

Собственная и примесная проводимость полупроводников

Трофимова Т.И. Курс физики. §§ 242-243.

Собственная проводимость. У полупроводников и диэлектриков валентная зона полностью заполнена электронами и при $T=0$ К они не могут принять участие в проводимости. Принять участие в проводимости они смогут, если им сообщить энергию, превышающую энергию запрещенной зоны, и они перейдут в свободную зону. Свободная зона станет для них зоной проводимости (так её и называют). Это происходит при $T>0$, когда в кристалле появляются фононы. Поглотив фонон или несколько фононов, электрон заполненной (валентной) зоны может получить энергию, достаточную для перехода в зону проводимости. Одновременно приходят в движение электроны верхних уровней валентной зоны, так как эти уровни частично освобождаются. Поэтому у полупроводников проводимость возникает при $T \neq 0$ в результате перехода электронов с верхних уровней валентной зоны (потолка валентной зоны) на верхние уровни зоны проводимости (дно зоны проводимости). При этом в валентной зоне освобождается такое же число уровней. Освобожденные уровни ведут себя как положительно заряженные частицы с зарядом « $+e$ ». Такие фиктивные квазичастицы (частицы, которые не могут быть обнаружены в свободном состоянии) – называют «дырками».

Уровень Ферми, как показывает расчет, расположен в собственных полупроводниках и диэлектриках посередине запрещенной зоны и не связан с реальным электроном. К такому выводу можно прийти на основании следующих рассуждений. Примем за начало отсчета энергии энергетический уровень, соответствующий дну зоны проводимости. Тепловые колебания переводят электроны из валентной зоны в зону проводимости. Эти электроны переходят назад в валентную зону. Им на смену из валентной зоны приходят новые электроны.

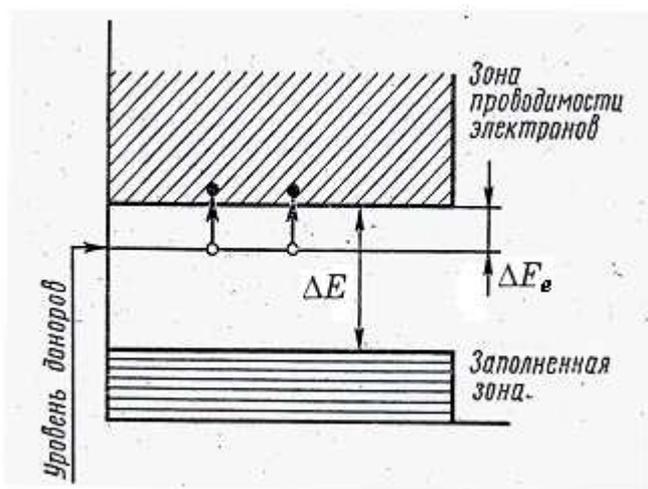
Отсюда в проводимости принимают участие как электроны, находящиеся на верхних уровнях валентной зоны, так и на нижних уровнях зоны проводимости.

Энергия первых $E_1 = 0$; вторых $E_2 = -\Delta E$. Тогда энергия, затрачиваемая на образование двух носителей, делится на два и средняя энергия электронов, принимающая участие в проводимости равна $-\frac{\Delta E}{2}$. Энергия не соответствует реальному уровню, занятому электроном и практически не зависит от температуры. Эту энергию называют уровнем Ферми.

Проводимость полупроводников и диэлектриков, обусловленную свободными электронами и дырками, образовавшимися в результате перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, называется собственной проводимостью.

Собственная проводимость полупроводников, пропорциональная числу носителей заряда, зависит от температуры по закону

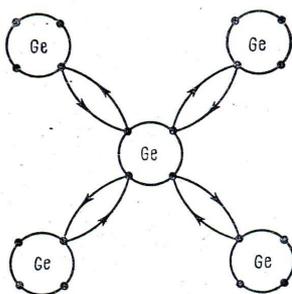
$$\sigma = \sigma_0 e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}. \quad (1)$$



Наиболее важными собственными полупроводниками являются кремний ($\text{Si} \rightarrow Z=14$) и германий ($\text{Ge} \rightarrow Z=32$). Электронные конфигурации и ширина запрещенной зоны: $\text{Si} - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ($\Delta E = 1,1$ эВ), $\text{Ge} - 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$ ($\Delta E = 0,75$ эВ).

Si и Ge имеют по 4 валентных электрона в s - и p -подоболочках. Связь с соседними атомами –

ковалентная. Валентная зона при $T=0$ заполнена. Ширина запрещенной зоны небольшая.



