

Содержательный  
модуль 4.



# «Электроматериаловедение»

## Лекция 9

**Полупроводниковые  
материалы**

**Доцент Лалазарова Н.А.**

Lec\_9\_el\_mat\_1MM\_LNA\_02-04-2015

# Содержание

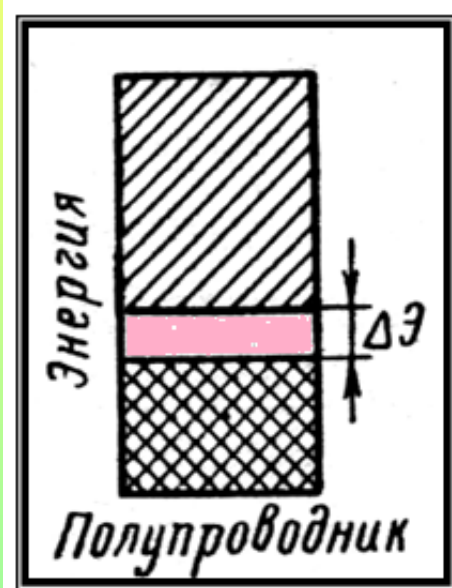
- ✦ 9.1. Характерные особенности и свойства полупроводниковых материалов
- ✦ 9.2. Влияние различных факторов на свойства полупроводников
- ✦ 9.3. Классификация полупроводниковых материалов
- ✦ 9.4. Простые полупроводниковые материалы
- ✦ Задания для самостоятельной работы



## 9.1. ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

К полупроводникам относятся большая группа веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре находится между значениями удельного сопротивления проводников и диэлектриков.

**Основной особенностью полупроводников** является их способность изменять свои свойства под влиянием различных внешних воздействий (изменение температуры и освещения, приложение электрического и магнитного полей, внешнего давления и др.)



**Свойства** полупроводников существенно зависят от **содержания примесей**. При введении примеси изменяется не только значение проводимости, но и характер ее температурной зависимости.

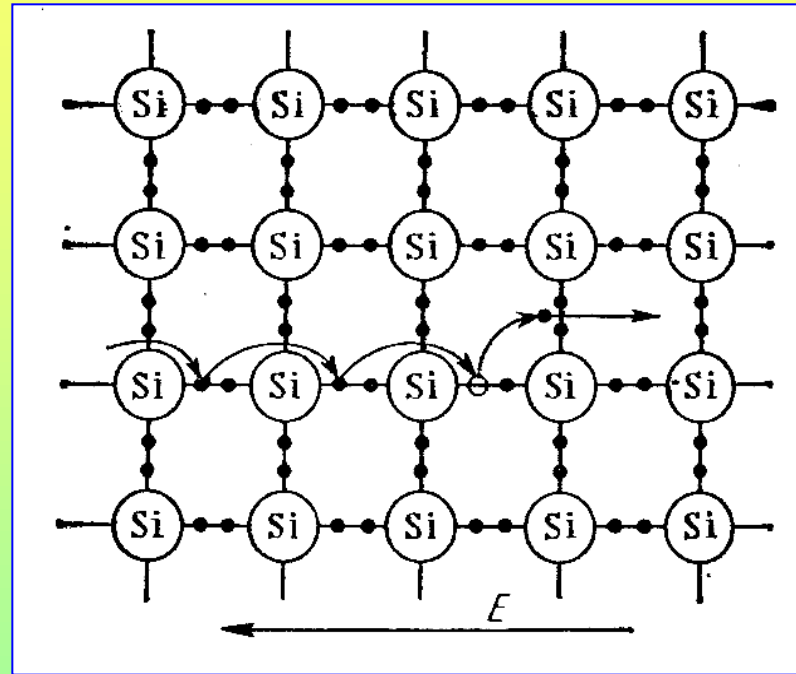
Согласно зонной теории твердого тела для полупроводников характерно наличие не очень широкой запрещенной зоны на энергетической диаграмме.



# СОБСТВЕННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

В зависимости от чистоты полупроводники подразделяются на: **собственные и примесные.**

В **собственном полупроводнике** носителями заряда являются электроны и дырки, концентрации которых одинаковы.



Собственная проводимость в кремнии

Электроны в зону свободных энергетических уровней могут поставляться только из валентной зоны. Электроны, переходя в зону проводимости, образуют в валентной зоне дырки.

