

Дисциплина
«Материалы электронной техники»

ТЕМА 5: «Полупроводниковые материалы»

Легостаев Николай Степанович,
профессор кафедры «Промышленная электроника»

Полупроводниковые материалы. Общие сведения.

Полупроводниковые материалы характеризуются значениями удельной электрической проводимости в пределах от $10^{-12} - 10^{-10} \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ до $10^4 - 10^6 \text{ См} \cdot \text{см}^{-1}$ (при температуре 300К), обладают высокой чувствительностью электропроводности к внешним энергетическим воздействиям (температуре, электрическому полю, свету, потокам быстрых частиц и др.), а также к содержанию примесей и дефектов в кристаллах.

Качественное отличие полупроводников от металлов состоит в том, что и при добавлении примесей, и при возрастании температуры электропроводность полупроводников возрастает, в то время как у металлов – уменьшается.

Различие между полупроводниками и диэлектриками является скорее количественным, чем качественным. Точнее было бы говорить о полупроводниковом состоянии неметаллических веществ, не выделяя полупроводники в особый класс, а к истинным диэлектрикам относить лишь такие, у которых электропроводность могла бы достигнуть заметных значений только при температурах, при которых они полностью испаряются.

Полупроводниковые материалы. Общие сведения.

Под полупроводниками чаще всего подразумевают совокупность наиболее типичных групп веществ, полупроводниковые свойства которых четко выражены уже при комнатной температуре.

Классификация полупроводниковых материалов

Элементы **IV** группы периодической системы Д.И. Менделеева (Ge, Si)

Соединения элементов **III** группы периодической системы (B, Al, Ga, In) с элементами **V** группы (N, P, As, Sb) – полупроводники типа $A^{III}B^{V}$

Соединения элементов **II** группы периодической системы (Zn, Cd, Hg) с элементами **VI** группы (S, Se, Te) – полупроводники типа $A^{II}B^{VI}$

Соединения элементов **VI** с переходными и редкоземельными металлами (Ti, V, Mn, Ni, Sm, Eu и т.п.)

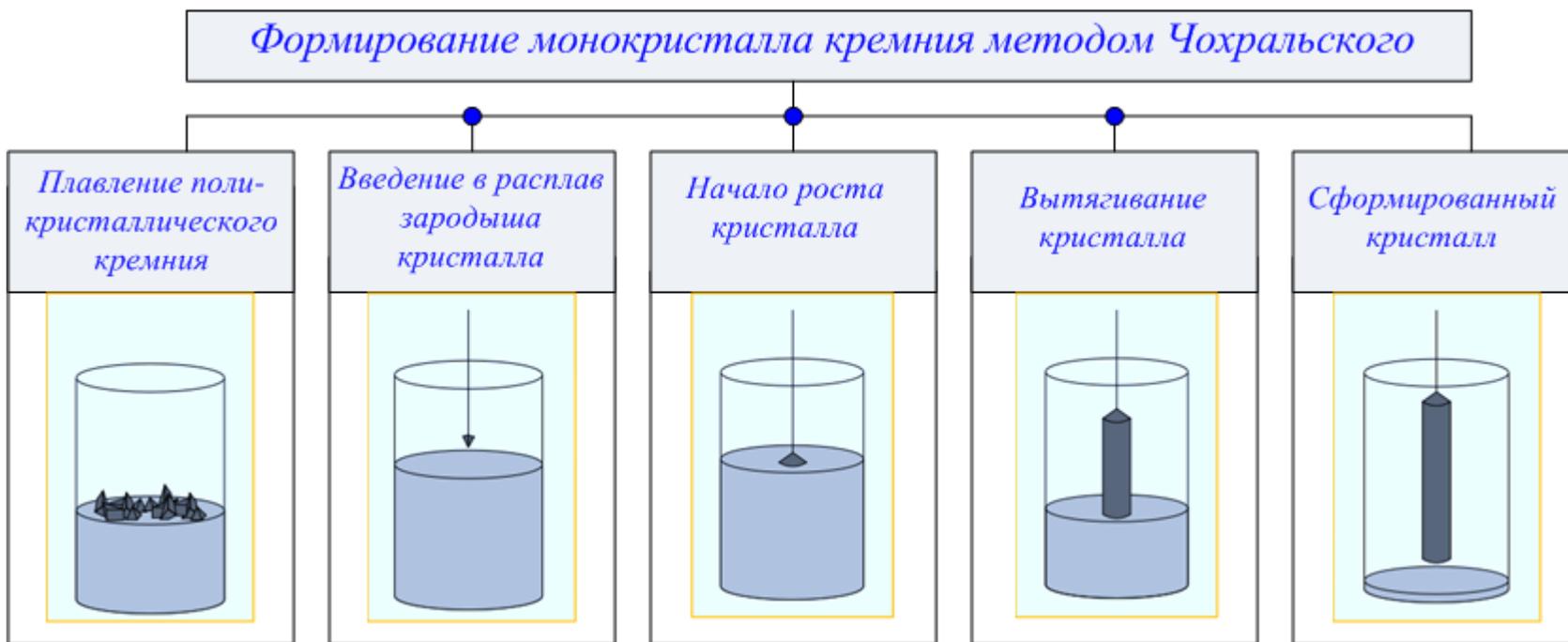
Элементы **VI** и **V** групп периодической системы и их аналоги

Органические полупроводники

Полупроводниковые материалы. Общие сведения.

