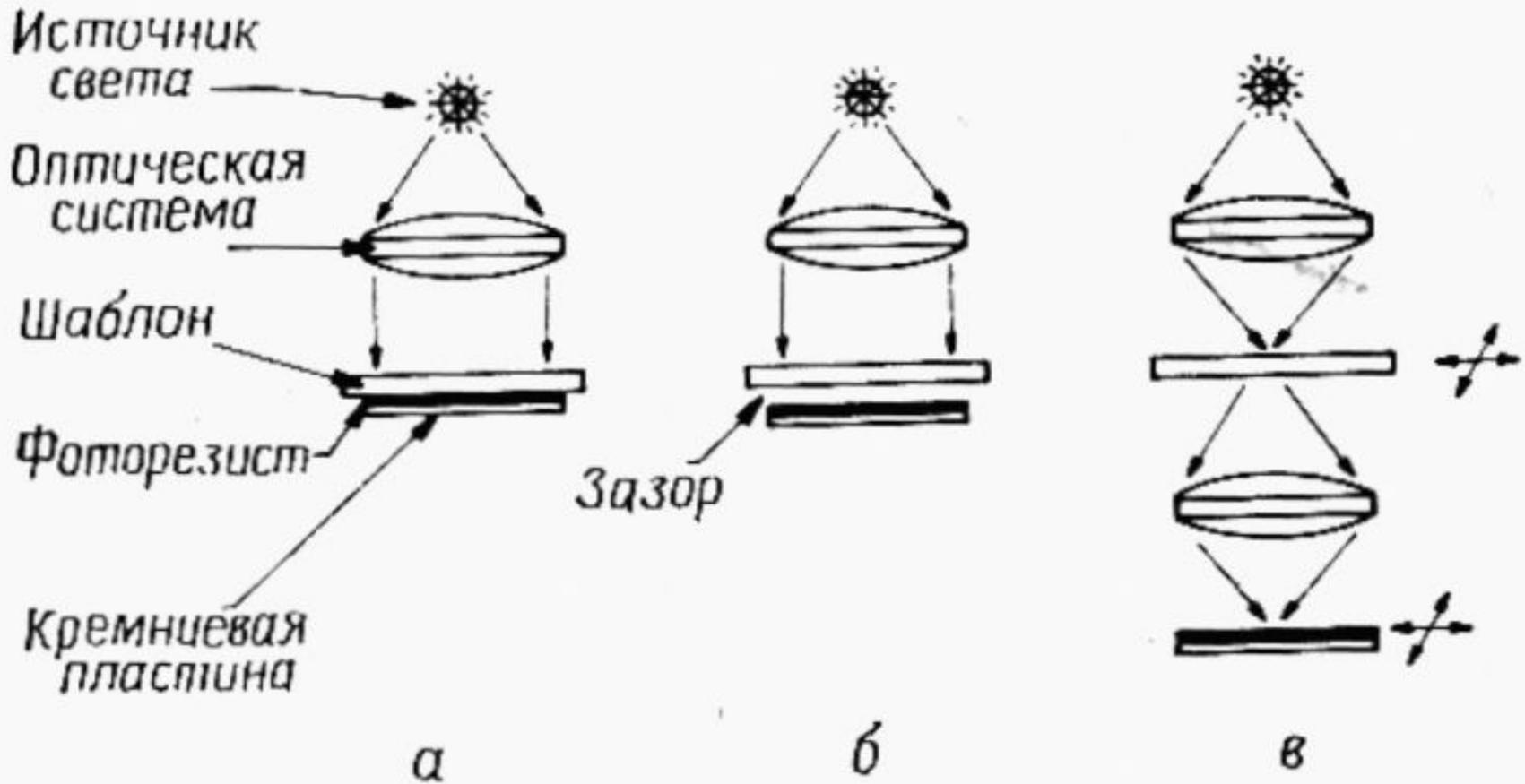
**Нанесение слоя резиста окунанием**



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

**Нанесение слоя резиста накаткой**



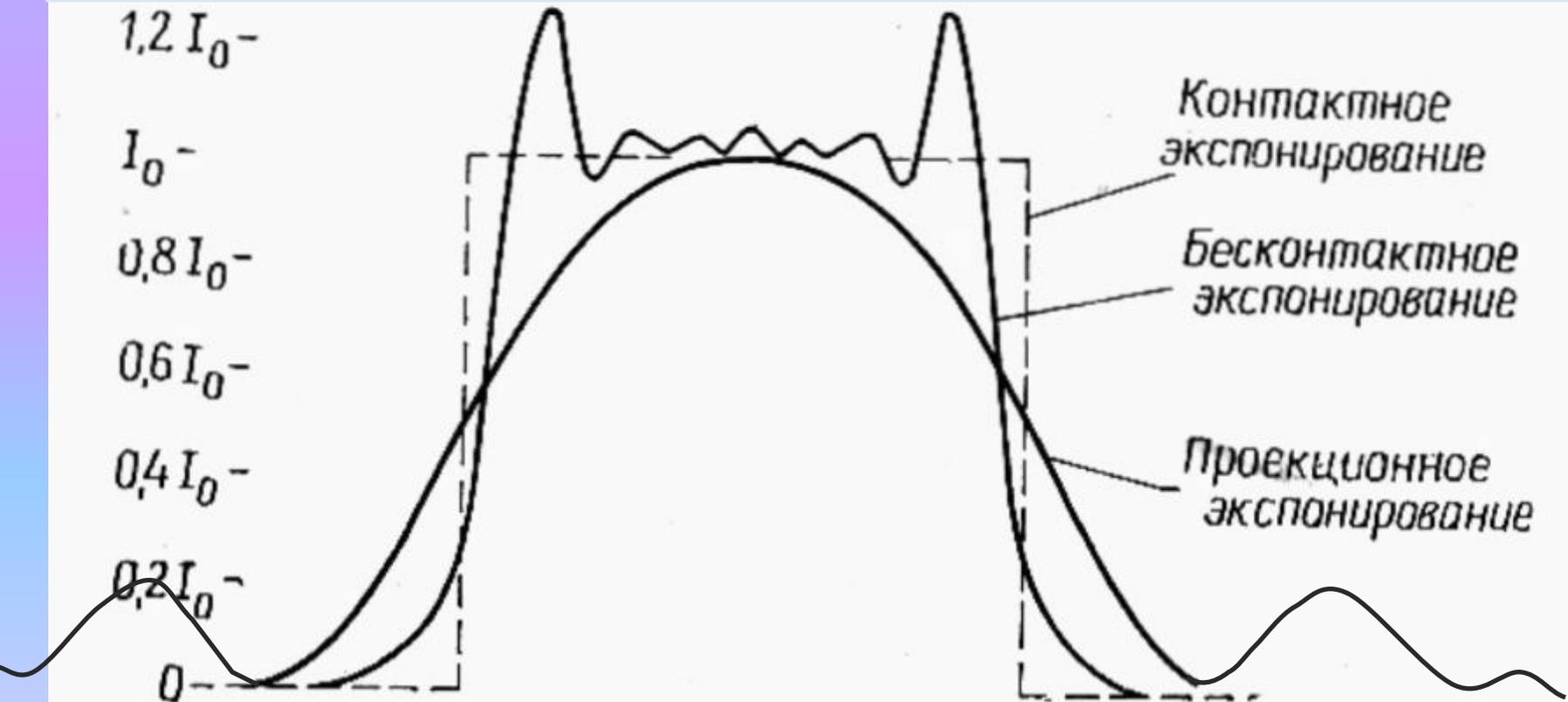


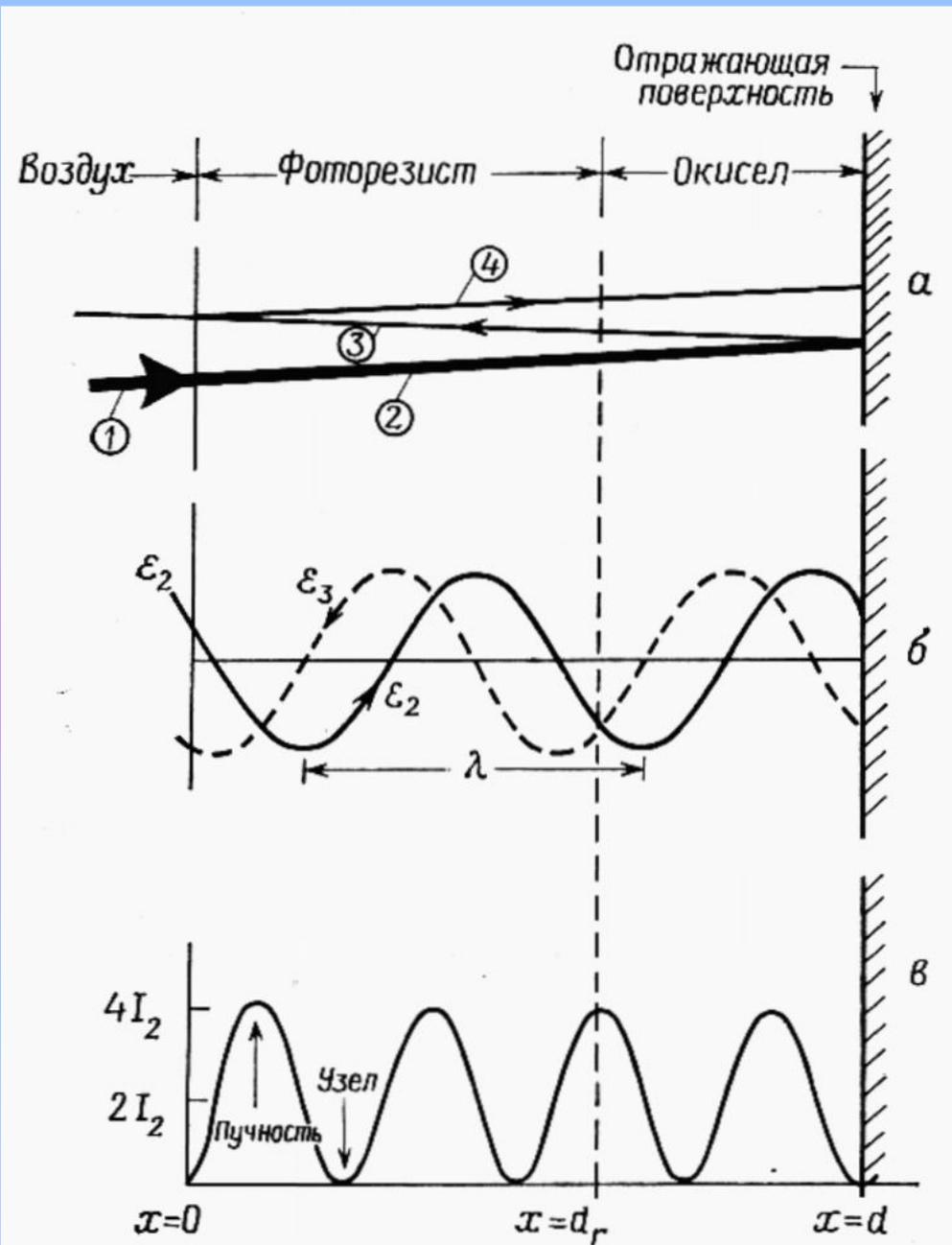
## Методы оптической литографии

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

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

**Проекционное экспонирование:**  
разрешение пропорционально  $\lambda$ .





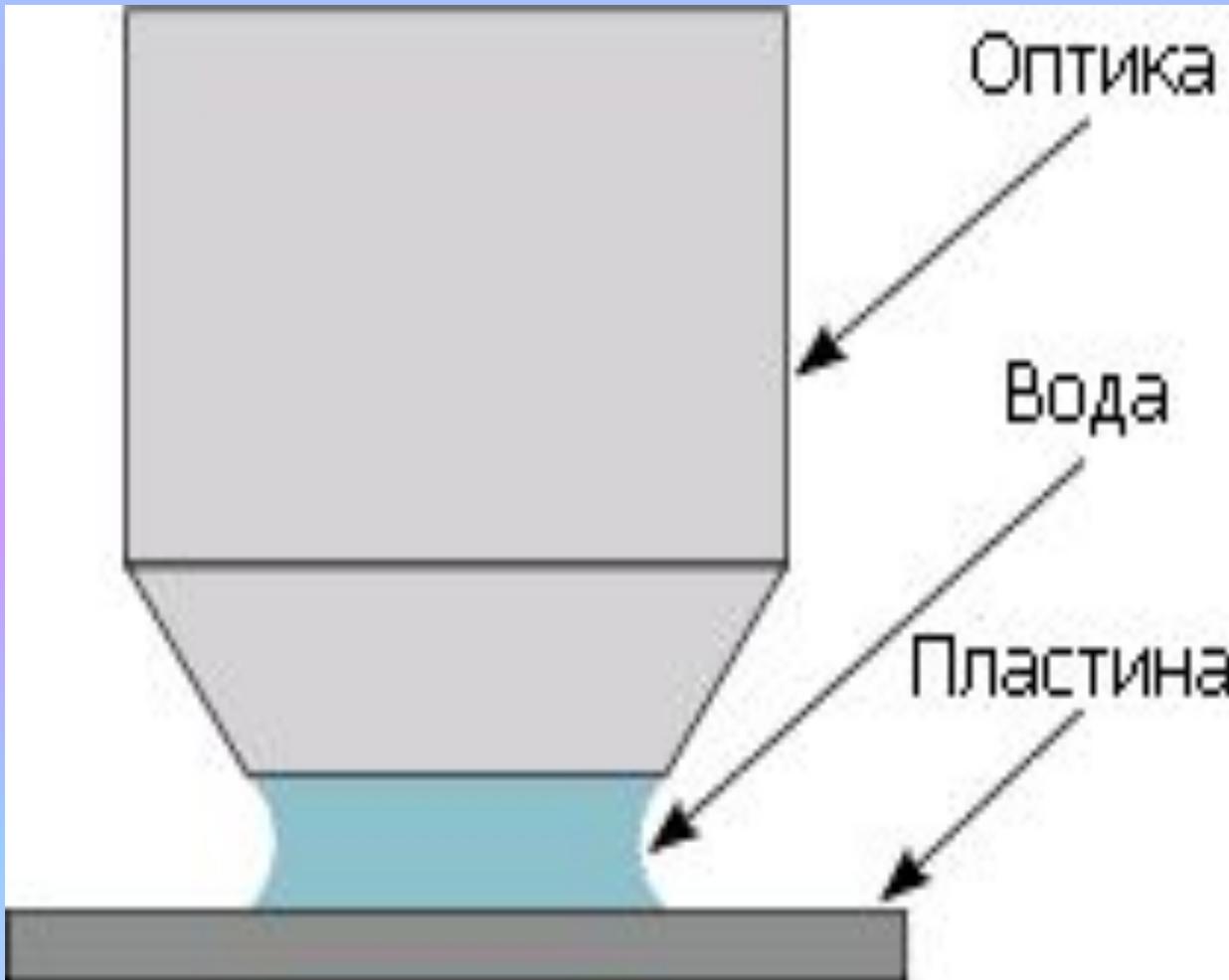
# Интерференция



Ртутные газоразрядные лампы (436, 405 или 365 нм)

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

# Иммерсионная литография



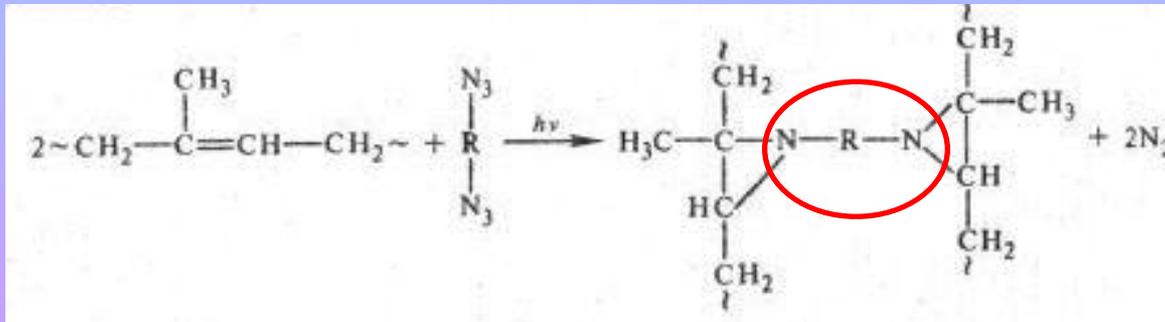
