

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И
ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

ФОТОЛИТОГРАФИЯ

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

Получение топологического рисунка

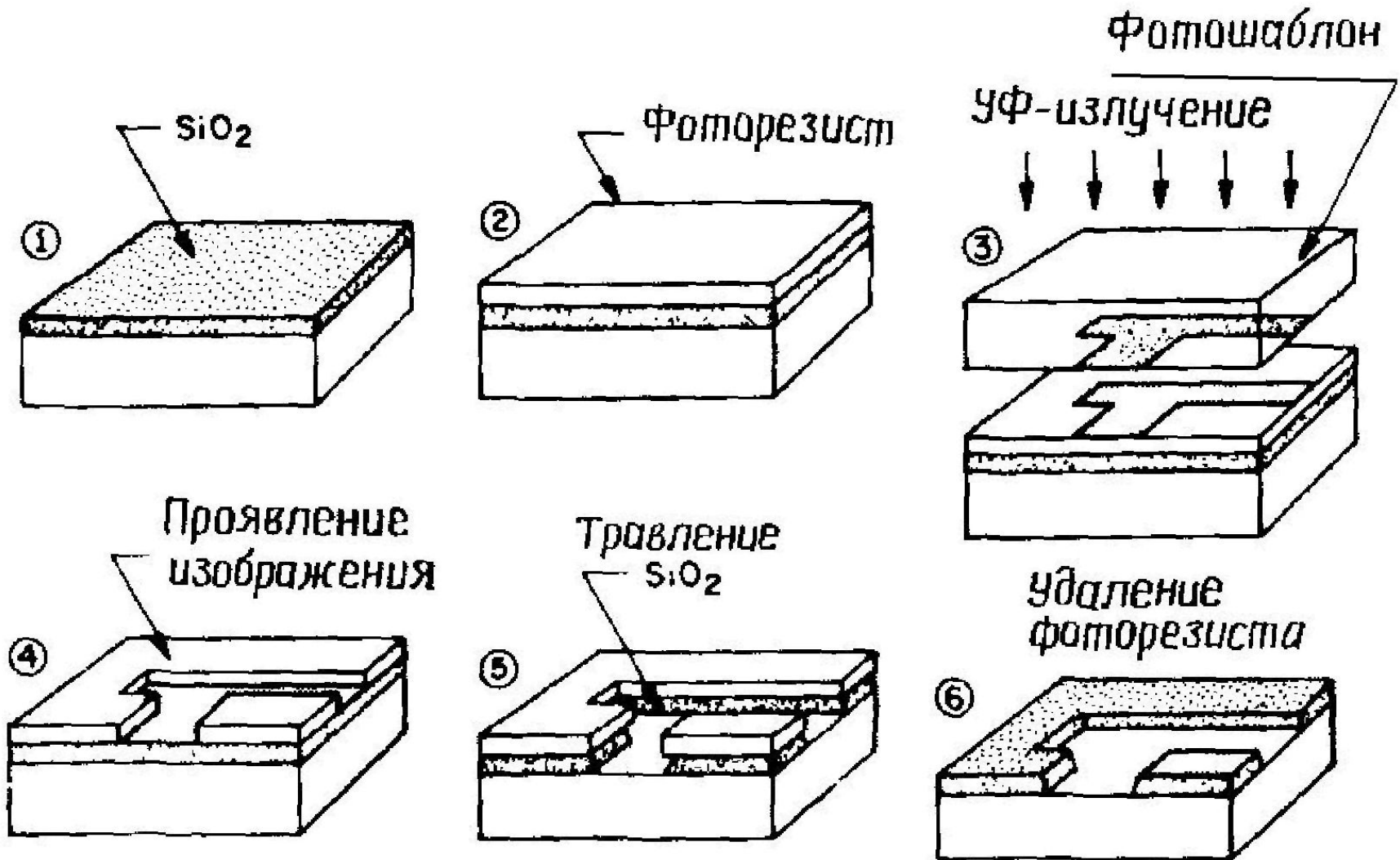
На первой стадии процесса изготовления ИС после завершения испытаний или моделирования с помощью ЭВМ формируют геометрический рисунок топологии схемы. Процесс создания рисунка ИС разбивают на этапы: на одном этапе формируют электроды затвора, на втором контактные окна и т.п. Этим этапам соответствуют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

С помощью ЭВМ геометрический рисунок топологии преобразуют в цифровые

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 различ-

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

Фотошаблоны. Основные термины

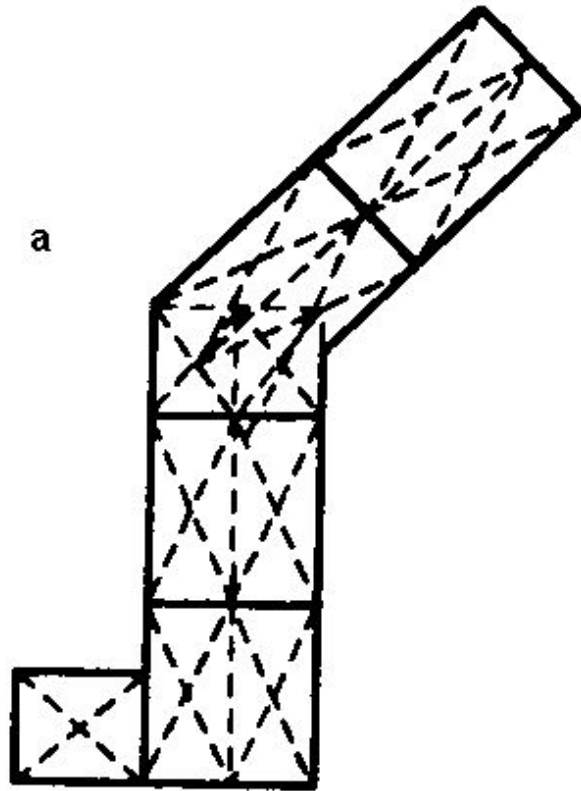
Маска – плоская пластина или плёнка, содержащая рисунок в виде сквозных окошек и предназначенная для локального экспонирования;

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

Генерация изображения методом микрофотонабора



а



б

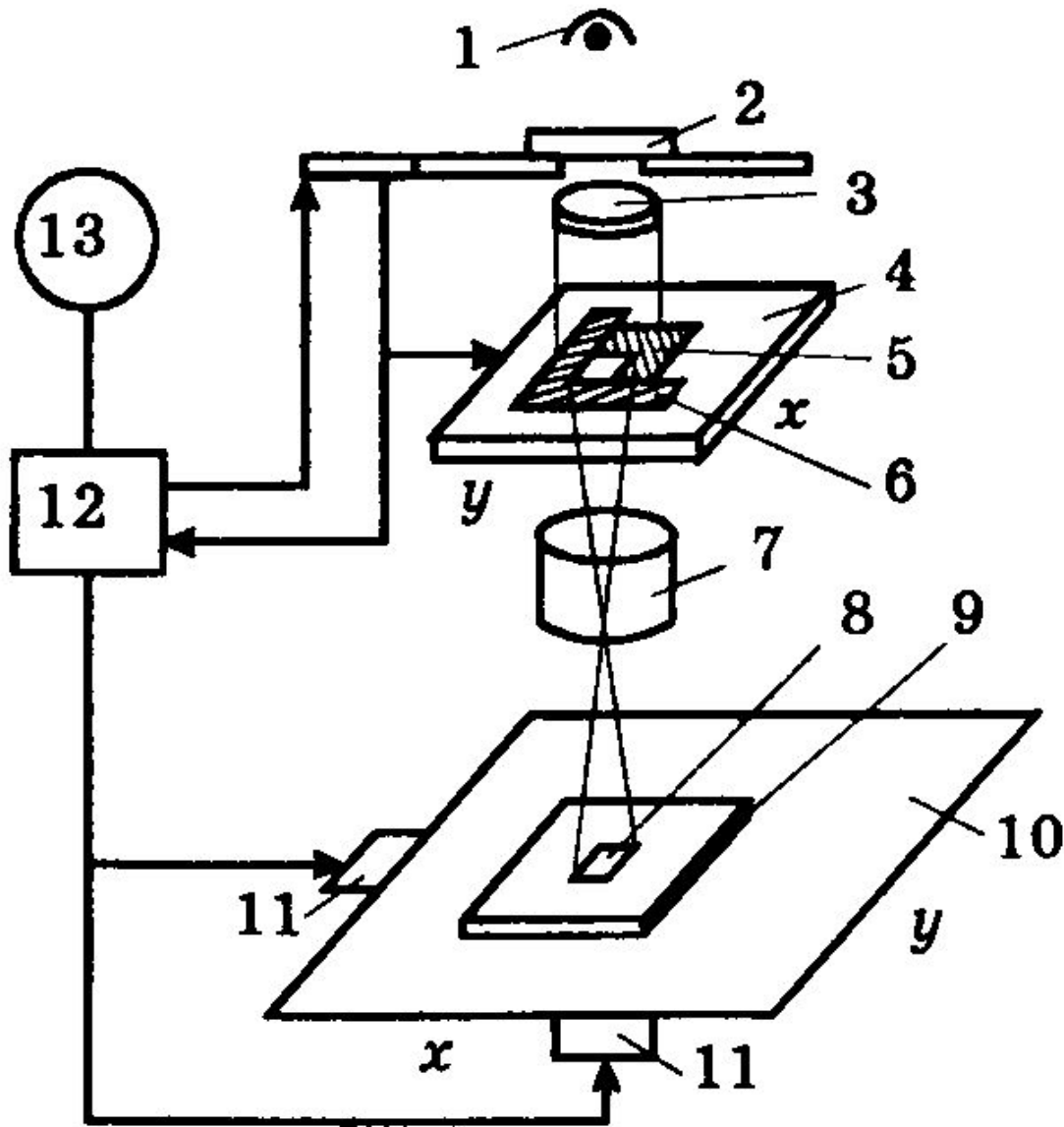


ху

в

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.

