

ЭЛЕКТРОНИКА

или

Физическая электроника

или

Физика твердого тела для
радиоинженеров

Лектор:

Торина Елена Михайловна,

к.т.н., доцент кафедры

Формирования и обработки радиосигналов

Цель курса

- Понять принципы действия и способы количественного описания характеристик основных полупроводниковых приборов, используемых в различных современных функциональных узлах радиоэлектроники.

✓ Физическая электроника

(2 курс – «Электроника»)

✓ Прикладная электроника

(3 курс – «Физические процессы в электронных цепях»)

Физическая электроника

Изучает:

- ✓ Поведение электронов в различных физических структурах
- ✓ Количественно описывает и объясняет процессы накопления, рассасывания и переноса зарядов.
- ✓ Выявляет какими внешними факторами и как можно управлять этими процессами.

Основные задачи:

- Поиск новых структур
- Поиск новых материалов
- Поиск новых способов управления движением e .

Изучая физические процессы в микроэлектронных структурах, записывают соотношения, связывающие токи и напряжения и затем на основе этих соотношений составляют электрическую схему, т.е. электрическую модель прибора.

Прикладная электроника

Основа схемотехники!

- Построение устройств различного назначения
- Методы проектирования, анализа и оптимизации этих устройств.

Проектируем простейшие функциональные узлы радиотехнических устройств. Описываем их эквивалентными электрическими схемами, т.е. объединяем в общую электрическую схему, которая описывает работу этого устройства. Дальше проводим оптимизацию.

ЛИТЕРАТУРА (simple)

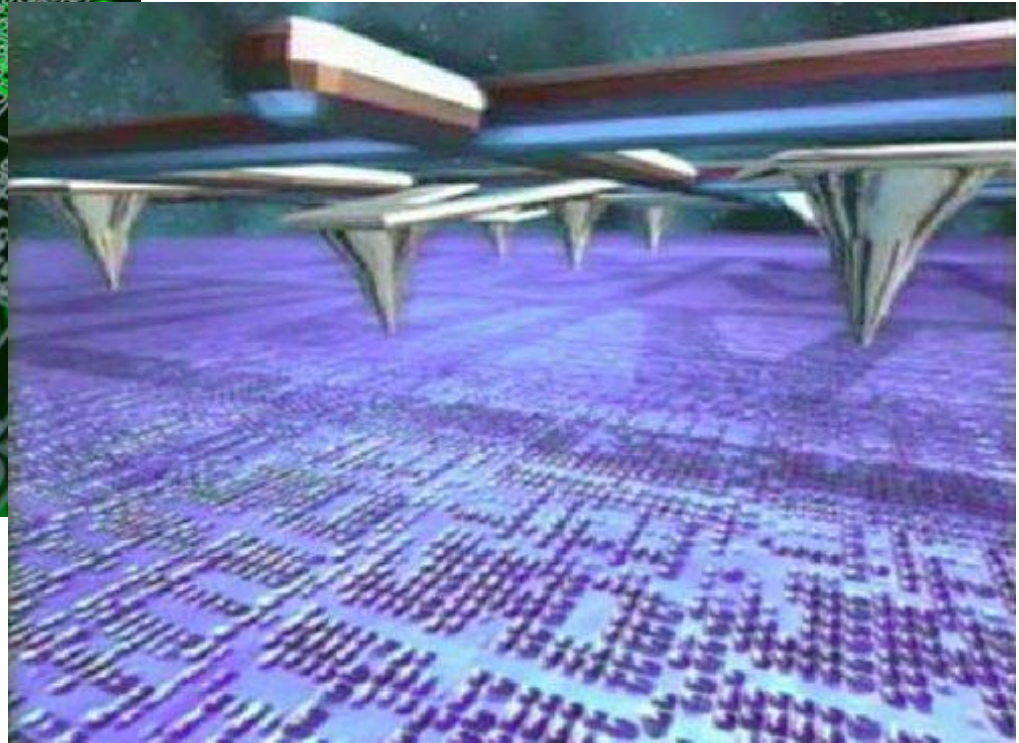
1. Воронков Э.Н., Гуляев А.М., Мирошникова И.Н., Чарыков Н.А. Твердотельная электроника. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 320 с.
2. Шишкин Г.Г. , Шишкин А.Г. Электроника: учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2009, - 703 с
3. Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Томашевская М.В. Базовые ячейки функциональных узлов радиоэлектронных устройств на полевых транзисторах. – М.: Издательство МЭИ, 2005.
4. Кулешов В.Н., Болдырева Т.И., Васильев М.В. Базовые ячейки функциональных узлов радиоэлектронных устройств на биполярных транзисторах. – М.: Издательство МЭИ, 2009.
5. Простейшие функциональные узлы на полупроводниковых диодах и транзисторах: лабораторный практикум – М.: Издательство МЭИ, 2021.

ЛИТЕРАТУРА (medium)

1. Л. Росадо. **Физическая электроника и микроэлектроника.**
2. В.А. Гуртов. Физика твердого тела для инженеров.
3. Н. Ашкрофт, Н. Мермин. Физика твердого тела
4. Ч. Киттель. Элементарная физика твердого тела. Физика твердого тела. Квантовая теория твердых тел.
5. Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. Задачи по физике твердого тела.
6. В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. Физика полупроводников.

Историческая справка

Характерная особенность современного естествознания — рождение новых, быстро развивающихся наук на базе фундаментальных знаний. К одной из таких наук относится сформировавшаяся в недрах физики микроэлектроника, перерастающая в последнее время в нанoeлектронику.



Историческая справка

У микроэлектроники и нанoeлектроники один общий корень — электроника. В соответствии со строгим определением электроника — наука о взаимодействии электронов с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых), используемых для передачи, обработки и хранения информации. Возникла она в начале XX в. На ее основе были созданы электровакуумные приборы, в том числе и электронные лампы (диод, триод, тетрод, пентод и т. д.).

