

# **ФОТОЛИТОГРАФИЯ**

Практическое занятие  
по курсу ФХОМиНЭ

# **Литография**

**Литографией** (греч. *lithos* - камень), применяемой в производстве ИИЭ, называют процесс формирования геометрического рисунка на поверхности кремниевой пластины.

С помощью этого рисунка формируют элементы схемы (базу, эмиттер, электроды затвора, контактные окна, металлические межкомпонентные соединения и т.п.).

## **Получение топологического рисунка**

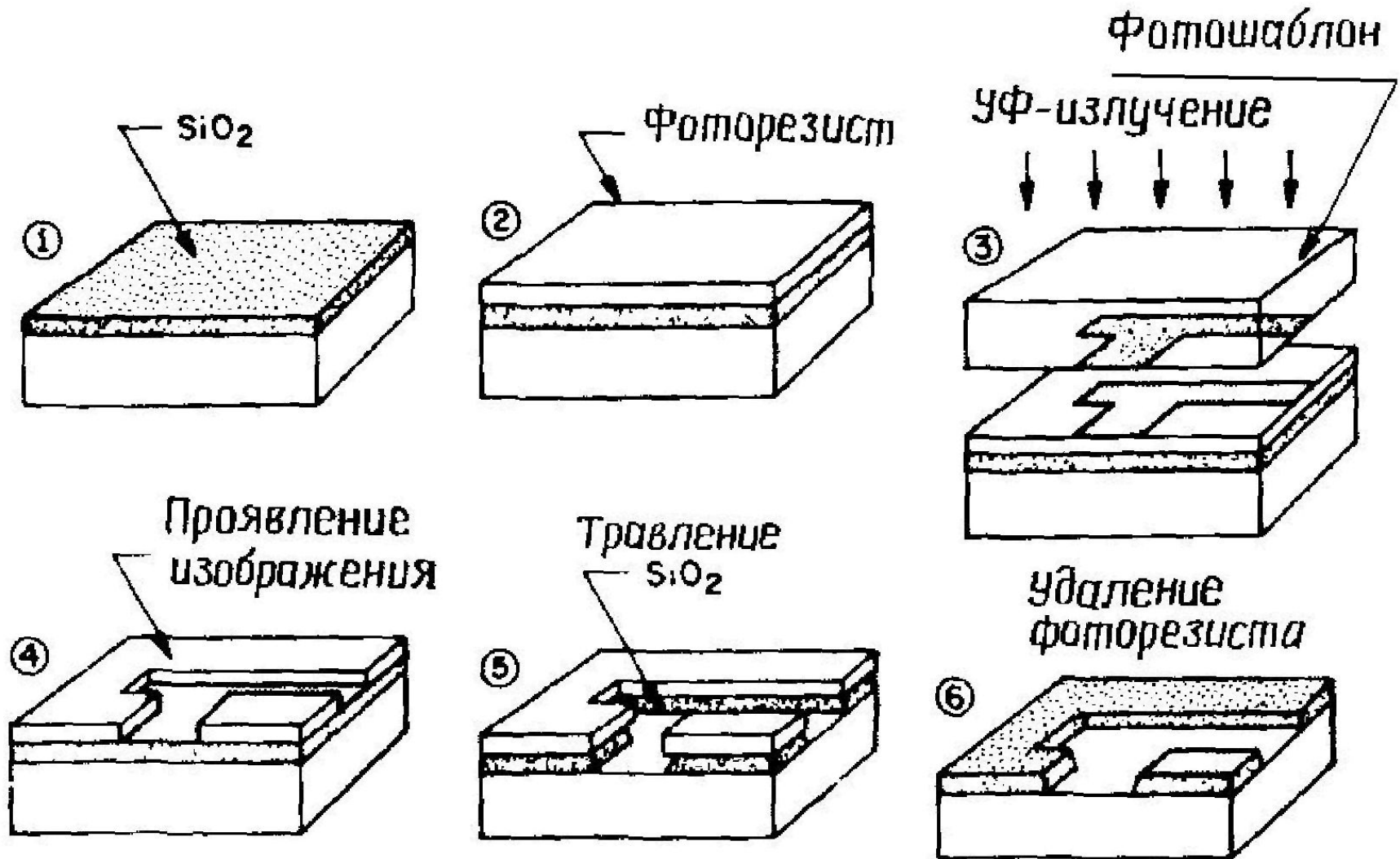
**На первой стадии процесса изготовления ИС после завершения испытаний или моделирования с помощью ЭВМ формируют геометрический рисунок топологии схемы. Процесс создания рисунка ИС разбивают на этапы: на одном этапе формируют электроды затвора, на втором контактные окна и т.п. Этим этапам соответствуют различные уровни фотошаблона.**

**С помощью ЭВМ геометрический рисунок топологии преобразуют в цифровые данные. С помощью этих данных генератор изображения формирует рисунок топологического слоя на шаблоне либо непосредственно на пластине.**

# **Формирование ИС**

**Законченные ИС получают последовательным переносом топологического рисунка с каждого шаблона, уровень за уровнем на поверхность кремниевой пластины. При этом между переносом топологического рисунка с двух шаблонов могут проводиться различные операции (ионной имплантации, диффузии, окисления, нанесение металлизации и т.п.)**

# Процесс литографического переноса изображения



# **Фотошаблоны. Основные термины**

**Фотошаблон** является основным инструментом литографии в планарной технологии. Для изготовления каждой ИС требуется комплект фотошаблонов из 4 – 15 (и более) стекол.

**Топология структуры** – рисунок (чертёж), включающий в себя размеры элементов структуры, их форму, положение и принятые допуски;

**Оригинал** – увеличенный, поддающийся воспроизведению рисунок отдельной детали фотошаблона, обычно одной или нескольких топологий структур изделия, предназначенной для изготовления фотошаблона методом последовательного уменьшения и мультипликации;

**Промежуточный оригинал** – фотошаблон с рисунком оригинала после его фотографического промежуточного уменьшения в один или несколько приёмов, с размножением изображения или без него;

**Фотошаблон** – плоско - параллельная пластина из прозрачного материала для фотолитографических целей с рисунком, состоящим из непрозрачных и прозрачных для света определенной длины волны участков, образующих топологию одного из слоёв структуры прибора, многократно повторённого в пределах активного поля структуры;

# **Фотошаблоны. Основные термины**

**Маска** – плоская пластина или плёнка, содержащая рисунок в виде сквозных окошек и предназначенная для локального экспонирования;

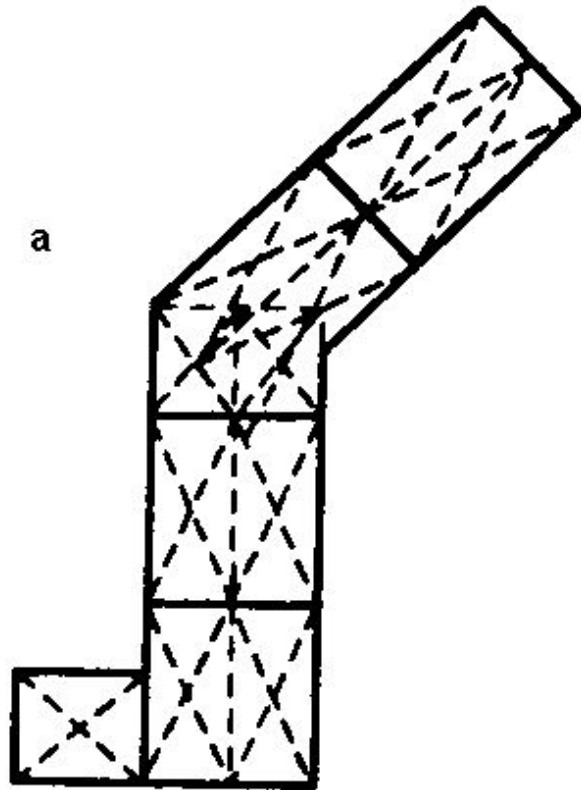
**Металлизированный фотошаблон** – фотошаблон, экспонирующий рисунок которого представляет собой тонкую металлическую плёнку, нанесённую на стеклянную подложку;

**Эталонный фотошаблон** – первый фотошаблон в процессе изготовления структур, с которого обычно получают рабочие или первичные копии фотошаблонов;

**Рабочий фотошаблон** – фотошаблон, применяемый в фотолитографическом процессе при изготовлении полупроводниковых структур контактной или проекционной печатью на полупроводниковых пластинах, покрытых слоем фоторезиста;

**Фигура совмещения** – специальный топологический рисунок в виде штриха, щели, креста и т.д. для облегчения юстировки рабочего фотошаблона при его совмещении с рисунком на полупроводниковой пластине.

# Генерация изображения методом микрофотонабора



а

Полученная в результате проектирования ИС информация о топологии в цифровом виде преобразуется **генератором изображения** в топологический рисунок на промежуточном шаблоне. Топологический рисунок генерируется методом **микрофотонабора**, т.е. разбиением элементов топологии на элементарные прямоугольники.

