

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.)

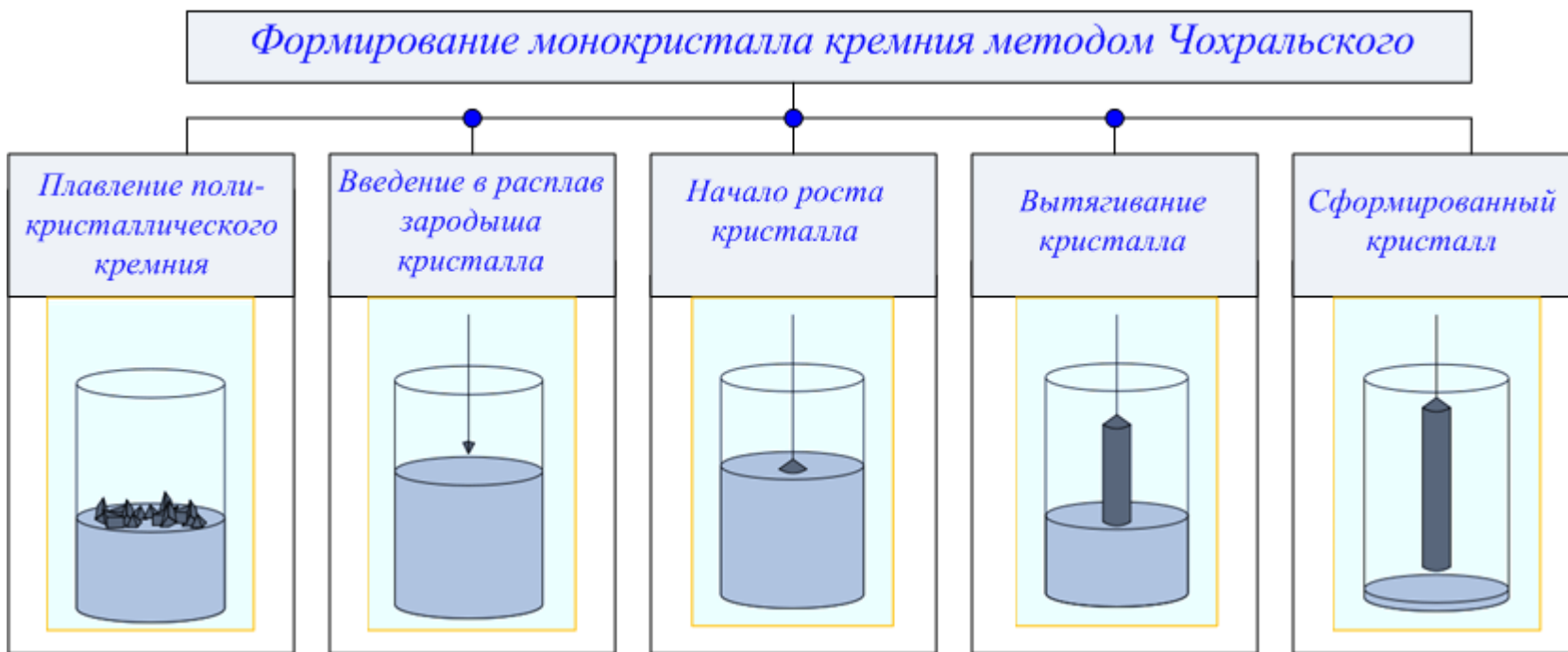
Элементы **VI** и **V** групп периодической системы и их аналоги

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  $1 \cdot 10^{-11} \%$ .

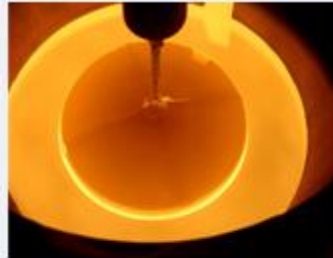
Наиболее эффективным способом очистки полупроводников от примесей является **метод зонной плавки**. Наиболее совершенные монокристаллы получают **методом вытягивания из расплава (метод Чохральского)**.



