

Л.2 Физика полупроводников (строение атома и электропроводность, примеси, р-п-переход, барьер Шоттки, гетеропереходы), технологии получения полупроводниковых компонентов.

Программы Microcap, Multisim, Matlab

Введение.

Электричество — совокупность явлений, обусловленных существованием, взаимодействием и движением электрических зарядов. Термин введён английским естествоиспытателем У.Гилбертом в его сочинении «О магните, магнитных телах и о большом магните — Земле» (1600 год), в котором объясняется действие магнитного компаса и описываются некоторые опыты с намагниченными телами. Имена Кулона, Гальвани, Вольты, Эрстеда, Джоуля, Ома, Гаусса, Ампера, Герца прославлены стремлением постичь электричество. Однако практическое использование электрических явлений началось лишь во второй половине 19 в., после создания Джеймсом К. Максвеллом в 1873 г. классической электродинамики.

Полупроводники, как новый материал для электротехники, стали применять только в середине прошлого века, хотя термин полупроводники был впервые предложен и использован в публикации немецкого физика Кенисбергером в 1914 году. В своей работе, еще в 1906 году, он писал: «При повышении температуры в оксидах и сульфидах число проводящих ими свободных квантов электричества - электронов - увеличивается, пока не станет предельным, после чего их поведение уподобляется металлам, в которых при нормальной температуре почти все электроны свободны».

В 1906 году американский инженер Гринлиф Виттер Пиккард получает патент на изобретение кристаллического детектора. В своей патентной заявке он пишет: «Контакт между тонким металлическим проводником и поверхностью некоторых материалов с кристаллической структурой (кремний, пирит, галенит, германий и др.) выпрямляет и вызывает демодуляцию высокочастотного тока, который возникает в антенне при приеме радиоволн».

В 1920 году, в Нижегородской радиолaborатории Олег Лосев работал над исследованием кристаллических детекторов и открывает «кристадин» - материал для создания детекторов и усилителей в домашних условиях (детекторная пара: цинкит—уголь и цинкит—сталь. Цинкит - окись цинка, полупроводник). В 1923г. Олег Лосев получил патент на детекторный приёмник-гетеродин. В 1930 г. Ю. Лишенфельд запатентовал полупроводниковый усилитель (полевой транзистор). Но лишь после 1928 года физики Зоммерфельд, Блох, Гейзенберг, Паули, М.Борн в виде квантово-механической теории твёрдого тела объяснили открытие нелинейной проводимости с позиций квантовой механики и появились идеи создания материалов для полупроводников, а не использования минералов.

Материалы, не имеющие свободных носителей заряда и вследствие этого обладающие высоким внутренним сопротивлением, называются **диэлектриками** (например, стекло (SiO_2), слюда, янтарь, фарфор). Материалы, сохраняющие свою проводимость даже при низких температурах и имеющие в нормальных условиях чрезвычайно малое сопротивление, называются **проводниками** (алюминий, медь, серебро, золото). Термином **полупроводник** описываются твёрдые материалы, которые по своей природе (из-за особенностей строения кристаллической решетки) и в зависимости от температуры могут иметь различное количество свободных электронов или дырок и иметь различную проводимость.

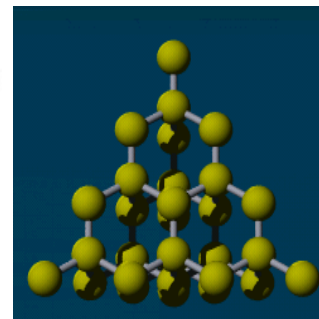
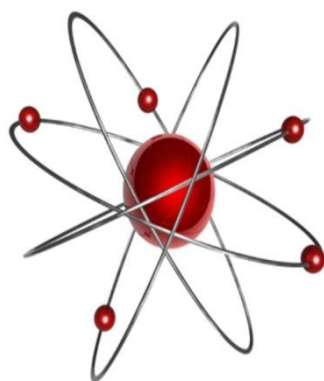
Полупроводниковые диоды

На границе 30-х - 40-х годов появились первые германиевые диоды. И были это диоды СВЧ. Радиолокация требовала СВЧ детекторов и смесителей, поскольку они имели чувствительность в десятки и сотни раз выше радиоламп. В радиолокации германиевые диоды с точечным контактом стали использоваться с 1940 года. В 1939 году физики Вальтер Шоттки и Эберхард Спенке, работавшие в компании Siemens & Halske, открыли принцип действия полупроводниковых диодов с переходом металл — полупроводник. Вклад Шоттки в развитие полупроводниковой техники почитается и по сей день, полупроводниковые диоды со структурой металл — полупроводник называются диодами Шоттки.

Строение атома и электропроводность.

Планетарная квантовая модель атома предложена датским физиком Н. Бором в 1913 году. Согласно этой модели, в центре атома находится ядро, состоящее из протонов и нейтронов. Вокруг ядра вращаются электроны. Их количество определяет химические свойства элемента и название вещества. Например, у водорода (H) всего один электрон, у полупроводника кремния (Si) - 14 электронов, 4 самых внешних определяют электрофизические свойства. Электрон является носителем отрицательного электрического заряда, равного по силе заряду протона. Каждый протон несет частицу положительного электрического заряда. Нейтроны не несут заряда и остаются электрически нейтральными.

Согласно постулатам Бора, энергетические уровни для электронов в изолированном атоме имеют дискретные значения. Электроны в атоме могут находиться на строго определённых орбитах. Твёрдое тело представляет собой ансамбль отдельных атомов, химическая связь между которыми объединяет их в **кристаллическую решетку**.



Область пространства вероятного местонахождения электрона называется **электронная оболочка**. Атом может иметь до семи электронных оболочек, именуемых латинскими буквами K (ближайшая оболочка к ядру), L, M, N, O, P и Q. В таблице ниже указано максимально возможное количество электронов на каждой оболочке. Количество электронов на внешней оболочке определяет принадлежность к группе (вертикальная) и электрические свойства элемента таблицы Менделеева.

Электронная оболочка

Максимальное количество электронов

K	L	M	N	O	P	Q
2	8	18	32	50	72	98

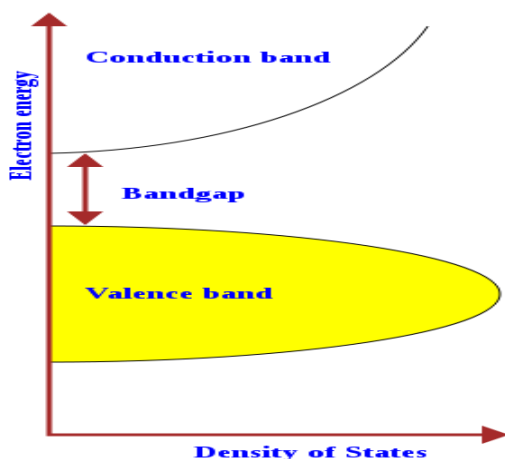
ПЕРИОДЫ	ГРУППЫ ЭЛЕМЕНТОВ									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	H 1 +1							He 2 +2		
2	Li 3 +3	Be 4 +4	B 5 +5	C 6 +6	N 7 +7	O 8 +8	F 9 +9	Ne 10 +10		
3	Na 11 +11	Mg 12 +12	Al 13 +13	Si 14 +14	P 15 +15	S 16 +16	Cl 17 +17	Ar 18 +18		
4	K 19 +19	Ca 20 +20	Sc 21 +21	Ti 22 +22	V 23 +23	Cr 24 +24	Mn 25 +25	Fe 26 +26	Co 27 +27	Ni 28 +28
	Cu 29 +29	Zn 30 +30	Ga 31 +31	Ge 32 +32	As 33 +33	Se 34 +34	Br 35 +35	Kr 36 +36		

Например, в оболочке M на внешнем подуровне может быть до 8 электронов, которые находятся дальше всего от ядра атома на внешней электронной оболочке и называются **валентными электронами**. С их помощью атом взаимодействует с соседними химическими элементами.

В обычном состоянии количество протонов и электронов одинаково, и такой атом электрически нейтрален. Когда у химического элемента не хватает одного электрона, тогда его называют **положительно заряженным ионом**. При избытке электронов, атом становится **отрицательно заряженным ионом**.

При объединении N атомов в кристалл, последний можно трактовать как гигантскую молекулу, в которой электроны всех атомов обобществлены в

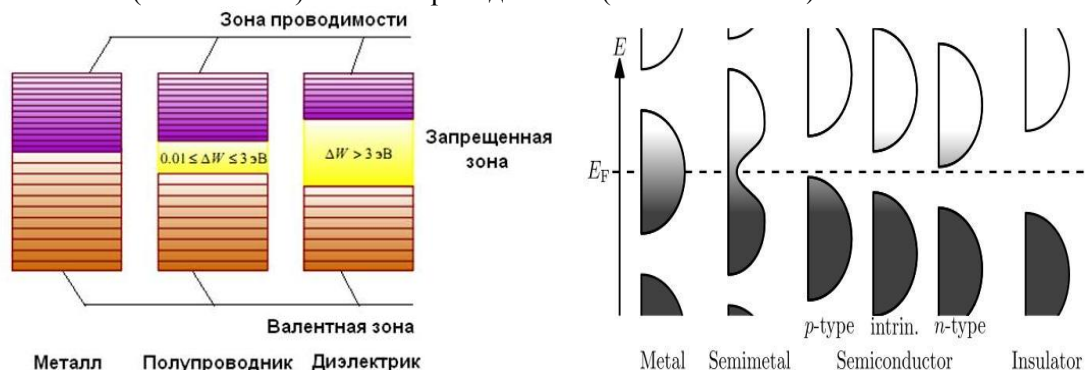
единую квантово-механическую систему. Нижние зоны (довольно узкие) целиком заполнены электронами внутренних оболочек атомов. Отдельные уровни расположены так близко друг к другу, что всю эту область энергий можно рассматривать как практически непрерывную **разрешенную энергетическую зону**.