улучшает разрешение на 30–40% ввиду большего коэффициента преломления жидкости

# Фотохимические реакции

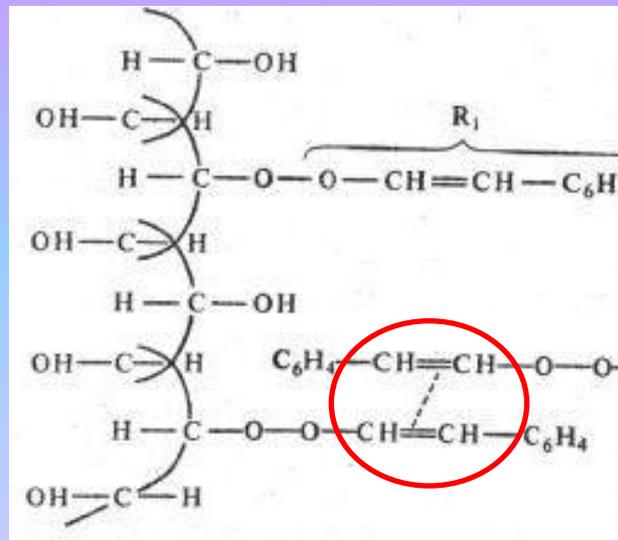
- Фотораспад (фотолиз)  $A-B \rightarrow [A-B]^* \rightarrow A\cdot + B\cdot$   
 $A-B \rightarrow [A-B]^* \rightarrow A^+ + B^-$
- Фотоперегруппировка  $A-B \rightarrow A=B$   
 $\begin{array}{ccc} H-O & & O-H \\ / & / & / \end{array}$
- Фотоприсоединение  $A^* + A \rightarrow A_2$   
 $A^* + H_2O \rightarrow HAOH$   
 $A^* + O_2 \rightarrow OAO$
- Фотоперенос электрона  $A^* + x \rightarrow A^- + x^+$   
 $A^* + y \rightarrow A^+ + y^-$
- Фотосенсибилизация  $A^* + M \rightarrow A + M^*$

# Негативные резисты

- на основе каучуков



- на основе поливинилциннамата (ПВЦ)



