

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

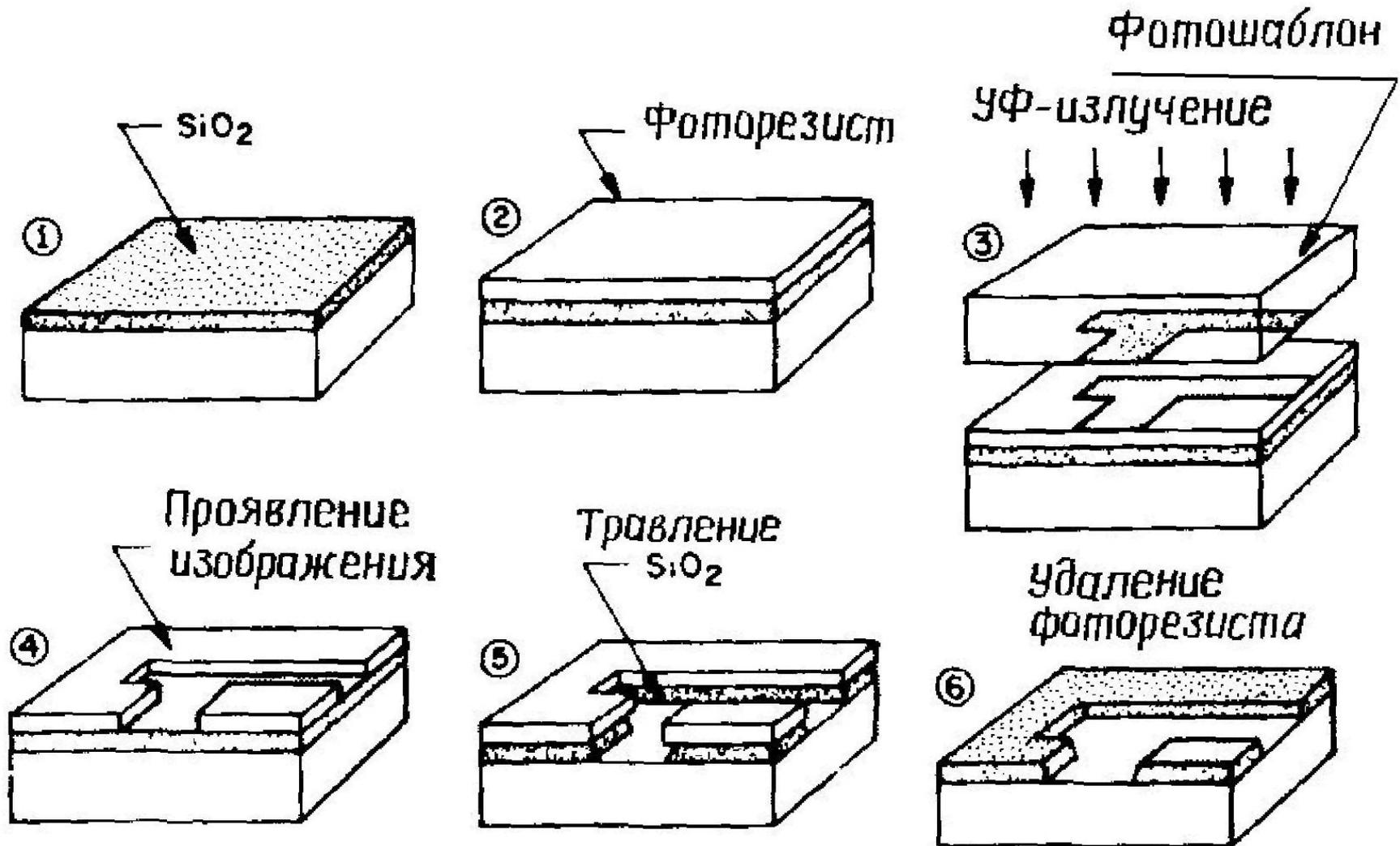
На первой стадии процесса изготовления ИС после завершения испытаний или моделирования с помощью ЭВМ формируют геометрический рисунок топологии схемы. Процесс создания рисунка ИС разбивают на этапы: на одном этапе формируют электроды затвора, на втором контактные окна и т.п. Этим этапам соответствуют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

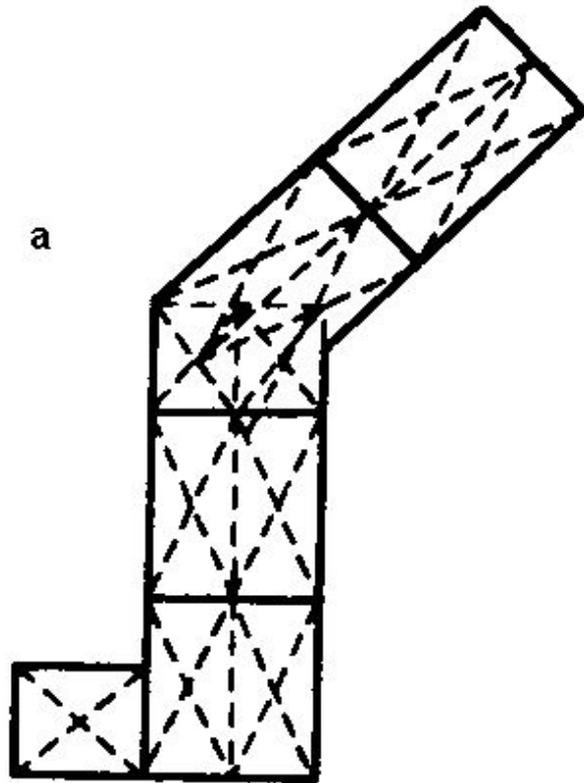
Металлизированный фотошаблон – фотошаблон, экспонирующий рисунок которого представляет собой тонкую металлическую плёнку, нанесённую на стеклянную подложку;

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

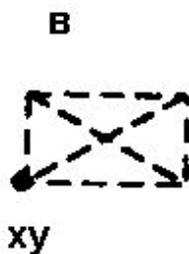
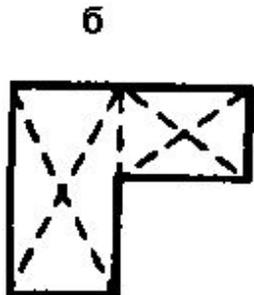
Рабочий фотошаблон – фотошаблон, применяемый в фотолитографическом процессе при изготовлении полупроводниковых структур контактной или проекционной печатью на полупроводниковых пластинах, покрытых слоем фоторезиста;

