

Лекция 10. Электропроводность в сильных электрических полях

Движение электрона во внешнем электрическом поле можно показать на картине зон. По горизонтальной оси отложим координату x электрона, а по вертикали – значение энергии электрона E при движении его в периодическом поле частиц кристалла. Энергетические уровни изобразим горизонтальными линиями.

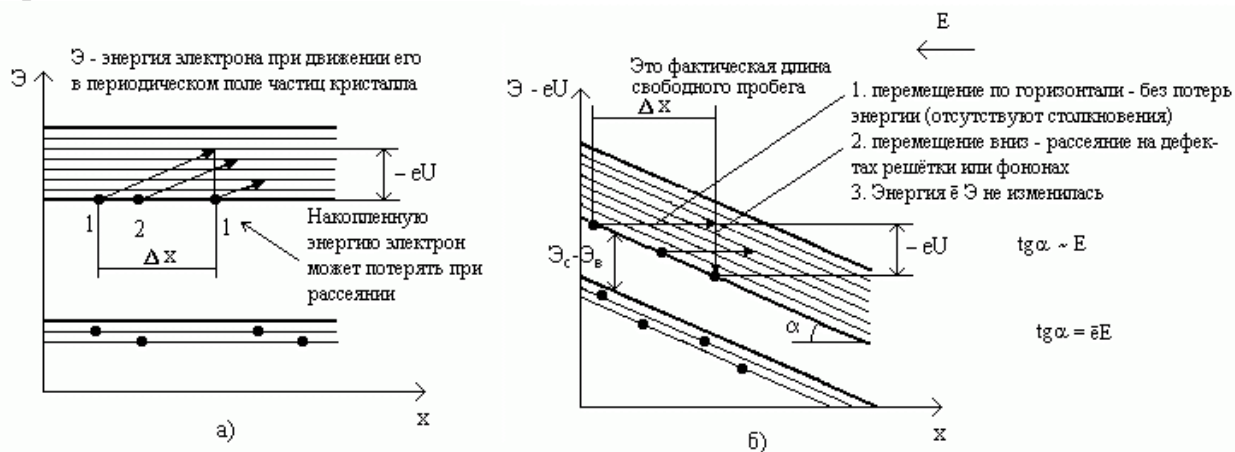


Рис.87: Движение электрона во внешнем электрическом поле

Двигаясь в электрическом поле, электрон меняет и свою координату, и энергию, переходя с одного уровня на другой (рис.87 а). При этом *кинетическая энергия* его *увеличивается* на величину eU (где U - пройденная электроном разность потенциалов), а *потенциальная энергия* уменьшается на ту же величину, так как *полная энергия не меняется*. Накопленную энергию электрон может потерять при рассеянии, вернувшись на более низкий уровень (электрон 1). Иногда удобнее откладывать по вертикальной оси полную энергию электрона с учётом внешнего электрического поля. Тогда движение электрона следует изображать горизонтальной линией, а энергетические уровни - наклонными (рис.87 б). Тангенс угла наклона энергетических уровней при этом оказывается пропорциональным напряжённости электрического поля.

Электрон, двигаясь в приложенном поле, приобретает дополнительную энергию $\Delta\varepsilon$, которую затем отдает решетке посредством электрон-фононного взаимодействия (электрон 1). Если значение поля E не велико ($E < 10^5$ В/м), то электроны отдают всю лишнюю энергию решетке, сохраняя свою энергию почти постоянной. С дальнейшим увеличением поля энергия электрона не успевает переходить в решетку и начинает накапливаться. В результате температура носителей становится более высокой, чем температура решетки. Указанный эффект называют разогревом электронного газа, а сами электроны и дырки – «горячими» носителями.

Для наблюдения закона Ома необходимо, чтобы подвижность носителей заряда и их концентрация не зависели от напряжённости электрического поля.

