

Полупроводниковые интегральные схемы

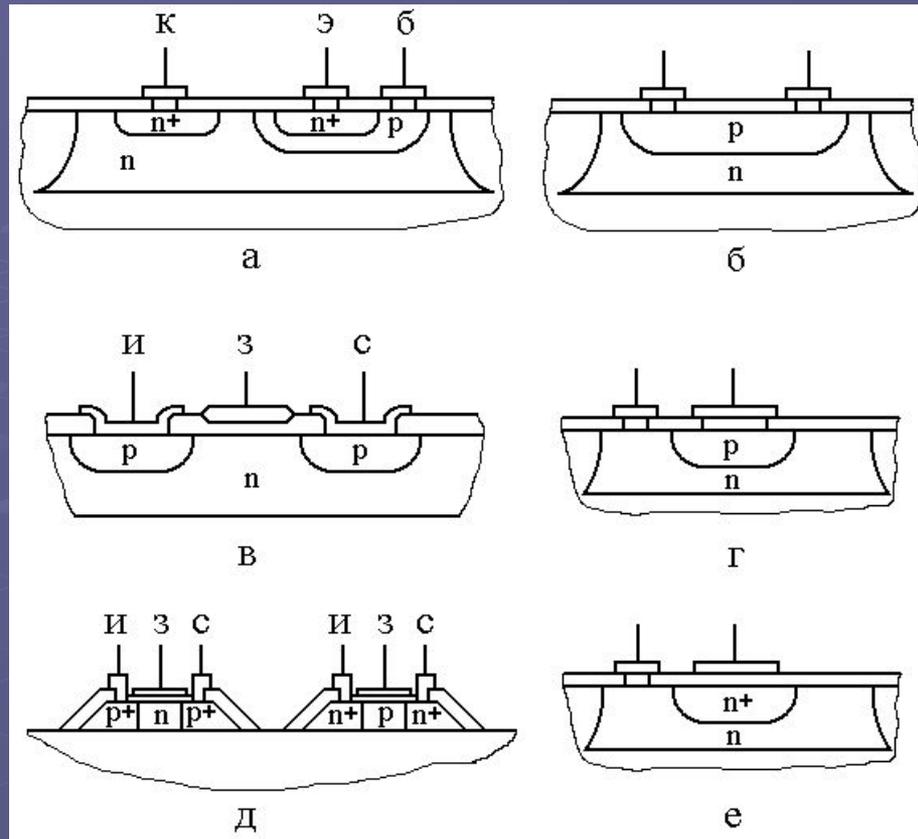
Лекции 8, 9

Базовыми элементами большинства полупроводниковых ИС (ППИС) являются биполярные и униполярные (полевые) транзисторы. На основе их структуры могут быть получены диоды, резисторы и конденсаторы.

Элементы ППИС соединяются тонкопленочной металлизацией. Пассивные элементы (резисторы, конденсаторы, индуктивности) также могут быть сформированы по тонкопленочной технологии на поверхности полупроводниковой подложки (такие схемы называют совмещенными).

Для изготовления ППИС чаще всего (более 80% мирового производства) используют подложки из монокристаллического кремния с определенным удельным сопротивлением и типом проводимости (n или p). Толщина подложек составляет от нескольких десятков до сотен мкм, а диаметр - 100...300 мм.

Основные технологические процессы, для формирования полупроводниковых структур это: оксидирование кремния, диффузия, эпитаксия, ионное легирование, литография, внутренних металлизация (получение внутренних соединений).



Элементы ПШИМ:

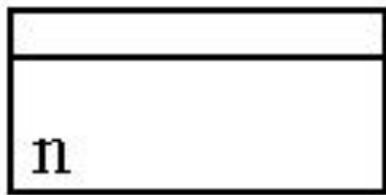
а – биполярный транзистор; б – диффузионный резистор;
 в – полевой (МДП) транзистор; г – диффузионный конденсатор;
 д – КМДП-транзисторы на сапфире; е – МДП-конденсатор

Оксидирование кремния

На поверхности кремниевых подложек создаются пленки SiO_2 толщиной от десятых долей мкм до 1 мкм (кварцевое стекло) обладающие хорошими диэлектрическими свойствами и стойкостью к химическим активным средам.

После фотолитографии используются в качестве изолирующих и защитных слоев, подзатворного диэлектрика в МДП - структурах, а также в качестве КМ при локальном изменении типа проводимости.

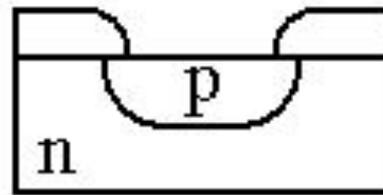
Термическое оксидирование проводится при температуре 1100 0С обычно с чередованием окисления в сухом и во влажном кислороде (парах воды).