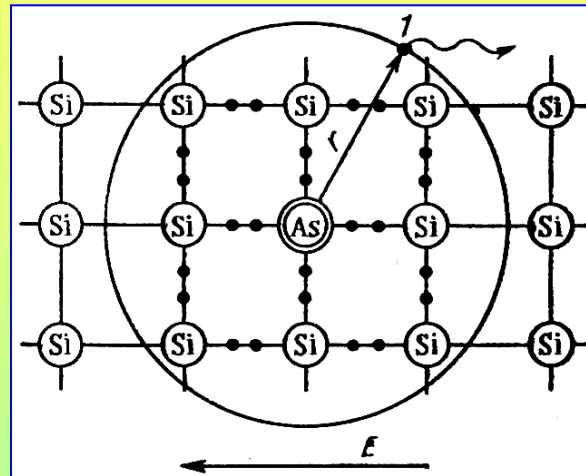
Подвижность электронов и дырок не одинакова. **Собственная проводимость** полупроводников имеет слабо преобладающий электронный характер.



# ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Для большинства полупроводниковых приборов используются **примесные полупроводники**.

В рабочем интервале температур поставщиками свободных носителей заряда являются **примеси**. Примеси в простых полупроводниках служат чужеродные атомы.



Примесь замещения в кремнии

Под примесях в полупроводниковых химических соединениях понимают включения атомов посторонних элементов, избыточные по стехиометрическому составу атомы тех самых элементов, которые входят в химическую формулу самого соединения,

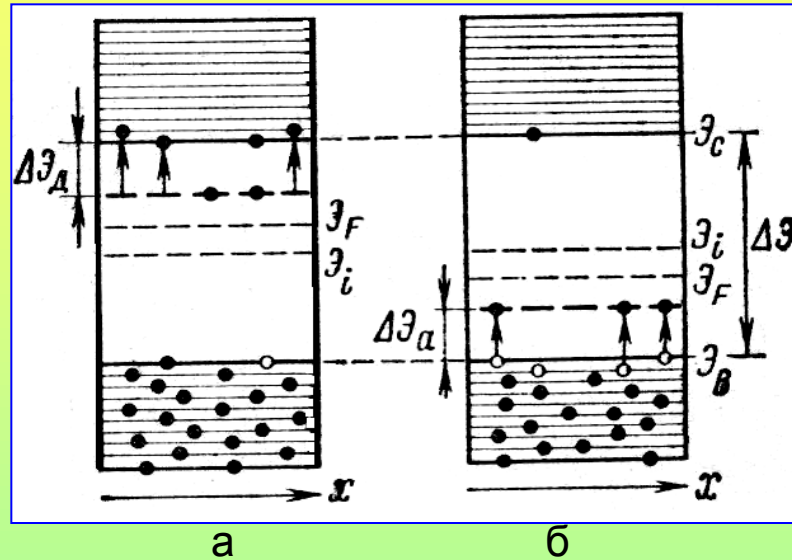
всевозможные дефекты кристаллической решётки: пустые узлы, атомы или ионы, оказавшиеся в междоузлиях решётки, дислокации или сдвиги, возникающие при пластической деформации.



# ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Как правило, примеси создают **дополнительные уровни** в запрещенной зоне полупроводника.

**Примесные уровни**, заполненные электронами при отсутствии внешних энергетических воздействий, расположены в запрещенной зоне вблизи нижнего края зоны проводимости (а).



Энергетическая диаграмма полупроводника легированного донорной примесью (а) и акцепторной примесью (б)

При внешнем возбуждении электроны с примесных уровней могут легко переходить в свободную зону и участвовать в процессе электропроводности.