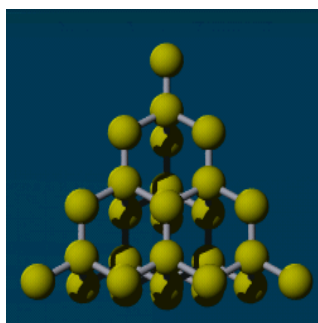
Электроны с энергетическими уровнями, лежащими во внутренних зонах, не могут принимать участие в процессе электропроводности, их на энергетических диаграммах обычно не изображают и отсчет энергии ведут от низшего уровня – **валентной зоны (ВЗ)**. Промежутки между разрешенными зонами энергетических состояний называют **запрещенными зонами**. Электрические свойства материалов определяются, главным образом, электронами, расположенными в верхних энергетических зонах. Внешняя свободная зона разрешенных состояний, в которую могут переходить электроны из **валентной зоны** при получении достаточной энергии, называется **зоной проводимости**. Для перемещения электрона из валентной зоны в зону

проводимости необходимо сообщить ему энергию, равную ширине **запрещенной зоны**. Вещества, у которых ширина запрещенной зоны составляет \sim до 3 эВ, называются **полупроводниками**. У полупроводников запрещенная зона довольно узкая, так что электроны могут «перепрыгивать» ее под действием, например, тепловой энергии. У диэлектриков запрещенная зона гораздо больше, у металлов запрещенная зона практически отсутствует.

Рис. **Запрещенная зона (bandgap)** в кристалле полупроводника располагается между зоной **валентности** (valence band) и зоной проводимости (conduction band).



В зонной структуре существует такой показатель, как **уровень Ферми - E_F** . Он отражает полное количество химической потенциальной энергии для электронов при абсолютном нуле (при температуре 0 градусов по Кельвину). Если зона располагается над уровнем Ферми, то ее электроны могут отделяться от атомов и проводить ток. Такая зона называется **зоной проводимости**. Если же зона располагается ниже уровня Ферми, то ее электроны уже не могут покидать атом. Эта зона носит название **зоны валентности**.



В обычном состоянии **атомы кремния Si** образуют **кристаллическую решетку**. Расстояние между атомами в кристаллической решетке **столь малое**, что внешние электроны могут быть общими. На внешней электронной оболочке атома кремния находятся четыре электрона. Атом кремния в кристаллической решетке окружается четырьмя пристыковавшимися к нему такими же атомами так, что вокруг каждого атома оказывается четыре своих и четыре чужих электрона, по одному от каждого соседнего атома. В результате последний уровень электронной оболочки семейки оказывается завершенным, у атомов очень трудно забрать их электроны и **материал ведет себя как диэлектрик** (не проводит электрический ток). Связь, при которой электронная пара принадлежит сразу двух атомам, называется **ковалентной**. Это очень важное свойство кристаллического кремния, позволяющее делать из него подложки для размещения активных элементов, интегральных схем, БИС и СБИС, на которых выполнены, например, **микропроцессоры**.

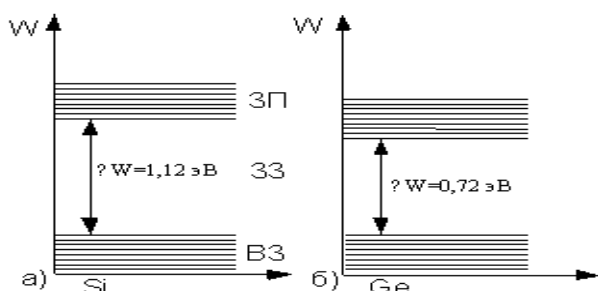


Рис.2. Энергетические (зонные) диаграммы.

Итак, самый важный материала для компьютерной индустрии — кремний. Энергетические уровни внешних электронных оболочек атома Si можно представить в виде трех горизонтальных линий (рис 2). ВЗ - валентная зона, ЗП – зона проводимости, ЗЗ – запрещенная зона с шириной, равной минимальной энергии, которую необходимо сообщить валентному электрону, чтобы он мог оторваться от атома и стать свободным - это 1,12 эВ для Si и 0,72 эВ для Ge. Запрещенной зона называется потому, что электрон не может длительно находиться в ней (т.е. длительно иметь энергетические уровни, соответствующие этой зоне).

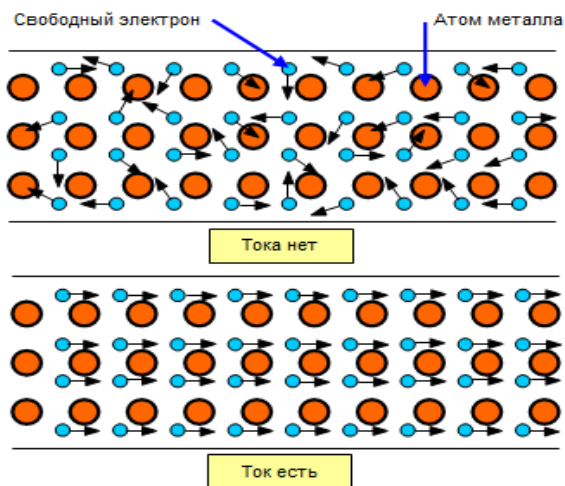
Если валентный электрон получил дополнительную энергию, меньшую необходимой для его отрыва от атома, например, для Si меньшую 1,12 эВ, то электрон лишь переходит на более удаленную от ядра орбиту. Такое состояние атома принято называть **возбужденным**. Электрон вскоре возвращается на свою обычную орбиту, отдавая в окружающее пространство полученную энергию в виде электромагнитной волны – фотона.

Качество кристалла кремния определяет свойства полупроводниковых приборов. Способ получения монокристаллического кремния -

Метод вытягивания из расплава (Чохральского)



Электропроводность материалов



Электрические свойства материала напрямую зависят от количества валентных (внешних) электронов у их атомов. Чем их меньше, тем слабее связь каждого валентного электрона с ядром атома. Следовательно, такой материал лучше проводит электрический ток, потому что его атомы "охотнее" расстаются со своими электронами. Самые **лучшие проводники** - это химические элементы с одним электроном на внешней оболочке – серебро (Ag) или медь (Cu). Из 104 элементов таблицы Менделеева 79 являются металлами, 25 – неметаллами, из которых 13 химических элементов обладают полупроводниковыми свойствами и 12 – диэлектрическими.

Рис. Электрический ток в металлах

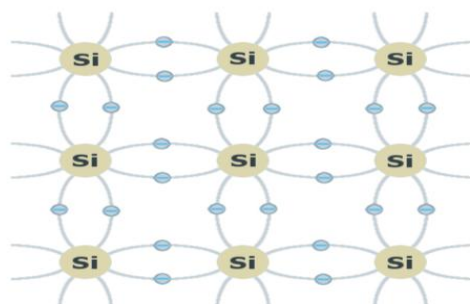
Чем больше заполнена внешняя электронная оболочка, тем больше энергии требуется на разрыв связей между ядром атома и валентными электронами. Самые **лучшие диэлектрики** (материалы, практически не проводящие электричество) - это химические элементы с завершённой валентной оболочкой. Типичными их представителями являются благородные газы - неон (Ne) или аргон (Ar).

У **полупроводников** внешняя электронная оболочка заполнена наполовину. Эти материалы не могут быть хорошими проводниками, как и диэлектриками. Полупроводники интересны именно тем, что способны значительно менять свои электрические свойства в зависимости от **температуры или наличия примесей** других химических элементов. Электропроводность полупроводников значительно возрастает при повышении температуры. При низких температурах они ведут себя подобно диэлектрикам, а при высоких — как проводники. Например, германий при температурах от -60 до +75 градусов Цельсия полупроводник, а при +150 проводник. Кремний - при +300 проводник. С увеличением температуры проводимость металлов ухудшается, а проводимость полупроводников – улучшается.

Чтобы искусственно повлиять на электропроводность полупроводников, их специально "загрязняют" (легируют) примесями. **Легирование полупроводников** - дозированное введение в полупроводник примесей или структурных дефектов с целью изменения его физических свойств (электрических, магнитных, оптических, механических и др.). Концентрация примесей обычно не превышает 1/1000 000.

Принципы действия дырочного и электронного типа проводимостей.

При **повышении температуры** внешние электроны могут отрываться и блуждать по кристаллу, образуя (при приложении разности потенциалов) электрический ток. Однако, этот процесс сложно использовать в технике, поскольку температура окружающей среды постоянно изменяется.



кристаллическая
решетка кремния



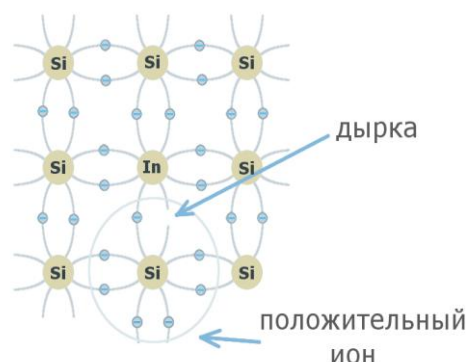
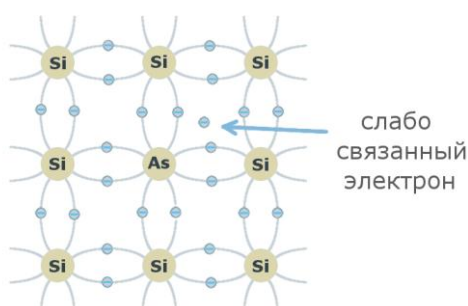
Легирование полупроводников

Для того чтобы изменить проводимость полупроводников, их специально загрязняют примесями – атомами химических элементов с другим значением валентности. Примеси с меньшим количеством валентных электронов, чем у полупроводника, называются **акцепторами**. Примеси с большей валентностью – **донорами**. Сам процесс введения примесей называется **легированием** полупроводников. Примерное соотношение - один атом примеси на миллион атомов полупроводника.

