Письма в ЖЭТФ, том 25, вып. 8, стр. 381 – 383 *20 апреля 1977 г.*

ОСОБЕННОСТИ ФОНОННОГО СПЕКТРА МЕТАЛЛОВ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ЛОКАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ

Г.Т.Аванесян, М.И.Каганов, Т.Ю.Лисовская

Предсказывается существование особенностей в угловой зависимости скорости s и коэффициента поглощения Г звука в металле. Особенности вызваны линиями нулевой кривизны (линии параболических точек) на поверхности Ферми. Параболические точки должны приводить, кроме того, к усилению особенностей Мигдала – Кона и к особенностям в угловой зависимости пиппардовских (геометрических) осцилляций коэффициента поглощения звука.

У большинства металлов поверхности Ферми сложны, содержат вмятины, перемычки и т. п. (см., например, приложение III к [1]). Мы хотим обратить внимание на практически обязательное существование на поверхности Ферми линий нулевой гауссовой кривизны (линий параболических точек) и на их роль в формировании ряда свойств металлов.

Как известно [1], в поглощении звука принимают участие электроны, расположенные на "пояске", уравнение которого [2]

$$\mathbf{k}\,\mathbf{v} = \omega ; \qquad \epsilon(\mathbf{p}) = \epsilon_F . \tag{1}$$

Здесь ω – частота, $\mathbf{k}$ – волновой вектор звуковой волны, $s = \omega/k$ — ее скорость; $\mathbf{p}$ – квазиимпульс; ϵ – энергия, $\mathbf{v} = \partial\epsilon/\partial\mathbf{p}$ – скорость, а ϵ_F – энергия Ферми электронов. Мы считаем, что $kl >> 1$, где l – длина свободного пробега электронов. Так как $v_F >> s$, то векторы $\mathbf{v}$ и $\mathbf{k}$ почти перпендикулярны. Если поверхность Ферми содержит линию параболических точек, то поясок (1) при изменении направления распространения звука с необходимостью изменяет свою топологию при некоторых значениях[1] $\mathbf{n} = \mathbf{k}/k$. Эти значения обозначим $\mathbf{n}_c$. Можно показать, что при $\mathbf{n} = \mathbf{n}_C$ возможны два случая: либо а) поясок исчезает (появляется), либо б) поясок разрывается. Каждому критическому направлению $\mathbf{n}_C$ соответствует определенная параболическая точка (точка A). Вблизи точки A поверхность Ферми имеет вид, изображенный на рис. 1. Структура пояска при $\mathbf{n} \approx \mathbf{n}_C$ (вблизи точки A) изображена на рис. 2. В первом случае (рис. 2, *а*) критическому направлению $\mathbf{n} = \mathbf{n}_C$ соответствует вырождение пояска в точку ($p_1 = p_2 = 0$), а во втором (рис. 2, *б*) при $\mathbf{n} = \mathbf{n}_C$ поясок имеет самопересечение. Этим исчерпываются топологические особенности поясков, если не предполагать каких-либо особых (случайных) свойств у поверхностей Ферми.

Существование особенностей у поясков приводит к особенностям в зависимости коэффициента поглощения звука электронами от направ-

[1] Близкие вопросы рассмотрены В.М.Конторовичем и Н.А.Сапоговой (устное сообщение, см., также [6]).

ления звука $\mathbf{n}$. Они легко вычисляются путем анализа выражения для коэффициента поглощения

$$\Gamma = \int |\Lambda|^2 \delta(\epsilon - \epsilon_F)\, \delta(s - \mathbf{n}\mathbf{v})\, d^3p, \tag{2}$$

Λ – матричный элемент электрон-фононного взаимодействия, в который включены все множители (см., например, [1], приложение II). В первом случае (рис. 2, *а*) при $\mathbf{n} = \mathbf{n}_C$ коэффициент Γ испытывает конечный скачок $\delta\Gamma \sim \Gamma_0$, где $\Gamma_0 \approx \sqrt{m/M}(sk)$ по порядку величины совпадает с коэффициентом поглощения большой поверхностью Ферми (ср. с [3]). Здесь m – масса электрона, а M – иона. Во втором случае (рис. 2, *б*) Γ имеет логарифмическую особенность $\delta\Gamma \sim \Gamma_0 \ln|\mathbf{n} - \mathbf{n}_C|$. Фактически скачок и логарифмическая особенность сглаживаются. Величина сглаживания определяется наибольшим из трех параметров $1/kl$, T/ϵ_F, $\hbar\omega/\epsilon_F$ (T – температура). Особенности $\Gamma = \mathrm{Im}\,\omega$, естественно, сопровождаются особенностью у $\mathrm{Re}\,\omega$, причем скачку Γ соответствует логарифмическая особенность у $\mathrm{Re}\,\omega$, а логарифмической особенности у Γ – скачок $\mathrm{Re}\,\omega$.