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

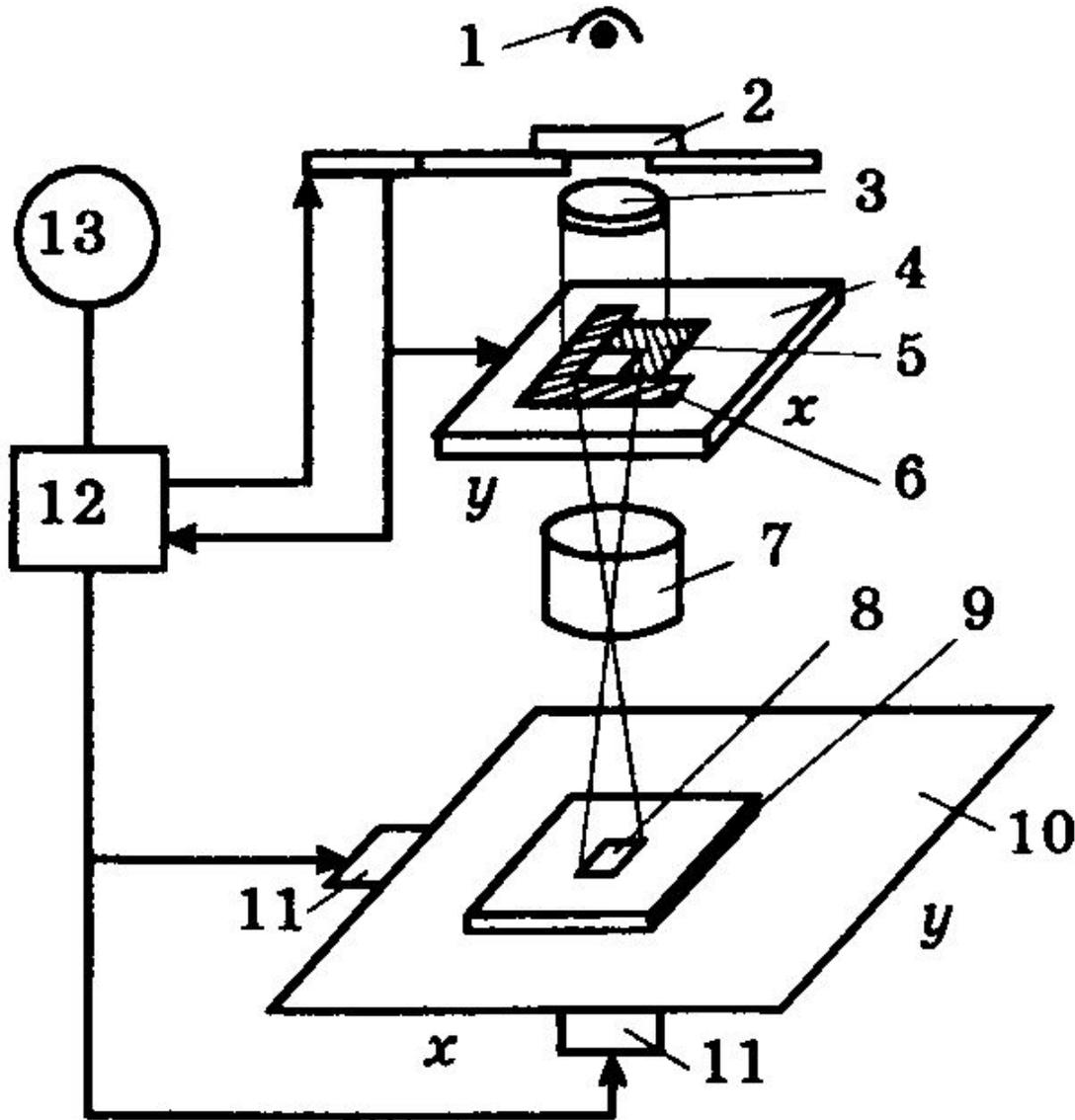


Полученная в результате проектирования ИС информация о топологии в цифровом виде преобразуется **генератором изображения** в топологический рисунок на промежуточном шаблоне. Топологический рисунок генерируется методом **микрофотонабора**, т.е. разбиением элементов топологии на элементарные прямоугольники.



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

Схема генератора изображения



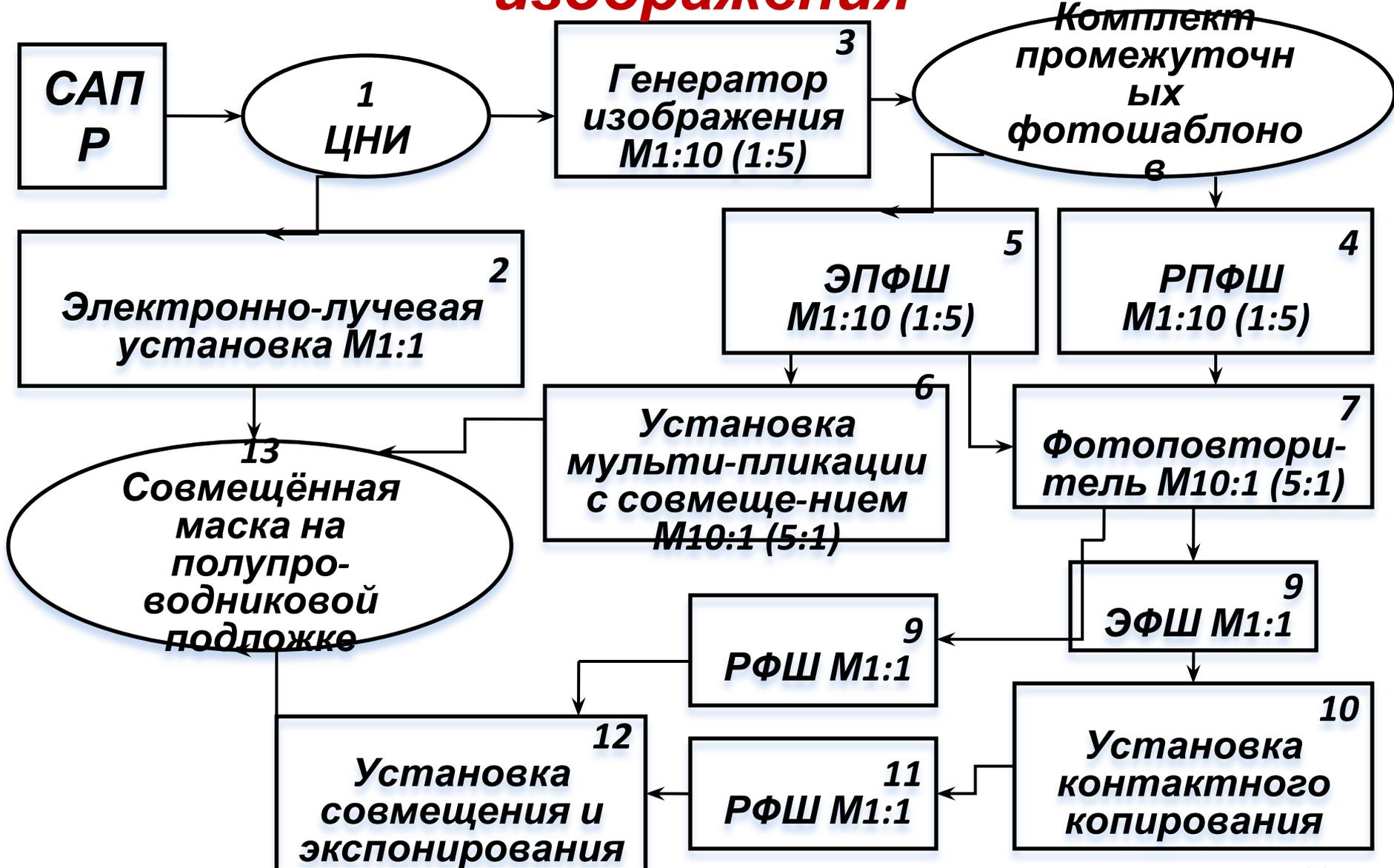
1 – источник излучения;
2 – затвор; 3 – конденсор;
4 – блок шторок; 5, 6 – неподвижная и подвижная шторки; 7 – проекционный объектив, передающий уменьшенное изображение; 8 – изображение элемента рисунка; 9 – слой фоторезиста; 10 – координатный стол с приводами; 11 – система контроля положения стола;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