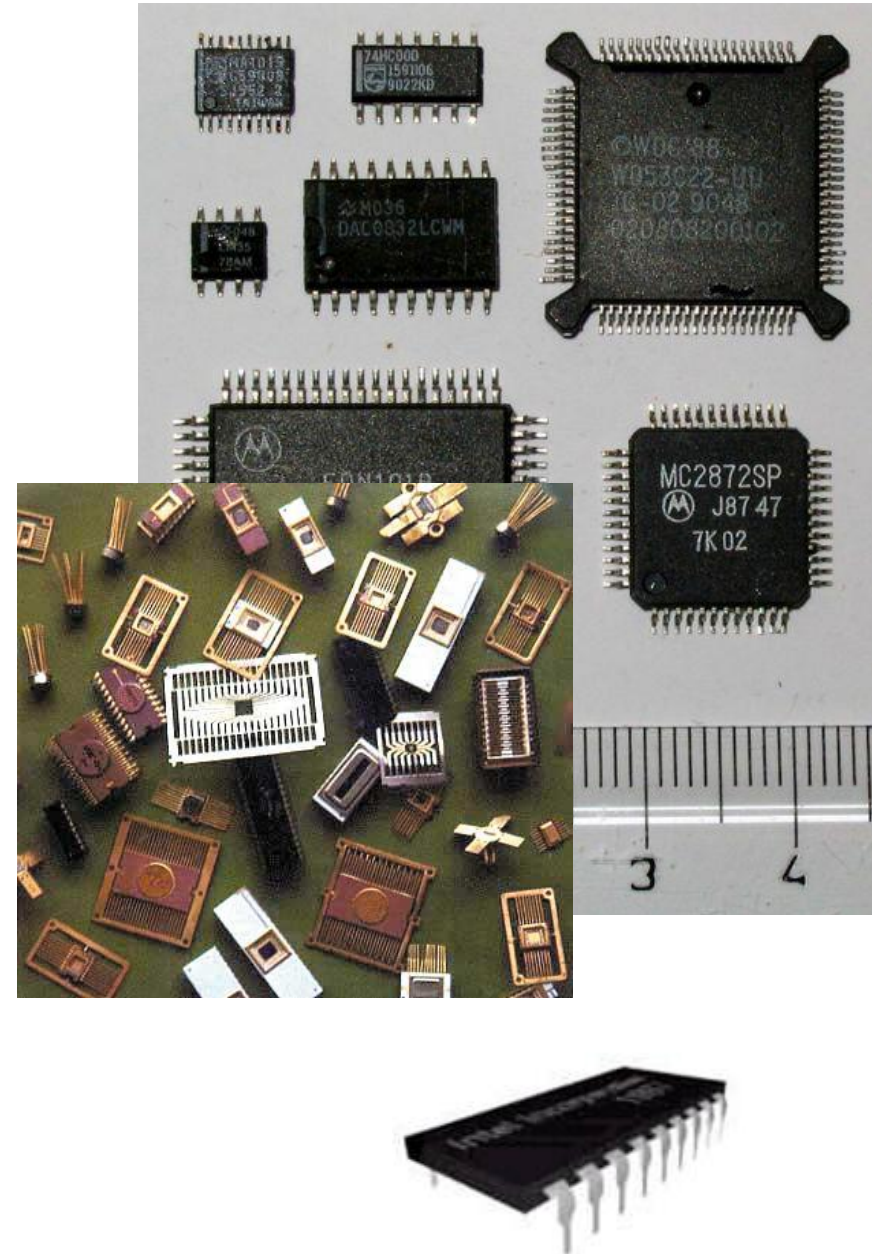


Историческая справка

Основу электронной базы микроэлектроники составляют интегральные схемы, выполняющие заданные функции блоков и узлов электронной аппаратуры, в которых объединено большое число микроминиатюрных элементов и электрических соединений, изготавливаемых в едином технологическом процессе.

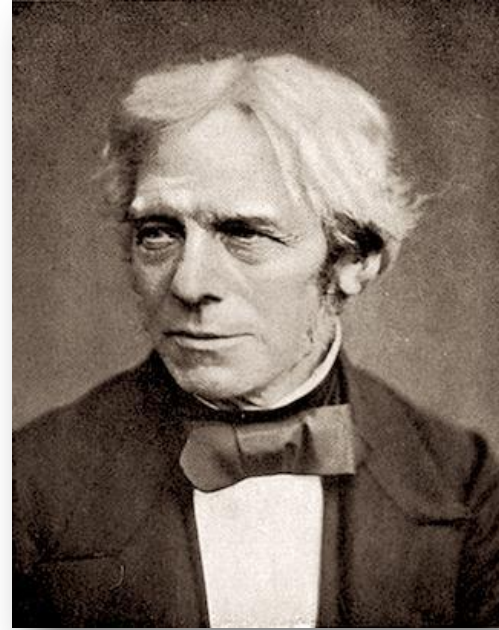
Микроэлектроника развивается в направлении уменьшения размеров содержащихся в интегральной схеме элементов (до 0,1–1,0 мкм), повышения степени интеграции (до 10^6 – 10^7 элементов на кристалл), плотности упаковки (до 10^5 элементов в 1 мм³), а также использования различных по принципу действия приборов (опто-, акусто-, криоэлектронных, магниторезистивных и др.).

В последнее время ведутся интенсивные работы по созданию интегральных схем, размеры элементов которых определяются нанометрами (10^{-9} м).



Историческая справка

Эпоха развития твердотельной электроники имеет более чем столетнюю историю; она началась с возникших и долго необъясняемых физических загадок, так называемых «плохих» проводников. Еще в XIX в. выдающийся физик М. Фарадей столкнулся с первой загадкой – с повышением температуры электропроводность исследуемого образца возрастала по экспоненциальному закону. К тому времени было известно, что электрическое сопротивление многих проводников линейно увеличивается с ростом температуры. Спустя некоторое время французский физик А.С. Беккерель (1788–1878) обнаружил, что при освещении «плохого» проводника светом возникает электродвижущая сила – фото ЭДС - вторая загадка.



М. Фарадей



А.С. Беккерель

Историческая справка

Было обнаружено, кроме того, изменение сопротивления селеновых стержней под действием света, что в определенной степени подтвердило сущность второй загадки, связанной с фотоэлектрическими свойствами «плохих» проводников. В 1906 г. немецкий физик К.Ф. Браун (1850–1918) сделал важное открытие: переменный ток, проходя через контакт свинца и пирита, не подчиняется закону Ома; более того, свойства контакта определяются величиной и знаком приложенного напряжения. Это была третья физическая загадка.



К.Ф. Браун

Историческая справка

В 1879 г. американский физик Э. Холл (1855–1938) открыл явление возникновения электрического поля в проводнике (тонкой пластине золота) с током, помещенном в магнитное поле, направленное перпендикулярно току.

Электрическое поле возникало и в полупроводниках: в одних полупроводниках электрическое поле направлено в одну сторону, а в других – в противоположную. Предполагалось, что направление данного поля определяют электроны и какие-то, в то время неизвестные, положительно заряженные частицы. Открытие Э. Холла – четвертая загадка «плохих» проводников.