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

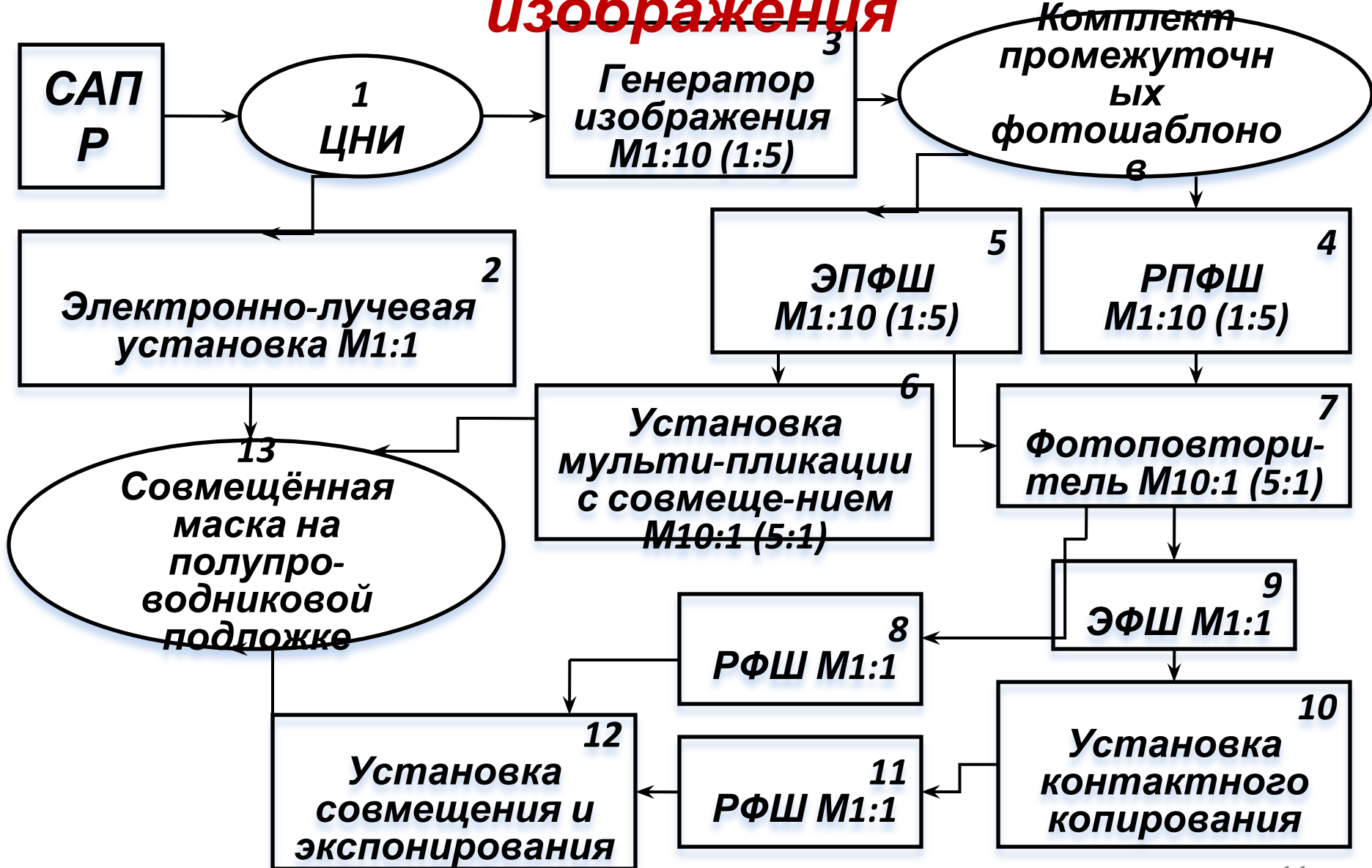
Работа генератора изображения

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 фоторезис-

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.

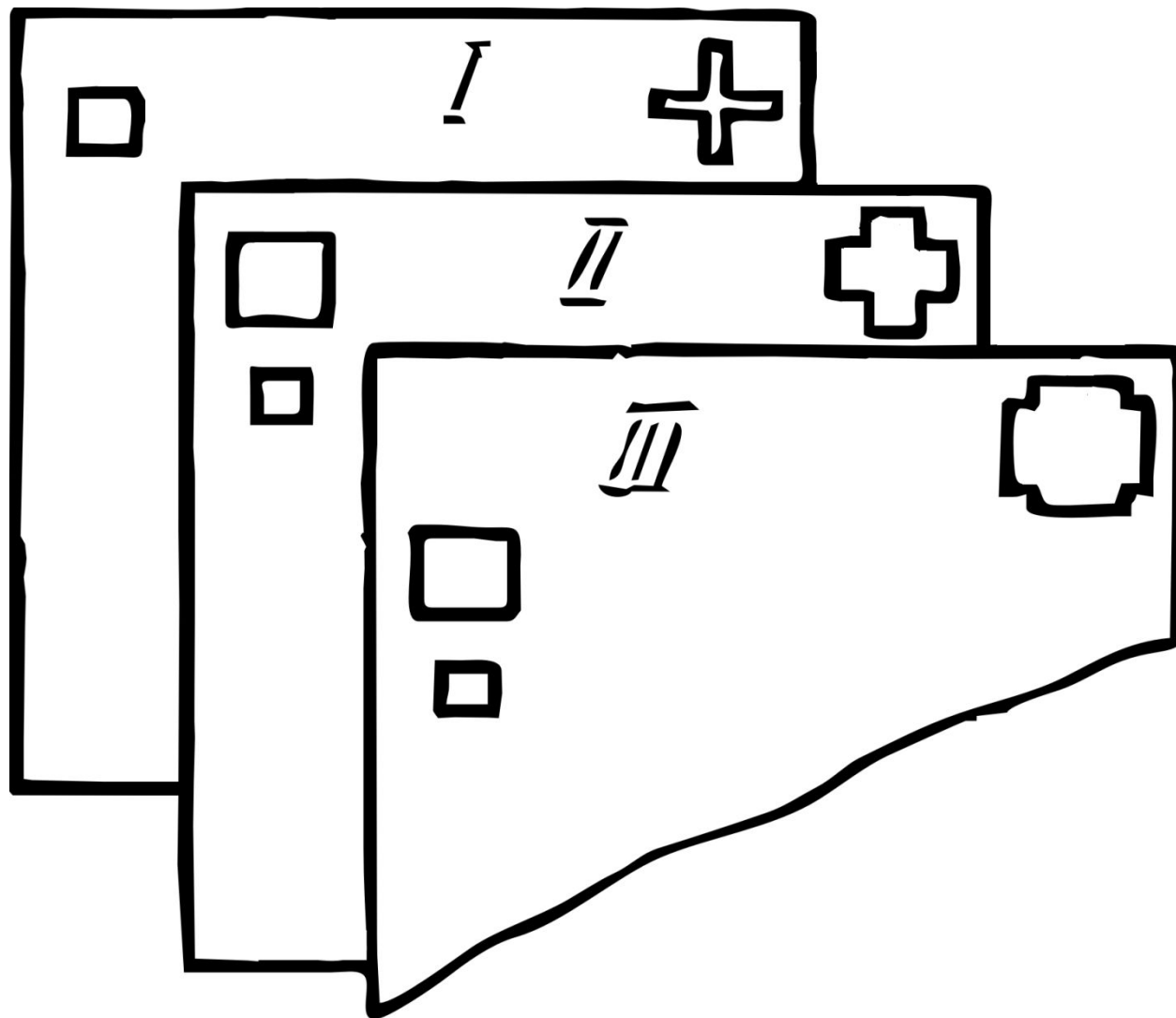
Для ИС высокой степени интеграции требования к

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;

Фигуры совмещения

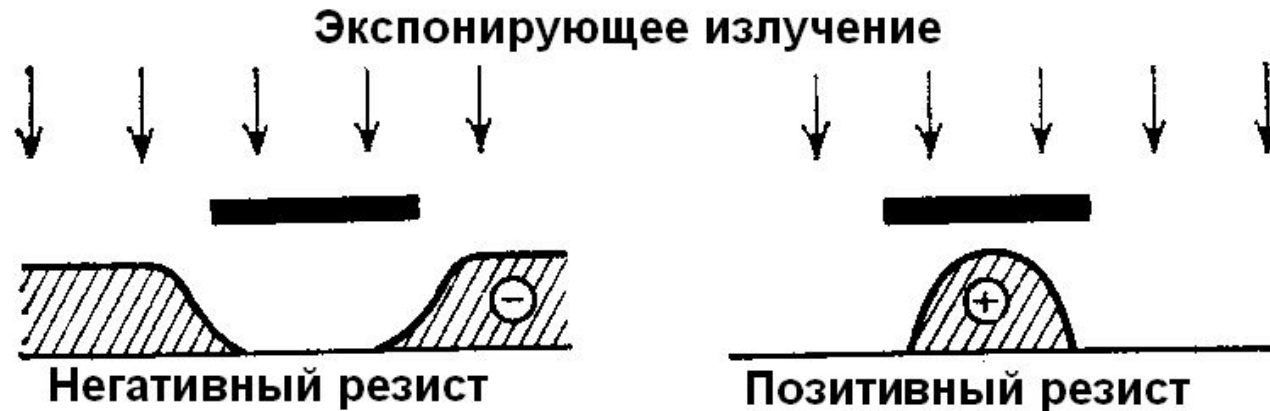
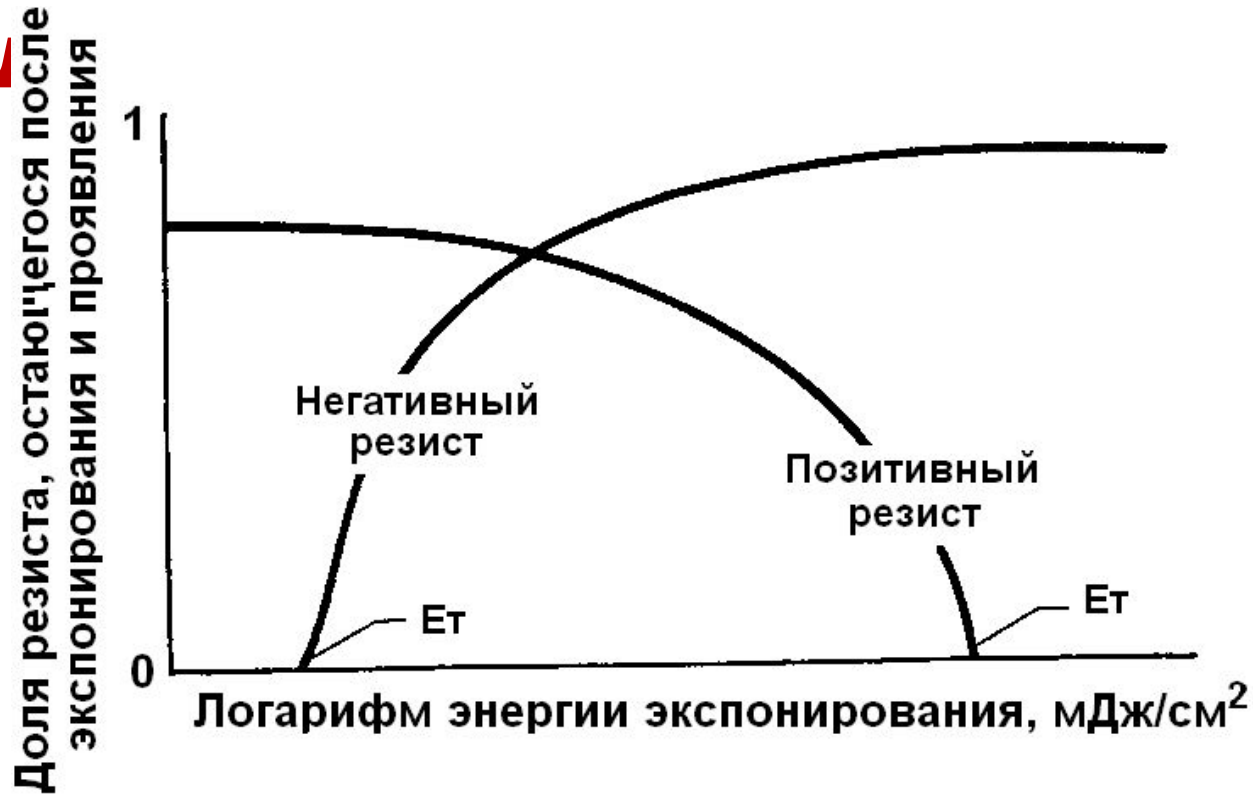