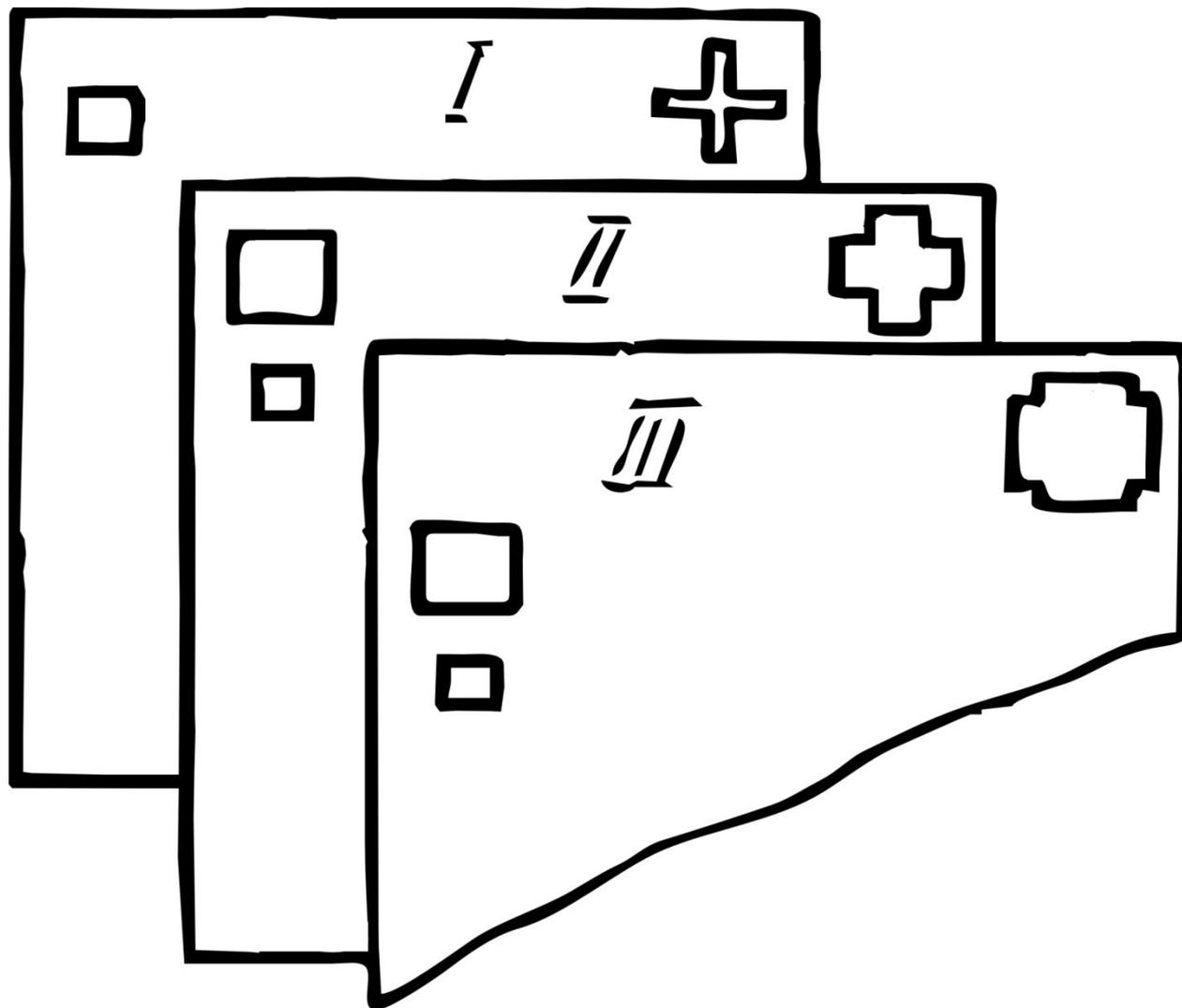
В случае **СБИС** выбирают маршрут, обеспечивающий максимальную точность и минимальный уровень дефектности не смотря на низкую производительность и очень высокие затраты: **1 - 3 - 5 - 6 - 13**.

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 (CdSe , Fe_2O_3 , SiO_2)