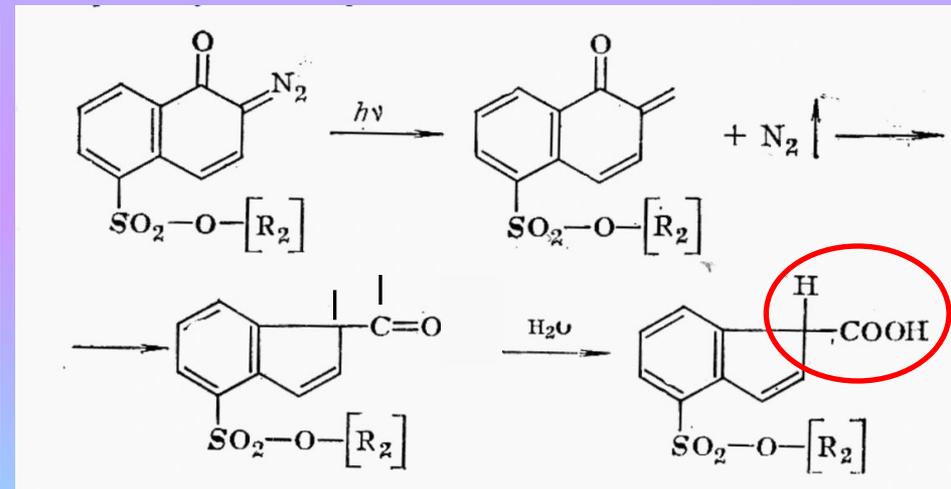
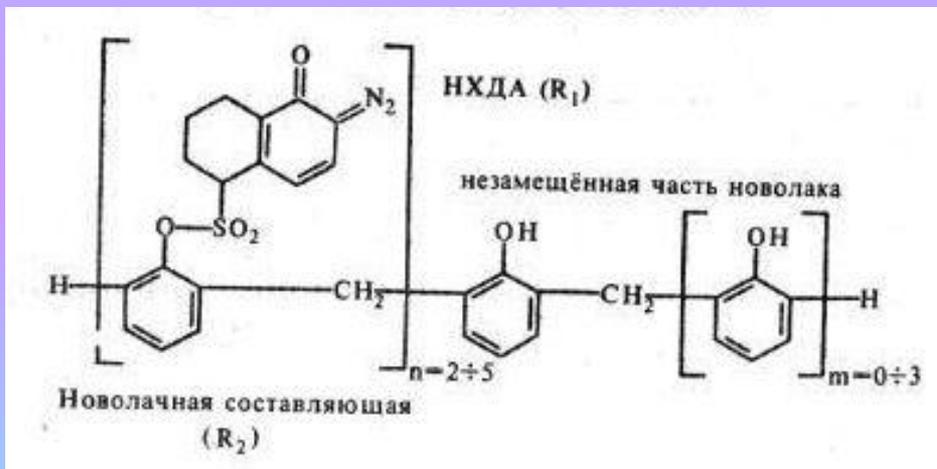
разрыв  
двойной связи  
 $\text{C}=\text{C}$

(200-250 нм)

# Позитивные резисты

- Сенсбилизаторами являются производные диазокетонов или хинондиазидов

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

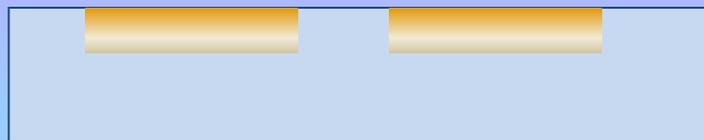
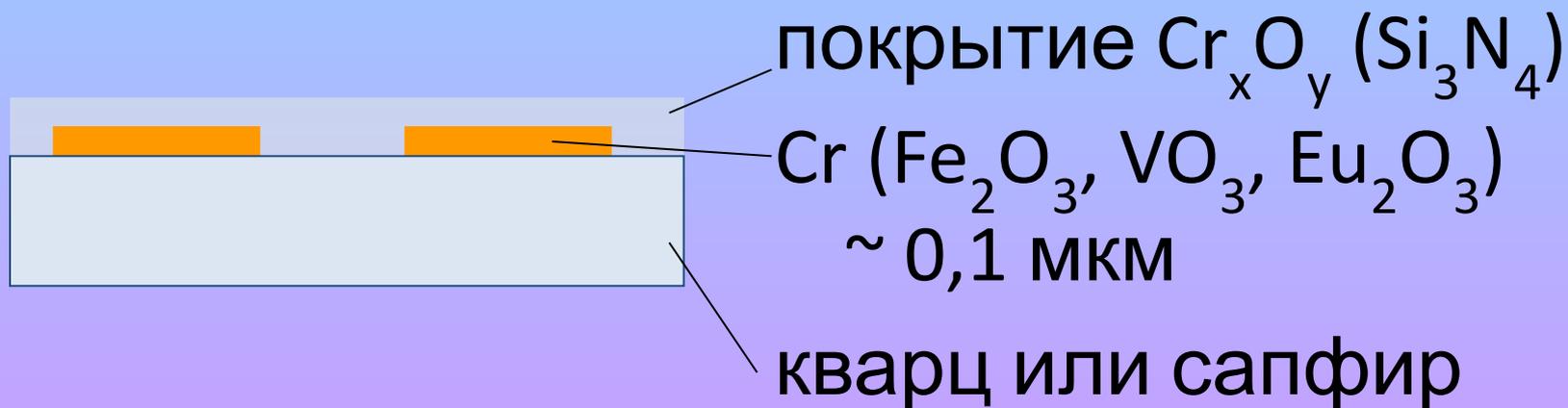


Нафтохинондиазид (НХДА) разрыв связи C=N<sub>2</sub> с отщеплением N<sub>2</sub>

- Полиметилметакрилат (ПММА)

