В теории полупроводников важно знать, где расположен уровень энергии, вероятность заполнения которого электронами равна 0,5. Этот уровень получил специальное наименование и **называется уровнем Ферми**, по имени известного итальянского физика.

**1. Уровень Ферми в чистом полупроводнике**

Приведем разъяснения где находится уровень Ферми у чистого полупроводника. У чистого полупроводника число электронов в зоне проводимости точно равно числу дырок в валентной зоне. Таким образом, вероятность заполнения симметрично расположенных относительно запрещенной зоны уровней энергии в зоне проводимости и валентной зоне в сумме равна единице. А это значит, что уровень Ферми, вероятность заполнения которого равна 0,5, должен располагаться в середине запрещенной зоны, как это показано на рисунке 1.1, где уровень Ферми обозначен через *EF*.

зона

проводимости

*Eg* - запрещенная зона

уровень Ферми

*EF*

валентная зона

Рис.1.1.

Однако возникает вопрос. Вероятность заполнения уровня Ферми равна 0,5, но он лежит внутри запрещенной зоны. Значит, на этом уровне электроны находиться не могут. Смысл уровня Ферми можно объяснить следующим образом: «Если бы внутри запрещенной зоны в месте расположения уровня Ферми имелись разрешенные энергетические уровни, то они заполнялись бы с вероятностью, которая была бы равна 0,5».

С повышением температуры уровень Ферми смещается вверх к дну зоны проводимости, если  и вниз, если  (рис. 1.). Где mn - эффективная масса электрона и mp - эффективная масса дырки. Однако в большинстве случаев это смещение настолько незначительно, что им часто пренебрегают и считают, что уровень Ферми в собственных полупроводниках располагается посередине зоны.

Рис_1

**Рис. 1.** Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике

**2. Уровень Ферми в примесных полупроводниках n- и р-типов**

Введение донорной примеси в полупроводник n-типа (например, фосфора в германий), сильно увеличивает число электронов в зоне проводимости, не меняя при этом числа дырок в валентной зоне. Это значит, что вероятность заполнения уровней зоны проводимости должна расти и следовательно, уровень Ферми должен сместиться вверх от середины запрещенной зоны ко «дну» зоны проводимости.

Аналогичные рассуждения позволяют утверждать, что в полупроводнике р-типа уровень Ферми должен сместиться от середины запрещенной зоны вниз к «потолку» валентной зоны.

Некоторые примеси весьма существенно влияют на электрические свойства полупроводников. Так, добавление в кремний (Si) бора (B) в количестве одного атома на 105 атомов кремния увеличивает проводимость при комнатной температуре в тысячу раз по сравнению с чистым кремнием.

Для четырехвалентных полупроводников германия (Ge) и кремния (Si) донорными примесями являются атомы пятивалентных элементов, таких, как фосфор (P), мышьяк (As), сурьма (Sb). Название «донор» происходит от лат. donare – дарить. Каждый атом донорной примеси поставляет один электрон. Примесный полупроводник, в котором носителями заряда являются электроны, заряд которых отрицателен, называется полупроводником n-типа (от лат. negativ – отрицательный).

Ge), в которой на месте одного из атомов решетки помещен атом фосфора

(P), у которого пять валентных электронов. Четыре из них образуют ковалент-

ные связи с соседними атомами германия, а пятый, донорный, удерживается у

положительного иона фосфора слабым кулоновским притяжением, наподобие

электрона в атоме водорода.

На рис. 14.1, б, изображена энергетическая зонная схема полупроводника

с донорной примесью.

На энергетической схеме присутствие донорного электрона изображают,

размещая его энергетический уровень на расстоянии Ed от дна зоны проводи-

мости. Для того, чтобы этот электрон перешел в зону проводимости ему, нужно

сообщить энергию Ed.



Eg

Рис. 2.1

Акцепторными примесями для германия и кремния являются атомы

трехвалентных элементов, таких, как бор (B), алюминий (Al), галлий (Ga),

индий (In).

Название «акцептор» происходит от лат. acceptor – приемник. Каждый

атом акцептора забирает из валентной зоны один электрон, создавая в валент-

ной зоне носитель заряда – дырку. Такой примесный полупроводник, в котором

носителями заряда являются положительные дырки, называется полупроводни-

ком p-типа (от лат. positiv – положительный).

На рис. 2.2, а изображена схема кристаллической решетки германия (Ge)

в которой на месте одного из атомов германия помещен атом бора (B), у ко-

торого три валентных электрона. На рис. 2.2, б, изображена энергетическая

зонная схема полупроводника с акцепторной примесью.



Eg

Рис. 2.2

Трехвалентных электронов, которые имеет атом бора, окажется недоста-

точно для образования ковалентных связей с четырьмя соседями: одна из свя-

зей окажется лишь с одним электроном, полученным от атома германия. На эту

незаполненную связь от соседних атомов германия переходит электрон, обра-

зуя положительно заряженную дырку на своем прежнем месте, и атом бора,

в результате, становится отрицательным ионом. Эта дырка будет связана с от-

рицательным ионом бора примерно так же, как донорный электрон связан с по-

ложительным ионом.

