

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПА ПРОВОДИМОСТИ  
ПОЛУПРОВОДНИКА**

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:  
Л.Н. Владимирова,  
Е.Н. Бормонтов,  
В.И. Петраков

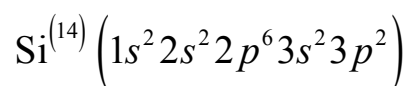
Издательско-полиграфический центр  
Воронежского государственного университета  
2009

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Все вещества в природе по своим электрофизическим свойствам могут быть разделены на три больших класса: металлы, полупроводники и диэлектрики. Наиболее проста классификация веществ по их удельному электрическому сопротивлению. У металлов эта величина лежит в пределах от  $10^{-6}$  до  $10^{-4}$  Ом · см. Группа веществ с удельным сопротивлением от  $10^{-4}$  до  $10^{10}$  Ом · см может быть отнесена к полупроводникам. Наконец, вещества с удельным сопротивлением более  $10^{10}$  Ом · см относятся к классу диэлектриков.

Из приведенных данных видно, что резкого изменения в величине удельного сопротивления при переходе от одного класса веществ к другому не существует. Для полупроводников и диэлектриков это отражает их принципиальное качественное сходство. Более существенно различаются по своей природе металлы и полупроводники.

Рассмотрим механизм проводимости типичного полупроводника — кремния (Si). Распределение электронов по состояниям в атоме кремния следующее:



Наивысшая валентность кремния, находящегося в IV группе Периодической системы, равна четырем. При образовании кристаллической решетки кремния в результате полной гибридизации электронных 3s и 3p облаков каждый атом кремния участвует в формировании четырех одинаковых ковалентных (парноэлектронных) связей. Схематически кристаллическая решетка Si с ковалентным типом связи представлена на рис. 1а. Здесь в узле решетки находится атом кремния, которому принадлежат четыре валентных электрона, изображенные на рис. 1 черными точками.

В целом система, представленная на рис. 1а, электронейтральна. Если поместить ее в электрическое поле, то электрический ток в ней не воз-

Наряду с собственным полупроводником, практически беспримесным, существуют полупроводники, в которые специально введены определенного сорта примеси в контролируемых количествах. Такой полупроводник, называется примесным, а проводимость, созданная введенной примесью, носит название примесной проводимости. Рассмотрим модель механизма проводимости кремния, в котором один из атомов в узле кристаллической решетки замещен атомом элемента V группы – фосфора.

В решетке кремния четыре валентных электрона атома фосфора вместе с четырьмя электронами ближайших атомов кремния объединены в парно-электронные связи, как это схематически представлено на рис. 3а. Пятый электрон не может реализовать свою валентную возможность, поэтому он слабо связан с атомом фосфора, но при низких температурах локализован около него. При повышении температуры этот электрон будет легко покидать атом примеси – фосфор и сможет свободно перемещаться по кристаллу. Отдавший электрон атом примеси станет положительным ионом. В этом случае доминирующую роль в проводимости кристалла будут играть электроны, и поэтому они называются основными носителями заряда, а дырки – неосновными носителями заряда. Такой полупроводник называется **электронным, или донорным, или n-типа** (**n – negativ, отрицательный**), а примесь, отдающая электроны, носит название **донорной**.

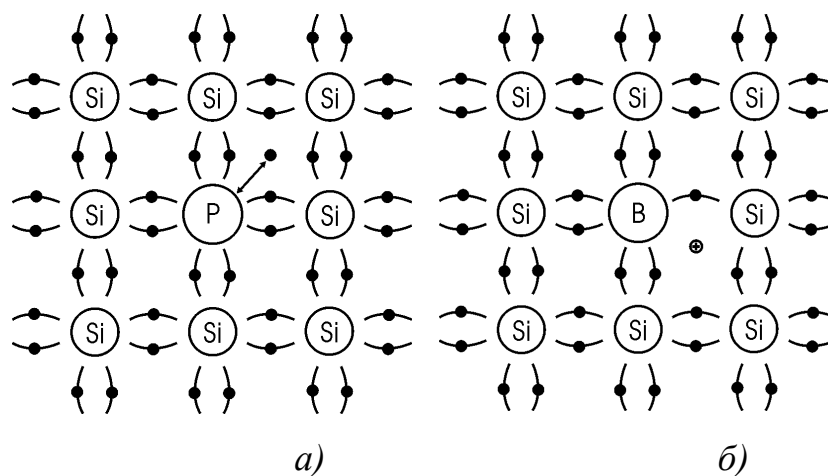


Рис. 3. Схематическое изображение кристаллической решетки донорного (а) и акцепторного (б) полупроводников

