Физическая электроника

Введение

- *Электроникой* называют раздел науки и техники, занимающийся исследованием
- взаимодействия электронов с электромагнитными полями
- и методов создания электронных приборов и устройств предназначенных для преобразования электромагнитной энергии, в основном для приема, обработки, хранения и передачи информации представленной в виде электрических сигналов.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАБОТЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Энергетические уровни и зоны

- В соответствии с квантовой теорией энергия электрона, вращающегося по своей орбите вокруг ядра, может иметь только определенные дискретные или квантованные значения энергии и дискретные значения орбитальной скорости.
- Поэтому электрон может двигаться вокруг ядра только по определенным (разрешенным) орбитам.

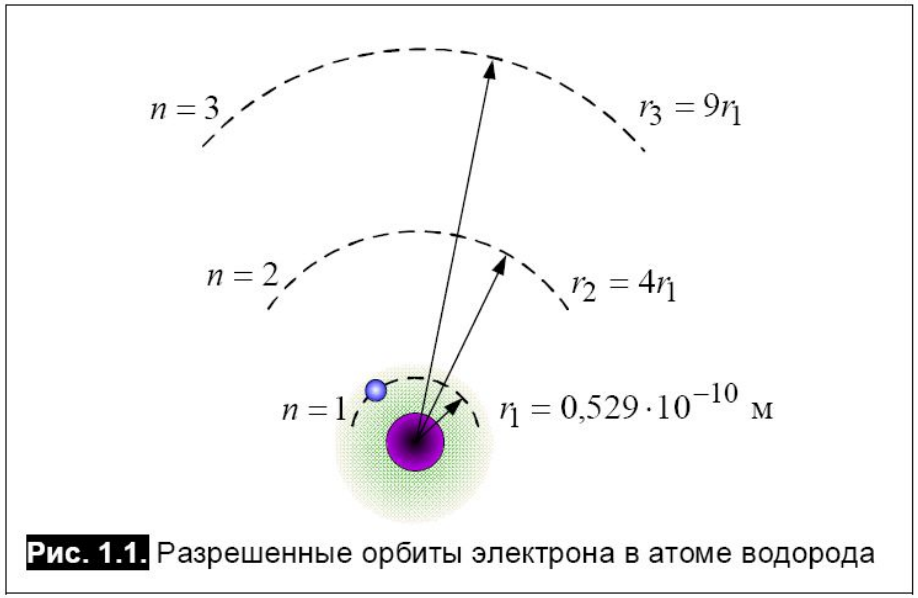


Рис. 1.1. Разрешенные орбиты электрона в атоме водорода

- Каждой орбите соответствует строго определенная энергия электрона, или энергетический уровень.
- Энергетические уровни отделены друг от друга запрещенными интервалами.

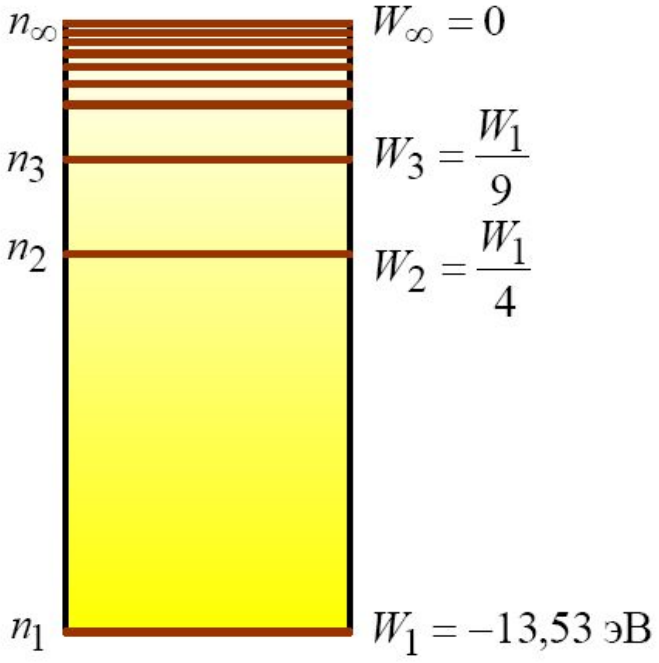


Рис. 1.2. Энергетические уровни атома водорода

- Согласно *принципу Паули*
- на одном энергетическом уровне не может находиться более двух электронов.
- В невозбужденном состоянии электроны в атоме находятся на ближайших к ядру орбитах.
- При поглощении атомом энергии какой-либо электрон может перейти на более высокий свободный уровней, либо вовсе покинуть атом, став свободным носителем электрического заряда (атом превратится в положительно заряженный ион).

Проводники, полупроводники и диэлектрики

- В твердых телах атомы вещества могут образовывать правильную *кристаллическую решетку*.
- Соседние атомы удерживаются межатомными силами на определенном расстоянии друг от друга в точках равновесия этих сил - *узлах* кристаллической решетки.
- Под действием тепла атомы, совершают колебательные движения относительно положения равновесия.

- Соседние атомы в твердых телах так близко находятся друг к другу, что их внешние электронные оболочки соприкасаются или перекрываются.
- В результате происходит расщепление энергетических уровней электронов на большое число близко расположенных уровней, образующих *энергетические зоны*.

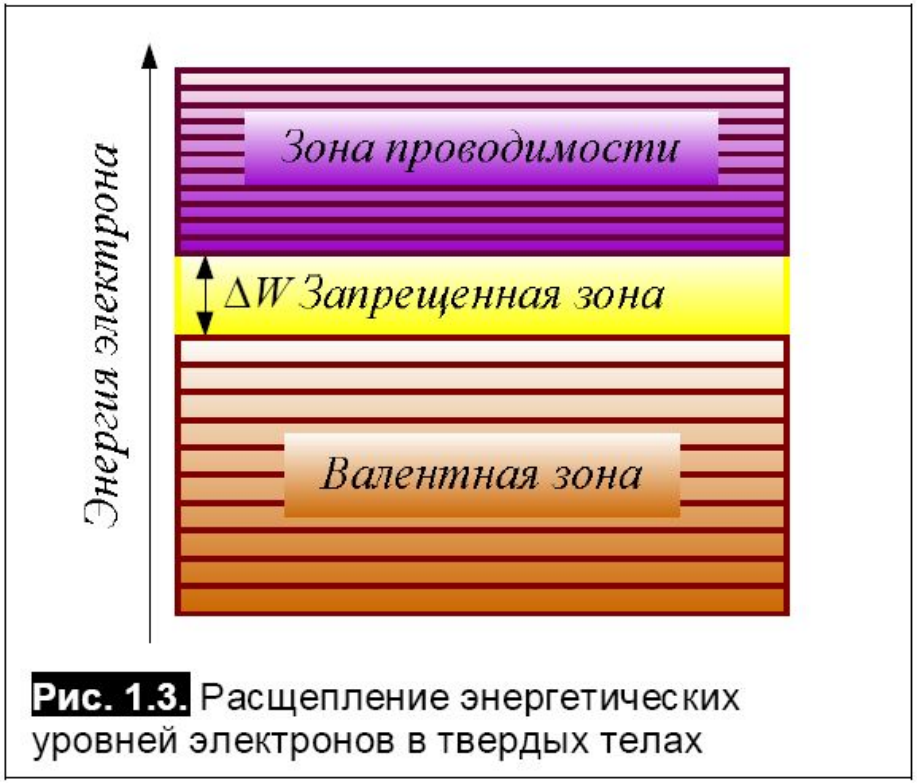


Рис. 1.3. Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах

- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля все энергетические уровни заняты электронами, называется *валентной*.