В области слабых электрических полей независимость подвижности определяется пренебрежимо малым изменением тепловых скоростей носителей заряда в полупроводнике от напряжённости поля. При достаточно большой напряжённости поля происходит разогрев электронного газа, вследствие чего увеличивается тепловая скорость носителей заряда. Тогда в соответствии с выражением

$$\mu = \frac{qL}{m^* \bar{u}} \quad (0.1)$$

подвижность носителей заряда в сильных полях будет уменьшаться с увеличением напряженности поля. Таким образом, дрейфовая скорость $v_{др} = \mu E$ с ростом напряженности будет оставаться неизменной и равной скорости насыщения (рис. 3.9).

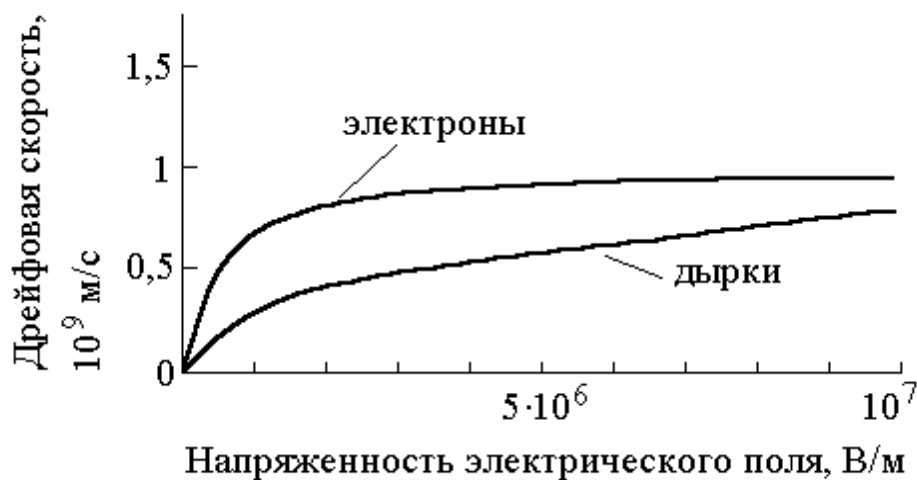


Рис. 3.9. Зависимости дрейфовых скоростей электронов и дырок в Si от напряженности электрического поля

На практике, однако, далеко не всегда удаётся наблюдать уменьшение проводимости полупроводников в сильном электрическом поле вследствие снижения подвижности носителей заряда. Это объясняется тем, что в большинстве случаев возрастание напряжённости поля приводит к значительному увеличению концентрации носителей заряда.

При повышении напряженности приложенного электрического поля до 10^6 - 10^7 В/м начинаются процессы ударной и электрической ионизации атомов, что также сопровождается увеличением концентрации свободных носителей. При ударной (лавинной) ионизации электрон, движущийся в сильном поле, накапливает кинетическую энергию, достаточную для ионизации атомов вещества. Образовавшийся при этом освобожденный электрон также ускоряется полем и вызывает ионизацию другого атома. Процесс столкновения электрона носит неупругий характер, что проявляется в изменении энергии электрона при столкновении. Многократное повторение столкновений с рождением новых свободных электронов приобретает лавинный характер. Ударная ионизация наиболее характерна для примесных

полупроводников, когда энергия, необходимая для перехода электрона с примесного уровня в зону проводимости, невелика.

Электростатическая ионизация (эффект Зенера) наблюдается в сильных электрических полях с $E \sim 10^6\text{-}10^7$ В/м за счет туннельного перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости. Туннельный эффект возникает за счет искривления энергетических зон при указанных напряженностях электрического поля. На энергетической диаграмме это выглядит как наклон зон, пропорциональный полю E (рис. 3.12). При этом определенному значению энергии электрона могут соответствовать состояния и в валентной зоне, и в зоне проводимости. При $E \sim 10^7$ В/м расстояние между эквивалентными положениями в зонах составляет около $1 \text{ \AA}$.



Рис. 3.12. Эффект Зенера