На энергетической схеме (рис. 2.2, б) вакантный уровень (с дыркой на

нем) мы должны разместить недалеко от «потолка» валентной зоны, его энер-

гия выше «потолка» валентной зоны на величину Ea. За счет теплового движе-

ния электрон из валентной зоны может перейти на акцепторный уровень, соз-

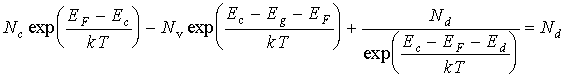
дав свободную дырку в валентной зоне. На пространственной схеме (рис. 2.2, а)

этому процессу соответствует возможность удаления положительной дырки от

отрицательного иона бора на сколь угодно большое расстояние: происходит

ионизация акцептора и переход дырки из связанного состояния в свободное.

Известно следующее уравнение (2.1) относительно положения уровня Ферми *ЕF*



(2.1)

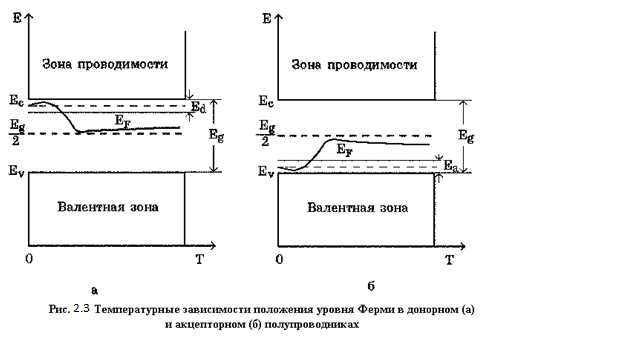
Уравнение (2.1) ввиду его сложности обычно в общем виде не решают, а ограничиваются рассмотрением частных случаев.

Например, при низких температурах, когда электроны в зоне проводимости появляются в основном за счет переходов с примесных уровней, а концентрация дырок близка к нулю, решение уравнения (2.1) имеет вид

http://ok-t.ru/studopedia/baza18/2135312596109.files/image507.png.

(2.2)

Из уравнения (2.2) следует, что при абсолютном нуле температуры энергия Ферми донорного полупроводника находится строго посередине между дном зоны проводимости и донорными уровнями. Температурная зависимость положения уровня Ферми определяется третьим членом в уравнении (2.2), который меняет знак с изменением температуры. Поэтому уровень Ферми с повышением температуры сначала смещается к зоне проводимости, а затем - к валентной зоне (рис. 2.3,а).



Аналогично можно получить выражение для температурной зависимости уровня Ферми в акцепторном полупроводнике. График этой зависимости схематически приведен на рис. 2.3,б.

В собственном полупроводнике уровень Ферми примерно равен уровню Ферми Ei, делящему запрещенную зону ровно пополам.

*EF ≈Ei = (EC + EV)/2 = 0,5Eg*

Для кремния n-типа при комнатной температуре *Eg* = 1,1 эВ, тогда *EF = 0,55 эВ.*



В собственном полупроводнике положение уровня Ферми φ относительно середины запрещенной зоны полупроводника равно:







где *mn* - эффективная масса электрона

*mp* - эффективная масса дырки

*k* - постоянная Больцмана

*Т* - температура в градусах Кельвина

Вышеприведенные формулы позволяют рассчитать положение уровня Ферми в собственном полупроводнике относительно середины запрещенной зоны.

**Примесные полупроводники**

Положение уровня Ферми в примесных полупроводниках относительно дна зоны проводимости (*EC-EF*) или потолка валентной зоны (*EF-EV*) может быть определено из следующих соотношений:

*EC - EF*  = *kT·*ln(*NC/Nd*) , *EF - EV  = kT·*ln(*NV/Na*)

Если полупроводник одновременно легирован донорами с концентрацией *Nd* и акцепторами с концентрацией *Na* , то расчетные формулы принимают следующий вид:

*EC - EF*  = *kT·*ln(*NC/(Nd -Na*) ) при *Nd > Na*

*EF - EV  = kT·*ln(*NV/(Na - Nd*) ) при *Na > Nd*

Из вышеприведенных выражений следует, что при очень сильном легировании полупроводников, когда *Nd > Nc* или *Na > NV* уровень Ферми находится либо в зоне проводимости, либо в валентной зоне. Такие полупроводники называются вырожденными и их свойства напоминают свойства металлов.

**Следует отметить, что в полупроводниках n-типа основными носителями заряда являются электроны, неосновными - дырки. В полупроводниках p-типа - основными носителями заряда являются дырки, а неосновными - электроны.**

Цели работы:

Изучение принципов расчета объемного положения уровня Фермидля собственных полупроводников при различных температурах с учетом различных значений эффективных масс электронов и дырок, приобретение практических навыков по реализации в среде MATLAB принципов расчета и построение на основании данных расчета зонной диаграммы для указанных полупроводников.

Задачи работы:

-знакомство с методикой расчета объемного положения уровня Фермии приобретьение навыков построения зонной диаграммы полупроводников.