

## ОБРАЗОВАНИЕ ГАНТЕЛЕВИДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ФЕРМИ И ВНУТРИЗОННЫЙ МАГНИТНЫЙ ПРОБОЙ У СПЛАВА $\text{Bi}_{0,78}\text{Sb}_{0,22}$ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

М.Ю.Лавренюк, Н.Я.Минина, А.М.Савин

При одноосном сжатии сплава  $\text{Bi}_{0,78}\text{Sb}_{0,22}$  наблюдается слияние двух изолированных полостей поверхности Ферми в одну гантелеобразную, которое сопровождается явлением внутризонного магнитного пробоя.

В отличие от межзонного магнитного пробоя (МП), внутризонный пробой (ВП) — явление более редкое и наблюдался лишь в валентной зоне теллура<sup>1</sup>. Как и при МП, переход с одной классической траектории на другую возможен, если траектории близки в  $p$ -пространстве. Такая ситуация может реализоваться на поверхности Ферми (ПФ), имеющей седловые или конические точки. Если возникающие в этом случае в магнитном поле самопересекающиеся орбиты не являются экстремальными, ВП макроскопически не проявляется<sup>2</sup>. Однако, когда при прохождении уровня Ферми  $E_F$  через седловую точку  $E_k$  в энергетическом спектре происходит слияние двух изолированных полостей в одну гантелеобразную ПФ (электронный топологический переход (ЭТП) И.М.Лифшица типа "образования перемычки") носители заряда, имеющие в случае квазиклассического квантования траекторию с самопересечением в плоскости  $p_z \parallel H$  ( $p_z = 0$ ), принадлежат к пояску на ПФ вблизи экстремального сечения  $S$  и определяют квантовые осцилляционные эффекты в магнитном поле.

В последнее время появились данные, указывающие на возникновение седловой точки в электронном и дырочном спектре сплавов  $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$  в точках  $L$  ( $X \cong 0,15$ )<sup>3</sup>, так что с ростом  $X$  зависимость  $E(k)$  принимает двугорбый вид. При прохождении  $E_F$  через седловую точку ( $E_F = E_k$ ) должен иметь место ЭТП образование (разрыв) гантелевидной ПФ (рис. 1). В процессе образования гантели имеется два типа близко расположенных в импульсном пространстве траекторий, допускающих вероятность ВП: пробой между двумя изолированными квазиэллипсоидами при  $E_F \lesssim E_k$  (траектории типа 2 на рис. 1, а) и пробой через "шейку" гантели при  $E_F \gtrsim E_k$  (траектории 3,4 на рис. 1, а). В первом случае ВП должен проявиться в удвоении частоты  $F$  осцилляций Шубникова — де Гааза (ШдГ) от максимальных экстремальных сечений "эллипсоидов" ПФ  $S_{max} \sim F_{max}$  в достаточно больших магнитных полях  $H$ , а во втором случае на фоне высокой частоты, связанной с максимальным сечением гантели, появляются в два раза меньшие пробойные частоты.

В настоящей работе исследован эффект ШдГ у сплава  $\text{Bi}_{0,78}\text{Sb}_{0,22}$  при одноосном сжатии вдоль биссекторной оси  $C_1$ , перпендикулярной бинарной оси  $C_2$ . При деформации такого типа один из ранее эквивалентных электронных  $L$ -экстремумов опускается ниже уровня Ферми, тогда как два других поднимаются выше него<sup>4</sup> (рис.1, б). Создается уникальная возможность провести уровень Ферми в опускающемся экстремуме через предполагаемую седловую точку в процессе одного опыта и наблюдать соответствующее изменение ПФ.