Фигуры совмещения

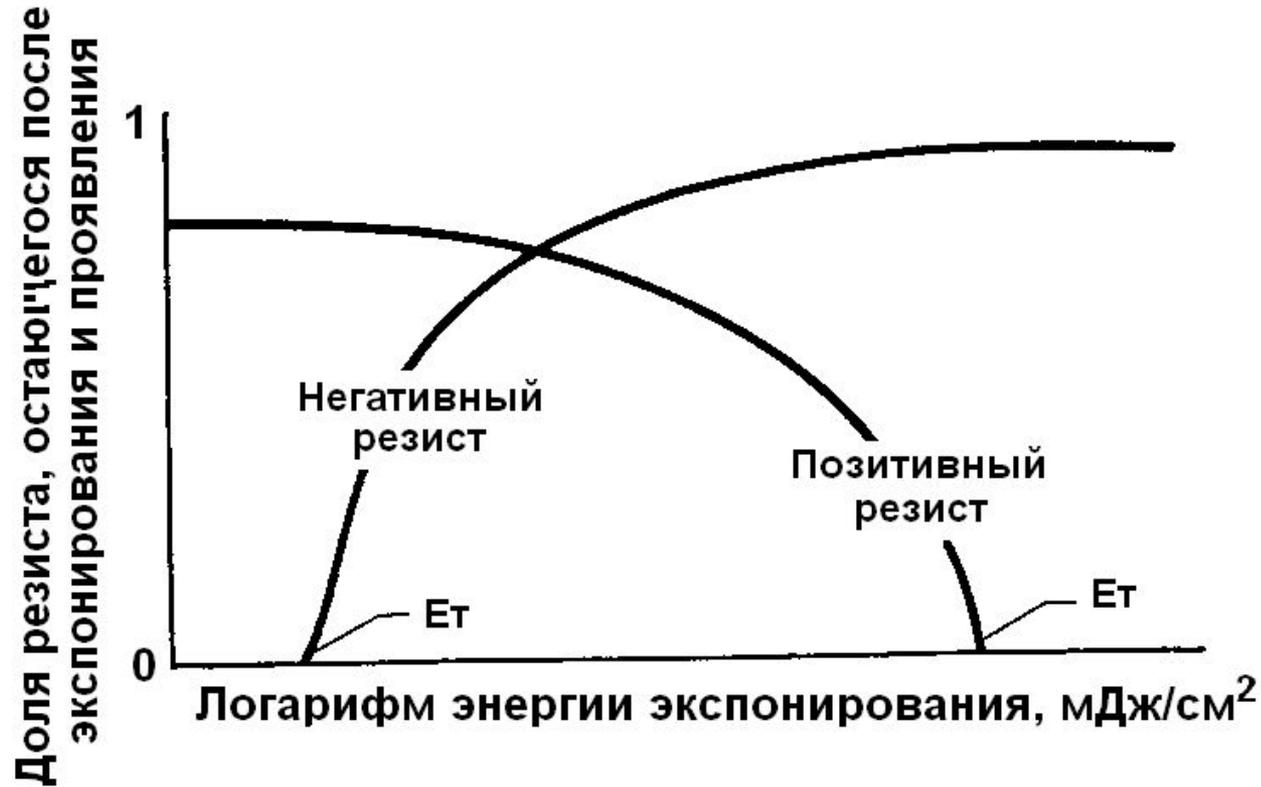


Фоторезисты

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

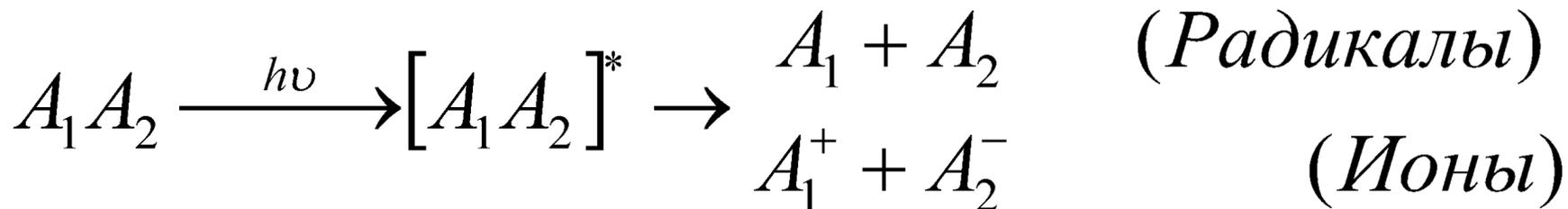
Особенностью фотохимических реакций является то, что фотон действует селективно, возбуждая одну молекулу и не затрагивая остальные.

Кинетика:

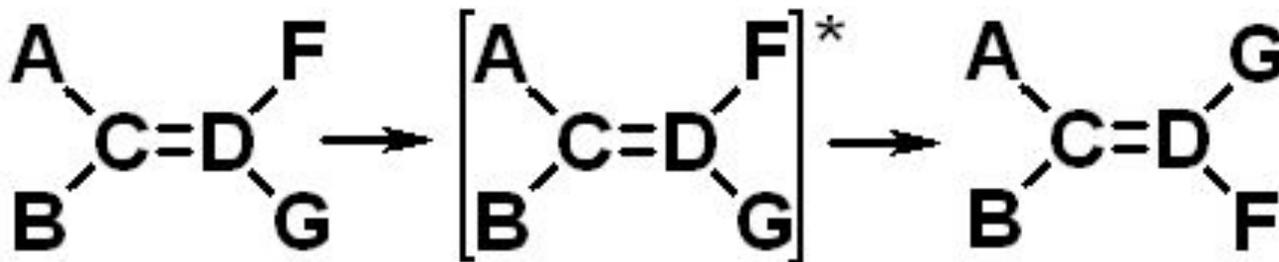
- поглощение фотона молекулой;**
- переход молекулы в возбуждённое состояние;**
- первичные фотохимические процессы с участием активных молекул;**
- вторичные «темновые» процессы между молекулами или комплексами, образующимися в результате первичных процессов.**

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.



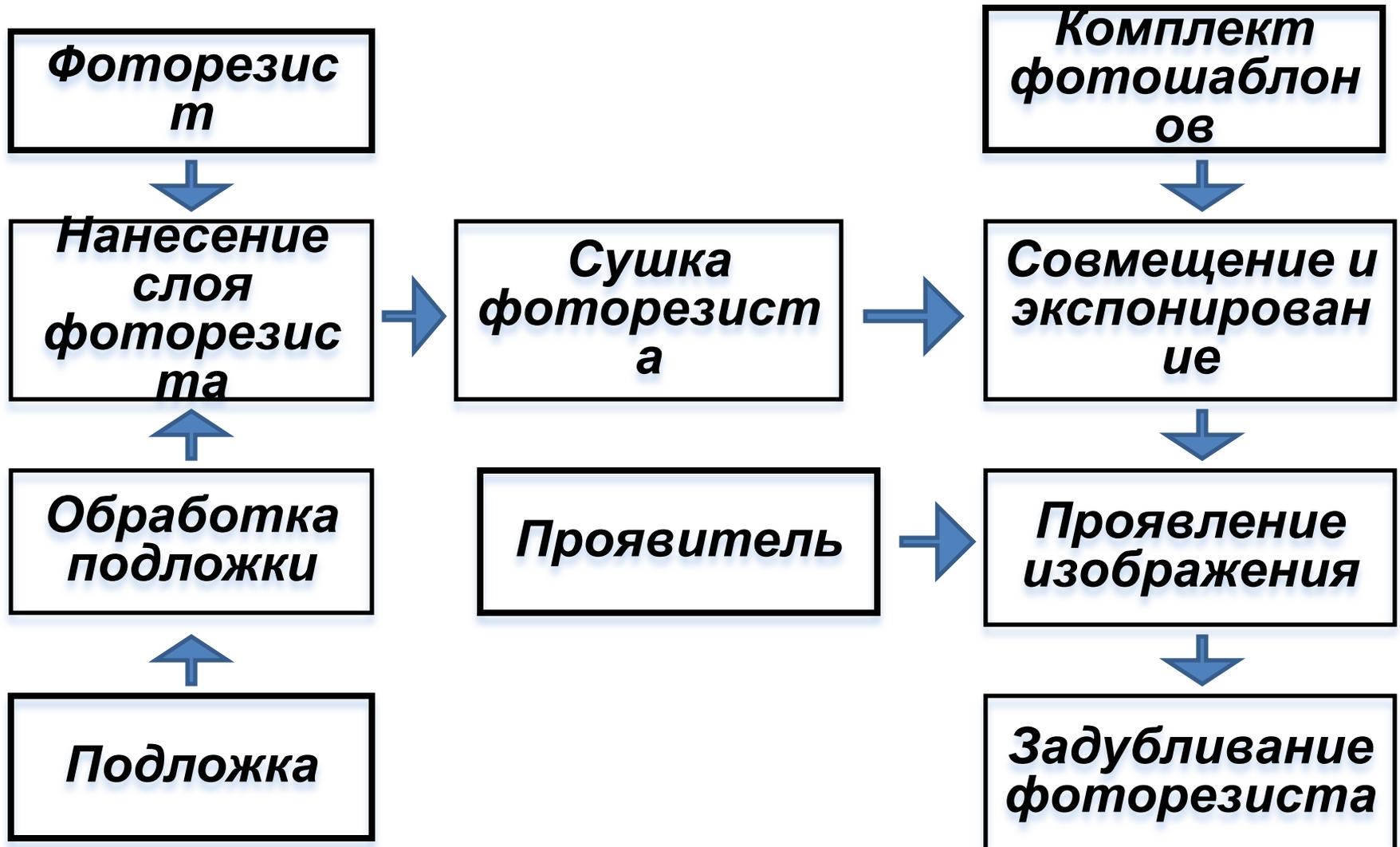
4. **Фотосенсибилизация** – передача электронной энергии возбуждения от одной молекулы (или ее части) к другой молекуле (или ее части).