## 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.

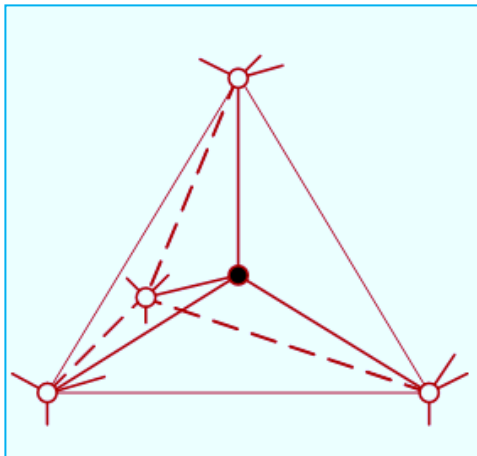


*Пластины должны иметь заданную толщину для использования стандартной оснастки при изготовлении и поддержания одинаковых условий на поверхности пластины в процессе выполнения операций с пластиной.*

## 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)*.

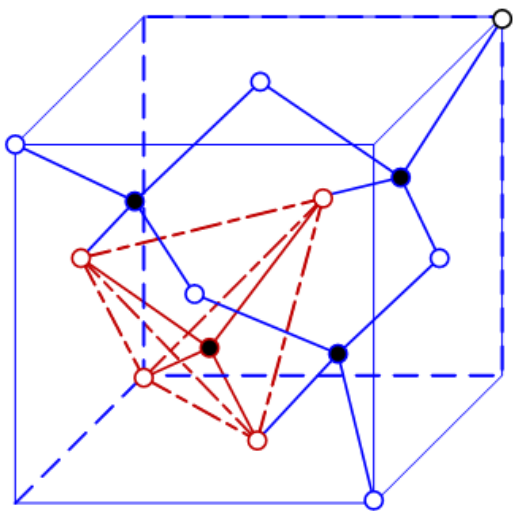
Применяемые в электронике полупроводники относятся к *монокристаллическим веществам*. Это означает, что по всему объему такого вещества атомы расположены в строго периодической последовательности на определенных постоянных расстояниях друг от друга, образуя трехмерную периодическую структуру, называемую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



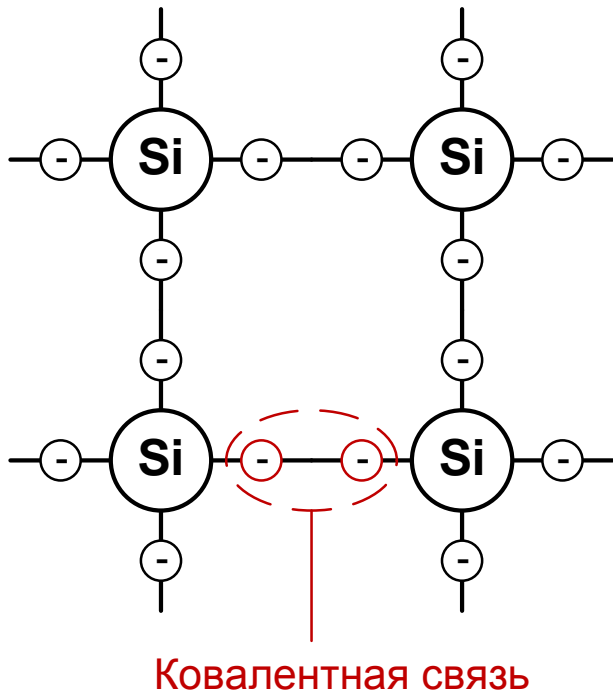
*Характерная особенность тетраэдрической системы заключается в одинаковом расстоянии центрального атома от четырех угловых. Каждый угловой атом в свою очередь служит центральным атомом для других четырех ближайших атомов. Совокупность нескольких тетраэдров образует элементарную ячейку (рисунок 5.2) кубической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



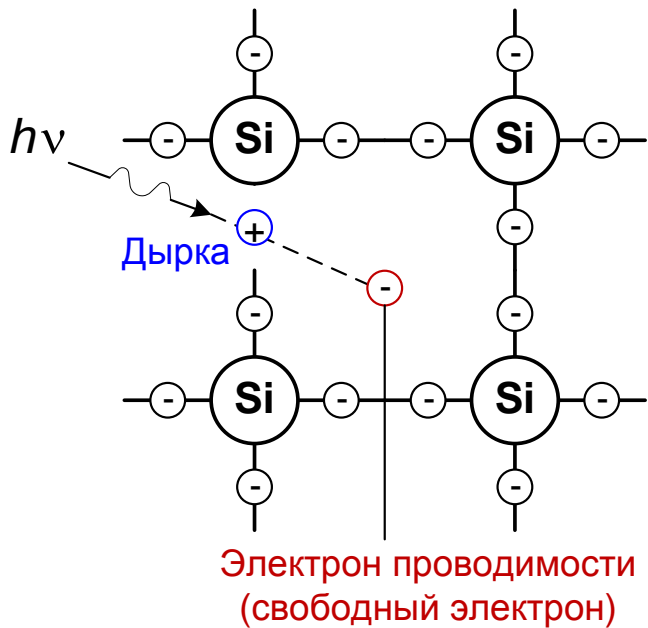
Трёхмерную картину ковалентных связей можно изобразить двумерной моделью, в которой сохраняется *главная особенность тетраэдрической структуры кристаллической решетки – одинаковые расстояния между смежными атомами.*

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*.