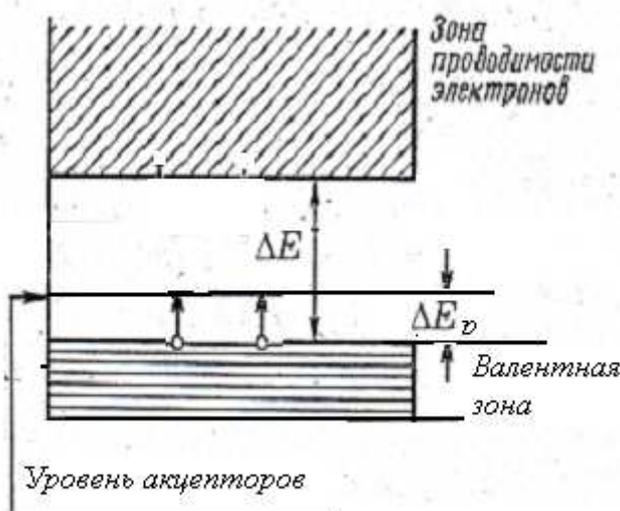
Примесная проводимость возникает, когда в чистом полупроводнике некоторые атомы замещают другими атомами и связана с появлением энергетических уровней в запрещенной зоне. Примесь может быть как поставщиком электронов, так и образовывать центры прилипания. У Si и Ge 4 электрона образуют связь с соседними атомами. Заменим атом Si или Ge атомами примеси,

обладающими пятью валентными электронами (фосфор, мышьяк, сурьма).

Четыре образуют связь с соседними атомами Si или Ge , а пятый оказывается лишним и не может образовать ковалентную связь. Энергия 4-х электронов – та же, что у электронов атома германия и они располагаются в энергетическом спектре в валентной зоне. Пятый электрон слабо связан с атомным остатком P . Требуется небольшая энергия по сравнению с ΔE , чтобы перевести его в зону проводимости. В результате в запрещенной зоне возникает добавочный уровень, расположенный близко к свободной зоне (они расположены на расстоянии $0,05$ эВ от дна зоны проводимости – донорные уровни). При $T = 0$ зона проводимости пуста. При нагревании в результате теплового заброса электронов в зону проводимости возникает электронная проводимость (проводимость n -типа). Полупроводники такого типа называются электронными (или полупроводниками n -типа). Энергия активации проводимости значительно меньше, чем для собственных полупроводников.

Если примесь, например In , B содержит три валентных электрона, то одна двойная связь не укомплектована. Эта связь может быть обеспечена переходом от атома Si или Ge к атому индия другого электрона, то есть возникает энергетический уровень, расположенный выше потолка валентной

зоны. Но при $T = 0$ такой переход невозможен, так как необходима дополнительная энергия. Поэтому при $T = 0$ валентные электроны Si или Ge остаются на своих местах, а примесные атомы In или B не укомплектованы. Но возникает принципиальная возможность для перехода электронов, получивших дополнительную энергию, на более высокий энергетический уровень. При $T = 0$ проводимости нет.



При $T > 0$ электроны получают дополнительную энергию ($\approx 0,05$ эВ). При этом в валентной зоне возникает дырка. Естественно, возможен и обратный переход. Но пока электрон находится в атоме индия (атом индия превращается в отрицательный ион), его вакантное место будет занято другим валентным электроном, то есть в результате возникает дырка и дырочная проводимость. Такие полупроводники получили название дырочных полупроводников или полупроводников p -типа. Примеси,

вводимые для захвата электронов из валентной зоны, назвали акцепторами, а энергетические уровни этих примесей – акцепторными уровнями (уровнями прилипания).

Микроэлектроника. Научно-техническая революция

Качественно новый этап развития электронной вычислительной техники, систем связи, автоматики наступил в результате нового раздела электроники – микроэлектроники, которая занимается разработкой интегральных микросхем и принципов их применения.

Микроэлектроника – важнейшее научно-техническое достижение современности. Основа научно-технической революции.

Основа микроэлектроники – интегральная микросхема. Интегральная микросхема – совокупность большого числа взаимосвязанных компонентов – миниатюрных транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, соединительных проводов, изготовленных в едином технологическом процессе на одном кристалле. Вначале, когда полупроводниковые элементы входили в жизнь, то каждый транзистор, резистор или диод использовались в отдельности даже, когда собиралась схема из множества однотипных схем. Потом пришли к выводу, что такие системы лучше собирать на отдельном кристалле. Для этого были предпосылки. Надежная работа подавляющего большинства полупроводниковых элементов обеспечивается при толщине поверхностного рабочего слоя в тысячные доли миллиметра. В самых миниатюрных транзисторах используется только верхний слой полупроводникового кристалла, составляющей 1 % его толщины. Остальные 99 % используются в роли носителя или подложки, так как без подложки

транзистор просто разрушился бы от малейшего прикосновения. Поэтому при определенной технологии на одном кристалле можно создать схему из нескольких десятков, сотен и даже тысяч таких компонентов. Каков выигрыш?