Фоторезисты

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 растворимос-

Характеристики экспонирования

рези



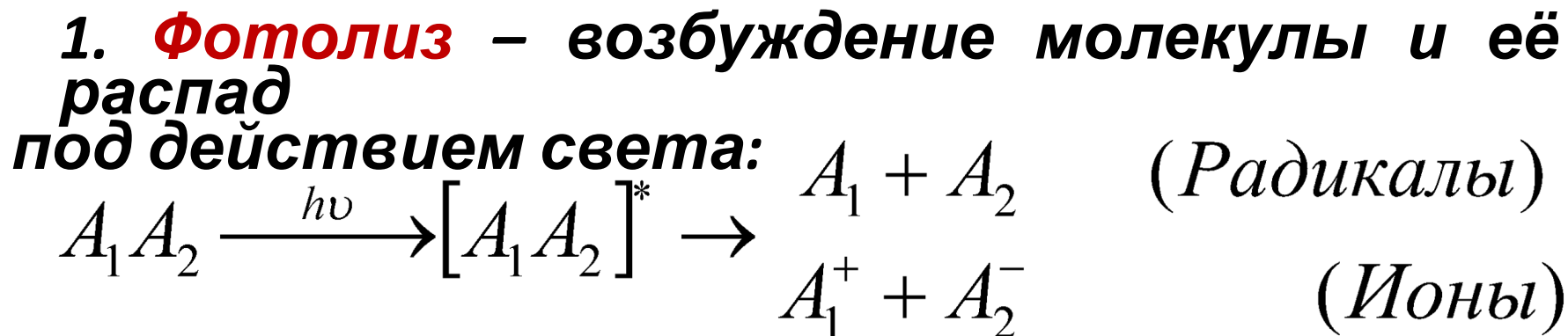
Кинетика фотохимических реакций

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

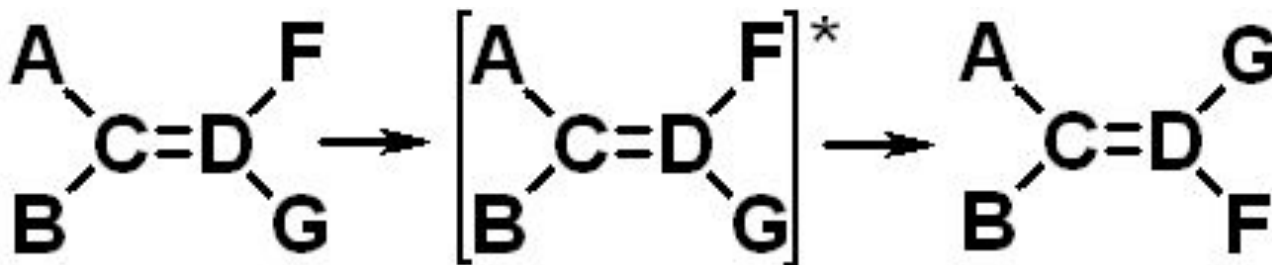
Кинетика:

- поглощение фотона молекулой;**
- переход молекулы в возбуждённое состояние;**
- первичные фотохимические процессы с участием активных молекул;**
- вторичные «темновые» процессы**

Реакции, протекающие в резистах

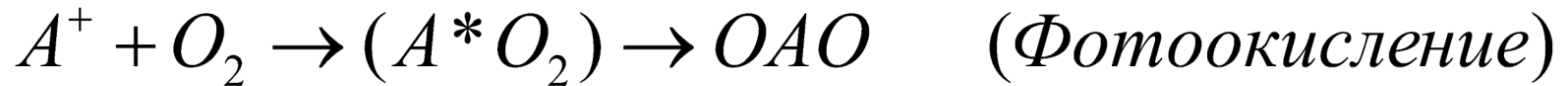
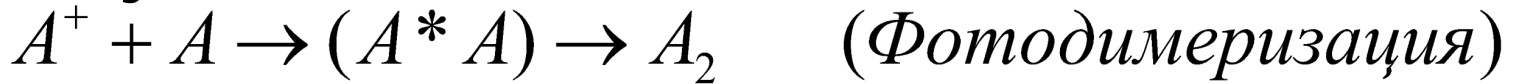


2. **Фотоперегруппировка** – перестановка атомов или радикалов в главной цепи молекулы под действием света:

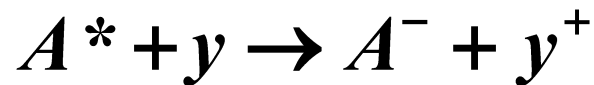


Реакции, протекающие в резистах

3. **Фотоприсоединение** – присоединение активированной молекулы к другой молекуле или молекулам.



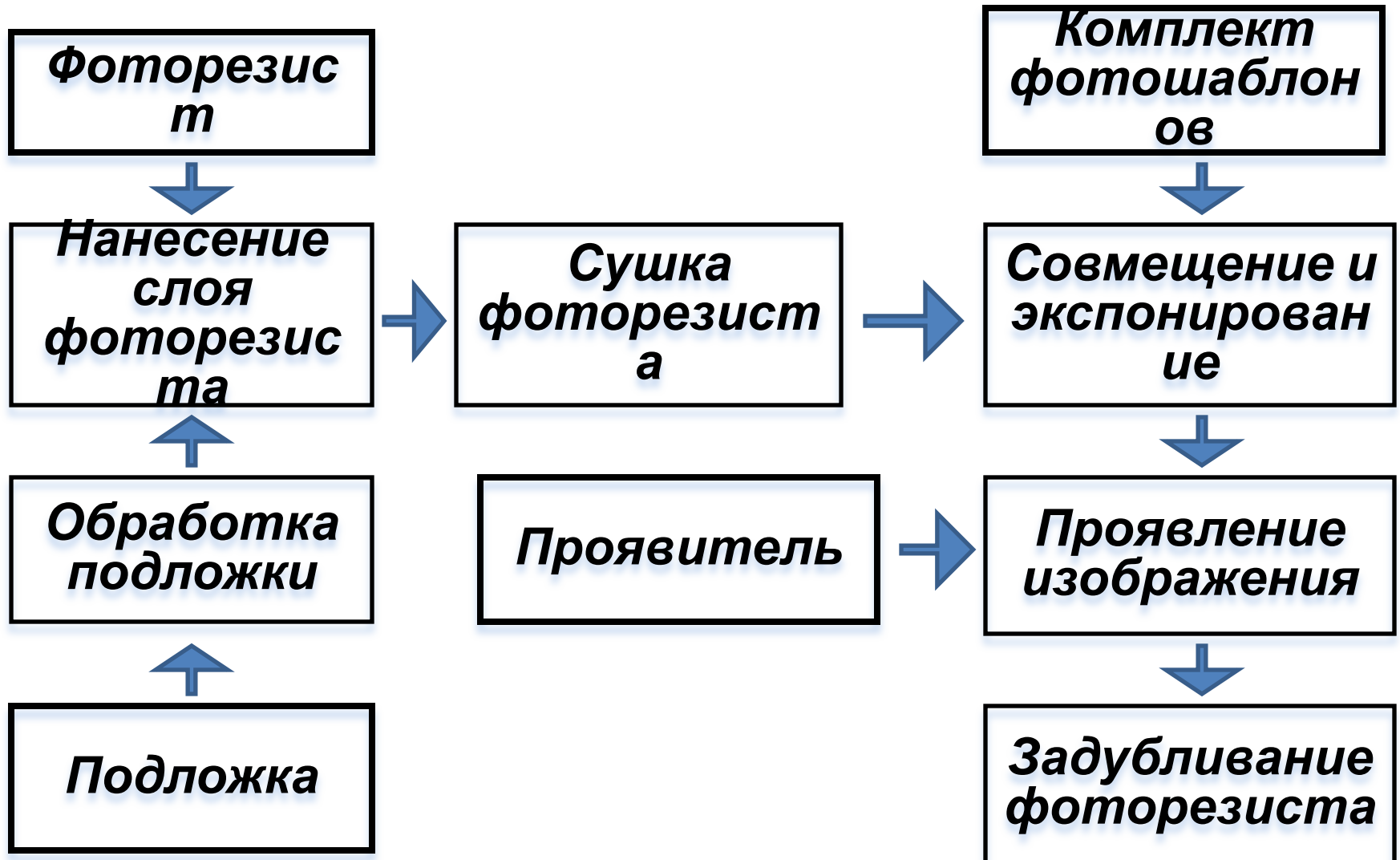
4. **Фотосенсибилизация** – передача электронного возбуждения от одной молекулы (или ее части) к другой молекуле (или ее части).