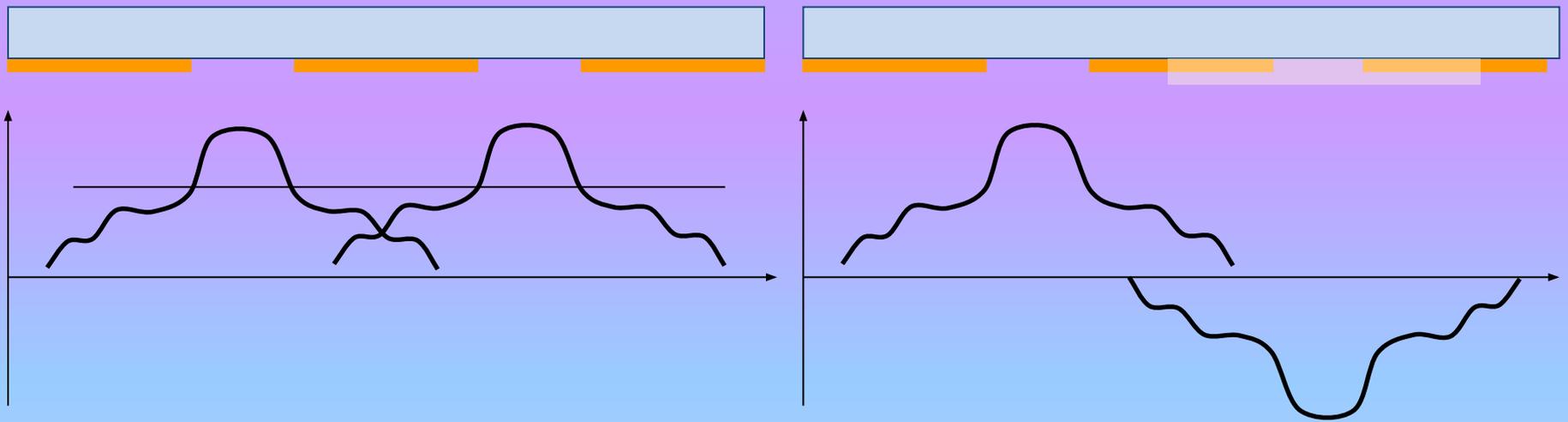


# Фотошаблоны



**Диффузионный ФШ**

# Фазоповорачивающее покрытие



# Как сделать первый фотошаблон?

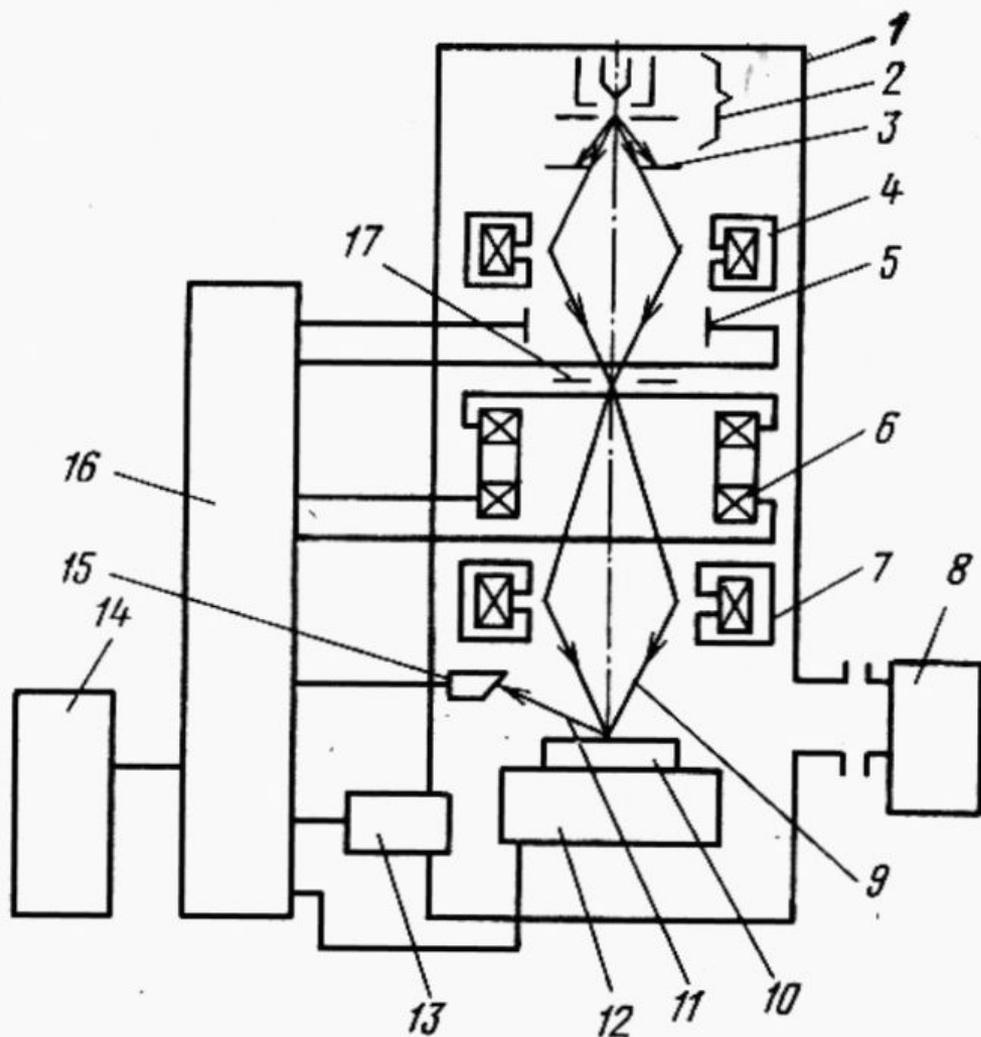


## Достоинства электронно-лучевой литографии:

- 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**

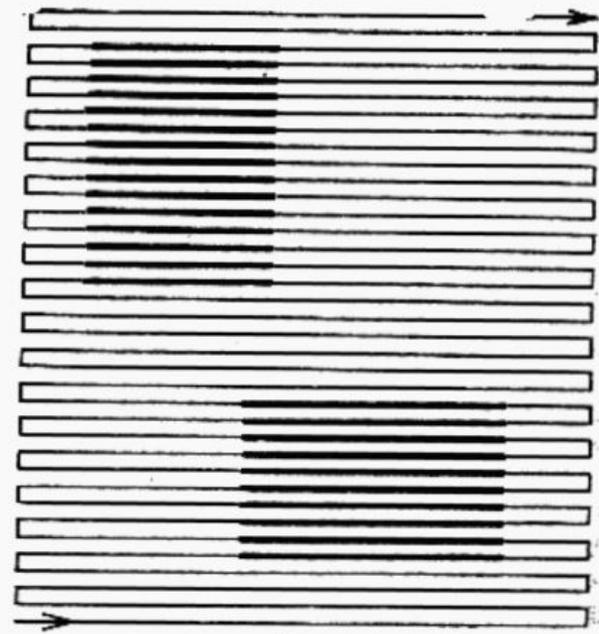
# Схема растрового (а) и векторного (б) сканирования луча

## Фокусировка электронного луча

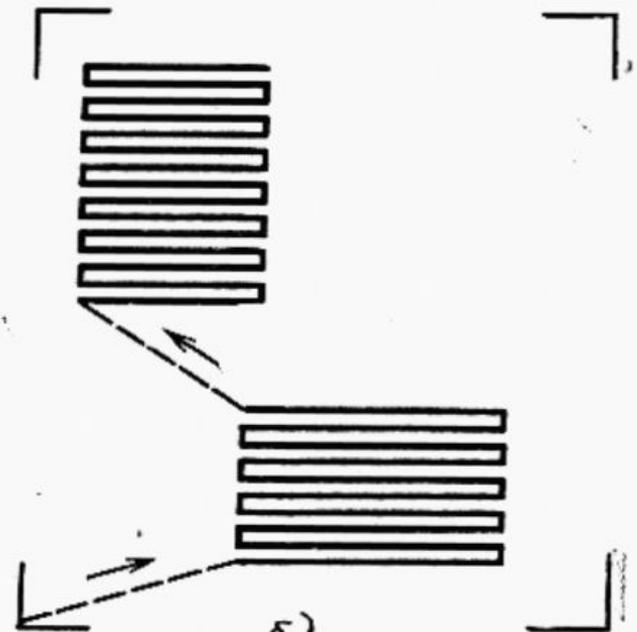
Ограничения:

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

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

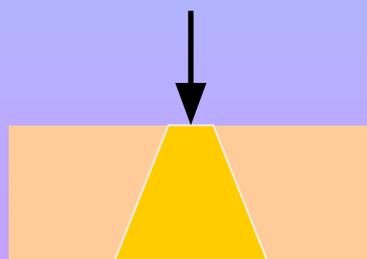
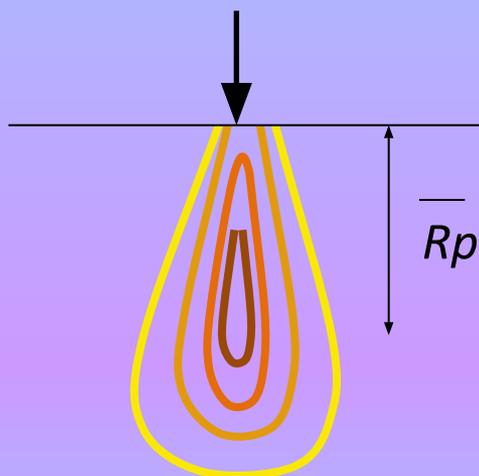


а)

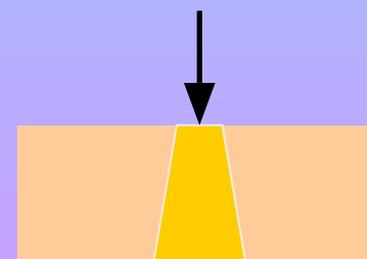


б)