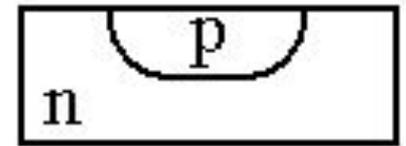
а



б



в



г

Локальное изменение типа проводимости кремния:

а – окисление поверхности;

б – фотолитография;

в – внедрение примеси;

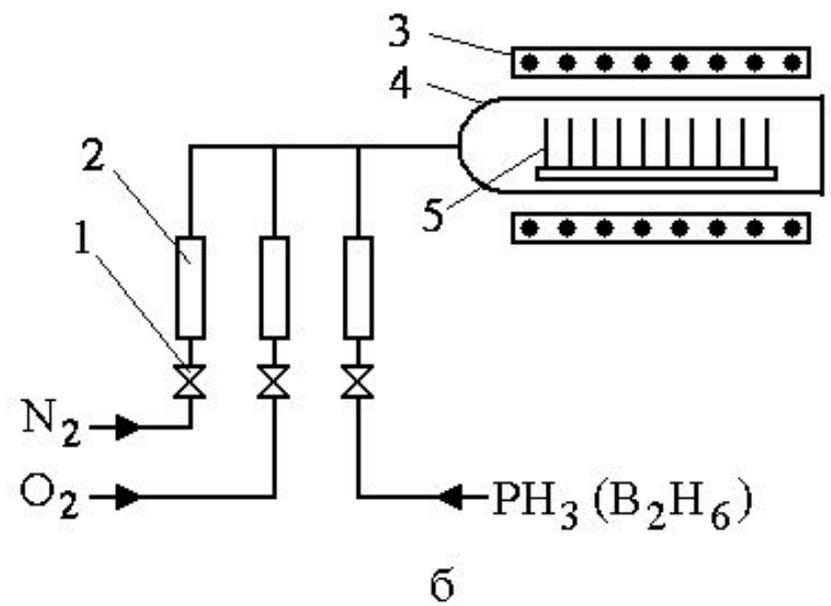
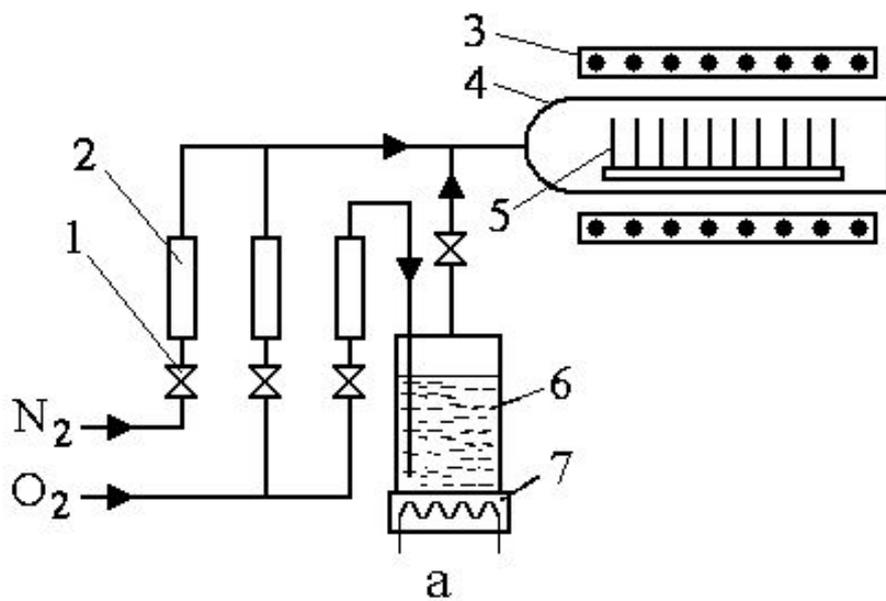
г – стравливание окисла

Диффузия

Процесс переноса легирующих примесей из областей с большей концентрацией в области с меньшей концентрацией. Процесс термического оксидирования также является разновидностью диффузии O_2 в Si .

Диффузия применяется для локального изменения типа проводимости путем внедрения атомов легирующего элемента в кристаллическую решетку полупроводника.

В установках диффузии для легирования кремния используют, в основном, гидриды примесей (PH_3 , B_2H_6 и др.). Они поставляются в баллонах в смеси с инертным газом. Пластины кремния помещают в кварцевую трубу, нагреваемую однозонной печью до температуры $1200^\circ C$, поддерживаемой с точностью $0,2 \dots 0,3^\circ C$.