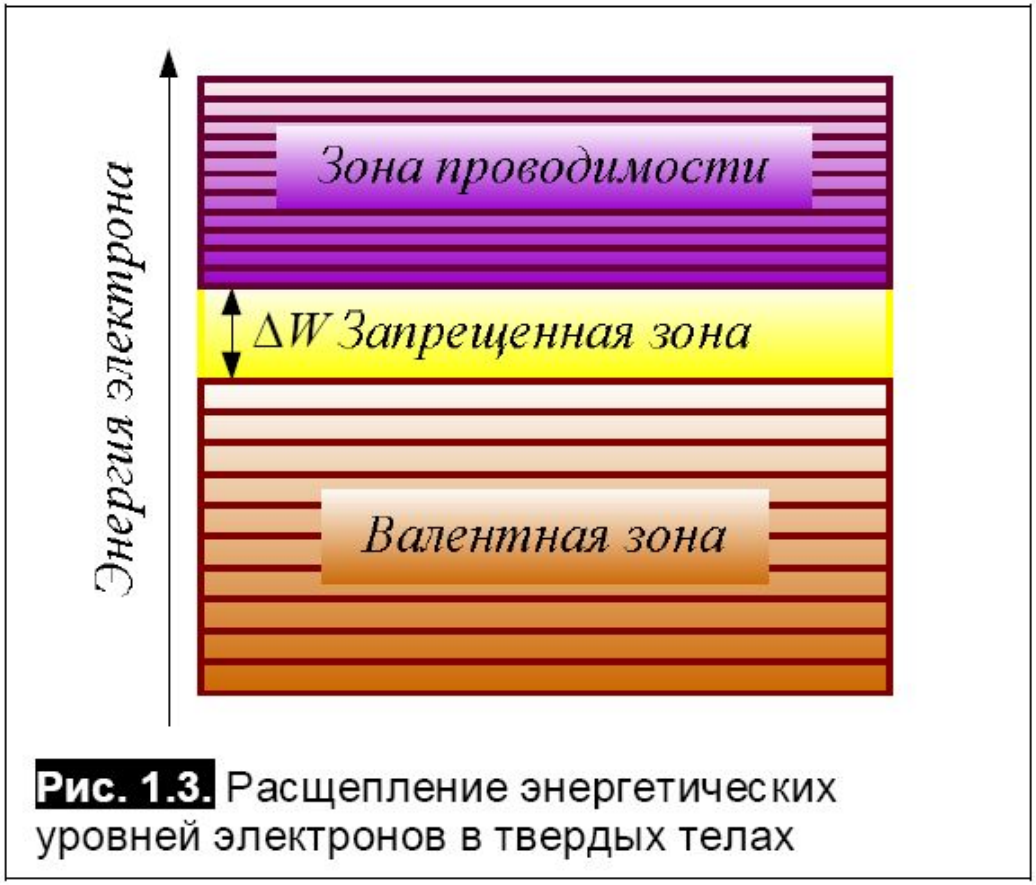


Рис. 1.3. Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах

- Разрешенная зона, в которой при температуре абсолютного нуля электроны отсутствуют, называется *зоной проводимости*.
- Между валентной зоной и зоной проводимости расположена *запрещенная зона*.

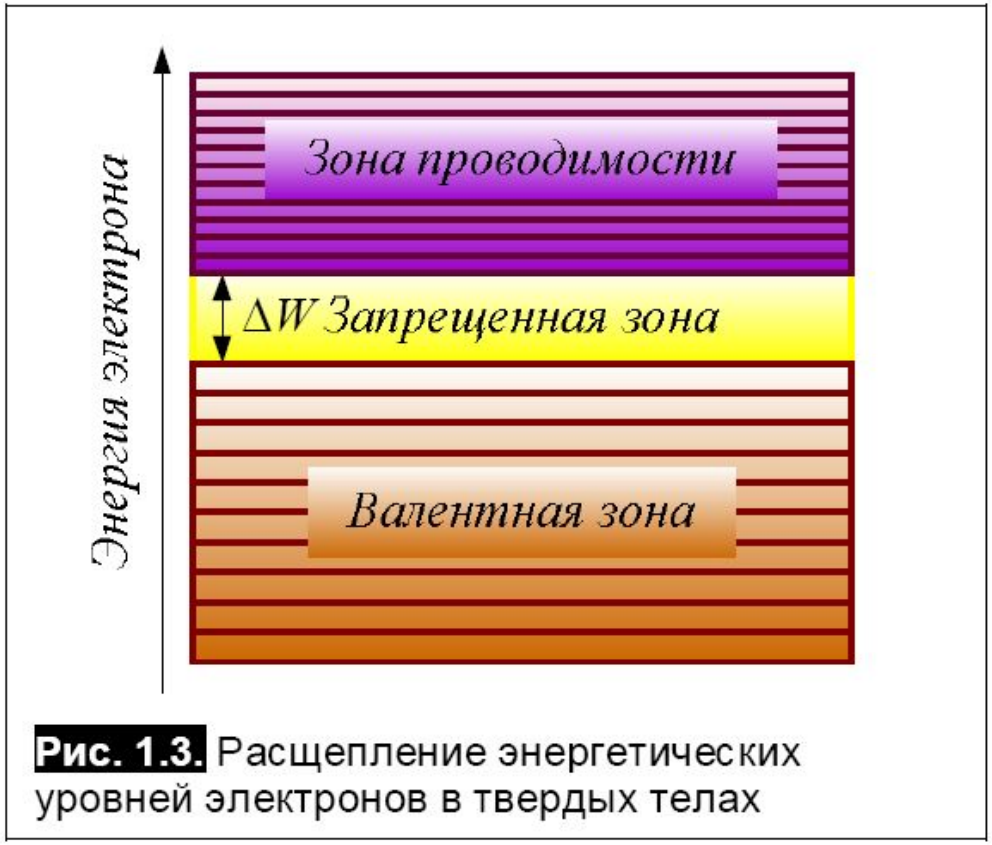


Рис. 1.3. Расщепление энергетических уровней электронов в твердых телах

- Ширина запрещенной зоны является основным параметром, характеризующим свойства твердого тела.