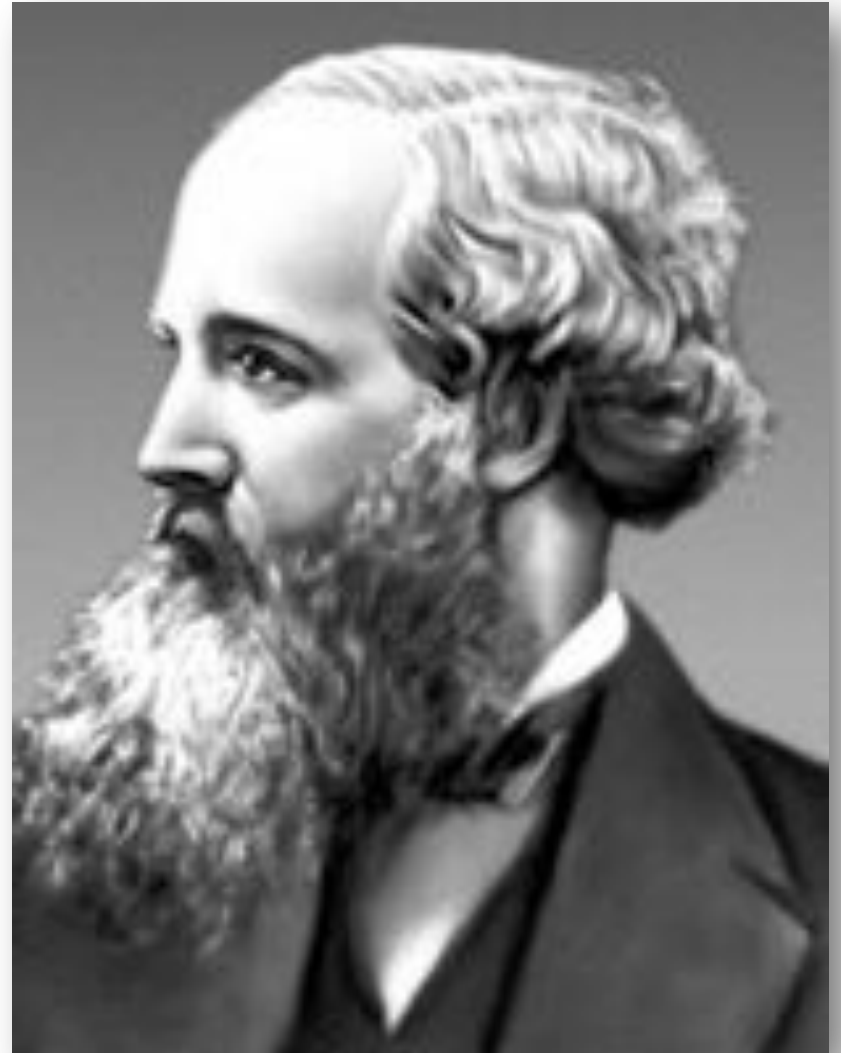
Э. Холл



Историческая справка

Созданная Дж. Максвеллом теория электромагнитного поля не объясняла ни одну из четырех загадок. Пока физики-теоретики искали отгадки, инженеры все шире применяли полупроводники.

В начале прошлого столетия ученые увлеклись исследованием беспроводной связи. Были созданы первые приемники радиоволн, способные детектировать сигналы. В них использовались контакты из полупроводниковых материалов и металла. Кристаллические полупроводниковые детекторы позволяли выпрямлять радиочастотные сигналы, но усиливать их не могли.



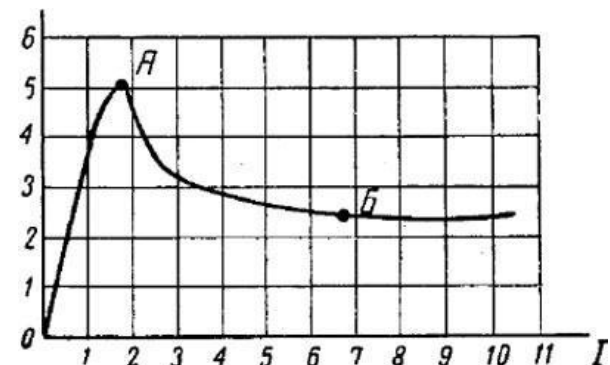
Дж. Максвелл

Историческая справка

Изучая свойства кристаллического детектора, наш соотечественник, выдающийся радиоинженер О. Лосев (1903–1942) обнаружил на вольт-амперной характеристике кристалла участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, на основе чего создал в 1922 г. генерирующий детектор. Это был первый детектор, способный усиливать и генерировать электромагнитные колебания. Основой его служила контактная пара: металлическое острие – полупроводник (кристалл цинкита). Однако хотя открытие О. Лосева и вызвало большой интерес в те годы, оно не нашло промышленного внедрения. 30–40-е годы – пора расцвета электровакуумных ламп, которые широко применялись в различных устройствах радиосвязи. Ненадежные в те годы полупроводниковые приборы не могли конкурировать с электронными лампами. В полупроводниковой электронике четыре загадки оставались неразгаданными почти 100 лет.



О. Лосев



Историческая справка

Тем не менее исследование свойств полупроводников продолжалось. Предпринимались поиски природных и синтезированных полупроводников – интерметаллических соединений с полупроводниковыми свойствами. Исследовательские работы существенно активизировались после создания зонной теории полупроводников, в соответствии с которой в твердом теле энергетическое состояние электронов образуют так называемые зоны, разделенные промежутками запрещенных значений энергий.

Если же ширина запрещенной зоны невелика, то электроны могут возбуждаться различными способами и переходить из валентной зоны в более высокоэнергетическую.

В верхней зоне находятся свободные заряды; она названа **зоной проводимости**.

Между ними расположена **запрещенная зона**.

Нижняя зона, в которой заряды связаны, получила название **валентной зоны**.

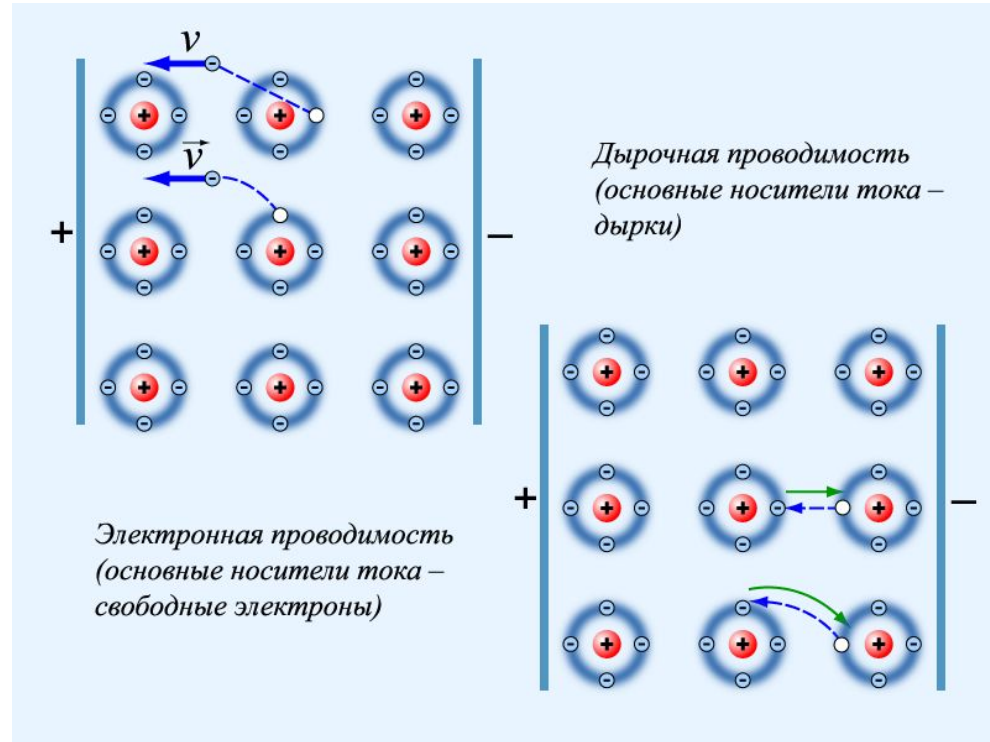
Если ее ширина велика, то в твердом теле электропроводность отсутствует и оно относится к диэлектрикам.

