

Строение и основные свойства полупроводников

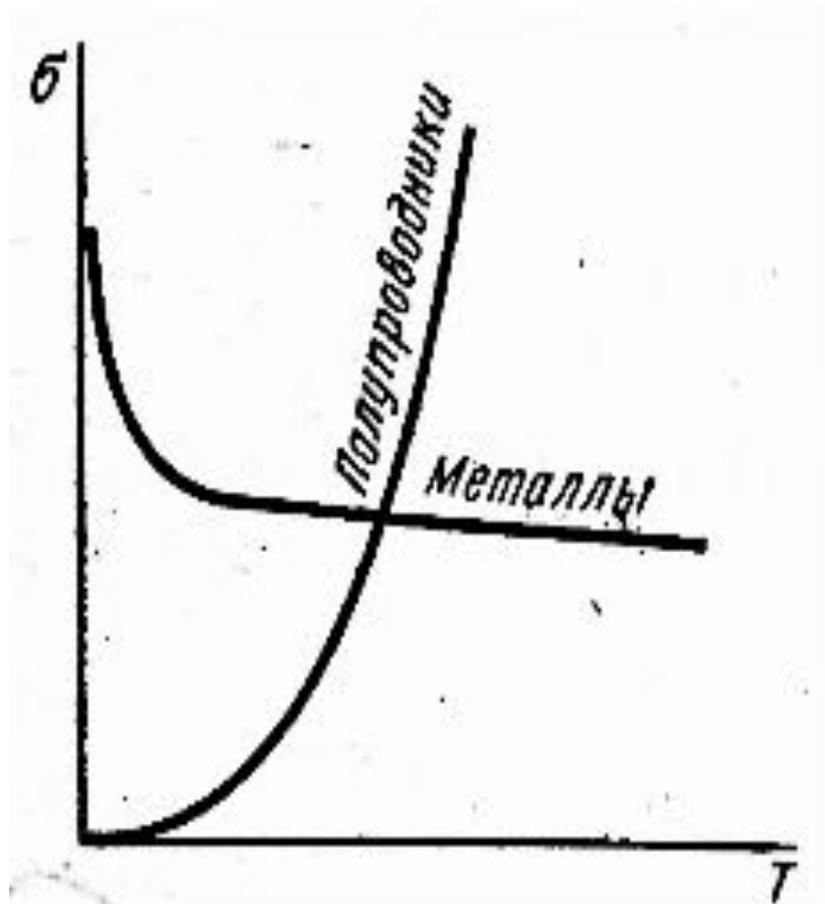
Полупроводники занимают промежуточную область между проводниками и диэлектриками.

К полупроводникам относится большинство веществ, имеющих в природе: это - минералы, различные окислы и сульфиды, Элементы - кремний, германий и др. Электрическая проводимость полупроводников колеблется в широком интервале:

$$\sigma = 10^{-10} - 10^{-12} \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$$

Температурная зависимость проводимости

- От металлов полупроводники, прежде всего, отличаются не величиной, а характером зависимости удельной электрической проводимости от температуры: у металлов она слабо уменьшается, а у полупроводников она сильно увеличивается при нагревании кристалла.



- *Полупроводники* — материалы, у которых зоны не перекрываются и расстояние между ними (ширина запрещенной зоны) лежит в интервале 0,1–3 эВ (для того, чтобы перевести электрон из валентной зоны в зону проводимости требуется энергия меньшая, чем для диэлектрика, поэтому чистые полупроводники слабо пропускают ток).

