



Рис. 3. а — Открытая электронная поверхность Ферми Pb; б — та же поверхность в одной ячейке обратной решётки.

тогда при $T=0$ К все состояния внутри Ф.-п. заняты. Такая Ф.-п. наз. электронной. Если внутри Ф.-п. имеются состояния с $\mathcal{E}_s(p) > \mathcal{E}_F$, то при $T=0$ К они свободны, а Ф.-п. наз. дырочной. Нормаль к Ф.-п. есть скорость электрона $v_s(p) = \partial \mathcal{E}_s / \partial p$. У электронных Ф.-п. векторы скорости (нормали) направлены вовне поверхностей, у дырочных — внутрь.

Объём $\Omega_s(\mathcal{E}_F)$ одной полости замкнутой Ф.-п. или часть объёма открытой Ф.-п., приходящая на одну ячейку p -пространства, с точностью до численного множителя совпадает с плотностью n_s электронов проводимости, принадлежащих s -й зоне:

$$2\Omega_s(\mathcal{E}_F)/(2\pi\hbar)^3 = n_s. \quad (2)$$

Для дырочной Ф.-п. её объём принято связывать с плотностью n'_s дырок — плотностью свободных состояний в зоне:

$$2\Omega_s(\mathcal{E}_F)/(2\pi\hbar)^3 = n'_s. \quad (2')$$

Особый класс составляют компенсированные металлы (Ве, Ви), у к-рых объёмы электронных и дырочных полостей Ф.-п. равны, т. е. равны плотности электронов и дырок.

Если Ф.-п. — сфера (К, Na, Rb, Cs), то её радиус равен

$$p_F = \hbar(3\pi^2 n)^{1/3}, \quad (3)$$

у эллипсоидальной Ф.-п. (Ви) размеры осей эллипсоида пропорциональны $n^{1/3}$.

Вычисление формы Ф.-п. конкретного металла пока неосуществимо, поэтому определение формы Ф.-п. производится по эксперим. данным. С разл. степенью точности известны Ф.-п. всех металлов и многих *интерметаллических соединений*. При этом используется тот факт, что большинство термодинамич., кинетич., акустич. и др. свойств металлов обусловлено электронами, занимающими состояния вблизи Ф.-п. В результате характеристики металла оказываются связанными с геом. характеристиками Ф.-п. (формой, кривизной, площадью сечений и др.). Так, сильная анизотропия *магнетосопротивления* указывает на открытость Ф.-п., знак постоянной Холла (см. *Холла эффект*) определяет характер Ф.-п. (электронная или дырочная), осцилляции магн. восприимчивости в сильных магн. полях (*де Хааза — ван Альфена эффект*) позволяют определить площадь экстремального сечения Ф.-п.; *поверхностный импеданс* в условиях аномального скин-эффекта — ср. кривизну Ф.-п.; квантовый *циклотронный резонанс* — площадь всех (а не только экстремальных) сечений Ф.-п. и т. д.

Задача восстановления формы Ф.-п. по эксперим. данным не может быть решена без привлечения теоретич. моделей. Чаще всего применяют либо приближение (модель) почти свободных электронов, либо приближение сильно связанных электронов. Обе модели используют отображения симметрии, позволяющие определить общие контуры Ф.-п. Приближение почти свободных электронов предполагает, что вся анизотропия Ф.-п. — результат периодичности кристалла. В нулевом приближении Ф.-п. — совокупность сфер радиуса p_F с центрами в точках

p -пространства $p = 2\pi\hbar b$, эквивалентных центру первой зоны Бриллюэна. Учёт взаимодействия электронов с кристаллич. решёткой сводится к снятию вырождения (если диаметр сферы больше размера 1-й зоны Бриллюэна) и приводит к перестройке Ф.-п. (напр., возникают открытые поверхности). Получающиеся т. о. формы Ф.-п. многообразны, хотя и составлены из «обрезков» сфер.

Модель сильно связанных электронов использует разложение энергии электрона в решётке в ряд Фурье, а приближение состоит в том, что применяется не весь ряд, а лишь неск. его членов, обладающих всеми элементами *симметрии кристалла*.