# Рассеяние электронов

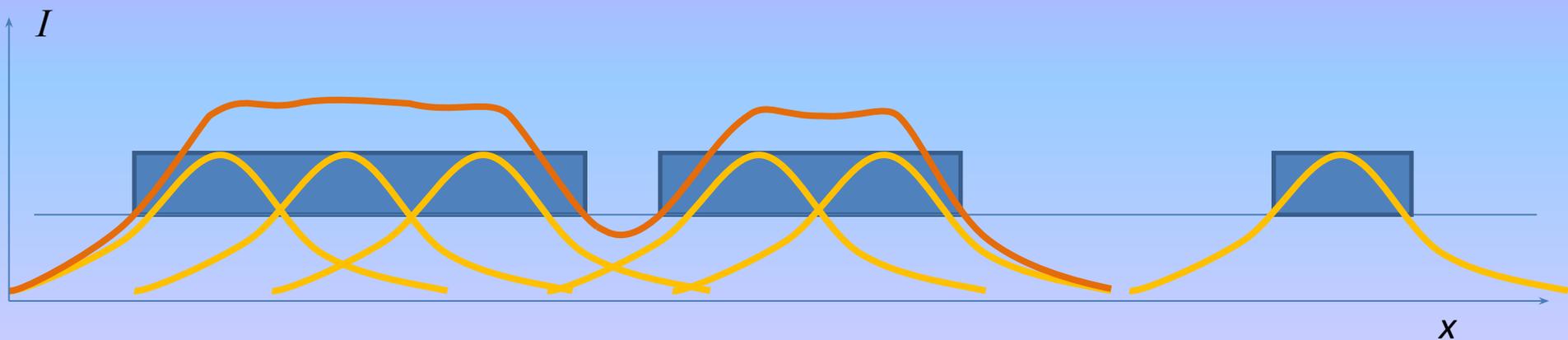


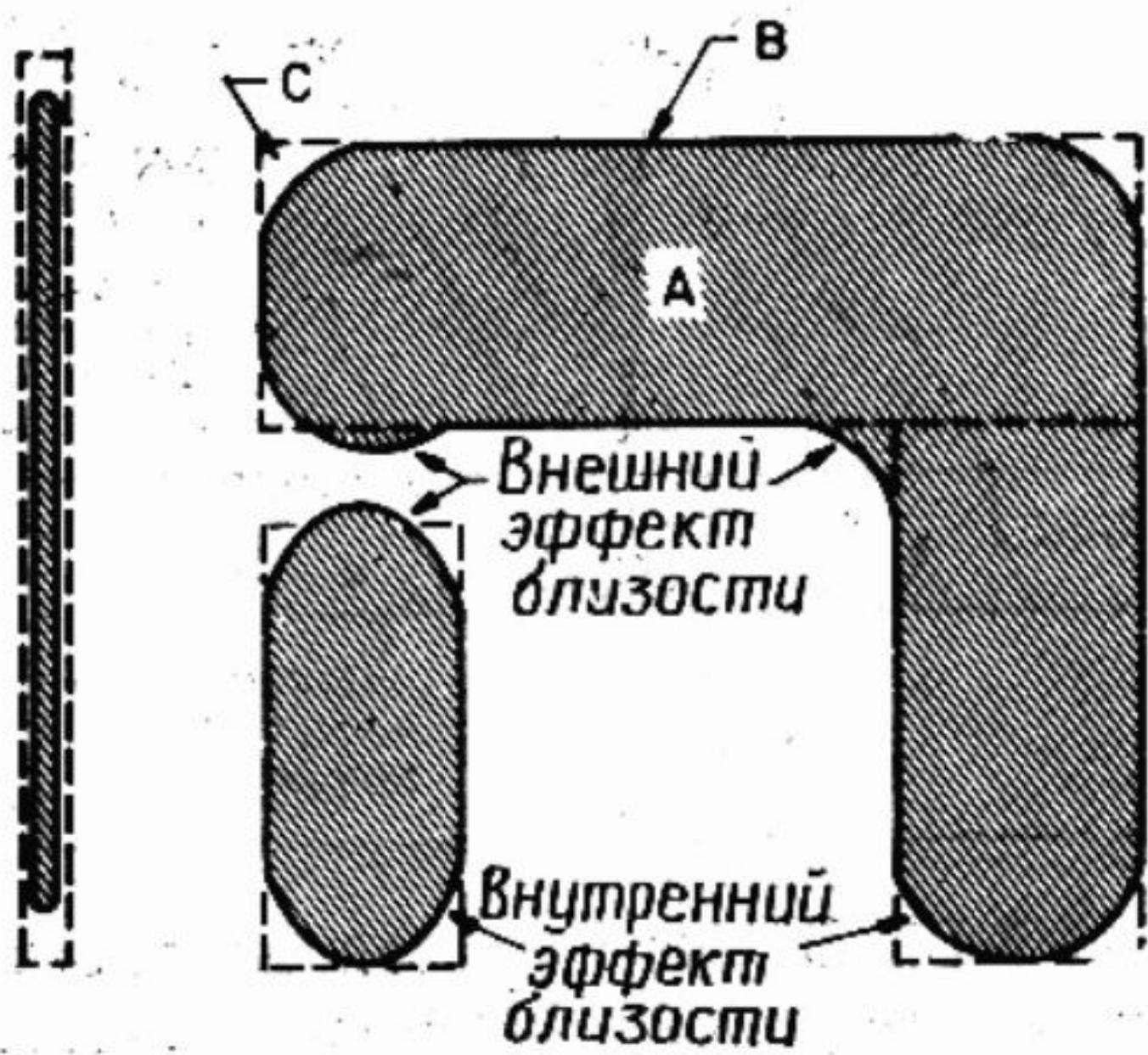
энергия мала



энергия велика

$10^{-4} - 10^{-6}$  Кул/см<sup>2</sup>





# 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.

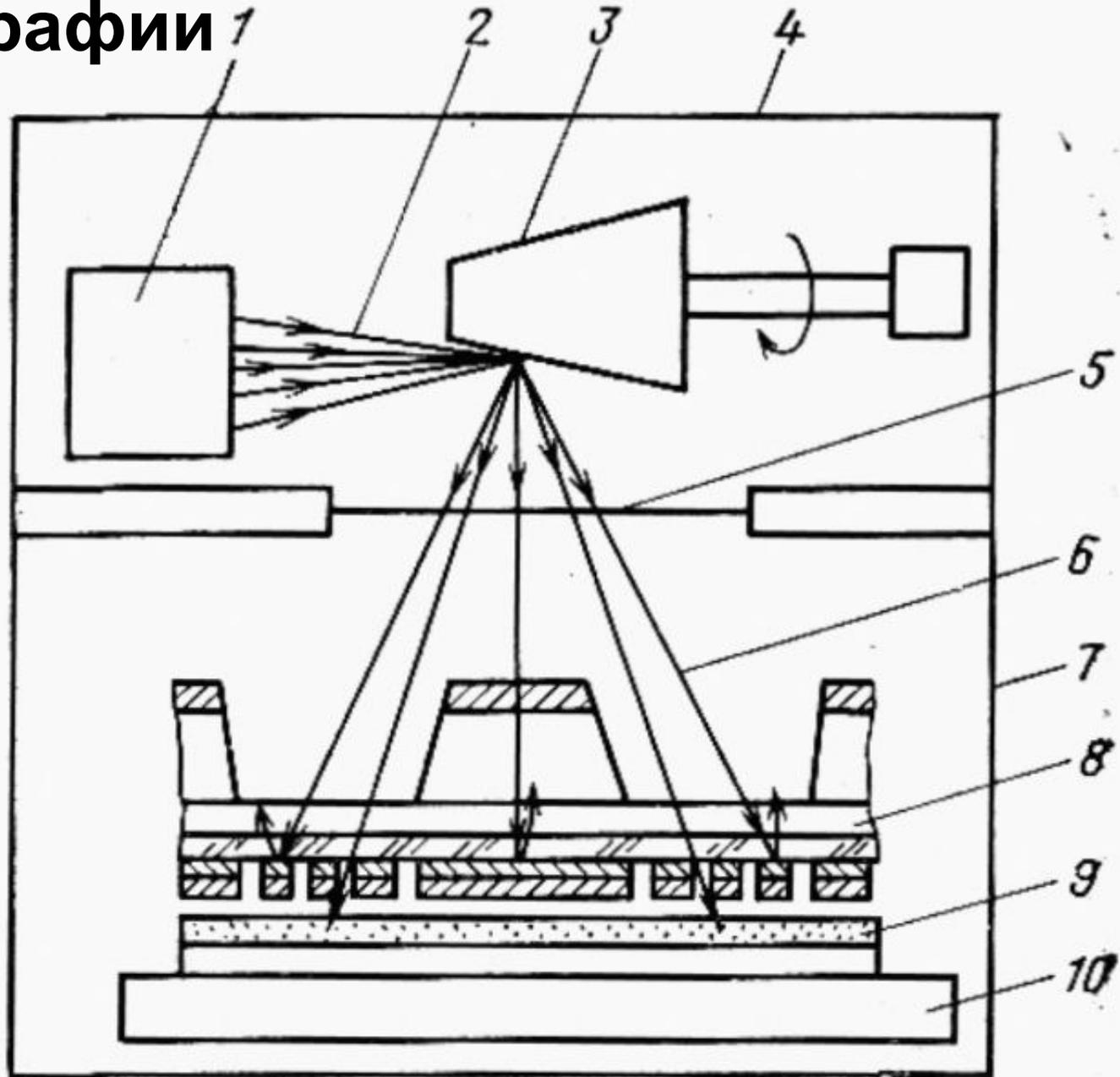
Длина волны РИ 0,4...5 нм

## Шаблоны для РЛГ

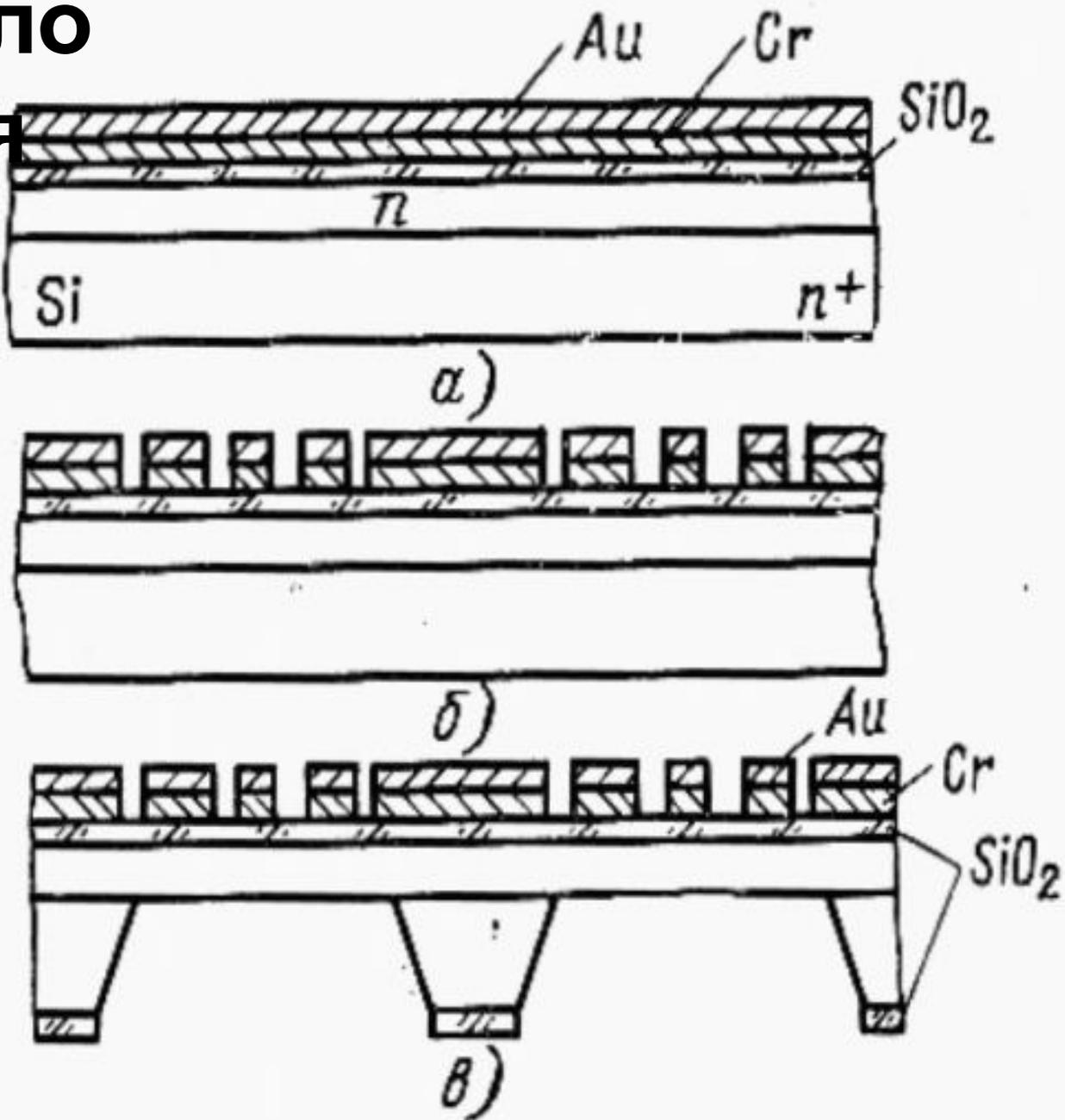
при  $\lambda < 0,4$  нм поглощение РИ мало, нет  
оптимального материала для маскирующего  
слоя (применяют Au)