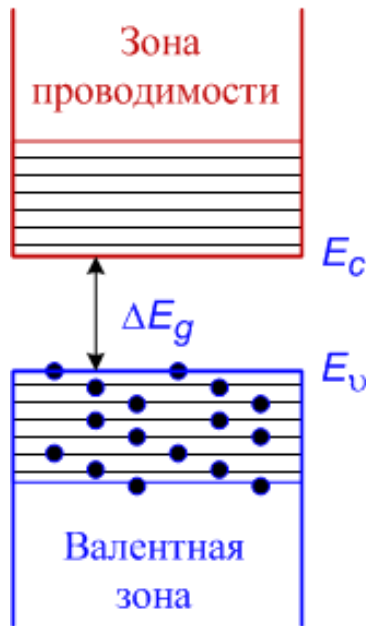
Промежуток времени с момента генерации носителя заряда до его рекомбинации называют *временем жизни*, а расстояние, пройденное носителем заряда за время жизни, - *диффузионной длиной*.

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*.

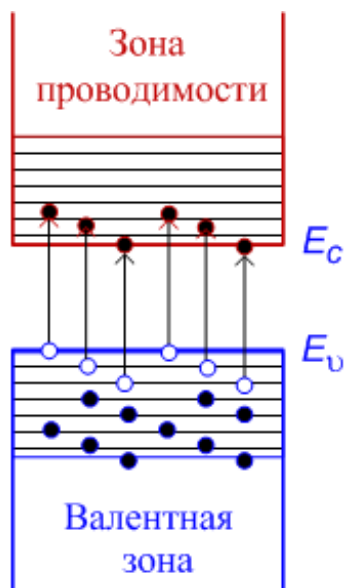


Каждая разрешенная зона занимает определенную область энергии и характеризуется минимальным и максимальным значениями энергии. Верхний энергетический уровень разрешенной зоны называется *потолком разрешенной энергетической зоны*, нижний – *дном разрешенной энергетической зоны*.

*Ширина запрещенной зоны  $\Delta E_g$*  – 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.

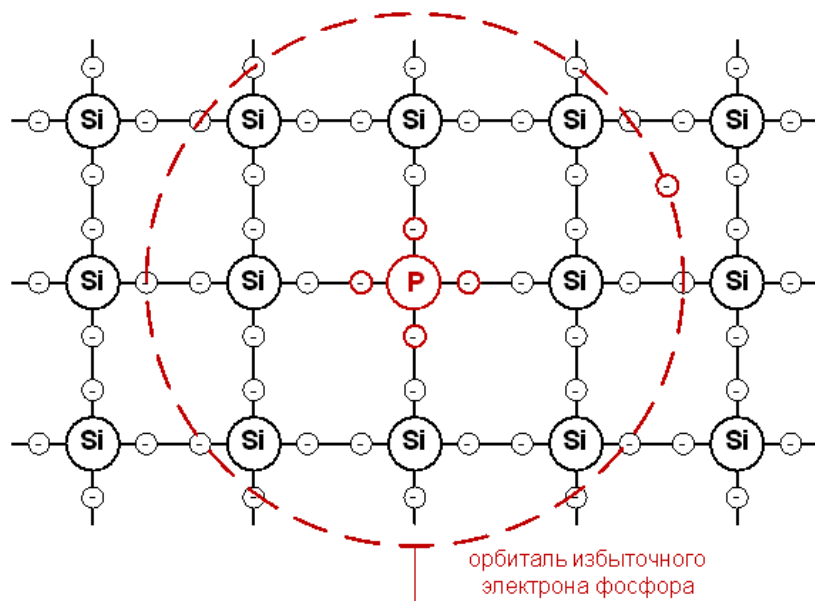


Рисунок 5.6 – Кристалл кремния, в котором часть основных атомов кристаллической решетки замещена примесными атомами фосфора.

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.