Полупроводниковый материал должен иметь очень высокую степень чистоты. Например, материалом для производства интегральных микросхем сейчас является кремний, причем, не просто кремний, а монокристаллический сверхчистый кремний, с содержанием примесей не более $1 \cdot 10^{-11} \%$.

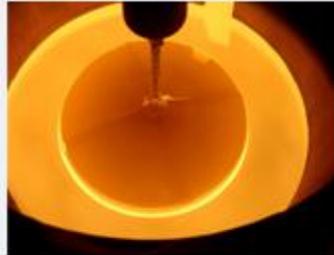
Наиболее эффективным способом очистки полупроводников от примесей является **метод зонной плавки**. Наиболее совершенные монокристаллы получают **методом вытягивания из расплава (метод Чохральского)**.



Полупроводниковые материалы. Общие сведения.



*Кварцевый тигель,
заполненный
поликристаллическим
кремнием*



*Начальная стадия
выращивания
цилиндрической
части
монокристалла
кремния*



*Монокристалл
кремния
цилиндрической
формы
охлаждают*

Полупроводниковые материалы. Общие сведения.



Пластины шлифуют и полируют до зеркального блеска.

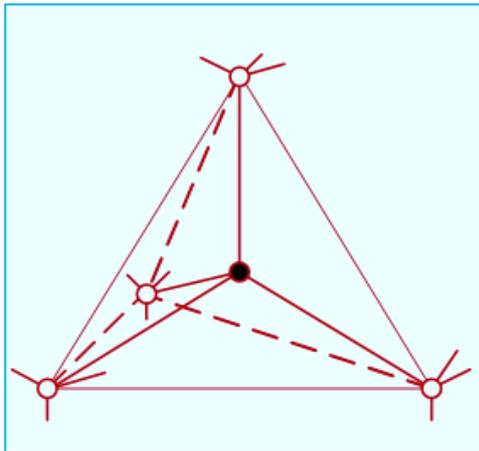


Пластины должны иметь заданную толщину для использования стандартной оснастки при изготовлении и поддержания одинаковых условий на поверхности пластины в процессе выполнения операций с пластиной.

Модель ковалентной связи.

Изучение электрических свойств полупроводниковых материалов (полупроводниковых приборов) чаще всего проводят на основе применения *модели ковалентной связи и модели энергетических зон (зонной модели)*.

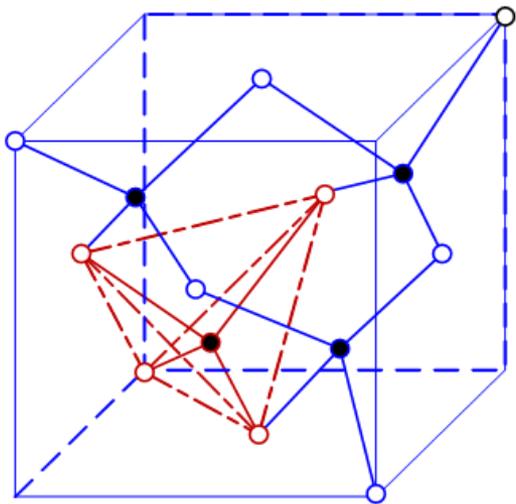
Применяемые в электронике полупроводники относятся к *монокристаллическим веществам*. Это означает, что по всему объему такого вещества атомы расположены в строго периодической последовательности на определенных постоянных расстояниях друг от друга, образуя трехмерную периодическую структуру, называемую *кристаллической решеткой*.



Кристаллическая решетка германия и кремния, получивших наибольшее применение в полупроводниковой электронике, называется *тетраэдрической* или решеткой типа алмаза. В основе такой решетки лежит пространственная фигура – *тетраэдр*, в углах и центре которого расположены атомы (рисунок 5.1).

Рисунок 5.1 – Элементарный тетраэдр.

Модель ковалентной связи.

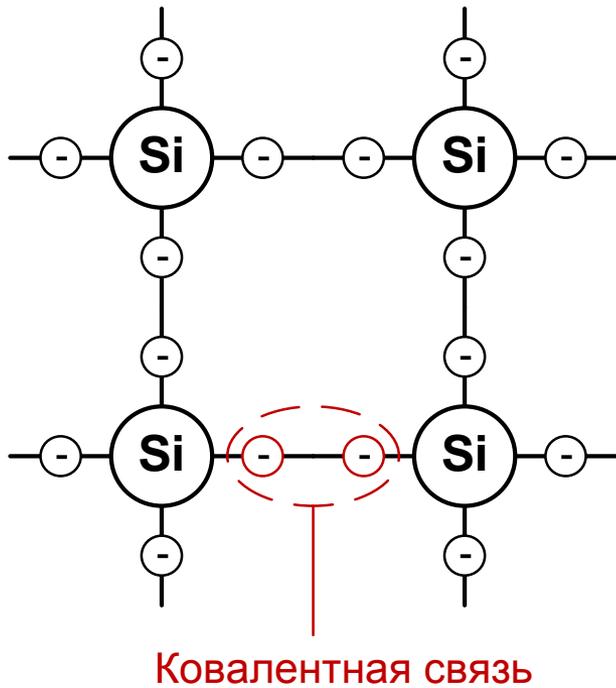


Характерная особенность тетраэдрической системы заключается в одинаковом расстоянии центрального атома от четырех угловых. Каждый угловой атом в свою очередь служит центральным атомом для других четырех ближайших атомов. Совокупность нескольких тетраэдров образует элементарную ячейку (рисунок 5.2) кубической формы.

Рисунок 5.2 – Элементарная ячейка тетраэдрической структуры кристаллической решетки.

Основную роль в процессе объединения атомов в кристалле играют электроны. Межатомная связь возникает благодаря тому, что атомы в веществе расположены близко друг от друга. При этом различают ионную, металлическую и ковалентную связи. *В кристаллах полупроводников реализуется ковалентная связь, при которой валентные электроны становятся общими для соседних атомов.*

Модель ковалентной связи.



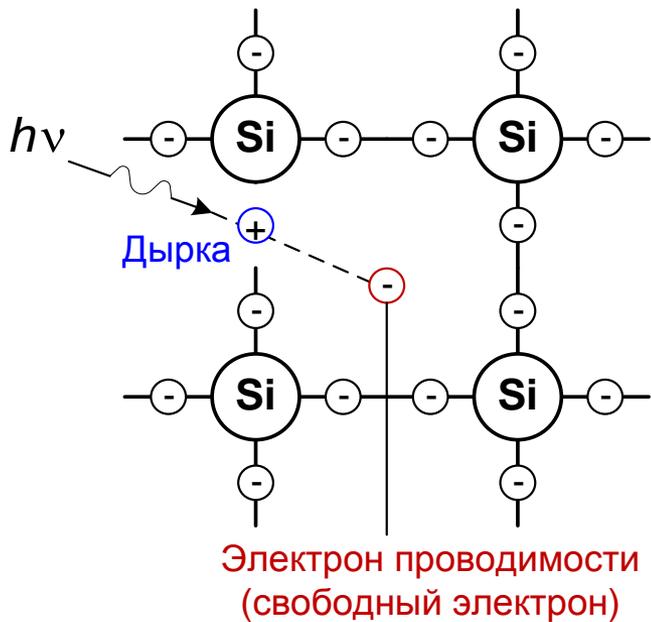
Трехмерную картину ковалентных связей можно изобразить двумерной моделью, в которой сохраняется *главная особенность тетраэдрической структуры кристаллической решетки – одинаковые расстояния между смежными атомами.*

В рассмотренной идеальной кристаллической решетке все электроны связаны со своими атомами, свободные носители заряда отсутствуют, поэтому такая структура *не проводит электрический ток.*

Рисунок 5.3 – Двумерная модель тетраэдрической решетки с ковалентными связями атомов.

Модель ковалентной связи.

Однако в полупроводниках (что коренным образом отличает их от диэлектриков) сравнительно небольшие энергетические воздействия, обусловленные, например, нагревом или облучением, могут привести *к отрыву некоторых валентных электронов от своих атомов* (рисунок 5.4).



Высвобожденные электроны могут участвовать в направленном движении, создавая электрический ток.

Электропроводность, обусловленная движением свободных электронов, называют электронной.

Освобождение какого-либо валентного электрона из атома полупроводника приводит к тому, что в системе ковалентных связей возникает пустое место. При этом *атом приобретает положительный заряд, численно равный заряду электрона, становясь положительно заряженным ионом.*

Отсутствие электрона в атоме полупроводника условно назвали дыркой.

Рисунок 5.4 – Разрыв ковалентной связи.

Модель ковалентной связи.

Атом с дыркой (положительный ион) может притянуть к себе электрон из соседнего атома. Этот электрон при переходе заполняет дырку, а в соседнем атоме образуется новая дырка. Далее процесс повторяется. В результате дырка перемещается от одного атома к другому, создавая дырочную электропроводность.

Дырку можно рассматривать как частицу, аналогичную электрону, но с зарядом противоположного знака. При дырочной электропроводности в действительности тоже перемещаются электроны, но более ограничено, чем при электронной (электроны переходят из данных атомов только в соседние атомы).

Таким образом, электрический ток в полупроводнике одновременно создается движением электронов и дырок.

У абсолютно чистого и однородного полупроводника при температуре, отличной от температуры $T = 0\text{ K}$, свободные электроны и дырки образуются попарно, то есть число электронов равно числу дырок. *Электропроводность* такого *полупроводника (собственного), обусловленная парными носителями теплового происхождения, называется собственной.*

Процесс образования пары электрон-дырка называется генерацией носителей заряда.

Модель ковалентной связи.

Процесс восстановления разорванных ковалентных связей называют *рекомбинацией*.

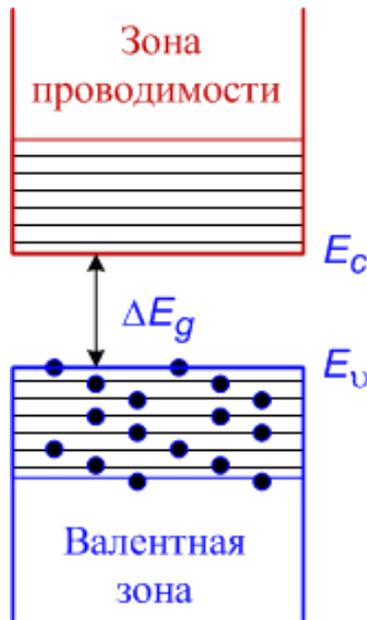
Промежуток времени с момента генерации носителя заряда до его рекомбинации называют *временем жизни*, а расстояние, пройденное носителем заряда за время жизни, - *диффузионной длиной*.

Так как *время жизни* каждого из носителей заряда различно, то для однозначной характеристики полупроводника под *временем жизни* чаще всего понимают среднее (среднестатистическое) время жизни носителей заряда, а под *диффузионной длиной* - среднее расстояние, которое проходит носитель заряда за среднее время жизни.

Модель энергетических зон.

Модель энергетических зон базируется на зонной теории твердого тела, основанной на применении аппарата квантовой механики к описанию поведения электронов в твердых кристаллических телах.

Фундаментальным свойством энергетического распределения электронов в кристаллах является возникновение *разрешенных* и *запрещенных энергетических зон*.

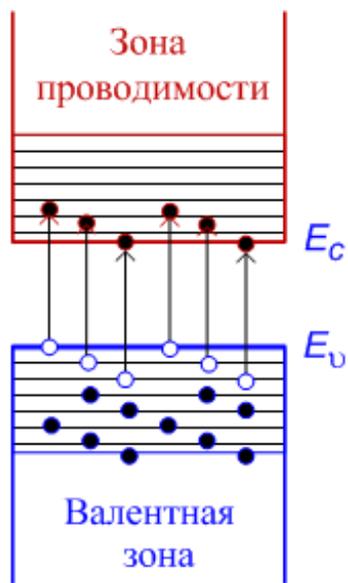


Каждая разрешенная зона занимает определенную область энергии и характеризуется минимальным и максимальным значениями энергии. Верхний энергетический уровень разрешенной зоны называется *потолком разрешенной энергетической зоны*, нижний – *дном разрешенной энергетической зоны*.

Ширина запрещенной зоны ΔE_g – это энергия, которую необходимо сообщить электрону, находящемуся на верхнем энергетическом уровне валентной зоны (E_v), чтобы перевести этот электрон на нижний энергетический уровень зоны проводимости (E_c).

Рисунок 5.5 – Энергетическая (зонная) диаграмма твердого кристаллического тела.

Собственная электропроводность полупроводников.



При температуре абсолютного нуля собственные полупроводники не проводят электрического тока. *Нагревание полупроводников приводит к тому, что часть электронов валентной зоны приобретает энергию, достаточную для их перехода в зону проводимости, в результате чего возникает заметная электропроводность* (примечание к рисунку: каждому электрону, перешедшему в зону проводимости, в валентной зоне соответствует незанятое (вакантное) состояние, которое называют *дырочным состоянием* или *дыркой проводимости* (обозначены светлыми кружками)).

С увеличением температуры число электронов в зоне проводимости увеличивается и вместе с этим растет электропроводность полупроводника. Помимо температуры, возбуждение электронов проводимости может происходить и под действием других факторов, способных сообщить электронам энергию, достаточную для их перехода из валентной зоны в зону проводимости. Этими факторами могут быть *световое облучение, ионизирующее излучение* и др.

Рассмотренный механизм возникновения электропроводности полупроводниковых кристаллов, справедлив для абсолютно чистых материалов, не содержащих примесей, влияющих на электропроводность. Такие полупроводники называются *собственными*, а их электропроводность – *собственной электропроводностью*.

Электропроводность примесных полупроводников.

Удельное сопротивление полупроводников существенно меняется при введении в их кристаллическую решетку определенного количества специально подобранных химических добавок – примесей.

Полупроводники, электрические характеристики которых определяются примесями, носят название примесных полупроводников, а обусловленная внедрением примесей электропроводность – примесной электропроводностью. Большинство полупроводниковых приборов изготавливают на основе примесных полупроводников. В рабочем диапазоне температур поставщиками основного количества носителей заряда в примесном полупроводнике должны быть примеси.

В полупроводниках, состоящих из атомов одного химического элемента, примесями являются чужеродные атомы, которые замещают часть основных атомов полупроводника в узлах кристаллической решетки.

В полупроводниках, состоящих из атомов нескольких химических элементов, примесями могут быть как чужеродные атомы, так и избыточные атомы химических элементов, образующих сложный полупроводник.

Электропроводность примесных полупроводников.