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 SiO_2 и Si_3N_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 20×20 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 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 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, ν – вязкость, ω - 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.

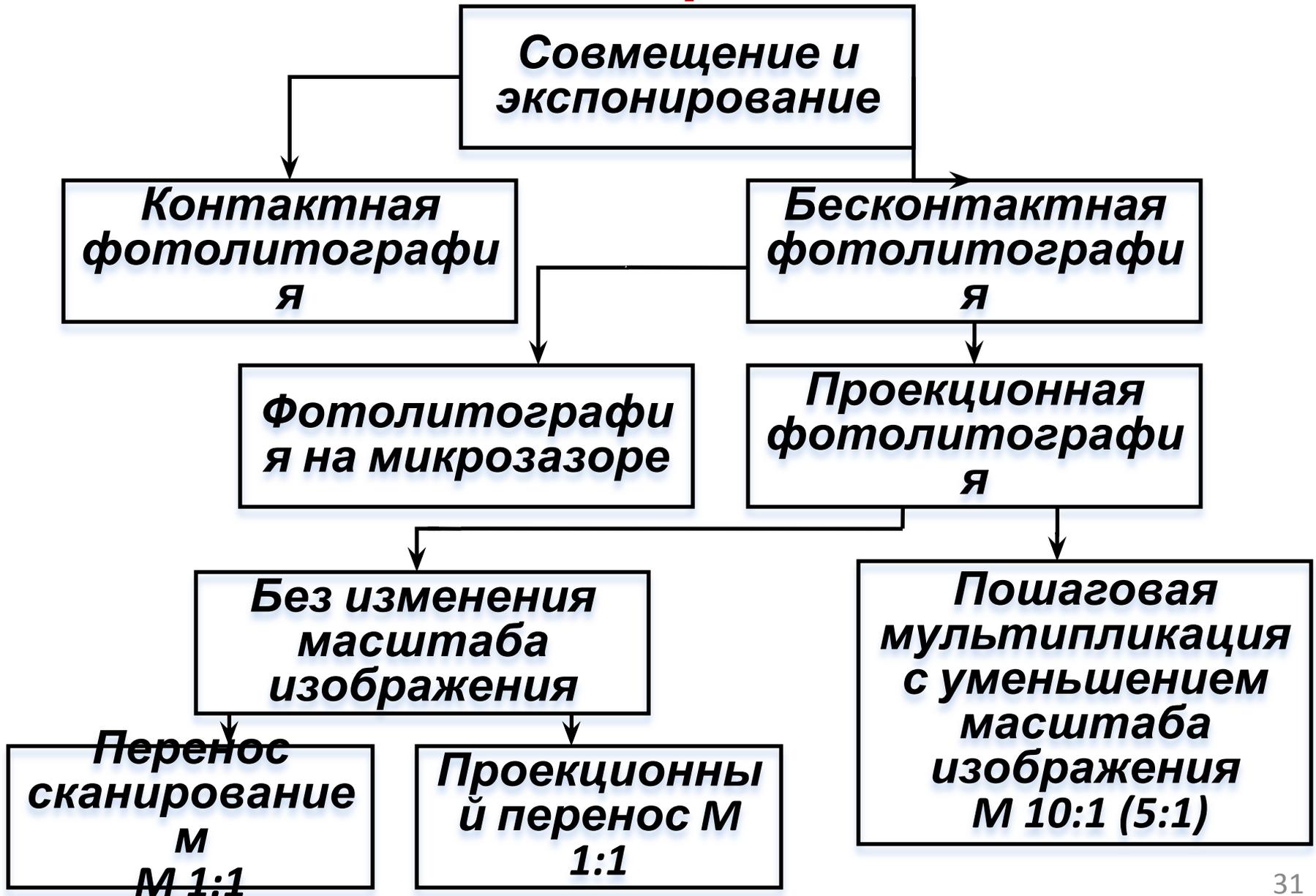
Основными режимами сушки являются:

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

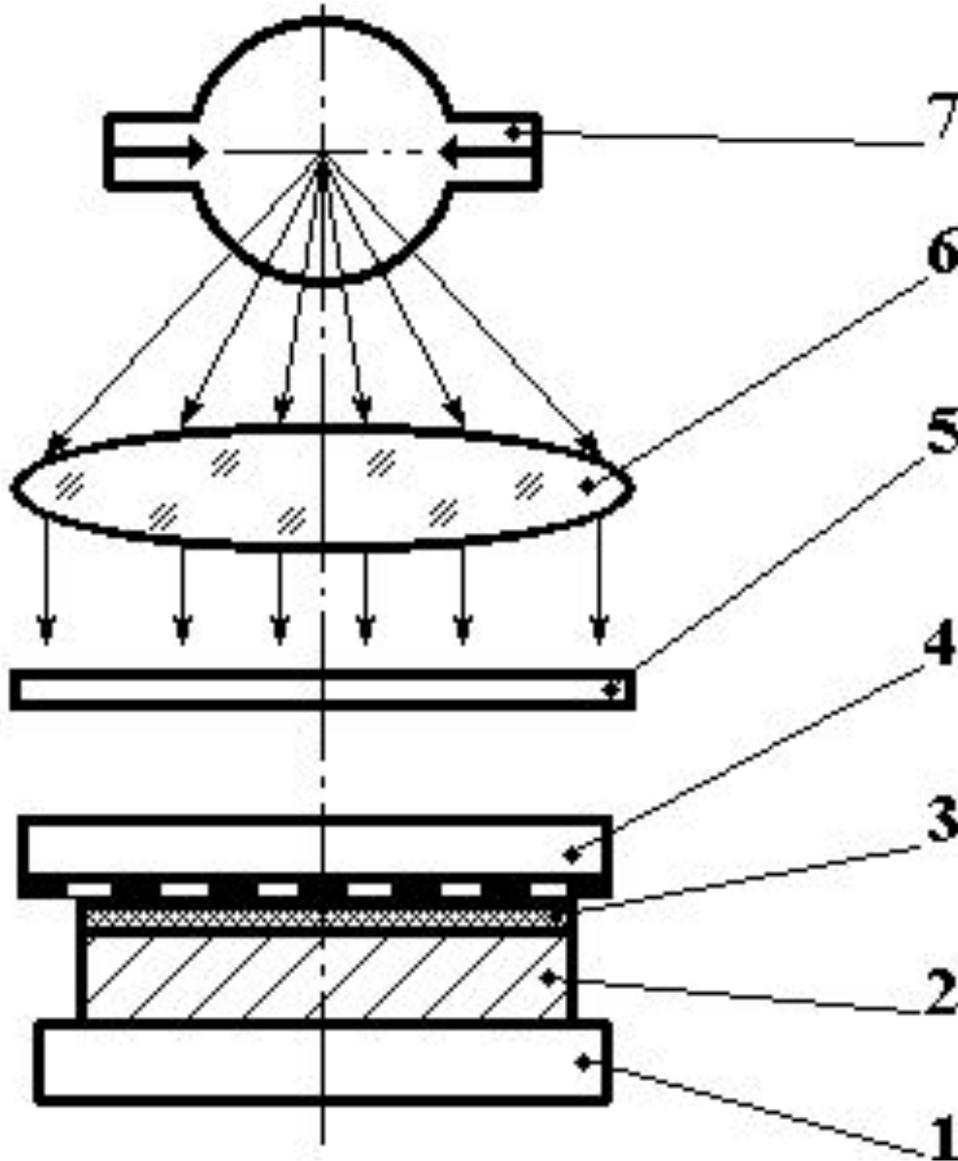
По способу подвода тепла различают 3 вида сушки:

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

Методы совмещения и экспонирования

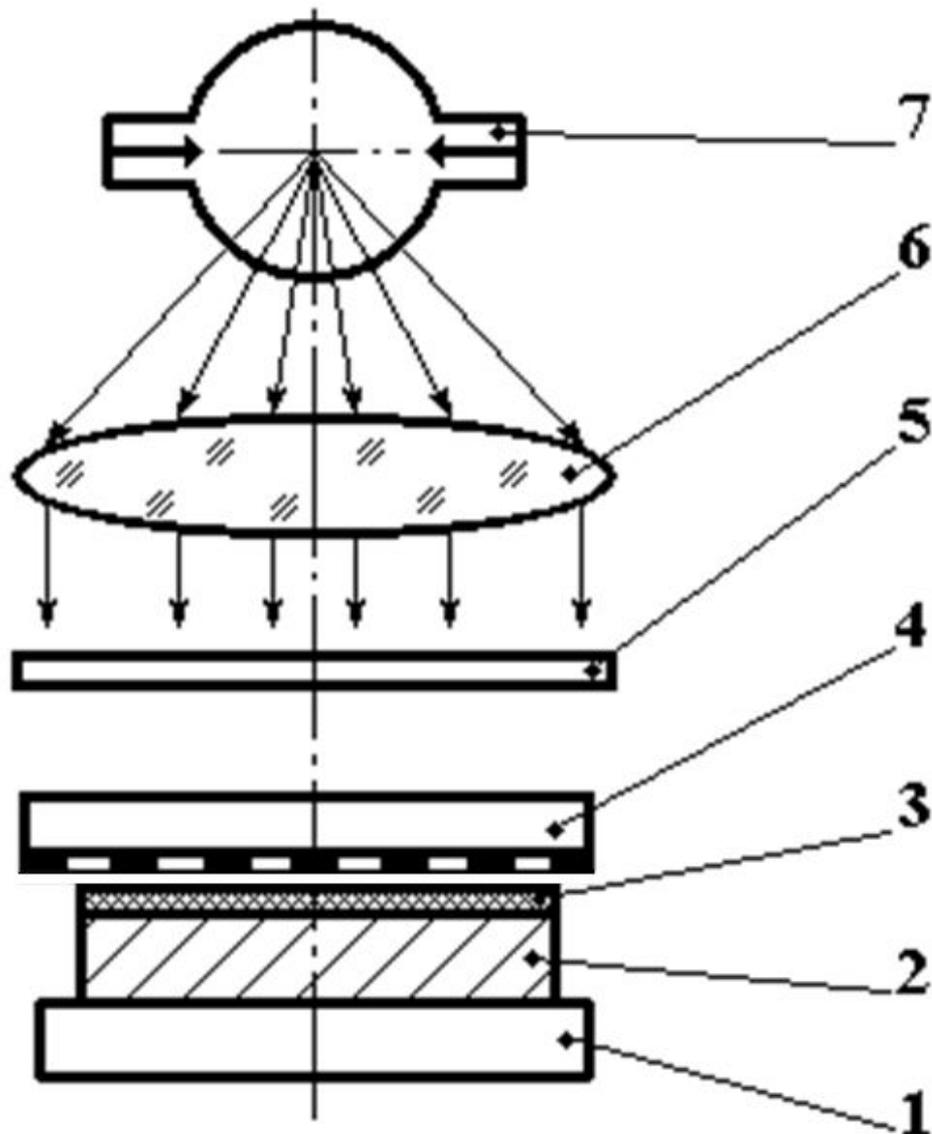


Контактная фотолитография схема экспонирования



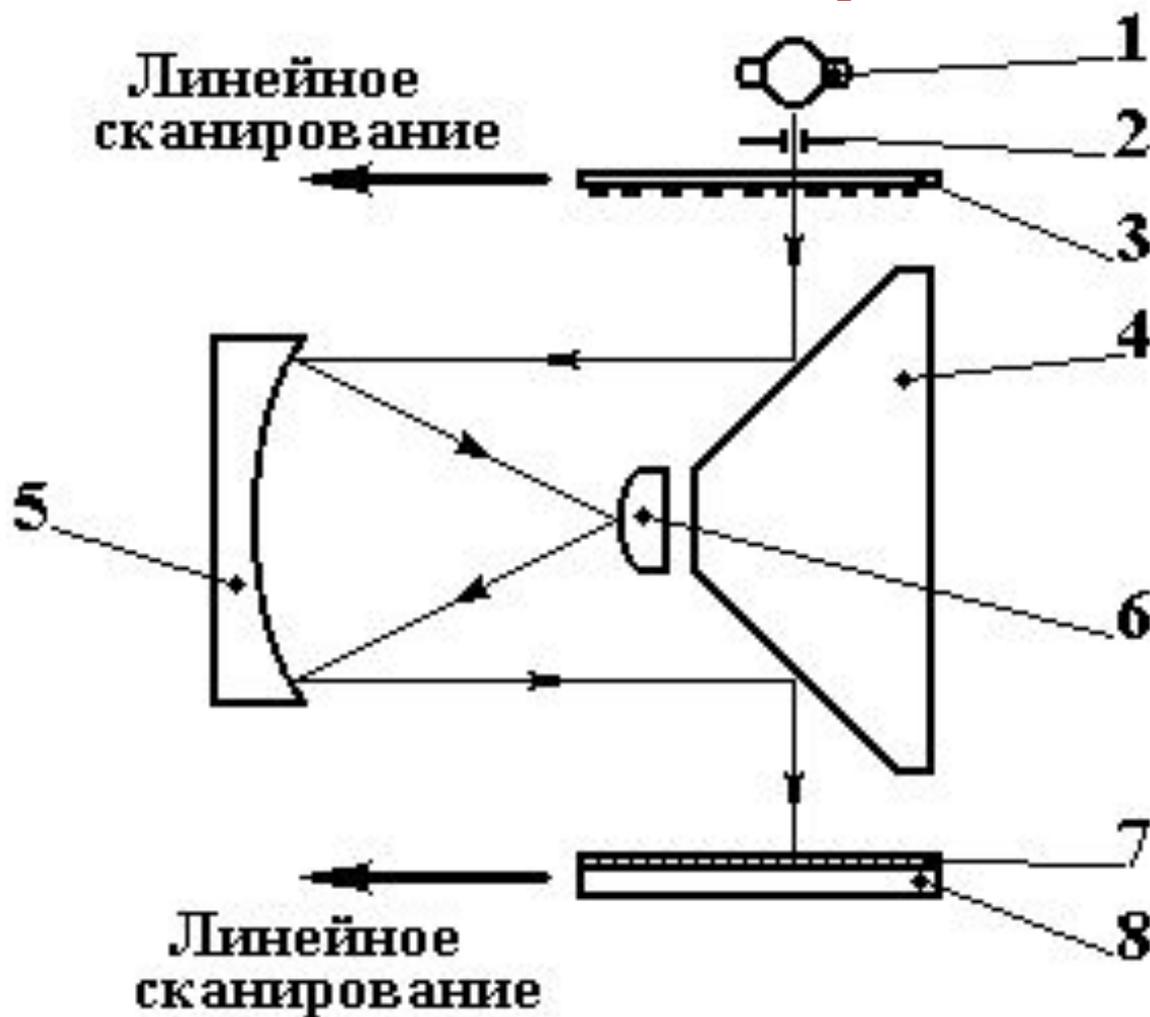
1 - предметный
стол; 2 – подложка;
3 - слой
фоторезиста; 4 –
фотошаблон;
5 - затвор; 6 –
конденсор; 7 –
источник света