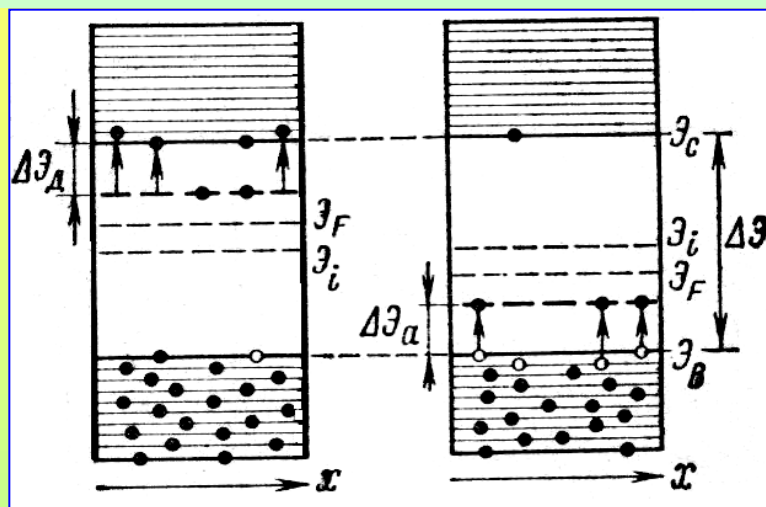
Примеси, поставляющие электроны в зону проводимости полупроводника, называют **донорами**. Материалы, в которых концентрация электронов превышает концентрацию дырок, получили название полупроводников **n-типа**.



# ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

В противоположном случае примесь может внести незаполненные уровни, располагающиеся в запрещенной зоне вблизи от верхнего края («потолка») валентной зоны (б).

Благодаря тепловому возбуждению электроны из валентной зоны полупроводника забрасываются на эти **свободные примесные уровни**.



а б  
Энергетическая диаграмма полупроводника легированного донорной примесью (а) и акцепторной примесью (б)

Полупроводник с такой примесью имеет концентрацию дырок большую, чем концентрация электронов, перешедших из валентной зоны в зону проводимости, и его называют полупроводником **р-типа**.

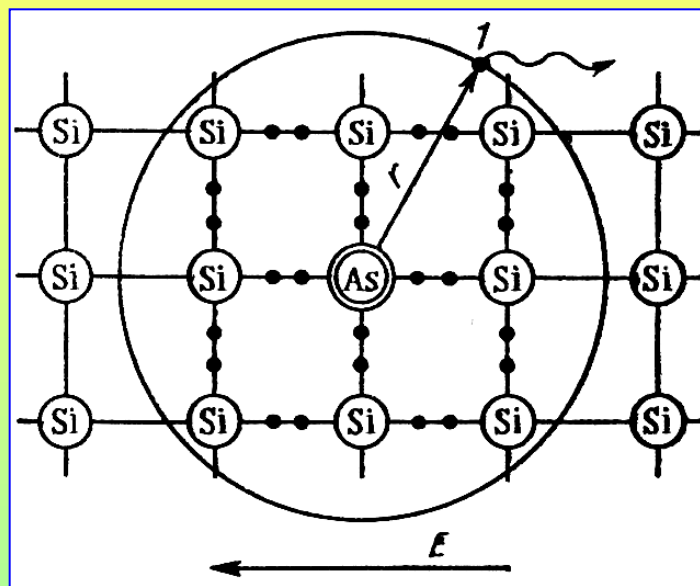
Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, — **акцепторами**. Так, в полупроводнике n-типа электроны являются основными носителями, а дырки — неосновными. В полупроводнике р-типа основными носителями являются дырки, а неосновными — электроны.



# ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

На свойства полупроводников оказывают влияние не только примеси, но и другие дефекты – вакансии, дислокации.

Но управлять электропроводностью полупроводников, используя эти дефекты, невозможно.



Кремний, легированный донорной примесью, мышьяком

Поэтому в производстве стремятся получить полупроводниковые материалы с минимально возможным содержанием дефектов кристаллической структуры, а затем производят легирование.

Примеси, не оказывающие влияние на электропроводность полупроводников, называют нейтральными.





# ПРИМЕСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Пер. \ Гр.	III	IV	V	VI	VII
2	<b>B</b> 5	<b>C</b> 6			
3	<b>Al</b> 13	<b>Si</b> 14	<b>P</b> 15	<b>S</b> 16	
4	<b>Ga</b> 31	<b>Ge</b> 32	<b>As</b> 33	<b>Se</b> 34	
5	<b>In</b> 49	<b>Sn</b> 50	<b>Sb</b> 51	<b>Te</b> 52	<b>I</b> 53
6			<b>Pb</b> 83		

The diagram illustrates the periodic table with elements highlighted in red and blue. Blue arrows point to Silicon (Si) from Boron (B), Aluminum (Al), Carbon (C), and Phosphorus (P). Magenta arrows point to Germanium (Ge) from Gallium (Ga), Tin (Sn), Arsenic (As), and Lead (Pb). The elements are arranged in groups III through VII and periods 2 through 6.

# Контрольные вопросы

1. Какая основная особенность полупроводников?