При разогреве твердого тела происходит тепловое возбуждение электронов, повышается их энергия и они переходят в зону проводимости; при этом повышается электропроводность твердого тела, а значит, уменьшается его сопротивление.

Историческая справка

В результате анализа электропроводности полупроводников был сделан вывод: на освободившихся от электронов местах в процессе их перехода в зону проводимости образуются вакансии или дырки, которые эквивалентны носителям положительного заряда, обладающим подвижностью, эффективной массой и способностью давать вклад в электрический ток с направлением, противоположным току электронов.

Выяснилось, что существуют полупроводники с электронным типом проводимости (n-тип), для которых эффект Холла отрицателен, и полупроводники с положительным эффектом Холла, имеющие дырочный тип проводимости (p-тип). Первые названы донорными, вторые – акцепторными.



Историческая справка

В конце 30-х годов трое ученых-физиков – советский А. Давыдов, английский Н. Мотт и немецкий В. Шоттки – независимо друг от друга предложили теорию контактных явлений, в соответствии с которой в полупроводниках на границе дырочного и электронного типов полупроводников происходит обеднение носителями зарядов и возникает эффективный электронно-дырочный барьер, препятствующий свободному передвижению электронов и дырок. Через такую границу ток проходит только в одном направлении, а ее электрическое сопротивление зависит от величины и направления приложенного напряжения. Если электрическое поле приложено в прямом направлении, высота барьера уменьшается, и наоборот; при этом неосновные носители тока (дырки в электронном полупроводнике и электроны в дырочном) играют определяющую роль.



А. Давыдов



Н. Мотт



В. Шоттки

Удалось изготовить образец, включающий границу перехода между двумя типами проводимости. Так впервые был создан р-n-переход и к сороковым годам удалось разгадать все четыре загадки «плохих» проводников.

Историческая справка

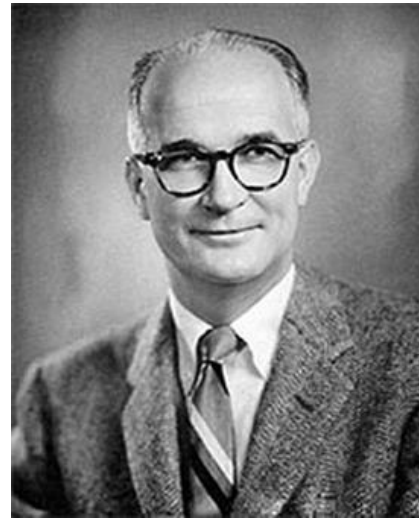
Первым твердотельным прибором для усиления электрического тока, способным работать в устройствах вместо незаменимой в те времена лампы, стал точечный транзистор, в котором два точечных контакта расположены в непосредственной близости друг от друга на верхней поверхности небольшой пластинки кремния n-типа. Демонстрация первого транзистора состоялась в 1948 г. Он позволял усиливать сигнал вплоть до верхней границы звуковых частот более чем в сто раз. В 1956 г. за разработку транзисторов американские физики Д. Бардин (1908–1991), У. Браттейн (1902–1987) и У. Шокли (1910–1989) получили Нобелевскую премию.



Д. Бардин



У. Браттейн



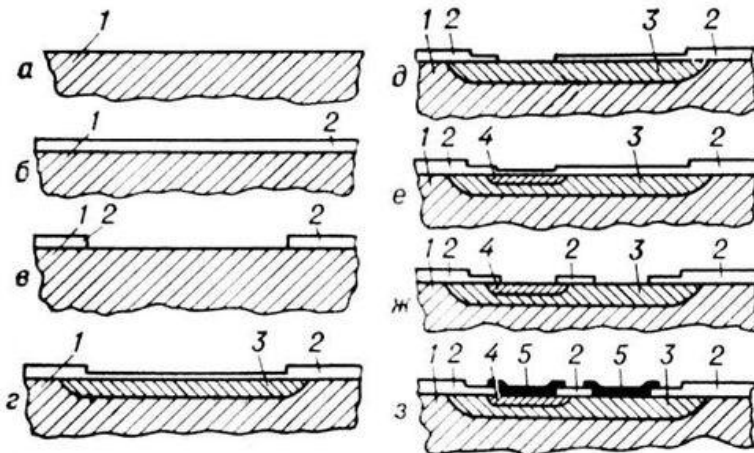
У. Шокли



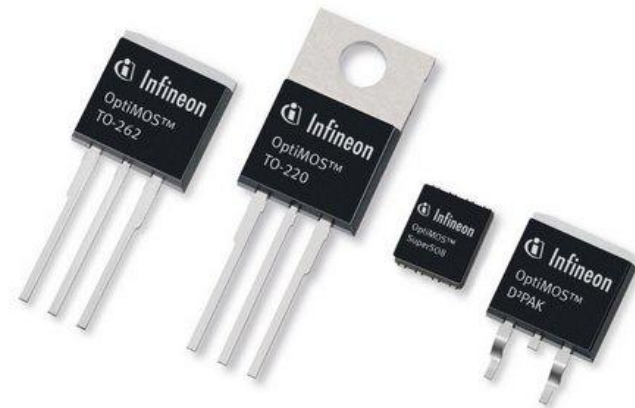
Историческая справка

В конце 50-х годов была разработана технология создания планарных транзисторов, конструкция которых имеет плоскую структуру. Особенность этой технологии – возможность создания множества приборов на одной подложке. Такая технология открыла путь к групповой технологии производства транзисторов и его автоматизации.

В истории разработки транзисторов известны примеры новых технических решений, которые открывали новые направления в полупроводниковой электронике. Одним из таких примеров может служить разработка полевых транзисторов, которые могли выполнять функции резисторов, управляемых напряжением. Типичный полевой транзистор реализован на базе структуры металл–окисел–полупроводник и носит название МОП - транзистор.