На энергетической диаграмме наличие примеси в решетке полупроводника будет характеризоваться появлением локального уровня, лежащего в запрещенной зоне. Так как при ионизации атома фосфора образуется свободный электрон, и для его отрыва требуется значительно меньшая энергия, чем для разрыва валентных связей кремния, то энергетический уровень донорной примеси  $E_d$  должен располагаться в запрещенной зоне на небольшой глубине под дном зоны проводимости (рис. 4а).

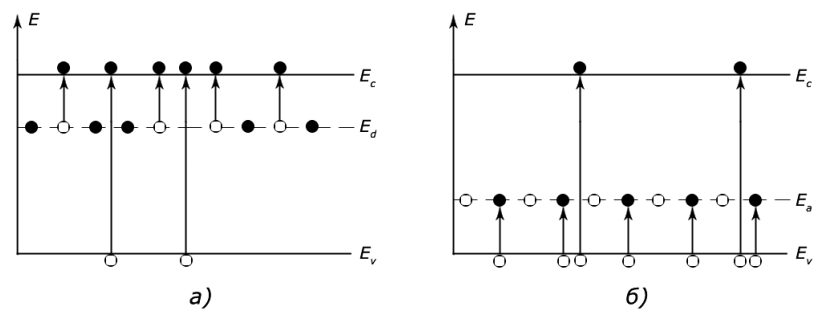


Рис. 4. Энергетическая диаграмма донорного (а) и акцепторного (б) полупроводников

Пусть теперь в качестве примеси в кристаллическую решетку кремния внесен элемент третьей группы – бор. Поскольку высшая валентность бора равна трем, то одна связь атома кремния в решетке будет не завершена из-за отсутствия у бора четвертого электрона (рис. 3б).

Незавершенную связь кремния с атомом бора за счет тепловой энергии может восстановить электрон, перескочивший от соседнего атома кремния. При этом образуется отрицательный ион бора, а на месте отдавшего электрон атома кремния – свободная дырка, перемещающаяся от атома к атому кремния и, следовательно, принимающая участие в проводимости кристалла. Примесь, захватывающая электроны, называется акцепторной. В таком полупроводнике основными носителями заряда будут дырки, а электроны – неосновными носителями заряда. **Полупроводник с акцепторной примесью носит название дырочного, или акцепторного, или p-типа (p – positiv, положительный).**

На энергетической диаграмме, изображенной на рис. 4б, акцепторная примесь имеет в запрещенной зоне энергетический уровень  $E_a$ , расположенный на небольшом расстоянии над потолком валентной зоны. При ионизации акцепторной примеси происходит переход электрона из валентной зоны на уровень  $E_a$ , а в валентной зоне появляется незавершенная связь — дырка, которая и является свободным носителем заряда.

**В полупроводниках могут одновременно содержаться как донорные, так и акцепторные примеси. Такие полупроводники называются компенсированными.**

Определение типа проводимости является обязательной операцией в процессе контроля качества полупроводниковых материалов. Наиболее распространенным методом определения типа проводимости является термоэлектрический метод (метод термозонда) и метод вольтамперной характеристики выпрямляющего контакта металла с полупроводником.

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД

Метод основан на возникновении термо-ЭДС на концах полупроводника, находящихся при различных температурах.

Рассмотрим однородный полупроводник при наличии в нем градиента температуры. Средняя энергия носителей заряда и их концентрация будут больше там, где выше температура. Следовательно, градиент (перепад) температуры в однородном полупроводнике приводит к градиенту средней энергии носителей заряда и градиенту их концентрации, вследствие чего возникает диффузионный поток носителей и появляется электрический ток. В разомкнутой цепи в стационарном состоянии плотность тока в любой точке образца равна нулю. Это означает, что электрический ток, обусловленный градиентом температуры, компенсируется током, возникающим в электрическом поле при разделении зарядов. На образце возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС).