

Полупроводник

Материал из Википедии — свободной энциклопедии

Полупроводник — [материал](#), который по своей [удельной проводимости](#) занимают промежуточное место между [проводником](#) и [диэлектриком](#) и отличаются от [проводника](#) сильной зависимостью [удельной проводимости](#) от концентрации примесей, температуры и различных видов излучения. Полупроводниками являются вещества, [ширина запрещённой зоны](#) которых составляет порядка нескольких эВ ([электрон-вольта](#)), то есть соизмерима с *kT*. Например, [алмаз](#) можно отнести к [широкозонным полупроводникам](#), а [InAs](#) — к [узкозонным](#).

В зависимости от того, отдаёт ли [атом примеси электрон](#) или захватывает его, примесные атомы называют [донорными](#) или [акцепторными](#). Характер примеси может меняться в зависимости от того, какой атом кристаллической решётки она замещает, в какую кристаллографическую плоскость встраивается.

Проводимость полупроводников сильно зависит от температуры. Вблизи [абсолютного нуля](#) температуры полупроводники имеют свойства [изоляторов](#).

Содержание

- [1 Механизм проведения электрического тока полупроводниками](#)
 - [1.1 Дырка](#)
- [2 Виды полупроводников](#)
 - [2.1 По характеру проводимости](#)
 - [2.1.1 Собственная проводимость](#)
 - [2.1.2 Примесная проводимость](#)
 - [2.2 По виду проводимости](#)
 - [2.2.1 Электронные полупроводники \(n-ного типа\)](#)
 - [2.2.2 "Дырчатые полупроводники \(p-типа\)"](#)
- [3 Использование полупроводников в электродинамике](#)
 - [3.1 Полупроводниковый диод](#)
 - [3.2 Транзистор](#)
- [4 Типы полупроводников в периодической системе элементов](#)
- [5 Физические свойства и применения](#)
 - [5.1 Легирование](#)
- [6 Методы получения](#)
- [7 Оптика полупроводников](#)
- [8 Полупроводники](#)
- [9 См. также](#)
- [10 Примечания](#)
- [11 См. также](#)
- [12 Ссылки](#)

Механизм проведения электрического тока полупроводниками

Полупроводники характеризуются как свойствами проводников, так и диэлектриков. Так как, образуя кристаллы, атомы полупроводников устанавливают ковалентные связи (то есть, один электрон в кристалле кремния, как и алмаза, связан двумя атомами), электронам необходим уровень внутренней энергии для высвобождения из атома ($1,76 \cdot 10^{-19}$ Дж против $11,2 \cdot 10^{-19}$ Дж, чем и характеризуется отличие между полупроводниками и диэлектриками). Эта энергия появляется в них при повышении температуры (например, при комнатной температуре уровень энергии теплового движения атомов равняется $0,4 \cdot 10^{-19}$ Дж), и отдельные атомы получают энергию для отрыва электрона от атома. В процессе повышения температуры количество свободных электронов возрастает - удельное сопротивление падает. Условно принято считать полупроводниками элементы с энергией связи электронов меньшей чем 1,5 - 2 эВ.

Дырка

Во время разрыва связи между электроном и ядром появляется свободное место в электронной оболочке атома. Это обуславливает переход электрона с другого атома на атом со свободным местом. На атом, откуда перешел электрон, входит другой электрон из другого атома и т. д. Это обуславливается ковалентными связями атомов. Таким образом, происходит перемещение позитивно заряженного атома без перемещения самого атома. Этот процесс назвали "дыркой".

Виды полупроводников

По характеру проводимости

Собственная проводимость

Полупроводники, в которых свободные электроны и "дырки" появляются в процессе ионизации атомов, из которых построен весь кристалл, называют полупроводниками с собственной проводимостью. В полупроводниках с собственной проводимостью концентрация свободных электронов равняется концентрации "дырок".

Примесная проводимость

Для создания полупроводниковых механизмов используют кристаллы с примесной проводимостью. Такие кристаллы изготавливаются с помощью внесения смесей с атомами трехвалентного или пятивалентного химического элемента.