Схемы установок термического окисления кремния (а) и диффузии из газообразных источников примеси (б):

1 - вентили;

2 – ротаметры для измерения расхода газов;

3 – печь;

4 - кварцевая труба;

5 – подложки на подставке;

6 - деионизованная вода;

7 – нагреватель.

Эпитаксия

Эпитаксией называют процесс наращивания слоев с упорядоченной кристаллической структурой путем использования ориентирующего действия подложки (повторения ее структуры).

Если подложка и слой состоят из одного вещества, то процесс называют гомоэпитаксией (например, кремний на кремнии), если из различных – гетероэпитаксией (например, кремний на сапфире).

На поверхности кремния *n*-типа проводимости можно вырастить слой кремния (толщиной обычно 1...25 мкм) *p*-типа проводимости. В отличие от диффузии здесь удается получить четкие границы между слоями с различным типом проводимости.

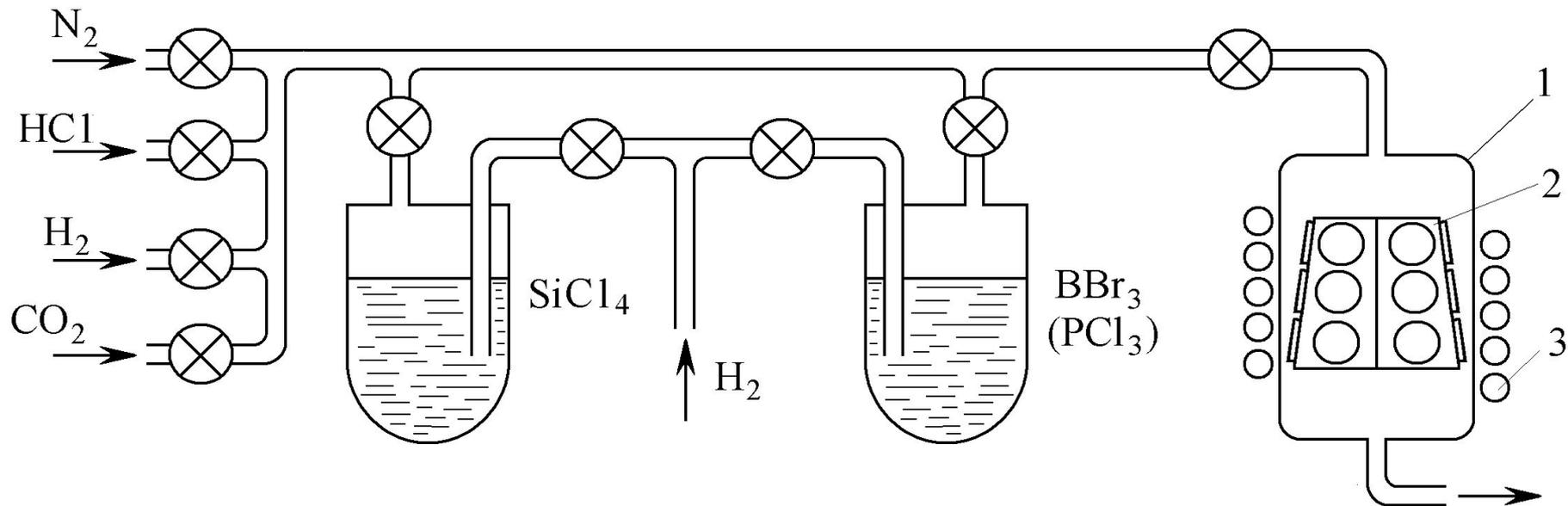


Схема установки эпитаксиального наращивания из парогазовой фазы с вертикальным реактором:

1 – реактор;