Фотолитография на микрозоре



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

Схема проекционного экспонирования со сканированием



Проекционная фотолитография без изменения масштаба

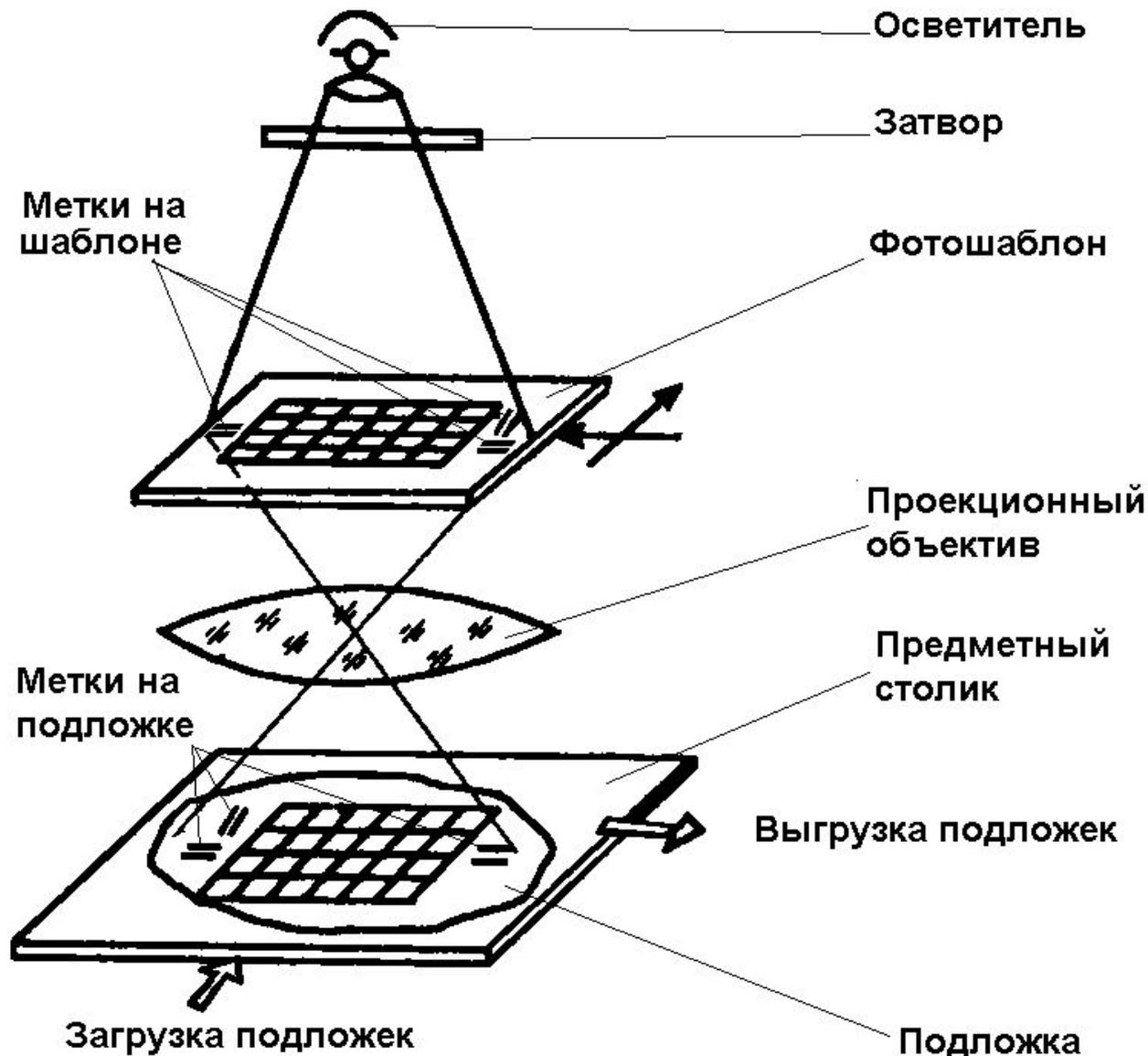
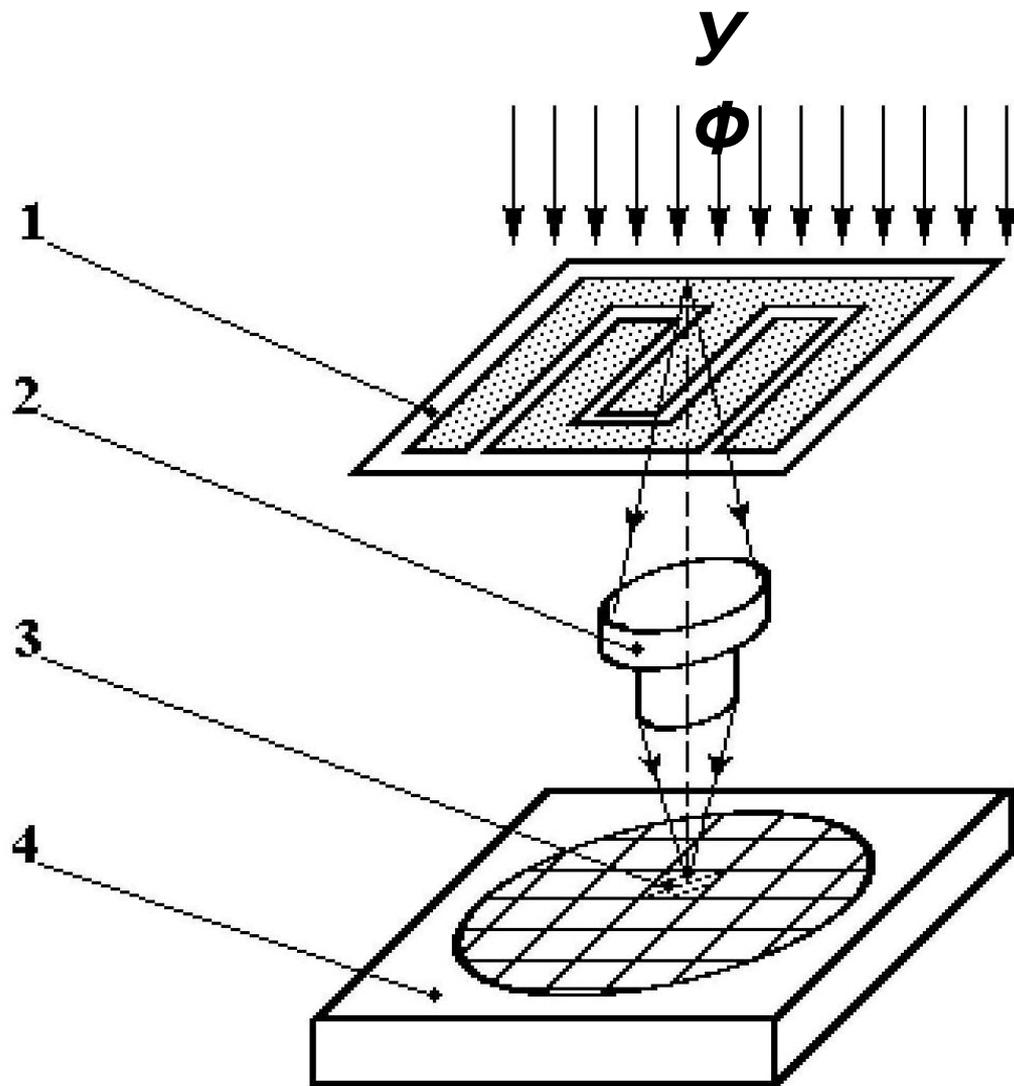