По виду проводимости

Электронные полупроводники (n-ного типа)

Этот вид полупроводников имеет примесную природу. В четырехвалентный полупроводник (например, кремний) добавляют примесь пятивалентного полупроводника (например, мышьяка). В процессе взаимодействия каждый атом примеси вступает в ковалентную связь с атомами кремния. Однако для пятого электрона атома мышьяка нет места в насыщенных валентных связях, и он переходит на дальнюю электронную оболочку. Там для отрыва электрона от атома нужно меньшее количество энергии. Электрон отрывается и превращается в свободный. В данном случае перенос заряда осуществляется электроном, а не дыркой, то есть данный вид полупроводников проводит

электрический ток подобно металлам. Примеси, которые добавляют в полупроводники, вследствие чего они превращаются в полупроводники n-типа, называются донорными.

"Дырчатые полупроводники (p-типа)"

Этот вид полупроводников, кроме примесной основы, характеризуется дырочной природой проводимости. В четырехвалентный полупроводник (например, в кремний) добавляют небольшое количество атомов трехвалентного элемента (например, индия). Каждый атом примеси устанавливает ковалентную связь с тремя соседними атомами кремния. Для установки связи с четвертым атомом кремния у атома индия нет валентного электрона, поэтому он захватывает валентный электрон из ковалентной связи между соседними атомами кремния и становится отрицательно заряженным ионом, вследствие чего образуется дырка. Примеси, которые добавляют в полупроводники, вследствие чего они превращаются в полупроводники p-типа, называются акцепторными.

Использование полупроводников в электродинамике

Полупроводниковый диод

Полупроводниковый диод состоит из двух типов полупроводников - дырчатого и электронного. В процессе контакта между этими областями из области с полупроводником n-типа в область с полупроводником p-типа проходят электроны, которые затем рекомбинируют с дырками. Вследствие этого возникает электрическое поле между двумя областями, что устанавливает предел деления полупроводников - так называемый p-n переход. В результате в области с полупроводником p-типа возникает некомпенсированный заряд из негативных ионов, а в области с полупроводником n-типа возникает некомпенсированный заряд из позитивных ионов. Разница между потенциалами достигает 0,3-0,6 В. В процессе подачи напряжения позитивным знаком на p-полупроводник и негативным знаком на n-полупроводник внешнее электрическое поле будет направлено против внутреннего электрического поля p-n перехода, и при достаточном напряжении электроны преодолеют p-n переход и в цепи диода появится электрический ток (прямая проводимость). При подаче напряжения негативным знаком на область с полупроводником p-типа и позитивным знаком на область с полупроводником n-типа между двумя областями возникает шар, который не имеет свободных носителей электрического тока (обратная проводимость). Обратный ток полупроводникового диода не равен нулю, так как в обеих областях всегда есть носители заряда. Для этих носителей p-n переход будет открыт. Таким образом, p-n переход проявляет свойства односторонней проводимости, что обуславливается подачей напряжения с различной полярностью. Это свойство используют для выпрямления переменного тока.

Транзистор

Транзистор - полупроводниковое устройство, которое состоит из двух областей с полупроводниками p- или n-типа, между которыми находится область с полупроводником n- или p-типа. Таким образом, в транзисторе есть две области p-n перехода. Область кристалла между двумя переходами называют базой, а внешние области называют эмиттером и коллектором. Самой употребляемой схемой включения транзистора является схема включения с общим эмиттером, при которой через базу и эмиттер ток распространяется на коллектор. Транзистор используют для усиления электрического тока.

Типы полупроводников в периодической системе элементов

В нижеследующей таблице представлена информация о большом количестве полупроводниковых соединений. Их делят на несколько типов: одноэлементные полупроводники IV группы [периодической системы элементов](#), сложные: двухэлементные $A^{III}B^V$ и $A^{II}B^{VI}$ из третьей и пятой группы и из второй и шестой группы элементов соответственно. Все типы полупроводников обладают интересной зависимостью ширины запрещённой зоны от периода, а именно — с увеличением периода ширина запрещённой зоны уменьшается.