б



в

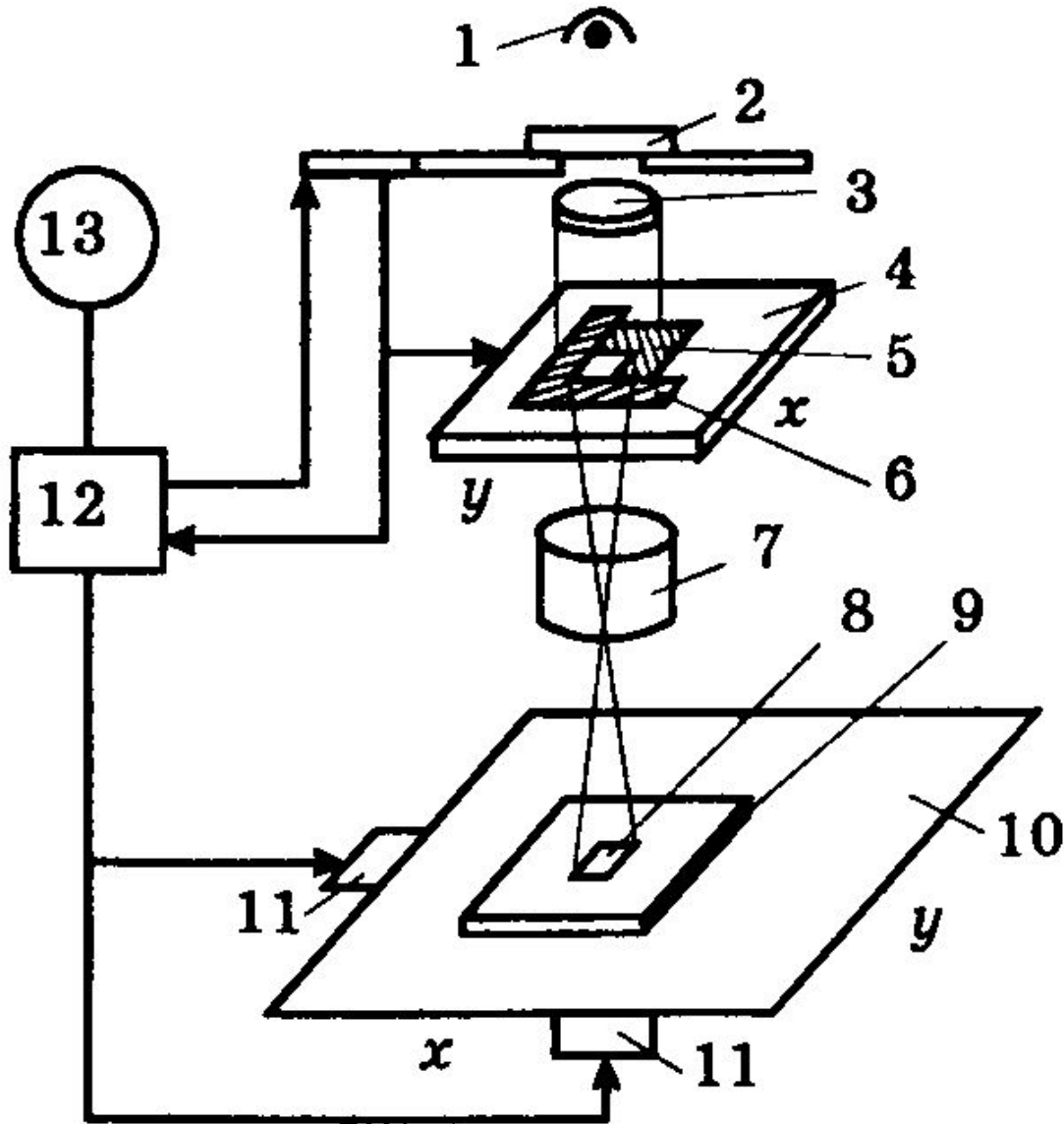


ху

а – генерация сложного топологического элемента;  
б, в – генерация простых топологических элементов



# Схема генератора изображения



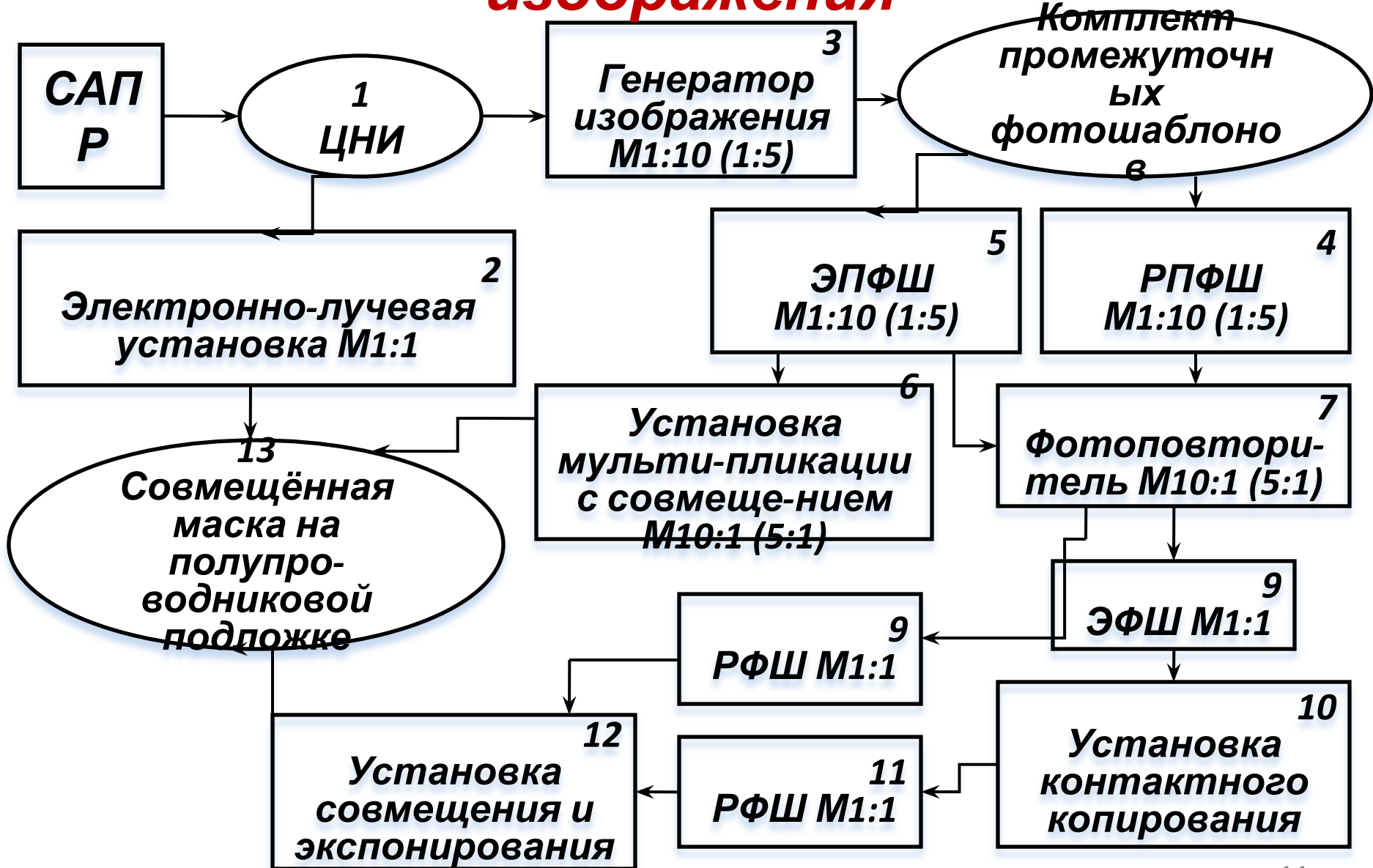
1 – источник излучения;  
2 – затвор; 3 – конденсор;  
4 – блок шторок; 5, 6 – неподвижная и подвижная шторки; 7 – проекционный объектив, передающий уменьшенное изображение; 8 – изображение элемента рисунка; 9 – слой фоторезиста; 10 – координатный стол с приводами; 11 – система контроля положения стола; 12 – ЭВМ; 13 – ввод информации.

# **Работа генератора изображения**

**Пучок света** от источника направлен сверху вниз. Установка работает с остановками стола в заданном положении во время экспонирования. **Элементарные прямоугольники** формируются **блоком шторок**, состоящим из неподвижной и подвижной шторок. Их взаимное расположение определяет размеры элементарного прямоугольника. **Координатный стол** обеспечивает точное перемещение пластины с фоторезистом по координатам  $X$  и  $Y$ .

Генератор изображения может формировать до 300 тыс. экспозиций в час. Для ИС с более чем 1 млн. элементов формирование 1 стекла фотошаблона займет несколько десятков часов.

