

Поляризация среды поддерживается электрич. полем [или, точнее, электрич. смещением $D(x)$, создаваемым носителями заряда (см. *Диэлектрики*)]. Полная поляризация среды создается не только смещением ионов из положений равновесия (ионная поляризация), но и деформацией электронных оболочек ионов (электронная поляризация). Оба эти механизма поляризации возникают в присутствии статич. электрич. поля и описываются статич. *диэлектрической проницаемостью* ϵ_0 :

$$P_{\text{полн}}(x) = \frac{1}{4\pi} \left(1 - \frac{1}{\epsilon_0} \right) D(x);$$

здесь $P_{\text{полн}}$ — полный дипольный момент, создаваемый обоими факторами. Однако при исследовании электронно-колебат. взаимодействия, обусловленного оптич. фононами, следует учесть только ионную поляризацию, так что из $P_{\text{полн}}$ следует исключить электронную поляризацию $P_{\text{эл}}(x)$, к-рая является безынерционной и удовлетворяет соотношению $P_{\text{эл}}(x) = (4\pi)^{-1} (1 - 1/\epsilon_\infty) D(x)$, где ϵ_∞ является высокочастотной частью диэлектрич. проницаемости, равной квадрату показателя преломления света в среде.

Поэтому часть поляризации среды, обусловленная инерционным движением ионов, определяется разностью двух вышеприведённых величин:

$$P(x) = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) D(x). \quad (10)$$

Далее, в (9) следует подставить разложение по плоским волнам продольной части вектора $P(x)$:

$$P(x) = \sum_q \sqrt{\frac{\hbar\omega_q}{8\pi V}} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right) \frac{q}{q} (a_q + a_q^+) e^{-iqx}.$$

Гамильтониан Э.-ф. в. по-прежнему имеет вид (7), но коэффициенты A_q в данном случае имеют иной вид:

$$A_q = -\frac{4\pi i}{q} \sqrt{\frac{\hbar\omega_q e^2}{8\pi V}} \left(\frac{1}{\epsilon_\infty} - \frac{1}{\epsilon_0} \right).$$

Модель Бардина — Пайнса. Простая модель Блоха для Э.-ф. в. в металле нуждается в уточнении ввиду значит. концентрации электронов проводимости и важности учёта межэлектронного взаимодействия, к-рое перенормирует осн. динамич. величины. Помимо экранировки кулоновского взаимодействия и замены закона $1/r$ на $\exp(-k_s r)/r$ существенно меняется величина матричных элементов Э.-ф. в., а также характер закона дисперсии фононов.

Согласно более точной модели Бардина — Пайнса, электроны проводимости двигаются в непрерывной положительно заряженной среде и взаимодействуют как между собой по закону Кулона, так и с продольными колебаниями этой среды (фононами). Гамильтониан такой системы состоит из гамильтониана свободных блоховских электронов H_e^0 , свободных фононов H_{ph}^0 и двух слагаемых взаимодействия: H_{e-ph} является электрон-фононным, а H_{e-e} — электрон-электронным кулоновским взаимодействием:

$$H = H_e^0 + H_{ph}^0 + H_{e-ph} + H_{e-e}, \quad (11)$$

где

$$H_e^0 = \sum_{k\sigma} E(k) C_{k\sigma}^+ C_{k\sigma}, \quad H_{ph}^0 = \sum_q \hbar\omega_q (a_q^+ a_q + 1/2),$$

$$H_{e-ph} = \sum_{kq\sigma} A_q (a_q + a_q^+) C_{k\sigma}^+ C_{k-q,\sigma},$$

$$H_{e-e} = \frac{1}{2V} \sum_{kpq\sigma\sigma'} \sum V(k) C_{k-p,\sigma}^+ C_{q,\sigma}^+ C_{q\sigma} C_{p\sigma},$$

$$V(k) = \frac{4\pi e^2}{k^2}, \quad A_q = -\frac{4\pi}{q} \sqrt{\frac{n_i(Ze)^2}{MV2\omega_q}};$$

здесь M — масса иона, Ze — его заряд, V — объём системы, $n_i = N_i/V$ — плотность ионов. Частота ω_q продольных колебаний ионов обладает слабой дисперсией. При $q=0$ эта

частота равна плазменной ионной частоте

$$\omega_{pi} = \frac{4\pi n_i(Ze)^2}{M}.$$

Отметим, что в рассматриваемой модели имеет место свойство

$$\frac{VAq^2}{\omega_{pi}^2} = V(q).$$

Модель Бардина — Пайнса учитывает наиб. существенные особенности металлов и приводит к качественно верному описанию Э.-ф. в. в них.