Группа IIВ IIIА IVA VA VIA

Период

2		5	6	7		
		B	C	N		
3		13	14	15	16	
		Al	Si	P	S	
4	30	31	32	33	34	
		Zn	Ga	Ge	As	Se
5	48	49	50	51	52	
		Cd	In	Sn	Sb	Te
6	80					
		Hg				

Физические свойства и применения

Прежде всего, следует сказать, что физические свойства полупроводников наиболее изучены по сравнению с [металлами](#) и [диэлектриками](#). В немалой степени этому способствует огромное количество эффектов, которые не могут быть наблюдаемы ни в тех ни в других веществах, прежде всего связанные с устройством [зонной структуры](#) полупроводников, и наличием достаточно узкой запрещённой зоны. Конечно же, основным стимулом для изучения полупроводников является производство [полупроводниковых приборов](#) и [интегральных микросхем](#) — это в первую очередь относится к [кремнию](#), но затрагивает и другие соединения ([Ge](#), [GaAs](#), [InP](#), [InSb](#)).

Кремний — [непрямозонный полупроводник](#), оптические свойства которого широко используются для создания [фотодиодов](#) и [солнечных батарей](#), однако его очень трудно заставить работать в качестве источника света, и здесь вне конкуренции прямозонные полупроводники -- соединения типа $A^{III}B^V$, среди которых можно выделить [GaAs](#), [GaN](#), которые используются для создания [светодиодов](#) и [полупроводниковых лазеров](#).

[Собственный полупроводник](#) при [температуре абсолютного нуля](#) не имеет свободных носителей в [зоне проводимости](#) в отличие от проводников и ведёт себя как [диэлектрик](#). При [легировании](#) ситуация может поменяться (см. [вырожденные полупроводники](#)).

В связи с тем, что технологи могут получать очень чистые вещества встаёт вопрос о новом эталоне для [числа Авогадро](#).

Легирование

Объёмные свойства **полупроводника** могут сильно зависеть от наличия [дефектов в кристаллической структуре](#). И поэтому стремятся выращивать очень чистые вещества, в основном для электронной промышленности. Легирующие примеси вводят для управления величиной и типом проводимости полупроводника. Например, широко распространённый [кремний](#) можно легировать элементом V подгруппы периодической системы элементов — [фосфором](#), который является [донором](#), и создать n-Si. Для получения кремния с дырочным типом проводимости (p-Si) используют [бор \(акцептор\)](#). Также создают [компенсированные полупроводники](#) с тем чтобы зафиксирован [уровень Ферми](#) в середине запрещённой зоны.

Методы получения

Свойства полупроводников зависят от способа получения, так как различные примеси в процессе роста могут изменить их. Наиболее дешёвый способ промышленного получения монокристаллического технологического кремния — [метод Чохральского](#). Для очистки технологического кремния используют также [метод зонной плавки](#).

Для получения монокристаллов полупроводников используют различные методы физического и химического осаждения. Наиболее прецизионный и дорогой инструмент в руках технологов для роста монокристаллических плёнок — установки [молекулярно-лучевой эпитаксии](#), позволяющей выращивать кристалл с точностью до монослоя.

Оптика полупроводников

Поглощение света полупроводниками обусловлено переходами между энергетическими состояниями зонной структуры. Учитывая [принцип запрета Паули](#), электроны могут переходить только из заполненного энергетического уровня на незаполненный. В собственном полупроводнике все состояния [валентной зоны](#) заполнены, а все состояния зоны проводимости незаполненные, поэтому переходы возможны лишь из валентной зоны в [зону проводимости](#). Для осуществления такого перехода электрон должен получить от света энергию, превышающую ширину запрещённой зоны. [Фотоны](#) с меньшей энергией не вызывают переходов между электронными состояниями полупроводника, поэтому такие полупроводники прозрачны в области частот $\omega < E_g/\hbar$, где E_g — ширина запрещённой зоны, \hbar — [постоянная Планка](#). Эта частота определяет [фундаментальный край поглощения](#) для полупроводника. Для полупроводников, которые зачастую применяются в электронике ([кремний](#), [германий](#), [арсенид галлия](#)) она лежит в [инфракрасной](#) области спектра.

