

МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ ВИСМУТА В ПОЛЯХ ДО 450 кэ ПРИ ГЕЛИЕВЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Н.Б.Брандт, Е.А.Свистова, Г.Х.Табиева

1. Изучение гальваномагнитных явлений у металлов в ультраквантовой области, когда расстояния между уровнями Ландау становятся сравнимы и превышают энергию Ферми, представляет единственную в своем роде возможность исследовать структуру энергетического спектра металлов в достаточно широком интервале энергий у границы Ферми [1,2]. В ультраквантовой области в результате изменения границ зон, энергии Ферми в зонах, концентрации носителей тока и их распределения между отдельными изоэнергетическими поверхностями структура спектра изменяется. Характер этого изменения непосредственно определяется законом дисперсии носителей тока и поэтому исследование этих изменений дает ценную информацию о характере их закона дисперсии.

2. Эффекты, связанные с переходом в ультраквантовую область, проще всего наблюдать у металлов с малой концентрацией носителей тока. В настоящей работе сообщаются результаты исследования электрического сопротивления у монокристаллических образцов висмута в поперечном магнитном поле Н напряженностью до 450 кэ при температуре жидкого гелия.

Впервые магнитосопротивление висмута в полях напряженностью до 300 кэ было исследовано в [3] при температуре 77°К и было обнаружено, что в области сильных полей зависимость ρ от Н близка к линейной. В области гелиевых температур поля, при которых исследовалось электрическое сопротивление висмута, не превышали, насколько нам известно, 100 кэ [4,5].

3. Для получения магнитного поля нами использовалась импульсная установка с периодом 316 мксек.

Основная трудность исследования гальваномагнитных эффектов у чистых металлов при низких температурах с использованием коротко-периодных импульсов магнитного поля заключается в том, что в результате малой скриновой глубины при возрастании поля образцы разруша-

ются в результате взаимодействия токов Фуко с полем. Эта трудность была устранена путем создания первичного постоянного магнитного поля, увеличивающего сопротивление образца в нужное число раз.

Образцы различной формы (параллелепипеды, цилиндры) и различных размеров (от 1 x 1 x 3,5 мм до 0,2 x 0,4 x 2,5 мм) изготавливались из висмута двух сортов: Bi_1 с $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 300 \pm 400$ и Bi_2 с $\rho_{300}/\rho_{4,2} = 150$. Номинальная чистота обоих сортов выше, чем 99,9999%. Измерения проводились на большом числе образцов при всевозможных ориентациях магнитного поля и тока относительно кристаллографических осей. В результате тщательного исследования влияния геометрии образцов, расположения электродов, влияния силы измерительного тока, определяющего величину перегрева образца в импульсе ("тепловой удар") и способа крепления образца, были выбраны такие условия, при которых влиянием паразитных эффектов (в частности, [6]) можно было практически пренебречь. Все приведенные ниже результаты полностью обратимы и воспроизводимы при импульсах поля различной величины.

4. На рис. I и 2, в качестве примера, изображены некоторые кривые зависимости ρ от H при трех основных ориентациях магнитного поля относительно кристаллографических осей, для некоторых образцов из Bi_1 и Bi_2 (№4).

Характерной особенностью приведенных кривых является следующий вид зависимости монотонной составляющей ρ от поля: квадратичный в области магнитных полей (доултраквантовая область $H < 25 \pm 35$ кэ), близкий к линейному в широкой области полей $25 \pm 35 < H < 200$ кэ выход на насыщение (при $H \parallel$ тригональной оси в полях 200 ± 400 кэ, кривая I) и, наконец, участок с отрицательной производной $d\rho/dH$ в полях, больших 320 кэ (при $H \parallel$ бинарной и биссекторной осям, кривая II).

На монотонную составляющую кривой $\rho(H)$ накладываются ясно видимые осцилляции магнитосопротивления (эффект Шубникова - де Гааза). Сильная зависимость параметров спектра от поля в ультраквантовой области приводит к тому, что обычно наблюдаемая в области слабых магнитных полей периодичность осцилляций в обратном поле нарушает-

ся. Картина осцилляций в полях до 90 кэ хорошо согласуется с работой [4].

