

Интегральная микросхема

- Применение микросхем привело к революционным изменениям во многих областях электроники. Это особенно ярко проявилось в компьютерной индустрии. На смену громоздким вычислительным машинам, содержащим десятки тысяч электронных ламп и занимавшим целые здания, пришли компактные и быстрые настольные и даже карманные компьютеры.

Интегральная схема (ИС) – это система *микроскопических* устройств (диодов, транзисторов, проводников и т.п.) на одной подложке.

С чьей-то легкой руки микросхемы стали также называть чипами за некоторое сходство с тонкими ломтиками жареного картофеля (англ. chip).

Topology

- **топология интегральной микросхемы (далее — топология) — это зафиксированное на материальном носителе пространственно-геометрическое расположение совокупности элементов интегральной микросхемы и связей между ними.**

Интегральная микросхема

- Чип размером в 1 см^2 может содержать миллионы микроскопических устройств.
- Очевидно, что последовательное создание таких приборов “вручную” невозможно из-за огромного количества межсоединений (попробуйте-ка правильно спаять 1.000.000 транзисторов о трех ногах каждый, плюс еще мириады обслуживающих элементов – резисторов, диодов и т.п., да при этом еще не запутаться в проводах!).
- Выход из создавшегося положения был найден на пути интеграции (объединения) в едином устройстве – интегральной схеме – всего этого множества полупроводниковых устройств и межсоединений, созданных в едином технологическом цикле.

Как делают микросхемы

1. Подготовка подложки (wafer-plate, substrate).
2. Нанесение фоторезиста (photoresist).
3. Экспонирование exposure, (резиста) writing.
4. Травление (etching).
5. Эпитаксия (epitaxy) - the growth of a thin layer on the surface of a crystal so that the layer has the same structure as the underlying crystal, диффузия
6. Металлизация (metallization) - metal(lic) coating.

1. Подготовка подложки

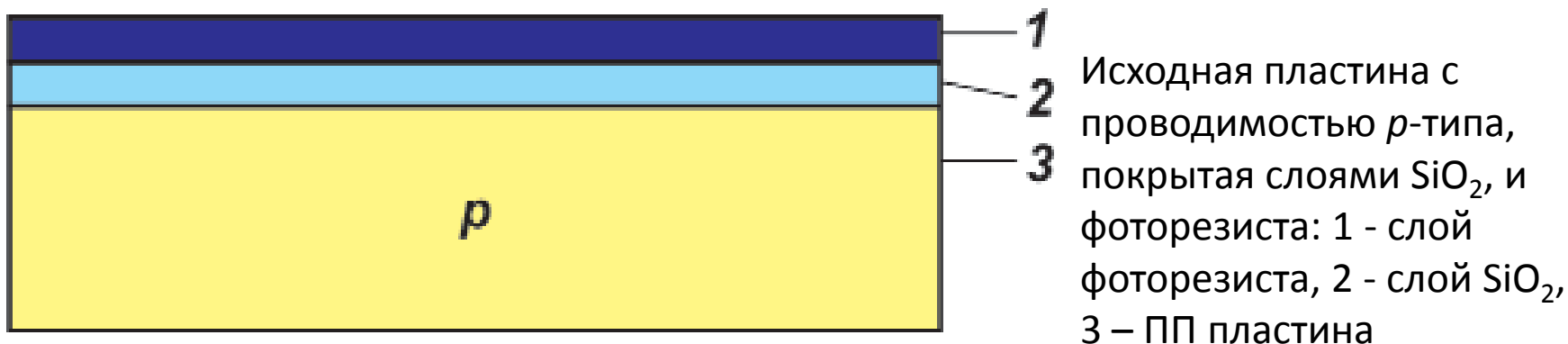
- Подложкой обычно является пластина кристалла кремния (Si) – самого распространенного полупроводника на Земле.
- Обычно пластина имеет форму диска диаметром 200 мм и толщиной менее 1 мм. Получают ее разрезанием цилиндрического монокристалла.
- Так как свойства полупроводникового кристалла сильно зависят от направления (вдоль или поперек кристалла), то перед тем как нарезать кристалл на пластины, его свойства измеряют во всех направлениях и ориентируют нужным образом.
- Для резки монокристаллов на пластины применяются диски с режущей кромкой, покрытой алмазной крошкой размером 40 - 60 микрон.

