

# **Строение и основные свойства полупроводников**

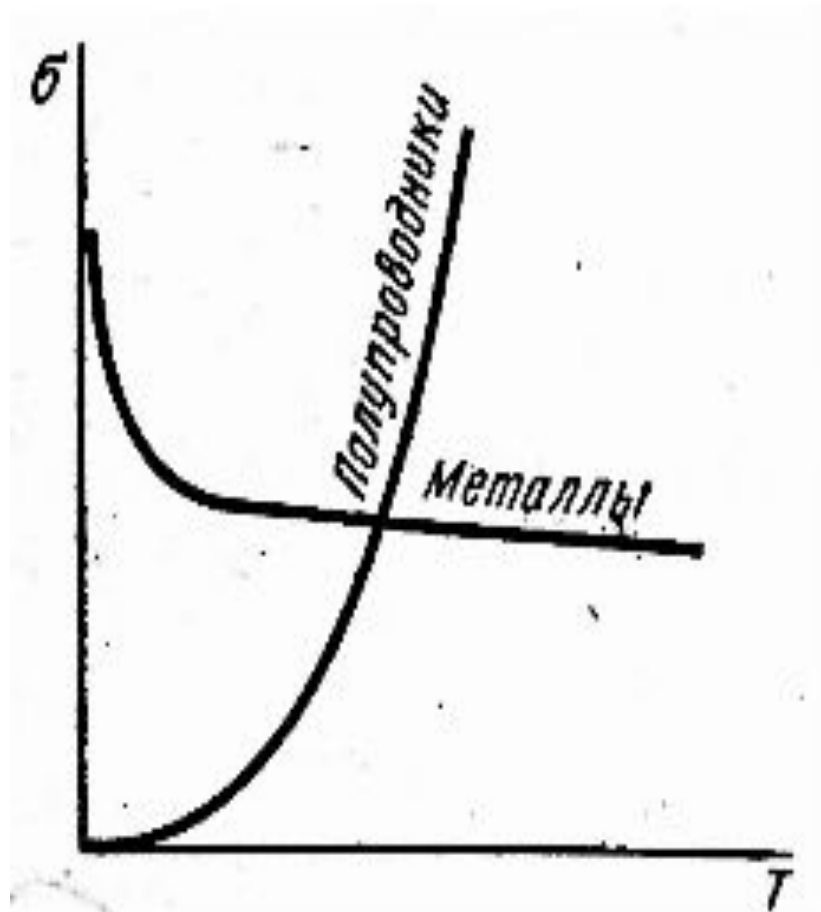
Полупроводники занимают промежуточную область между проводниками и диэлектриками.

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

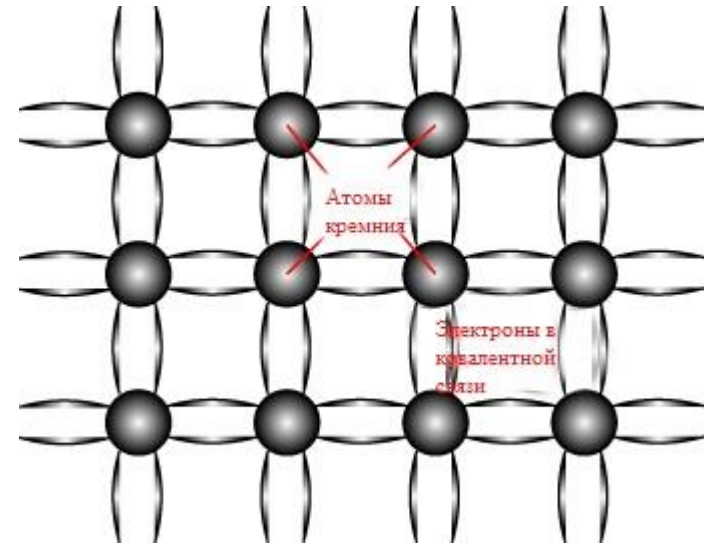
- Наиболее существенной особенностью полупроводников является их способность изменять свои свойства в чрезвычайно широких пределах под влияние различных воздействий (температура, освещение, электрическое и магнитное поля, внешнее гидростатическое давление и т.д.). Под их действием характеристики полупроводников, 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
							<sup>2</sup> He 4.003
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	
		<sup>5</sup> B 10.811	<sup>6</sup> C 12.011	<sup>7</sup> N 14.007	<sup>8</sup> O 15.999	<sup>9</sup> F 18.998	<sup>10</sup> Ne 20.183
		<sup>13</sup> Al 26.982	<sup>14</sup> Si 28.086	<sup>15</sup> P 30.974	<sup>16</sup> S 32.064	<sup>17</sup> Cl 35.453	<sup>18</sup> Ar 39.948
IB	IIB						
<sup>29</sup> Cu 63.54	<sup>30</sup> Zn 65.37	<sup>31</sup> Ga 69.72	<sup>32</sup> Ge 72.59	<sup>33</sup> As 74.922	<sup>34</sup> Se 78.96	<sup>35</sup> Br 79.909	<sup>36</sup> Kr 83.80
<sup>47</sup> Ag 107.870	<sup>48</sup> Cd 112.40	<sup>49</sup> In 114.82	<sup>50</sup> Sn 118.69	<sup>51</sup> Sb 121.75	<sup>52</sup> Te 127.60	<sup>53</sup> I 126.904	<sup>54</sup> Xe 131.30
<sup>79</sup> Au 196.967	<sup>80</sup> Hg 200.59	<sup>81</sup> Tl 204.37	<sup>82</sup> Pb 207.19	<sup>83</sup> Bi 208.980	<sup>84</sup> Po (210)	<sup>85</sup> At (210)	<sup>86</sup> 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.***