Требования к фоторезистам

- 1. Высокая светочувствительность в требуемом диапазоне-не 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 взрывоопасных продуктов химических**

Схема технологического процесса фотолитографии



Обработка пластин

Обработка подложек производится с целью:

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

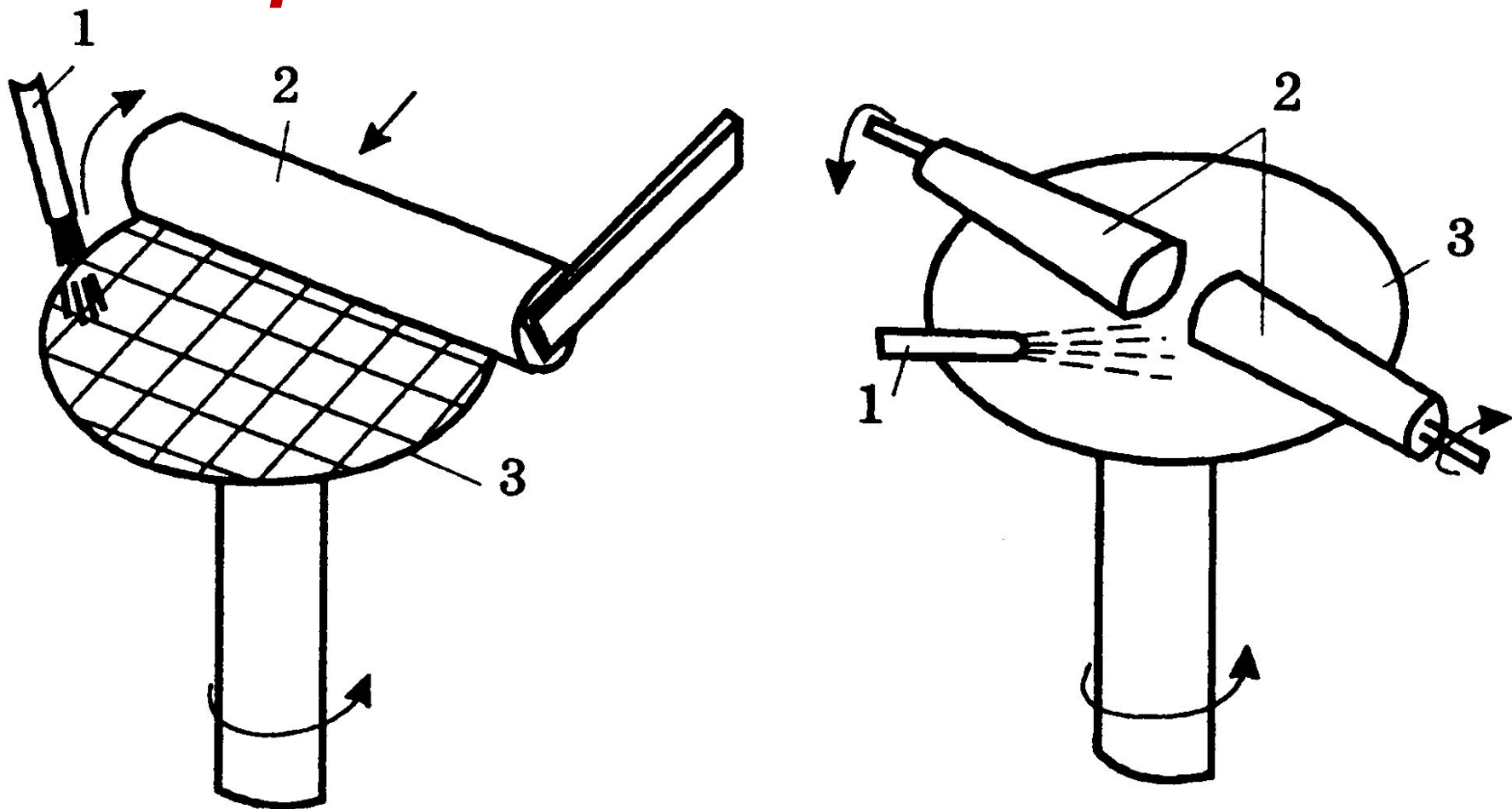
**В технологии ИИЭ фотолитографии под-
вергают технологические слои
кремния, ди-
оксида кремния, нитрида кремния,
алюми-
ния, фосфоросиликатного стекла.**

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;**

Гидромеханическая отмывка



Цилиндрической щёткой Коническими щётками

1 – форсунка, 2 – щётки, 3 - подложка

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

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.

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

Адгезия для фотолитографических процессов

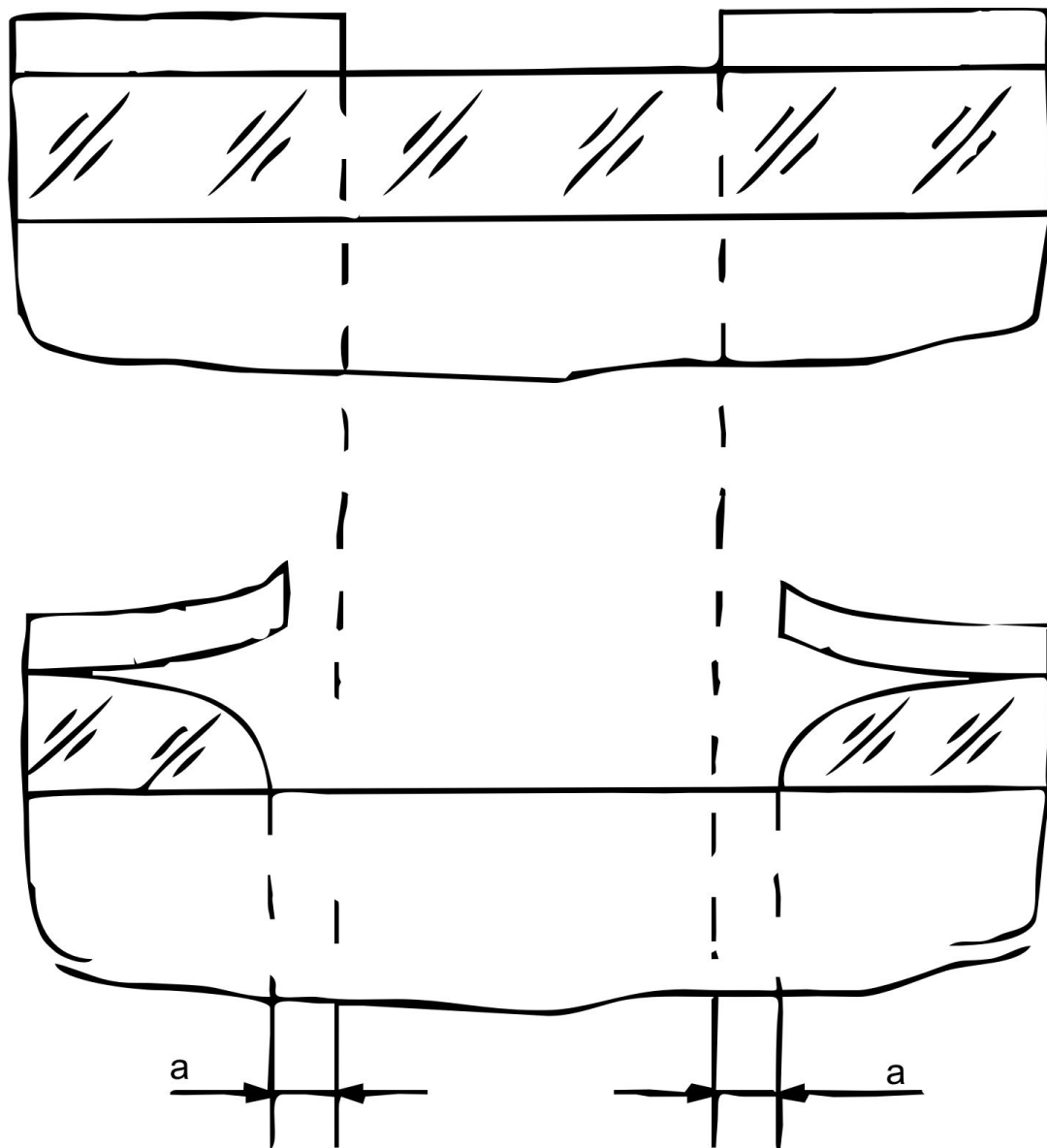
Адгезия – способность фоторезиста препятствовать проникновению травителя к подложке по периметру создаваемого рельефа рисунка элементов.

Критерием адгезии является время, отрыва слоя фоторезиста заданных размеров от подложки в ламинарном потоке травителя.

Адге-

зию считают хорошей если слой

Проникновение травителя под маску резиста



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 .