1. Подготовка подложки

- После резки пластины получаются шероховатыми, на них остаются царапины (abrasions), трещины (cracks) и другие дефекты, нарушающие однородность структуры приповерхностного слоя и его физикохимические свойства. Чтобы восстановить поверхностный слой, пластину тщательно шлифуют (grind) и полируют (polish).
- Все процессы по обработке полупроводниковых пластин проводятся в условиях вакуумной гигиены в специальных помещениях со сверхчистой атмосферой. В противном случае пыль может осесть на пластину и нарушить элементы и соединения микросхемы (гораздо меньшие по размерам, чем сама пыль).
- Очищенная кремниевая пластина подвергается *оксидированию (или окислению)* – воздействию на заготовку кислородом, которое происходит под высокой температурой (1000°C).

2. Нанесение фоторезиста

- Если некоторые области кремния, лежащие под слоем оксида, необходимо подвергнуть обработке, то оксид надо предварительно удалить с соответствующих участков. Для этого на диоксидную пленку сначала наносится слой фоторезиста.
- **Фоторезист** – это светочувствительный материал, который после облучения становится растворимым в определенных химических веществах.
- **Фотошаблон** (mask) представляет собой пластинку, состоящую из прозрачных и непрозрачных участков, и играет роль трафарета.

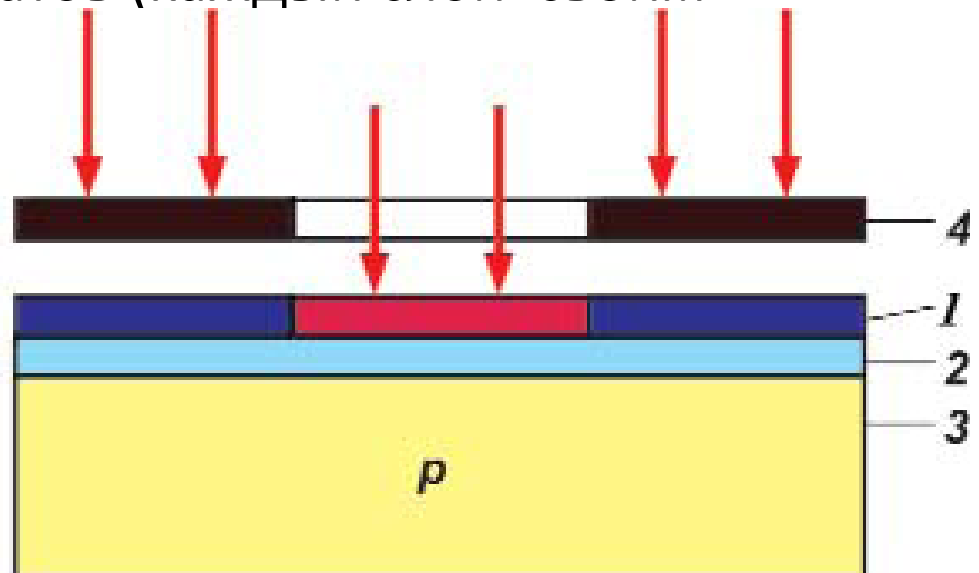


3. Экспонирование

- На следующем этапе – экспонировании – пластину с наложенным на нее фотошаблоном подвергают действию излучения. Фоторезист, расположенный под прозрачными участками фотошаблона, засвечивается.
- В результате засвеченный слой, чьи структура и химические свойства изменились под действием излучения, а также находящийся под ним слой диоксида кремния могут быть удалены с помощью химикатов (каждый слой своим химикатом).