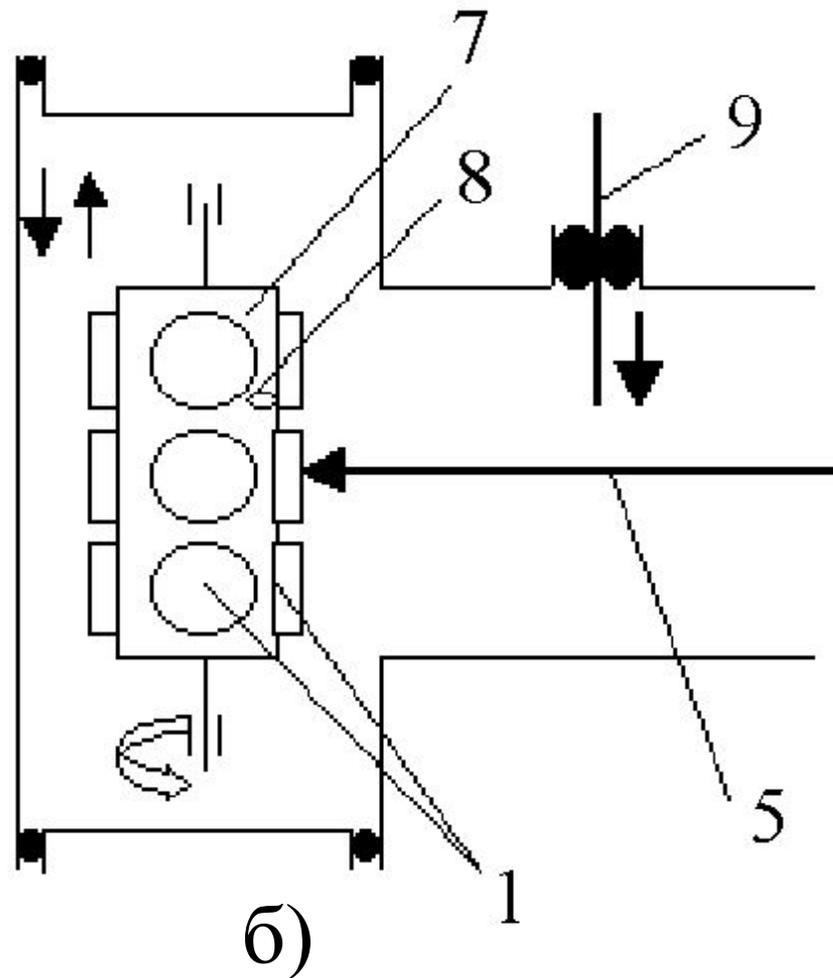
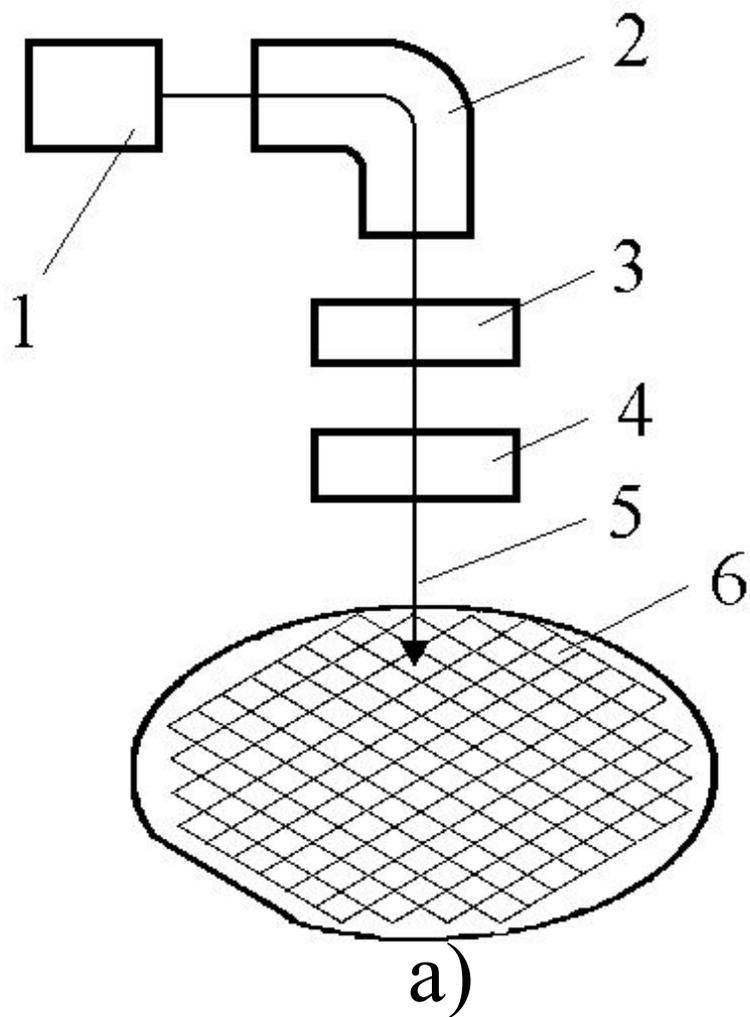
2 – держатель пластин;

3 – индуктор ВЧ-генератора.

Ионное легирование

Ионное легирование (или ионная имплантация) – способ получения р-п переходов путем введения примеси в виде ускоренных ионов (рис. а)

Ионы легирующего элемента образуются в плазме дугового разряда, создаваемого в газоразрядной камере установки, куда поступают пары рабочего вещества, содержащего легирующий элемент.