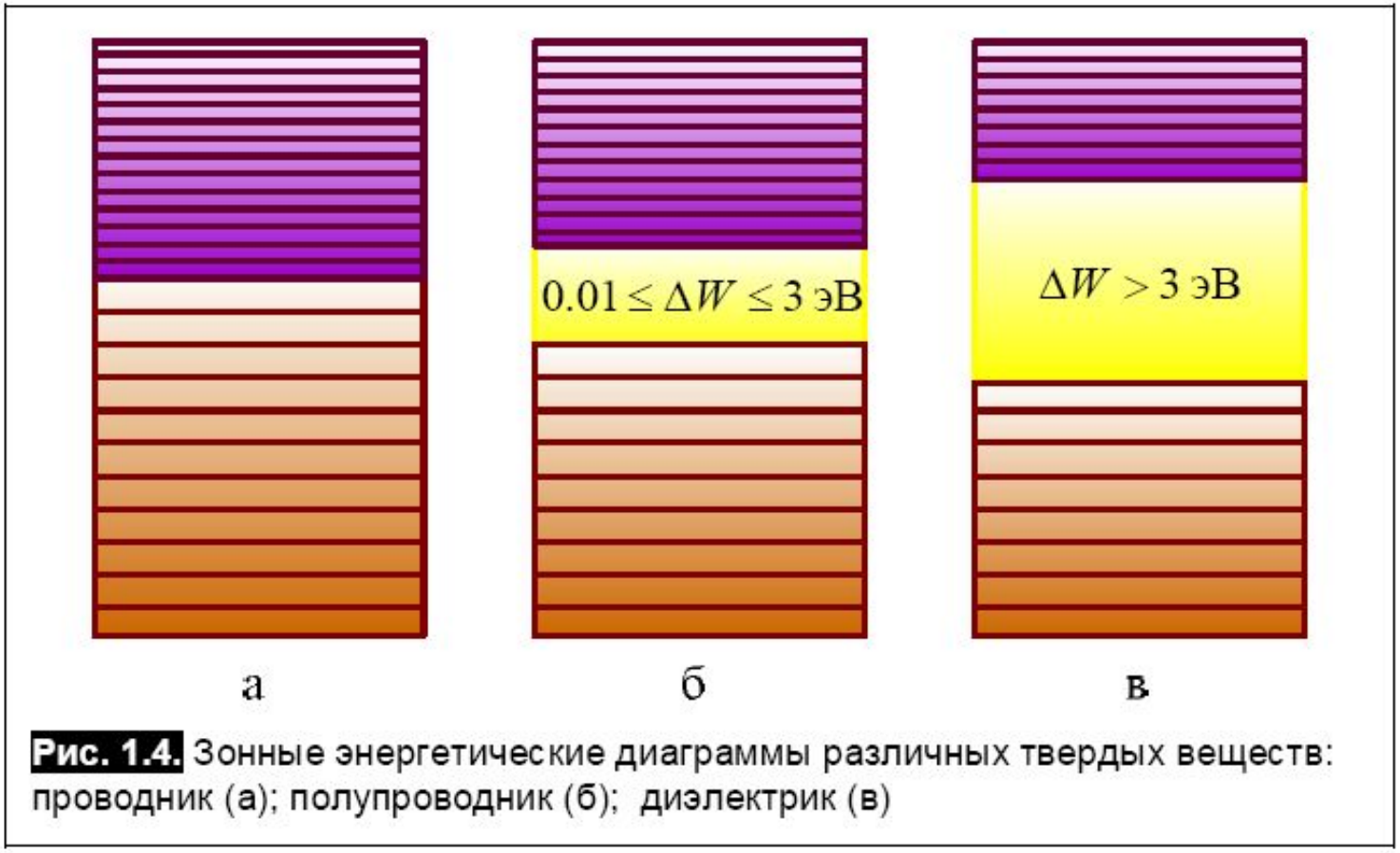


Рис. 1.4. Зонные энергетические диаграммы различных твердых веществ: проводник (а); полупроводник (б); диэлектрик (в)

- В полупроводниковой электронике широкое применение получили
- германий Ge (ΔW = 0,67 эВ)
- и кремний Si (ΔW =1,12 эВ)(элементы 4-й группы периодической системы элементов Менделеева),
- а также арсенид галлия GaAs (ΔW = 1,43 эВ).

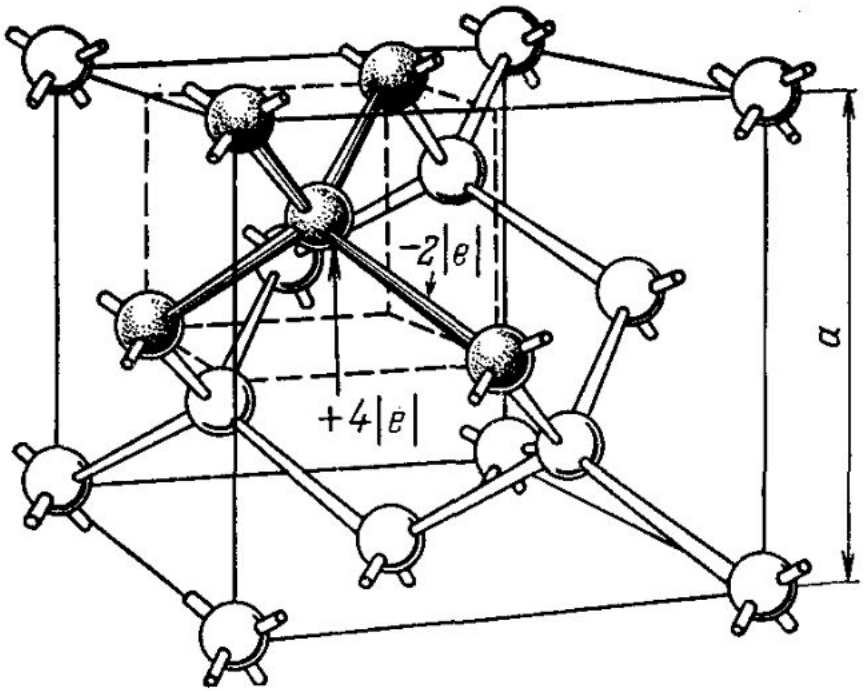
- Электроны в твердом теле могут совершать переходы внутри разрешенной зоны при наличии в ней свободных уровней, а также переходить из одной разрешенной зоны в другую.
- Для перехода электрона из низшей энергетической зоны в высшую требуется затратить энергию, равную ширине запрещенной зоны.
- Способность твердого тела проводить ток под действием электрического поля зависит от структуры энергетических зон и степени их заполнения электронами.

- В металлах зона проводимости частично заполнена.
- Концентрация свободных электронов в металлах практически не зависит от температуры.
- Зависимость электропроводности металлов от температуры обусловлена подвижностью электронов, которая уменьшается с увеличением температуры из-за увеличения амплитуды колебания атомов в кристаллической решетке, что влечет за собой уменьшение длины свободного пробега электрона.

- У диэлектриков и полупроводников при температуре абсолютного нуля валентная зона полностью заполнена, а зона проводимости совершенно пуста, поэтому эти вещества проводить ток не могут.
- Если этому веществу сообщить достаточное количество энергии, то электроны, могут преодолеть ширину запрещенной зоны и перейти в зону проводимости. В этом случае вещество приобретает некоторую электропроводность, которая возрастает с ростом температуры.

Собственная электропроводность полупроводников

- Атомы кремния (Si) располагаются в узлах кристаллической решетки, а электроны наружной электронной оболочки образуют устойчивые ковалентные связи, когда каждая пара валентных электронов принадлежит одновременно двум соседним атомам и образует связывающую эти атомы силу.



Кристаллическая решетка типа алмаза:
a — постоянная решетки

- При температуре абсолютного нуля (T=0K) все энергетические состояния внутренних зон и валентная зона занята электронами полностью, а зона проводимости совершенно пуста.
- Поэтому в этих условиях кристалл полупроводника является практически диэлектриком.

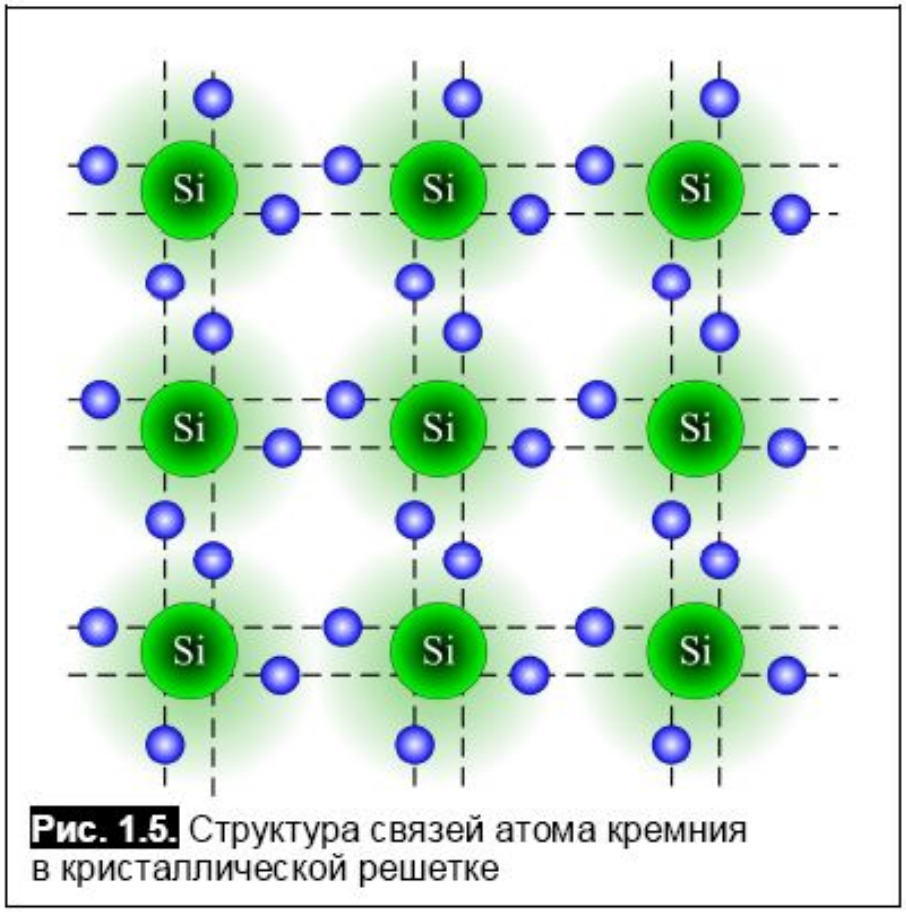
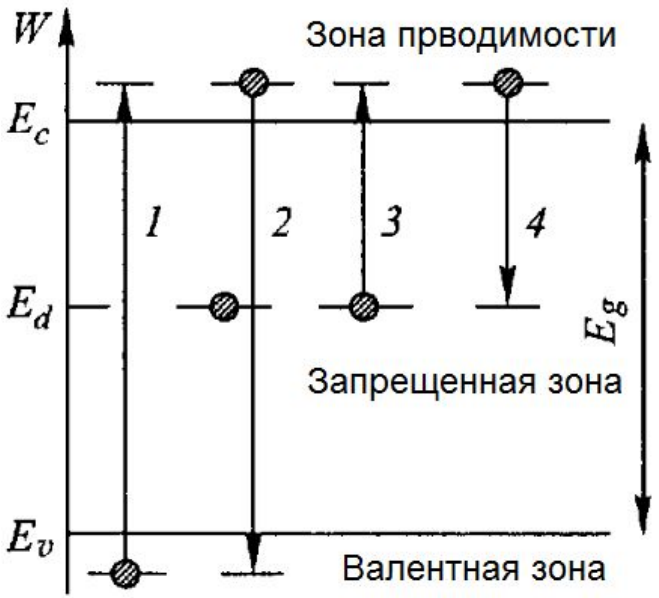