Типы проводимости полупроводников. Электронная проводимость. Добавим в полупроводник кремния пятивалентный атом мышьяка (As). Посредством четырех валентных электронов, мышьяк установит ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния. Для пятого валентного электрона не останется пары, и он станет слабосвязанным с атомом. Под действием электромагнитного поля, такой электрон легко отрывается, и вовлекается в упорядоченное движение заряженных частиц (электрический ток). Атом, потерявший электрон, превращается в положительно заряженный ион с наличием свободной вакансии электрона – дырку.

Несмотря на присутствие дырок в полупроводнике кремния с примесью мышьяка, основными носителями свободного заряда являются электроны. Такая проводимость называется электронной, а полупроводник с электронной проводимостью - **полупроводником N-типа**.

В отличие от проводников, в полупроводниках всегда есть носители двух типов: электроны и дырки и соотношение между ними, как правило, неравнозначное.

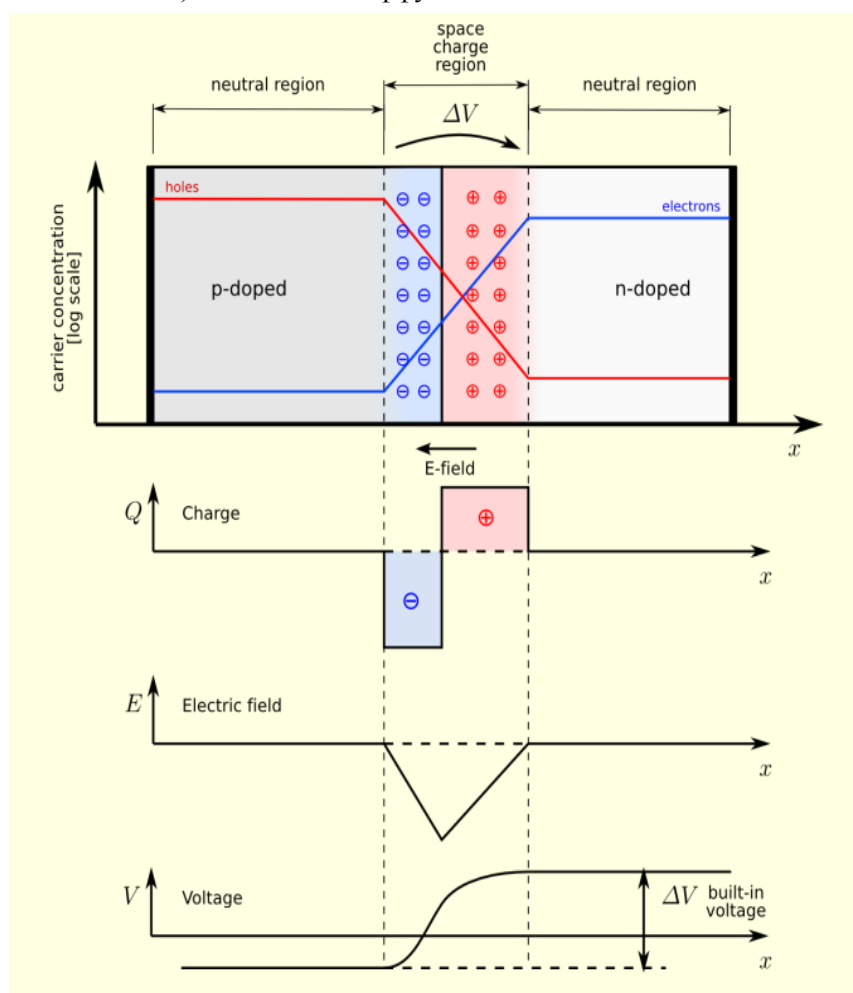


Дырочная проводимость. Введем в кристалл кремния трехвалентный атом индия (In). Индий установит ковалентные связи лишь с тремя соседними атомами кремния. Для четвертого «соседа», у индия не хватает одного электрона - образуется вакансия (дырка). На это место может перескочить электрон из соседней ковалентной связи, а на месте электрона образуется дырка. В результате получается хаотическое блуждание дырок по кристаллу. Если поместить полупроводник в электромагнитное поле, движение дырок станет упорядоченным, т.е. возникнет электрический ток. Таким образом, обеспечивается дырочная проводимость. Полупроводник с дырочной проводимостью называется **полупроводником P-типа**.

Итак, **полупроводники** могут быть двух типов: p и n. Если свободные электроны генерируются легче и их становится больше, то такой материал становится полупроводником n-типа. Ну а если создаются электронные «дырки», то это уже полупроводник p-типа. Сама «дырка» представляет собой место, где мог бы располагаться электрон, но его там нет. Несмотря на отсутствие электрона в этом месте, «дырка» все равно может проводить ток. Реальное направление движения электронов от отрицательного полюса источника питания к положительному. Дырки движутся наоборот, от положительного полюса к отрицательному. При этом принято условно при рассмотрении источников, что заряды движутся от положительного полюса к отрицательному, что не соответствует реальному движению в полупроводниках.

P-N –переход. Мысленно соединив вместе материалы P-типа и N-типа на межатомное расстояние, на их стыке получим область **электронно-дырочного перехода** (P-N -перехода). Реально такое соединение невозможно и заменяется сплавлением, диффузией, фотолитографией и пр. Происходящие внутри **P-N-перехода** физические процессы между электронами и дырками легли в основу принципа работы полупроводниковых приборов.

Электронно-дырочный переход - это область полупроводника, в которой имеет место пространственное изменение типа проводимости (от электронной n-области к дырочной p-области) вследствие диффузии.



В полупроводнике p-типа, который получается посредством акцепторной примеси, концентрация дырок намного превышает концентрацию электронов. В полупроводнике n-типа, который получается посредством донорной примеси, концентрация электронов намного превышает концентрацию дырок. Пусть внешнее напряжение на переходе отсутствует. При установлении контакта возникнет **диффузионный ток** — основные носители заряда (искусственные электроны и дырки) хаотично перетекают из той области, где их больше, в ту область, где их меньше, и посередине рекомбинируют друг с другом. Как следствие, вблизи границы между областями практически не будет свободных (подвижных) основных носителей заряда, но останутся ионы примесей с некомпенсированными зарядами (рис.4 а).

Из-за диффузии край области соединения полупроводником n-типа становится положительно

заряженной, а p-типа — отрицательно заряженной. Это происходит потому, что в процессе диффузии часть соединения n-типа теряет электроны, то есть становится положительно заряженной. Область p-типа, наоборот, получает их и становится отрицательно заряженной. В результате образуется электрическое поле, препятствующее диффузии, и достигается положение равновесия. Та область, где происходит этот процесс, называется **слоем обеднения**, в ней большинство электронов и дырок рекомбинировали (заняли вакантные места).

В области p возникает положительный объемный заряд, который образован положительно заряженными атомами акцепторной примеси. Подобно этому, в области n возникает отрицательный объемный заряд, образованный отрицательно заряженными атомами донорной примеси. Между образовавшимися объемными зарядами возникает электрическое поле E , направленное от p - области к n - области (от положительных зарядов в p-области к отрицательным зарядам в n-области) и **контактная разность потенциалов**: $u_k = E \cdot l$, где l - толщина перехода. Контактная разность потенциалов зависит от материала полупроводников, степени легирования и температуры.

Рис. Положение равновесия в p-n-соединении

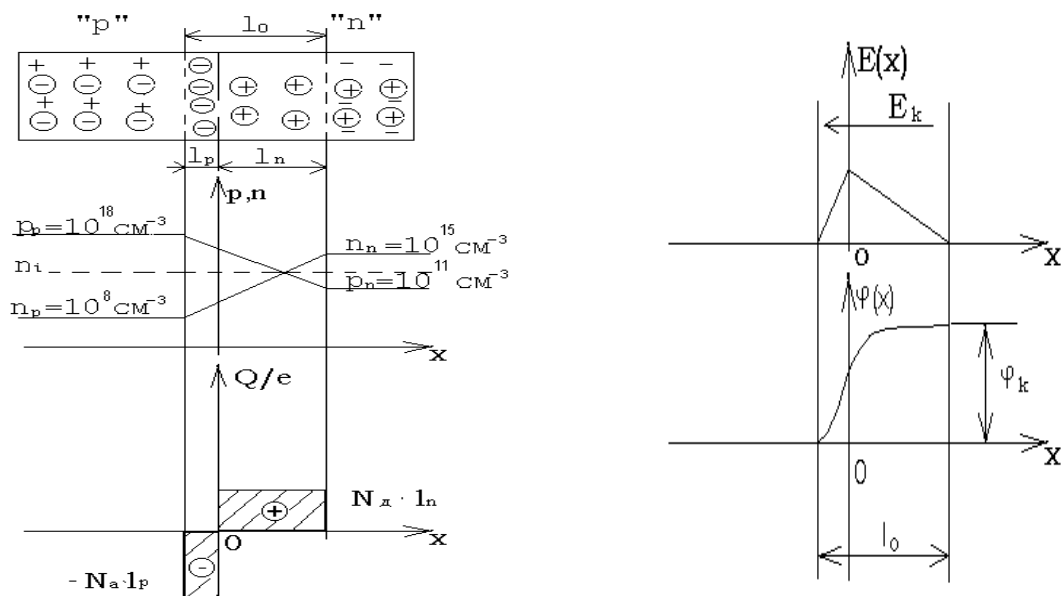
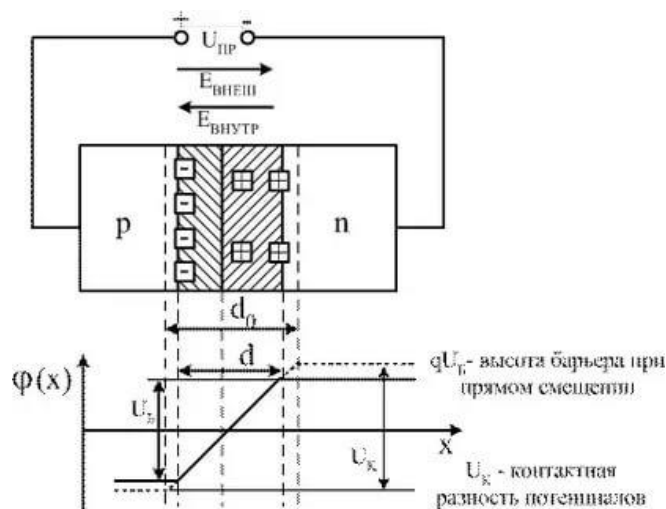


Рисунок 4

а)

б)

В p-n - переходе возникает **потенциальный барьер**, который препятствует диффузии основных носителей зарядов. При образовании контактной разности потенциалов по обе стороны границы раздела полупроводников образуется слой с пониженной концентрацией основных носителей зарядов. Он обладает повышенным сопротивлением и называется **запирающим** слоем. Толщина его несколько микрон.



Высота потенциального барьера равна контактной разнице потенциалов и обычно составляет десятые доли вольта. Высота потенциального барьера возрастает при увеличении концентрации примесей в соответствующих областях, при этом толщина p-n - перехода d уменьшается. Для германия, например, при средней концентрации примесей $u_k = 0,3 - 0,4$ В и $d = 10^{-4} - 10^{-5}$ см, а при больших концентрациях - $u_k \approx 0,7$ В и $d = 10^{-6}$ см. С увеличением температуры высота потенциального барьера уменьшается.

Ток, возникающий в результате диффузии основных носителей из области, где их концентрация повышена, в направлении области с более низкой концентрацией, называется **диффузным током**.

Ток диффузии обусловлен переходом основных носителей заряда через р-п переход из-за их градиента концентрации (за счет тепловой энергии). Плотность диффузионного тока подчиняется закону Фика:

$$i_D = i_{Dp} + i_{Dn} = - (q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx} + q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx})$$
 , где i_D – плотность диффузионного тока р-п перехода; i_{Dp} – дырочная составляющая плотности тока диффузии; i_{Dn} – электронная составляющая плотности тока диффузии; D_p , D_n – коэффициенты диффузии дырок и электронов; dp/dx , dn/dx – градиенты концентрации дырок и электронов. Знак минус показывает, что диффузионный ток протекает в сторону уменьшения градиента концентрации.

В областях р-и-п для точного описания процессов мысленно разделяют два типа электронов и дырок:

Основные носители – электроны и дырки, которые образовались в результате легирования. Их концентрация $10^{15-18}/\text{см}^3$. **Неосновные** (собственные) – электроны и дырки, образовавшиеся естественно в полупроводнике из-за дефектов кристалла и температуры. Их концентрация $10^{8-11}/\text{см}^3$.

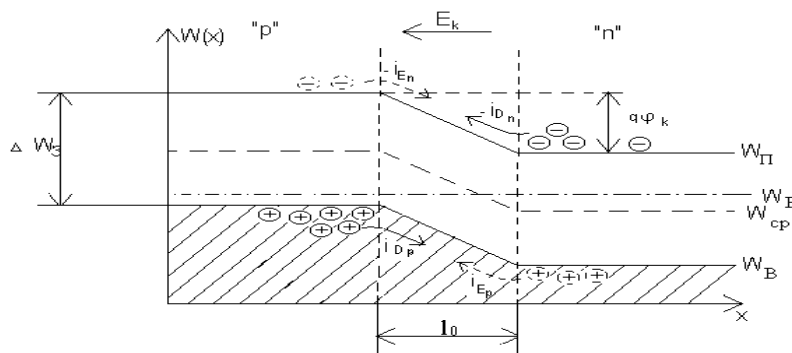
Одновременно с диффузионным перемещением **основных** носителей, через границу происходит и обратное перемещение **неосновных** носителей под действием электрического поля контактной разности потенциалов. Такое перемещение неосновных носителей зарядов называется **дрейфовым**. Дрейфовая составляющая тока обусловлена переносом через р-п переход неосновных носителей заряда под действием ускоряющего для них электрического поля р-п перехода

напряженностью E_k . Плотность дрейфового тока i_E определяется: $i_E = \sigma \cdot E$

Или $i_E = i_{Ep} + i_{En} = q \cdot \mu_p \cdot p_n \cdot E + q \cdot \mu_n \cdot n_p \cdot E$, где i_{Ep} – дырочная составляющая плотности дрейфового тока; i_{En} – электронная составляющая плотности дрейфового тока; μ_p , μ_n – подвижности дырок и электронов; p_n – концентрация дырок в полупроводнике п-типа, являющихся там неосновными носителями заряда; n_p – концентрация электронов в полупроводнике р-типа, являющихся там также неосновными носителями заряда.

Основные носители заряда областей полупроводника р- и п-типов, энергия которых больше высоты барьера, **диффузионно** преодолевают его. Неосновные носители заряда, находящиеся вблизи р-п перехода и совершающие тепловое хаотическое движение, попадают под действие электрического поля р-п перехода, увлекаются им и переносятся в противоположную область: электроны р-области в п-область; дырки п-области в р-область. Неосновные носители заряда, переходящие переход под действием напряженности электрического поля E р-п перехода, образуют **дрейфовую** составляющую тока i_E через переход.

Итак, при отсутствии внешнего электрического поля через р-п - переход протекают два тока: ток **диффузии** и ток **дрейфа** навстречу друг другу и взаимно компенсируются. Суммарный ток через р-п - переход равен нулю $I_{dp} = I_{dif}$.



Электроны справа и дырки (слева) (основные носители) при приобретении энергии преодолевают порог и создают диффузионный ток.

Рис. Энергетическая диаграмма равновесного р-п перехода

Если к р-п - переходу приложено **внешнее прямое напряжение** U_{np} , то создаваемое им внешнее электрическое поле E_{np} оказывается направленным навстречу электрическому полю контактной разности потенциалов E_k р-п - перехода. В результате этого высота потенциального барьера

понижается на величину внешнего напряжения. Уменьшается толщина запирающего слоя ($d_{пр} < d$) и его сопротивление в прямом направлении становится малым ($R_{пр} \ll R_0$), возрастает диффузионный ток, так как большее число носителей зарядов может преодолеть пониженный барьер. Ток дрейфа при этом почти не изменяется, так как он зависит от числа неосновных носителей.

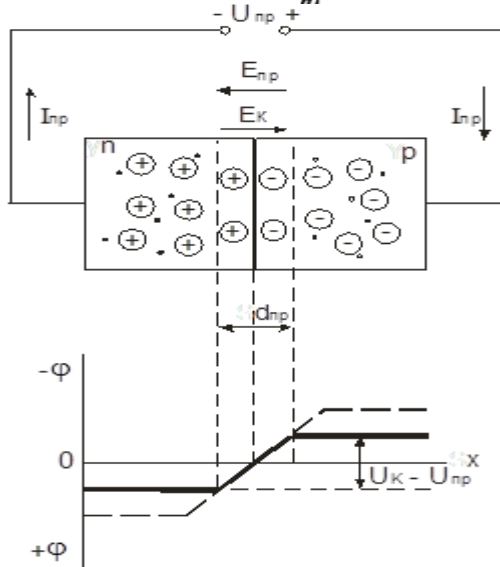
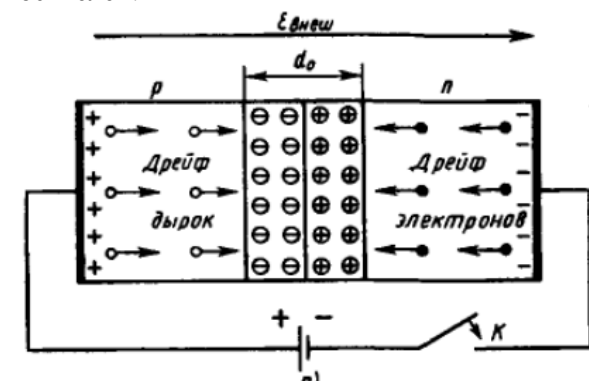


Рисунок 5

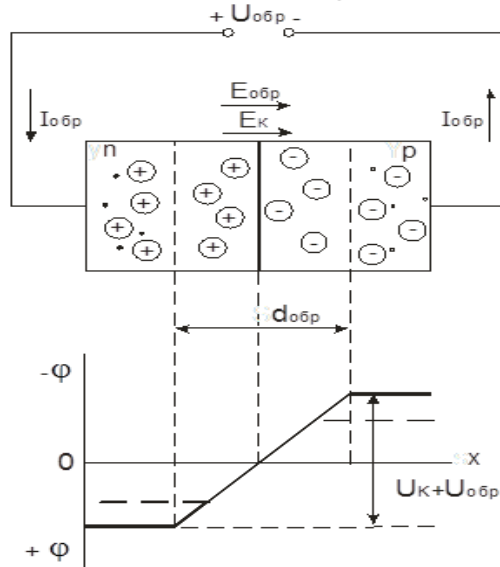
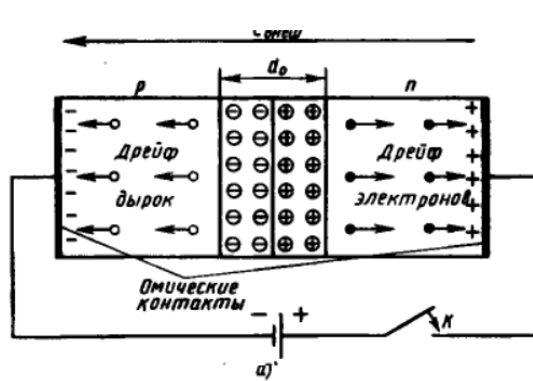


Рисунок 6

При прямом напряжении $I_{диф} > I_{др}$ и поэтому полный ток через переход уже не равен нулю: $I_{пр} = I_{диф} - I_{др} > 0$.

Введение основных носителей зарядов через p-n - переход при действии прямого внешнего напряжения в область полупроводника, где эти носители являются неосновными, называется **инжекцией**.

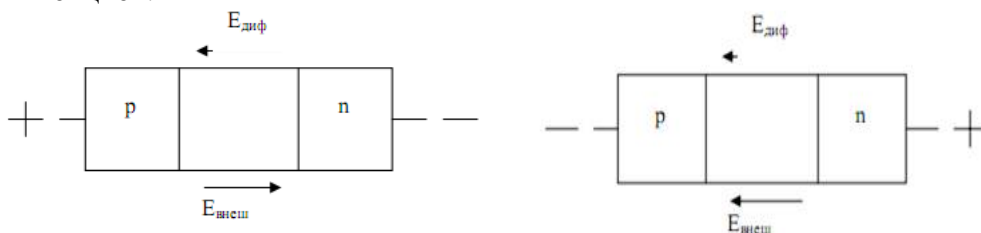


Рис. прямое и обратное включение p-n-перехода

Под действием **обратного напряжения** $U_{обр}$ через переход протекает очень небольшой обратный ток $I_{обр}$. Поле, создаваемое обратным напряжением $E_{обр}$, складывается с полем контактной разности потенциалов $E_к$. В результате этого потенциальный барьер повышается, а толщина самого запирающего слоя увеличивается ($d_{обр} > d$). Этот слой еще сильнее обедняется носителями, и его сопротивление значительно возрастает, т.е. $R_{обр} \gg R_{пр}$.

Внешнее поле оттягивает основные носители зарядов от p-n - перехода. Перемещение свободных носителей зарядов через p-n-переход уменьшается, и при обратном напряжении, равном $U_{обр} = 0,2$ В, ток диффузии через переход прекращается, т.е. $I_{диф} = 0$, так как собственные скорости носителей недостаточны для преодоления потенциального барьера.

Однако, неосновные носители будут перемещаться через р-п - переход, создавая ток, протекающий из п-области в р - область (обратный ток $I_{обр}$). Он является дрейфовым током (током проводимости) неосновных носителей через р-п - переход. Значительное электрическое поле, создаваемое обратным напряжением, перебрасывает через р-п - переход любой неосновной носитель заряда, появившийся в этом поле. Выведение неосновных носителей через р-п - переход электрическим полем, созданным обратным напряжением, называют **экстракцией** носителей зарядов.

Р-п - переход пропускает ток в одном направлении - прямом, при превышении контактной разности потенциалов, и не пропускает ток в другом направлении - обратном, что определяет вентиляльные свойства р-п - перехода.

Итак, для электроники нужны а) элементы 4 группы таблицы Менделеева – **полупроводники**, имеющие 4 валентных электрона или твердые растворы полупроводниковых соединений типа **InGaAs/ InAlAs** или полупроводниковые пленки **OLED** (светодиоды).

б) **монокристаллы** с высоким уровнем очистки (однородности и структуры кристалла);

в) для создания требуемых электрических свойств применяется **легирование** – дозированное внесение примесей, содержащих или 5 валентных электронов и имеющих близкий атомный вес (п-тип) или 3 валентных электрона (р- тип).

в) контакт разнотипных областей (сплавление, напыление, эпитаксия и пр.)

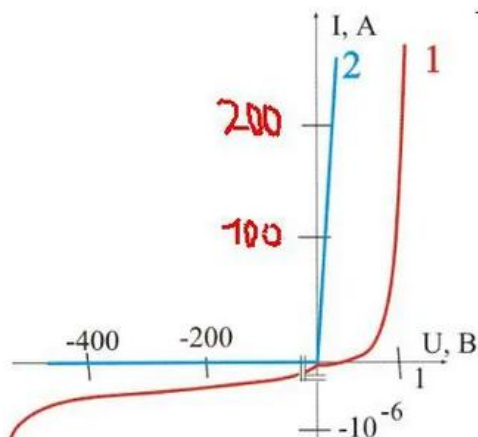
Полупроводниковые соединения делят на несколько типов:

-**простые** полупроводниковые материалы — собственно химические элементы: бор В, углерод С, германий Ge, кремний Si, селен Se, сера S, сурьма Sb, теллур Те, йод I, мышьяк. Самостоятельное широкое применение нашли **германий, кремний и селен**. Остальные чаще всего применяются в качестве легирующих добавок или в качестве компонентов сложных полупроводниковых материалов;

-в группу **сложных** полупроводниковых материалов входят химические соединения из двух, трёх и более химических элементов. Так, соединения, содержащие **мышьяк**, называют **арсенидами**, **серу** — **сульфидами**, **теллур** — **теллуридами**, **углерод** — **карбидами**. Сложные полупроводниковые материалы объединяют по номеру группы Периодической системы элементов Д. И. Менделеева и обозначают буквами латинского алфавита, указывая валентность (А — первый элемент, В — второй и т. д.). Например, бинарное соединение фосфид индия InP имеет обозначение $A^{III}B^V$.

Количественные соотношения для описания р-п-перехода. (Далее, презентация «Введение в полупроводники». Теория основана на работах ученых, внесших основной вклад в современное понимание ядерной физики – Нильса Бора, Макса Планка, Вернера Карла Гейзенберга, Бриллюэна, Энрико Ферми, Дирака. Почитать – Гуртов. Твердотельная электроника. Петрозаводск 2004 – 312 с; Чеботарев С.Н. Физика и техника полупроводников. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017 – 92с.

Вольт-амперной характеристикой (ВАХ) р-п - перехода называется зависимость тока, протекающего через р-п - переход от приложенного внешнего напряжения $I = f(U)$ (рис.7).



Статическую прямую ВАХ р-п-перехода аппроксимируют выражением

$$I = I_s (\exp(eU/mkT) - 1)$$

, где I_s – обратный ток диода, e – заряд электрона, U – напряжение на диоде, m – коэффициент неидеальности перехода, k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

$$I_{p-n} = I_0 (e^{U/\varphi_T} - 1) = I_0 \left(\exp \frac{U}{\varphi_T} - 1 \right),$$

или

$\varphi_T = kT/q$ – температурный потенциал, где k –

постоянная Больцмана, q - элементарный заряд (при $T = 300\text{K}$, $\Phi_T \approx 0,26\text{ В}$).

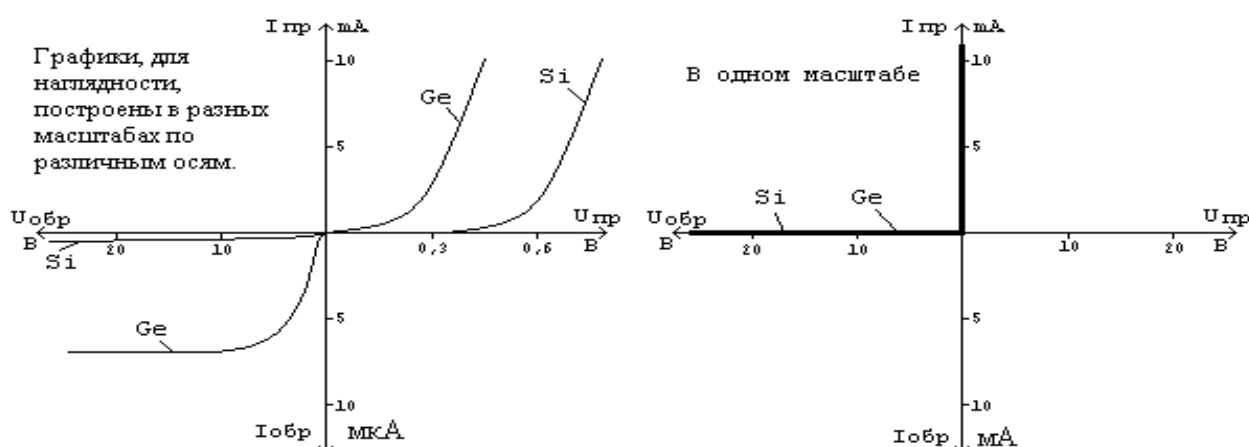
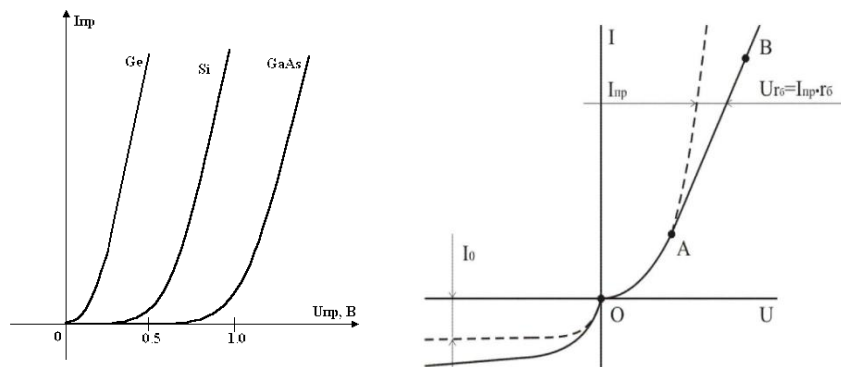


Рис. 7 - Вольт-амперная характеристика p-n - перехода: 1 - прямая ветвь. Прямую 1 и обратную 2 ветви ВАХ изображают в разном масштабе, поскольку в нормальном режиме работы p-n - перехода обратный ток на несколько порядков меньше прямого.

Прямая ветвь экспоненциальна, на нее оказывают влияние материал полупроводника, объемное сопротивление базы p-n перехода, температура окружающей среды, реальная ширина и конфигурация p-n перехода, степень легирования областей и т.д. Принято считать, что кремниевый переход гарантированно открыт при 0,7 В, германиевый - при 0,4 В. В прямом направлении ВАХ ($U > 0$) реального диода близка к экспоненциальной только в начале зависимости - участок ОА, а далее рост тока при увеличении прямого напряжения замедляется и характеристика становится более полой, почти прямолинейной - участок АВ. Этот участок характеристики называют **омическим**, поскольку здесь оказывает влияние объемное сопротивление базы r_b p-n-перехода.



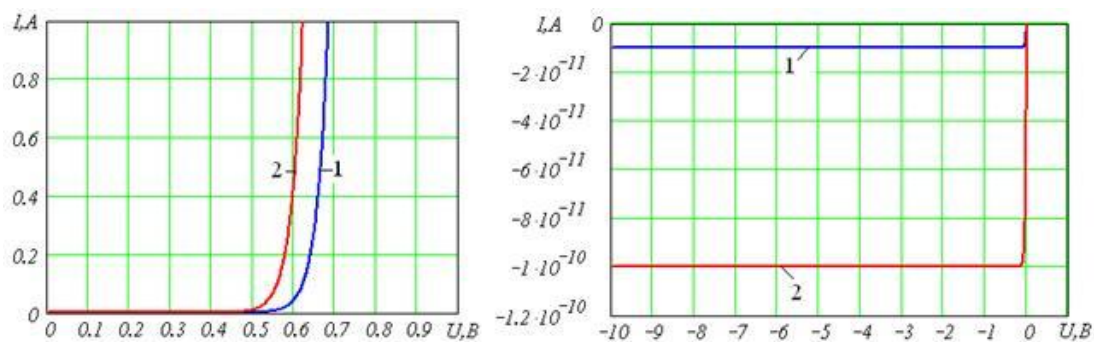
Обратный ток

преобладает, если на диод подать внешнее (запирающее) напряжение. При этом высота потенциального барьера повышается, количество основных носителей заряда, преодолевающих барьер уменьшается.

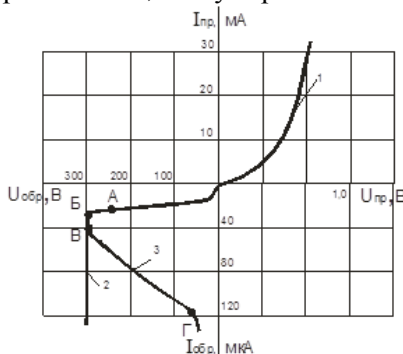
Переход преодолевают неосновные (собственные) носителя, количество которых очень невелико (в 10^{-6-9} раз меньше).

Рис. 1) Прямые ветви ВАХ p-n переходов, изготовленных из разных материалов 2) Обратный ток диода (в $\sim 10^{-6-9}$ раз меньше прямого).

На электропроводность полупроводников значительное влияние оказывает **температура**. При повышении температуры увеличивается концентрация носителей и проводимость растет в прямом и обратном направлении. **Прямой ток** возникает за счет примесной проводимости, которая не зависит от температуры, поэтому рост небольшой. **Обратный ток** определяется неосновными носителями, он в $10^4 - 10^8$ раз меньше, а зависимость от температуры больше.



б) Влияние температуры: $T_1 = 20$ град, $T_2 = 60$ град. Для p-n - переходов на основе германия обратный ток возрастает примерно в 2 раза при повышении температуры на каждые 10°C ; на основе кремния - в 2,5 раза при нагреве на каждые 10°C . Однако обратные токи кремния в сотни раз меньше, чем у германия.



При достижении обратным напряжением некоторой критической величины $U_{\text{проб}}$ происходит резкое уменьшение сопротивления p-n - перехода. Это явление называется **пробоем** p-n - перехода, а соответствующее ему напряжение - **напряжением пробоя**.

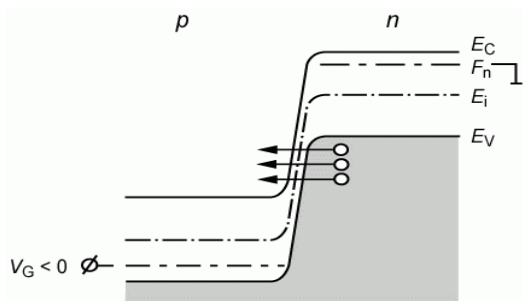
Рис. Пробой на обратной характеристике.

Различают **электрический** и **тепловой пробой**. **Области теплового пробоя** соответствует на рис. - в, участок ВГ. Тепловой пробой необратим, т.к. он сопровождается разрушением структуры вещества в месте p-n - перехода.

Причиной теплового пробоя является нарушение устойчивости теплового режима p-n - перехода. Количество теплоты, выделяющейся в переходе от нагрева его обратным током, превышает количества теплоты, отводимой от перехода. В результате температура перехода возрастает, сопротивление его уменьшается и ток увеличивается, что приводит к перегреву перехода и его тепловому разрушению.

Электрический пробой (участок АБВ характеристики) является обратимым при условии ограничения тока, т.е. при этом пробое в переходе не происходит разрушения структуры вещества. Могут существовать два вида электрического пробоя: **лавинный** и **туннельный**.

Лавинный пробой объясняется размножением носителей за счет **ударной ионизации** и вырывания электронов из атомов сильным электрическим полем. Этот пробой характерен для p-n - переходов большой толщины, получающихся при сравнительно малой концентрации примесей в полупроводниках. Пробивное напряжение для лавинного пробоя составляет десятки или сотни вольт. Явление ударной ионизации состоит в том, что электроны приобретают под действием электрического поля обратного напряжения большую скорость и, ударя в атомы кристаллической решетки, выбивают из них новые электроны, которые, в свою очередь, разгоняются полем и также выбивают из атомов электроны. Такой процесс усиливается лавинно с повышением напряжения.



Туннельный пробой объясняется явлением туннельного эффекта. Сущность последнего состоит в том, что при поле напряженностью более 10^5 В/см, действующем в p-n - переходе малой толщины и высокой концентрации примесей, некоторые электроны проникают через переход без изменения своей энергии. Внешнее напряжение обычно не превышает единиц вольт.

Рис. Зонная диаграмма туннельного эффекта

Барьерная (зарядная) и диффузионная емкость p-n - перехода.

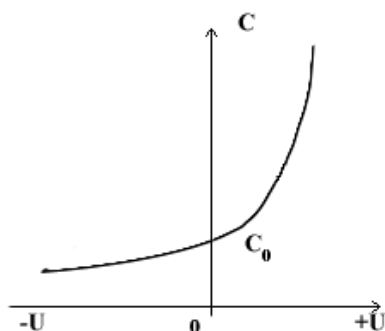
Барьерная (или зарядная) емкость обусловлена нескомпенсированными зарядами ионизированных атомов примеси, сосредоточенными по обе стороны от границы перехода при **обратном напряжении**. Запирающий слой выступает как диэлектрик конденсатора. Эти

объемные заряды создают электрическое поле перехода. При увеличении обратного напряжения толщина перехода увеличивается, а емкость уменьшается. Эта емкость использована в варикапах и в лабораторной работе 2.

Барьерная емкость составляет десятки - сотни пикофард и определяется как

$$C_{бар} = \frac{dQ}{du}, \text{ и равна } C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d} \text{ где } S - \text{площадь перехода, } d - \text{толщина}$$

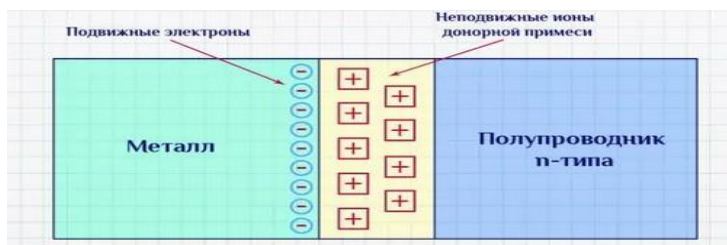
При прямом напряжении, кроме барьерной емкости, существует **диффузионная емкость** $C_{диф} = dQ/dU$, когда носители зарядов в большом количестве инжектируют через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в р- и n-областях. Диффузионная емкость значительно больше барьерной $C_{диф} > 1000 pF$.



При прямом напряжении на переходе общая емкость определяется в основном диффузионной емкостью, а при обратном напряжении — барьерной.

Рисунок 9 - Зависимость емкости p-n-перехода от приложенного напряжения

Барьер Шоттки (Schottky, 1939г.) — потенциальный барьер, образующийся в приконтактном слое полупроводника, граничащего с металлом, равный разности энергий, затрачиваемых на удаление электрона из твердого тела или жидкости в вакуум, другой металл или полупроводник. При установлении равновесия между металлом и полупроводником возникает контактная разность потенциалов: $U_k = (\phi_m - \phi_p)/e$, где e - заряд электрона.



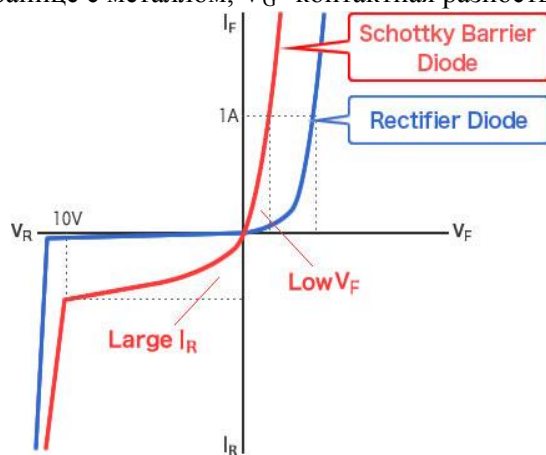
При сближении полупроводника n-типа с металлом, имеющим большую, чем у полупроводника, энергию отрыва электрона ϕ_m , металл заряжается отрицательно, а полупроводник — положительно, так как электроны переходят из полупроводника в металл, а в полупроводнике остаются положительные ионы.