Особенности полупроводников

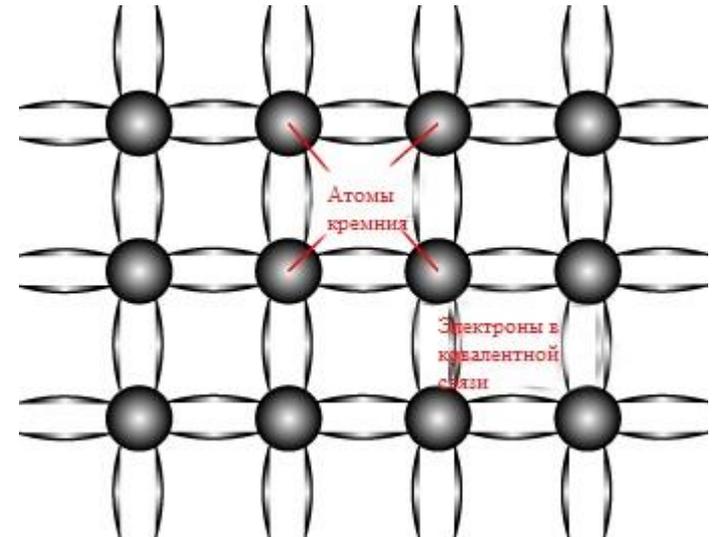
- Наиболее существенной особенностью полупроводников является их способность изменять свои свойства в чрезвычайно широких пределах под влияние различных воздействий (температура, освещение, электрическое и магнитное поля, внешнее гидростатическое давление и т.д.). Под их действием характеристики полупроводников, например, электропроводность могут изменяться в $10^6 - 10^7$ раз. Такой чувствительностью не обладают ни металлы, ни диэлектрики. Столь большая чувствительность и обусловила широкое применение полупроводников в технике.
- Чувствительность к температуре лежит в основе действия таких приборов, как *термисторы*.
- На большой чувствительности к свету основано действие полупроводниковых *фотоприемников*.
- Чувствительность к слабым сигналам электрического напряжения позволила создать различные полупроводниковые *диоды и триоды*.
- Чувствительность к магнитному полю используют при создании полупроводниковых *приборов для измерения* весьма слабых величин напряженности магнитного поля и т.д.
- Свойства полупроводников определяются особенностями их зонного строения. Как и у диэлектриков, зона валентных электронов и электронов проводимости у них разделены запрещенной зоной, ширина которой от 0,1 до 3 эВ. **Электропроводность** определяется свободными электронами (-) и дырками (+), которые образуются при переходе валентных электронов в зону проводимости или ионизации примесей. В зависимости от степени чистоты полупроводники бывают *собственными* и *примесными*.

Строение полупроводника

- Полупроводниками называют элементы четвертой группы, соединения 3-ей и 5-ой, 2-ой и 6-ой групп периодической таблицы.
- Самым широко используемым полупроводниковым элементом является **кремний**, так как на его основе чаще всего изготавливают интегральные схемы.
- Технология производства и обработки кремния сегодня находится на очень высоком уровне.
- Большинство солнечных элементов так же изготовлены на основе кремния.

Ковалентные связи в кристаллической решетке кремния.

Полупроводники состоят из отдельных атомов, объединенных друг с другом в кристаллическую упорядоченную структуру, в которой каждый из атомов имеет восемь электронов.



Вещества с полупроводниковыми свойствами

- На фрагменте периодической таблицы элементы, образующие наиболее распространенные полупроводниковые материалы, выделены синим. Полупроводниками могут быть или отдельные элементы, например, кремний или германий, соединения, например, GaAs, InP и CdTe, или сплавы, как, например, $\text{Si}_x\text{Ge}_{(1-x)}$ и $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$ где x - это доля элемента, изменяющаяся от 0 до 1.