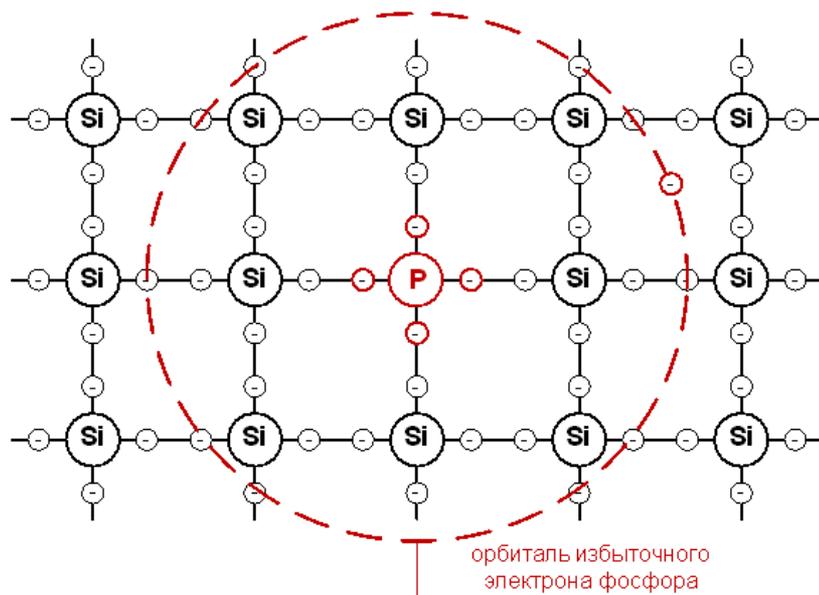


Рисунок 5.6 – Кристалл кремния, в котором часть основных атомов кристаллической решетки замещена примесными атомами фосфора.

У атома фосфора пять валентных электронов, четыре из которых участвуют в образовании ковалентных связей с четырьмя соседними атомами кремния, а пятый электрон оказывается избыточным. Из-за большой диэлектрической проницаемости полупроводника кулоновское притяжение избыточного электрона ядром фосфора в значительной мере ослаблено, поэтому радиус орбитали избыточного электрона оказывается большим и может достигать до нескольких межатомных расстояний. Достаточно небольшого энергетического воздействия, чтобы оторвать избыточный электрон от примесного атома и сделать его свободным, при этом атом примеси превращается в положительно заряженный ион, неподвижно закрепленный в узле кристаллической решетки.

Минимальная энергия, которую необходимо сообщить избыточному электрону донорной примеси, чтобы сделать его свободным, называется **энергией ионизации донорной примеси**.

Электропроводность примесных полупроводников.

Свободные электроны примесного происхождения добавляются к собственным свободным электронам, поэтому электропроводность полупроводника становится преимущественно электронной. Такие примесные полупроводники называются *электронными (донорными) полупроводниками* или *полупроводниками n-типа*, а примеси, обуславливающие электронную проводимость – *донорными примесями*. В отличие от собственных полупроводников образование свободных электронов, обусловленное донорными примесями, не сопровождается образованием дырок, поэтому *в полупроводниках n-типа основными носителями заряда являются электроны, а неосновными носителями заряда – дырки*. Наиболее распространенными донорными примесями по отношению к кристаллам кремния и германия являются атомы пятой группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева: *фосфор, мышьяк, сурьма, висмут*.

Электропроводность примесных полупроводников.

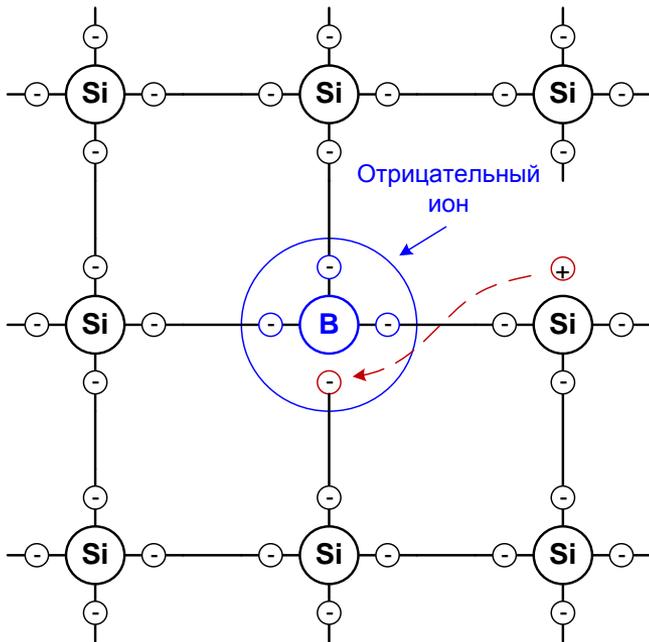


Рисунок 5.7 – Кристалл кремния, в котором часть основных атомов кристаллической решетки замещена примесными атомами бора.

Если в кристаллическую решетку кремния в качестве примеси внедрить атомы какого-либо *трехвалентного элемента*, например, бора, то для установления химических связей с четырьмя соседними атомами кристаллической решетки у примесного атома не хватает одного электрона, вследствие чего одна ковалентная связь оказывается ненасыщенной, то есть образуется вакансия (дырка). Потребность в установлении четырех химических связей приводит к тому, что атом бора может захватить недостающий электрон у одного из соседних атомов кремния. Захваченный электрон локализуется в примесном атоме и не принимает участия в создании электрического тока, так как атом-акцептор достроил свою оболочку до устойчивого состояния. В результате *примесный атом превращается в отрицательный ион*, неподвижно закрепленный в узле кристаллической решетки, а вблизи атома кремния, отдавшего электрон, появляется вакантное энергетическое состояние – дырка.

За счет эстафетного перехода электронов от одного атома к другому дырка может перемещаться по кристаллу (рисунок 5.7).

Электропроводность примесных полупроводников.