Схемы установки (а) и рабочей камеры (б) ионного легирования:
 1 – источник ионов; 2 – магнитный сепаратор; 3 – ускоритель; 4 – фокусирующее устройство; 5 – пучок ионов; 6 – подложка; 7 – держатель подложек; 8 – датчики; 9 – вакуумный затвор.

Литографические процессы в производстве ППИС

При изготовлении ППИС применяют (в зависимости от размеров элементов) различные виды литографии:

фото-, рентгено-, электроно- и ионную литографию

Разрешающая способность фотолитографии с $\lambda = 300 \dots 400$ нм и ФШ, выполненными в масштабе 1:1, ограничивается, главным образом, дифракционными явлениями.

Рентгеновская литография (РЛ) является разновидностью оптической печати на микрозазоре, в которой длина электромагнитной волны экспонирующего облучения лежит в диапазоне 0,4...5 нм

Электронно – лучевая литография

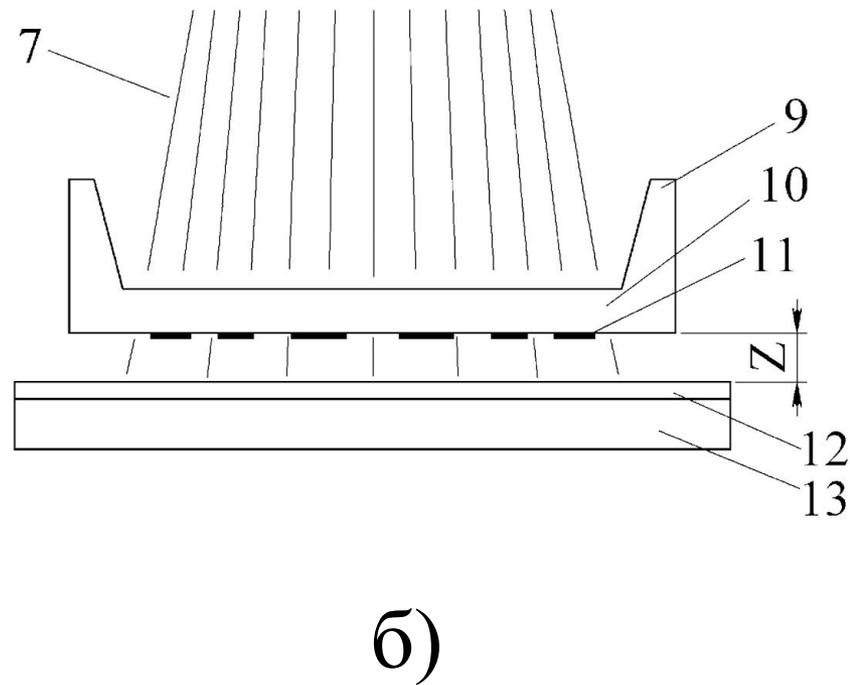
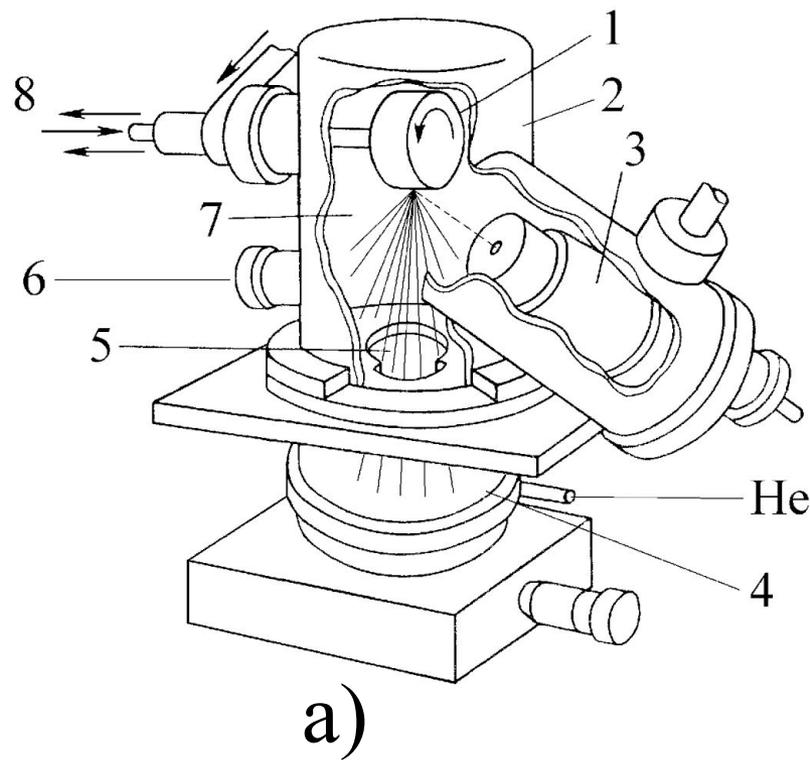
В основе электронно – лучевой литографии (ЭЛЛ) лежит избирательное экспонирование потоком электронов специального резиста, называемого электронорезистом.