На рис. 2 приведена зависимость от деформации  $\epsilon$  частот ШдГ от максимального в тригонально-биссекторной плоскости ( $C_1C_3$ ) сечения ПФ. При малых  $\epsilon \leq 0,07\%$  угловые зависимости  $S(\phi)$  в плоскости ( $C_1C_3$ ) соответствуют эллипсоидальной ПФ с анизотропией  $A = \frac{S_{max}}{S_{min}} = 12$  (у чистого  $\text{Bi}$   $A = 11$ ), а соответствующие осцилляции ШдГ монохроматичны до предельных магнитных полей  $H \cong 50$  кЭ (кривая 1 рис. 3). При  $\epsilon \gtrsim 0,18\%$  в окрестности минимальных сечений  $S_{min}$  наблюдаются биения двух частот, тогда как на зависимости  $F_{max}(\epsilon)$  при  $\epsilon \gtrsim 0,08\%$  появляется ветвь с удвоенной частотой. Характер изменения  $F_{max}(\epsilon)$  на рис. 2 можно объяснить слиянием при  $\epsilon = \epsilon_k$  двух изолированных ПФ в одну гантелеобразную (рис.1, а), в результате чего на зависимости  $F_{min}(\epsilon)$  появляются две частоты, связанные с "шейкой" и

”пузом” гантели, а  $S_{max} \sim F_{max}$  возрастает вдвое.

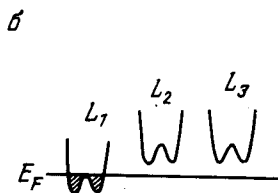
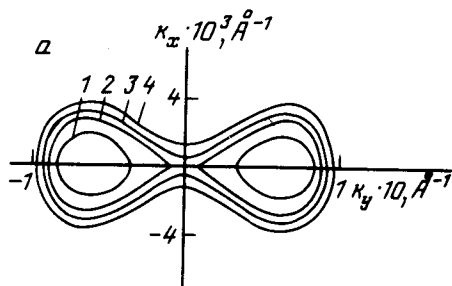


Рис. 1

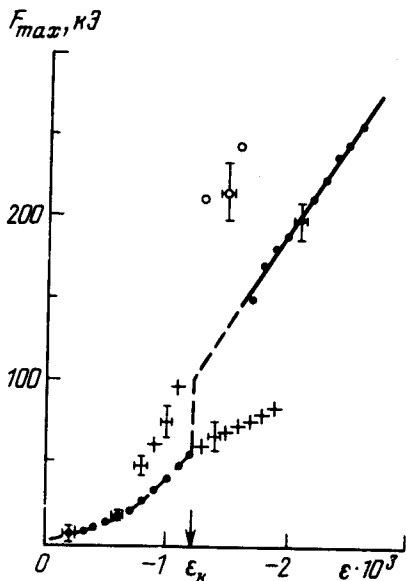


Рис. 2

Рис. 1. *a* – Контуры максимального экстремального сечения электронной ПФ в тригонально-бисекторной плоскости у сплавов  $\text{Bi}_{0,78}\text{Sb}_{0,22}$ , рассчитанные по модели энергетического спектра <sup>5</sup> и представленные в пространстве волновых векторов  $\mathbf{k}$  ( $\mathbf{H} \parallel k_z, k_z = 0$ ) для  $E_F$ : 1 – 19 мэВ, 2 – 21,5 мэВ, 3 – 22 мэВ, 4 – 23 мэВ. *б* – Относительное расположение электронных *L*-экстремумов при сжатии вдоль оси  $C_1$  ( $E_F - E_k$ )

Рис. 2. Зависимость от деформации частоты ШдГ от максимального экстремального сечения ПФ  $\text{Bi}_{0,78}\text{Sb}_{0,22}$  соответствующего контурам на рис. 1, *a* ( $\mathbf{H} \parallel k_z$ ). Крестами отмечены магнитопробные частоты

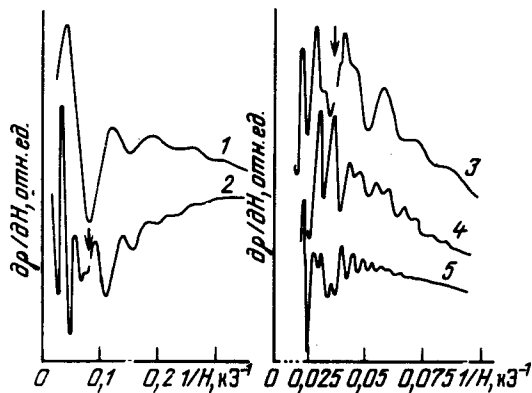


Рис. 3. Изменение с деформацией вида осцилляций ШдГ, соответствующих данным рис. 2, *б*. Деформации  $\epsilon$ : 1 –  $-0,05\%$ , 2 –  $-0,08\%$ , 3 –  $-0,15\%$ , 4 –  $-0,19\%$ , 5 –  $-0,25\%$ . Стрелками указывают места изменения масштаба по оси  $dR/dH$

Динамика изменения с деформацией осцилляционных зависимостей от максимального сечения, где в точке  $\epsilon_k$  возникает траектория с самопересечением, приведена на рис. 3. Появление в полях  $H \gtrsim 30$  кЭ удвоенной частоты на кривой 2 рис. 3 следует рассматривать как туннелирование через барьер, разделяющий две области потенциальной ямы в *L* в докритической области деформаций (рис. 1, *б*): частоты ШдГ в низких полях соответствуют изолированным квазиклассическим орбитам, а в высоких – возникают удвоенные магнитопробные. Удвоенные частоты нельзя рассматривать как вторую гармонику, так как в области максимальных деформаций картина изменяется на противоположную: в низких магнитных полях осцилляции определяются высокочастотной составляющей от максимального сечения гантели, тогда как бо-

лее низкая частота, возникающая в результате пробоя через "шейку" гантели, появляется в области больших  $H$  (кривая 5 рис. 3). С деформацией (ростом шейки гантели) поле пробоя  $H_{\text{п}}$  смещается в большие поля (ср. кривые 4 и 5 рис. 3). Поле пробоя  $H_{\text{п}} \approx 35$  кЭ для гантели при  $\epsilon = -0,25\%$ , полученное из соотношения  $H_{\text{п}} = \Delta E / \mu$ , где  $\Delta E = E_F - E_k$  — энергетическое расстояние до седловой точки спектра,  $\mu$  — магнетон Бора (расчет по модели <sup>5</sup>), согласуется с видом соответствующей зависимости  $\frac{\partial \rho}{\partial H}(H)$  (кривая 5 рис. 3).

Переходная область ( $0,11 \leq \epsilon \leq 0,18$ )% является областью близости к конической точке ПФ (самопересекающиеся орбиты). Условия квантования для таких орбит выведены в работах <sup>6,7</sup>. В этой области расстояния между уровнями Ландау существенно неэквидистантны <sup>7</sup>, что приводит к появлению высоких гармоник в указанном выше интервале деформаций (рис. 2, кривая 3 рис. 3). Деформация  $\epsilon_k \cong 0,12\%$ , соответствующая точке образования гантели, выбрана в этом интервале из соображения максимального соответствия экспериментальных результатов и данных расчета по модели <sup>5</sup> ( $\epsilon_k \sim 0,1\%$ ).

Авторы признательны М.И.Каганову, И.И.Фарбштейну и Я.Г.Пономареву за полезные дискуссии и замечания.

#### Литература

1. Anzin V.B., Bresler M.S., Farbshtein I.I., Kosichkin Yu. V., Veselago V.G. Phys. Stat. Solid, 1970, 40, 417.
2. Электроны проводимости, М.: Наука, 1985, гл. III.
3. Пономарев Я.Г., Судакова М.В. Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по полупроводникам с узкой запрещенной зоной и полуметаллам, Львов, 1986, ч. 2, 164.
4. Грандт Н.Б., Кульбачинский В.А., Минина Н.Я., Широких В.Д. ЖЭТФ, 1980, 78, 1114.
5. Mc Clure J.W., Choi K.H. Solid State Comm., 1977, 21, 1015.
6. Зильберман Г.Е. ЖЭТФ, 1958, 34, 748.
7. Азбель М.Я. ЖЭТФ, 1960, 39, 1276.

Московский государственный  
университет им. М.В.Ломоносова

Поступила в редакцию  
23 июня 1987 г.