

ограничивающих полей строго заданной конфигурации, практич. невозможностью строго выполнить нач. условия ввода пучка в систему ограничения и др. Реальные Э. п. имеют волнистую и пульсирующую границы, форма пучка не остаётся неизменной. Поэтому для предупреждения оседания электронов пучка на поверхности пролётного канала радиус проводящей трубки, сквозь к-рую пропускается интенсивный пучок, выбирается на 20—30% больше радиуса пучка.

Лит.: Алямовский И. В., Электронные пучки и электронные пушки, М., 1966; Молоковский С. И., Сушков А. Д., Интенсивные электронные и ионные пучки, 2 изд., М., 1991.

А. А. Жигарев.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ ПЕРЕХОД (фазовый переход $2^{1/2}$ рода, переход И. М. Лифшица) — изменение топологии (связности) ферми-поверхности металла в результате внеш. воздействия. Явления, обусловленные Э. т. п., наблюдаются в металлах при низкой темп-ре.

Нек-рые изоэнергетич. поверхности в пространстве квазимпульсов p , описывающие электронный энергетич. спектр (см. *Зонная теория*), содержат критич. точки $p=p_c$, в к-рых скорость электрона $v = \partial \mathcal{E} / \partial p = 0$ (см. *Ван Хова особенность*). Такие поверхности наз. критическими $\mathcal{E}_c = \mathcal{E}(p_c)$. При Э. т. п. поверхность Ферми совпадает с критич. изоэнергетич. поверхностью

$$\mathcal{E}_F(p) = \mathcal{E}_c.$$

Если критич. точка не вырождена, то в её окрестности зависимость энергии электрона от квазимпульса (закон дисперсии) $\mathcal{E}(p)$ может быть представлена в виде

$$\mathcal{E}(p) = \mathcal{E}_c + p_x^2 / 2m_x + p_y^2 / 2m_y + p_z^2 / 2m_z, \quad (1)$$

где x, y, z — оси координат. Если все три эффективные массы m_x, m_y, m_z имеют один знак, то критич. точка является точкой экстремума, если одна из эфф. масс отличается от знака двух других — седловой точкой. В результате внеш. воздействия на металл (напр., приложения внеш. давления или введения примесей), изменяющего период решётки, а вместе с ним концентрацию электронов проводимости и ферми-энергию, уровень Ферми-металла \mathcal{E}_F может перемещаться от значения, меньшего \mathcal{E}_c , до значения, большего \mathcal{E}_c . При этом поверхность Ферми меняет свою топологию, т. е. происходит Э. т. п. В зависимости от типа критич. точки, через к-рую «проходит» уровень Ферми, различают 2 осн. типа Э. т. п. — появление или исчезновение новой полости поверхности Ферми (p_c — точка экстремума; рис. 1, а) и разрыв перемычки поверхности Ферми (p_c — седловая точка; рис. 1, б). Если критич. точка одновременно является точкой вырождения электронного спектра, то возможны более сложные Э. т. п.

Изменение топологии поверхности Ферми влечёт за собой появление особенностей в плотности электронных со-

стояний на уровне Ферми. Вблизи Э. т. п. плотность состояний может быть представлена в виде $\nu(\mathcal{E}) = \nu_0(\mathcal{E}) + \delta\nu(\mathcal{E})$, где ν_0 — регуляриная часть плотности состояний, обусловленная электронами, находящимися далеко от особой точки, а $\delta\nu$ — сингулярная добавка, связанная с Э. т. п. Для осн. типов Э. т. п. в случае идеального кристалла последняя может быть записана единым образом:

$$\delta\nu(\mathcal{E}) = \begin{cases} \pm \alpha |\mathcal{E} - \mathcal{E}_c|^{1/2} & \text{— область I,} \\ 0 & \text{— область II.} \end{cases} \quad (2)$$

Здесь $\alpha = 2^{3/2} |m_x m_y m_z|^{1/2} \pi^{-2} \hbar^{-3}$. В области I число полостей поверхности Ферми больше, в области II — меньше; знак „плюс“ („минус“) относится к случаю, когда число полостей при увеличении энергии увеличивается (уменьшается).

