

№12. ОБ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПО РАДИОЧАСТОТНЫМ РАЗМЕРНЫМ
ЭФФЕКТАМ

В.Ф.Гантмахер, И.П.Крылов

Институт твердого тела АН СССР
Институт физических проблем АН СССР

Для использования радиочастотных размерных эффектов (РЭ) при изучении энергетических спектров электронов в металлах нужно, во-первых, уметь различать линии от разных типов траекторий и, во-вторых, знать факторы, определяющие формы линий. Большинство РЭ (от цепочек замкнутых траекторий, от окрестности опорной точки, от экстремальных винтовых и от открытых траекторий) имеет свои характерные признаки, позволяющие различать их между собой^{/1/}. Хуже обстоит дело с линиями РЭ от изломов на замкнутых траекториях. Впервые наличие таких изломов и линий РЭ от них было доказано для индия^{/2/}. Однако, по видимому, изломы /острые ребра/ встречаются на ферми-поверхностях довольно часто. Анализ экспериментальных данных показал, например, что линии от изломов имеются и на олове.

Как известно, ферми-поверхность олова в зоне 4^A содержит участки, имеющие форму труб. Отклонение от цилиндричности этих участков не превышает нескольких процентов, причем на центральном сечении размер орбиты достигает максимума; сечение цилиндра практически мало отличается от квадрата. Когда магнитное поле составляет с осью цилиндра (с кристаллографической осью $[001]$) небольшой угол, от центрального сечения возникает замкнутая траектория, имеющая форму квадрата. В зависимости от ориентации нормали к поверхности, у этого квадрата может оказаться параллельной поверхности образца либо сторона, либо диагональ. В последнем случае траектория заходит в скин-слой углом, а еще два ее угла оказываются на глубине, равной половине диагонали. В работе^{/3/} (см. там рис.6 и 8) линия I_2 соответствует равенству толщины пластинки диагонали квадрата, а линия 4_2 - равенству толщины половине диагонали. Таким образом, как и в случае I_n , выявить линии РЭ от изломов удалось лишь в результате конкретного анализа ферми-поверхности.

Переходя к вопросу о форме линий РЭ, сразу же отметим, что она не связана с какими-либо побочными экспериментальными факторами. Так, сравнение линий на образцах с литыми зеркальными и с травленными поверхностями показало, что на форме линий практически не сказывается степень гладкости поверхности^{/3/}.

Можно было бы предположить, что форма линии РЭ связана с более значительной неоднородностью толщины образца Δd , с его клиновидностью. Однако при $\Delta d \ll \delta$ (δ - глубина скин-слоя) неоднородность толщины вообще не сказывается на линиях РЭ. Это следует из хорошей воспроизводимости формы линий на различных образцах, заведомо обладающих такими неоднородностями в силу различных случайных причин. Если же изготовить сильно клиновидный образец с контролируемой $\Delta d \gg \delta$, то линии РЭ не размываются, а расщепляются. Вместо одной линии появляются две, со-

ответствующие экстремальным значениям толщины образца d_{\min} и d_{\max} (см. рис.1). При этом ширина каждой из линий остается примерно такой же, как на плоскопараллельном образце. Это было проверено на многих образцах из различных металлов (Bi, In, Sn).

С другой стороны, можно считать доказанным, что форма линии тесно связана с распределением поля в скин-слое. Как на Bi^{/1/}, так и на In^{/4/}, линия с повышением частоты ω сужается, причем ширина линии $\Delta H \sim \omega^{-1/3}$, также как и глубина скин-слоя при аномальном скин-эффекте. Сужение происходит несимметрично: левый край линии при изменении частоты практически не сдвигается. Это означает, что со стороны меньших полей линия начинается тогда, когда экстремальная траектория эффективных электронов касается обеих поверхностей пластин. В сторону больших полей линия

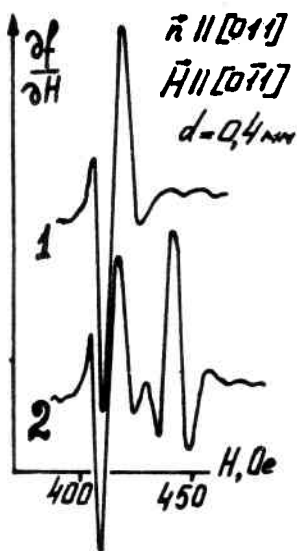


Рис.1

Расщепление линий РЭ в In на клиновидном образце. Частота генерации $f = 3$ МГц.
 1 - плоскопараллельный образец
 2 - клиновидный образец
 $\Delta d/d = 7\%$

простирается до тех пор, пока траектория связывает скин-слой с противоположной поверхностью. К аналогичному выводу пришли Кох и Вагнер при изучении РЭ в Al и R^{5/}.

Из сказанного следует, что при определении размеров ферми-поверхности нужно брать значение поля, соответствующее левому краю линии РЭ. Этот вывод прекрасно подтверждается самими результатами. В целом ряде случаев измеряемые параметры ферми-поверхности известны из теории, либо из других экспериментов (период открытых траекторий в Sn, размер наименьшей полуоси электронного эллипсоида в Bi, радиус кривизны ферми-поверхности In вблизи опорной точки при H || [111]). С известными данными согласуется значение, определяемое именно левым краем линии РЭ.