Дырки примесного происхождения добавляются к собственным дыркам, поэтому электропроводность полупроводника становится преимущественно дырочной. Такие примесные полупроводники называются *дырочными (акцепторными) полупроводниками* или *полупроводниками p-типа*, а примеси, обуславливающие дырочную проводимость – *акцепторными примесями*. В отличие от собственных полупроводников образование свободных дырок, обусловленное акцепторными примесями, не сопровождается образованием свободных электронов, поэтому *в полупроводниках p-типа основными носителями заряда являются дырки, а неосновными – свободные электроны*. Наиболее распространенными акцепторными примесями по отношению к кристаллам кремния и германия являются атомы третьей группы периодической системы элементов Д.И. Менделеева: *бор, алюминий, галлий, индий*.

Минимальная энергия, необходимая атому-акцептору, чтобы захватить у соседнего атома кристаллической решетки электрон, недостающий для образования устойчивой электронной оболочки, называется энергией ионизации акцепторной примеси.

Собственные полупроводники. Германий.

Основу современной электроники составляют неорганические кристаллические полупроводники. По химическому составу полупроводниковые материалы делят на *элементарные (собственные) полупроводники* и *полупроводниковые химические соединения*. Полупроводниковые свойства проявляют – *германий (Ge)*, *кремний (Si)*, *селен (Se)*, *теллур (Te)*, *йод (I)*, *бор (B)*, *углерод (C)*, *фосфор (P)*, *сера (S)*, *сурьма (Sb)*, *мышьяк (As)*. Из них в виде самостоятельных полупроводников применяются *Ge*, *Si*, *Se*, а остальные используются в виде легирующих примесей.



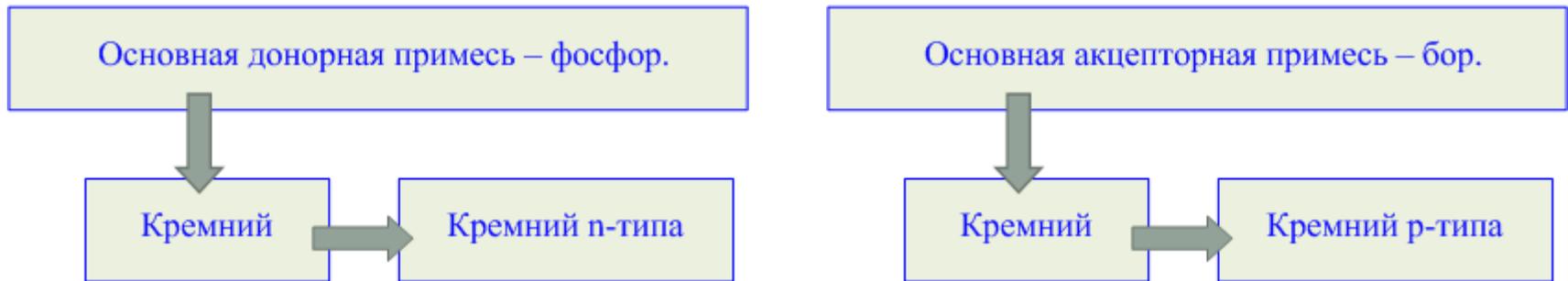
Пример маркировки монокристаллического германия

ГДГ 0,75/0,5	Г	Д	Г	0,75	0,5
	Германий	Тип электропроводности: Э - электронный; Д - дырочный.	Название легирующего элемента (в данном случае галлий)	Удельное электрическое сопротивление 0,75 Ом·см	Диффузионная длина неосновных носителей заряда 0,5 мм

Собственные полупроводники. Кремний.

Кремний – элемент IV группы с кубической кристаллической решеткой типа алмаза. *Отличается от германия более сильной химической связью, обладает более высокой температурой плавления, большей шириной запрещенной зоны, меньшей подвижностью носителей заряда и более низкой собственной электропроводностью.*

Кремний применяют с примесной проводимостью. В качестве легирующих примесей используются элементы III и V групп таблицы Д. И. Менделеева.



Примеси I и II групп образуют глубокие энергетические уровни и сокращают время жизни неравновесных носителей заряда. *Концентрация примесей сильно влияет на удельное электрическое сопротивление.* При увеличении концентрации легирующей примеси удельное электрическое сопротивление ρ снижается от 10^3 до 10^{-6} Ом·м.

Собственные полупроводники. Кремний.

*Кремний выпускается в виде поликристаллических и монокристаллических слитков. Поликристаллический кремний является исходным продуктом для получения монокристаллического легированного кремния. Промышленность выпускает **большое количество разнообразных марок монокристаллического кремния**, отличающихся по типу электропроводности, виду легирующих примесей, размерам слитка, величине удельного электрического сопротивления и другим параметрам.*

Пример маркировки кремния

КДБ 7,5/0,1- 45	К	Д	Б	7,5	0,1	45
	Кремний	Тип электропроводности: Э - электронный; Д - дырочный.	Название легирующего элемента (в данном случае бор)	Удельное электрическое сопротивление 7,5 Ом·см	Диффузионная длина неосновных носителей заряда 0,1 мм	Диаметр слитка 45 мм

Полупроводниковые химические соединения.