Облучение фоторезиста через фотошаблон:

- 1 – засвеченный участок фоторезиста, 2 – слой SiO_2 ,
3 – полупроводниковая пластина,
4 – фотошаблон

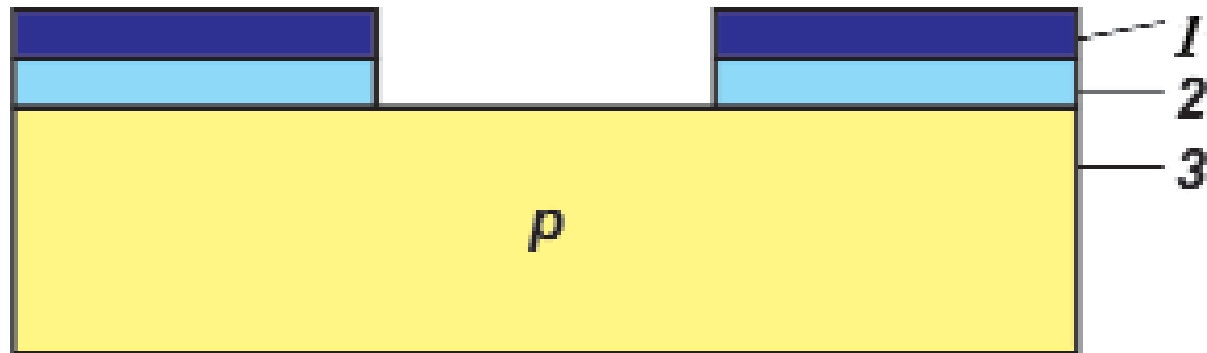


4. Травление - Etching

- Удаление облученного фоторезиста и оксидной пленки называется травлением. Этот процесс необходим, чтобы вскрыть окно для доступа к материалу подложки. Травление может быть химическим “мокрым” или плазменным “сухим”. Химическое жидкостное травление основано на растворении химическими веществами не защищенных фоторезистивной маской участков образца.
- Более эффективными являются “сухие” методы обработки, основанные на взаимодействии газозарядной плазмы с поверхностным слоем материала. Кроме того, существует ионное, ионнохимическое и плазмохимическое травление.
- Результатом травления является полное удаление материала на участках, не защищенных фоторезистом.

4. Травление

- Результатом травления является полное удаление материала на участках, не защищенных фоторезистом.



Кремниевая пластина с “окном” в слое SiO₂, образовавшимся в результате облучения и последующего травления:

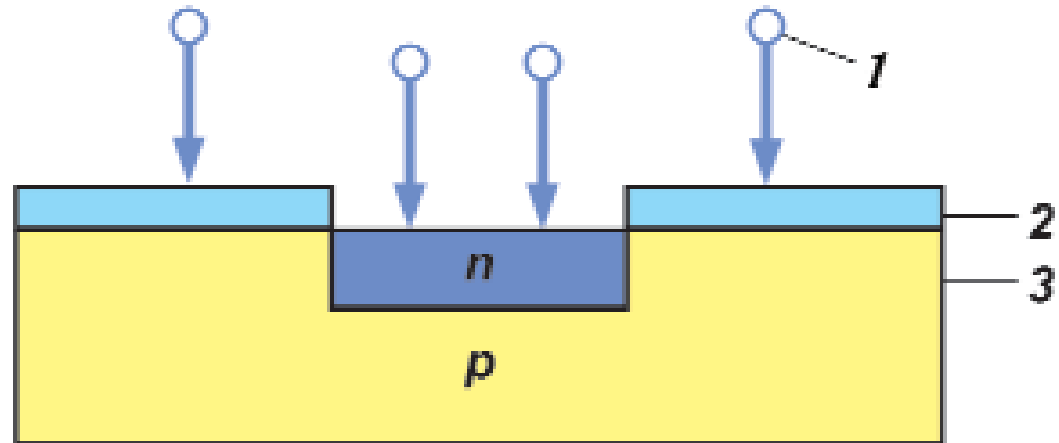
1 – фоторезист,

2 – слой SiO₂,

3 – полупроводниковая пластина

5. Процессы эпитаксии, диффузии и металлизации

- *Эпитаксией называют* ориентированное наращивание слоев вещества с воспроизведением кристаллической структуры подложки. Его производят в особом реакторе. Эпитаксия позволяет создавать равномерные атомные слои на пластине.



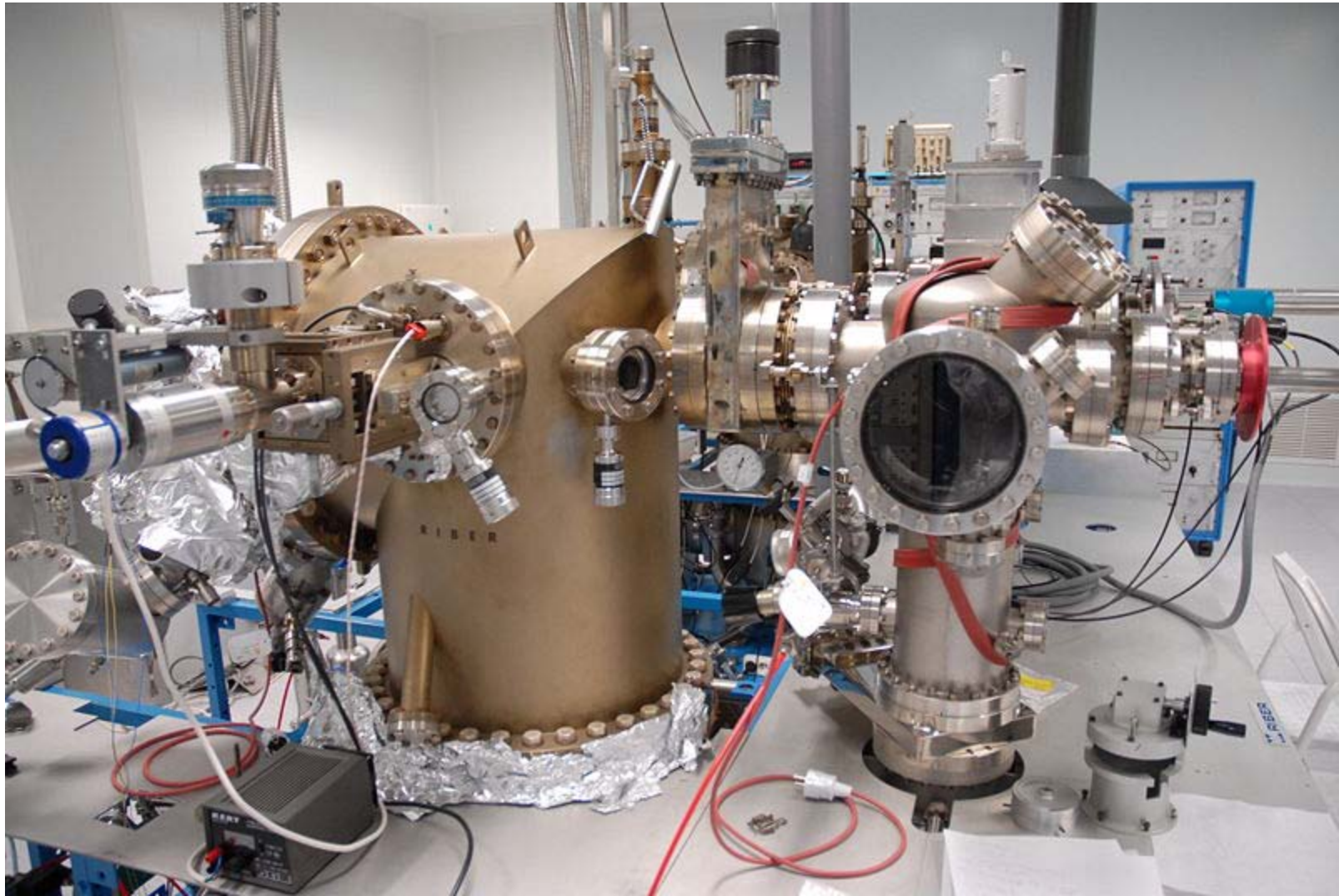
Выращивание на поверхности пластины эпитаксиального *n*-слоя с помощью диффузии донорных примесей:

