

## ФАЗОВЫЙ ПЕРЕХОД $2^{1/2}$ РОДА В ЦИНКЕ

Ю.П.Гайдук, Н.П.Данилова,  
М.Б.Щербина-Самойлова

На нитевидных кристаллах цинка толщиной  $\sim 1$  мкм проведены измерения анизотропии магнетосопротивления  $\rho(H)$  в свободном состоянии и при одноосном упругом растяжении. Измерения проводились при  $T = 4,2$  К и полях до 80 кэ. Обнаружено резкое изменение анизотропии  $\rho(H)$  при растяжении  $\Delta l/l_0 \approx 0,35\%$  вдоль оси  $[2\bar{3}11]$ . Это изменение объясняется изменением топологии поверхности Ферми цинка – разрываются переемычки вдоль оси  $[0001]$  и некоторые переемычки в плоскости  $(0001)$ .

В энергетическом спектре электронов проводимости в металле  $\epsilon = \epsilon(\vec{p})$  существуют особые критические точки  $\epsilon_k$ , в которых изоэнергетические поверхности изменяют свою топологию. В работе [1] было показано, что если энергия Ферми электронов  $\epsilon_F$  при непрерывном изменении какого-либо параметра проходит через критическое значение  $\epsilon_k$ , то это должно сопровождаться резкой аномалией в плотности состояний электронов проводимости и соответствующими резкими аномалиями термодинамических и кинетических свойств металла. По предложению Лифшица [1] такие аномалии принято называть "переходами  $2^{1/2}$  рода". Они не связаны с изменением симметрии решетки и являются электронными переходами без скачкообразного изменения полного числа электронов проводимости. Теория показала, что достижение критических значений  $\epsilon_F = \epsilon_k$  возможно, в частности, при воздействии на металл различного рода деформаций, как изотропных, так и анизотропных, примеси, а также магнитного поля [2].

Предсказанные в работе [1] новые необычные зависимости в свойствах металла стимулировали интенсивные экспериментальные поиски фазовых переходов  $2^{1/2}$  рода. Задача заключалась, во-первых, в обна-

ружении собственно топологических изменений в поверхности Ферми (ПФ) (например, по исчезновению или появлению новых частот квантовых осцилляций или по изменению магнетосопротивления), а во-вторых, в экспериментальном доказательстве того, что это изменение имеет характер фазового перехода, т.е. сопровождается различного рода аномалиями свойств металла.

Прежде всего была создана методика получения значительных гидростатических давлений, обеспечившая успех практически всем работам по обнаружению переходов  $2^{1/2}$  рода [3]. Вскоре было показано, что по крайней мере у Zn, Cd [4] и Bi [5, 6] топологические изменения ПФ могут быть получены при реально достижимых деформациях, причем у Zn и Cd они будут иметь разные знаки. Впервые топологический переход от замкнутой поверхности ПФ к открытой при давлениях порядка  $10 \text{ кбар}$  был зафиксирован у Cd [7]. Затем на Bi с примесью Sb было обнаружено исчезновение электронных эллипсоидов при давлениях того же порядка [8, 9]. Под действием магнитного поля переходы обнаружены у Bi [10] и Te [11]. В работе [12] было высказано предположение, что немонотонная зависимость от давления температуры сверхпроводящего перехода  $T_K$  у таллия может быть связана с изменением ПФ. Это предположение получило теоретическое обоснование в работе [13], однако с экспериментальной точки зрения вопрос о существовании фазового перехода  $2^{1/2}$  рода в таллии остается открытым, так как непосредственно топологических изменений ПФ таллия обнаружено не было.

Полученные во многих работах результаты говорили о том, что для большинства металлов критические точки  $\epsilon_K$  не могут быть достигнуты с помощью существующей методики создания гидростатических давлений. В работе [14] для обнаружения и изучения переходов  $2^{1/2}$  рода было предложено использовать нитевидные кристаллы (вискеры) металлов. Хорошо известно, что эти объекты позволяют получить обратимые упругие деформации большой величины. Однако, реализация уникальных свойств вискерев встретила большие методические трудности, связанные с одновременным механическим и электрическим монтажом вискерев. Более того, физические свойства вискерев при низких температурах, существенно отличающиеся от таковых у массивных образцов, не были изучены. В настоящее время эти трудности преодолены и мы приступили к изучению влияния одноосных растяжений на геометрию ПФ металлов.

Первым объектом измерений был выбран цинк, открытая ПФ которого имеет ряд тонких перемишек. Мы надеялись "разорвать" эти перемишки в процессе растяжения. Результаты измерений проводятся ниже.

Объекты измерений — пластинчатые вискеры Zn толщиной  $\sim 1 \text{ мм}$  и длиной  $\sim 2 - 3 \text{ мм}$ . Наблюдение за изменением топологии ПФ мы проводили по измерению анизотропии сопротивления, которая в сильном магнитном поле вызвана существованием открытых сечений ПФ [15]. Механический и электрический монтаж вискерев осуществлялся с помощью эпоксидной смолы "Epotek-20". Растяжение осуществлялось специально сконструированным трансформатором перемещения жесткого типа с коэффициентом около  $1/3000$ . Измерения проведены при  $T = 4, 2 \text{ К}$  и магнитных полях до  $80 \text{ кэ}$ .

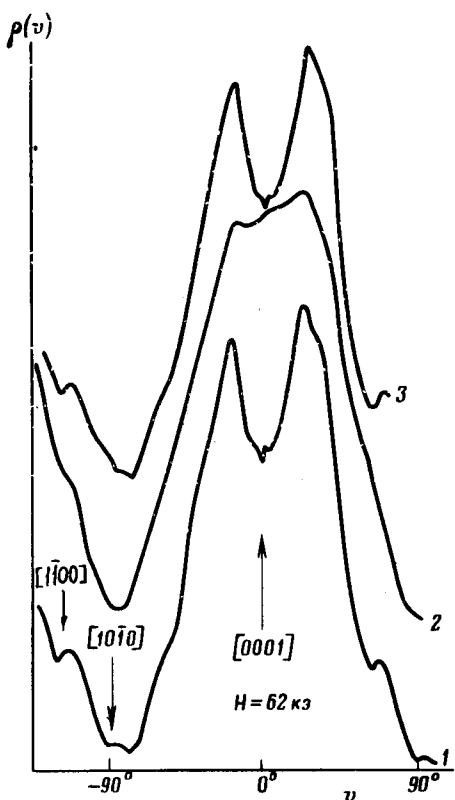


Рис. 1

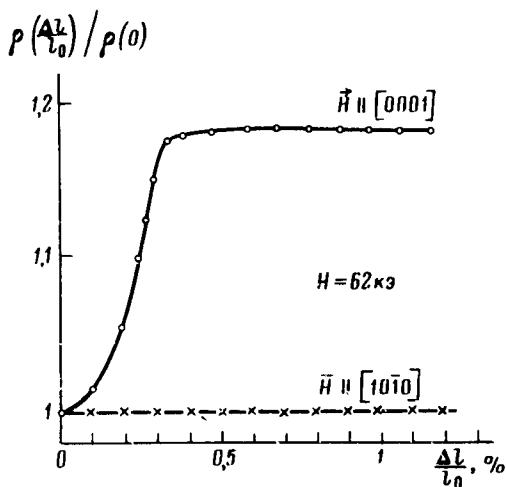


Рис. 2

На рис. 1 представлена зависимость сопротивления в магнитном поле  $H = 62 \text{ кэ}$  от угла поворота поля в плоскости, перпендикулярной измерительному току, для вискера, имеющего ориентацию вдоль оси  $[2\bar{3}11]$  (ориентация определена из сравнения анизотропии  $\rho_H(\theta)$  вискера и массивного образца с учетом размерного эффекта в пластине). Минимумы сопротивления в плоскости  $(0001)$  связаны с открытыми сечениями ПФ в направлении  $[0001]$  ("вертикальные рукава монстра"), а в плоско-

стях  $\{10\bar{1}0\}$  — с "горизонтальными перемычками" того же "монстра" [15]. Первая "розетка" дана для нулевого растяжения, вторая — при относительном растяжении образца  $\Delta l/l_0$  на 1%, третья — после снятия напряжения. Для удобства кривые смещены друг относительно друга. При растяжении исчезают два минимума  $\rho_H(\theta)$ . Это исчезновение можно интерпретировать как разрыв ряда перемычек "монстра": вдоль оси  $[0001]$  и в плоскости  $(00\bar{1}1)$ . Сохранение минимума при  $\vec{H} \parallel (10\bar{1}0)$  свидетельствует о том, что разрывается лишь одна из трех неэквивалентных перемычек "монстра" в плоскости  $(0001)$ . На рис. 2 приведена зависимость сопротивления от величины растяжения для двух характерных минимумов "розетки" рис. 1. Размер точек соответствует точности измерений. Видно, что для направления  $\vec{H} \parallel (0001)$  кривая имеет вид перехода, наступающего при  $\Delta l/l_0 \approx 0,35\%$ . Характерно, что изменение магнетосопротивления происходит со стороны  $\epsilon < \epsilon_K$  в согласии с теорией [1].