В отличие от УФ и рентгеновских лучей поток электронов не является электромагнитным излучением. Поэтому эффекты дифракции и интерференции здесь практически отсутствуют.

ЭЛЛ может быть проекционной и сканирующей. В проекционных вариантах ЭЛЛ изображение может передаваться в масштабе 1:1 или с уменьшением.

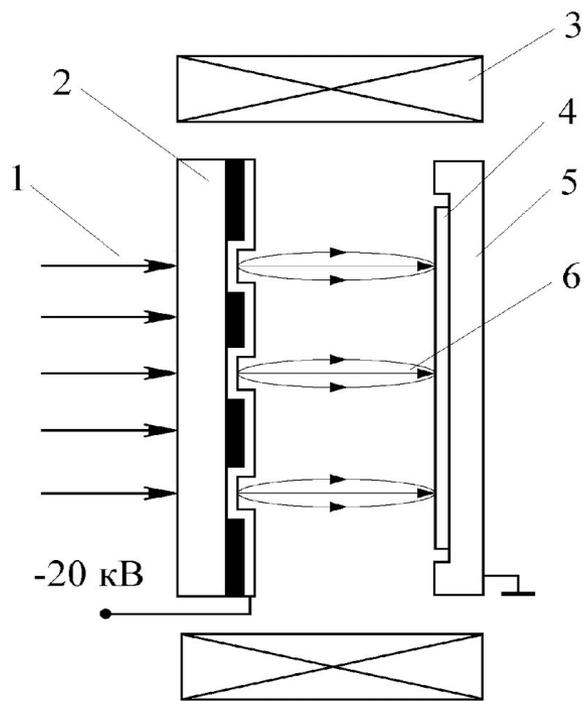
Такой вариант ЭЛЛ позволяет изготавливать ППИС с минимальной шириной линии около 1 мкм.

Сканирующие системы позволяют получать линии шириной 0,1 ... 0,4 мкм.

