

РАЗМЕРНЫЕ ОСЦИЛЛЯЦИИ ПРОДОЛЬНОГО МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЯ
ТОНКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ МОНОКРИСТАЛЛОВ ВИСМУТА*Н. Б. Брандт, Д. В. Гицу, А. А. Николаева, Я. Г. Пономарев*

На монокристаллических нитях висмута цилиндрической формы, толщиной от 0,2 до 0,8 мкм в слабых магнитных полях обнаружены эквидистантные по полю и убывающие по амплитуде осцилляции продольного магнитосопротивления, связанные, по-видимому, с периодическим отсеканием размерами образца орбит электронов, соответствующих квантованным неэкстремальным сечениям поверхности Ферми.

В настоящей работе исследовано продольное магнитосопротивление тонких цилиндрических монокристаллов висмута с диаметром $0,2 \leq d \leq 0,8$ мкм в магнитных полях H до 15 кэ при гелиевых температурах. Монокристаллические нити висмута в стеклянной изоляции получались литьем из жидкой фазы методом Улитовского [1]. Рентгенографические исследования показали, что у образцов с диаметром $d < 5$ мкм ось цилиндра совпадает с ΓL -направлением, расположенным в зоне Бриллюэна в биссекторно-тригональной плоскости и составляющим с биссектрисой угол $19,5^\circ$.

Диаметр образцов находился расчетным путем по значению удельного сопротивления висмута при комнатной температуре. Этот метод, как показали специальные измерения на электронном микроскопе, дает удовлетворительную точность при диаметрах образцов больше 0,2 мкм.

У исследованных образцов отношение $\rho_{300\text{ К}} / \rho_{4,2\text{ К}}$ уменьшалось с толщиной от ~ 15 при $d = 1$ мкм до ~ 3 при $d = 0,2$ мкм. На продольном магнитосопротивлении $\rho(H)$ при гелиевых температурах обнаружен участок отрицательного магнитосопротивления, смещающийся с уменьшением d в область сильных магнитных полей.

В магнитных полях H , при которых максимальный ларморовский радиус электронной орбиты r_H меньше радиуса цилиндра $R = d/2$, на продольном магнитосопротивлении наблюдаются нормальные шубниковские осцилляции, эквидистантные в обратном поле (рис. 1). Область существования шубниковских осцилляций сдвигается в сильные поля с уменьшением d . У образцов с $d > 0,4 - 0,5$ мкм в полях до 15 кэ присутствуют две частоты с периодами: $\Delta_1(1/H) = (3,8 \pm 0,4) \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$ и $\Delta_2(1/H) = (78,0 \pm 1,0) \cdot 10^{-5} \text{ э}^{-1}$, которые хорошо согласуются с данными, полученными для массивных образцов висмута в той же ориентации [2]. У более тонких образцов наблюдаются шубниковские осцилляции только с одним периодом $\Delta_1(1/H)$. В пределах экспериментальных погрешностей величины периодов $\Delta_1(1/H)$ и $\Delta_2(1/H)$ не меняются с толщиной образцов.

В начальном интервале магнитных полей у всех исследованных образцов обнаружены затухающие с ростом поля осцилляции продольного магнитосопротивления, параметры которых сильно зависят от диаметра образцов (рис. 1). Осцилляции отличаются хорошей воспроизводимостью. Положение и форма осцилляционных пиков не зависят от измерительного тока и амплитуды модуляции магнитного поля. При возникновении перегревных эффектов амплитуда этих осцилляций спадает значительно быстрее, чем амплитуда шубниковских осцилляций в сильном поле.

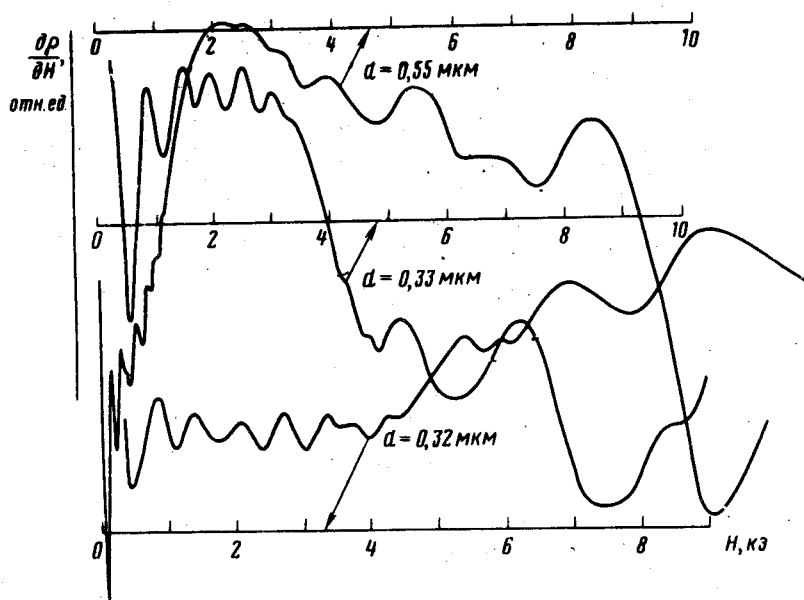


Рис. 1. Осцилляционные зависимости $\frac{d\rho}{dH}(H)$, для случая продольного магнитосопротивления ($T = 4,2$ К) у цилиндрических монокристаллов висмута разного диаметра

Характерные особенности новых осцилляций заключаются в следующем: 1) осцилляции наблюдаются в полях H , меньших поля "отсечки" $H_{отс} = c D_{max} / eD$ (D_{max} — максимальный диаметр экстремального сечения электронной поверхности Ферми), где нормальные шубниковские

осцилляции отсутствуют; 2) осцилляции представляют собой суперпозицию двух частот, период которых постоянен в прямом поле (один из наиболее ярко выраженных случаев биений двух частот приведен на рис. 2); 3) частота осцилляций увеличивается с диаметром образцов; 4) амплитуда осцилляций спадает с ростом магнитного поля и зануляется к моменту появления нормальных шубниковских осцилляций; 5) понижение температуры от 4,2 до 2К приводит к заметному росту амплитуды осцилляций; период осцилляций от температуры не зависит.

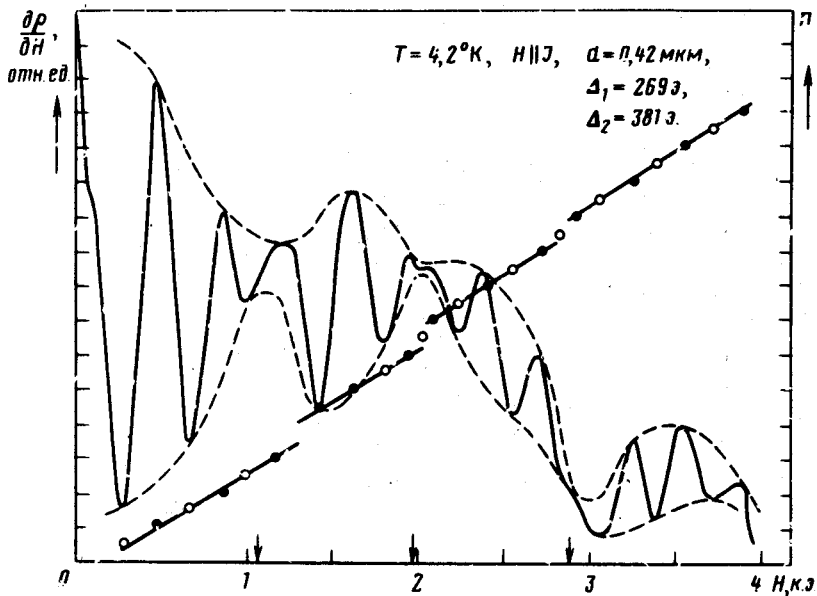


Рис. 2. Характерный вид размерных осцилляций продольного магнитосопротивления для образца с $d = 0,42 \text{ мкм}$ при 4,2К и зависимость номера экстремумов от магнитного поля. Узлы биений обозначены стрелками

Зависимость частоты обнаруженных в настоящей работе осцилляций ($H < H_{\text{отс}}$) от диаметра образцов позволяет отнести их к классу размерных. Четкая картина биений, наблюдавшаяся у большинства исследованных образцов (рис. 2), позволила определить периоды составляющих частот с достаточной точностью. Из рис. 3 видно, что периоды обеих частот размерных осцилляций зависят от диаметра образцов d по закону: $\Delta_p \sim d^{-2}$. Отсюда следует, что изменение магнитного потока через сечение цилиндрического образца при изменении номера осцилляций на единицу: $\Delta\phi = \Delta HS = \Delta_p (\pi d^2 / 4)$, есть величина существенно постоянная. С нашей точки зрения, эта закономерность является наиболее важной характеристикой обнаруженных в настоящей работе размерных осцилляций. Для нижней ветви $\Delta_p(d)$ на рис. 3 величина $\Delta\phi$ составляет: $(4,3 \pm 0,4) \cdot 10^{-15} \text{ тл} \cdot \text{см}^2$, что в пределах ошибок совпадает с величиной кванта потока $hc/e = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ тл} \cdot \text{м}^2$.

Осцилляции магнитосопротивления в слабых магнитных полях при гелиевых температурах наблюдались ранее на вискерах висмута [3, 4] и на висмутовых пленках [5]. При регистрации осцилляций в [3, 4] были обнаружены гистерезисные явления, а также существенная зависимость положения осцилляционных пиков от измерительного тока. Подробный анализ толщинных зависимостей параметров осцилляций в [3–5] не проводился, поэтому сравнение данных, полученных в настоящей работе, с результатами работ [3–5] не представляется возможным.

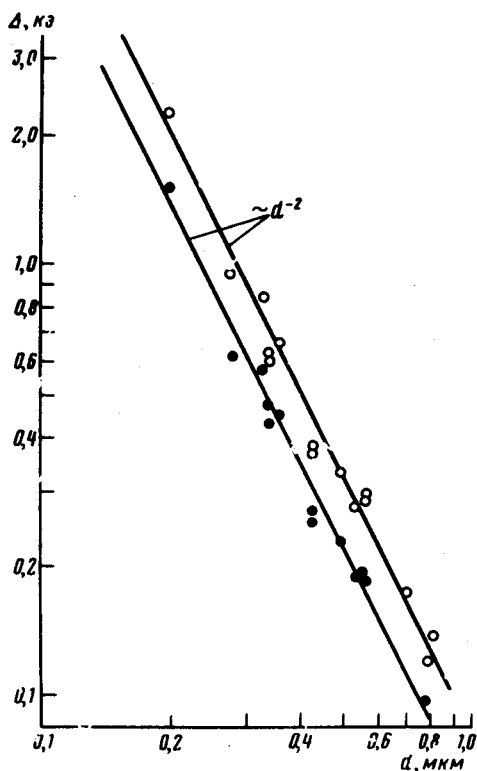


Рис. 3. Зависимости периодов размерных осцилляций в прямом поле от диаметра цилиндрических монокристаллов висмута

Осцилляционные эффекты в тонких металлических цилиндрах в слабом магнитном поле ($r_H > R$) рассмотрены теоретически в работах [6, 7]. В [6] показано, что при условии зеркального отражения от поверхности электронов со "скользящими" орбитами в продольном магнитном поле возникают магнитные поверхностные уровни, которые вызывают осцилляции термодинамических величин в функции магнитного потока Φ через сечение цилиндра с периодом, равным кванту потока $\Phi_0 = hc/e$. В [7] рассмотрены осцилляционные эффекты в продольном и поперечном магнитных полях для случая диффузного рассеяния. Осцилляционные пики в магнитосопротивлении возникают каждый раз, когда максимальный диаметр электронной орбиты, соответствующей оче-

редной квантовой трубке Ландау, сравнивается с d . В случае продольного магнитосопротивления при сферической поверхности Ферми период осцилляций в функции потока через сечение цилиндра будет определяться разницей в магнитных потоках через орбиты, соответствующие соседним квантовым трубкам, т.е. опять: $\Delta\phi = hc/e$. При анизотропной поверхности Ферми период эквидистантных в прямом поле размерных осцилляций дается выражением [7]: $\Delta_p = c h/aed^2$, где a — параметр, связывающий площадь сечения поверхности Ферми и квадрат его диаметра: $S(\epsilon, p_z) = aD^2(p_z)$. Из [7] следует, что в случае, когда поверхность Ферми состоит из нескольких замкнутых поверхностей с разными a , размерные осцилляции будут иметь характер биений. Амплитуда осцилляций, предсказанных в [7], должна быстро убывать с ростом магнитного поля.

Результаты, полученные в настоящей работе, находятся в качественном согласии с предсказаниями теории [7]. Размерные осцилляции с двумя частотами определяются, по-видимому, сечением электронного эллипсоида, расположенного в плоскости зеркальной симметрии, содержащей ось цилиндра, и двумя совпадающими по величине сечениями от двух других электронных эллипсоидов, расположенных симметрично относительно этой плоскости.

Авторы благодарны М.М.Маркус за проведение рентгенографических исследований.

Московский

государственный университет
им. М.В.Ломоносова

Институт прикладной физики
Академии наук Молдавской ССР

Поступила в редакцию
17 ноября 1975 г.
После переработки
30 июля 1976 г.

Литература

- [1] Н.Б.Брандт, Д.В.Гицу, А.М.Иойшер, Б.П.Котрубенко, А.А.Николаева. ПТЭ, № 3, 256, 1976.
- [2] R.N. Bhargava. Phys. Rev., 156, 785, 1967.
- [3] Ю.П.Гайдуков, Н.П.Данилова. Письма в ЖЭТФ, 15, 592, 1972.
- [4] Ю.П. Гайдуков, Н.П.Данилова. ФТТ, 16, 924, 1974.
- [5] Ю.Ф.Комник. Докторская диссертация, г. Харьков, 1975.
- [6] Э.Н.Богачек, Г.А.Гогодзе. ЖЭТФ, 63, 1839, 1972.
- [7] В.Г.Песчанский, В.В.Синолицкий. Письма в ЖЭТФ, 16, 484, 1972.