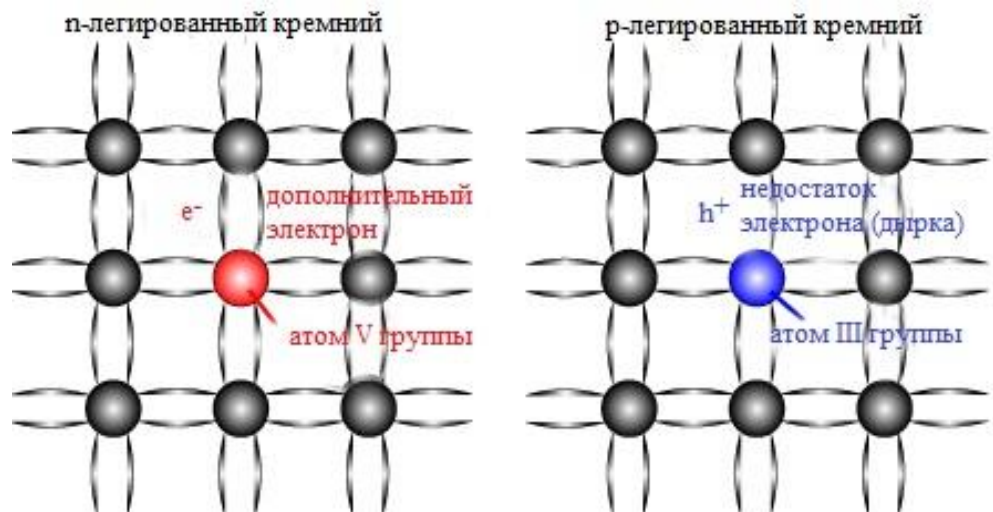
Количество и энергия свободных электронов - основа микроэлектроники.

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 "p-типа". В полупроводниках "p-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 p- и n-типа.