# Маршруты генерации и переноса изображения



## **Маршруты изготовления фотошаблонов**

**Маршрут изготовления фотошаблонов выбирают исходя из степени сложности ИС. Чем короче маршрут генерации и переноса изображения, тем меньше вносимых дефектов.**

**Для ИС малой и средней степени интеграции выбирают маршрут: 1-3-5-7-9-10-11-12-13. Это обеспечивает высокую производительность и низкие затраты за счёт невысокой точности и высокого уровня дефектности.**

**Для ИС высокой степени интеграции требования к точности существенно возрастают. Это определяет маршрут: 1-3-4-7-8-12-13. Здесь низка производительность и высоки затраты.**

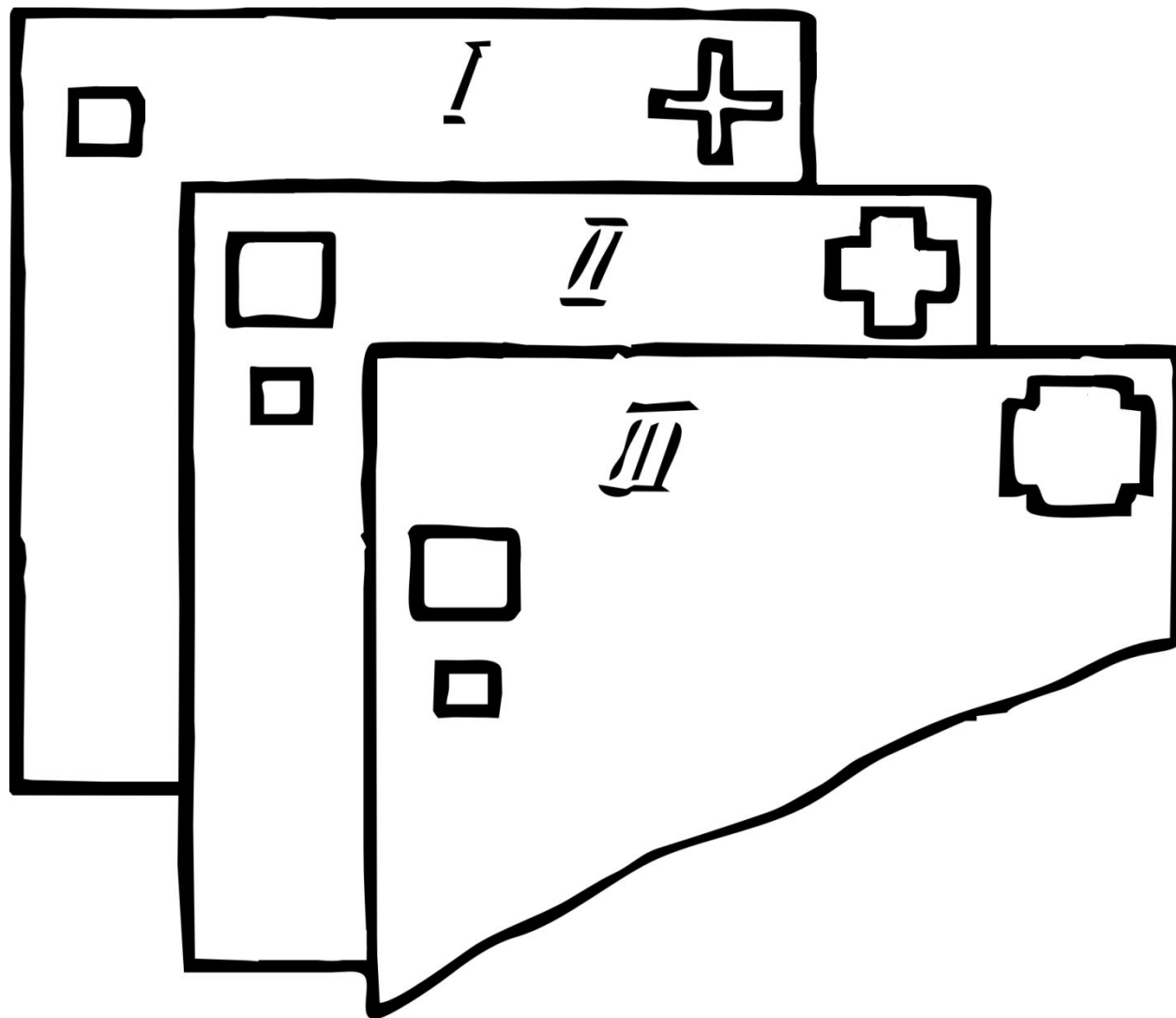
**В случае СБИС выбирают маршрут, обеспечивающий максимальную точность и минимальный уровень дефектности не смотря на низкую производительность и очень высокие затраты: 1 - 3 - 5 - 6 - 13.**

# Разновидности фотошаблонов

По технологии изготовления фотошаблоны делятся на:

- **металлизированные** – в качестве непрозрачных участков используются пленки металла (как правило, используют плёнки хрома, нанесенные ионным распылением из-за их хорошей адгезии к стеклу и высокой износостойкости);
- **эмульсионные** – используются плёнки органических эмульсий;
- **транспарентные** (полупрозрачные) – непрозрачные участки обладают селективной светонепроницаемостью, т.е. прозрачны для глаза оператора при  $\lambda > 0,55$  мкм и непрозрачны для УФ при  $\lambda = 0,35 - 0,45$  мкм ( $\text{CdSe}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ )

# Фигуры совмещения

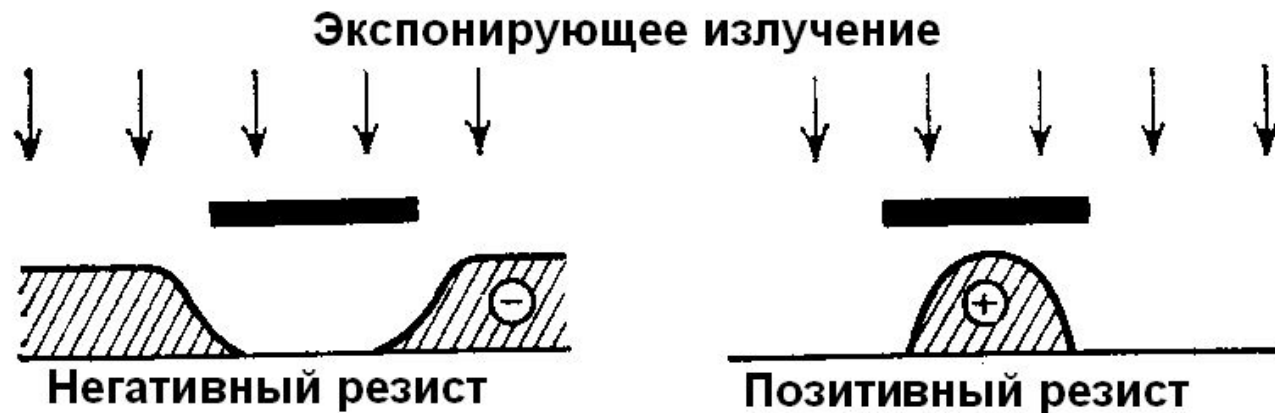
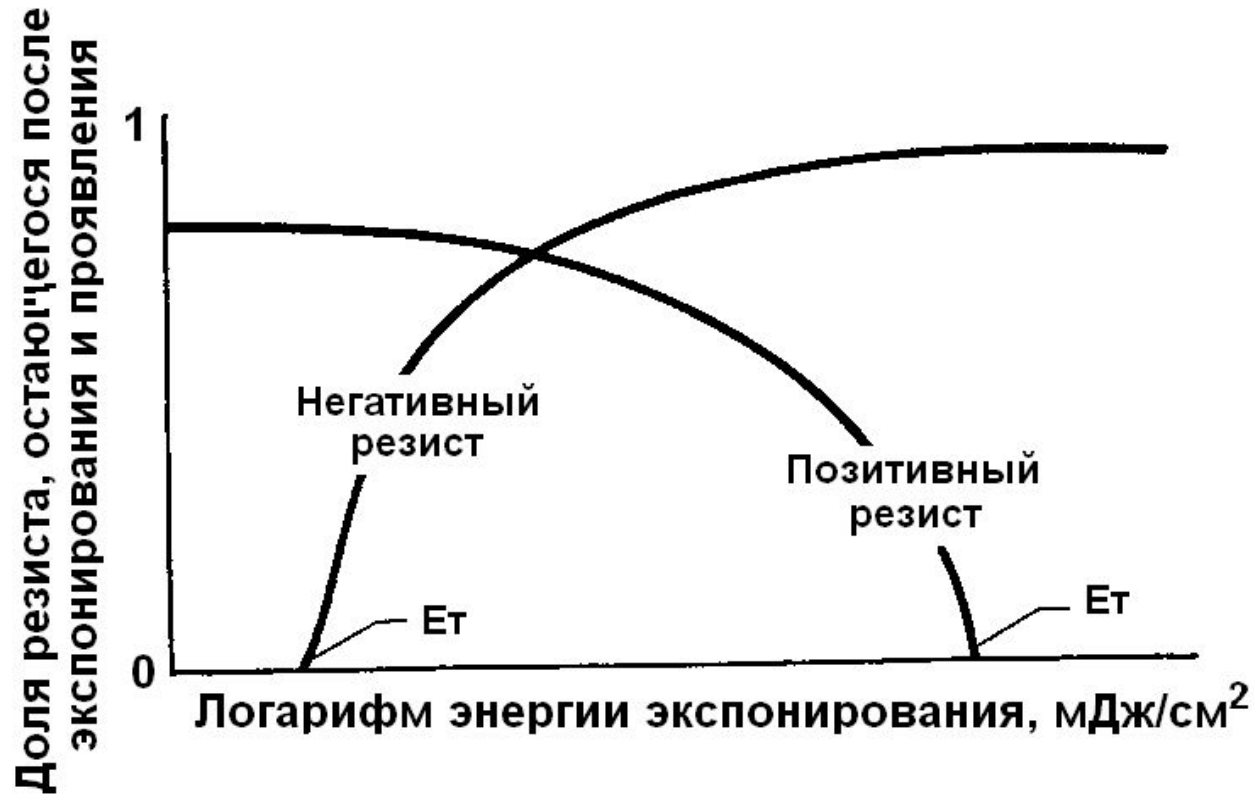


# **Фоторезисты**

**Фоторезисты** – светочувствительные полимерные композиции, в которых под действием света протекают необратимые химические реакции, приводящие к изменению их физических и химических свойств. Внешним проявлением действия света на фоторезисты – изменение характера их растворимости.

**В негативных фоторезистах (ФН)** растворимость экспонированного участка **уменьшается**, а в **позитивных фоторезистах (ФП)** – **возрастает**.

# Характеристики экспонирования резистов





# **Кинетика фотохимических реакций**

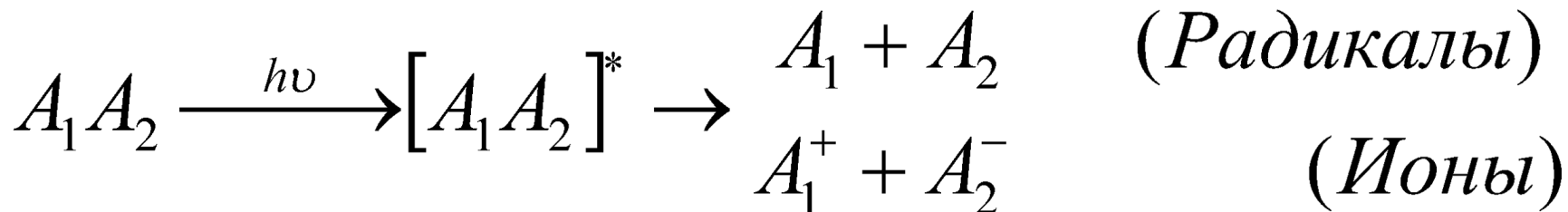
**Особенностью фотохимических реакций является то, что фотон действует селективно, возбуждая одну молекулу и не затрагивая остальные.**

**Кинетика:**

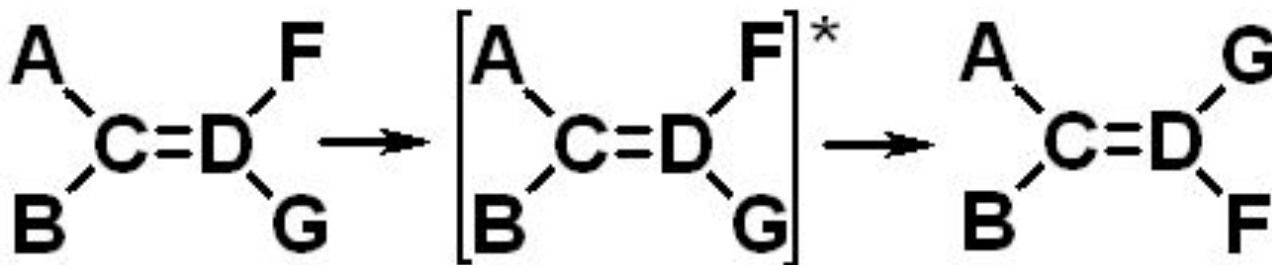
- поглощение фотона молекулой;**
- переход молекулы в возбуждённое состояние;**
- первичные фотохимические процессы с участием активных молекул;**
- вторичные «темновые» процессы между молекулами или комплексами, образующимися в результате первичных процессов.**

# Реакции, протекающие в резистах

1. **Фотолиз** – возбуждение молекулы и её распад под действием света:

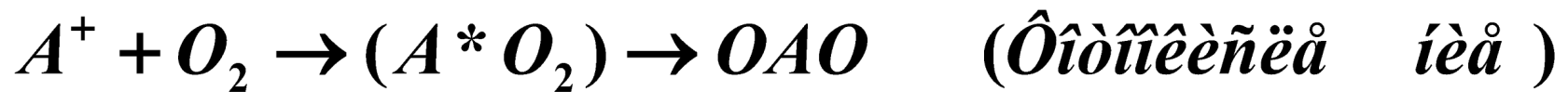


2. **Фотоперегруппировка** – перестановка атомов или радикалов в главной цепи молекулы под действием света:

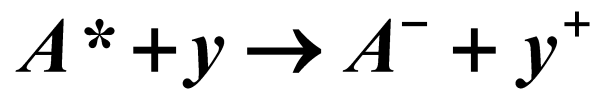


# Реакции, протекающие в резистах

3. **Фотоприсоединение** – присоединение активированной молекулой другой молекулы или молекул.



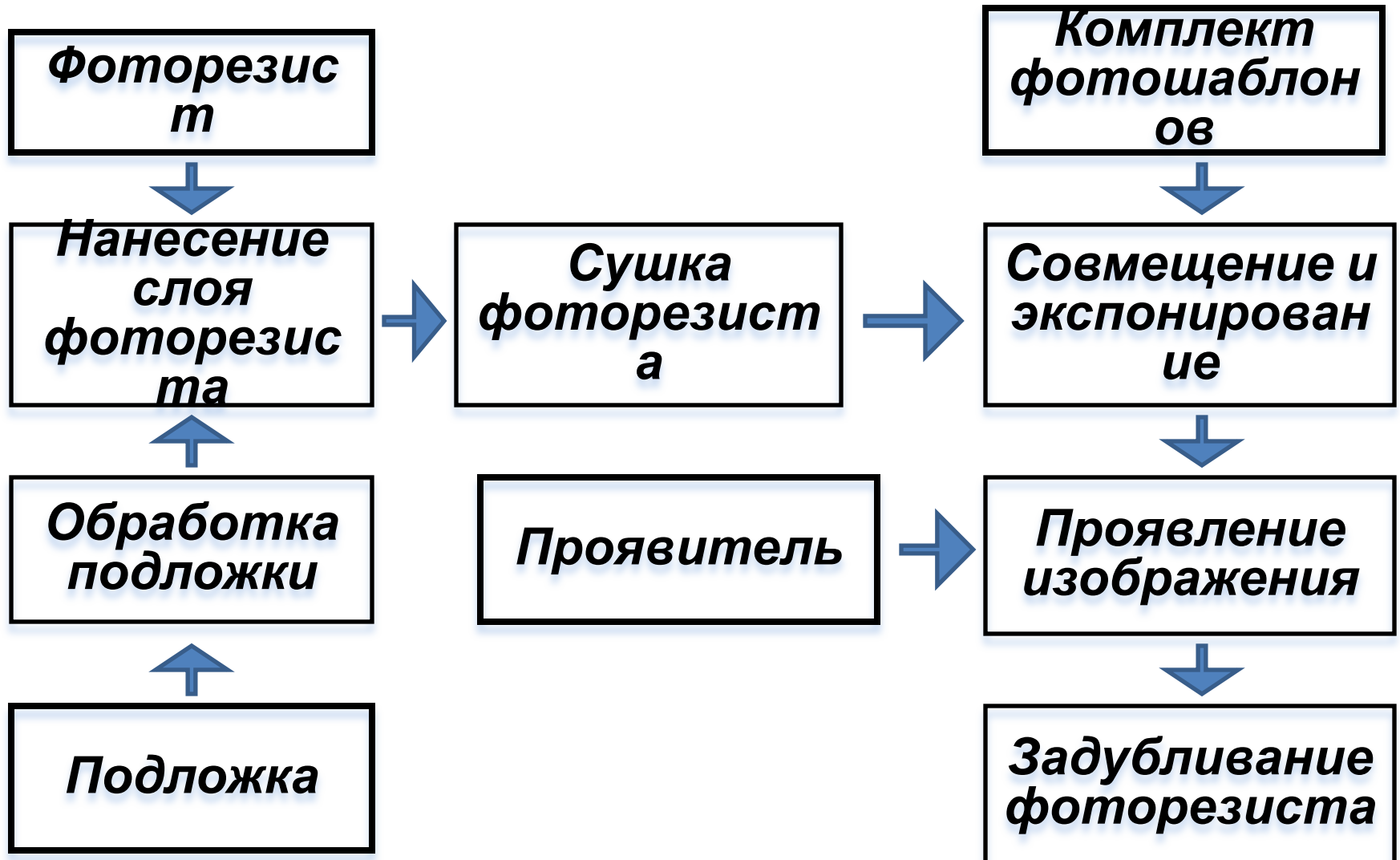
4. **Фотосенсибилизация** – передача электронной энергии возбуждения от одной молекулы (или ее части) к другой молекуле (или ее части).



# **Требования к фоторезистам**

- 1. Высокая светочувствительность в требуемом диапазоне длин волн.**
- 2. Высокая разрешающая способность (на современном уровне производства СБИС – до 5000 – 10000 линий/мм при толщине слоя фоторезиста до 0,1 мкм).**
- 3. Высокая адгезия к подложке (полупроводнику, оксиду, нитриду или металлу, другим функциональным слоям).**
- 4. Высокая контрастность (получение резко дифференцированной границы между экспонированными и неэкспонированными участками).**
- 5. Высокая устойчивость в химически агрессивных средах.**
- 6. Однородность свойств по всей поверхности слоя.**
- 7. Стабильность свойств во времени.**
- 8. Отсутствие загрязнений продуктами химических превращений.**
- 9. Доступность материалов, относительная простота, надежность и безопасность применения, возможность различных способов нанесения и др.**

# Схема технологического процесса фотолитографии



# **Обработка пластин**

**Обработка подложек производится с целью:**

- 1. Очистки подложек от загрязнений;**
- 2. Повышения адгезии фоторезиста.**

**В технологии ИИЭ фотолитографии подвергают технологические слои кремния, диоксида кремния, нитрида кремния, алюминия, фосфоросиликатного стекла.**

# **Удаление поверхностных загрязнений**

**Поверхностные загрязнения удаляют:**

- механическим способом с помощью кистей и щёток под струёй воды (ГМО) - ультразвуковой отмывкой;**
- потоком жидкости и газа;**
- растворением в органических растворителях;**
- обработкой в растворах ПАВ;**
- обработкой в неорганических кислотах.**

## **Обработка поверхности слоёв кремния $\text{SiO}_2$ и $\text{Si}_3\text{N}_4$**

**Данные слои не обладают высокой химической активностью. Как правило их обрабатывают в ПАР, нагретом до температуры 60 – 80 °С.**