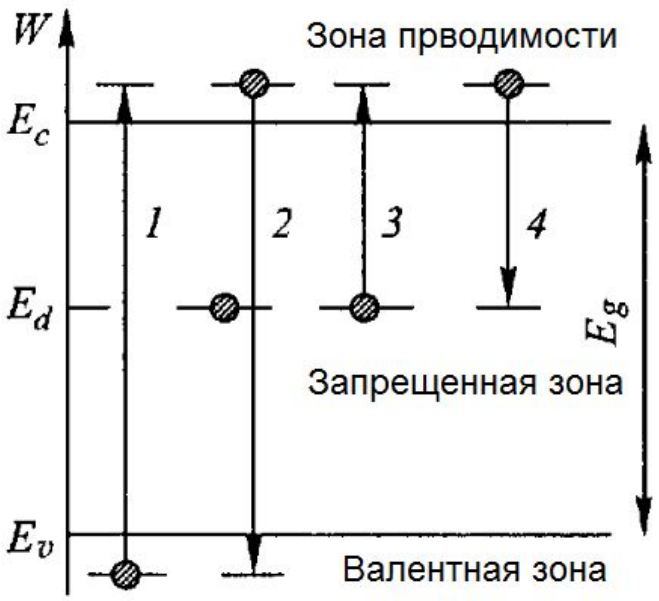
Рис. 1.5. Структура связей атома кремния в кристаллической решетке

- При температуре $T > 0$ К дополнительной энергии, поглощенной каким-либо электроном, может оказаться достаточно для разрыва ковалентной связи и перехода в зону проводимости, где электрон становится свободным носителем электрического заряда (1).



- Электроны хаотически движутся внутри кристаллической решетки и представляют собой так называемый *электронный газ*.
- Электроны при своем движении сталкиваются с колеблющимися в узлах кристаллической решетки атомами, а в промежутках между столкновениями они движутся прямолинейно и равномерно.

- У атома полупроводника, от которого отделился электрон, возникает незаполненный энергетический уровень в валентной зоне, называемый *дыркой*.



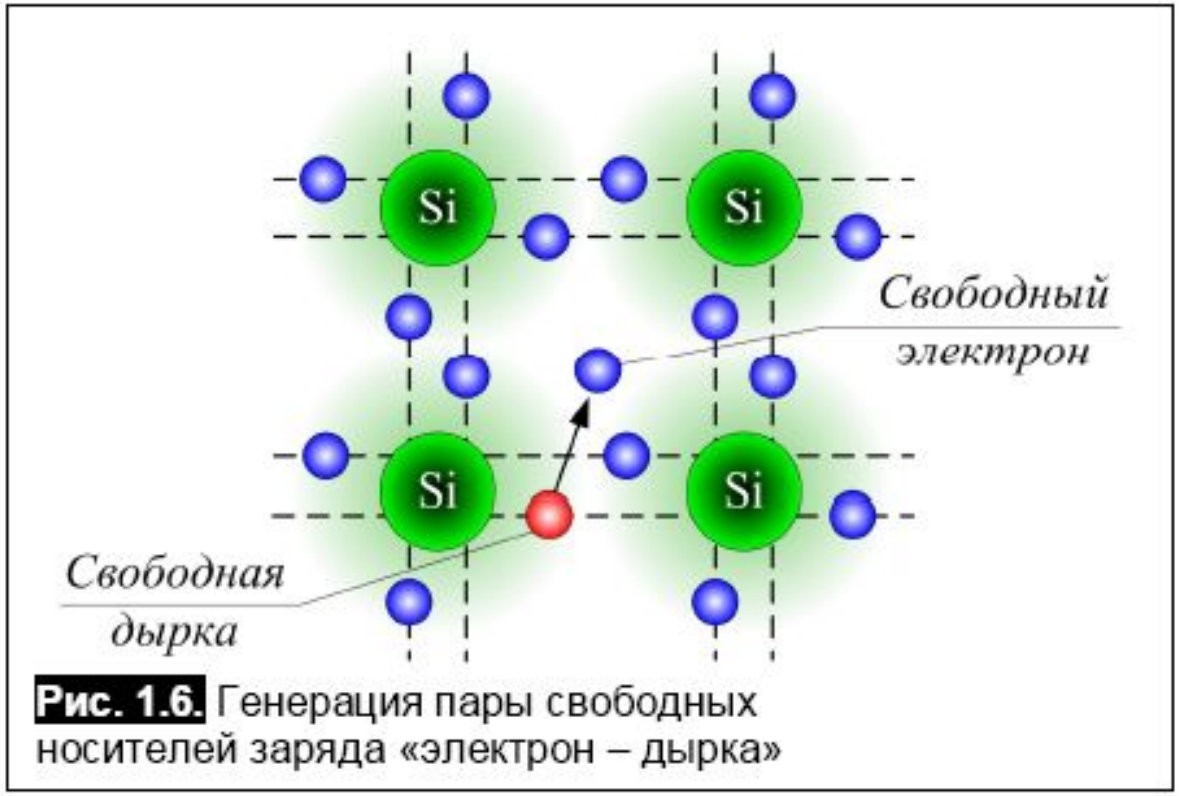


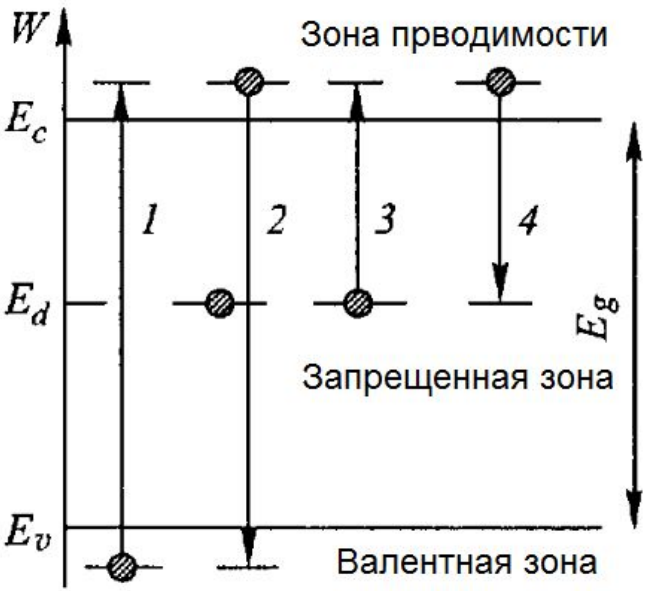
Рис. 1.6. Генерация пары свободных носителей заряда «электрон – дырка»

- Для простоты дырку рассматривают как
- единичный положительный электрический заряд.
- Дырка может перемещаться по всему объему полупроводника
- под действием электрических полей,
- в результате разности концентраций носителей заряда в различных зонах полупроводника,
- участвовать в тепловом движении.

- Таким образом, в кристалле полупроводника при нагревании могут образовываться пары носителей электрических зарядов «электрон – дырка», которые обусловливают появление *собственной электрической проводимости* полупроводника.