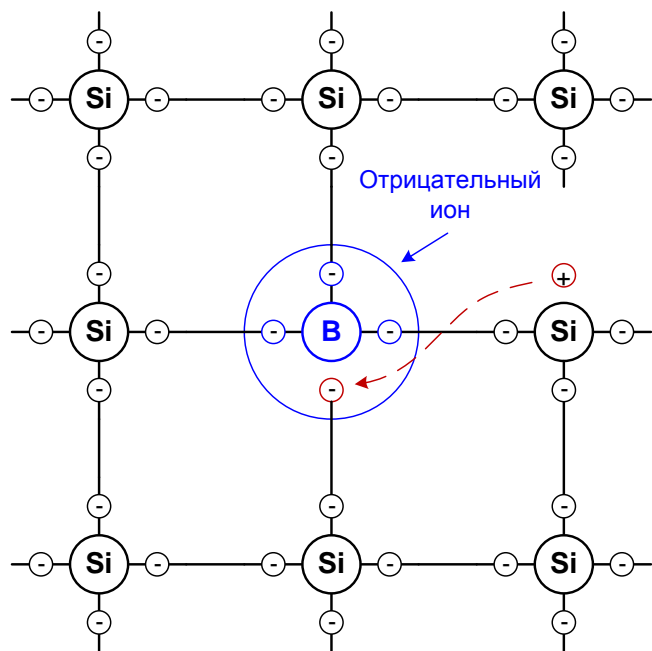


Рисунок 5.7 – Кристалл кремния, в котором часть основных атомов кристаллической решетки замещена примесными атомами бора.

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).*

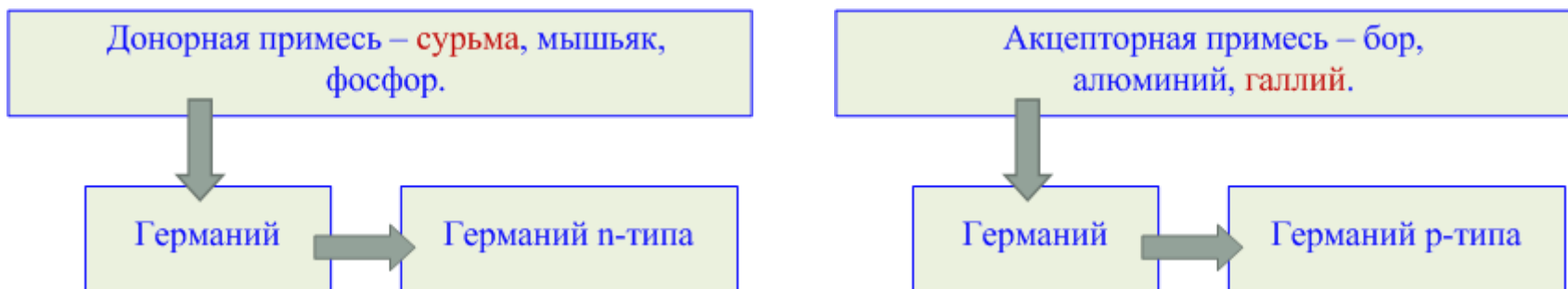
## Электропроводность примесных полупроводников.

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.



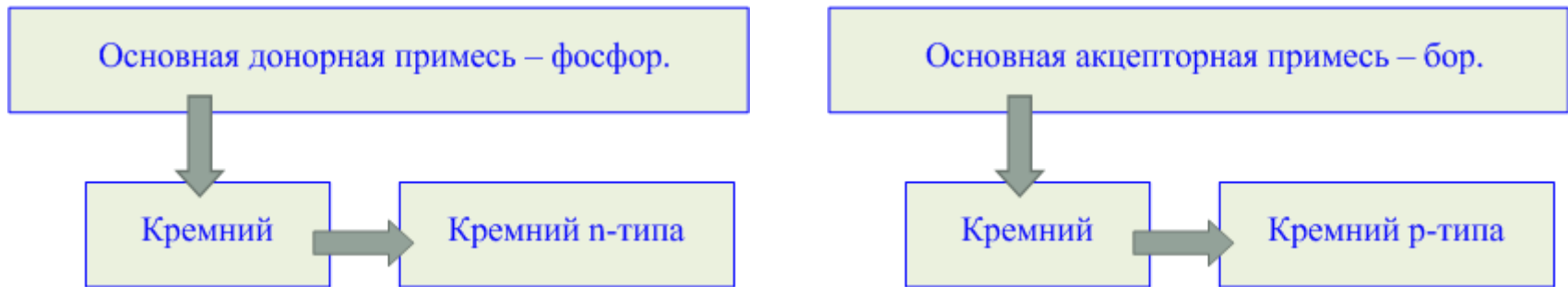
### Пример маркировки монокристаллического германия

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  $\rho$  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<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. 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:**

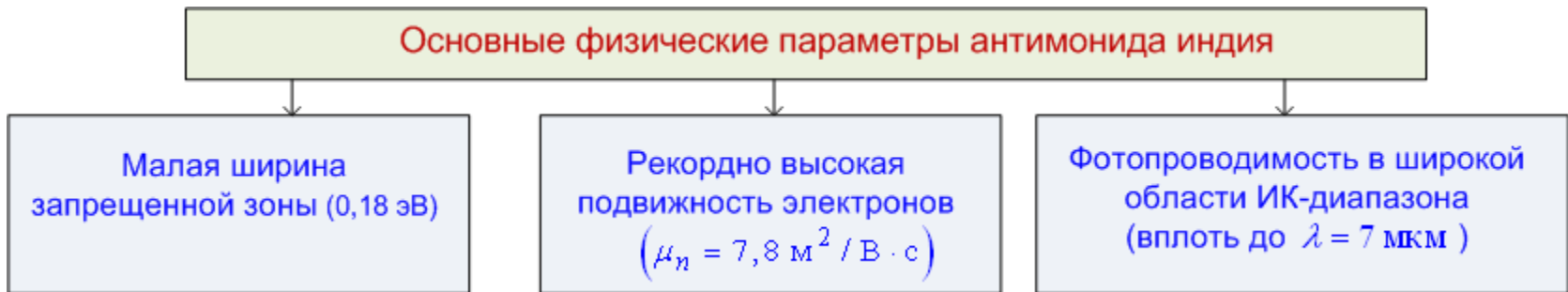
большая ширина запрещенной зоны (1,43 эВ), высокая подвижность электронов ( $\mu_{n2} = 0,95 \text{ м}^2 / \text{В} \cdot \text{с}$ )

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  $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$

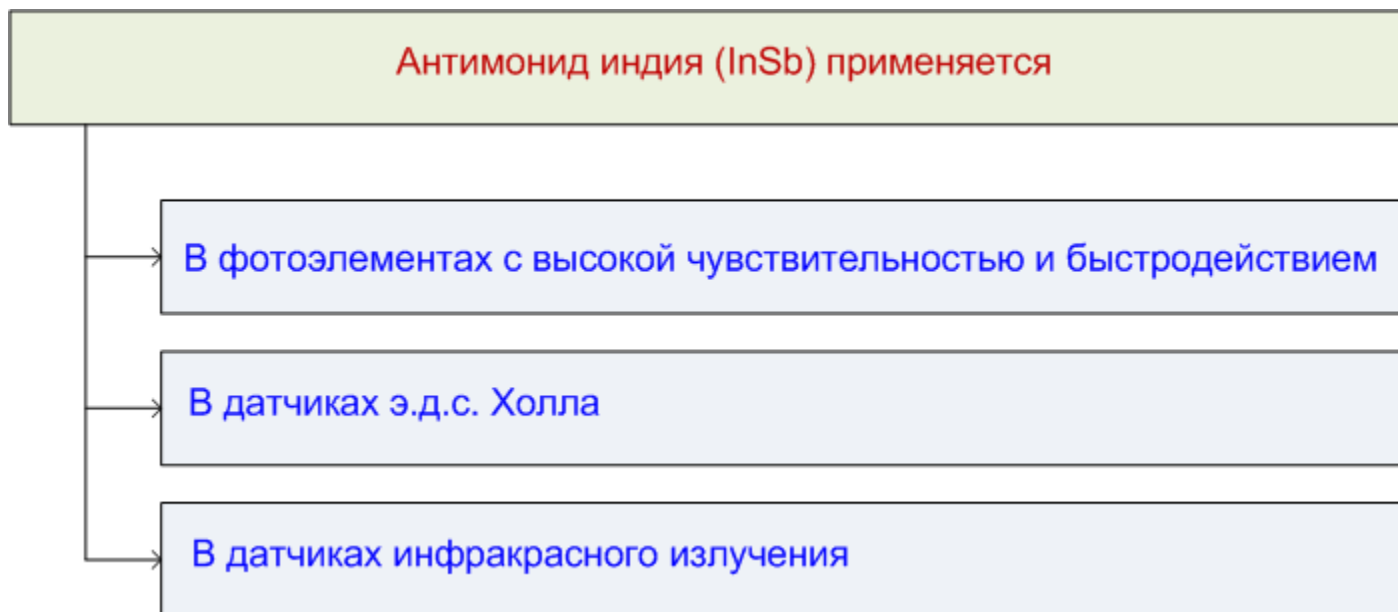
## Полупроводниковые соединения A<sup>III</sup>B<sup>V</sup>. Антимонид индия.

*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/м<sup>2</sup>).

## 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  $\lambda$  – 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**