2. Зависит ли проводимость полупроводников от температуры?

3. На какие группы делятся полупроводники по чистоте?

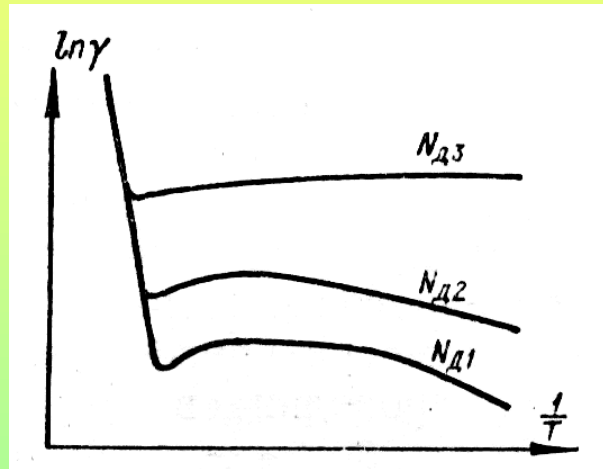


## 9.2. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

### Влияние температуры на электропроводность полупроводников

Отличительной особенностью полупроводников является рост их проводимости с температурой. При изменении температуры подвижность носителей изменяется сравнительно слабо, а концентрация очень сильно.

В процессе дальнейшего нагревания при некоторой температуре все электроны с примесных уровней оказываются переброшенными в зону проводимости.



Температурная зависимость удельной проводимости

При этом вероятность ионизации собственных атомов проводника еще мала. Этот участок температурной зависимости называется областью истощения примесей.

При относительно высоких температурах доминирующую роль начинают играть переброшены электроны через запрещенную зону, т. е. происходит переход в область собственной электропроводности, где концентрация электронов равна концентрации дырок.



# ТЕРМИСТОРЫ

Полупроводниковые материалы, сопротивление которых резко изменяется с **температурой**, используются для изготовления термочувствительных полупроводниковых резисторов, называемых **термисторами**.

Резкая зависимость сопротивления от температуры наблюдается у ряда оксидов и их смесей ( $\text{CuO-Mn}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$ - $\text{Mn}_3\text{O}_4$  и др.), сульфидов, нитридов и карбидов металлов.



Термисторы

Для терморезистора характерны большой температурный коэффициент сопротивления, простота устройства, способность работать в различных климатических условиях при значительных механических нагрузках, стабильность характеристик во времени.

Терморезистор изготавливают в виде стержней, трубок, дисков, шайб, бусинок и тонких пластинок преимущественно методами порошковой металлургии. Их размеры могут варьироваться в пределах от 1–10 мкм до 1–2 см. Применяют: для измерения температуры; в управляющих реле (регулирование тока) – пожарная сигнализация



# ТЕРМИСТОРЫ



Извещатели пожарные тепловые ИП103-5/2-А1(НЗ) предназначены для работы в закрытых помещениях наземных стационарных объектов с целью выдачи информации о пожаре при достижении температуры окружающего воздуха  $70^{\circ}\text{C} \pm 5\%$  путем размыкания контактов теплового реле.



# ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Электропроводность полупроводников изменяется при **деформации** вследствие увеличения или уменьшения (растяжение, сжатие) межатомных расстояний, приводящих к изменению концентрации и подвижности носителей.

У разных полупроводников одна и та же деформация может вызвать как увеличение, так и уменьшение удельной проводимости.



Тензодатчики

Свойство полупроводников изменять свое сопротивление под действием деформации используют при изготовлении из них измерителей давления – **тензодатчиков**.

В настоящее время используются тензодатчики на основе порошковых композиций (угольных, из прессованного порошка PbS) и однородных монокристаллов (Si, Ge, GaSb и др.)



# ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ

Тензометрический датчик (тензодатчик) преобразует величину деформации в удобный электрический сигнал.