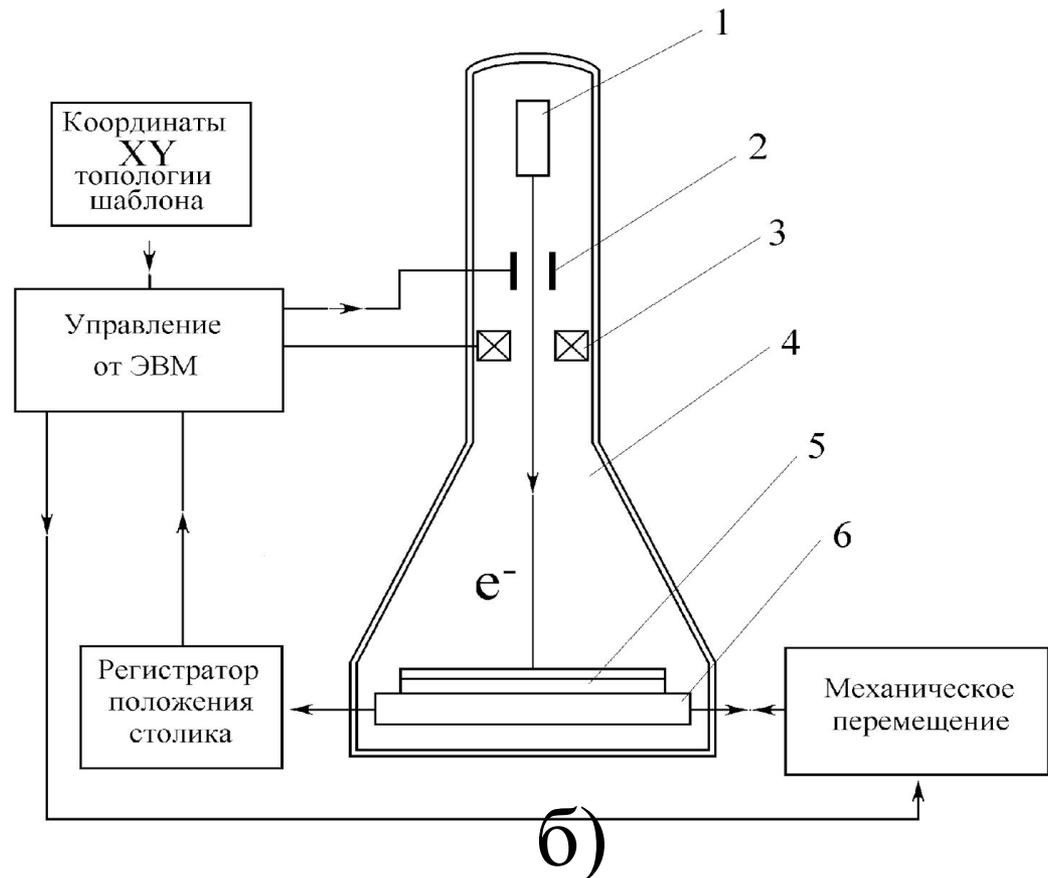


Установка РЛ (а) и схема экспонирования (б):

*1 – мишень; 2 – вакуумная камера; 3 – электронная пушка;
 4- подложка и рентгеношаблон; 5 - бериллиевое окно;
 6 – патрубок для откачки; 7 – рентгеновские лучи; 8 – вода;
 9 – рамка рентгеношаблона; 10 - мембрана рентгеношаблона
 (толщиной ~ 6 мкм); 11- тонкопленочный рисунок;
 12 – рентгенорезист; 13 – подложка; Z – зазор (~ 10 мкм).*



а)



б)

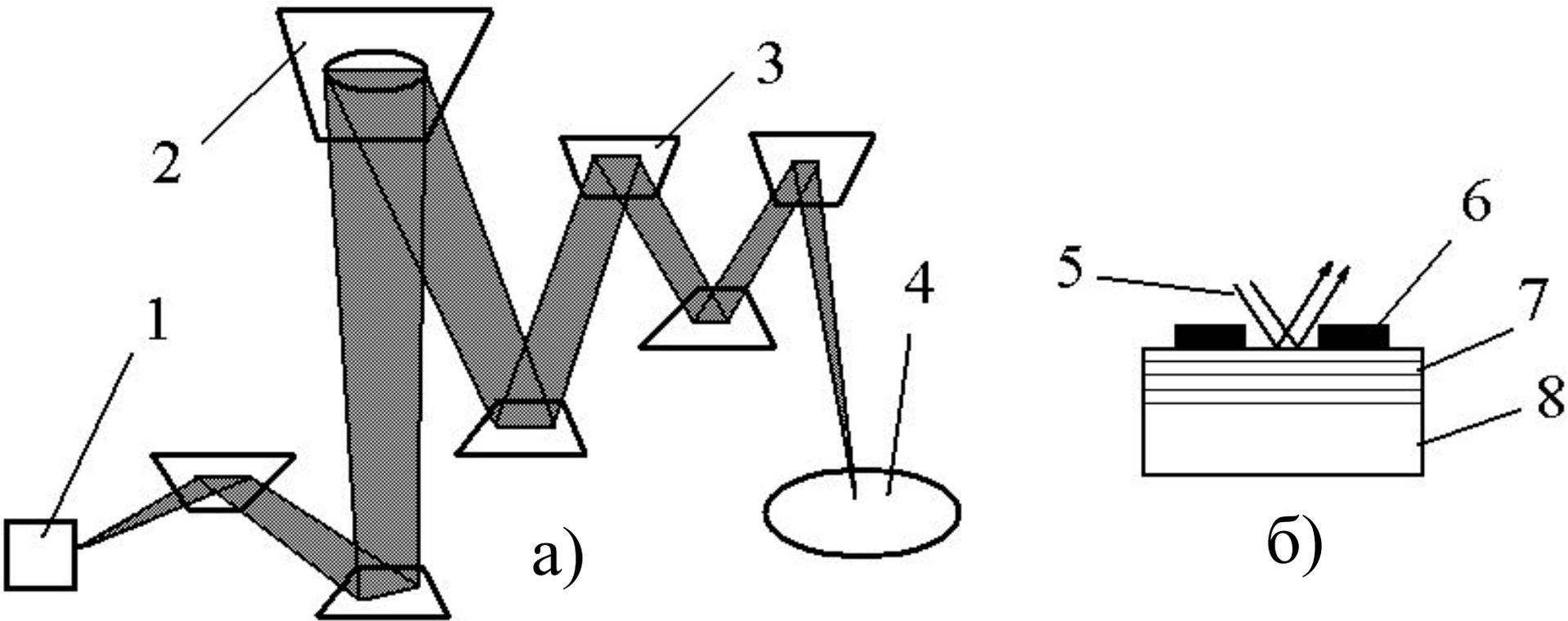
а) Схема проекционной ЭЛЛ:

1 –УФ излучение; 2 – шаблон-фотокатод; 3 – магнитная система;
4 – подложка с электронорезистом; 5 – анод; 6 – поток электронов

б) Схема установки для сканирующей ЭЛЛ:

1 - электронная пушка; 2 – прерывание луча; 3 – отклоняющие катушки, линзы; 4 – вакуумная камера; 5 - подложка с электронорезистом; 6 - столик

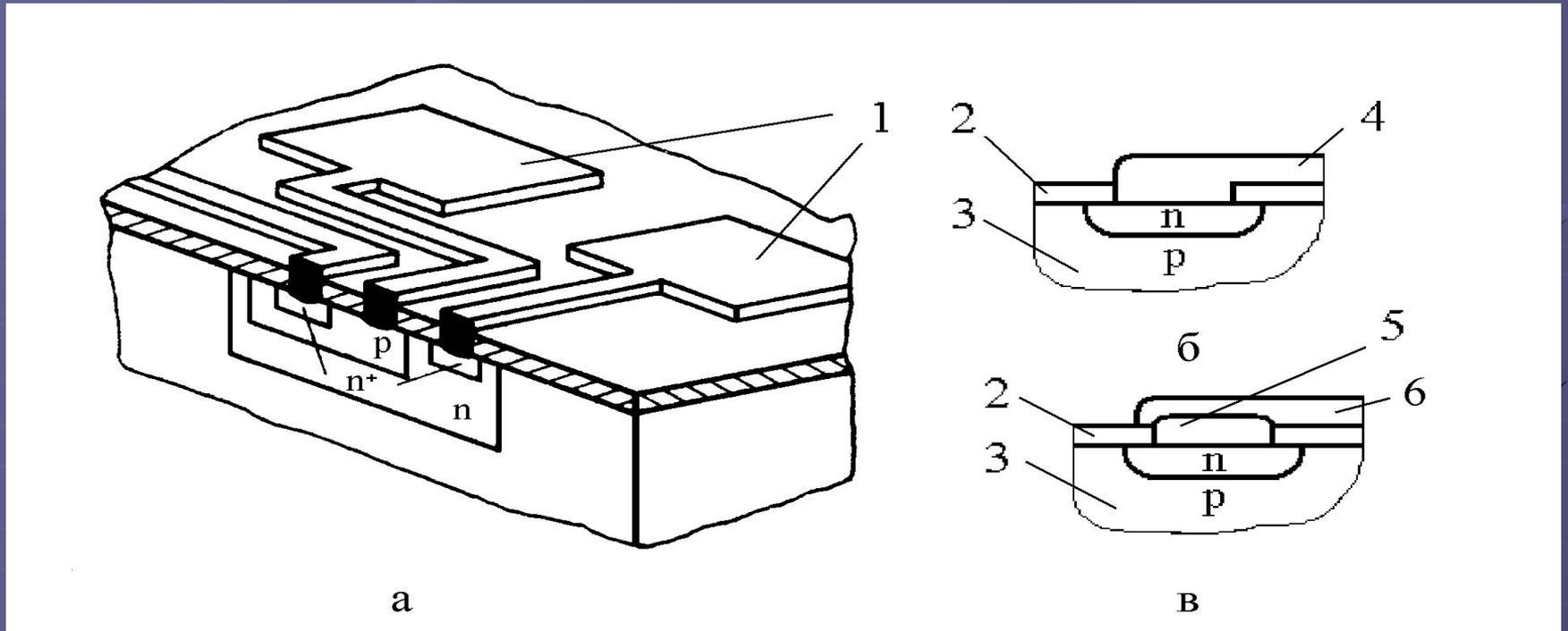
EUV (Extreme Ultra Violet) – литография, использующая излучение с длиной волны порядка 13 нм.



*Схема EUV- литографии (а) и разрез отражающего шаблона (б):
1- источник излучения; 2- шаблон; 3 – зеркала; 4 – подложка;
5 – EUV – лучи; 6 – поглощающие участки; 7- покрытие из 40...80 парных слоев Mo/Si; 8 – подложка шаблона.*

Металлизация

Металлизация ППИС включает в себя процессы получения контактов, межсоединений и контактных площадок.



Фрагмент одноуровневой коммутации ППИС (а) и варианты её выполнения: б – из одного материала; в – из двух материалов; 1 – контактные площадки для внешних связей; 2 – SiO_2 ; 3 – полупроводниковая структура; 4 – контакт и коммутация из одного материала; 5 – контакт; 6 – коммутация.