- Процесс образования пары «электрон – дырка» называют *генерацией* свободных носителей заряда.
- После своего образования пара «электрон – дырка» существует в течение некоторого времени, называемого *временем жизни носителей* электрического заряда.

- В течение *времени жизни* носители
- участвуют в тепловом движении, взаимодействуют с электрическими и магнитными полями как единичные электрические заряды,
- перемещаются под действием градиента концентрации,
- а затем *рекомбинируют*, т. е. электрон восстанавливает ковалентную связь (2).



- При рекомбинации электрона и дырки происходит высвобождение энергии.
- В зависимости от того, как расходуется эта энергия, рекомбинацию можно разделить на два вида: *излучательную* и *безызлучательную*.

- Излучательной является рекомбинация, при которой энергия, освобождающаяся при переходе электрона на более низкий энергетический уровень, излучается в виде кванта света – фотона.

- При безызлучательной рекомбинации избыточная энергия передается кристаллической решетке полупроводника, т.е. избыточная энергия идет на образование фононов – квантов тепловой энергии.

- Генерация пар носителей «электрон – дырка» и появление собственной электропроводности полупроводника может происходить и при любом другом способе энергетического воздействия на полупроводник – квантами лучистой энергии, ионизирующим излучением и т.д.

Распределение электронов по энергетическим уровням

- Вероятность заполнения электроном энергетического уровня *W* при температуре *T* определяется функцией распределения Ферми:

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}},$$

$$f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{kT}}},$$

- где T – температура в градусах Кельвина; k – постоянная Больцмана; W_F – энергия уровня Ферми (средний энергетический уровень, вероятность заполнения которого равна 0,5 при T = 0 К).

- Соответственно функция (1- *fn*(*W*)) определяет вероятность того, что квантовое состояние с энергией *E* свободно от электрона, т. е. занято дыркой

$$f_p(W) = 1 - f_n(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W_F - W}{kT}}}.$$

- При T = 0 К все энергетические уровни, находящиеся выше уровня Ферми, свободны.

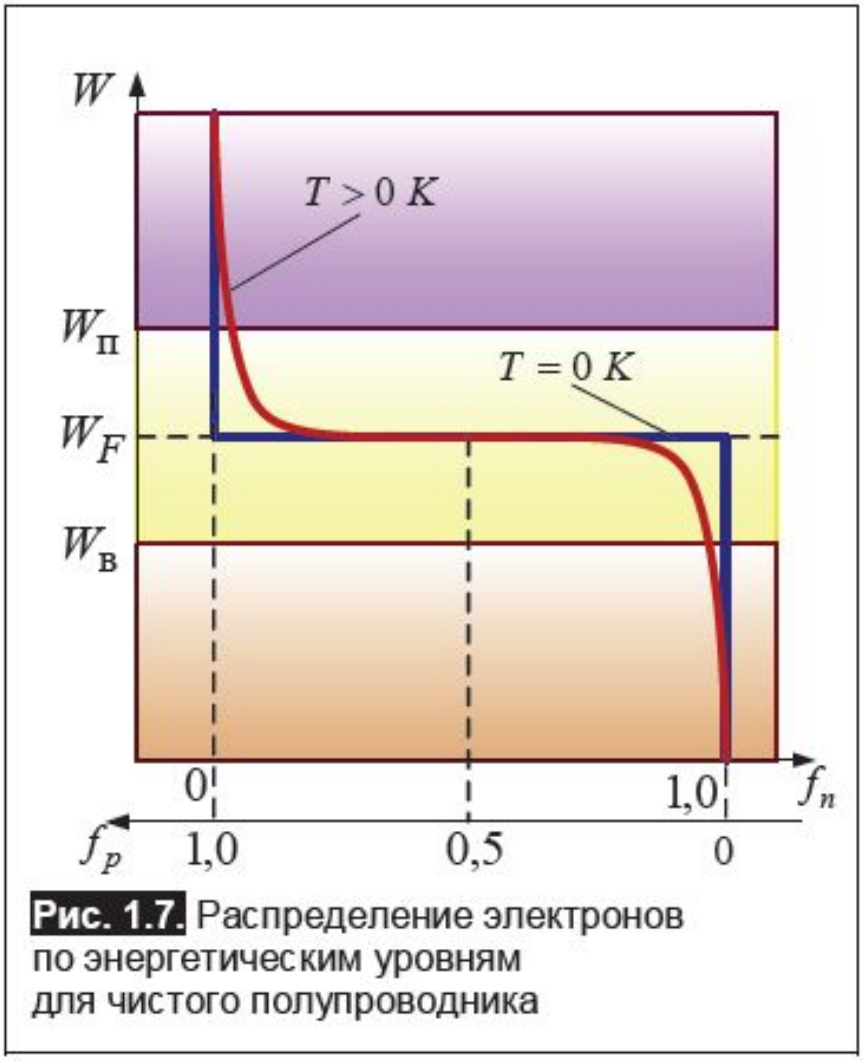


Рис. 1.7. Распределение электронов по энергетическим уровням для чистого полупроводника

- При $T > 0$ К увеличивается вероятность заполнения электроном энергетического уровня, расположенного выше уровня Ферми.
- Ступенчатый характер функции распределения сменяется на более плавный.

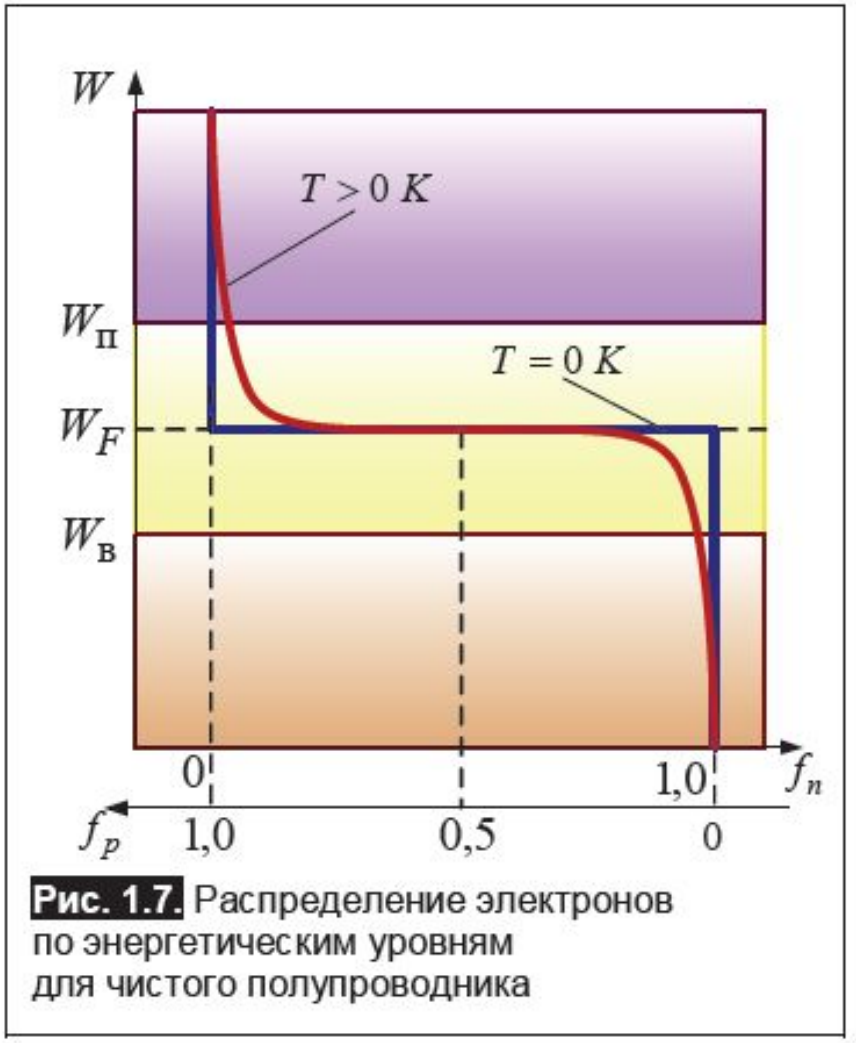


Рис. 1.7. Распределение электронов по энергетическим уровням для чистого полупроводника