Лит.: Бёте Г. А., Зоммерфельд А., *Электронная теория металлов*, пер. с нем., Л.—М., 1938; Зейтц Ф., *Современная теория твёрдого тела*, пер. с англ., М.—Л., 1949; Пекар С. И., *Исследования по электронной теории кристаллов*, М.—Л., 1951; Пайерлс Р., *Квантовая теория твёрдых тел*, пер. с англ., М., 1956; Джайман Дж., *Электроны и фононы*, пер. с англ., М., 1962; Пайнс Дж., *Элементарные возбуждения в твёрдых телах*, пер. с англ., М., 1965; Киттель Ч., *Квантовая теория твёрдых тел*, пер. с англ., М., 1967; Киреев П. С., *Физика полупроводников*, 2 изд., М., 1975; Ашкрофт Н., Мермин Н., *Физика твёрдого тела*, пер. с англ., т. 1—2, М., 1979; Хакен Х., *Квантовая теория твёрдого тела*, пер. с нем., М., 1980; Ридли Б., *Квантовые процессы в полупроводниках*, пер. с англ., М., 1986; Bardeen J., Pines D., *Electron-phonon interaction in metals*, «Phys. Rev.», 1955, v. 99, p. 1140; Bloch F., *Quantum mechanics of electrons in crystal lattices*, «Z. Phys.», 1928, Bd 52, S. 555.

В. А. Москаленко, Ю. Г. Рудой.

ЭЛЕКТРОНЫ ПРОВОДИМОСТИ — электроны твёрдого тела, упорядоченное движение к-рых (дрейф) обуславливает электропроводность. В твёрдых телах часть электронов (как правило, валентные) отрывается от своих атомов. Области разрешённых значений энергии делокализованных электронов — разрешённые зоны — чередуются с запрещёнными зонами. Э. п. — электроны частично заполненных разрешённых зон — зон проводимости (см. *Зонная теория*). В *полупроводниках* Э. п. появляются только при нек-ром возбуждении (достаточно высокой темп-ре, освещении, внедрении примесей и т. п.). В *металлах* Э. п. есть всегда: при $T=0$ К они занимают все состояния с энергией, меньшей *ферми-энергии*.

Состояние Э. п. сходно с состоянием свободного электрона, но с *эффективной массой*, отличной от массы свободного электрона. Как квазичастица Э. п. характеризуется *квазиимпульсом* p и законом дисперсии $\epsilon(p)$. Внутри разрешённой зоны $\epsilon(p)$ — сложная периодич. ф-ция.

Свойства Э. п. удобно описывать в терминах кинетич. теории газов (газ квазичастиц). В полупроводниках, если Э. п. относительно мало, газ Э. п. хорошо описывается *Больцмановым распределением*. В металлах Э. п. образуют вырожденный ферми-газ при всех темп-рах (см. *Вырожденный газ*). Для описания взаимодействий между Э. п. используют теорию *ферми-жидкости*.

Лит. см. при ст. *Твёрдое тело*.

Э. М. Эпштейн.

ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ в твёрдых телах — взаимодействие между *электронами проводимости*. Э.-э. в. определяет *межэлектронное рассеяние*, плазменные колебания и экранирование (см. *Плазма твёрдых тел*). Осн. вклад в Э.-э. в. вносит непосредств. кулоновское взаимодействие. Э.-э. в. также осуществляется посредством обмена *фононами* (см. *Электрон-фононное взаимодействие*). Такое взаимодействие может приводить к эфф. притяжению между электронами, находящимися вблизи *ферми-поверхности*, и возникновению связанных состояний — куперовских пар. Это явление лежит в основе *сверхпроводимости*.

Э. М. Эпштейн.

ЭЛЕКТРООПТИКА — раздел оптики, в к-ром изучаются изменения оптич. свойств среды под действием электрич. поля и вызванные этими изменениями особенности взаимодействия оптич. излучения со средой, помещённой в электрич. поле. Оптич. характеристики любой среды, такие, как величина показателя преломления для разл. *поляризаций света* и *оптическая активность*, зависят от распределения связанных зарядов в среде. Если среда находится под действием внеш. электрич. поля, то положение