Полупроводниками являются сложные химические соединения, включающие два, три и более элемента. Сложные полупроводниковые материалы объединяют по номеру группы периодической системы Д. И. Менделеева, к которой принадлежат компоненты соединения и обозначают буквами латинского алфавита (**A** – первый компонент, **B** – второй компонент, **C** – третий компонент и так далее). Римские цифры над буквами обозначают группу элементов в периодической системе, а арабские под буквами – стехиометрический коэффициент. Например, бинарное соединение InP (фосфид индия) обозначается $A^{III}B^V$, Bi_2Te_3 (теллурид висмута) – $A^V_2B^{VI}_3$, силицид цинка и фосфора $ZnSiP_2$ – $A^{II}B^{IV}C^V_2$.

Среди бинарных полупроводников наибольший научный и практический интерес представляют соединения $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$, *которые являются важнейшими материалами полупроводниковой оптоэлектроники.*

Полупроводниковые соединения $A^{IV}B^{IV}$.

Единственным представителем группы соединений $A^{IV}B^{IV}$ является *карбид кремния SiC*. Карбид кремния используется, главным образом, с примесной проводимостью (собственная проводимость возможна только при $T > 1400^\circ\text{C}$).

Легирующие элементы V группы (N, P, As, Sb, Bi) *являются донорами* и дают SiC *n*-типа. *Элементы II группы* (Ca, Mg) и *III группы* (B, Al, Ga) *являются акцепторами* и дают SiC *p*-типа. Электрически активными являются собственные избыточные атомы: избыток кремния создает проводимость *n*-типа, избыток углерода – проводимость *p*-типа.



Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$.

Тип кристаллической решетки у большинства полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ – *сложная кубическая* (сфалерит), у нитридов – *гексагональная* (вюрцит).
 Тип химической связи полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ – *ковалентно-ионная*.

Полупроводниковые химические соединения $A^{III}B^V$				
Группы соединений	Нитриды	Фосфиды	Арсениды	Антимониды
$A^{III} \backslash B^V$	N (азот)	P (фосфор)	As (мышьяк)	Sb (сурьма)
B (бор)	BN	BP	BAs	BSb
Al (алюминий)	AlN	AlP	AlAs	AlSb
Ga (галлий)	GaN	GaP	GaAs	GaSb
In (индий)	InN	InP	InAs	InSb

Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$. Арсенид галлия.

В качестве акцепторов при формировании проводимости в соединениях $A^{III}B^V$ используются химические элементы II группы (Zn, Cd, Mg), которые замещают в кристаллической решетке атомы A^{III} и формируют полупроводник p-типа. *В качестве доноров* применяют химические элементы VI группы (S, Se, Te), замещающие атомы B^V , которые создают полупроводниковое соединение n-типа.

Из всех полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ *наиболее широкое применение находят арсенид галлия GaAs, антимонид индия InSb, фосфид галлия GaP, нитрид галлия GaN.*

Арсенид галлия (GaAs) применяется для изготовления

Полевых транзисторов с эффектом Шоттки (ПТШ)

Фотоэлементов (GaAs - лучший фоточувствительный материал для солнечных батарей)

Полупроводниковых лазеров с длиной волны излучения 0,83 – 0,92 мкм

Интегральных микросхем повышенного быстродействия и степени интеграции на полевых транзисторах с эффектом Шоттки

Фотокатодов с малой работой выхода электронов, туннельных диодов, диодов Ганна

Полупроводниковые соединения A^{III}B^V. Арсенид галлия.

Арсенид галлия (GaAs)

В качестве доноров используют химические элементы VI группы – Se, Te

В качестве акцепторов применяют химические элементы II группы – Zn, Cd

pn-переходы на арсениде галлия получают путем диффузии акцепторной примеси (Zn, Cd) в материал n-типа (легированный Se, Te) либо используют эпитаксиальные структуры

Основные свойства GaAs:

большая ширина запрещенной зоны (1,43 эВ), высокая подвижность электронов ($\mu_{n2} = 0,95 \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$)

В обозначении марки GaAs указывают вид материала (Аг – арсенид галлия), способ получения (Ч – по методу Чохральского, Н – методом направленной кристаллизации), вид легирующей примеси (Ц – цинк, О – олово, Т – теллур). К буквенному обозначению добавляют две цифры, из которых первая означает величину концентрации основных носителей заряда, вторая – показатель десятичного порядка этой величины.

Пример маркировки арсенида галлия: АГЧЦ-21-19 – арсенид галлия, полученный методом Чохральского, легирован цинком, марки 2, концентрация основных носителей заряда $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

Полупроводниковые соединения A^{III}B^V. Антимонид индия.

Антимонид индия InSb является одним из наиболее широко применяемых бинарных полупроводников. *Антимонид индия получают* путем сплавления высокочистых индия и сурьмы с последующей очисткой методом зонной плавки и получением монокристаллов выращиванием из расплава, *p-n-переходы* получают введением Zn в *n-InSb*, содержащий избыток Sb.



Полупроводниковые соединения A^{III}B^V. Антимонид индия.

Промышленность выпускает антимонид индия в виде монокристаллических слитков марок ИСЭ, ИСЭТ, ИСДГ, ИСДЦ (ИС – индий сурьмянистый, Э – электронный тип проводимости, Д – дырочный тип проводимости, Т – легирующая примесь теллур, Г – легирующая примесь галлий, Ц – легирующая примесь цинк).



Полупроводниковые соединения $A^{III}B^V$. Фосфид галлия.