1 – ионы, 2 – слой SiO_2 , 3 – полупроводниковая пластина.

Молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ), или молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ)

- МПЭ (МПЛ)— эпитаксиальный рост в условиях сверхвысокого вакуума. Позволяет выращивать гетероструктуры заданной толщины с моноатомно гладкими гетерограницами и с заданным профилем легирования.
- В установках МПЭ имеется возможность исследовать качество плёнок «in situ» (то есть прямо в ростовой камере во время роста).
- Для процесса эпитаксии необходимы специальные хорошо очищенные подложки с атомарногладкой поверхностью.
- Технология молекулярно-пучковой эпитаксии была создана в конце 1960-х годов Дж. Р. Артуром (J. R. Arthur) и Альфредом Чо (Alfred Y. Cho).

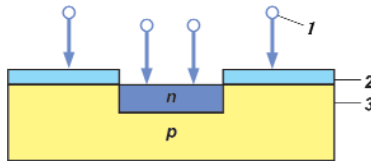
Система молекулярно-пучковой эпитаксии



Видна ростовая камера (слева) и камера загрузки образцов (справа), разделенные заслонкой-шибером.

5. Процессы эпитаксии, диффузии и металлизации

- *Диффузию используют для создания p и n-областей. Для этого в кремний в качестве акцептора вносят бор (В), а в качестве доноров – фосфор (Р) и мышьяк (As). Процесс заключается в нагреве пластины и внедрении в нее ионов с высокой энергией.*



- *Металлизация завершает изготовление чипа. В ходе этого процесса осаждаются тонкие металлические пленки из алюминия, золота или никеля, которые образуют электрические соединения между активными областями и приборами на кристалле – те токопроводящие линии и контактные площадки, которые мы можем наблюдать на любой микросхеме.*

Технология изготовления ИС

Итак, процесс изготовления микросхем включает несколько технологических этапов:

- Очистка, cleaning
- окисление, oxidation, oxidizing
- литография, lithography
- травление, etching
- диффузия, эпитаксия 'epitaxy
- осаждение и металлизация. settling