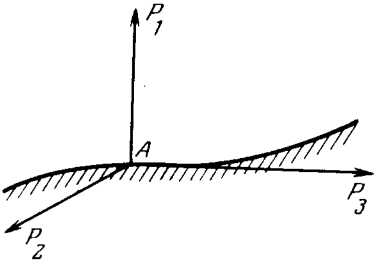

Рис. 1

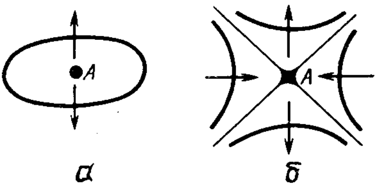

Рис. 2

Так как все поверхности Ферми имеют центр инверсии, то у каждой параболической точки A есть "антипод" с $\mathbf{v} = -\mathbf{v}_A$. Поэтому обязательно существует критическое направление $\mathbf{n}'_C$, близкое $\mathbf{n}_C$ и обладающее аналогичными особенностями (см. рис. 3, *а* и 3, *б*). Так как $\Gamma_0 \sim sk$, то перечисленные выше особенности надо трактовать как особенности скорости звука s.

Структура выражения для тензора проводимости $\sigma_{ik}(\mathbf{k})$ при $kl >> 1$ (асимптотическое значение σ_{ik} определяет величину импеданса в условиях аномального скин-эффекта) похожа на структуру выражения (2) для коэффициента поглощения Γ. Поэтому компонента проводимости σ_{11} тоже должна обладать описанными выше особенностями. Другие компоненты σ_{ik} имеют значительно более слабые особенности, так как $v_2 = v_3 = 0$ в точке A. Параболические точки поверхности Ферми могут служить источником аномалий в тех эффектах, которые обязаны электронам, принадлежащим малой окрестности вблизи избранной точки. В

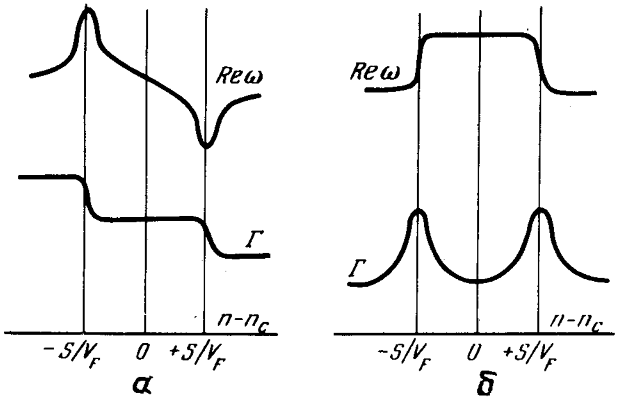

Рис. 3

этом смысле должны быть чувствительны все эффекты, обусловленные опорными точками поверхности Ферми. Мы приведем два примера.

1. Должны существовать конусы направлений, в которых особенности Мигдала – Кона усилены (см. [4]). Усиление имеет место тогда, когда вектор $\hbar\mathbf{k}$ равен опорному диаметру, соединяющему точку A с ее "антиподом".

2. Разрыв пояска (1) должен приводить к скачкообразному изменению периодов пиппардовских (геометрических) осцилляций поглощения звука [5] в магнитном поле, причем в "момент" разрыва (при $\mathbf{n} = \mathbf{n}_C$) амплитуда осцилляций возрастает в $(kr_H)^{1/6}$ раз, если экстремальная траектория движения электрона в магнитном поле содержит одну параболическую точку, и в $(kr_H)^{1/3}$, если – две.

В заключение авторы пользуются случаем поблагодарить И.М.Лифшица и Л.П.Питаевского за стимулирующие дискуссии.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
17 марта 1977 г.

Литература

[1] И.М.Лифшиц, М.Я.Азбель, М.И.Каганов. Электронная теория металлов. М., изд. Наука, 1971.

[2] А.И.Ахиезер, М.И.Каганов, Г.Я.Любарский. ЖЭТФ, 32, 837, 1957.

[3] В.Н.Давыдов, М.И.Каганов. Письма в ЖЭТФ, 16, 133, 1972; ЖЭТФ, 67, 1491, 1974.

[4] А.М.Афанасьев, Ю.Каган. ЖЭТФ, 43, 1456, 1962; М.И.Каганов, А.И.Семенко. ЖЭТФ, 50, 630, 1966.

[5] A. B. Pippard. Phil. Mag., 2, 1147, 1957; В.Л.Гуревич. ЖЭТФ, 37, 71, 1959.

[6] Н.А.Сапогова, В.М.Конторович. Письма в ЖЭТФ, 18, 381, 1973.