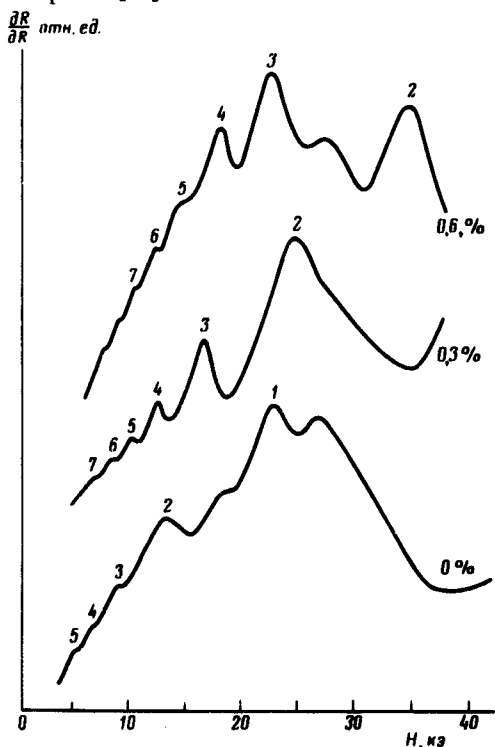


Рис. 3

Аналогичные исследования, проводимые нами на вискерах  $Bi$  и  $Sb$ , обнаруживают лишь большие количественные изменения ПФ этих металлов. Так при  $\Delta l/l_0 \approx 1\%$  некоторые сечения ПФ  $Sb$  уменьшаются примерно вдвое, а у  $Bi$  увеличиваются в пять раз. Для иллюстрации на рис. 3 приведена запись эффекта Шубникова — де Гааза в  $Bi$ , растянутом на 0,3 и 0,6% вдоль бинарной оси, магнитное поле отклонено на  $30^\circ$  от оси  $\bar{C}_3$ . Видно сильное увеличение частоты осцилляций, свидетельствующее о значительной деформации электронного эллипсоида ПФ  $Bi$ .

Московский  
государственный университет  
им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
12 апреля 1977 г.

## Литература

- [ 1 ] И.М.Лифшиц. ЖЭТФ, **38**, 1569, 1960.
- [ 2 ] М.Я.Азбель, Н.Б.Брандт. ЖЭТФ, **48**, 1206, 1965.
- [ 3 ] Е.С.Ицкевич. ЖЭТФ, **42**, 1173, 1962; ПТЭ, №4, 148, 1963.
- [ 4 ] Ю.П.Гайдуков, Е.С.Ицкевич. ЖЭТФ, **45**, 71, 1963.
- [ 5 ] Н.Б.Брандт, Ю.П.Гайдуков, Е.С.Ицкевич, Н.Я.Минина. ЖЭТФ, **47**, 455, 1964.
- [ 6 ] Е.С.Ицкевич, Л.М.Фишер. ЖЭТФ, **53**, 98, 1967.
- [ 7 ] Е.С.Ицкевич, А.Н.Вороновский. Письма в ЖЭТФ, **4**, 226, 1966.
- [ 8 ] Е.С.Ицкевич, Л.М.Фишер. Письма в ЖЭТФ, **6**, 748, 1967.
- [ 9 ] Н.Б.Брандт, Я.Г.Пономарев. ЖЭТФ, **55**, 1215, 1968.
- [ 10 ] Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Р.Г.Валеев. Письма в ЖЭТФ, **6**, 724, 1967.
- [ 11 ] Ю.В.Косичкин. Диссертация, Москва, 1970.
- [ 12 ] Б.Г.Лазарев, Л.С.Лазарева, В.И.Макаров. ЖЭТФ, **44**, 481, 1963.
- [ 13 ] В.И.Макаров, В.Г.Барьяхтар. ЖЭТФ, **48**, 1717, 1965.
- [ 14 ] Ю.П.Гайдуков. Диссертация, Москва, 1966.
- [ 15 ] Н.Е.Алексеевский, Ю.П.Гайдуков. ЖЭТФ, **43**, 2097, 1962.
-