Схема пошаговой мультипликации с уменьшением масштаба



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, **λ** – длина волны УФ-излучения, **NA** – числовая апертура проекционного объектива

$$NA = n \sin \alpha$$

n - коэффициент преломления среды, **α** - половина угла расхождения лучей.

Эволюция источников УФ излучения

<i>g-линия Hg</i>	<i>436 nm</i>
<i>i-линия Hg</i>	<i>365 nm</i>
<i>KrF (эксимерный лазер на фториде криптона)</i>	<i>248 nm</i>
<i>ArF (эксимерный лазер на фториде аргона)</i>	<i>193 nm</i>
<i>F₂ лазер</i>	<i>157 nm</i>
<i>EUV (extreme ultra violet)</i>	<i>13,5 nm</i>

Фотолитография с фазосдвигающей маской

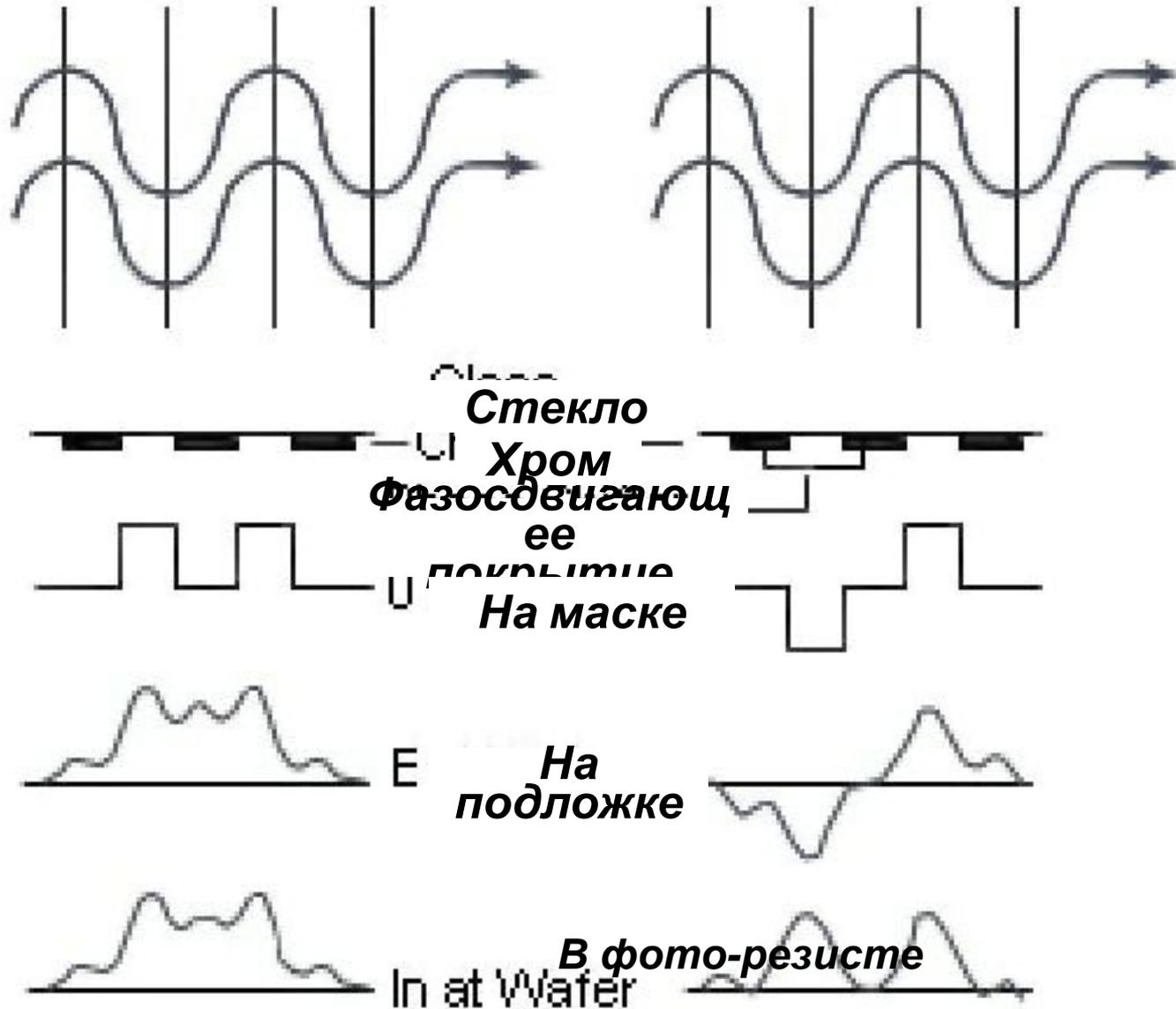


Схема иммерсионной фотолитографии



Схема фотолитографии на сверхжестком УФ