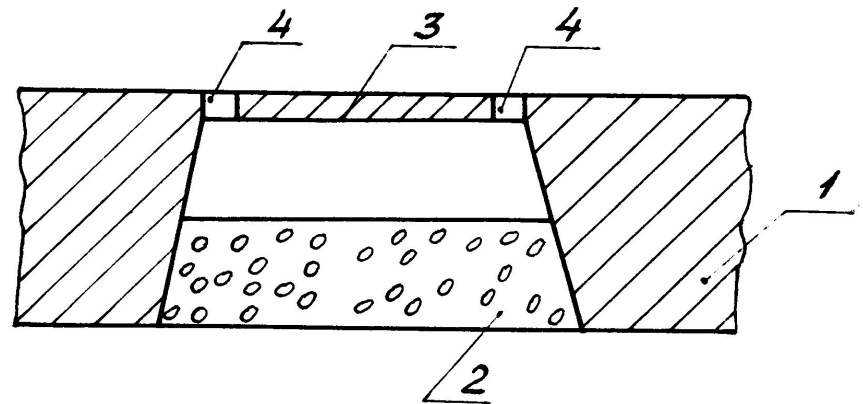
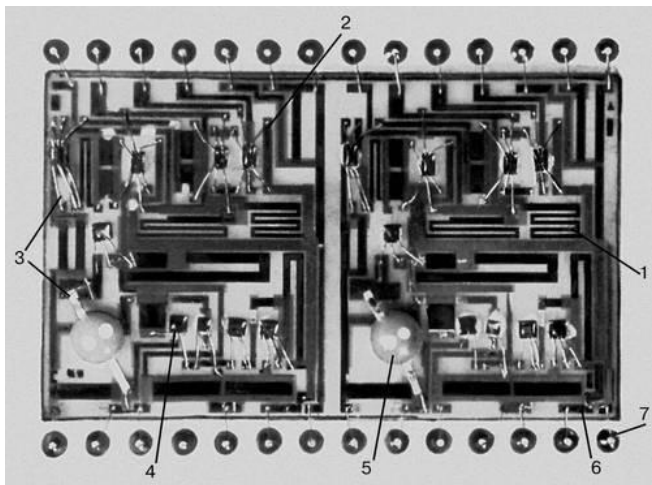
Планарные транзисторы



Силовые МОП-транзисторы

Историческая справка

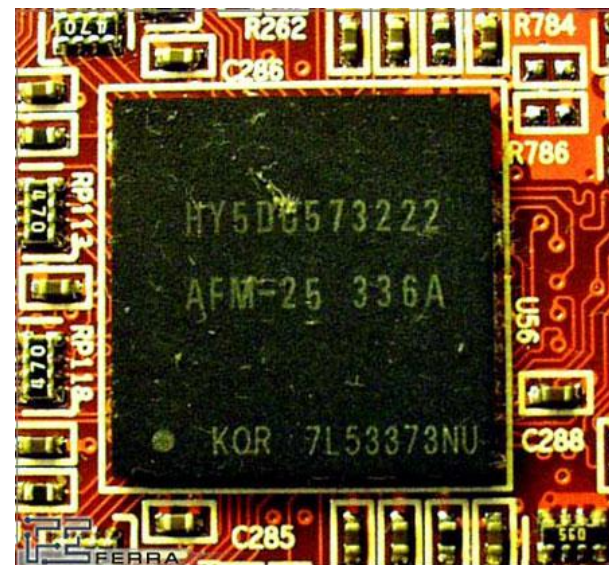
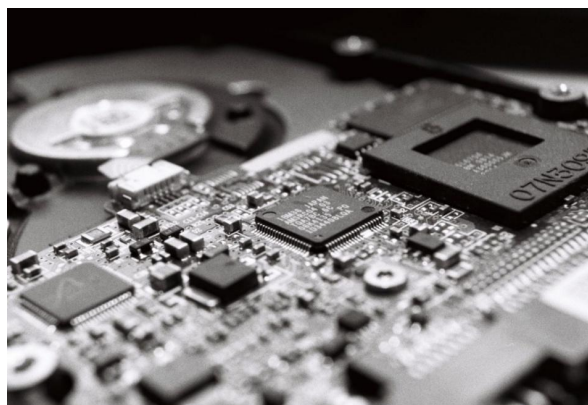
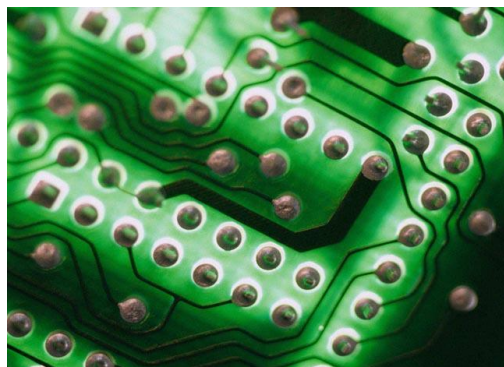
Идея интеграции в полупроводниковом производстве пришла со стороны технологии в электронном материаловедении. В 1960 г. был предложен метод изготовления транзисторов в тонком эпитаксиальном слое, выращенном на монокристаллической подложке. Таким способом удавалось на прочной толстой подложке создать транзисторы стойкой базой. Открылась возможность разработки высокочастотных транзисторов большой мощности. Было предложено использовать транзисторы с тонкопленочными проводниками в пределах одной пластины. Такие транзисторы получили название интегральных, а кристаллы стали называть интегральными схемами.



Способ формирования мембран в монокристаллической кремниевой подложке.

Историческая справка

Основная продукция микроэлектроники за последние десятилетия – разнообразные интегральные схемы. На протяжении достаточно длительного времени наблюдается устойчивая тенденция экспоненциального увеличения степени их интеграции. Один из путей связан с уменьшением топологического размера и соответственно повышением плотности упаковки элементов на кристалле. Совершенствование технологических процессов, особенно литографии, а также процессов травления позволяло ежегодно уменьшать характерный размер на 11%.



Историческая справка

Гетероструктура — термин в физике [полупроводников](#), обозначающий выращенную на [подложке](#) слоистую структуру из различных полупроводников, в общем случае отличающихся шириной [запрещённой зоны](#). Между двумя различными материалами формируется так называемый [гетеропереход](#), в котором возможна повышенная концентрация носителей, и отсюда — формирование [вырожденного двумерного электронного газа](#). В отличие от [гомоструктур](#) обладает большей свободой выбора в конструировании нужного потенциального профиля [зоны проводимости](#) и [валентной зоны](#). За развитие полупроводниковых гетероструктур для высокоскоростной оптоэлектроники [Жорес Алфёров](#) ([Россия](#)) и [Герберт Крёмер](#) ([США](#)) были удостоены [Нобелевской премии](#) в 2000 году.