1. Очень сильно снижаются затраты, так как стоимость микросхемы в сотни раз меньше, чем совокупная стоимость всех электронных компонентов ее составляющих.
2. Надежность устройства возрастает в десятки тысяч раз. Проще найти неисправную микросхему, чем проводить поиск неисправностей в схеме из десятков или сотен тысяч отдельных компонентов.
3. Все электронные компоненты в сотни и тысячи раз меньше своих аналогов в обычной сборной схеме, их энергопотребление намного меньше, а быстродействие гораздо выше.

Эра микроэлектроники была начата работами американского инженера Дж. Килби из фирмы «Texas instruments», создавшего в 1958 г. интегральную микросхему.

Технология изготовления. При изготовлении интегральной схемы на пластинку из полупроводникового материала наносятся последовательно слои примесей, диэлектриков, напыляются новые слои металлов. Для каждого нового слоя используется своя технология нанесения и свой рисунок расположения деталей. В результате на одном кристалле одновременно создается несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, соединенных проводниками в определенную схему.

Исходный материал – обычно пластина из чистого кремния. Она имеет сравнительно большие размеры, так как на ней содержится несколько сотен однотипных микросхем.

Первая операция – формирование при температуре 1000°C под воздействием кислорода на поверхности кристалла слоя двуокиси кремния. Окись кремния обладает большой механической стойкостью и является великолепным диэлектриком, обеспечивающим надежную изоляцию расположенному под ним кремнию.

Вторая операция – внесение примесей для создания *n*- и *p*- зон проводимости. Для этого оксидную пленку удаляют с тех мест пластины, которые соответствуют отдельным электронным компонентам. Выделение нужных участков соответствуют отдельным электронным компонентам. Выделение нужных участков осуществляют с помощью процесса, называемого фотолитографией. Сначала весь слой оксида покрывают светочувствительным составом (фоторезист). Затем проводят последовательное травление и легирование. Для создания токопроводящих соединений – напыление тонкого слоя алюминия.

В результате на одном кристалле одновременно создается несколько тысяч транзисторов, конденсаторов, резисторов и диодов, соединенных проводниками в определенную схему.

Интегральные микросхемы, насчитывающие порядка 100 элементов, называются микросхемами с малой степенью интеграции.

До 1000 – со средней степенью интеграции.

До десятка тысяч элементов – с большой степенью интеграции.

Пример: микросхема часов «Электроника» размещена на кремниевом кристалле толщиной 0,5 мм и размерами 4·3,6 мм. В этой микросхеме содержится 3000 транзисторов.

Микропроцессор современной ЭВМ размещен на кристалле кремния размерами 6·6 мм, содержит несколько сотен тысяч транзисторов.

1962 г. – массовый выпуск микросхем.

1971 г. – фирма «Интел» создала интегральную схему для выполнения арифметических и логических операций – микропроцессор. Это повлекло грандиозный прорыв микроэлектроники в вычислительную (компьютерную) технику.

Электронные лампы вытеснены, потребление электроэнергии уменьшилось в десятки тысяч раз.

Элементы нанотехнологии и нанoeлектроники. «Нанотехнология» может изменить лицо цивилизации. Элементы нанотехнологии – объекты, хотя бы один размер которого измеряется в нанометрах. Подавляющее большинство явлений на наномасштабах исходит из волновых свойств частиц, поведение которых описывается законами квантовой механики. Перспективы – создание совершенно новых квантовых устройств, в частности, квантовых компьютеров. Реализация заветной мечты – одноэлектронные устройства. Пока лучшие электронные устройства затрачивают сотни и тысячи электронов на одну операцию. Преимущества – быстродействие порядка терагерц ($\sim 10^{12}$ операций в секунду), энергосберегаемость.

Литература

1. А.А. Детлаф, Б.М. Яворский, Л.Б. Милковская. Курс физики. Том II М.: Высш.шк., 1977. – 375 с.
2. Д.И Вайсбурд., Ю.А Сивов., Ю.И Тюрин, Л.Ю.Лельчук Сборник вопросов и задач по физике для студентов элитного технического отделения: Методическое пособие для технических университетов. Часть III. / Под редакцией проф. Ю.И.Тюрина. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 228 с. (в печати)
3. С. Г. Калашников. Электричество. - М.: Наука, 1977. – 664 с.
4. Рыжов. Сто великих изобретений.
5. Б.Н. Бушманов, Ю.А. Хромов. Физика твердого тела.М.: Высш.шк., 1971.– 224 с.