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

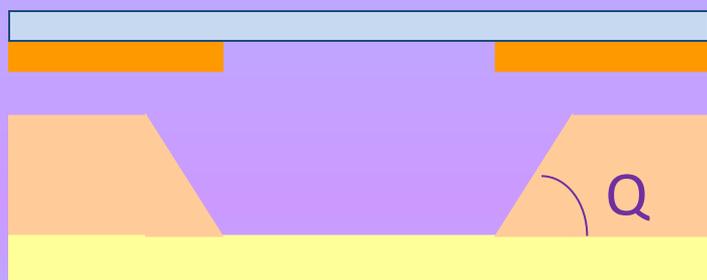
- *Преимуществами* этого метода являются **меньшее рассеивание ионов** вследствие их массы и следовательно **большее разрешение** по сравнению с ЭЛГ.
- Как и рентгеновское излучение, ионы с большой энергией не подвержены дифракции.
- Для ионно-лучевого экспонирования требуются дозы облучения во много 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

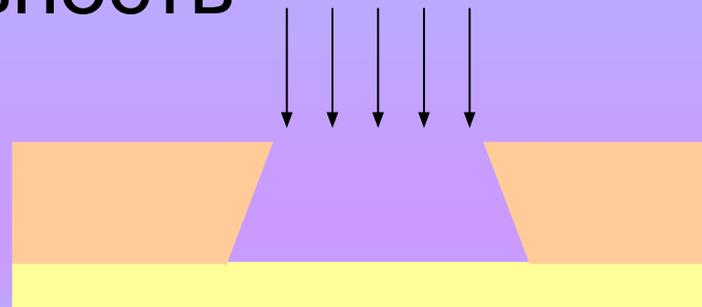
# Форма края фоторезиста

Проблема при плазменном  
проявлении – низкая

селективность



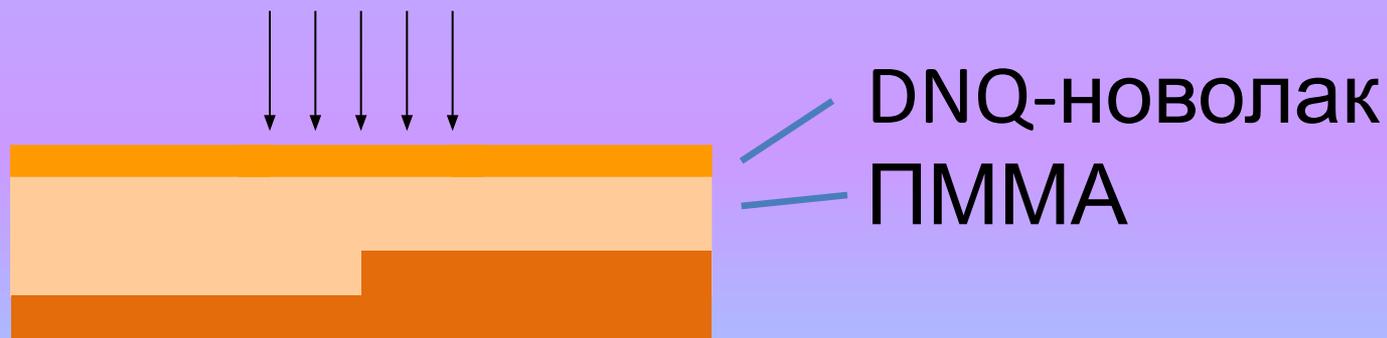
Фотолитография,  
жидкостное проявление



Электронная литография,  
плазменное проявление

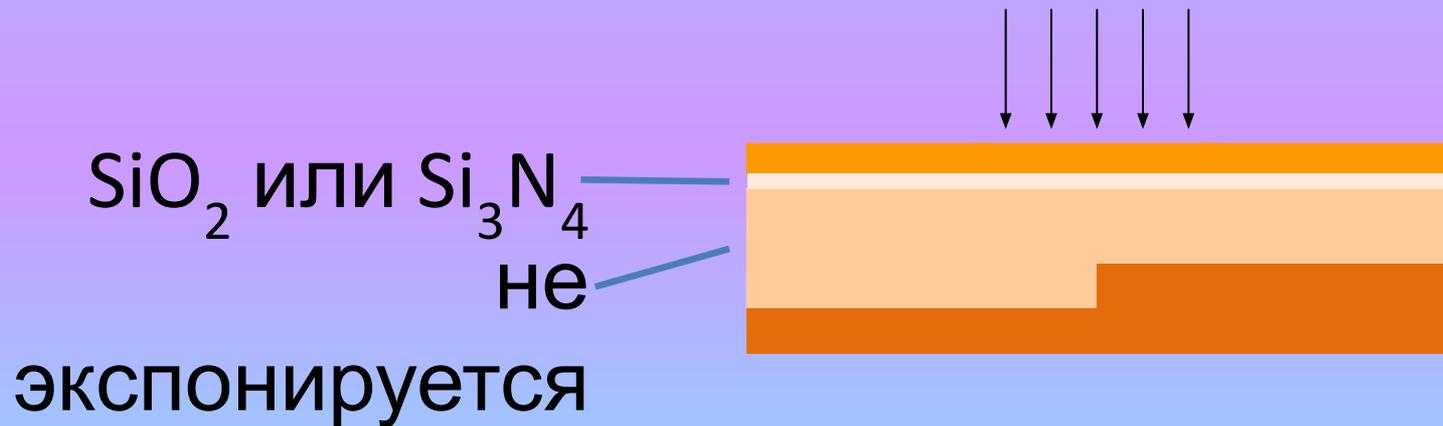
(кислородная плазма)

# Многослойные резисты



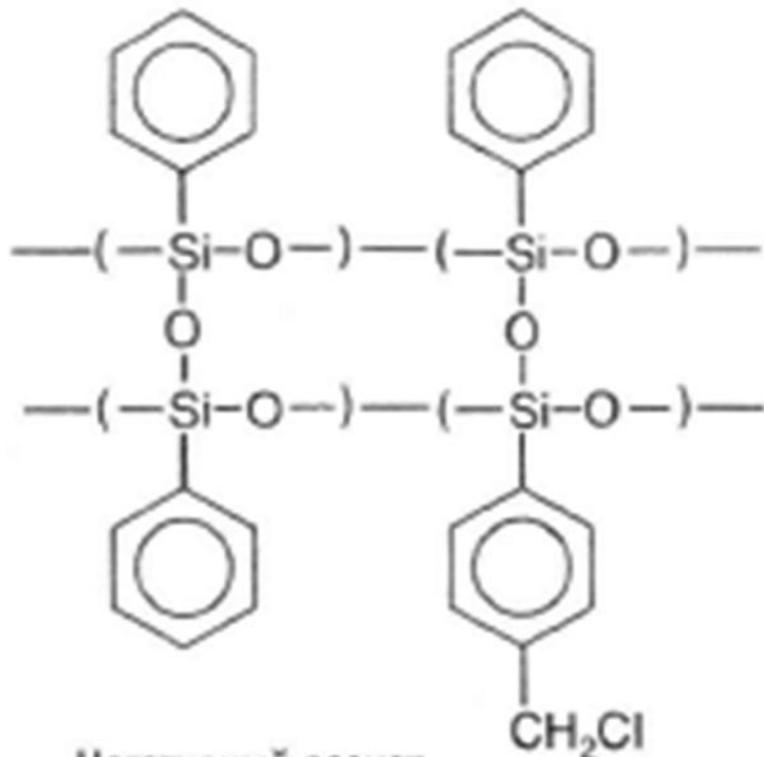
Верхний слой является маской (ФШ) при экспонировании нижнего