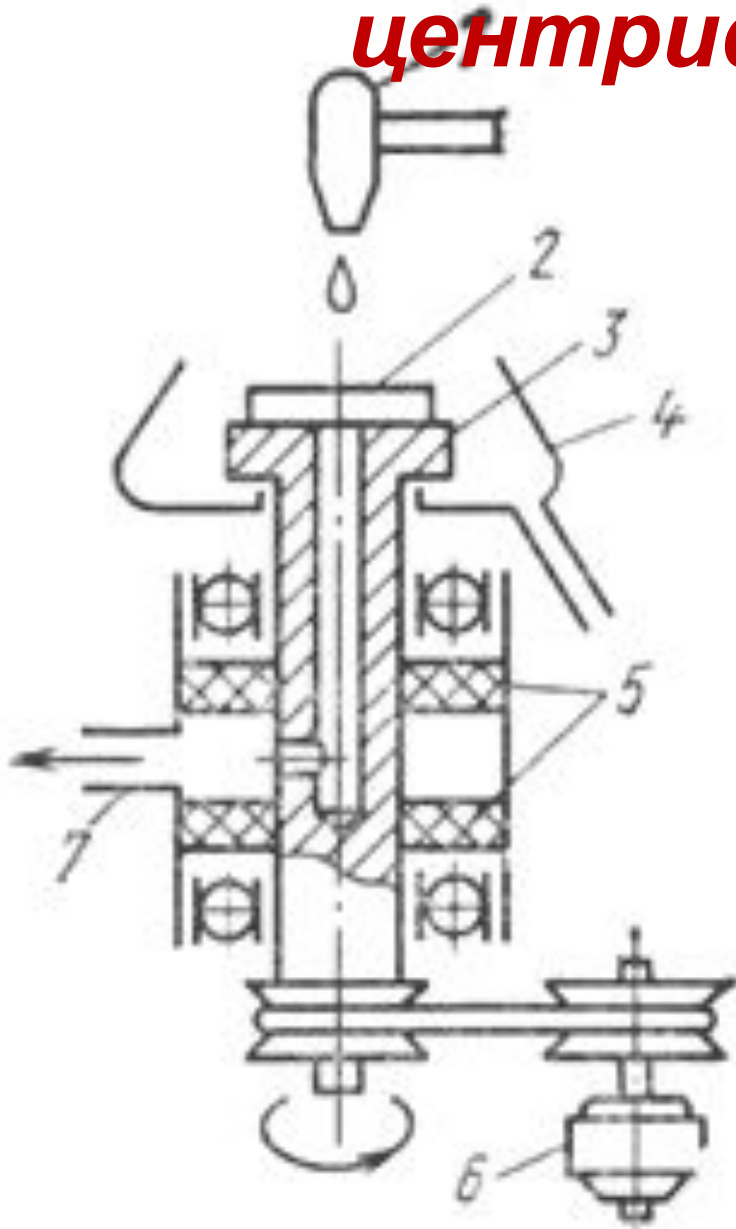
Для улучшения адгезии подложки перед нанесением фоторезиста отжигают при температуре 700 – 800

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

Схема нанесения центрифугированием



- 1 – дозатор;**
- 2 – подложка;**
- 3 – вакуумный столик;**
- 4 – кожух для сбора избытков фоторезиста;**
- 5 – вакуумные уплотнители;**
- 6 – электропривод;**
- 7 – трубопровод вакуумного насоса.**

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.

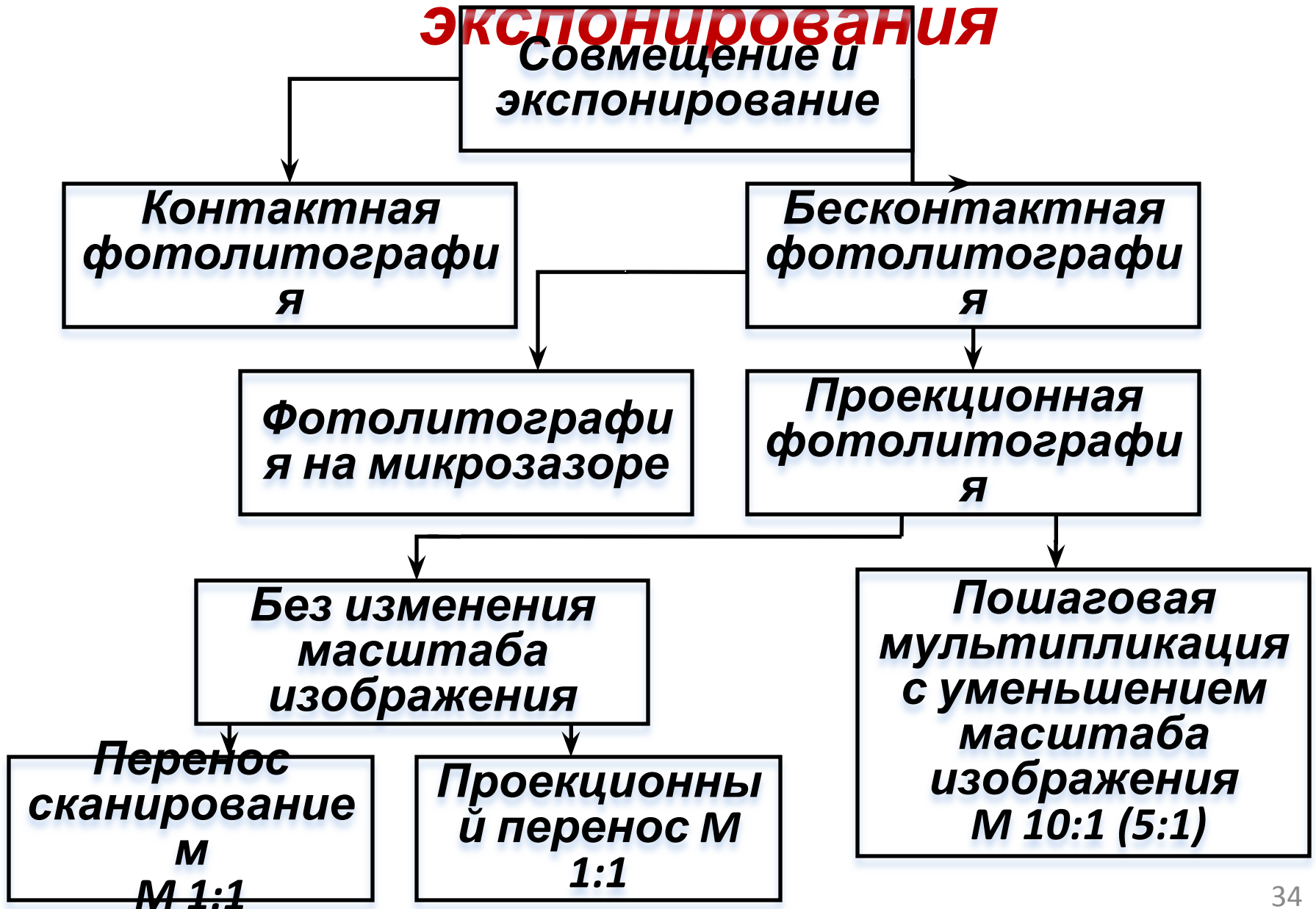
Основными режимами сушки являются:

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

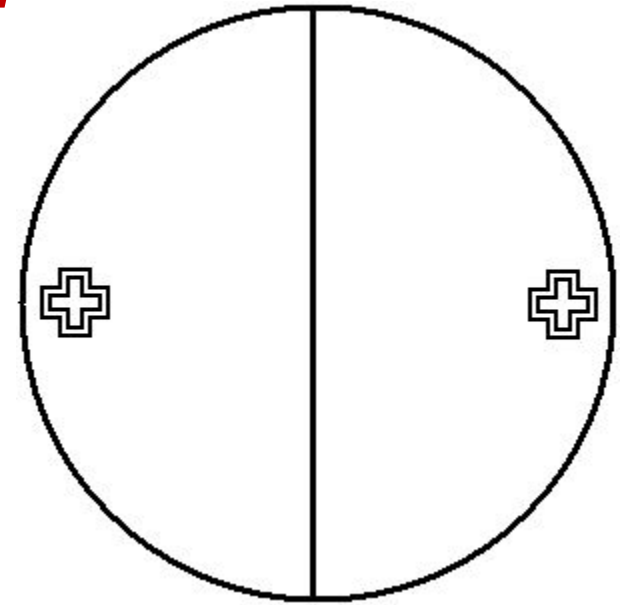
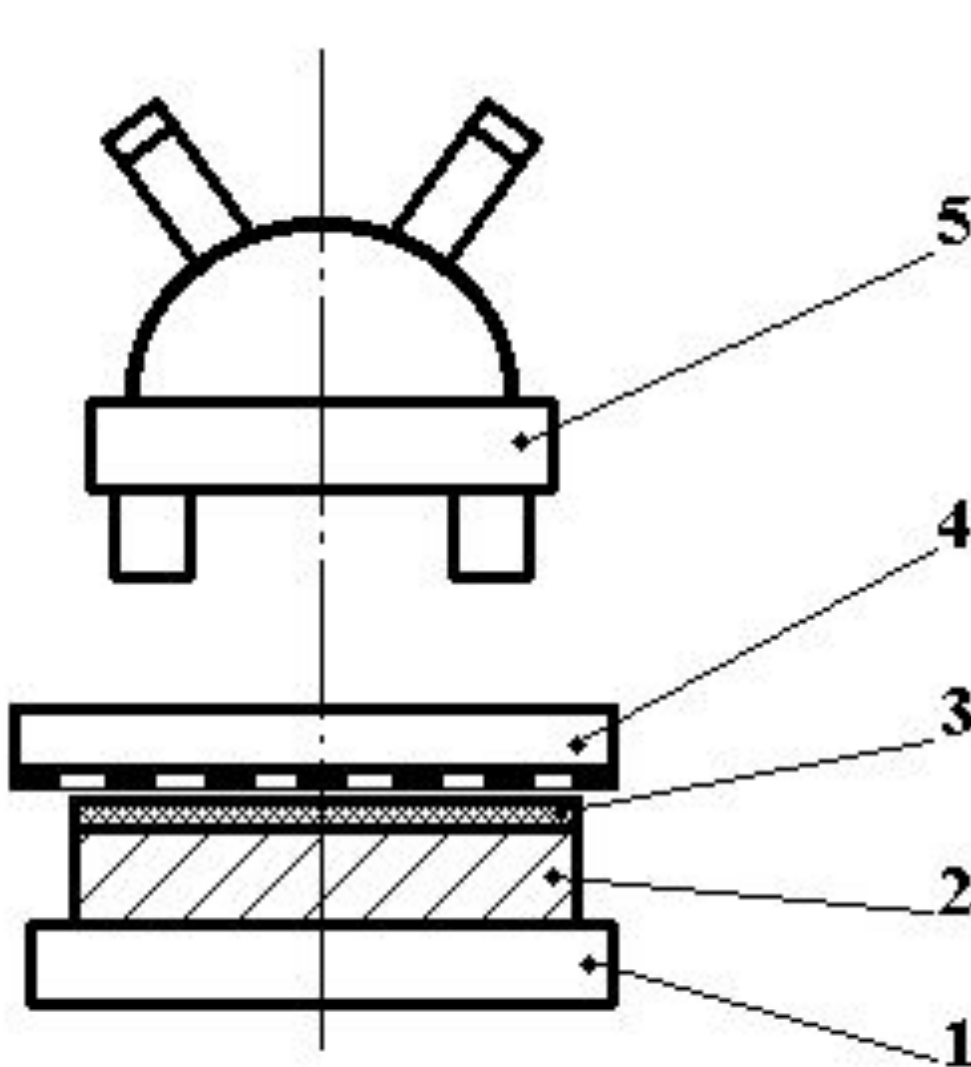
По способу подвода тепла различают 3 вида