В современном виде тензометрический измерительный преобразователь конструктивно представляет собой тензорезистор, чувствительный элемент которого выполнен из тензочувствительного материала (проволоки, фольги и др.),

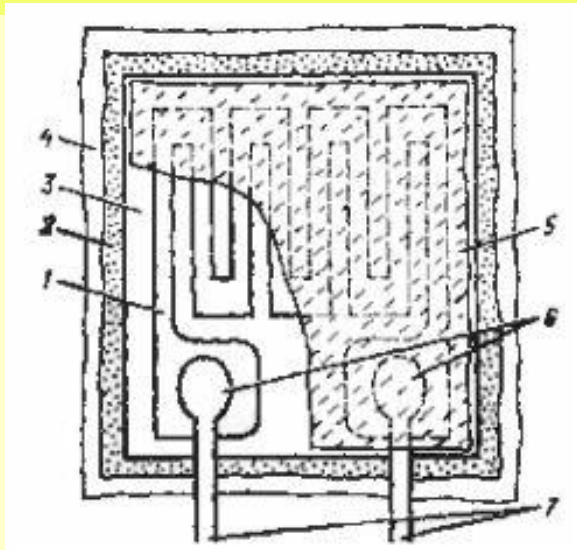


Схема тензопреобразователя: 1- чувствительный элемент; 2- связующее; 3- подложка; 4- исследуемая деталь; 5- защитный элемент; 6- узел пайки (сварки); 7- выводные проводники

закрепленный с помощью связующего (клея, цемента) на исследуемой детали. Для присоединения чувствительного элемента в электрическую цепь в тензорезисторе имеются выводные проводники.

Некоторые конструкции тензорезисторов для удобства установки имеют подложку, расположенную между чувствительным элементом и исследуемой деталью, а также защитный элемент, расположенный поверх чувствительного элемента.



# ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Фотопроводимостью** называют увеличение электрической проводимости вещества под действием электромагнитного излучения.

Изменение электрических свойств полупроводников под влиянием электромагнитного излучения носит временный характер. После прекращения облучения проводимость более или менее быстро возвращается к тому значению, которое она имела до облучения.



Фоторезистор



Солнечные батареи

У одних полупроводников это длится микросекунды, у других измеряется минутами или часами. Это свойство полупроводников используют при создании **фоторезисторов** – приборов, чувствительных не только к видимому участку спектра, но и к инфракрасному излучению.

В качестве материалов технических фоторезисторов применяются GaS, PbS,  $Sb_2S_3$ , CdSe. Применение фоторезисторов: в устройствах автоматики и телемеханики; регулирование освещённости улиц; сортировка продукции на производстве по цвету или по размерам.





# ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ



Извещатель пожарный пламени «Спектрон-201Н». Принцип действия извещателя заключается в фиксации датчиком ультрафиолетового излучения с длиной волны от 185 до 260 нм. Этот интервал соответствует спектру, которое излучает открытое пламя.



Инфракрасные светодиоды излучают свет в инфракрасном диапазоне. Области применения инфракрасных светодиодов это оптические контрольно-измерительные приборы, устройства дистанционного управления, оптронные коммутационные устройства, беспроводные линии связи.



Светодиод излучает свет при пропускании через него электрического тока. Светодиоды применяются в устройствах индикации приборов, в электронных компонентах (оптронах), сотовых телефонах для подсветки дисплея и клавиатуры, мощные светодиоды используют как источник света в фонарях и т.д. Светодиоды бывают разного цвета свечения, RGB и т.д.



Фотодиод преобразует свет попавший на его фоточувствительную область, в электрический ток, находит применение в преобразовании света в электрический сигнал.





**Фотоэлектрические датчики установлены в метрополитене на турникетах**



# ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

**Датчики движения** и **датчики присутствия** реагируют на появление или исчезновения инфракрасного света на фотоэлементе.

Важным способом экономии электроэнергии является установка на освещение датчиков движения, которые реагируют на движение и включают систему освещения только тогда, когда кто-то находится в помещении.

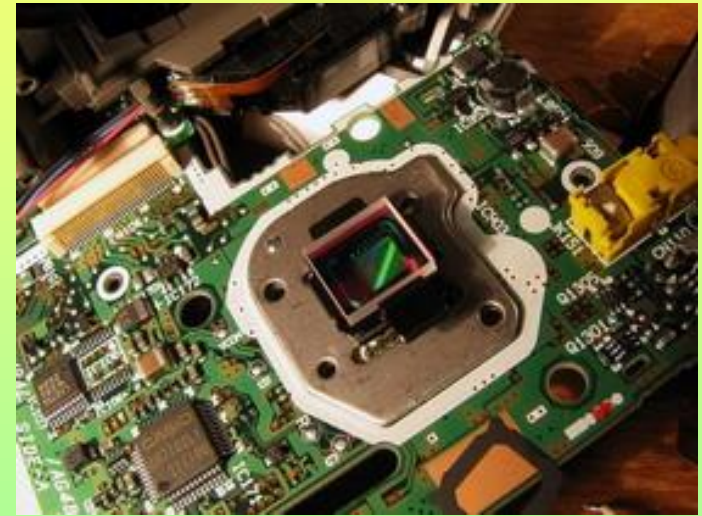


# ДАТЧИКИ В АВТОМОБИЛЯХ



Датчик температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя – **термистор** (изготавливается из окиси никеля или окиси кобальта).