**Часто в ПАР добавляют триаммонийную соль оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ТАСОЭДФ) для стабилизации перекиси водорода и смачивания поверхности.**

**Иногда в состав ПАР вводят хлористый аммоний для улучшения сорбционной способности по отношению к тяжёлым металлам, а также комплексообразователи для щелочных металлов.**

**В МОП - технологии перед обработкой диффузионных слоёв в ПАР, как правило, проводят обработку в смеси КАРО с целью уменьшения плотности заряда в окисле.**



# **Обработка поверхности металла**

**В технологии ИС для металлизированной разводки, как правило, используют алюминий и его сплавы с кремнием (до 5 %), которые обладают высокой химической активностью.**

**Поверхность алюминия обрабатывают в органических растворителях (диметилформамиде (ДМФ), изопропиловом спирте). Для удаления механических загрязнений используют также ДМФ в сочетании с ультразвуковой обработкой.**

**Также для очистки алюминиевой поверхности используют обработку в очищающем растворе, состоящем из перекиси водорода (200 мл), воды (800 мл), смачивателя (0,2 г/л), ТАСОЭДФ (4 г/л), при температуре 60 – 70 °С в течение 10 – 12 мин.**

# **Обработка поверхности фосфоросиликатного стекла**

**ФСС также обладает высокой химической активностью, особенно к щелочным средам.**

**Скорость травления ФСС в ПАР при температуре 75 °С составляет 0,1 – 0,3 мкм/мин.**

**Поэтому поверхность слоёв ФСС обрабатывают на установках ГМО или в смесях КАРО при температуре 120 – 170 °С в течение 1 – 5 минут с последующей промывкой в деионизованной воде.**

# **Адгезия для фотолитографических процессов**

**Адгезия – способность фоторезиста препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру создаваемого рельефа рисунка элементов.**

**Критерием адгезии является время, отрыва слоя фоторезиста заданных размеров от подложки в ламинарном потоке травителя. Адгезию считают хорошей, если слой фоторезиста  $20 \times 20$  мкм отрывается за 20 мин. Для обеспечения адгезии необходимо чтобы поверхность подложки была гидрофильна по отношению к фоторезисту и гидрофобна к травителю.**

## **Обработка, повышающая адгезию фоторезиста**

**Сразу после термического окисления плёнка  $\text{SiO}_2$  гидрофобна. Через некоторое время на ней адсорбируются молекулы воды из атмосферы и она становится гидрофильной. Образовавшаяся плёнка воды препятствует адгезии фоторезиста к поверхности слоя  $\text{SiO}_2$ .**

**Для улучшения адгезии подложки перед нанесением фоторезиста отжигают при температуре 700 – 800 °С в сухом инертном газе. Подложки с плёнками ФСС обрабатывают при температуре 100 – 500 °С в сухом инертном газе в течение 1 часа.**

**Для удаления влаги с поверхности применяют также обработку в гексаметилдесилазане (ГМДС).**

# Нанесение фоторезиста

Операция представляет собой процесс создания на поверхности подложки однородного слоя толщиной 1 – 3 мкм.

Наибольшее распространение в промышленности получил способ нанесения фоторезиста центрифугированием. При включении центрифуги фоторезист растекается по поверхности подложки под действием центробежной силы. Слой фоторезиста толщиной  $h$  на границе с подложкой формируется за счет уравновешивания этой силы и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул фоторезиста:

$$h = A \sqrt{\nu / \omega}$$

где  $A$  - коэффициент пропорциональности,  $\nu$  – вязкость,  $\omega$  - частота вращения.

# Сушка фоторезиста

Способствует окончательному формированию структуры слоя фоторезиста. В процессе сушки из фоторезиста удаляется растворитель и происходят сложные релаксационные процессы, уплотняющие молекулярную структуру слоя, уменьшающие внутренние напряжения и повышающие его адгезию к подложке.

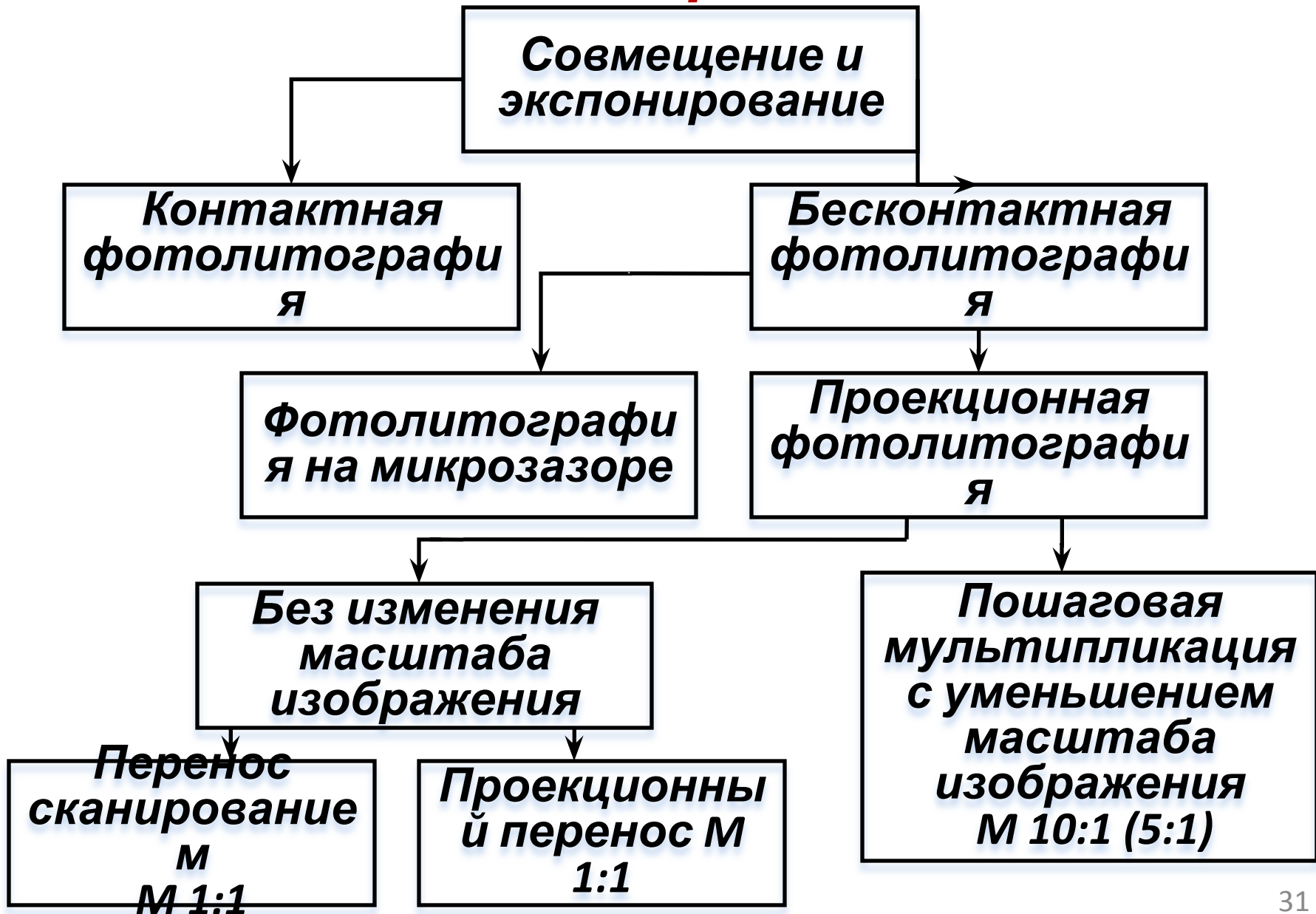
Основными режимами сушки являются:

- **температура** сушки (90 – 120 °С);
- **время** сушки (10 – 30 мин.);
- **скорость подъёма и спада** температуры.