Методы совмещения и

ЭКСПОНИРОВАНИЯ

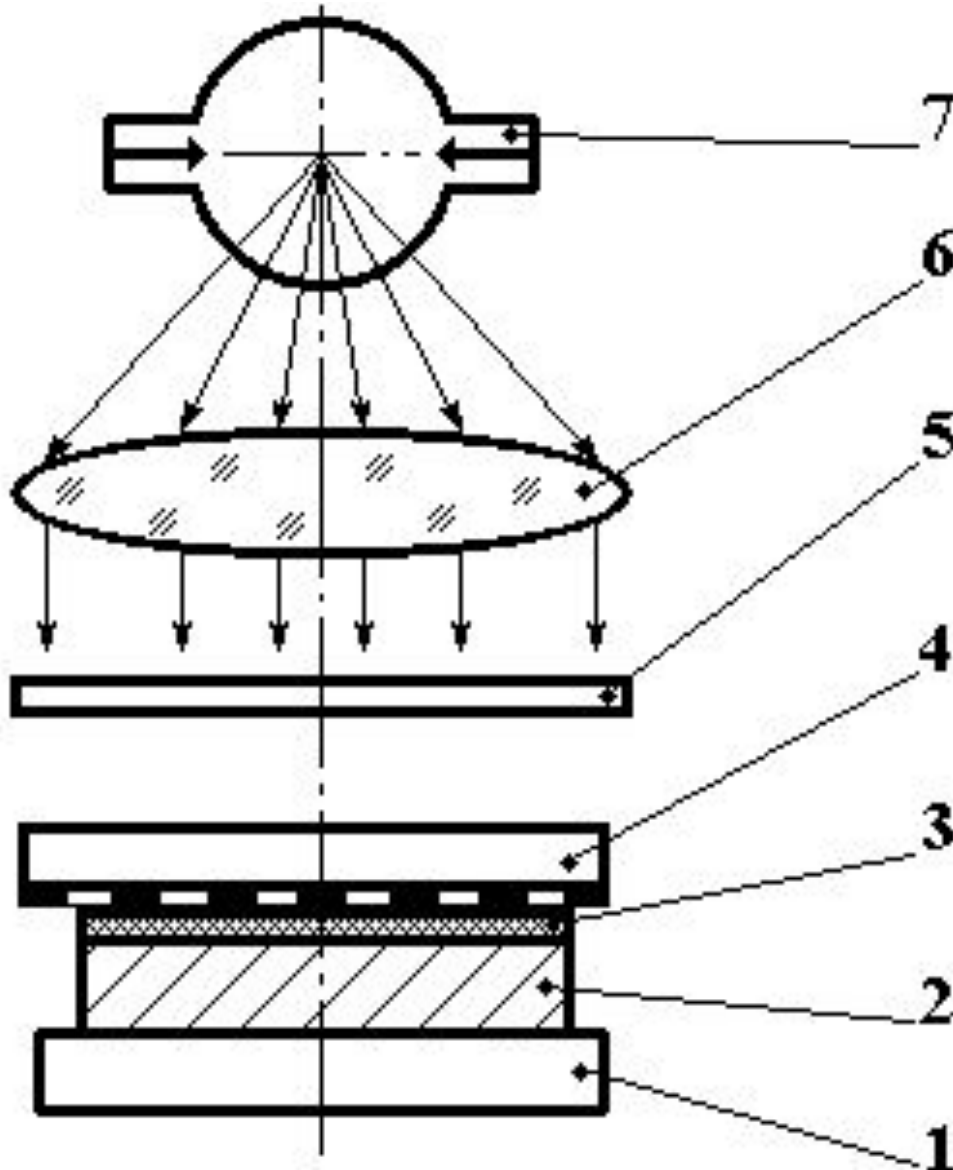


Контактная фотолитография схема совмещения



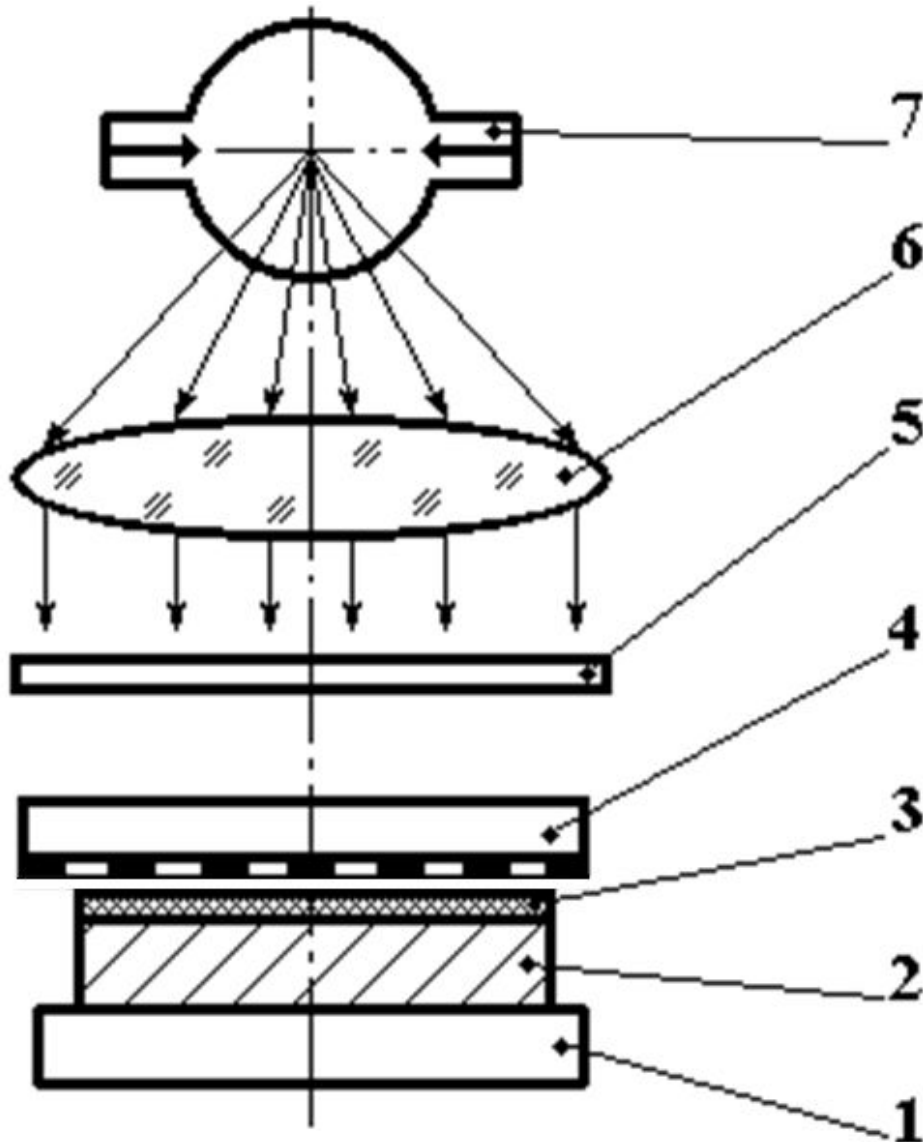
**1 - предметный сто-
лик; 2 - подложка;
3 - слой
фоторезиста;
4 - фотошаблон;
5 – микроскоп**

Контактная фотолитография схема экспонирования



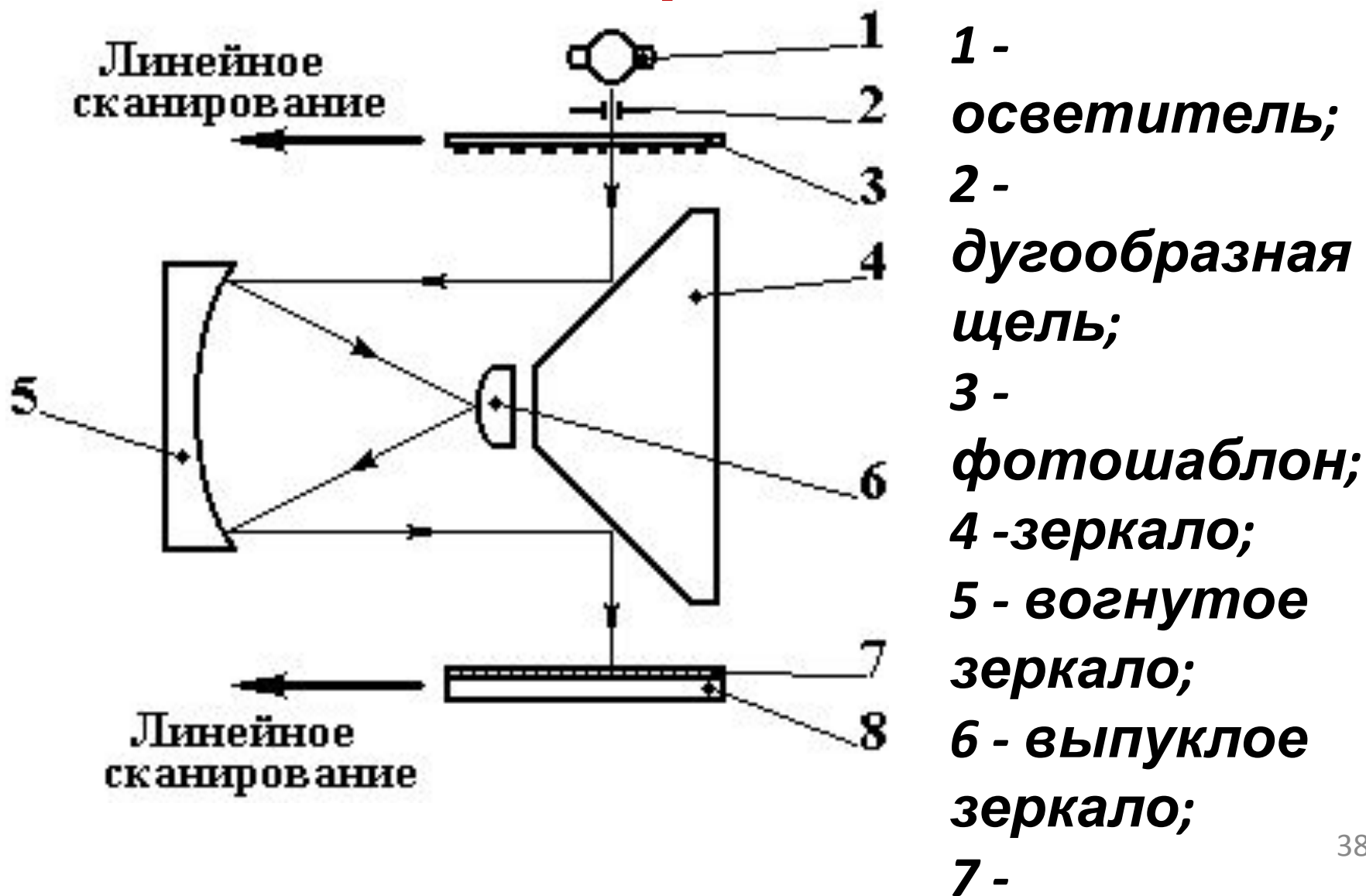
1 - предметный столик; 2 – подложка; 3 - слой фоторезиста; 4 – фотошаблон; 5 - затвор; 6 – конденсор; 7 –