Фазовый переход в металле сопровождается изменением его Ф.-п. Так, при переходе из парамагнитного в ферромагн. состояние (см. *Магнитный фазовый переход*) происходит расщепление Ф.-п. на две — для электронов с различными спинами.

Внеш. воздействие на металл может привести к изменению геометрии Ф.-п.: может возникнуть или исчезнуть полость Ф.-п. и (или) разорваться либо образоваться перемычка у Ф.-п. При этом электронные характеристики металла обнаруживают аномалии, называемые *электронным топологическим переходом* в нормальном металле.

Лит.: Крэкнелл А., Уонг К., Поверхность Ферми, пер. с англ., М., 1978; см. также лит. при ст. *Металлы*.

М. И. Каганов, Э. М. Эпштейн.

ФЭРМИ-РАСПРЕДЕЛЕНИЕ — то же, что *Ферми — Дирака распределение* (см. также *Ферми — Дирака статистика*).

ФЭРМИ-УРОВЕНЬ — то же, что *ферми-энергия*.

ФЭРМИ-ЭНЕРГИЯ (уровень Ферми) — энергия, ниже к-рой все состояния системы частиц или *квазичастиц*, подчиняющихся *Ферми — Дирака статистике*, заполнены, а выше — пусты в осн. состоянии при абс. нуле темп-ры ($T=0$ К). Существование Ф.-э. следует из *Паули принципа*. Для идеального газа фермионов Ф.-э. \mathcal{E}_F совпадает с *химическим потенциалом* при $T=0$ К и связана с числом частиц (n) газа в единице объёма соотношением:

$$\mathcal{E}_F = \frac{(2\pi\hbar)^2}{2m} \left[\frac{3n}{4\pi(2s+1)} \right]^{2/3}. \quad (1)$$

Здесь m , s — масса и спин фермиона (в случае квазичастиц m — *эффективная масса*). Для электронов ($s=1/2$)

$$\mathcal{E}_F = (\hbar^2/2m)(3\pi^2 n)^{2/3}.$$

Наряду с Ф.-э. вводят также понятия *ферми-импульса* $p_F = \sqrt{2m\mathcal{E}_F}$ и фермиевской скорости $v_F = p_F/m = \sqrt{2\mathcal{E}_F/m}$.

В *металлах* и вырожденных *полупроводниках* Ф.-э. расположена в одной из разрешённых энергетич. зон. В невырожденных полупроводниках Ф.-э. совпадает с серединой запрещённой зоны (при $T=0$ К) и смещается в сторону разрешённой зоны, обладающей меньшей эфф. массой, при $T \neq 0$ К ($kT \ll \mathcal{E}_c - \mathcal{E}_v$):

$$\mathcal{E}_F = \frac{1}{2}(\mathcal{E}_v - \mathcal{E}_c) - \frac{3}{4}kT \ln \frac{m_n}{m_p}. \quad (2)$$

Здесь \mathcal{E}_v , \mathcal{E}_c — энергии краёв валентной зоны и проводимости зоны; m_n , m_p — эфф. массы электронов и дырок.

Ф.-э. имеет величину порядка 1—10 эВ в металлах, порядка 10^{-2} — 10^{-1} эВ в вырожденных полупроводниках и порядка 10^{-4} эВ в ^3He . В вырожденном звёздном веществе (*белые карлики, пульсары*) Ф.-э. может достигать 10^4 — 10^6 эВ.

Лит.: Лифшиц И. М., Азбель М. Я., Каганов М. И., Электронная теория металлов, М., 1971; Бонч-Бруевич В. Л., Калашников С. Г., Физика полупроводников, М., 1990.

Э. М. Эпштейн.

ФЕРРИМАГНЕТИЗМ — магнитоупорядоченное состояние вещества, сочетающее свойства *ферромагнетизма* и *антиферромагнетизма*; в более общем смысле — совокупность физ. свойств вещества в этом состоянии. Магн. структура в состоянии Ф. определяется взаимной ориентацией векторов намагниченности M_i *магнитных подрешёток*. Самопроизвольная намагниченность M в отсутствие