# Многослойные резисты

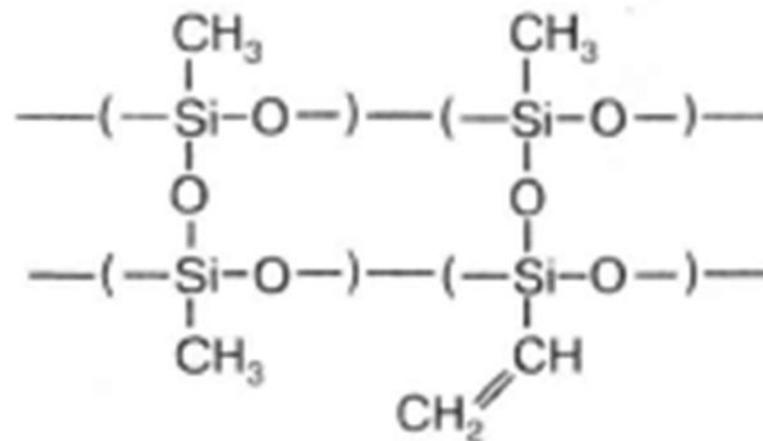


Неорганический слой является маской при травлении нижнего слоя

# Негативные двухслойные резисты с кремнием



Негативный резист  
с кремнием (SNR)



Винил-силсесквиоксан

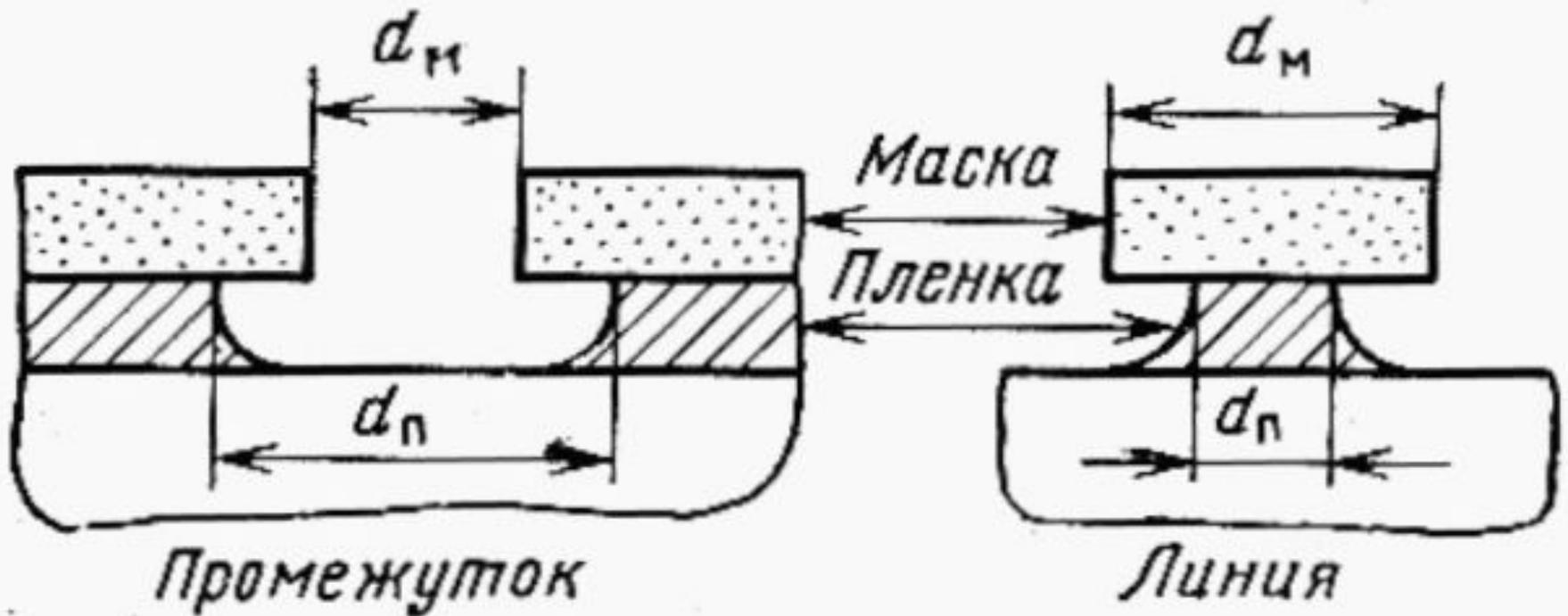
Верхний слой содержит Si, который в кислородной плазме превращается в  $\text{SiO}_2$

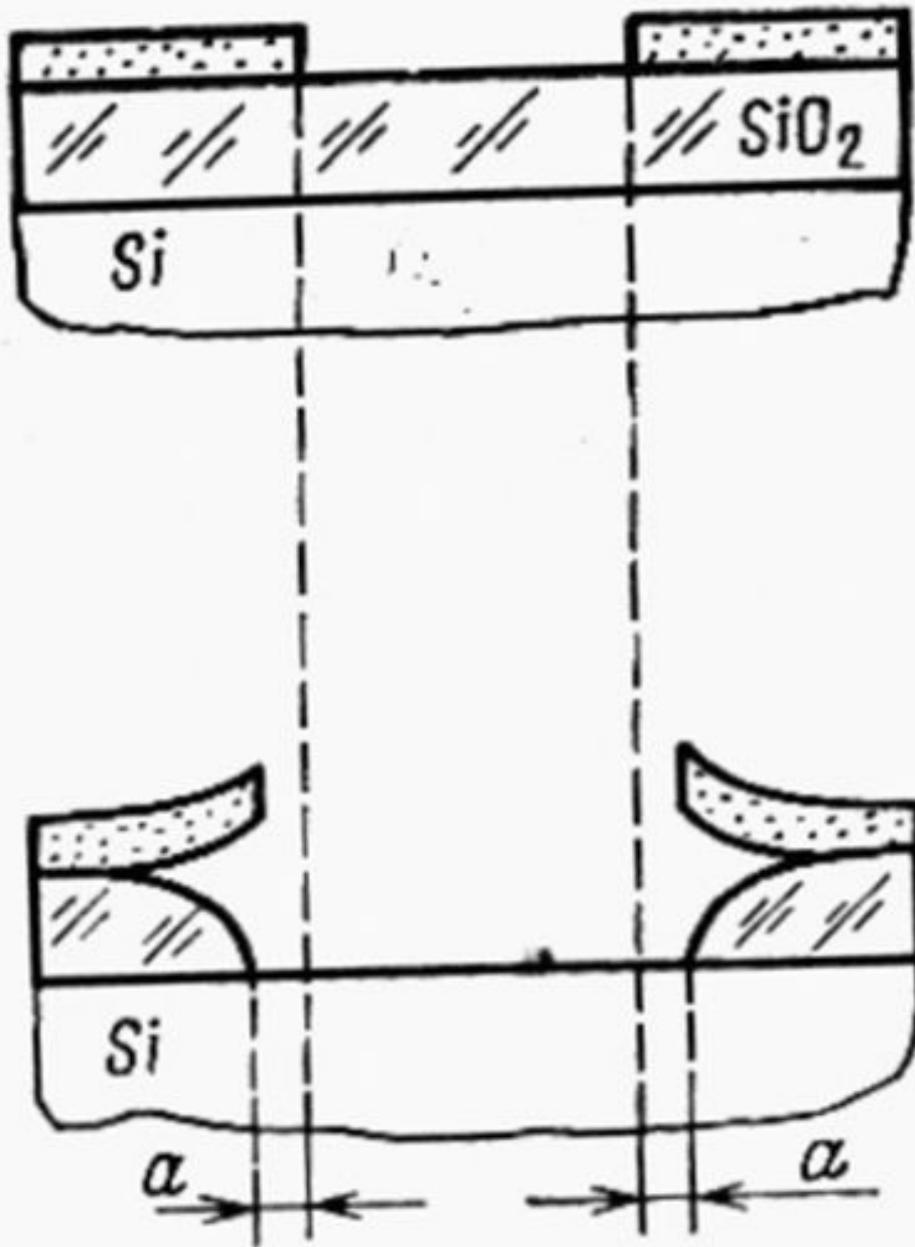
# Силилирование

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)