Напротив, при сближении полупроводника p-типа с металлом, обладающим меньшей энергией отрыва электрона, электроны переходят в полупроводник, металл заряжается положительно, а полупроводник — отрицательно. Из-за большой электропроводности металла электрическое поле в него не проникает, и разность потенциалов U_k создается в приповерхностном слое полупроводника. Барьер Шоттки обладает выпрямляющими свойствами. Ток через него при наложении внешнего электрического поля создается почти целиком основными носителями заряда, что означает отсутствие явления инжекции, накопления и рассасывания зарядов.

$$J = J_0 (e^{\beta V_G} - 1); \quad J_0 = \frac{1}{4} q n_s v_0$$

В компактной форме ВАХ записывается в виде:

где v_0 — тепловая скорость электронов, n_s — поверхностная концентрация в полупроводнике на границе с металлом, V_G — контактная разность потенциалов



Вольтамперная характеристика барьера Шоттки, имеет ярко выраженный несимметричный вид. В области прямых смещений ток экспоненциально сильно растёт с ростом приложенного напряжения. В области обратных смещений ток от напряжения зависит слабо.

В обоих случаях, при прямом и обратном смещении, ток в барьере Шоттки обусловлен **основными носителями – электронами**, что означает отсутствие явления инжекции, накопления и рассасывания зарядов. Диоды с барьером Шоттки широко используются в сверхвысокочастотных детекторах, транзисторах и фотодиодах.

Рис. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки

Диод Шоттки в интегральном исполнении представляет собой контакт металла с высокоомным полупроводником n-типа, в качестве которого используется коллекторная область транзистора. При соответствующей очистке поверхности полупроводника на границе полупроводник — металл возникает обедненный слой и образуется барьер Шоттки.

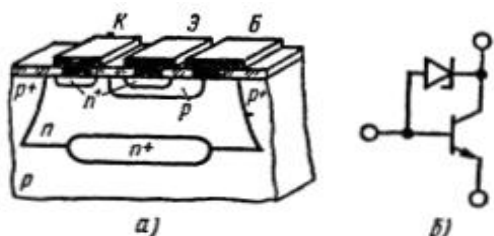


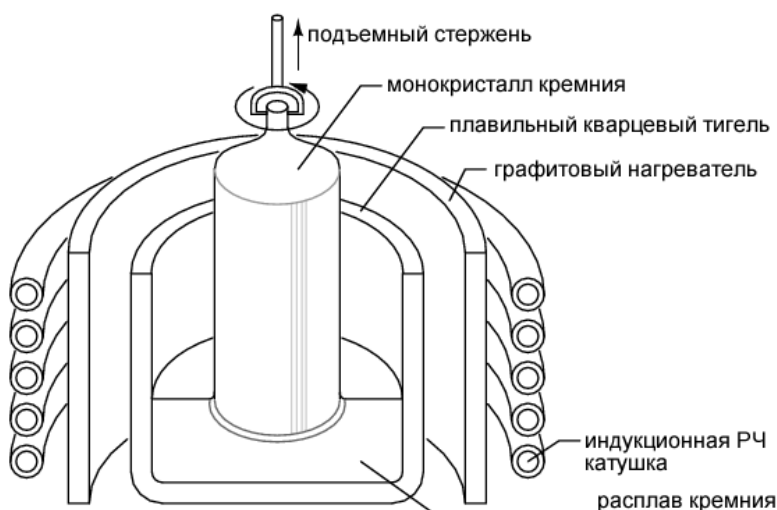
Рис. 3.9. Структура (а) и схема (б) транзистора с барьером Шоттки

Такой контакт обладает выпрямляющими свойствами и работает как диод. По сравнению с диодом на p-n-переходе диод Шоттки характеризуется низкими значениями падения напряжения в открытом состоянии (около 0,35—0,45 В) и малым временем выключения, которое обычно не превышает 0,1 нс.

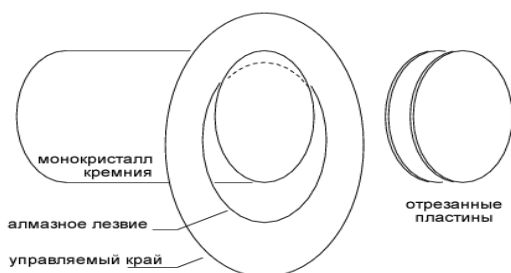
При интегральном исполнении транзистор и диод составляют единую структуру, которую называют **транзистором с барьером Шоттки**.

Основные технологические процессы изготовления p-n-переходов.

Кремний является вторым наиболее распространенным элементом в земной коре в виде диоксида кремния, SiO_2 , известного как кварцевый песок. Кремний освобождается из диоксида кремния путем восстановления с помощью углерода в *электрической дуговой печи* (грязный, $\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{CO}_2 + \text{Si}$), чистый кремний получается разложением силана: $\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$



Поликристаллический кремний плавится в кварцевом тигле, нагреваемом графитовым нагревателем. В процессе Чохральского расплавленный кремний затвердевает (с затравкой) в монокристаллический кремниевый стержень с необходимой ориентацией кристаллической решетки. Стержень вращается и поднимается по уровню вверх.



Слиток разрезают на пластины с помощью алмазной пилы. Пластины шлифуются и полируются. Пластины могут иметь эпитаксиальный слой N-типа, выращенный на вершине пластины для более высокого качества путем термического осаждения.

Технологии производства полупроводников с субмикронными размерами элементов основана на широком круге сложных физико-химических процессов: механическая обработка

пластин по 14-му классу чистоты с отклонением от плоскостности не более 1 мкм, получение тонких плёнок термическим и ионно-плазменным распылением в вакууме, применяются ультразвук и лазерное излучение, используются отжиг в кислороде и водороде, рабочие температуры при плавлении металлов достигают более 1500 °С, при этом диффузионные печи поддерживают температуру с точностью 0,5 °С, широко применяются опасные химические элементы и соединения (например, белый фосфор). Всё это обуславливает особые требования к производственной «электронной гигиене». Поэтому в чистых фабриках по производству подобных изделий все работники обязаны носить специальные комбинезоны bunny suit («костюм кролика»).

Электронно-дырочные переходы, в зависимости от технологии изготовления, разделяются на **точечные, сплавные, диффузионные, эпитаксиальные, планарные** и др.

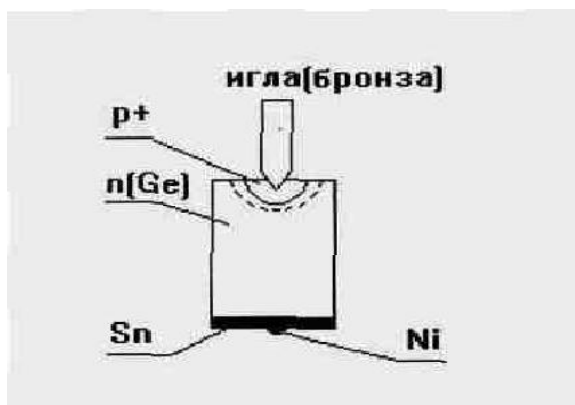


Рисунок 1.4 - Точечный переход.

Точечные переходы. К полированной и протравленной пластине монокристаллического полупроводника n-типа подводят иглу, например из бериллиевой бронзы с острием 20-30 мкм. Затем через контакт пропускают кратковременные мощные импульсы тока. Место контакта разогревается до температуры плавления материала зонда, и медь легко диффундирует внутрь полупроводника, образуя под зондом небольшую по объему область p-типа. Электронно-дырочный переход образуется в результате диффузии акцепторной примеси из расплава зонда и возникновения под ним области p-типа в кристаллической решетке полупроводника n-типа. Точечные переходы использовались в первых РЛС.

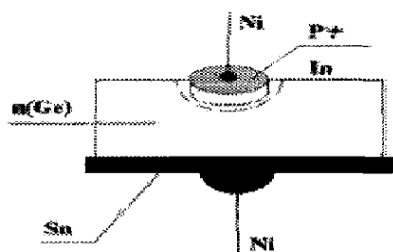


Рисунок 1.5 - Сплавной переход.

Сплавные переходы получают выплавлением примеси в монокристалл полупроводника (рис. 1.5.). Монокристалл германия n-типа распиливают на пластины толщиной 200-400 мкм и затем после травления и полировки разрезают на кристаллы площадью в два-три миллиметра и больше. На кристаллы, помещенные в графитовые кассеты, накладывают таблетку акцепторного материала, чаще всего индия. Затем кассета помещается в вакуумную печь, в которой таблетка индия и слой германия под ней расплавляются. Нагрев прекращается и при охлаждении германий

кристаллизуется, образуя под слоем индия слой p-типа. Застывшая часть индия представляет собой омический (невыпрямляющий) контакт, на нижнюю часть пластины наносят слой олова, который служит омическим контактом к германию n-типа. К индию и олову припаивают выводы обычно из никелевой проволочки.