Ширина линии РЭ в силу сказанного выше дает возможность оценить глубину скин-слоя: $\delta \sim \frac{\Delta H}{H} \alpha$. В качестве ΔH мы брали расстояние между двумя симметричными экстремумами на линии (см. /4/; в оценке δ в /4/ фигурировал дополнительный множитель 1/2). Полученные значения мы попытались сравнить с результатами измерений поверхностного импеданса $Z = R + iX$, пересчитанными к интересующей нас частоте по формуле $Z \sim \omega^{2/3}$. Поскольку Z характеризует лишь относительную скорость убывания электрического поля вблизи самой поверхности, при одном и том же Z глубина, на которой поле существенно отлично от нуля, может быть различна в зависимости от закона убывания поля. В частности, предположив экспоненциальный закон убывания поля, получим, что расстояние, на котором поле убывает в e раз, $\delta_e = \frac{c^2}{4\pi\omega} \cdot \frac{|Z|^2}{X}$. Сравнение наших значений с δ_e характеризует поэтому неэкспоненциальность распределения поля в скин-слое (см. таблицу, все значения для частоты 7,5 Мгц, ℓ - средняя длина свободного пробега в экспериментах по РЭ).

	$\delta_e, 10^{-4} \text{ см}$	$\delta, 10^{-4} \text{ см}$	$\ell, 10^{-1} \text{ см}$	δ/δ_e	ℓ/δ
Sn	2,0	10	2	5	200
In	1,6 /6/	12	0,5	8	40
Bi	10 /7/	150	0,5	15	3

Распределение поля в скин-слое является основным, но не единственным фактором, определяющим форму линии РЭ. Форма зависит также и от типа РЭ, и от закона дисперсии вблизи эффектив -

ных точек на экстремальных траекториях. Например, в случае РЭ на замкнутых траекториях может варьироваться в широких пределах как отношение R/δ (R - радиус кривизны траектории в эффективной точке), характеризующее путь электрона в скин-слое, так и параметр $\partial^2 D / \partial p_H^2$, определяющий характер экстремальности размера траектории (измеряемой величины D_{ext}). Вся совокупность экспериментальных данных свидетельствует о том, что первый фактор более существенен для формы линии, чем второй.

Проиллюстрируем это утверждение на примере того же цилиндрического участка ферми-поверхности олова. Если на образце $\vec{n} \parallel [100]$ (сторона квадрата параллельна поверхности образца), то $\partial^2 D / \partial p_H^2$ меняется очень сильно, а R примерно постоянно. Форма линий при таком повороте поля практически не меняется. В то же время переход к образцу с $\vec{n} \parallel [110]$ резко меняет величину R - угол "квадрата" вместо стороны - при сравнительно малом изменении $\partial^2 D / \partial p_H^2$. Различие между формами линий на этих образцах видно из рис.2.

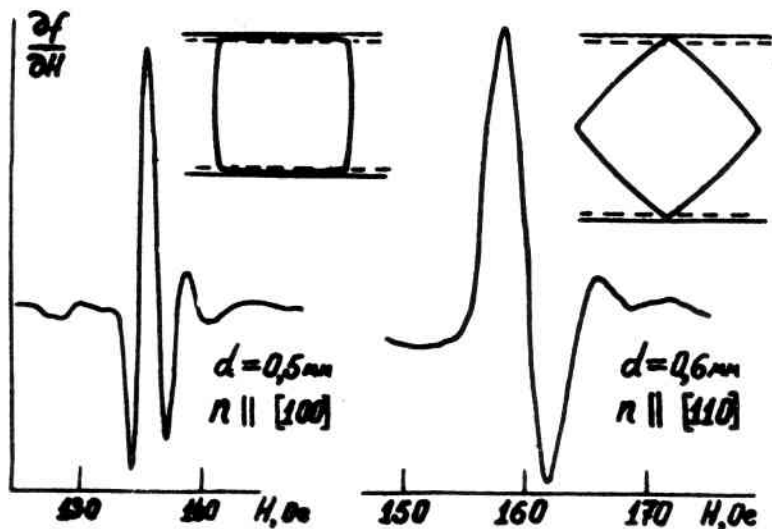


Рис.2

Записи линий РЭ на олове. Для обеих кривых $f = 3,3$ Мгц, $\Delta (H, [001]) = 21^\circ$, масштабы по оси ординат различные

ЛИТЕРАТУРА:

1. V.F.Gantmakher, Progr.Low Temp.Phys., v.5 (in press)
2. В.Ф.Гантмахер, И.П.Крылов, ЖЭТФ, 49, 1054 (1965)
3. В.Ф.Гантмахер, ЖЭТФ, 44, 811 (1963)
4. И.П.Крылов, В.Ф.Гантмахер, ЖЭТФ, 51, 740 (1966)
5. J.F.Koch, T.K.Wagner, Bull.Am.Soc., 11, (2), 170 (1966)
см. также этот том на стр.
6. P.N.Dheer, Proc.Roy.Soc., A260, 333 (1961)
7. G.E.Smith, Phys.Rev., 115, 1561 (1959)