							VIIIA
							² He 4.003
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
		⁵ B 10.811	⁶ C 12.011	⁷ N 14.007	⁸ O 15.999	⁹ F 18.998	¹⁰ Ne 20.183
		¹³ Al 26.982	¹⁴ Si 28.086	¹⁵ P 30.974	¹⁶ S 32.064	¹⁷ Cl 35.453	¹⁸ Ar 39.948
IB	IIB						
²⁹ Cu 63.54	³⁰ Zn 65.37	³¹ Ga 69.72	³² Ge 72.59	³³ As 74.922	³⁴ Se 78.96	³⁵ Br 79.909	³⁶ Kr 83.80
⁴⁷ Ag 107.870	⁴⁸ Cd 112.40	⁴⁹ In 114.82	⁵⁰ Sn 118.69	⁵¹ Sb 121.75	⁵² Te 127.60	⁵³ I 126.904	⁵⁴ Xe 131.30
⁷⁹ Au 196.967	⁸⁰ Hg 200.59	⁸¹ Tl 204.37	⁸² Pb 207.19	⁸³ Bi 208.980	⁸⁴ Po (210)	⁸⁵ At (210)	⁸⁶ Rn (222)

Главное свойство полупроводников

Ковалентная связь между атомами является причиной того, что электроны существуют в кристалле в двух состояниях: ***связанном либо свободном.***

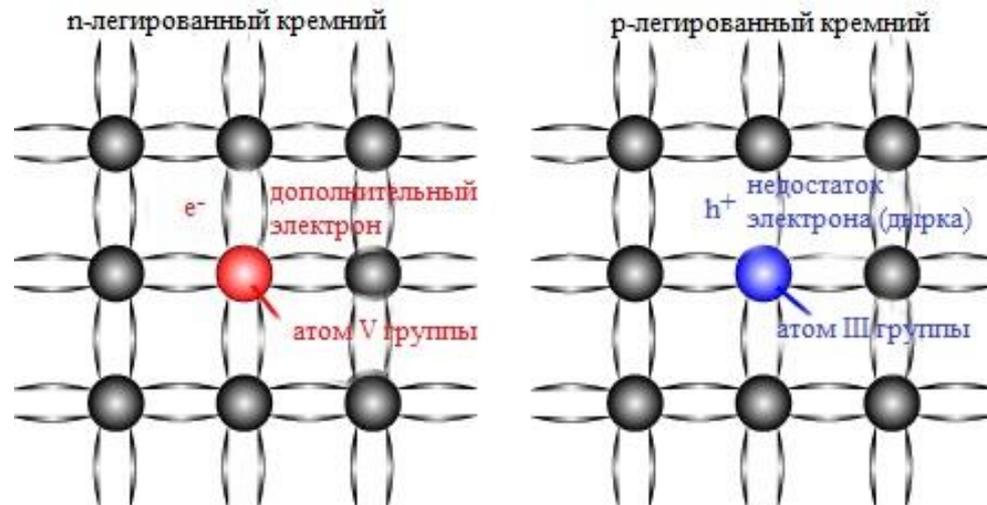
В связанном состоянии энергия электрона минимальна. Однако, если электрон получит достаточно энергии, чтобы разорвать связь, он станет свободным. Электрон может находиться либо в состоянии с более низкой энергией, образуя связь, либо получить определенное минимальное количество энергии, чтобы разорвать связь и стать свободным. Эта минимальная энергия называется ***энергией запрещенной зоны полупроводника.***

Количество и энергия свободных электронов - основа микроэлектроники.

Место, оставленное электроном, позволяет оборванной ковалентной связи перемещаться от одного электрона к другому. Это движение можно представить, как движение положительного заряда по решетке. Само пустое место обычно называют ***дыркой.*** Дырка - такой же носитель, как и электрон, только с положительным зарядом.

Легирование

- Нелегированный (собственный) кремний редко используется в электронной промышленности. Почти всегда при изготовлении приборов кремний легируется примесями.
- Баланс электронов и дырок в кристалле кремния можно нарушить с помощью его легирования другими атомами. Атомы, у которых на один валентный электрон больше, чем у кремния, используются для получения полупроводника "n-типа". Эти атомы добавляют электроны в зону проводимости, увеличивая общее число электронов. Легирование атомами, у которых на один валентных электрон меньше, приводит к материалу "р-типа". В полупроводниках "р-типа" количество электронов, образовавших связи больше, что увеличивает количество дырок. В легированных материалах одних носителей всегда больше, чем других. Носители с более высокой концентрацией называются "основными носителями", в то время как носители с более низкой концентрацией - "неосновными". Структура кристаллической решетки кремния легированного примесями для получения материала р- и n-типа.

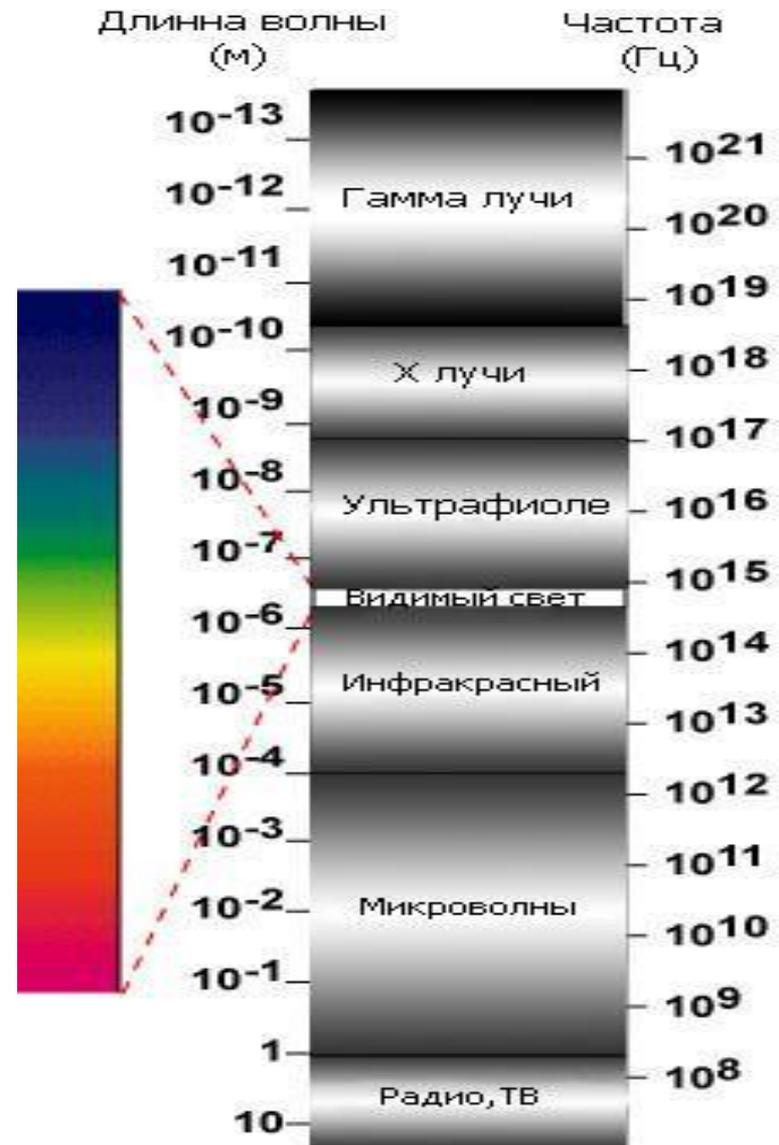


Свойства полупроводников p- и n-типа проводимости

	P-тип	N-тип
Легирующая примесь	Группа III (например, Бор)	Группа V (например, Фосфор)
Связи	Недостающие электроны (дырки)	Избыточные электроны
Основные носители	Дырки	Электроны
Неосновные носители	Электроны	Дырки

Спектр электромагнитных излучений

- Солнечный свет - это вид электромагнитного излучения, и свет, который видит наш глаз, является лишь небольшой частью всего электромагнитного спектра



Энергия фотона

Размерность в электронвольтах

Если энергию фотона записать в электронвольтах (эВ), (1 эВ равен энергии необходимой одному электрону для преодоления поля, создаваемого разностью потенциалов 1 Вольт, $1 \text{ эВ} = 1.602 \times 10^{-19}$ Дж), а длину волны в микрометрах (μm), то предыдущее уравнение можно представить, как

$$E = \frac{1.24}{\lambda(\mu\text{m})}$$

Можно воспользоваться калькулятором для нахождения соответствующей энергии фотона в любой части электромагнитного спектра.

Введите длину волны, $\lambda = 0,6 \text{ мм}$
Энергия фотона, $E = 2,0667 \text{ эВ}$

Взаимодействие света с полупроводником

- Фотоны, падающие на полупроводник, могут:
 - отразиться от его поверхности,
 - поглотиться в нем,
 - будучи ни поглощенным ни отраженным, пройти через него.
- Для фотоэлектричества отраженные и пропущенные фотоны являются потерянными, так как они не участвуют в производстве энергии.
- Когда фотон поглощается, он переводит электрон из валентной зоны в зону проводимости.
- Определяющим фактором того, будет ли поглощен фотон, является его энергия. Фотоны, падающие на полупроводник, можно разделить на три группы в зависимости от их энергии:
 1. $E_{ph} < E_G$. Фотоны с энергией E_{ph} меньше, чем ширина запрещенной зоны E_G , слабо взаимодействуют с полупроводником, проходят через него, как будто он является прозрачным.
 2. Фотоны с $E_{ph} = E_G$ имеют как раз достаточно энергии, чтобы создать электронно-дырочную пару, поэтому они хорошо поглощаются.
 3. $E_{ph} > E_G$. Фотоны с энергией больше ширины запрещенной зоны сильно поглощаются.

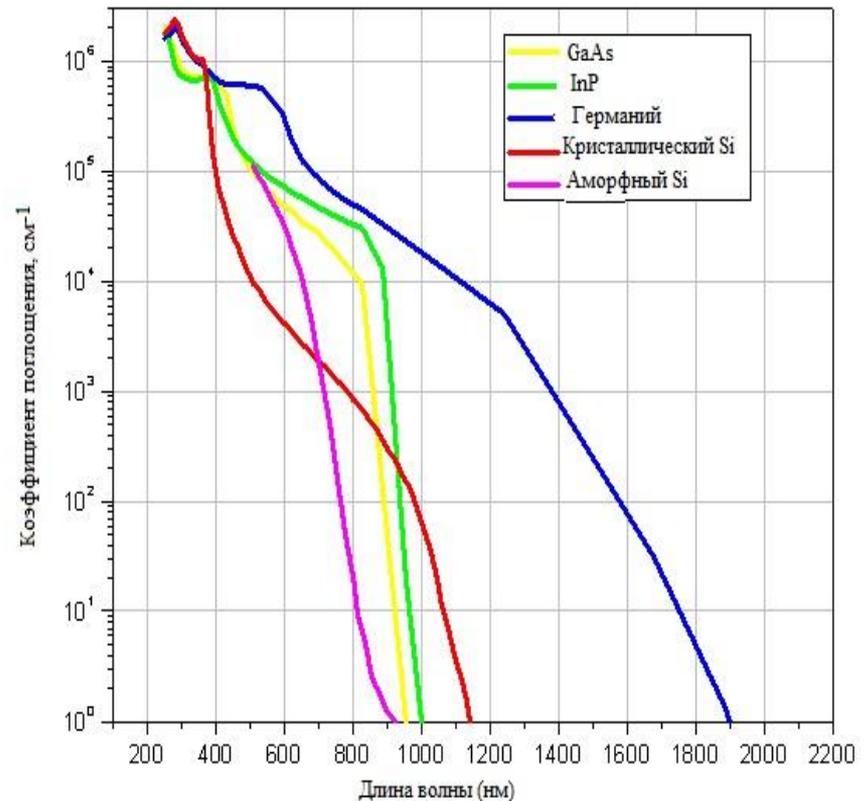
Поглощение света полупроводником

- В результате поглощения фотона образуются и основные и неосновные носители.
- Во многих фотоэлектрических приборах число носителей, сгенерированных светом, на несколько порядков меньше числа основных носителей, присутствующих в полупроводнике после легирования. Поэтому концентрацию основных носителей под действием света можно считать неизменной.
- Однако, для неосновных носителей верно обратное. Число неосновных носителей, сгенерированных светом, на много превышает равновесное число неосновных носителей, и поэтому при освещении общее число неосновных носителей можно принять за число неосновных носителей, сгенерированных светом.