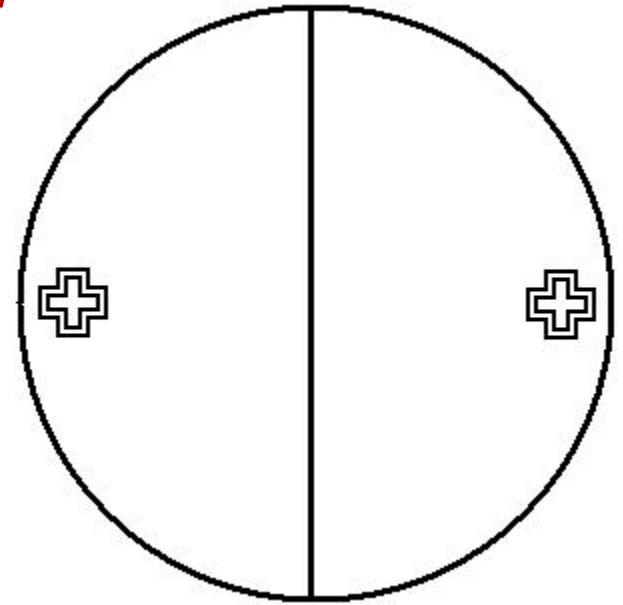
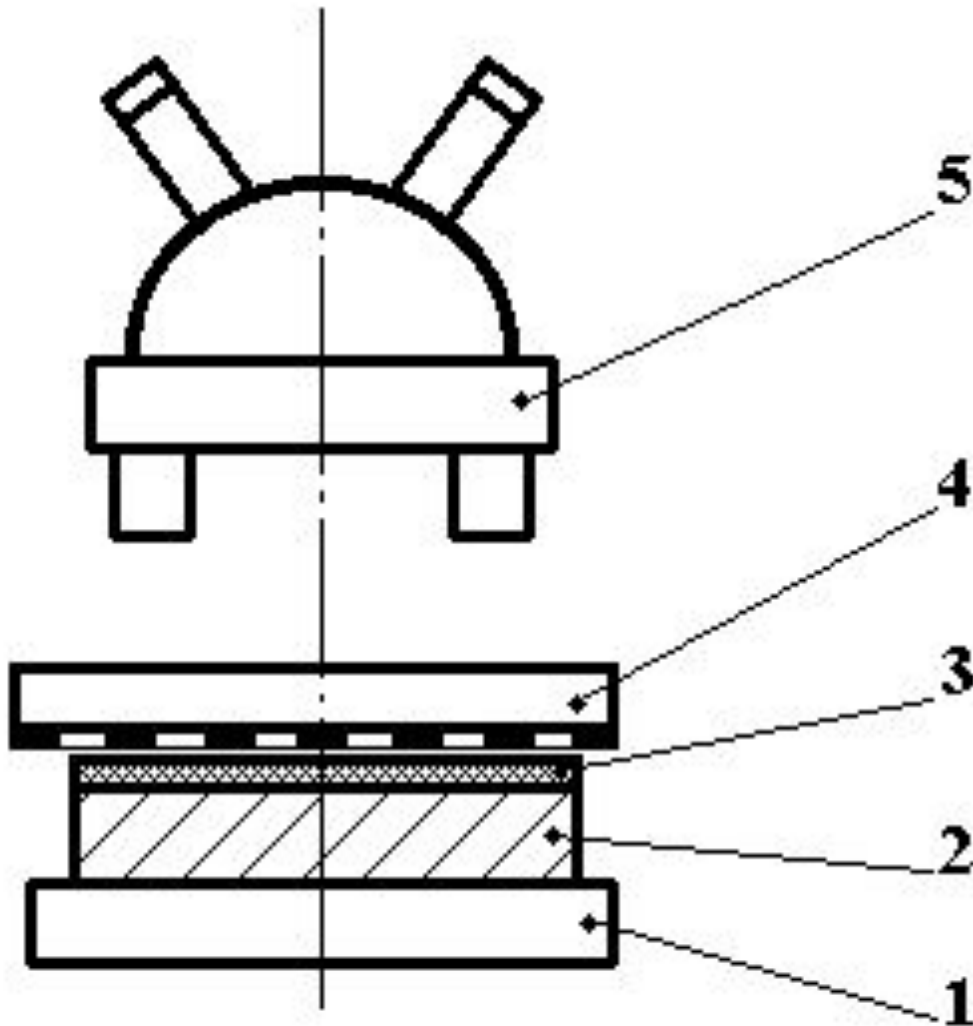
По способу подвода тепла различают 3 вида сушки:

- **конвективная сушка** (в термостате);
- **ИК – сушка**;
- **СВЧ – сушка**.

# Методы совмещения и экспонирования



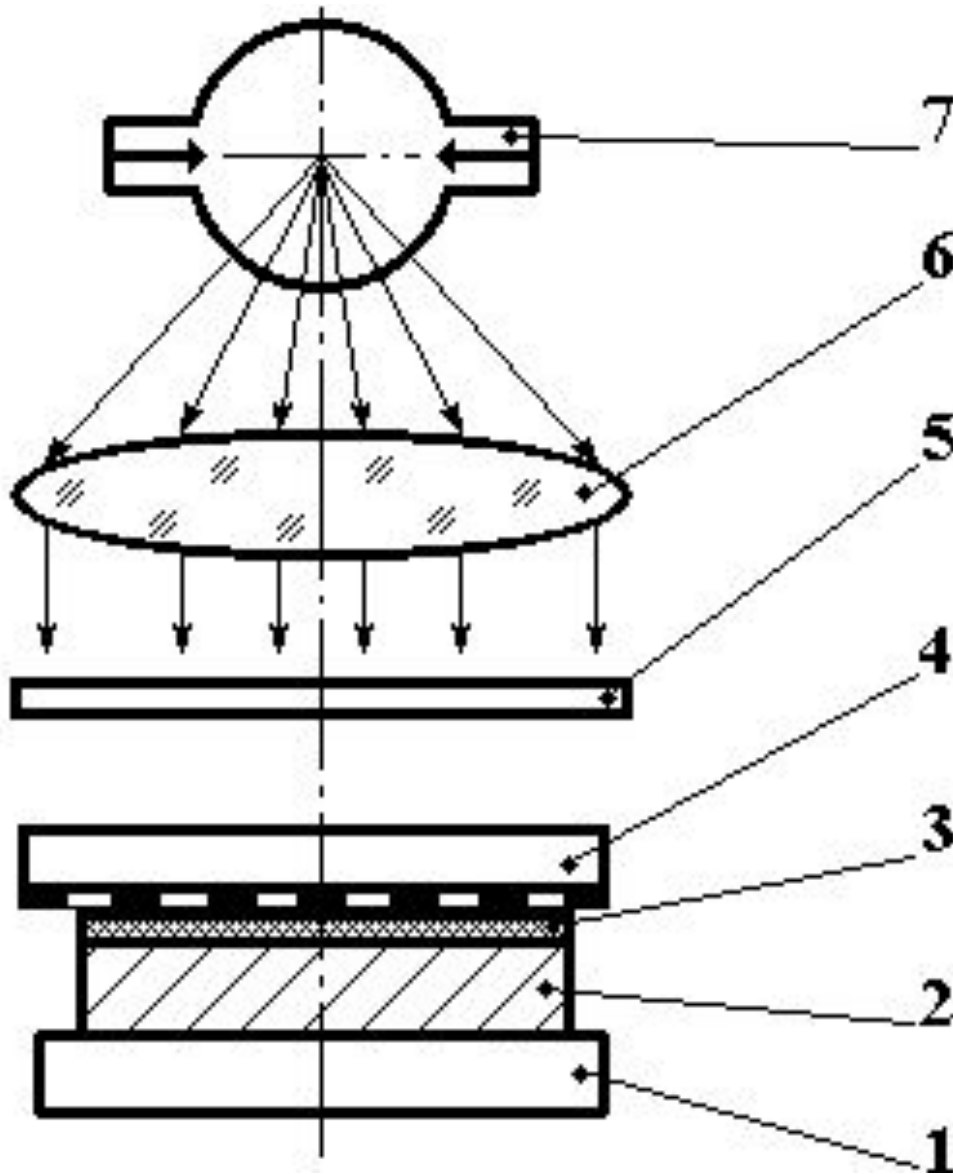
# **Контактная фотолитография схема совмещения**