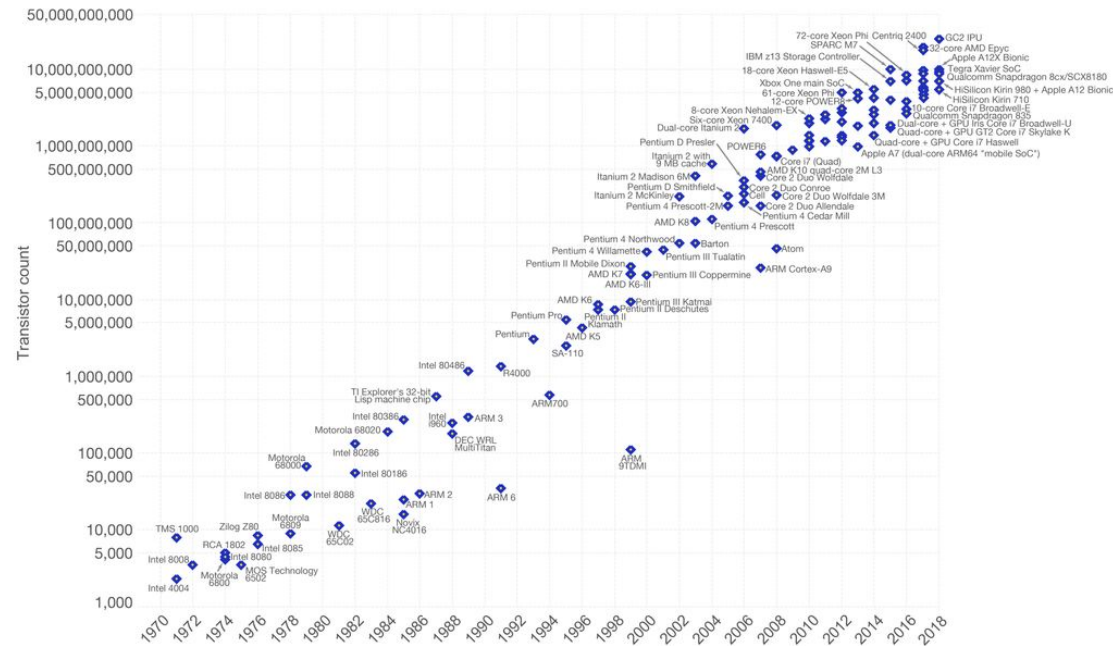
Закон Мура

Количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца

Moore's Law – The number of transistors on integrated circuit chips (1971-2018)

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important as other aspects of technological progress – such as processing speed or the price of electronic products – are linked to Moore's law.

Our World
in Data



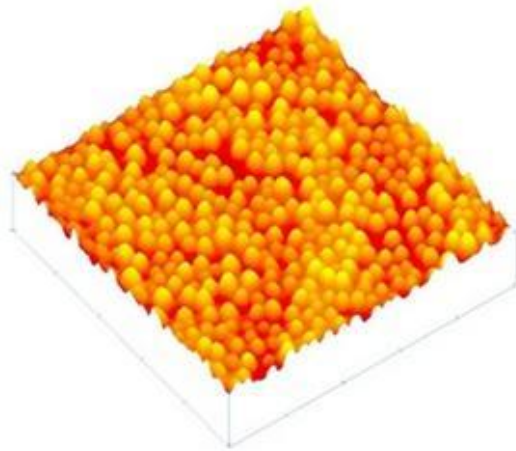
Data source: Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count)
The data visualization is available at OurWorldinData.org. There you find more visualizations and research on this topic.

Licensed under CC-BY-SA by the author Max Roser.

Если бы авиапромышленность в последние 25 лет развивалась столь же стремительно, как промышленность средств вычислительной техники, то сейчас самолёт Boeing 767 стоил бы 500 долл. и совершал облёт земного шара за 20 минут, затрачивая при этом пять галлонов (~18,9 л) топлива. Приведенные цифры весьма точно отражают снижение стоимости, рост быстродействия и повышение экономичности ЭВМ

Новые материалы?

Сейчас основной материал полупроводниковых приборов – кремний. Переход к нанoeлектронике заставляет обратиться и к другим материалам: арсениду галлия, фосфиду индия, кадмий – ртуть – теллуру и др.



ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Название	Среда передачи	Носители	Характерная длина волны	Частоты	Недостатки
Электроника	Металл, полупроводник	Электроны , дырки	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм	ГГц, ТГц	Омические потери, топология межсоединений
Фотоника	диэлектрик	Фотоны, ЭМВ	0.5-10 мкм	40-700 ТГц	Управляемость, масштабируемость
Плазмоника	Диэлектрик-металл	Плазмоны	0.1-1 мкм	ТГц	Затухание, скин-эффект
Спинтроника	Магнетик-металл-диэлектрик	Электроны , спиновые волны	$2,42 \cdot 10^{-6}$ мкм 0.1- ∞ мкм	ГГц	Повторяемость
Магноника	Ферромагнетики, Антиферромагнетики, слоистые магнитные структуры	Магноны	0.1- ∞ мкм	до 100 ГГц, ТГц	Необходимо внешнее магнитное поле для ФМ, повторяемость
Акустоэлектроника	Пьезоэлектрики, пьезополупроводники и др.	Фононы	мм	МГц, единицы ГГц	Диапазон частот, высокие потери при распространении

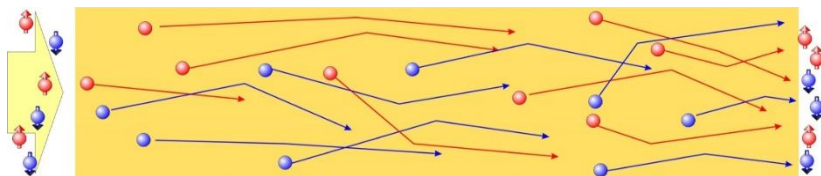
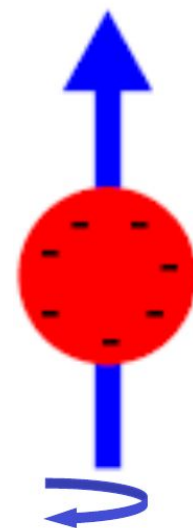
ЭЛЕКТРОНИКА и СПИНТРОНИКА

Электроника → Заряд

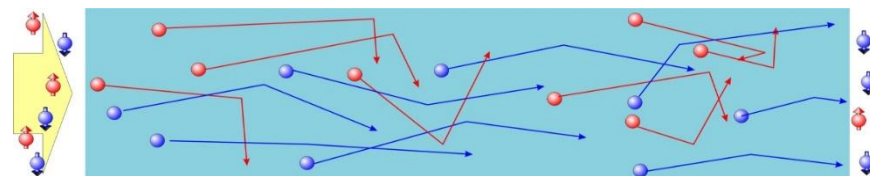
Основана на переносе заряда носителей электрического тока.

Спинтроника → Спин

Основана на переносе собственного магнитного момента - спина носителей электрического тока.



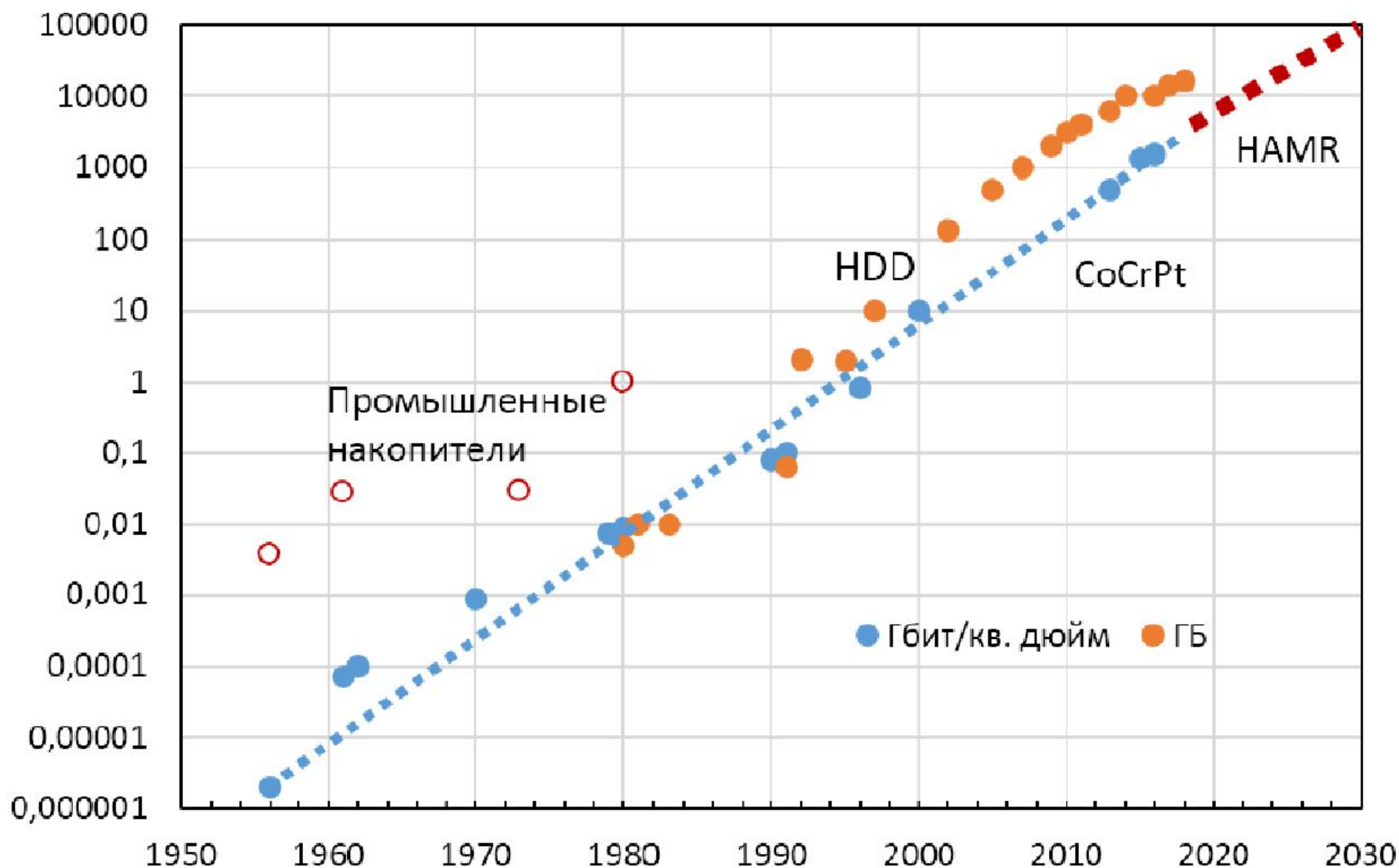
vs



В немагнитном проводнике электроны рассеиваются независимо от направления спина. От среднего количества рассеяния электронов зависит электрическое сопротивление проводника.

В ферромагнитном проводнике электроны рассеиваются по-разному в зависимости от направления спина электронов. Например, электроны со спином вверх рассеиваются сильнее, чем со спином вниз.

ПЛОТНОСТЬ ЗАПИСИ ИНФОРМАЦИИ

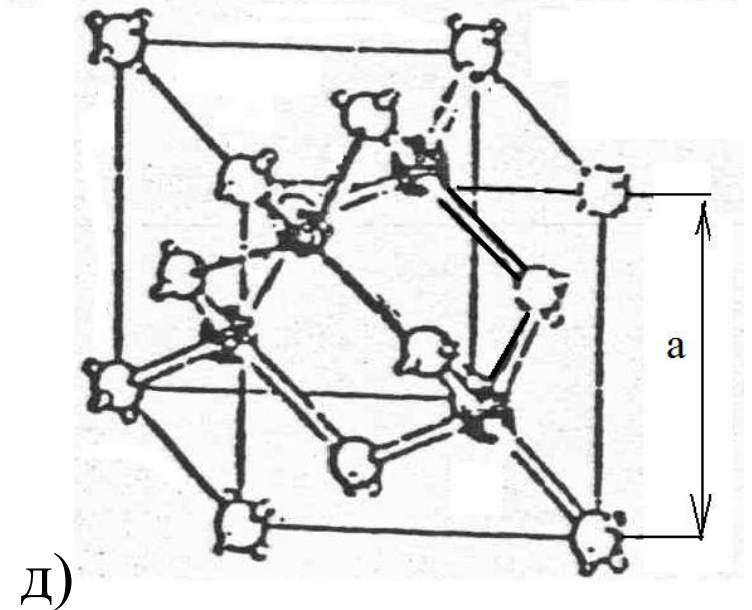
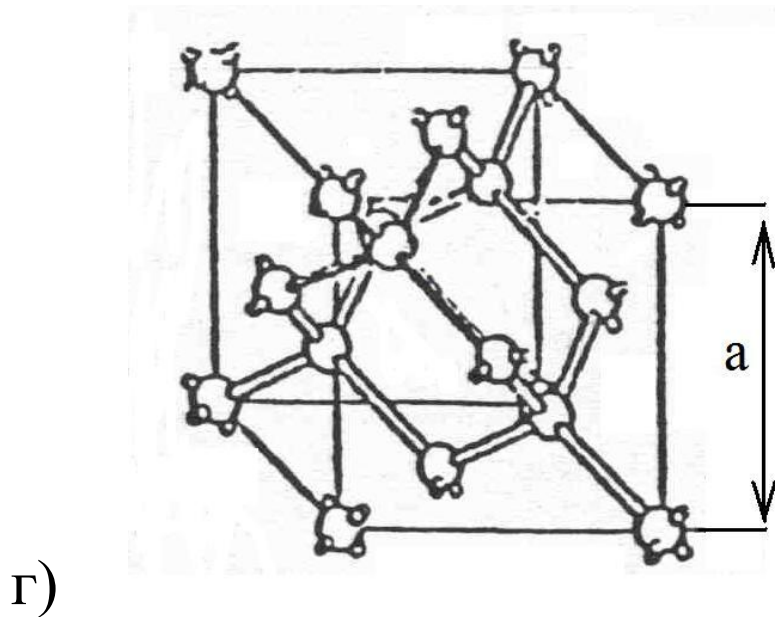
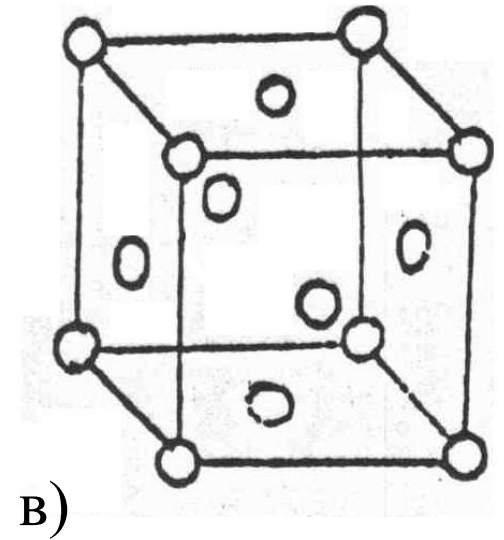
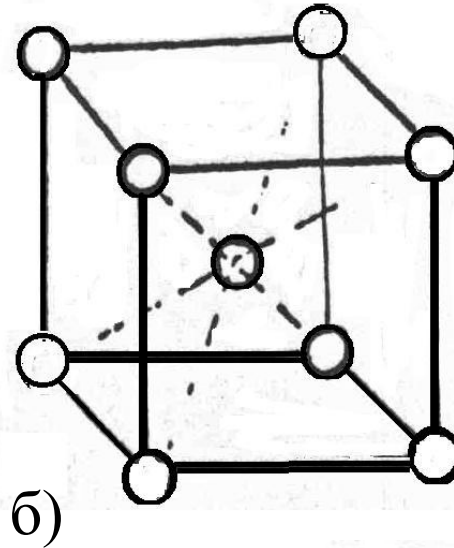
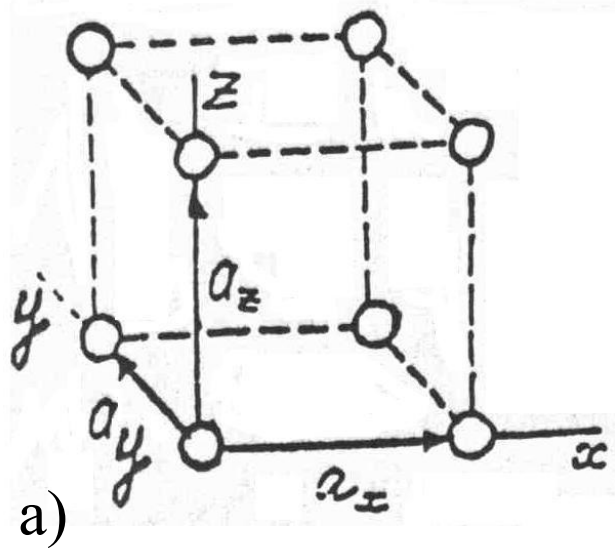


Лекция 1

Физические основы электропроводности

Твердые тела и их классификация

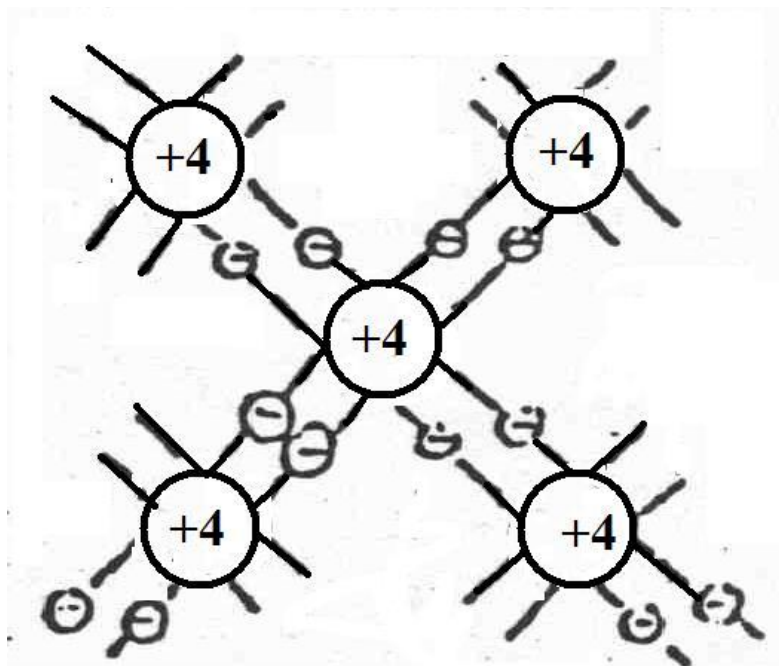
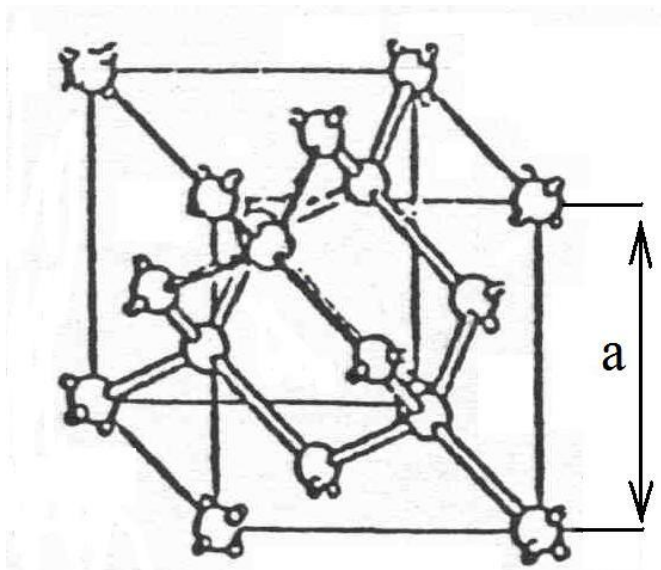
Типы кубических решеток



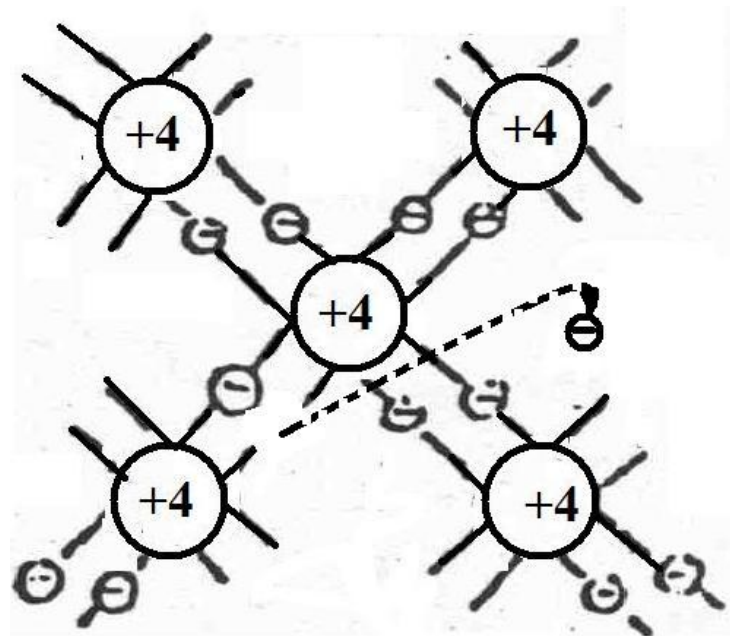
Размеры постоянных решетки и концентрация атомов

	Si	Ge
Постоянная решетки, а, нМ	0,542	0,565
Мин.расстояние $\frac{a\sqrt{3}}{4}$	0,235	0,245
Число атомов в 1 см ³	$5 \cdot 10^{22}$	$4,45 \cdot 10^{22}$

Модель ковалентных связей



а)



б)

Вопросы самопроверки

1. Изобразите плоскую модель ковалентной связи, образованную атомам и элемента 4-ой группы таблицы Менделеева ($3S^23P^2$).
2. Изобразите энергетическую диаграмму зон беспримесного п/п при сближении атомов на расстояние постоянной решетки. Укажите название зон и их основные особенности.