Основная часть видеорегистратора - цифро-аналоговая интегральная микросхема, состоящая из светочувствительных элементов — фотодиодов.



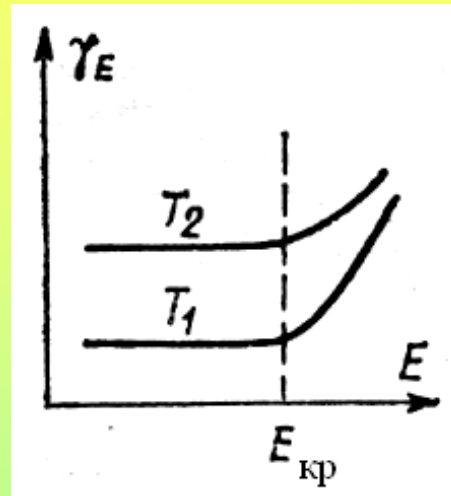
Датчики давления и температуры в шинах автомобиля



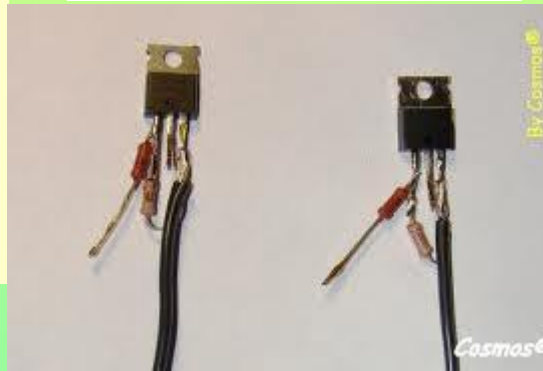
# ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

При отсутствии внешнего электрического поля равновесные носители заряда движутся хаотично в разных направлениях.

Если приложить внешнее электрическое поле с напряженностью  $E$ , то на хаотическое тепловое движение носителей заряда накладывается направленное движение, т.е. в полупроводнике возникает электрический ток.



Если проводимость  $\gamma$  постоянна, то с возрастанием напряженности поля плотность тока будет линейно возрастать, но лишь до тех пор, пока напряженность поля не превысит критического значения  $E_{кр}$ . При дальнейшем увеличении напряженности проводимость полупроводника начинает возрастать.



Ближний и дальний свет через полевые транзисторы. Принцип работы этого типа полевого транзистора основан на влиянии внешнего электрического поля на проводимость прибора.



# ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Важной характеристикой полупроводников является **время жизни носителей электрического тока.**

В полупроводнике одновременно с процессом возникновения свободных электронов и дырок идёт обратный процесс **рекомбинации**: электроны из зоны проводимости вновь возвращаются в валентную зону, ликвидируя дырки. Электрический ток.



Среднее время, в течении которого живёт носитель до своей рекомбинации, называется **временем жизни.**

Расстояние, которое успеет пройти за это время носитель, называется **диффузионной длиной.**

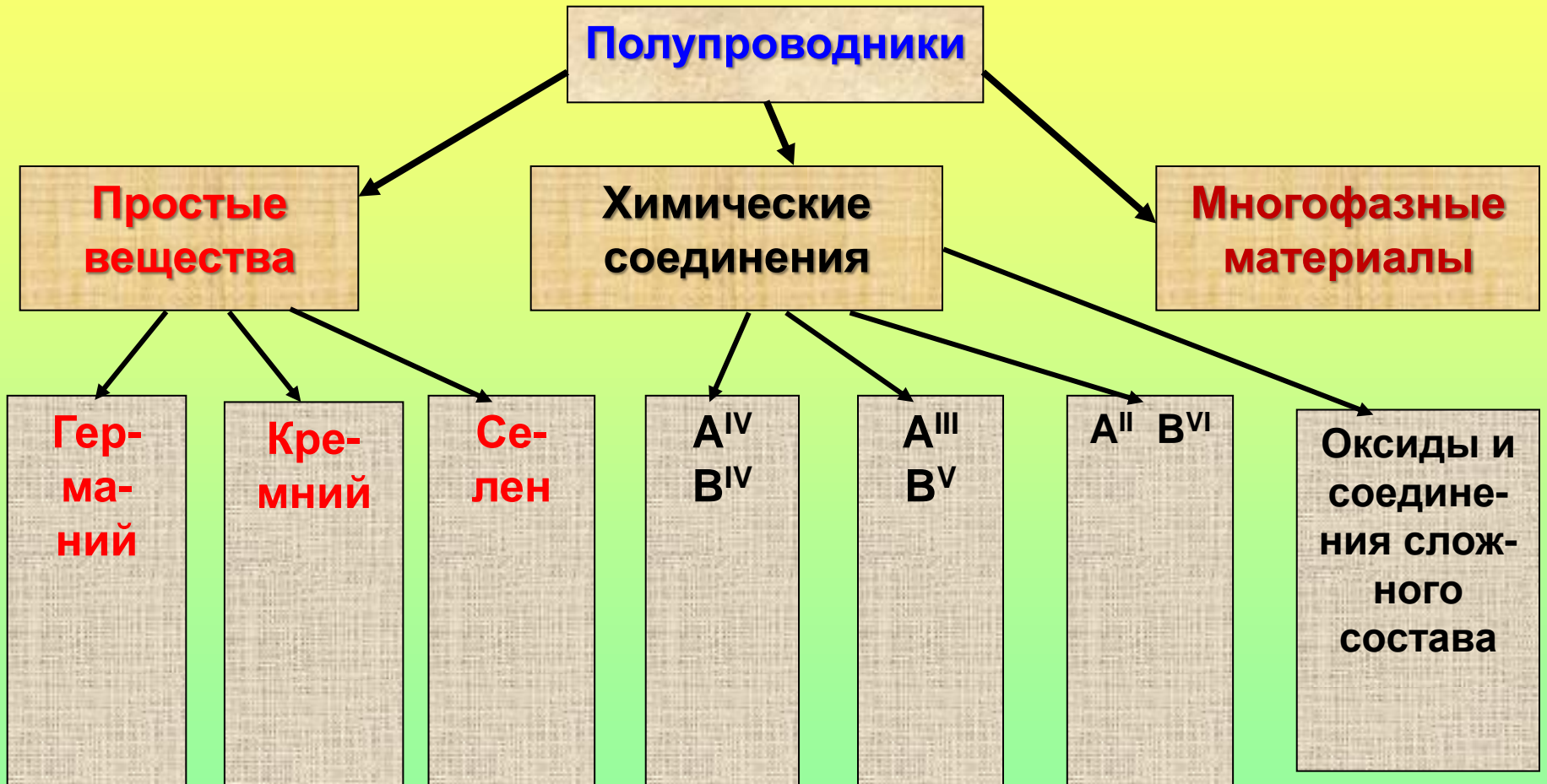


# Контрольные вопросы

1. Какая основная особенность полупроводников?
2. Зависит ли проводимость полупроводников от температуры?
3. На какие группы делятся полупроводники по чистоте?



# 9.3. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ





# Контрольные вопросы

1. Назовите простые полупроводниковые материалы.

2. К какой группе полупроводниковых материалов относятся соединения  $\text{ZnS}$ ,  $\text{CdS}$ ,  $\text{ZnSe}$ ,  $\text{ZnTe}$ ?



# 9.4. ПРОСТЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводниковые свойства проявляют 13 химических элементов.

В периодической системе Менделеева они распределены следующим образом:

III – бор;

IV – углерод, **германий**, олово, **кремний**;

V – фосфор, мышьяк, сурьма, висмут;

VI – сера, селен, теллур;

VII – йод.



Германий имеет кристаллическую решетку типа алмаза. При комнатной температуре германий химически устойчив, при нагревании выше  $650^{\circ}\text{C}$  он окисляется, образуя пленку  $\text{GeO}_2$ , температура плавления  $937^{\circ}\text{C}$ .

Для изготовления полупроводниковых приборов применяют германий с определенными добавками электрически активных примесей. В качестве доноров и акцепторов наиболее часто используют элементы V (ванадий, сурьма) и III (галлий, индий) групп.