Появление добавки $\delta\nu$ к плотности состояний приводит к аномалиям всех электронных характеристик кристалла. Так, термодинамич. потенциал при $T=0$ К приобретает добавку, к-рая отлична от 0 лишь с одной стороны от Э. т. п. (в области I) и пропорциональна $|z|^{5/2}$, где энергетич. параметр $z = \mathcal{E}_F - \mathcal{E}_c$ характеризует близость электронной системы к Э. т. п. Таким образом, вторые и третьи производные термодинамич. потенциала при $T=0$ К в идеальном кристалле имеют особенности по параметру z , напр. третьи при $z \rightarrow 0$ обращаются в бесконечность как $|z|^{-1/2}$. Это позволило Лифшицу в соответствии с терминологией Эренфеста назвать Э. т. п. фазовым переходом двухполовинного рода.

При конечной темп-ре добавка к термодинамич. потенциалу отлична от 0 по обе стороны от перехода и Э. т. п. перестаёт быть фазовым переходом — особенность степени $5/2$ «размывается» темп-рой. Аналогично влияют дефекты в кристаллах (примесные атомы, дислокации и т. п.). Отклонение от идеальности кристалла приводит к тому, что добавка к плотности состояний (2) размывается на интервал энергий шириной $\Gamma \sim \hbar/\tau$, где τ — время жизни электронных состояний. Соответственно добавка к термодинамич. потенциалу также размывается, и Э. т. п. в неидеальном кристалле даже при $T=0$ К не является фазовым переходом.

Наиб. просты для анализа особенности (при Э. т. п.) термодинамич. характеристик. При $T=0$ К в идеальном кристалле электронная теплоёмкость C_v (точнее, отношение C_v/T) и сжимаемость $\partial P / \partial V$ (P — электронное давление) имеют сингулярные добавки, отличные от нуля с одной стороны от точки перехода и зависящие от дробной степени $|z|$, а добавка к коэф. теплового расширения $\partial V / \partial T$ (V — объём) с одной стороны от перехода обращается в бесконечность как $|z|^{-1/2}$. При $T > 0$ К или в неидеальном кристалле эти особенности размываются, изломы в теплоёмкости и сжимаемости сглаживаются, а бесконечный скачок в коэф. теплового расширения становится конечным.

Один из способов регистрации Э. т. п. — измерение особенности термоэдс α/T . В слабонеидеальном кристалле при рассеянии электронов на примесях термоэдс при Э. т. п. имеет пик, причём значение термоэдс в максимуме превышает значение вдали от Э. т. п. (рис. 2). Появление термоэдс, а также излом в электросопротивлении

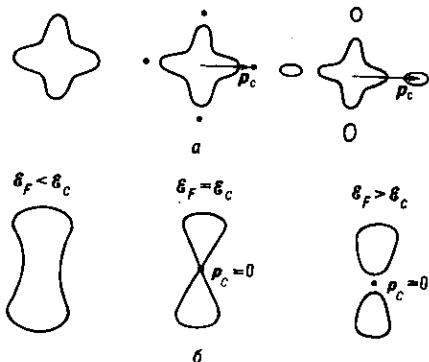


Рис. 1. Изменение топологии поверхности Ферми при электронном топологическом переходе: а — появление новых полостей; б — разрыв перемычки. Количество и расположение перемычек и новых полостей определяется симметрией кристалла; так, на рис. а показан случай кубического кристалла — 6 полостей (изображена проекция на одну из плоскостей симметрии).

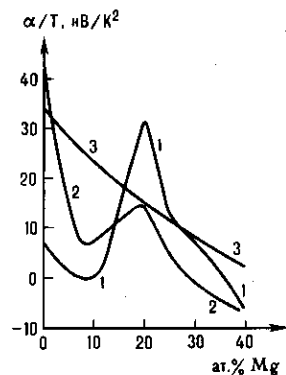


Рис. 2. Зависимость дифференциальной термоэдс α/T сплава Li—Mg от концентрации Mg при различных температурах T : 1) 4,2 К; 2) 78 К; 3) 300 К. При концентрации Mg ок. 20 атомных % происходит электронный топологический переход типа разрыва перемычки.