Фотолитография на микрозоре



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

Схема проекционного экспонирования со сканированием



Проекционная фотолитография без изменения масштаба

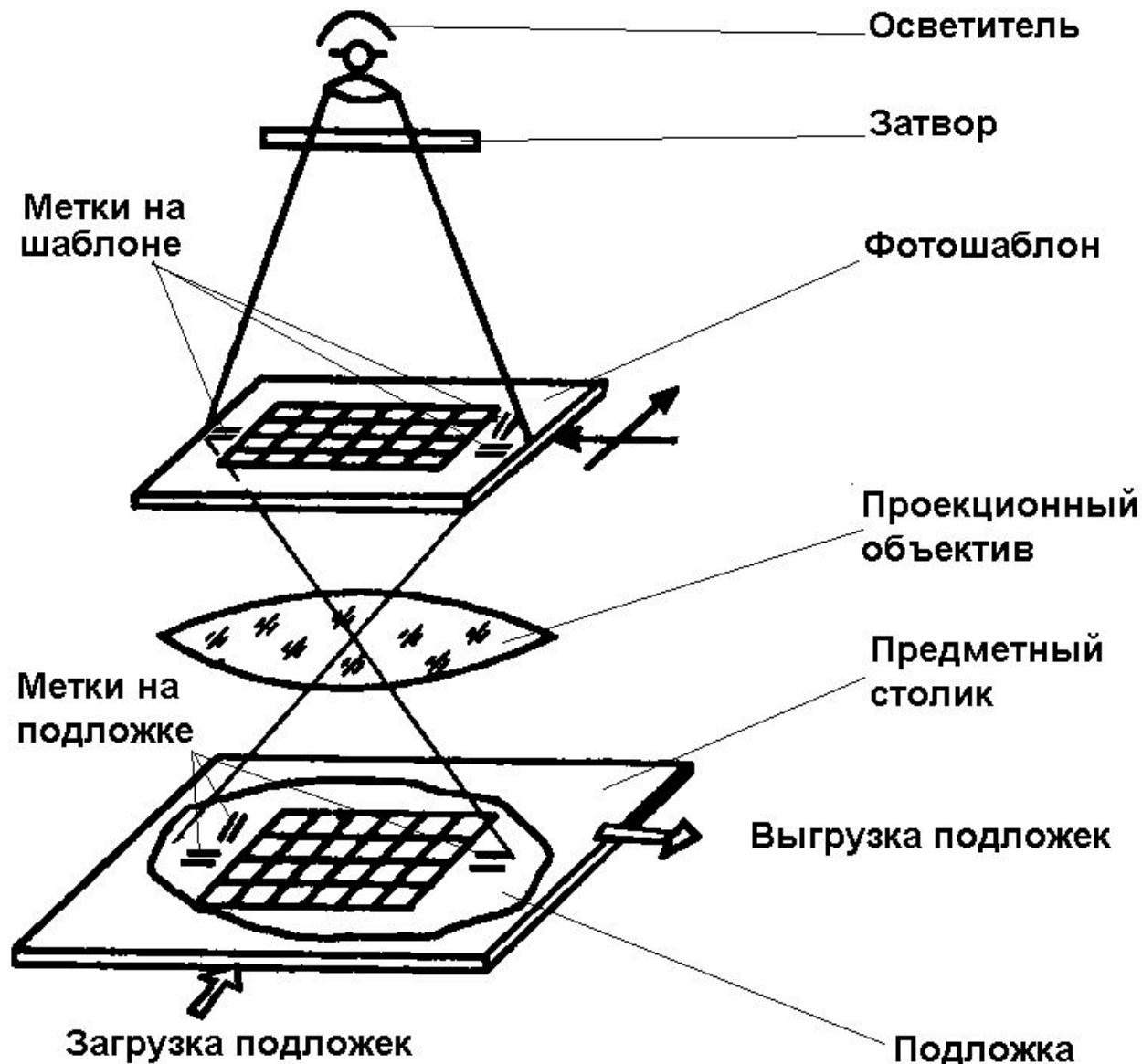
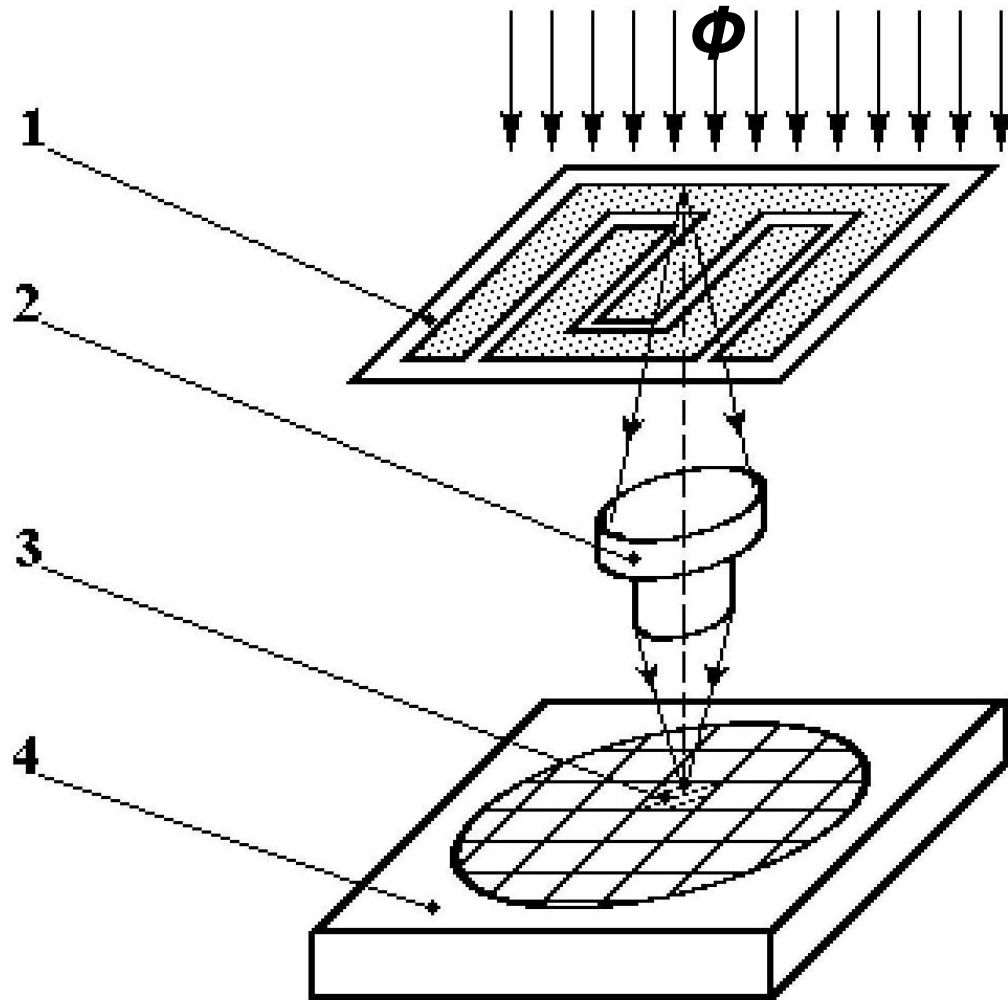