Примесная электропроводность полупроводников

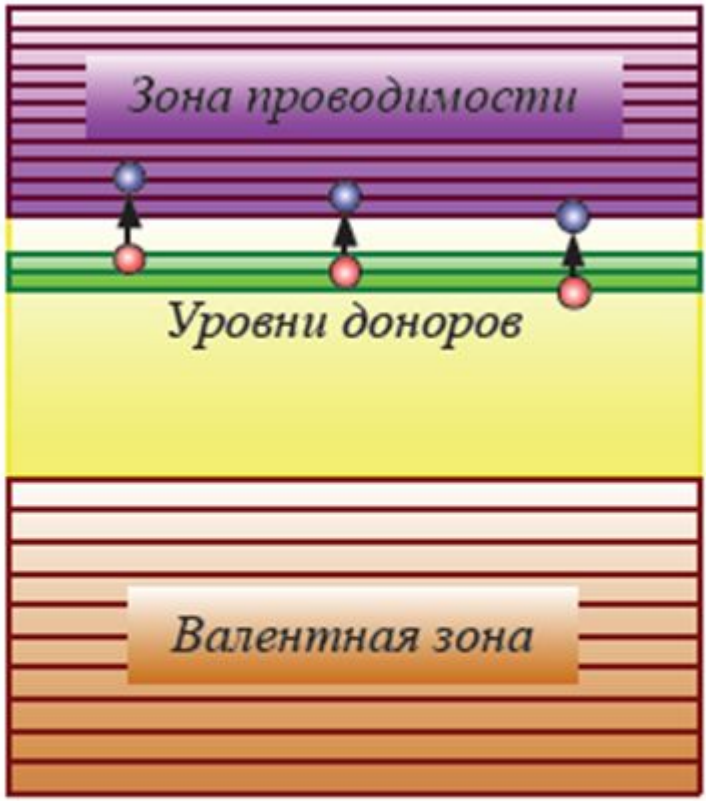
- Электропроводность полупроводника может обусловливаться не только генерацией пар носителей «электрон – дырка» вследствие какого-либо энергетического воздействия, но и введением в структуру полупроводника определенных примесей.

- Примеси бывают
-
- 1) донорного типа,

- 2) акцепторного типа.

Донорные примеси

- *Донор* – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, занятый в невозбужденном состоянии электроном и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.



Зонная диаграмма полупроводника с донорными примесями

- Пример донорной примеси – сурьма (Sb) (элемент V группы таблицы Менделеева).
  - У атома сурьмы на наружной электронной оболочке находятся пять валентных электронов.
  - Четыре электрона устанавливают ковалентные связи с четырьмя соседними атомами кремния,
  - а пятый валентный электрон такой связи установить не может, так как в атомах кремния все свободные связи (уровни) уже заполнены.

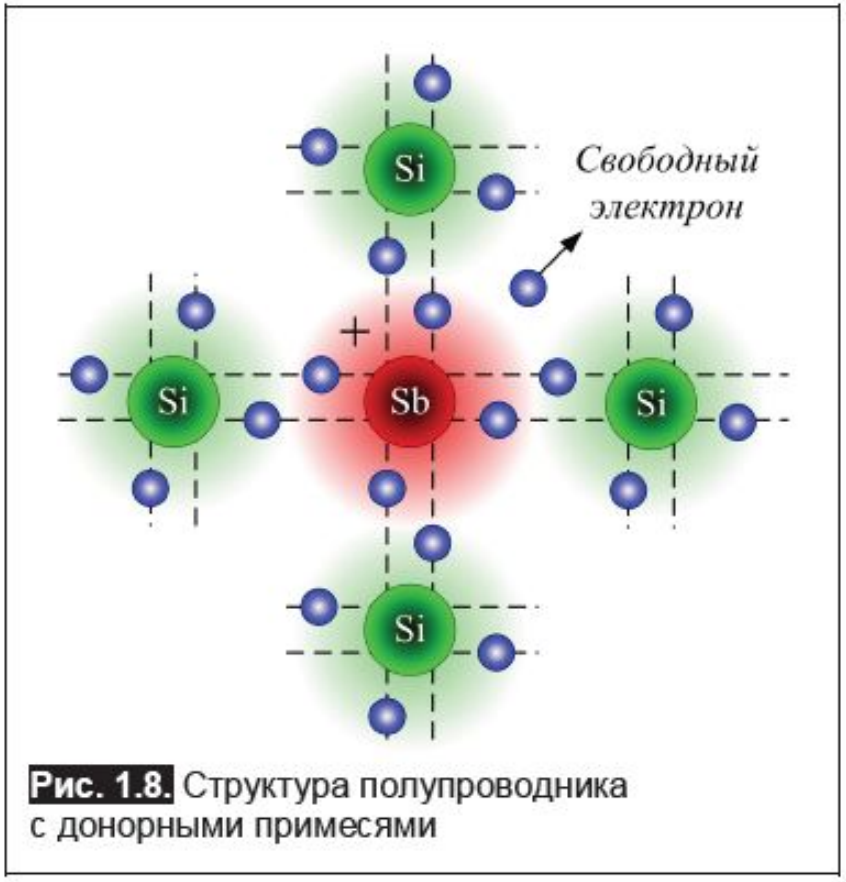


Рис. 1.8. Структура полупроводника с донорными примесями

- Связь с ядром пятого электрона атома примеси слабее по сравнению с другими электронами.
- Под действием теплового колебания атомов кристаллической решетки связь этого электрона с атомом легко разрушается, и он переходит в зону проводимости, становясь при этом свободным носителем электрического заряда.

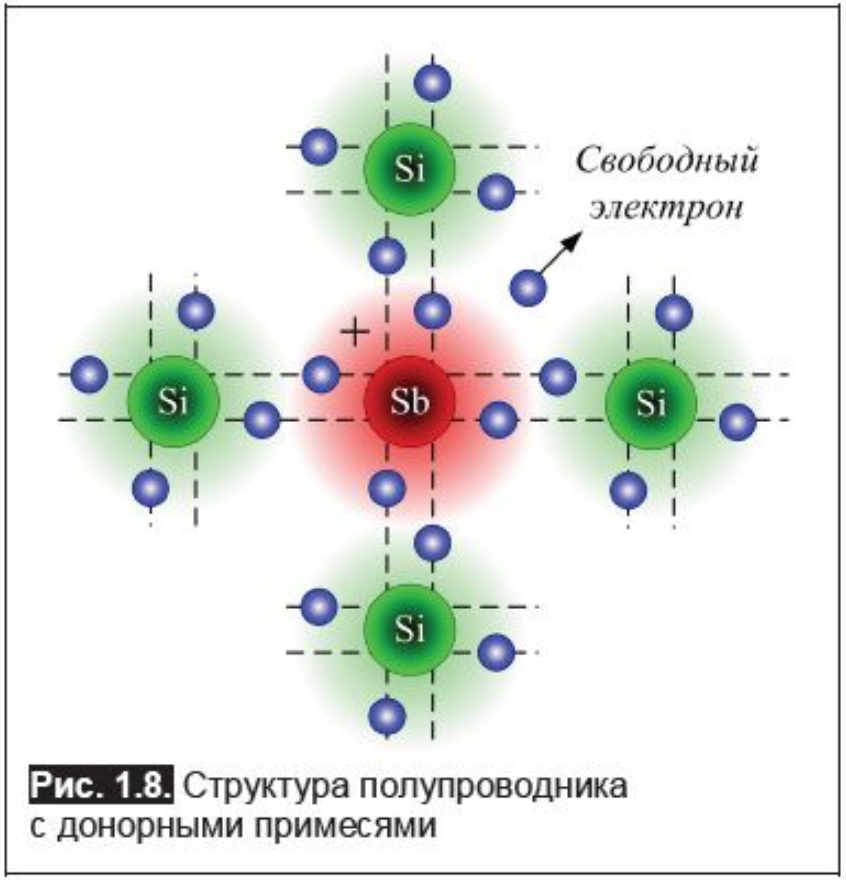


Рис. 1.8. Структура полупроводника с донорными примесями

- Атом примеси, потеряв один электрон, становится положительно заряженным ионом с единичным положительным зарядом.
- Он не может перемещаться внутри кристалла, так как связан с соседними атомами полупроводника межатомными связями, и может лишь совершать колебательные движения около положения равновесия в узле кристаллической решетки.
- Электрическая нейтральность кристалла полупроводника не нарушается, так как заряд каждого электрона, перешедшего в зону проводимости, уравновешивается положительно заряженным ионом примеси.