# ГЕРМАНИЙ

**Германий** применяется для изготовления транзисторов, диодов различных типов, тензодатчиков, датчиков ЭДС Холла, фототранзисторов, фотодиодов, оптических линз, модуляторов волн и счетчиков ядерных частиц.

Германий маркируется буквами и цифрами. Буквы обозначают тип проводимости и название легирующего элемента; цифры записываются в виде дроби: числитель выражает удельное сопротивление в Ом·см, знаменатель – диффузионную длину пробега носителей в мм.



Датчик Холла

Например, **ГЭС 10/1,0** – германий с электронным типом проводимости, легированный сурьмой, имеет  $\rho=10$  Ом·см;  $L=1,0$  мм; **ГДГ 1,0/0,6** – германий дырочный, легированный галлием, имеет  $\rho = 1,0$  Ом·см;  $L=0,6$  мм.

Основным сырьем для получения германия являются продукты сгорания бурого угля (в 1 тонне – 100 г германия).



# КРЕМНИЙ

**Кремний** - один из наиболее распространенных элементов земной коры (в земной коре около 50% кремнезёма). По сравнению с германием, кремний характеризуется меньшим периодом решетки, большей энергией связи и, как следствие этого, более широкой запрещенной зоной, температура плавления 1414°C.

Кремний, как и германий, относится ковалентным кристаллам IV группы таблицы Менделеева и имеет кристаллическую решетку типа алмаза, температура плавления 1414°C.



Интегральная микросхема

Дырочная проводимость достигается введением акцепторов элементов III группы (алюминий, бор), электронная проводимость – введением доноров (мышьяка, сурьмы, фосфора).

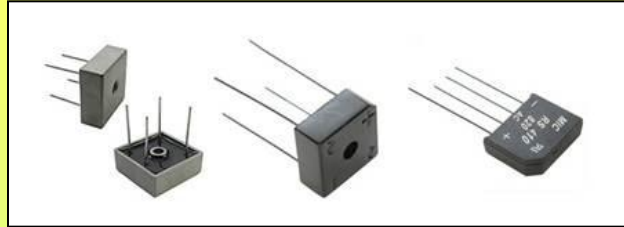
Кремниевые полупроводниковые приборы имеют более высокую рабочую температуру.



# КРЕМНИЙ

Кремний маркируется аналогично германию сочетанием букв и цифр.

Например, **КЭ15/0,5** – чистый кремний с электронной проводимостью; **КДБ 7,5/0,5** – кремний дырочный, легированный бором; **КЭФ 7,5/0,5** – кремний с электронной проводимостью, легированный фосфором.



Диоды

Кремний применяют:

- 1) для изготовления диодов,
- 2) мощных выпрямителей,
- 3) триодов,
- 4) солнечных батарей,
- 5) тензометров,
- 6) интегральных полупроводниковых схем и др.

Кремний является базовым материалом при изготовлении планарных транзисторов и интегральных микросхем. Полупроводниковые интегральные микросхемы, отличающиеся очень малыми размерами и сложной конфигурацией активных областей, нашли широкое применение в приемно–усилительной аппаратуре и вычислительной технике.



# СВОЙСТВА ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

Свойства	Германий	Кремний
Температура плавления, °С	937	1414
Собственное удельное сопротивление при 20°С, Ом·м	0,47	2000
Собственная концентрация основных носителей, м <sup>-3</sup>	$2,5 \cdot 10^{19}$	$10^{16}$
Ширина запрещенной зоны при 20°С, эВ	0,72	1,12
Подвижность электронов, м <sup>2</sup> /(В·с)	0,39	0,14
Подвижность дырок, м <sup>2</sup> /(В·с)	0,19	0,05
Диэлектрическая проницаемость	16	12,5
Рабочая температура, °С	80-100	130-200



# Контрольные вопросы

1. Назовите области применения германия.

2. Назовите области применения кремния.



# **Задания для самостоятельной работы**

- 1. Ознакомиться с основными особенностями полупроводниковых материалов.**
- 2. Ознакомиться с датчиками температуры.**
- 3. Ознакомиться с датчиками деформации и их применением в технике.**
- 4. Сравнить свойства германия и кремния и выявить их достоинства и недостатки.**







# Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лалазарова Наталиа Алексеевна

E-mail: [lalaz1991@mail.ru](mailto:lalaz1991@mail.ru)

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М  
Tel.(8-057 )707-37-92