

и  $\mathcal{E}_v$ , а концентрация дырок экспоненциально зависит от  $T$ . В компенсиров. П.  $n$ -типа при низких темп-рах  $\mathcal{E}_F$  практически совпадает с донорным уровнем, а зависимость  $n(T)$  при  $n \ll N_d$  имеет вид

$$n = N_c \frac{N_d - N_a}{2N_a} \exp(-\mathcal{E}_d/kT). \quad (22)$$

На рис. 5 схематически показана зависимость  $\ln(1/n)$  от  $1/T$  в П.  $n$ -типа. Крутой участок (I) соответствует собств. П. Согласно (16), энергия активации, характеризующая угол наклона прямой в этой области, равна  $\mathcal{E}_d/2$ . В области II все доноры ионизованы и  $n = N_d - N_a$ . В самой низкотемпературной области (III) почти все электроны находятся на примесях и энергия активации, согласно (22), равна  $\mathcal{E}_d$ . В слабокомпенсиров. П., где  $K \ll 1$ , между областями III и II существует область, в к-рой, согласно (20), энергия активации равна  $\mathcal{E}_d/2$ .

Т. о., концентрации подвижных электронов и дырок в П. экспоненциально уменьшаются с темп-рой, обращаясь в 0 при  $T = 0$  К (рис. 5). Это явление наз. «вы-

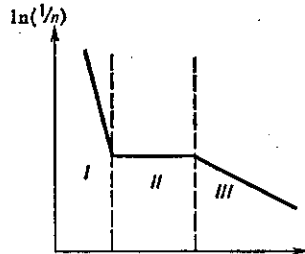


Рис. 5. Зависимость логарифма концентрации электронов  $\ln(1/n)$  от  $1/T$  в полупроводнике  $n$ -типа.

мораживанием» носителей. Оно объясняется локализацией носителей на примесях. Однако при достаточно большой концентрации примесей это свойство исчезает.

**Сильнолегированные полупроводники.** При достаточно высокой концентрации примесей существует остаточная концентрация подвижных электронов (или дырок), примерно равная концентрации примесей и слабо зависящая от  $T$  при низких темп-рах. Это приводит к появлению остаточной электропроводности металлич. типа, т. е. слабо зависящей от  $T$ . Напр.: в  $n$ -Si с примесью P остаточная электропроводность наблюдается при  $N_d > 3,7 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, в  $n$ -Ge с примесью Sb — при  $N_d > 1,5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup>.

Переход к металлич. электропроводности объясняется сближением соседних примесных уровней, вследствие чего образуется примесная энергетич. зона, к-рая, в конечном счёте, перекрывается с зоной проводимости. Критич. концентрация  $N_{кр}$ , при к-рой появляется электропроводность металлич. типа, как правило, описывается соотношением

$$N_{кр} a^3 \approx 0,02, \quad (23)$$

где  $a$  — радиус примесного состояния (расстояние, на к-ром волновая ф-ция примесного состояния спадает в  $e$  раз), соответствующий данному сорту примесей в условиях слабого легирования. При концентрациях доноров  $N_d$ , удовлетворяющих неравенству  $N_d a^3 \gg 1$ , электронный газ при  $T = 0$  К можно считать идеальным. Действительно, уровень Ферми находится в зоне проводимости и при стандартном спектре выражается зависимостью

$$\mathcal{E}_F = (3\pi^2)^{2/3} / \hbar^2 n^{1/3} / 2m, \quad (24)$$

причём в отсутствие компенсации ( $N_a = 0$ )  $n = N_d$ . При  $N_d a^3 \gg 1$  энергия Ферми  $\mathcal{E}_F$  больше, чем энергия взаимодействия электронов с примесями и друг с другом. Поэтому электронный газ можно считать идеальным.

Т. о., статистика электронов в сильнолегиров. П. такая же, как в металлах, хотя концентрация носите-

лей значительно ниже металлической. При достаточно высоких  $T$  ( $kT \gg \mathcal{E}_F$ ) фермиевское вырождение электронного газа исчезает, электронный газ становится максвелловским, а  $\mathcal{E}_F$  определяется ф-лой (18).

Если в П.  $n$ -типа имеются также акцепторы, то в ф-лу (24) следует подставить  $n = N_d - N_a$ . При точной компенсации, когда  $N_d$  и  $N_a$  достаточно близки, электронный газ не является идеальным. Электроны находятся в поле со случайным потенциалом, создаваемым донорами и акцепторами. Случайный потенциал можно рассматривать как искривление «дна» зоны проводимости  $\mathcal{E}_c$ . При очень точной компенсации характерная амплитуда случайного потенциала становится больше, чем  $\mathcal{E}_F$ , определяемая ф-лой (24). При этом электроны находятся лишь в самых глубоких местах потенц. рельефа, образуя изолированные друг от друга к а п и (рис. 6). При  $T = 0$  К такая система становится диэлектриком. Электропроводность осуществляется путём теплового заброса электронов на т. н. уровень протекания (см. Протекания теория).

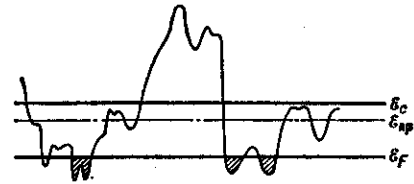


Рис. 6. Энергетическая схема компенсированного полупроводника. Извилистая линия изображает искривление «дна» зоны проводимости, верхняя сплошная линия — энергию «дна» зоны проводимости в отсутствие примесного потенциала, нижняя сплошная линия — уровень Ферми, штрих-пунктирная линия — уровень протекания. Заштрихованы области, занятые электронами (электронные капли).

### Процессы переноса

**Электропроводность.** Носителями заряда в П., помимо электронов, могут быть и ионы, однако ионная электропроводность в типичных П. пренебрежительно мала (исключение — ионные суперпроводники). В П. осуществляются 3 гл. механизма электронного переноса: основной зонный перенос (движение электрона связано с изменением его энергии в пределах одной, разрешённой энергетич. зоны); прыжковый перенос по локализов. состояниям (см. Прыжковая проводимость); поляронный перенос (см. Полярон).

Электропроводность П. меняется в очень широких пределах при изменении темп-ры и концентрации примесей. Изменение происходит как за счёт изменения концентрации подвижных носителей  $n$ , так и за счёт изменения характера их рассеяния. Электропроводность  $\sigma$  можно представить в виде

$$\sigma = en\mu, \quad (25)$$

где  $\mu$  — подвижность носителей заряда, к-рая в невырожденном П. не зависит (или зависит слабо) от  $n$ . Подвижность определяется отношением дрейфовой скорости  $v_{др}$  носителей под действием электрич. поля к напряжённости поля  $E$ :

$$\mu = v_{др}/E. \quad (26)$$

Существуют прямые методы измерения подвижности, основанные на соотношении (26), но чаще всего подвижность определяют по величине  $\sigma$  и коэф. Холла  $R_H$ , измеренному в слабом магн. поле  $H$  (см. Холла эффект):

$$\mu = R_H \sigma. \quad (27)$$

Подвижность, определённую таким способом, часто наз. холловской. Она может отличаться от подвижности, определяемой ф-лой (26).

Величина  $\mu$  и её температурная зависимость определяются состоянием носителя (зонное, примесное, по-