- Таким образом, полупроводник приобретает свойство примесной электропроводности, обусловленной наличием свободных электронов в зоне проводимости.
- Этот вид электропроводности называется *электронной* и обозначается буквой *n* (негативная, отрицательная проводимость), а полупроводники с таким типом проводимости называются полупроводниками *n*-типа.

- Уровень Ферми будет смещаться вверх, к границе зоны проводимости $W_п$. Малейшее приращение энергии электрона приводит к его переходу в зону проводимости.

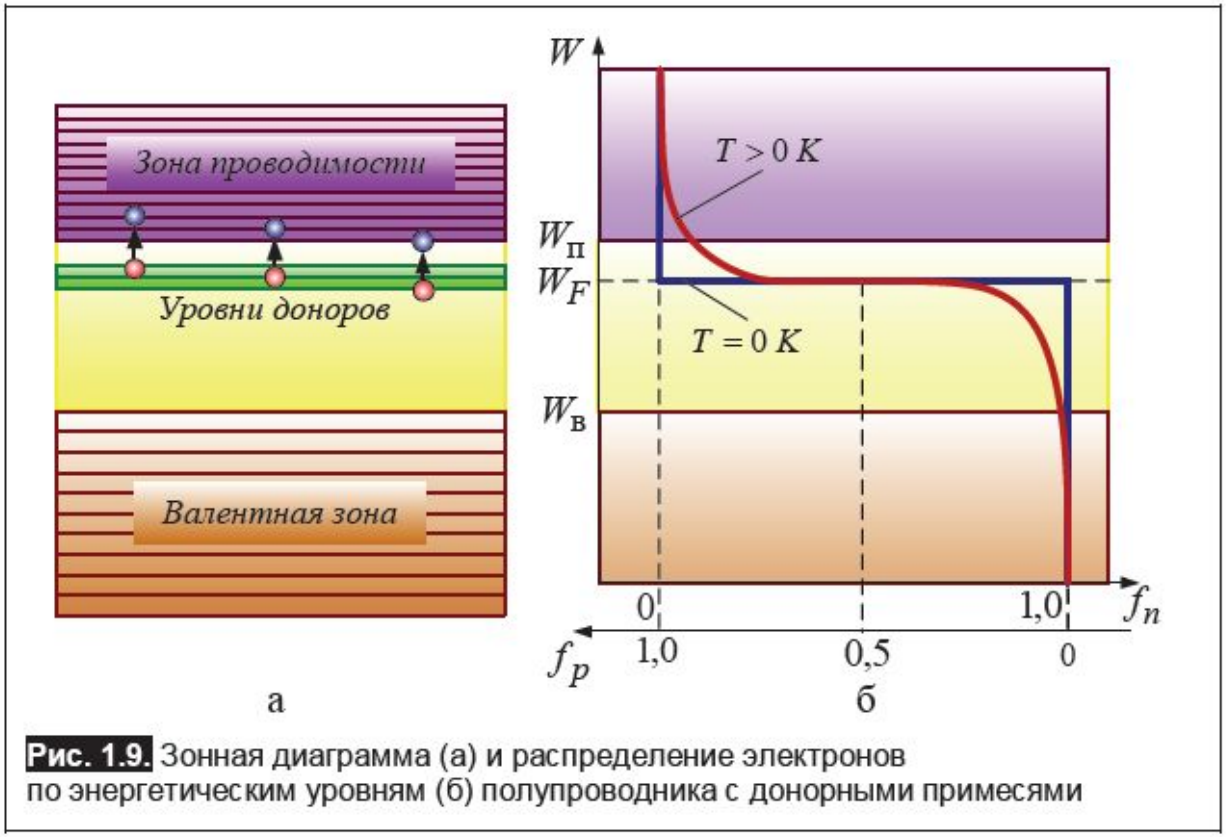
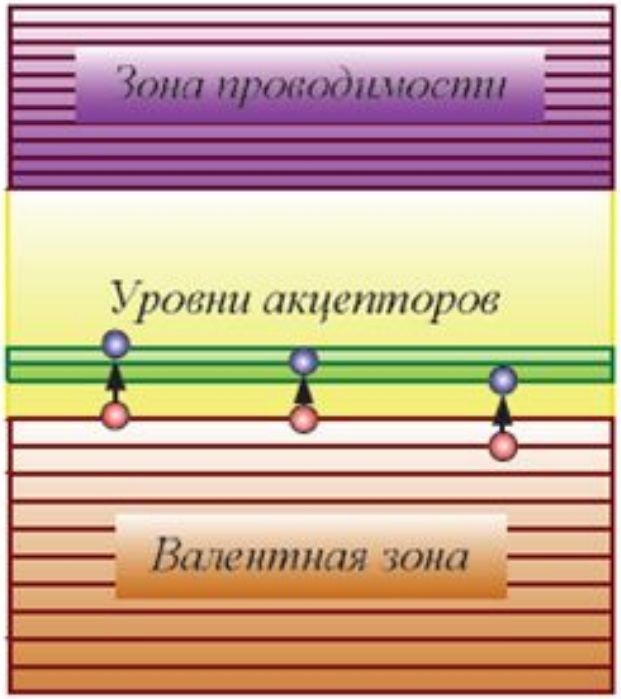


Рис. 1.9. Зонная диаграмма (а) и распределение электронов по энергетическим уровням (б) полупроводника с донорными примесями

Акцепторные примеси

- *Акцептор* – это примесный атом, создающий в запрещенной зоне энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии и способный захватить электрон из валентной зоны в возбужденном состоянии.



Зонная диаграмма полупроводника с акцепторными примесями

•Если в кристаллическую решетку полупроводника кремния ввести атомы примеси - индия (In) (элемент III группы таблицы Менделеева), имеющего на наружной электронной оболочке три валентных электрона, то эти три валентных электрона устанавливают прочные ковалентные связи с тремя соседними атомами кремния из четырех.

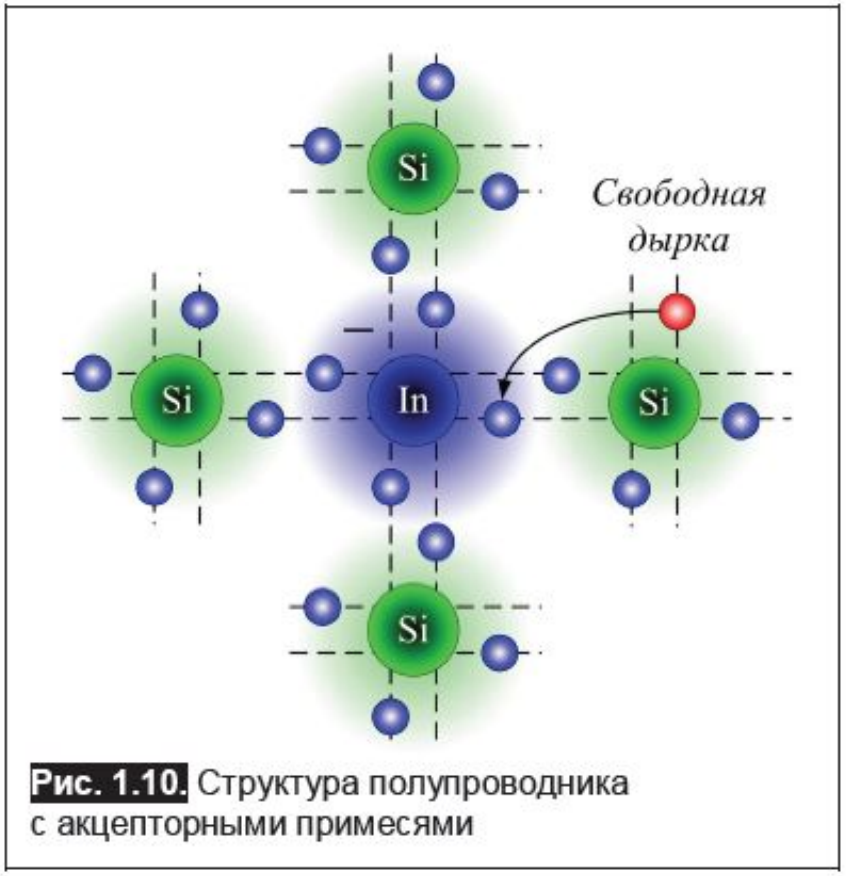


Рис. 1.10. Структура полупроводника с акцепторными примесями

- Одна из связей остается не заполненной.
- Заполнение этой свободной связи может произойти за счет электрона, перешедшего к атому примеси от соседнего атома основного полупроводника при нарушении какой-либо связи.