Фосфид галлия GaP. Вследствие большой ширины запрещенной зоны (2,26 эВ) излучательные переходы в фосфиде галлия приходятся на видимую часть спектра, что позволяет на основе *GaP* создавать *светодиоды, дающие красное, желтое и зеленое свечение.* Высокая термическая (1000 °С) и радиационная стойкость позволяет применять фосфид галлия для изготовления *солнечных батарей.* Вводя в фосфид галлия легирующие примеси (теллур, цинк, кислород) можно получить светодиоды, имеющие разное свечение, что указывается в маркировке фосфида галлия.

Промышленность выпускает фосфид галлия в виде монокристаллических слитков марок **ФГЭТ-к/10, ФГЭТ-о/20, ФГЭТ-к/30, ФГДЦ-з** (ФГ – фосфид галлия, Э – электронный тип проводимости, Д – дырочный тип проводимости, Т – легирующая примесь теллур, Ц – легирующая примесь цинк, К – легирующая примесь кислород, к – красный цвет свечения материала, о – оранжевый цвет свечения материала, з – зеленый цвет свечения материала). Цифры в показывают минимальную яркость свечения (кД/м²).

Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$.

Тип кристаллической решетки полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ – *сложная кубическая* (сфалерит), либо *гексагональная* (вюрцит), у некоторых полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ кристаллическая решетка типа NaCl. *Тип химической связи* полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ – *ковалентно-ионная*. Ионная составляющая более выражена, чем у химических полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$. *Получают соединения $A^{II}B^{VI}$ кристаллизацией из паров металла и неметаллического компонента, регулируя соотношение их концентраций.*

Полупроводниковые химические соединения $A^{II}B^{VI}$			
Группы соединений	Сульфиды	Селениды	Теллуриды
$A^{II} \backslash B^{VI}$	S (сера)	Se (селен)	Te (теллур)
Zn (цинк)	ZnS	ZnSe	ZnTe
Cd (кадмий)	CdS	CdSe	CdTe
Hg (ртуть)	HgS	HgSe	HgTe

Собственная проводимость формируется путем создания избытка атомов элемента A^{II} или элемента B^{VI} . *Примесная проводимость* применяется реже – используются металлы I группы (Cu, Ag, Au) в качестве акцепторов.

Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$.

Особенностями свойств полупроводниковых соединений $A^{II}B^{VI}$ являются большие различия в ширине запрещенной зоны у разных соединений, что дает возможность генерировать излучение с различной длиной волны λ – от ультрафиолетовой до инфракрасной области спектра. Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$ отличаются стабильностью характеристик благодаря слабой зависимости удельного электрического сопротивления от температуры и напряженности электрического поля.

Полупроводниковые соединения $A^{II}B^{VI}$ находят применение в производстве

Фоторезисторов (на основе сульфида кадмия CdS и селенида кадмия CdSe)

Люминофоров (на основе сульфида цинка ZnS)

Фотоприемников излучения в инфракрасной области спектра (на основе теллурида кадмия CdTe и теллурида ртути HgTe)

Датчиков э.д.с. Холла (на соединениях с большой подвижностью носителей заряда – HgSe, HgTe и их растворах)

Вопросы для самоконтроля

1. Существует ли принципиальное различие между электронами проводимости в полупроводниках (и металлах) и свободными электронами?
2. Каким образом электроны из валентной зоны могут переходить в зону проводимости в собственном полупроводнике?
3. Чем обеспечивается собственная электропроводность полупроводников?
4. Как и почему изменяется подвижность носителей заряда в кремнии и германии при увеличении концентрации легирующей примеси?
5. Как изменяется ширина запрещенной зоны кремния и германия при понижении температуры?
6. Каким соотношением связаны между собой концентрации электронов и дырок в невырожденном полупроводнике при термодинамическом равновесии?
7. Какие примеси в ковалентных полупроводниках являются донорами, а какие – акцепторами?
8. Какое состояние носителей заряда называется неравновесным?
9. Какой тип химической связи характерен для полупроводниковых соединений типа $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$?
10. Почему большинство полупроводниковых соединений $A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$ проявляет лишь один тип электропроводности, независимо от характера легирования?

Рекомендуемая литература

1. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учебное пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Эль Контент, 2012. – 184 с. ISBN 978-5-4332-0023-4

2. Легостаев Н.С. Материалы электронной техники: учеб.-метод. пособие / Н.С. Легостаев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2014. – 74 с. ISBN 978-5-86889-678-1

Тема следующего занятия «Эксплуатационные характеристики и параметры резисторов и конденсаторов».

Для подготовки к занятию изучите материал, представленный в разделах 3,5 учебного пособия на страницах 42-56, 75-88. *Необходимо знать классификацию дискретных резисторов, основные параметры и характеристики резисторов. Следует обратить внимание на выбор резисторов в зависимости от условий эксплуатации. Необходимо знать классификацию конденсаторов, основные параметры и характеристики конденсаторов. При изучении конденсаторов особое внимание следует обратить на области номинальных емкостей и напряжений керамических конденсаторов, конденсаторов с органическим диэлектриком и конденсаторов с оксидным диэлектриком. Следует обратить внимание на выбор конденсаторов в зависимости от условий эксплуатации.*

Вопросы и пожелания можно присылать через диспетчерский отдел ФДО.

Спасибо за внимание