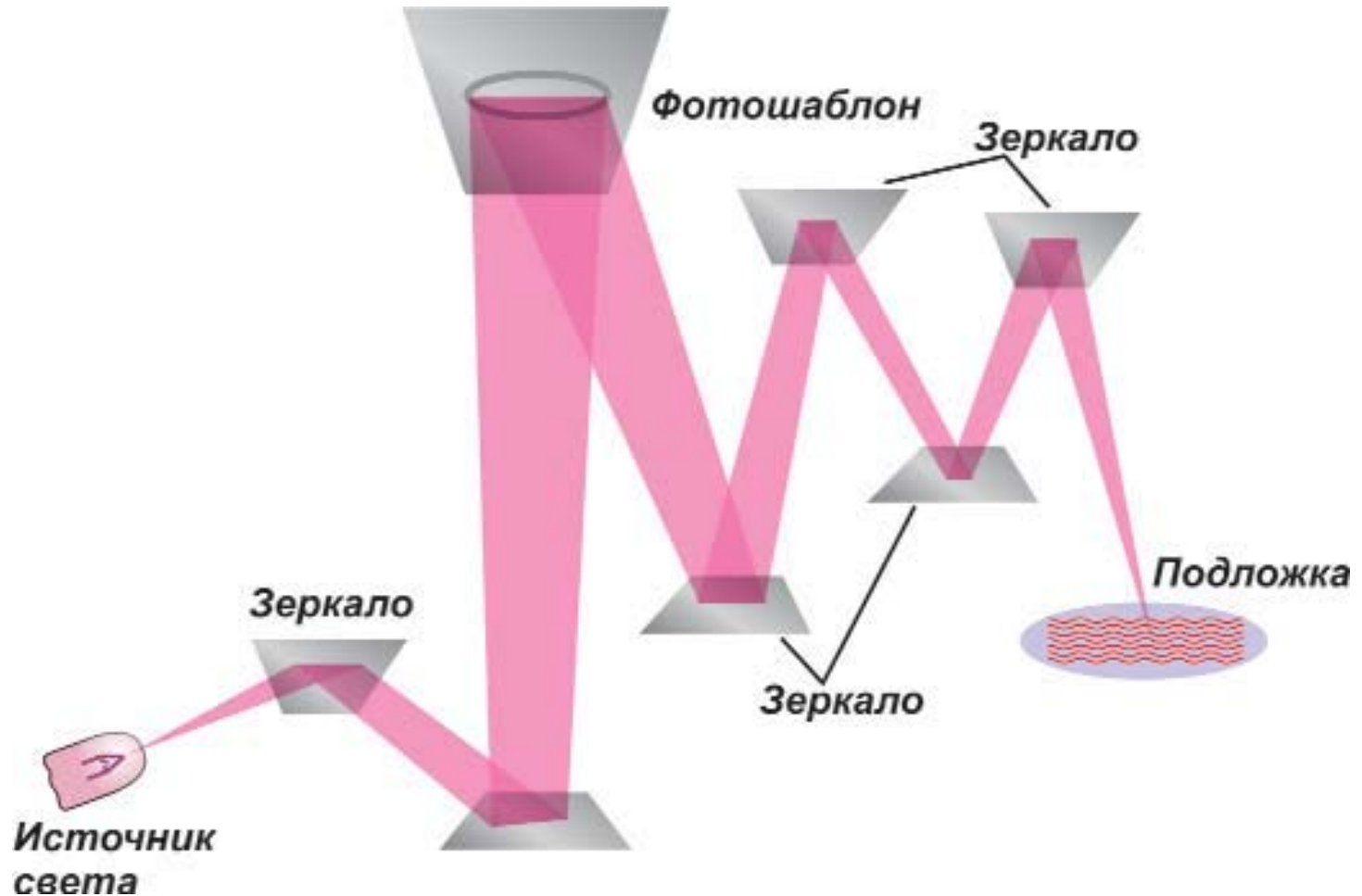
Развитие литографии

- Бесспорно, для дальнейшего развития электроники, т.е. увеличения производительности за счет уменьшения размеров чипов, ключевым моментом является совершенствование методов литографии.
- Это значит, что толщина линий, наносимых светом на поверхности фоторезиста в момент формирования “рисунка” микросхемы, должна стремиться к уменьшению. Этого можно достичь уменьшением длины волны, ведь чем меньше длина волны, тем более мелкие детали рельефа она позволяет «нарисовать».
- Первоначально засветка производилась инфракрасным излучением с длиной волны чуть более 1 микрона – и ширина дорожек была примерно такой же. Затем стандартными стали длины волн 435 и 365 нм. При помощи источника излучения с длиной волны 365 нм вычерчивались линии толщиной до 0,35 микрон, что почти соответствует длине волны.