**1 - предметный столик;  
2 - подложка;  
3 - слой фоторезиста;  
4 - фотошаблон;  
5 - микроскоп**

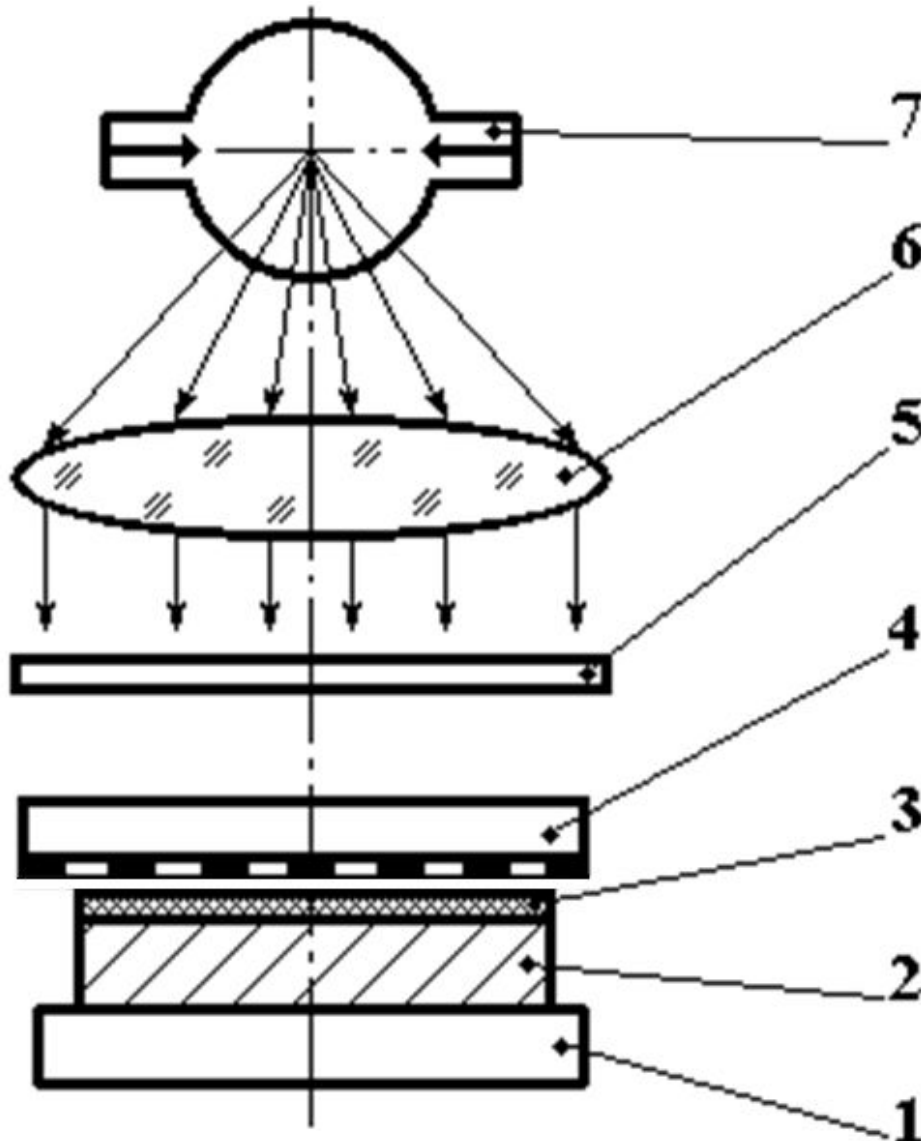


# Контактная фотолитография схема экспонирования



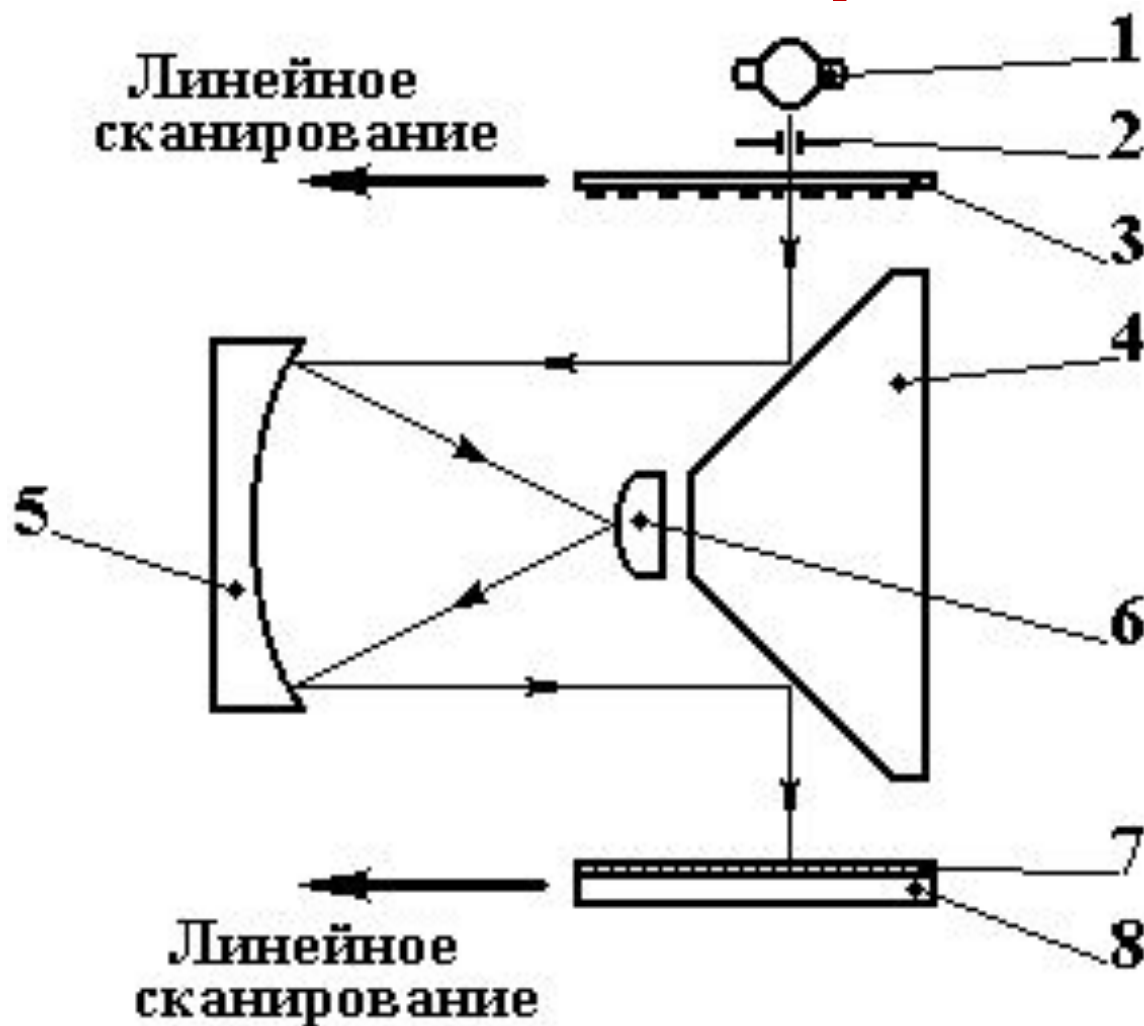
1 - предметный  
стол; 2 – подложка;  
3 - слой  
фоторезиста; 4 –  
фотошаблон;  
5 - затвор; 6 –  
конденсор; 7 –  
источник света

# Фотолитография на микрозоре

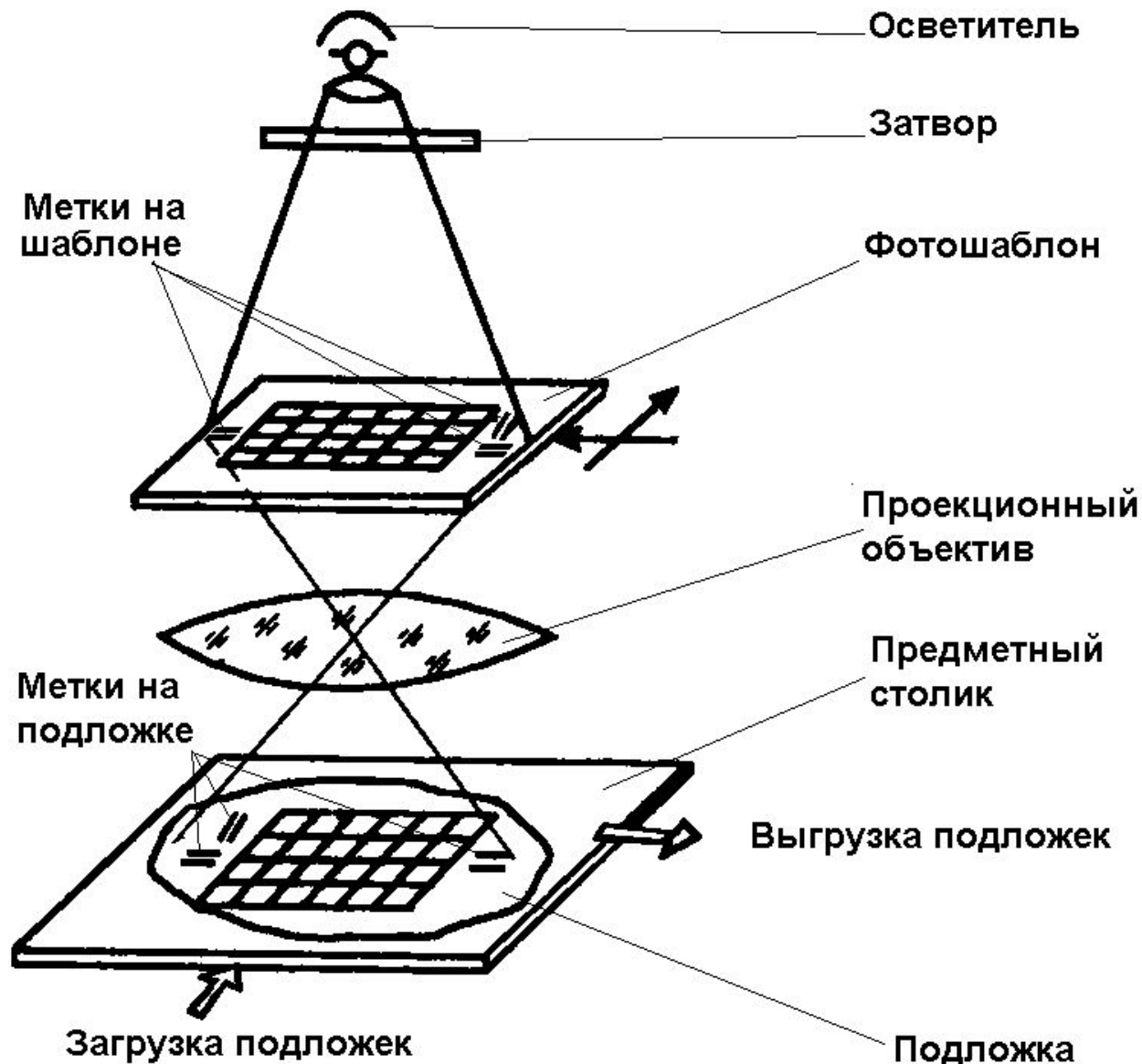


**1 - предметный  
стол; 2 – подложка;  
3 - слой  
фоторезиста; 4 –  
фотошаблон;  
5 - затвор; 6 –  
конденсор; 7 –  
источник света**