Схема пошаговой мультипликации с уменьшением масштаба



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

Проявление фоторезиста

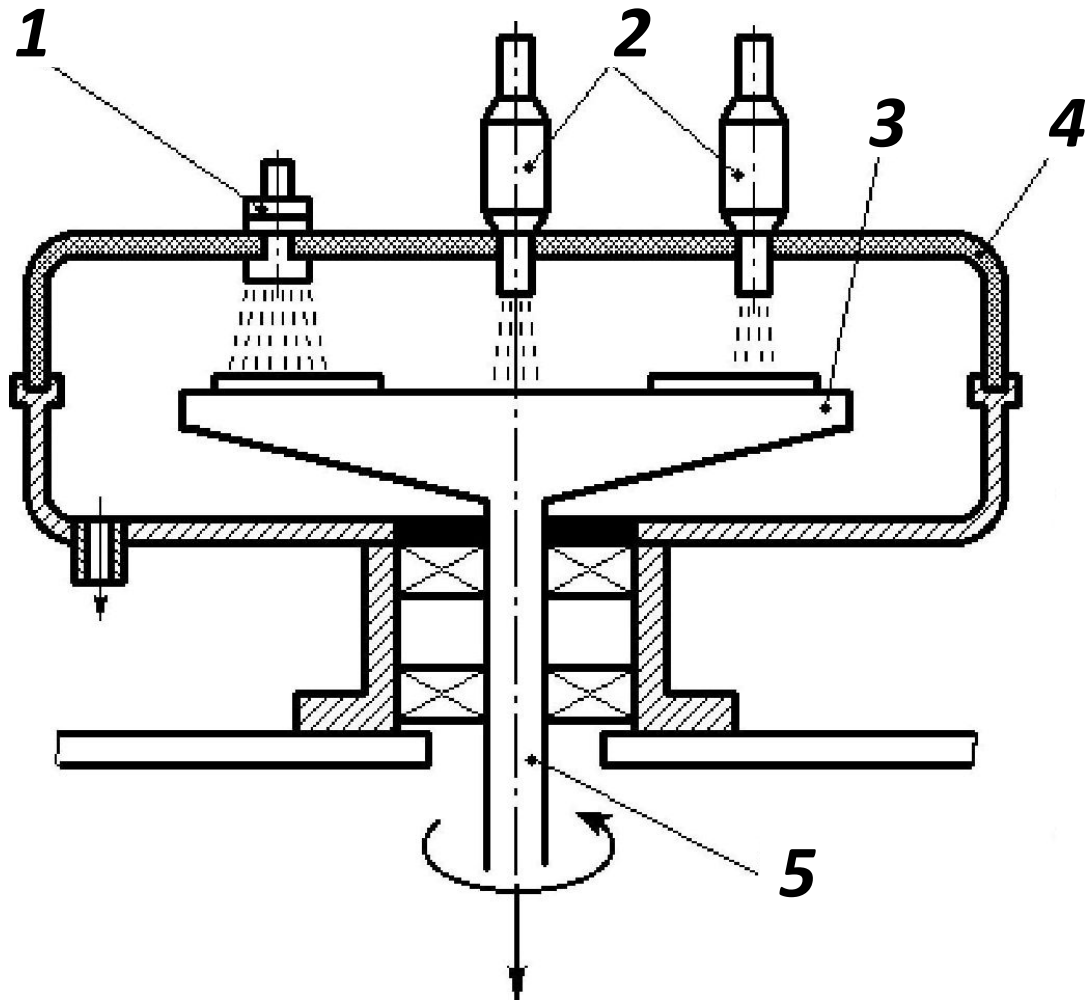
Служит для окончательного формирования изображения схемы в плёнке фоторезиста. При этом в зависимости от типа фоторезиста удаляются экспонированные или неэкспонированные участки. В результате на подложке остаётся защитная маска требуемой конфигурации.

Проявители для негативных фоторезистов – **органические растворители**: толуол, бензол, уайт-спирит, три-хлорэтилен, 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:

Схема проявления пульверизацией



1 - форсунка сушки; 2 - пневматические форсунки проявления и от-мывки; 3 - плат-форма; 4 - съем-ная крышка; 5 - ротор

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 поли-

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.

При этом основным методом формирования топологического рисунка на данном этапе остаётся проекционная фотолитография. $B_{\min} = 0,61 \times \frac{\lambda}{NA}$ – минимальный размер элемента, λ – длина волны УФ-излучения, NA – числовая апертура проекционного объектива

$$NA = n \sin \alpha$$

n - коэффициент преломления среды, α -

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

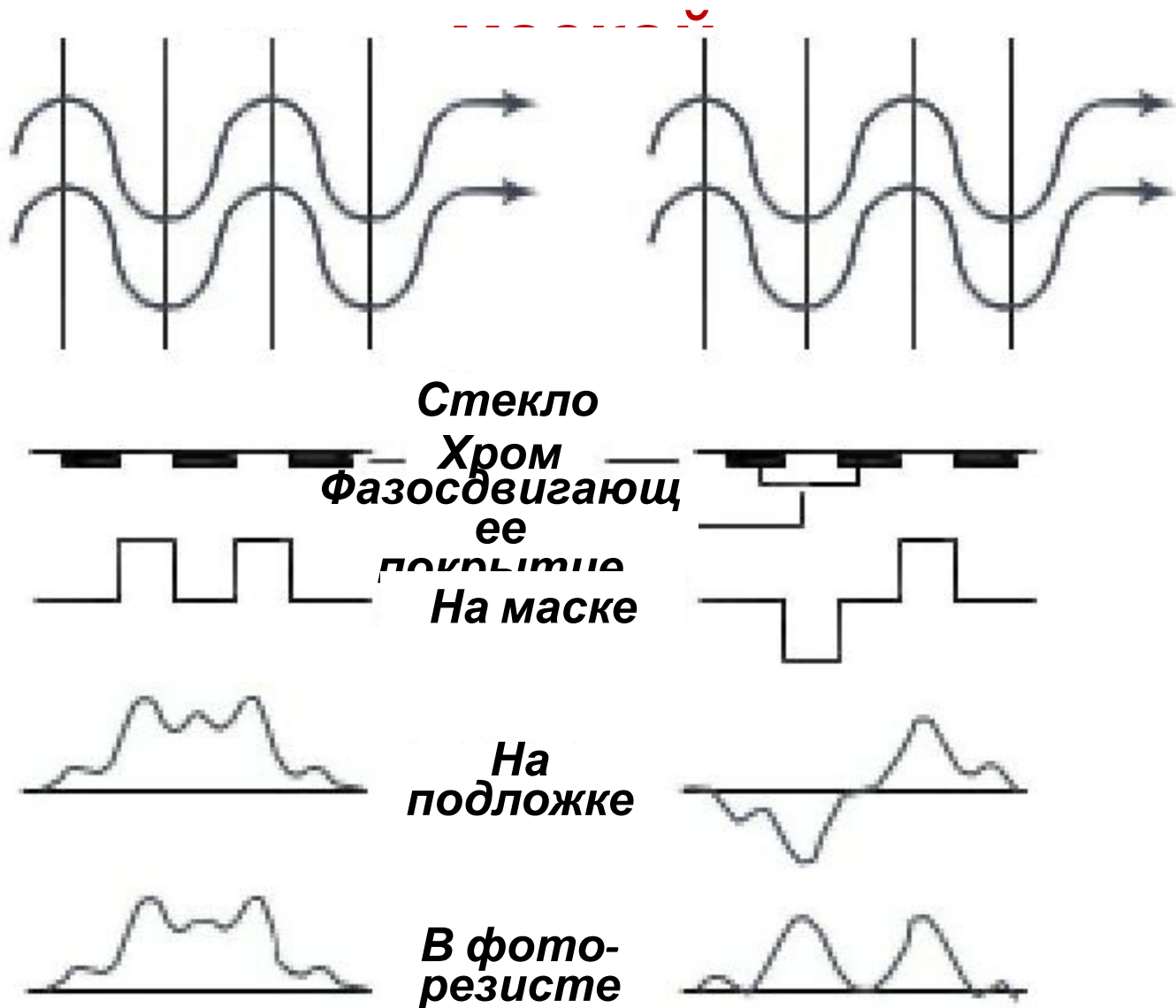


Схема иммерсионной фотолитографии

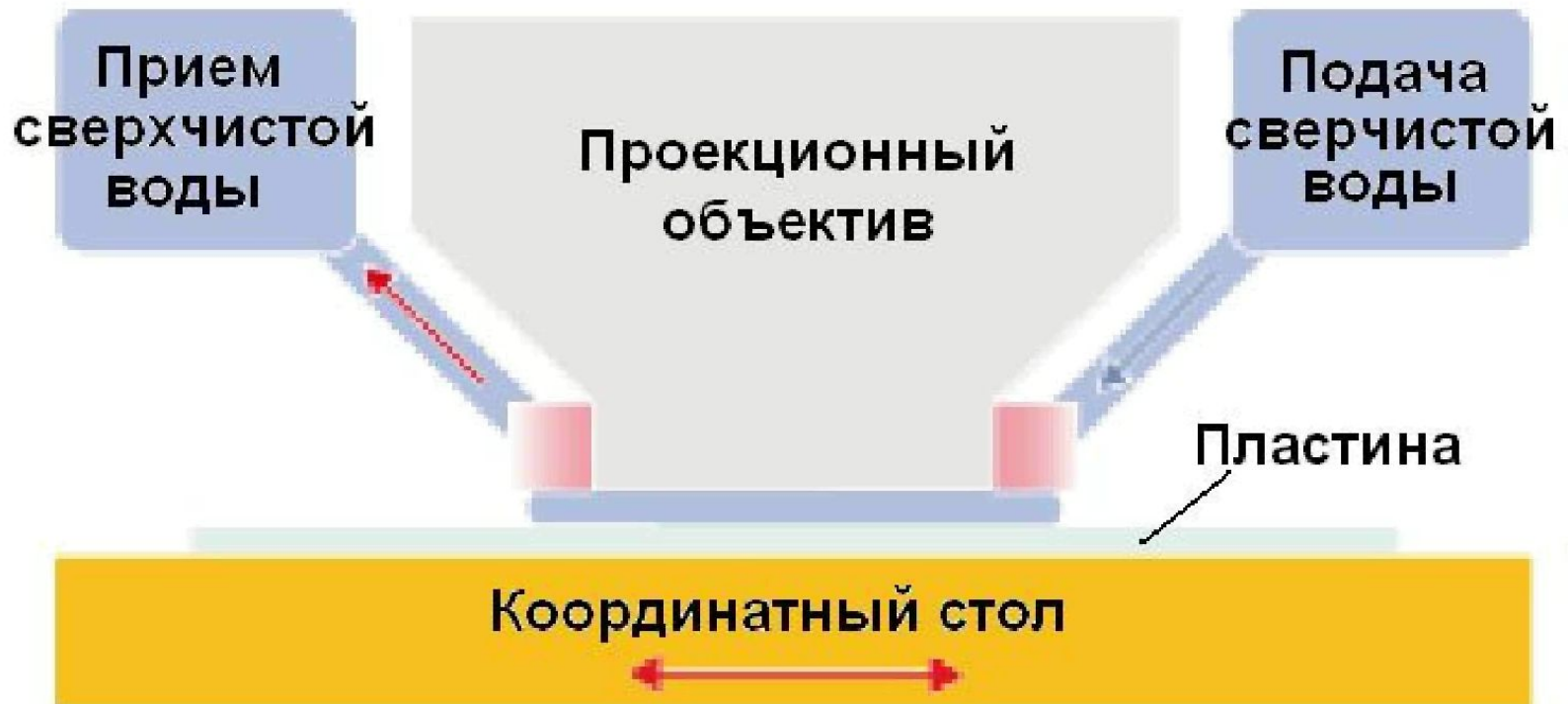


Схема фотолитографии на сверхжестком УФ