Развитие литографии

- Затем благодаря переходу на источники, действующие в спектре глубокого УФ-излучения (*DUV-литография “Deep Ultra Violet”*) с длиной волны 248 нм, полупроводниковая промышленность перешла на 0,18-микронную литографию. Достижение топологических размеров в 100 нм и меньше потребует уменьшения длины волны излучения, возможно, за счет применения принципиально новых источников.
- В настоящее время интенсивно развивается *EUV-литография (Extreme Ultra Violet)* – литография в спектре жесткого ультрафиолета, обеспечивающая толщину линий проводников в 70 нм, что примерно в тысячу раз меньше толщины человеческого волоса.
- EUV-литография является обычной литографией, но с использованием излучения с длиной волны 11-14 нм, отражательной оптикой и фотошаблонами. Оптическая система содержит набор зеркал между источником света и маской.

Схема оптической литографии



Преимущества EUV-литографии

- EUV-технология приводит к микропроцессорам в 30 раз быстрее существующих. Процессор в 10 ГГц, например, за время, пока человек моргнет глазом ($\approx 1/5$ секунды), производит 2 млрд. вычислений.
- EUV-литография предназначена для печати элементов размером 0,07 мкм (70 нм) и менее. Это все равно, что рисовать изображение размером с монету на поверхности Земли с космического корабля, а затем поверх него печатать другую картинку, четко совмещая их.
- На одном кристалле соли (с ребром 0,25 мм) разместится ≈ 3600 таких 70-нанометровых элементов.
- Элементы, нанесенные с помощью EUV и DUV-литографий, примерно так же отличаются друг от друга, как две линии, проведенные на бумаге шариковой ручкой (EUV) и маркером (DUV).
- Переход к EUV литографии позволил пересечь 100 нм рубеж, оставаясь в рамках традиционной фотолитографии, но сложная зеркальная оптика и технология изготовления фотошаблонов делает такой подход исключительно дорогим – нужно разрабатывать литографические процессы, основанные на иных физических принципах.

Проводящие полимеры

- Долгое время основными материалами микроэлектроники считались кремний – основа чипов, и медь, используемая в токопроводящих дорожках и контактах. Пластмассовым в компьютере был разве что корпус монитора. Однако в последнее время все большую популярность завоевывают **проводящие полимеры**, которым, по прогнозам материаловедов, в ближайшие годы предстоит стать чуть ли не основным сырьем для производства полупроводниковой техники.
- **Полимеры это огромные молекулы-цепочки (макромолекулы), состоящие из большого числа многократно повторяющихся однотипных молекул-звеньев (мономеров).**
- Греческая приставка "поли", означает "много".

Проводящие полимеры

- Типичным полимером является молекула белка, состоящая из сотен молекул аминокислот. В природе полимеры – важная часть любого микроорганизма, растения, животного. Например, целлюлоза, крахмал, каучук, природные смолы – примеры полимеров растительного мира. В человеческом организме также есть полимеры: мышцы, кожа, волосы и др.
- До недавнего времени полимеры создавала только природа.
- Но в 20х годах XX столетия человек научился синтезировать их самостоятельно. Искусственные полимеры прочно вошли в наш быт (полиэтилен, капрон, нейлон и другие виды пластмасс). Сегодня благодаря своим ценным свойствам пластмассы повсеместно заменяют древесину, металл, стекло. Пластмассы не боятся влаги и едких кислот, не подвержены ржавчине и гнили и к тому же изготавливаются из дешевого углеводородного сырья.

Проводящие полимеры

- Меняя длину и способы переплетения цепочек полимеров, можно управлять прочностью и эластичностью пластмасс. Стоит к цепочке добавить еще хотя бы одно звено или ввести небольшое количество примесей — и у полимера появляются новые свойства. Одни пластмассы по прочности сравнимы с самой лучшей сталью, другие эластичнее резины, третьи прозрачны, как хрусталь, но не разбиваются. Одни пластмассы мгновенно разрушаются под действием тепла, другие способны выдерживать очень высокую температуру. На сегодняшний день создано сотни тысяч различных синтетических полимеров.
- Создание проводящих полимеров и применение их в электронике — это уже область нанотехнологий и переход к приборам и системам наноэлектроники.