Дополнительные ограничения на поглощение света полупроводников накладывают [правила отбора](#), в частности [закон сохранения импульса](#). Закон сохранения импульса требует, чтобы [квазиимпульс](#) конечного состояния отличался от квазиимпульса начального состояния на величину [импульса](#) поглощённого фотона. [Волновое число](#) фотона $2\pi/\lambda$, где λ — длина волны, очень мало по сравнению с волновым [вектором обратной решётки](#) полупроводника, или, что то же самое, длина волны фотона в видимой области намного больше характерного межатомного расстояния в полупроводнике, что приводит к требованию того, чтобы квазиимпульс конечного состояния при электронном

переходе практически равнялся квазиимпульсу начального состояния. При частотах, близких к фундаментальному краю поглощения, это возможно только для [прямозонных полупроводников](#). Оптические переходы в полупроводниках, при которых импульс электрона почти не меняется называются *прямыми* или *вертикальными*. Импульс конечного состояния может значительно отличаться от импульса начального состояния, если в процессе поглощения фотона участвует ещё одна, третья частица, например, [фонон](#). Такие переходы тоже возможны, хотя и менее вероятны. Они называются *непрямыми переходами*.

Таким образом, прямозонные полупроводники, такие как [арсенид галлия](#), начинают сильно поглощать свет, когда энергия кванта превышает ширину запрещённой зоны. Такие полупроводники очень удобны для использования в [оптоэлектронике](#).

Непрямозонные полупроводники, например, [кремний](#), поглощают в области частот света с энергией кванта чуть больше ширины запрещённой зоны значительно слабее, только благодаря непрямым переходам, интенсивность которых зависит от присутствия фононов, и следовательно, от [температуры](#). Граничная частота прямых переходов кремния больше 3 эВ, то есть лежит в [ультрафиолетовой области](#) спектра.

При переходе электрона из валентной зоны в зону проводимости в полупроводнике возникают свободные [носители заряда](#), а следовательно [фотопроводимость](#).

При частотах ниже края фундаментального поглощения также возможно поглощение света, которое связано с возбуждением экситонов, электронными переходами между уровнями примесей и разрешенными зонами, а также с поглощением света на колебаниях решетки и свободных носителях. Экситонные зоны расположены в полупроводнике несколько ниже дна зоны проводимости благодаря энергии связи экситона. Экситонные спектры поглощения имеют [водородоподобную](#) структуру энергетических уровней. Аналогичным образом примеси, [акцепторы](#) или [доноры](#), создают акцепторные или донорные уровни, лежащие в запрещённой зоне. Они значительно модифицируют спектр поглощения легированного полупроводника. Если при непрямозонном переходе одновременно с квантом света поглощается фонон, то энергия поглощенного светового кванта может быть меньше на величину энергии фонона, что приводит к поглощению на частотах несколько ниже по энергии от фундаментального края поглощения.

Полупроводники

- [кремний, Si](#)
- [германий, Ge](#)
- [серое олово, \$\alpha\$ -Sn](#)
- [карбид кремния, SiC](#)
- [нитрид бора, BN](#)
- [нитрид алюминия, AlN](#)
- [фосфид алюминия, AlP](#)
- [арсенид алюминия, AlAs](#)
- [нитрид галлия, GaN](#)
- [фосфид галлия, GaP](#)
- [арсенид галлия, GaAs](#)
- [антимонид галлия, GaSb](#)
- [фосфид индия, InP](#)
- [арсенид индия, InAs](#)
- [антимонид индия, InSb](#)

- [селенид цинка, ZnSe](#)
- [селенид кадмия, CdSe](#)
- [теллурид кадмия, CdTe](#)
- [теллурид цинка, ZnTe](#)
- [теллурид ртути, HgTe](#)
- [оксид цинка, ZnO](#)
- [диоксид титана, TiO₂](#)
- [сульфид цинка, ZnS](#)
- [сульфид свинца, PbS](#)
- [теллурид свинца, PbTe](#)
- [теллурид олова, SnTe](#)
- [теллурид висмута, Bi₂Te₃](#)
- [органические полупроводники](#)

См. также

- [Проводник](#)
- [Диэлектрик](#)
- [Словарь терминов физики полупроводников](#)
- [Полупроводниковые материалы](#)
- [Полупроводниковые приборы](#)

Ссылки

- [Получение зависимостей Мотта-Шоттки методом потенциодинамической электрохимической импедансной спектроскопии](#)