

изменяться так, как показано на рис. 5.8. Когда F лежит ниже донорного уровня E_1 , последний пуст, и, следовательно, атомы золота заряжены положительно. Когда F лежит между уровнями E_1 и E_2 , то уровень E_1 практически весь заполнен, а уровень E_2 — пустой. Так как уровень E_1 донорный, то подавляющее большинство атомов будет в нейтральном состоянии и средний их заряд будет близок к нулю. После перехода уровня Ферми через второй (акцепторный) уровень энергии E_2 практически все атомы будут содержать два электрона, а, следовательно, средний заряд будет близок к $-e$, и т. д. При последовательном повышении уровня Ферми атомы золота будут проходить через все возможные для них зарядовые состояния $e, 0, -e, -2e, -3e$.

§ 13. Определение положения уровня Ферми

В предыдущих рассуждениях мы считали, что уровень Ферми задан. Посмотрим теперь, как можно найти положение уровня Ферми.

Ответ на этот вопрос зависит от того, какие другие величины заданы. Если известны концентрации носителей заряда в зонах n и p , то значение F можно определить из формул §§ 4—6. Так, например, для невырожденного полупроводника n -типа из (5.1) мы имеем

$$F = E_c - kT \ln \frac{N_c}{n}.$$

Аналогично, для невырожденного полупроводника p -типа из (5.2) получаем

$$F = E_v + kT \ln \frac{N_v}{p}.$$

Эти выражения дают уже известный нам результат, что чем больше концентрация основных носителей, тем ближе уровень Ферми к краю соответствующей зоны.

Однако чаще мы встречаемся с задачей, когда задан состав кристалла, т. е. концентрации и типы содержащихся в нем примесей (их энергетические уровни), а концентрации свободных и связанных носителей заряда, напротив, должны быть вычислены. В этом случае положение уровня Ферми можно найти из условия электрической нейтральности образца.

Из классической электродинамики известно, что в однородной проводящей среде в состоянии равновесия объемный заряд в любой точке равен нулю. Возникший же по тем или иным причинам заряд рассасывается под действием кулоновских сил за время порядка максвелловского времени релаксации

$$\tau_M = \frac{\epsilon}{4\pi\sigma}, \quad (13.1)$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость, σ — удельная электропроводность. Для типичных полупроводников τ_M весьма мало. Так, например, при $\epsilon \sim 10$ и $\sigma \sim 1 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1} = 9 \cdot 10^{11} \text{ ед. СГСЭ}$

мы имеем $\tau_M \sim 10^{-12}$ с. Поэтому в стационарном состоянии или даже при периодическом изменении состояния с частотой ω , удовлетворяющей условию $\omega\tau_M \ll 1$, внутренность полупроводника можно считать нейтральной.

Отсюда следует, что в равновесии концентрации положительно заряженных частиц должны быть всегда равны концентрациям отрицательных частиц. Положим, что в полупроводнике имеются доноры одного и того же типа с концентрацией N_d и, кроме того, акцепторы (тоже одинакового типа) с концентрацией N_a . Положительными частицами являются, во-первых, подвижные дырки с концентрацией p . Во-вторых, мы имеем еще связанные положительные заряды p_t в виде положительно заряженных доноров.

В случае простых доноров

$$p_t = N_d (1 - f) \quad (\text{простые доноры}), \quad (13.2)$$

где, как и раньше, f — вероятность заполнения донора электроном, выражаемая первой формулой (9.3) (где индекс 1 опущен).

Соответственно для многозарядных доноров, имеющих в нейтральном состоянии M избыточных электронов,

$$p_t = N_d \sum_{j=0}^{M-1} (M-j) f^{(j)} = N_d \sum_{j=1}^M j f_p^{(j)} \quad (\text{многозарядные доноры}), \quad (13.2a)$$

где $f^{(j)}$ — вероятность донору иметь j электронов (формула (11.8)).

Концентрация отрицательных частиц складывается из концентрации электронов в зоне n и концентрации отрицательно заряженных акцепторов. Если n_t есть концентрация связанных элементарных зарядов, то для случая простых акцепторов

$$n_t = N_a f \quad (\text{простые акцепторы}). \quad (13.3)$$

Аналогично, для многозарядных акцепторов

$$n_t = N_a \sum_{j=1}^M j f^{(j)} \quad (\text{многозарядные акцепторы}). \quad (13.3a)$$

После этого условие электрической нейтральности можно записать в виде

$$p + p_t - n - n_t = 0. \quad (13.4)$$

Если в полупроводнике имеются доноры и акцепторы разных типов, то под p_t и n_t нужно понимать суммарные концентрации связанных элементарных зарядов.

Каждая из величин p , p_t , n и n_t зависит от значения уровня Ферми, и поэтому уравнение (13.4) можно использовать для его опре-

деления. Однако это уравнение является трансцендентным, и поэтому для его решения приходится либо пользоваться либо численными методами, либо исследовать различные частные случаи, к которым мы и обратимся.

§ 14. Уровень Ферми в собственном полупроводнике

Для собственного полупроводника $p_i, n_i \ll n, p$ и условие нейтральности принимает вид $n = p$. Если ширина запрещенной зоны полупроводника достаточно велика, так что она охватывает много kT , и если эффективные массы электронов и дырок m_n и m_p одного порядка, то уровень Ферми будет достаточно удален от краев зон и полупроводник будет невырожденным. Поэтому, пользуясь для n и p выражениями (5.1) и (5.2), имеем

$$N_c \exp \frac{F - E_c}{kT} = N_v \exp \frac{E_v - F}{kT}.$$

Это дает

$$F = E_i - \frac{1}{2} kT \ln \frac{N_c}{N_v} = E_i - \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_n}{m_p}, \quad (14.1)$$

где через $E_i = \frac{1}{2} (E_v + E_c)$ обозначена энергия середины запрещенной зоны.

Эта зависимость показана схематически на рис. 5.9. Там же отмечены края зон E_v и E_c и учтено, что ширина запрещенной зоны $E_g = E_c - E_v$ сама изменяется с температурой. При $T = 0$ уровень Ферми располагается точно в середине запрещенной зоны. При повышении температуры он удаляется от зоны более тяжелых носителей заряда и приближается к зоне более легких.

Для полупроводников с узкой запрещенной зоной (HgSe, HgTe, серое олово и др.) даже при комнатной температуре приходится уже учитывать вырождение, и поэтому для n и p нужно брать общие выражения (4.4) и (4.6).

Из выражения (14.1) и рис. 5.9 видно, что если m_n и m_p весьма различны, то при повышении температуры уровень Ферми может приблизиться к зоне легких носителей на расстояние порядка kT и даже оказаться внутри этой зоны. Поэтому такие полупроводники при нагревании могут стать вырожденными. Этот случай мы имеем, например, в InSb, где $m_n \ll m_p$. При этом оказывается, что уровень Ферми попадает в зону проводимости при температурах $T \gtrsim 440$ К.

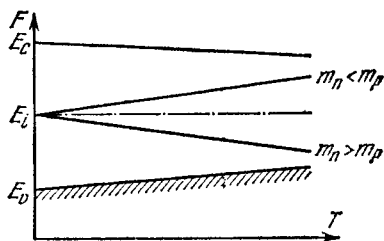


Рис. 5.9. Зависимость положения уровня Ферми от температуры в собственном полупроводнике (схематически).