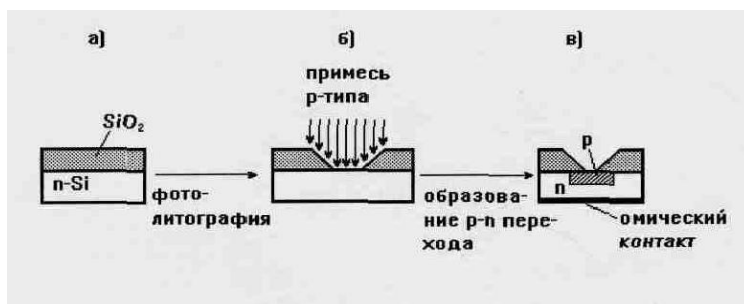


Рисунок 1.6 - Процесс создания диффузионного перехода – (а) исходная заготовка; (б) заготовка с внесённой примесью; (в) р-п-переход

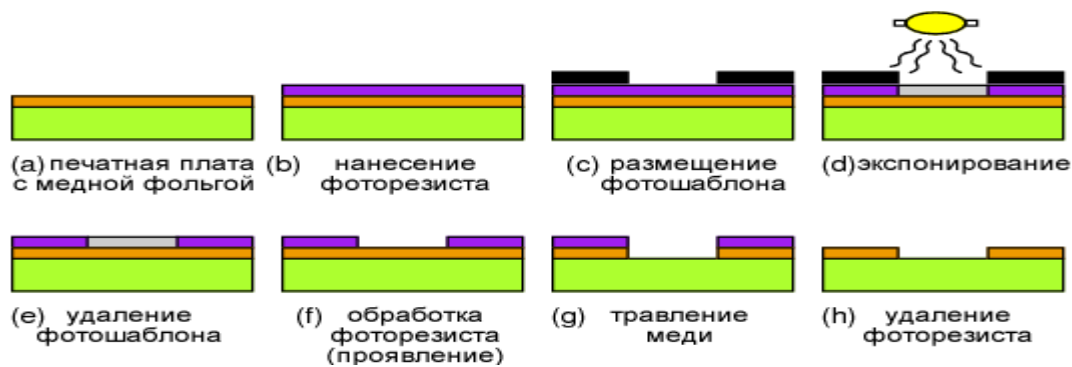
Диффузионные переходы получают диффузией примесного вещества в исходную полупроводниковую пластинку (рис. 1.6.). При планарном методе диффузии переходы получают, используя изолирующий слой, препятствующий диффузии примесей. На поверхности кремния n-типа выращивается тонкий (около 3 мкм) слой двуокиси кремния SiO₂ (рис. 1.6.).

Газофазная эпитаксия - получение эпитаксиальных слоев полупроводников путём осаждения из парогазовой фазы. Наиболее часто применяется в технологии кремниевых и арсенид - галлиевых полупроводниковых приборов и интегральных схем.

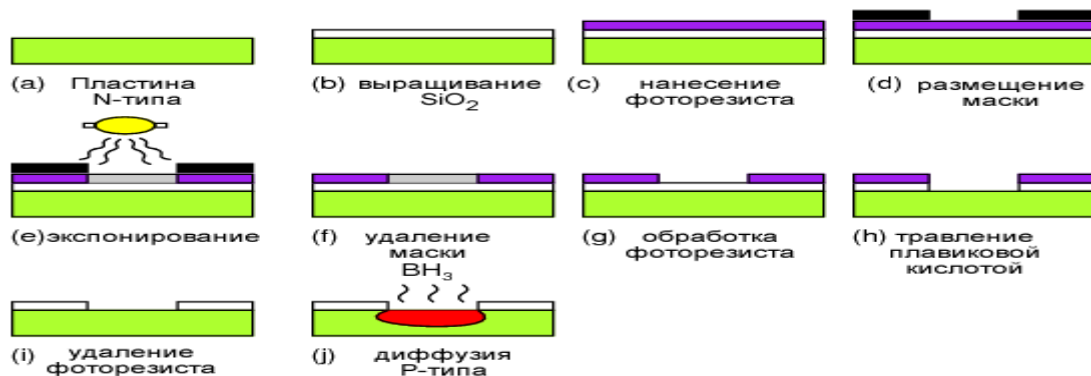
Для проведения эпитаксии необходимо создавать условия для **конденсации атомов осаждаемого вещества на поверхности подложки**. Конденсация происходит перенасыщением пара или жидкого

Ионное легирование и молекулярно-лучевая эпитаксия - методы формирования р-п-переходов. **Ионное легирование** заключается в бомбардировке ионами примеси нагретой полупроводниковой пластины, находящейся в вакууме. Ионы предварительно разгоняются до определенной скорости и, внедряясь в пластину полупроводника, играют роль донорных или акцепторных примесей.

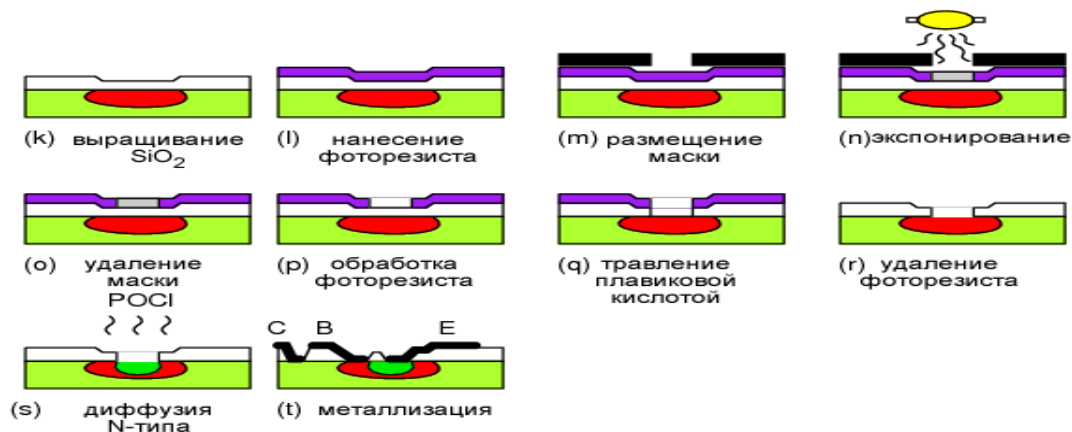
Обработка полупроводников включается в себя **фотолитографию** - процесс получения на поверхности пленки оксида необходимого рисунка расположения окон. Оксидную пленку покрывают **фоторезистом** (светочувствительным слоем) и **экспонируют** (засвечивают) ультрафиолетовыми лучами через маску, на которой выполнен рисунок в виде прозрачных и непрозрачных участков. Участки фоторезиста, подвергнувшиеся освещению, оказываются нерастворимыми, а с неосвещенных участков фоторезист удаляют растворителем. Травление пленки диоксида кремния производят плавиковой кислотой, в результате в оксидной пленке образуются окна, через которые производится **диффузия, эпитаксиальное наращивание** или **ионное легирование**. а) фотолитография печатной платы с медной фольгой



б). Легированная **кремниевая пластина N-типа** является исходным материалом в производстве полупроводниковых соединений. На поверхности пластины выращивается слой диоксида кремния (b) при высокой температуре (выше 1000°C) в диффузионной печи в присутствии кислорода или водяного пара. Наносится фоторезист в центр охлажденной пластины, а после чего та вращается в вакуумном патроне, для равномерного распределения резиста. К пластине с запеченным резистом (c) прикладывается маска, которая содержит шаблон окна, подвергающегося воздействию ультрафиолета (e).



Пластина подвергается воздействию газообразной легирующей примеси P-типа при высокой температуре в диффузионной печи. Примесь диффундирует в кремний только через отверстия в слое диоксида кремния. Для преобразования диодов в транзисторы требуется небольшая диффузия N-типа в середине существующей P-области. Эту задачу решает повторение предыдущих шагов с маской, имеющей меньшие размеры отверстий.



Этапы технологического процесса при производстве микросхем

Механическая обработка полупроводниковых пластин — получают пластины полупроводника со строго заданной геометрией, нужной кристаллографической ориентацией (не хуже $\pm 5\%$) и классом чистоты поверхности. Эти пластины в дальнейшем служат заготовками в производстве приборов или подложками для нанесения эпитаксиального слоя.

Химическая обработка (предшествующую всем термическим операциям) — удаление механически нарушенного слоя полупроводника и очистка поверхности пластины. Это **жидкостное и газовое травление**, плазмохимические методы. Для вытравливания окон в маскирующих покрытиях, для проявления скрытого изображения в слое экспонированного фоторезиста, для удаления его заподимеризированных остатков, для получения контактных площадок и разводки в слое металлизации применяют химическую (электрохимическую) обработку.

Фотолитография — производится для образования рельефа в диэлектрической плёнке.

Эпитаксиальное наращивание слоя полупроводника — осаждение атомов полупроводника на подложку, в результате чего на ней образуется слой, кристаллическая структура которого подобна структуре подложки. При этом подложка часто выполняет лишь функции механического носителя. Введение электрически активных примесей в пластину для образования отдельных р- и n-областей производится методом [диффузии](#) из твёрдых, жидких или газообразных источников, основными диффузантами в кремний являются [фосфор](#) и [бор](#).

Получение маскирующего покрытия — для защиты слоя полупроводника от проникновения примесей на последующих операциях [легирования](#). Чаще всего проводится путём окисления эпитаксиального слоя кремния в среде кислорода при высокой температуре.

Термическая диффузия — направленное перемещение частиц вещества в сторону убывания их концентрации: определяется градиентом концентрации.

Ионное легирование (применяемое при изготовлении полупроводниковых приборов с большой плотностью переходов, солнечных батарей и СВЧ-структур) выполняется в два этапа: - в полупроводниковую пластину на вакуумной установке внедряют ионы; - производится отжиг при высокой температуре. В результате восстанавливается нарушенная структура полупроводника и ионы примеси занимают узлы кристаллической решётки.

Получение **омических контактов** и создание пассивных элементов на пластине — с помощью фотолитографической обработки в слое оксида, покрывающем области сформированных структур, над предварительно созданными сильно легированными областями n^+ - или p^+ -типа, которые обеспечивают низкое переходное сопротивление контакта, **вскрывают окна**. Затем, методом вакуумного напыления всю поверхность пластины покрывают слоем металла (металлизируют), излишек металла удаляют, оставив его только на местах контактных площадок и разводки. В случае напыления на материал оксида специальных сплавов получают пассивные тонкоплёночные элементы — резисторы, конденсаторы, индуктивности.

Добавление дополнительных слоёв металлизации (в современных процессах — около 10 слоёв), между слоями располагают диэлектрик со сквозными отверстиями.