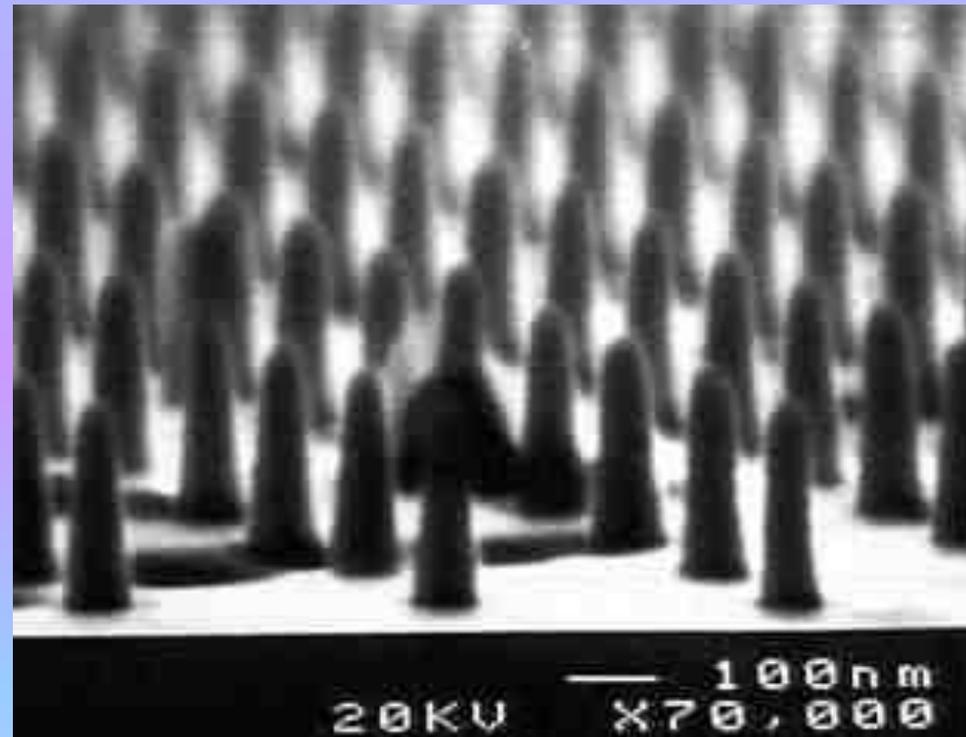
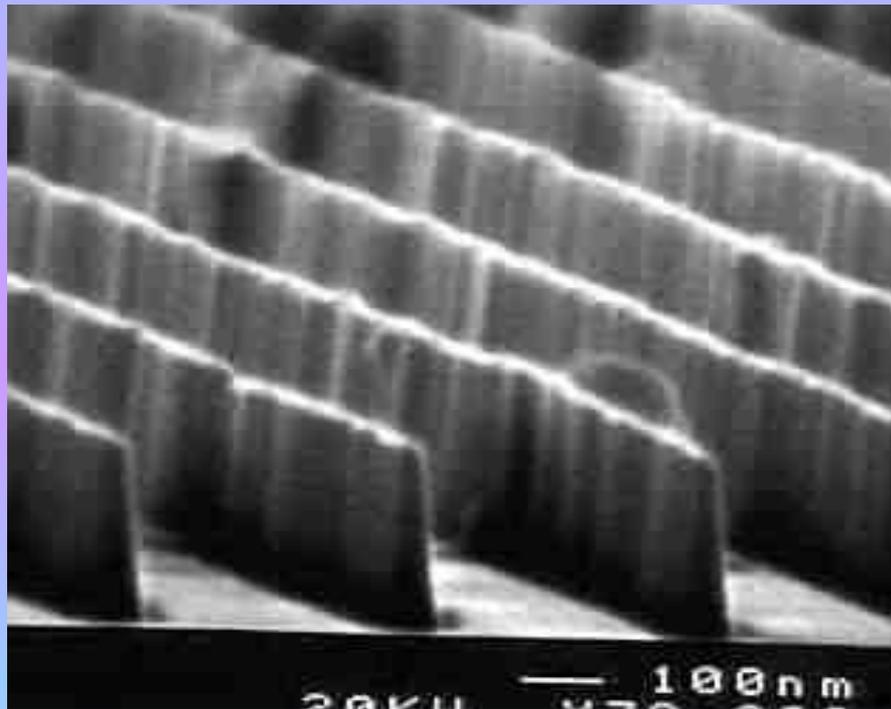
# Изотропное травление





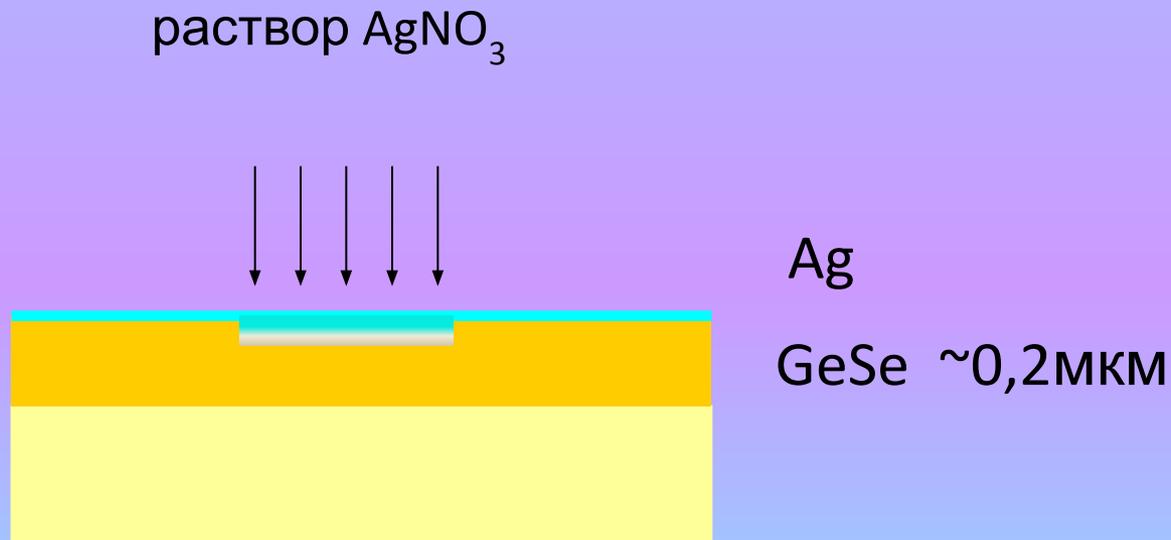
Клин  
травления  $a$   
при передаче  
рисунка с  
фотомаски на  
пленку SiO<sub>2</sub>

# Анизотропное травление



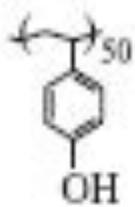
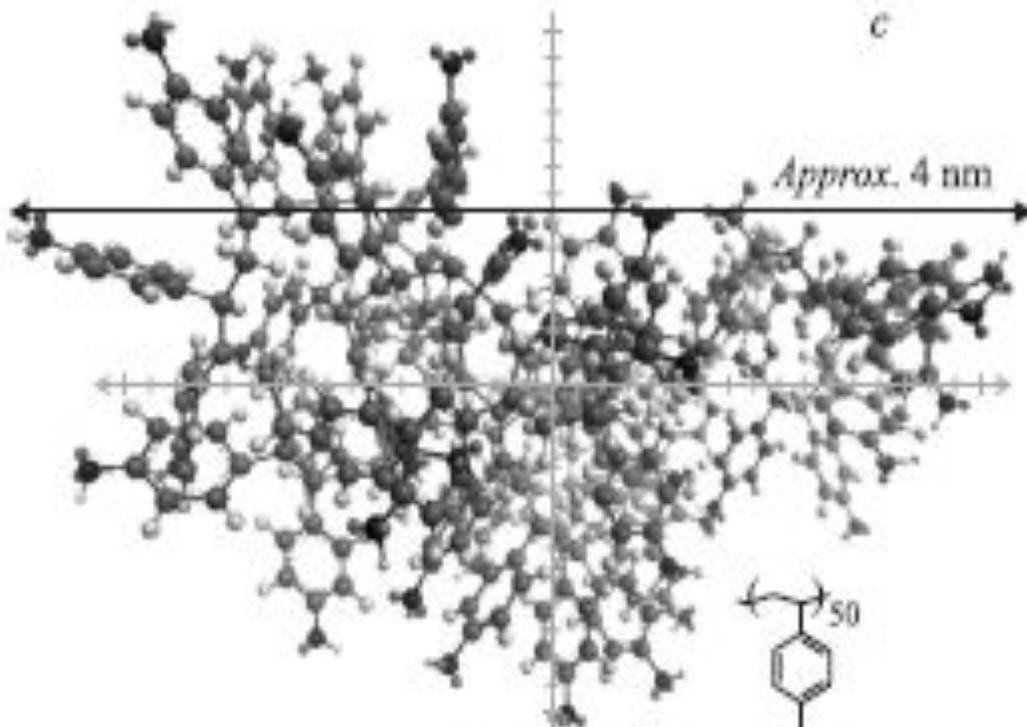
Реактивное ионное травление ZnSe

# Неорганические резисты

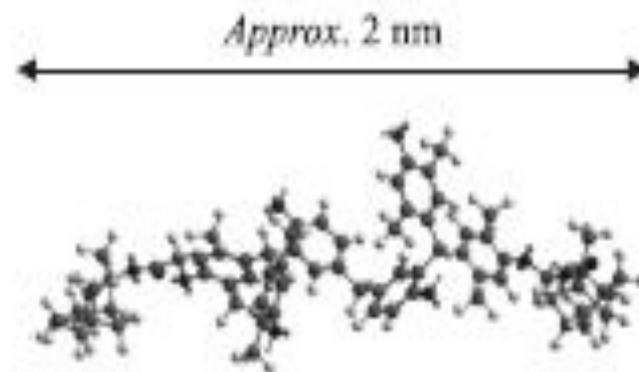
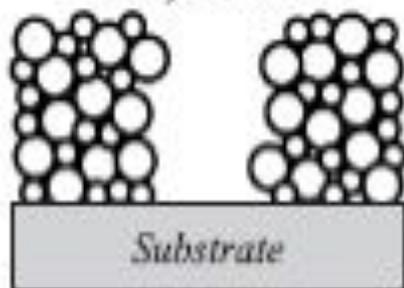


Полупроводниковые халькогенидные  
стекла (нанесение в вакууме)

c

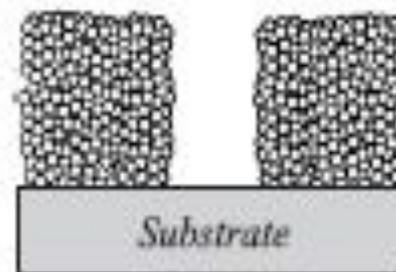


*Polymer resists*



*Bond energy: 669.5 kcal/mol*

*Molecular resists (MG)*



экспонирующее излучение 13,4 нм