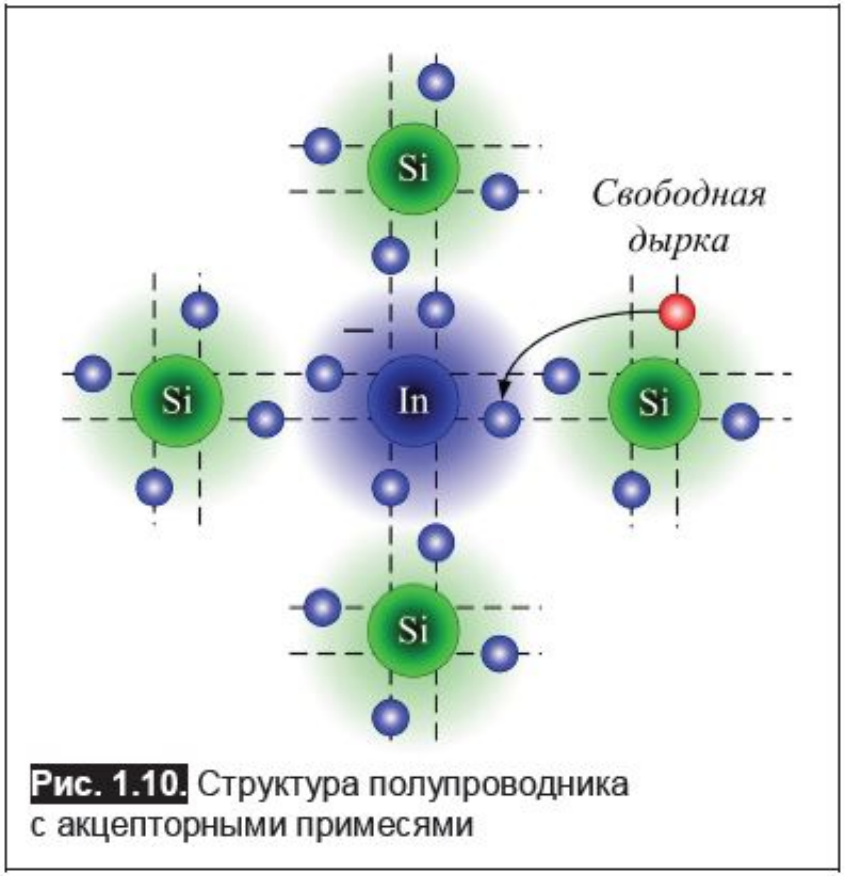


Рис. 1.10. Структура полупроводника с акцепторными примесями

- Атом примеси, приобретая лишний электрон, становится отрицательно заряженным ионом, а дырка, образовавшаяся в атоме основного полупроводника, имея единичный положительный заряд, может перемещаться от одного атома полупроводника к другому внутри кристалла.

- Такой тип проводимости называется *дырочным* и обозначается буквой *p* (позитивный, положительный тип проводимости), а полупроводник называется полупроводником *p*-типа.

- Орицательно заряженные ионы акцепторной примеси в полупроводнике *p*-типа не могут перемещаться внутри кристалла, так как находятся в узлах кристаллической решетки и связаны межатомными связями с соседними атомами полупроводника.
- В целом полупроводниковый кристалл остается электрически нейтральным.

- Вероятность захвата электрона и перехода его в валентную зону возрастает в полупроводниках *p*-типа, поэтому уровень Ферми здесь смещается вниз, к границе валентной зоны

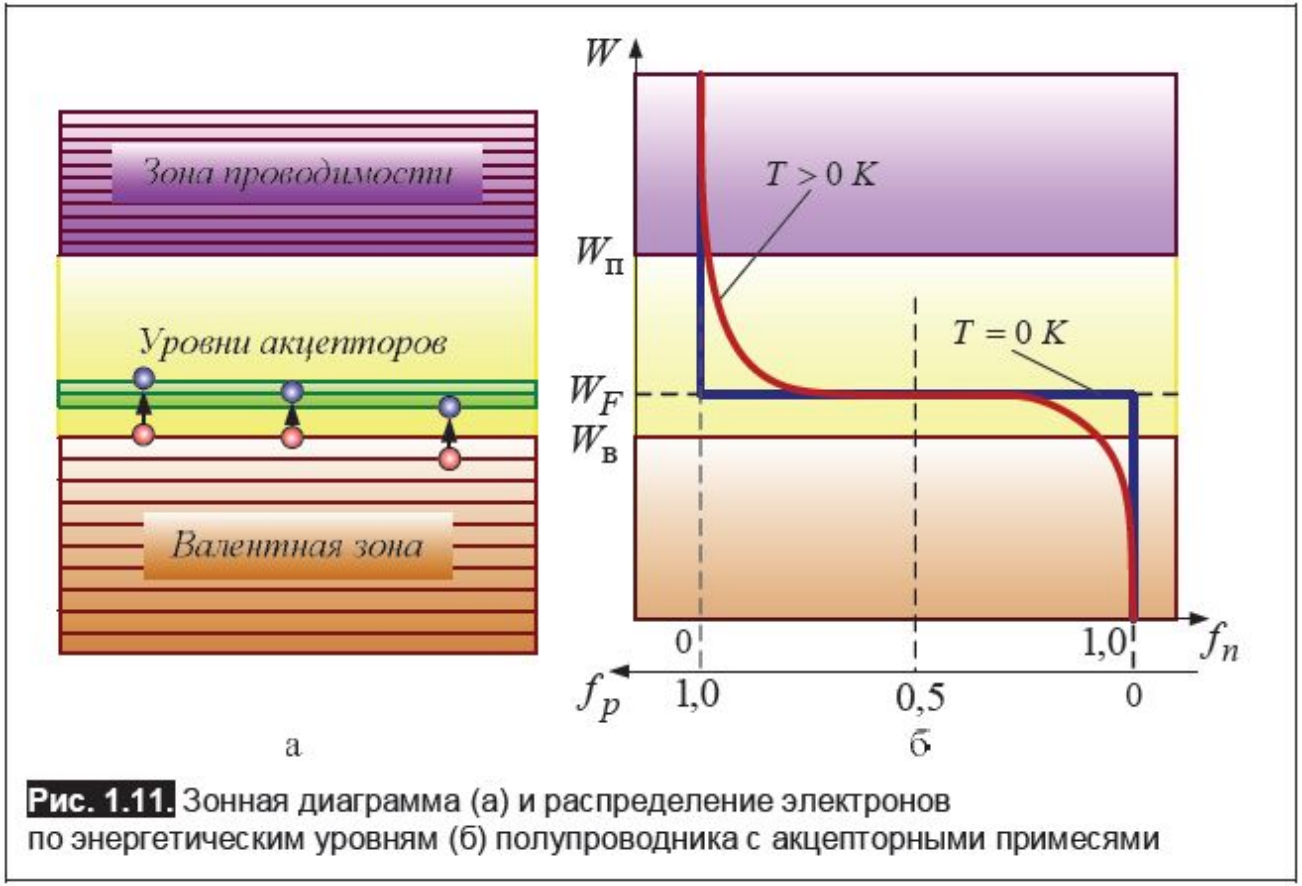


Рис. 1.11. Зонная диаграмма (а) и распределение электронов по энергетическим уровням (б) полупроводника с акцепторными примесями

- При очень больших концентрациях примесей в полупроводниках уровень Ферми может даже выходить за пределы запрещенной зоны либо в зону проводимости (в полупроводниках *n*-типа) либо в зону валентную (в полупроводниках *p*-типа). Такие полупроводники называются *вырожденными*.