

Так же, как и выше, для невырожденных полупроводников в формулы (9.10) удобно ввести концентрацию дырок в зоне  $p$ . Учитывая формулу (5.2), имеем

$$f_p^{(1)} = \frac{p}{p+p_1}, \quad f_p^{(0)} = \frac{p_1}{p+p_1}, \quad (9.12)$$

где

$$p_1 = \frac{g_{0,p}}{g_{1,p}} N_v \exp\left(-\frac{\mathcal{E}_p}{kT}\right), \quad (9.13)$$

а величина  $\mathcal{E}_p = E_1 - E_v$  равна энергии отщепления дырки. По-прежнему, с точностью до множителя  $g_{0,p}/g_{1,p}$ ,  $p_1$  равно концентрации дырок в зоне, когда уровень Ферми совпадает с уровнем энергии центра  $E_1$ .

Во всех предыдущих рассуждениях мы ничего не говорили о характере рассматриваемых центров, т. е. о том, являются ли они донорами или акцепторами. Это обстоятельство действительно не играет никакой роли при вычислении вероятностей заполнения центров электронами или, соответственно, дырками, так как вероятности заполнения зависят только от энергетического спектра центров и положения уровня Ферми. Однако донорный или акцепторный характер центров должен учитываться при вычислении связанного заряда, т. е. концентраций заряженных центров. В случае, если центры являются донорами, они нейтральны, если с ними связан электрон (т. е. нет дырки), и положительно заряжены, если на них не имеется электрона (захвачена дырка). И наоборот, если центры являются акцепторами, они нейтральны, если с ними связана дырка (не имеется электрона), и отрицательно заряжены, когда не имеется дырки (захвачен электрон).

## § 10. Многозарядные центры

В § 11.9 мы уже говорили, что многие примесные атомы создают в полупроводниках «многозарядные» центры, способные присоединять или отдавать не один, а несколько носителей заряда. Поэтому мы обобщим полученные выше результаты на этот более сложный случай.

Положим, что рассматриваемые центры могут содержать 0, 1, 2, ...,  $M$  электронов и, соответственно, находиться в  $(M+1)$  различных зарядовых состояниях. Энергетическая диаграмма полупроводника с такими центрами для случая  $M=3$  показана на рис. 5.7. Если центр пустой, то для электрона существует некоторое вакантное основное квантовое состояние, характеризующее локальным уровнем энергии  $E_1$ . Для этого уровень Ферми  $F$  должен быть расположен ниже уровня  $E_1$  на несколько  $kT$  (рис. 5.7, а). Если  $E^{(0)}$  есть энергия пустого центра, то  $(E_1 - E^{(0)})$  равно приращению энергии центра при захвате первого электрона. Однако сама величина

$E^{(0)}$  для нас не играет никакой роли. Это обстоятельство будет проявляться в последующих формулах в том, что в них нигде не будет входить  $E^{(0)}$ , а будут содержаться только разности энергетических уровней  $E_1$ ,  $E_2$  и т. д. и уровня Ферми  $F$ .

Помимо основного состояния с энергией  $E_1$ , захваченный электрон может находиться в различных возбужденных состояниях, уровни энергии которых будут расположены выше уровня  $E_1$ .

Эти уровни не изображены на рис. 5.7.

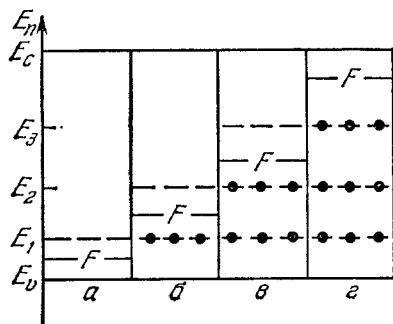


Рис. 5.7. Энергетическая диаграмма полупроводника с многозарядными центрами, создающими три локальных уровня энергии.

центров («альтернативные» уровни), отличающая его от системы уровней, создаваемых несколькими простыми центрами разных типов. В последнем случае вся совокупность локальных уровней всегда существует полностью, независимо от степени заполнения отдельных уровней.

Ситуация, изображенная на рис. 5.7, б, возникает тогда, когда уровень Ферми  $F$  расположен выше уровня  $E_1$ , но ниже уровня  $E_2$  (см. ниже). При заполнении электронами уровня  $E_2$  возникают новые квантовые состояния с энергией  $E_3$  и т. д., которые могут быть либо заполненными, либо пустыми в зависимости от положения уровня Ферми (рис. 5.7, в, г).

## § 11. Распределение Гиббса

Для вычисления вероятности заполнения электронами многозарядных центров уже нельзя использовать функцию Ферми (3.1), а необходимо исходить из более общего принципа статистической физики — канонического распределения Гиббса для системы с переменным числом частиц. Рассмотрим изолированную систему, содержащую очень большое число одинаковых частиц  $N_0 = \text{const}$  и обладающую определенной внутренней энергией  $E_0 = \text{const}$ . Выделим внутри этой системы малую ее часть, ограниченную по-