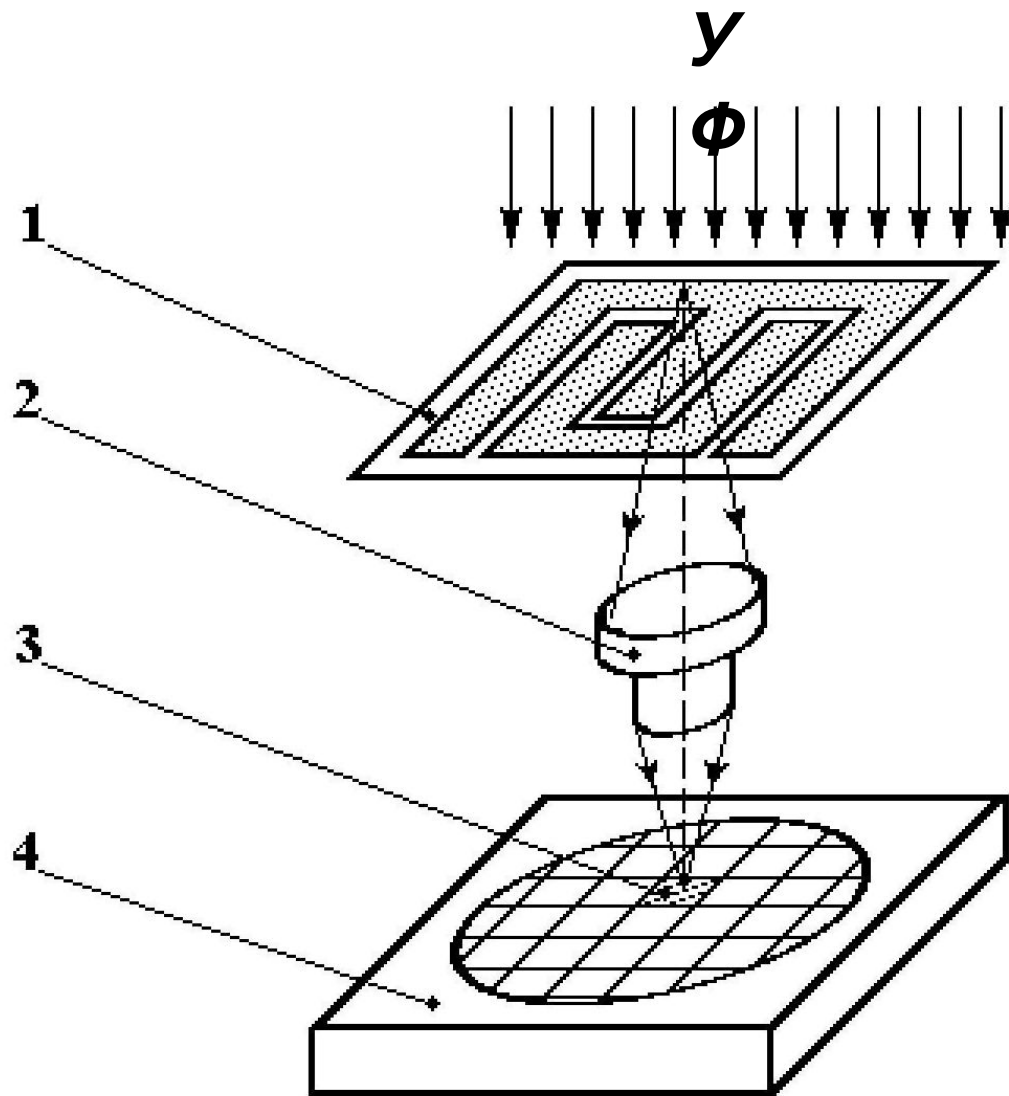
# Схема проекционного экспонирования со сканированием



# Проекционная фотолитография без изменения масштаба



# Схема пошаговой мультипликации с уменьшением масштаба



**1 - фотошаблон;**  
**2 - проекционный объектив;**  
**3 - подложка со**  
**слоем**  
**фоторезиста;**  
**4 - двухкоординат-**  
**ный стол**

# Проявление фоторезиста

**Служит для окончательного формирования изображения схемы в плёнке фоторезиста. При этом в зависимости от типа фоторезиста удаляются экспонированные или неэкспонированные участки. В результате на подложке остаётся защитная маска требуемой конфигурации.**

**Проявители для негативных фоторезистов – органические растворители: толуол, бензол, уайт-спирит, трихлорэтилен, хлорбензол и др.**

**Проявители для позитивных фоторезистов – слабые водные и глицериновые растворы щелочей: 0,3 – 0,6 % раствор КОН, 1 -2 % раствор тринатрийфосфата.**

**Методы проявления фоторезиста: пульверизация, окунание подложки, полив подложки.**

## **Задубливание**

**Проводят при более высокой температуре, чем сушка.**

**Задубливание обеспечивает:**

**- повышение стойкости маски ФР к действию травителей;**

**- повышает адгезию маски ФР к подложке.**

**При задубливании в результате воздействия температуры происходит окончательная полимеризация фоторезиста, а также затягивание (залечивание) мелких пор, отверстий и несквозных дефектов.**

# Пути повышения разрешающей способности фотолитографии

Минимальные размеры элементов современных ИИЭ составляют 32 – 65 нм.

При этом основным методом формирования топологического рисунка на данном этапе остаётся проекционная фотолитография путем пошаговой мультипликации.

$$B_{\min} = 0,61 \times \frac{\lambda}{NA}$$

**$B_{\min}$**  – минимальный размер элемента,  **$\lambda$**  – длина волны УФ-излучения,  **$NA$**  – числовая апертура проекционного объектива

$$NA = n \sin \alpha$$

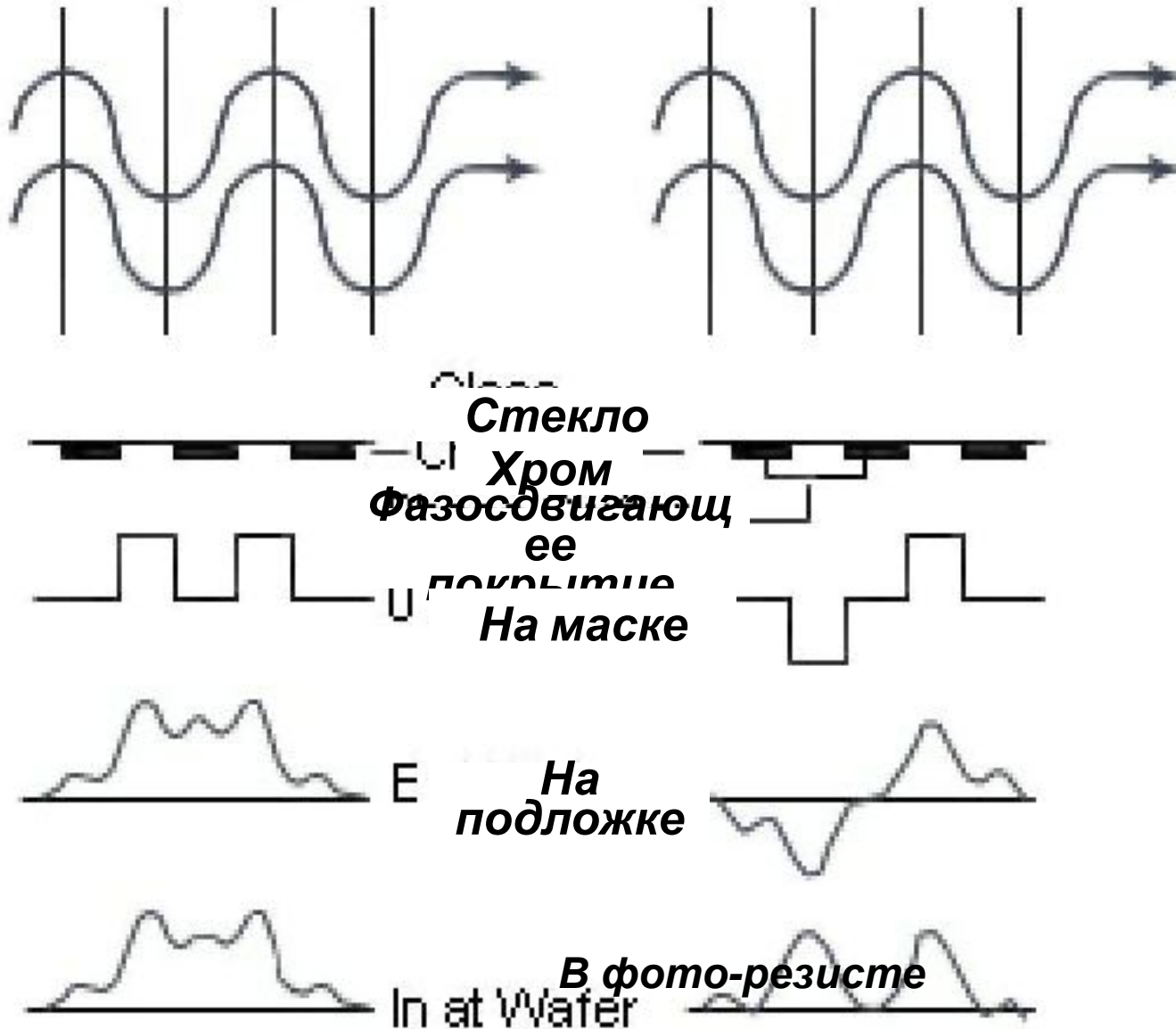
**$n$** - коэффициент преломления среды,  **$\alpha$**  - половина угла расхождения лучей.



## **Эволюция источников УФ излучения**

<b><i>g-линия Hg</i></b>	<b><i>436 nm</i></b>
<b><i>i-линия Hg</i></b>	<b><i>365 nm</i></b>
<b><i>KrF (эксимерный лазер на фториде криптона)</i></b>	<b><i>248 nm</i></b>
<b><i>ArF (эксимерный лазер на фториде аргона)</i></b>	<b><i>193 nm</i></b>
<b><i>F<sub>2</sub> лазер</i></b>	<b><i>157 nm</i></b>
<b><i>EUV (extreme ultra violet)</i></b>	<b><i>13,5 nm</i></b>

# Фотолитография с фазосдвигающей маской



# Схема иммерсионной фотолитографии



# Схема фотолитографии на сверхжестком УФ