Подведем итоги (ресар)

- Прогресс науки и техники во второй половине XX века во многом объясняется созданием и совершенствованием полупроводниковых *транзисторов* – основы современной электроники.
- В зависимости от способности пропускать ток все вещества делятся на проводники, полупроводники и диэлектрики. Характерной чертой полупроводников является их зависимость от внешних воздействий.
- Целенаправленно меняя температуру полупроводникового кристалла или внося в него примеси, можно эффективно управлять его физическими свойствами, в том числе и электропроводностью.

Подведем итоги (ресар)

- Электропроводность полупроводников бывает двух типов:
 - **Собственная** – возникает при нагревании вещества. Тепловое движение разрывает межатомные связи, образуя "дырки", которые вызывают движение электронов, стремящихся заполнить разорванные связи. Ток идет пока дырки и электроны не рекомбинируют. Собственный полупроводник имеет равные концентрации электронов и дырок ($n=p$).
 - **Примесная** – объясняется наличием в полупроводнике примесей с лишними (донорные), или недостающими (акцепторные) электронами. Полупроводник с донорной примесью относится к n -типу ($n>p$), а с акцепторной к p -типу ($n<p$).

Подведем итоги (ресар)

- Полупроводниковые приборы основаны на ЭД-переходах. *P-n-переход* – это область контакта двух полупроводников с разными типами проводимости. На p-n-переходах построены диоды и транзисторы.
- Микропроцессор состоит из миллионов транзисторов, оперирующих электрическими импульсами, символизирующими 0 и 1. Соединяя несколько транзисторов, можно получить все базовые схемы, для микропроцессора: "И", "ИЛИ", "НЕ" и другие.
- *ИС* – это система микроскопических устройств (диодов, транзисторов, проводников и т.п.) на одной подложке. Другое популярное название микросхемы – *микрочип*.
- ИС – плоские пластины, поэтому технология их создания называется планарной. Ее основу составляет *литография* – способ формирования заданного рисунка (рельефа) в слое полупроводника.

Подведем итоги (ресар)

- Процесс изготовления ИС включает несколько технологических этапов: очистка, оксидирование, литография, травление, диффузия, осаждение и металлизация.
- Основными материалами микроэлектроники считались кремний, служащий основой для создания ИС, и медь, используемая в качестве токопроводящих дорожек и контактов. В последнее время все большую популярность завоевывают *проводящие полимеры*, открытые в конце XX века. Благодаря дешевизне производства такие полимеры находят все больше применений в электронике.
- Чем больше транзисторов можно поместить на единице площади, тем выше быстродействие компьютера. Поэтому для дальнейшего развития микропроцессорной техники неизбежен переход к нанoeлектронике, МЭМС, и НЭМС.

Dictionary

- Conductor (Electric Conductor) - Провідник
- Semiconductor - Напівпровідник
- Dielectric - Ізолятор (діелектрик)
- Chemical element – Хімічний елемент
- Admixture (additive, impurity) – домішок (примесь)
- Electron-hole junction, p-n junction - електронно-дырочный переход
- Physical properties – фізичні властивості
- Covalent bond – Ковалентний зв'язок між атомами
- Interbond (valence, valent) electrons – валентні електрони
- Outer shell – Зовнішня оболонка (внешняя оболочка)
- Unidirectional conduction – одностороння провідність
- Barrier layer – запирающий слой (запирный шар)
- Inverse current - зворотний струм
- Opposite charges - різнойменні заряди (разноимённые заряды)
- *n*-area (*p*-area) – *n*-область (*p*-область)

- електронно-дырочный переход - electron-hole junction, p-n junction
- логический переключатель - logical switch
- фотошаблон - photographic mask
- подложка – substrate, wafer-plate, bottom layer
- крахмал – starch
- каучук – rubber, caoutchouc
- природная смола - natural resin (gum)