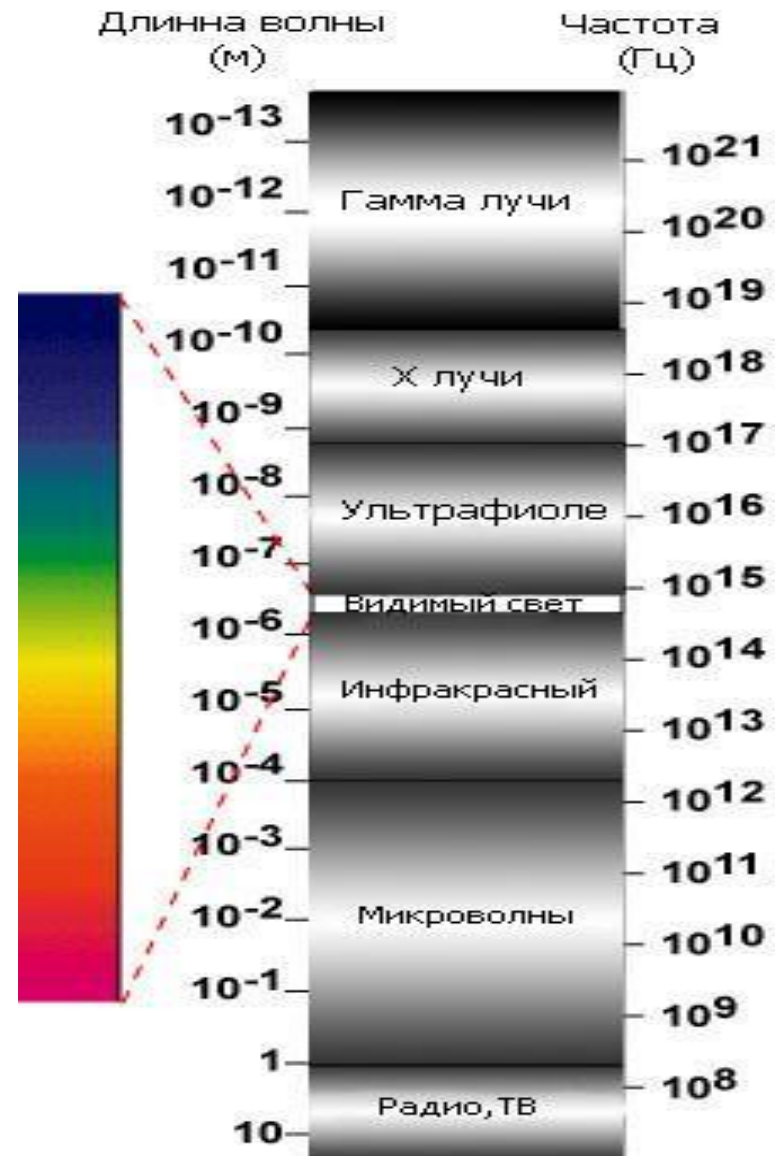


# Свойства полупроводников p- и n-типа проводимости

	<b>P-тип</b>	<b>N-тип</b>
<b>Легирующая примесь</b>	Группа III (например, Бор)	Группа V (например, Фосфор)
<b>Связи</b>	Недостающие электроны (дырки)	Избыточные электроны
<b>Основные носители</b>	Дырки	Электроны
<b>Неосновные носители</b>	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 ( $\mu\text{m}$ ), 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.

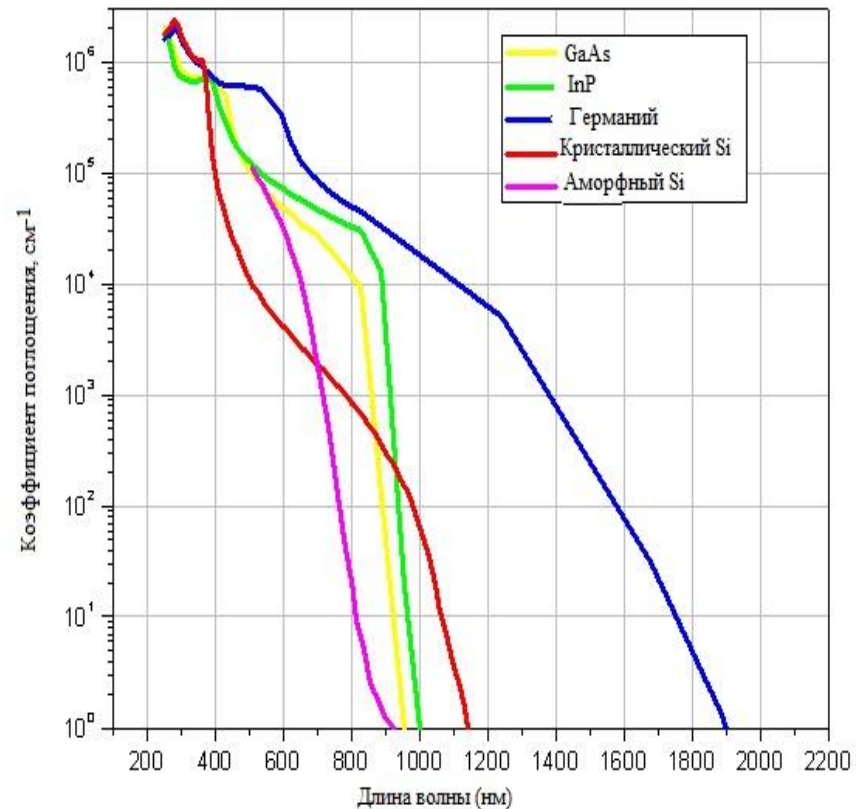
# Поглощение света полупроводником

- 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,  $\alpha$ , в различных полупроводниках при 300К как функция длины волны света

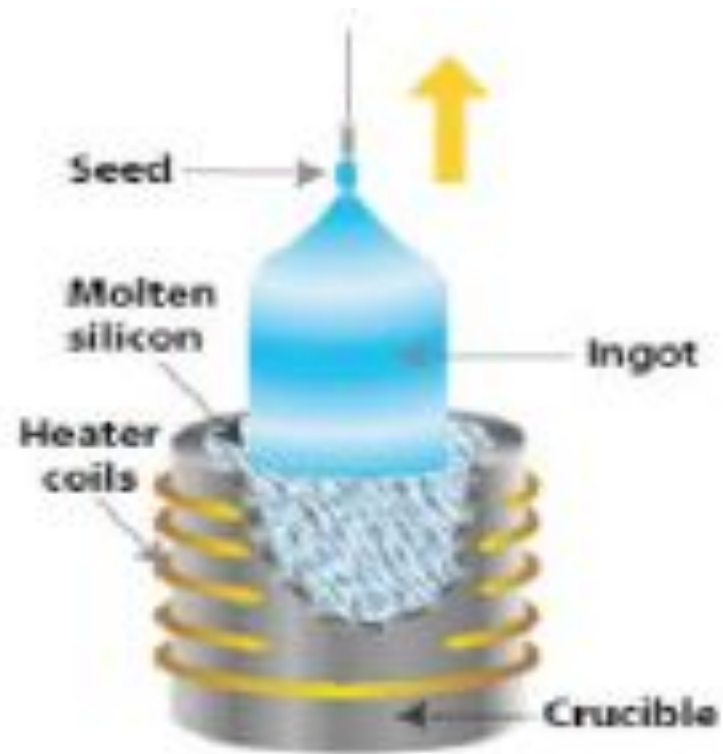


# Метод Чохральского

- 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