Коэффициент поглощения света

- **Коэффициент поглощения** - величина обратная глубине проникновения в материал света определенной длины волны до того, как он будет поглощен.
- В материалах с низким коэффициентом поглощения свет поглощается плохо и, если материал сделать достаточно тонким, он окажется прозрачным для данной длины волны.
- Коэффициент поглощения зависит не только от самого материала, но и от длины волны излучения.
- Вероятность поглощения фотона зависит от вероятности взаимодействия фотона и электрона, при котором электрон переходит на более высокий энергетический уровень.
- При увеличении энергии фотона, с ним может взаимодействовать гораздо большее количество электронов, в следствии чего он поглощается.

Зависимость коэффициента поглощения, α , в различных полупроводниках при 300К как функция длины волны света

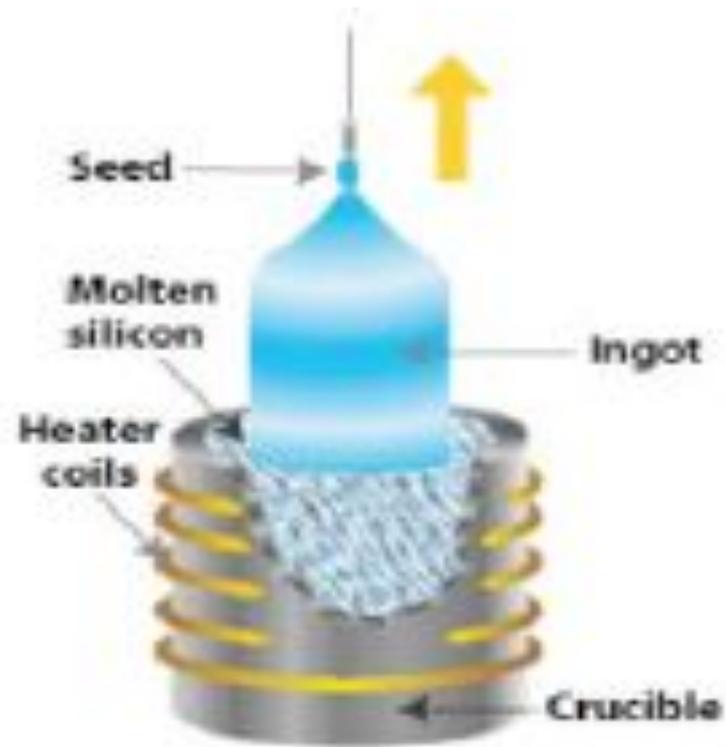


Метод Чохральского

- На рисунке показан процесс получения монокристаллического кремниевого слитка по методу Чохральского.

- Затравка (монокристалл кремния) приводится в соприкосновение с поверхностью расплава легированного примесью бора (p-тип) кремния.

- При выращивании слитков монокристаллического кремния необходимо очень тщательно контролировать температуру и скорость извлечения кристалла из расплава. Цилиндрическая форма слитка достигается за счет вращения. Процесс роста проходит в течении нескольких часов. В результате можно получить практически идеальный монокристаллический слиток диаметром до 300 мм и 2 метра длиной.



Source: EERE