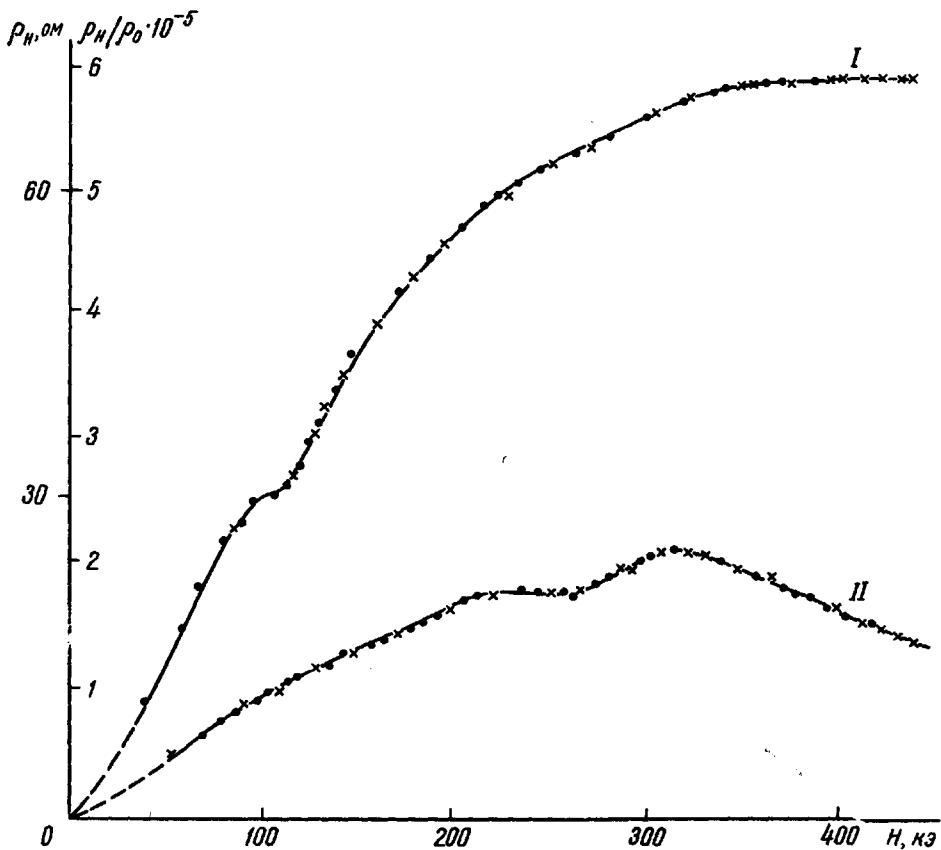


Рис. I. Электрическое сопротивление B_L в магнитном поле при температуре жидкого гелия. I - $H \parallel$ тригональной, $i \parallel$ биссекторной осям. Образец № 4 (B_{L2}); II - $H \parallel$ бинарной, $i \parallel$ биссекторной осям. Образец № 4 (B_{L2}). . - результаты измерений в полях до 410 кэ, x - до 440 кэ

5. Для интерпретации результатов в [4] использовался квадратичный закон дисперсии для дырок и неквадратичный закон Коэна [7] для электронов, с учетом сильного спинового расщепления уровней Ландау.

Основываясь на результатах этого анализа, минимумам ρ на рис. I можно приписать прохождение через уровень Ферми у дырок энергетических уровней: $n = \pm 4$ ($H = 80$ кэ), $n = \pm 3$ ($H = 140$ кэ), $n = \pm 2$ ($H = 250$ кэ) - при $H \parallel$ бинарной оси, уровней $n = \pm 4$ ($H = 100$ кэ), $n = \pm 3$ ($H = 165$ кэ), $n = \pm 2$ ($H = 270$ кэ) - при $H \parallel$ биссекторной оси, и уровня $n = -1$ ($H = 100$ кэ) при $H \parallel$ тригональной оси.

Зависимость энергии Ферми от поля при ориентациях $H \parallel$ бинарной и биссекторной осям, рассчитанных по формуле

$$(n + 1/2) h \omega^2 \cdot H_i = E_F(H_i)$$

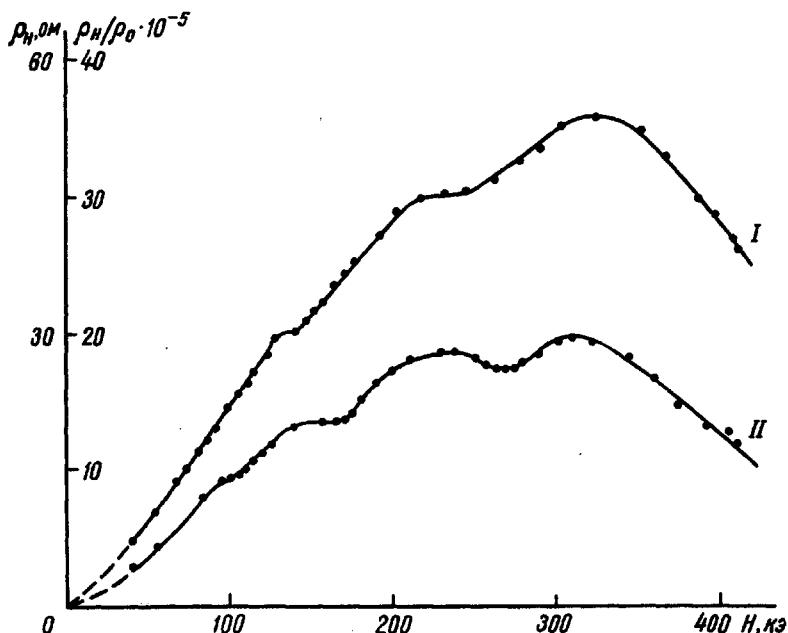


Рис. 2. Электрическое сопротивление ρ_H в магнитном поле при температуре жидкого гелия. I - $H \parallel$ бинарной, $i \parallel$ тригональной оси. Образец № 5 (B_{t1}); II - $H \parallel$ биссекторной, $i \parallel$ тригональной оси. Образец № 6 (B_{t2})

($\omega^2 = e\hbar/\omega^2 c$), представлены на рис. 3.

При ориентации $H \parallel$ тригональной оси E_F возрастает, но более медленно, чем падает при $H \parallel$ бинарной оси.

Неквадратичность закона дисперсии у электронов и характер спирального расщепления электрических уровней приводят к тому, что при всех ориентациях магнитного поля концентрация n носителей тока у висмута увеличивается с полем приблизительно по линейному закону (при $H \parallel$ бинарной оси в поле около 400 кэ концентрация носителей возрастает примерно в 10 раз).

Возрастание концентрации электронов у висмута в магнитном поле является причиной появления линейного участка для монотонной составляющей на кривых $\rho(H)$. Легко показать, что при $n = \text{const}$ сопротивление у висмута в полях до 200 кэ возрастало бы приблизительно по

квадратичному закону, что и должно было бы быть на основании двухзонной теории [8,9].

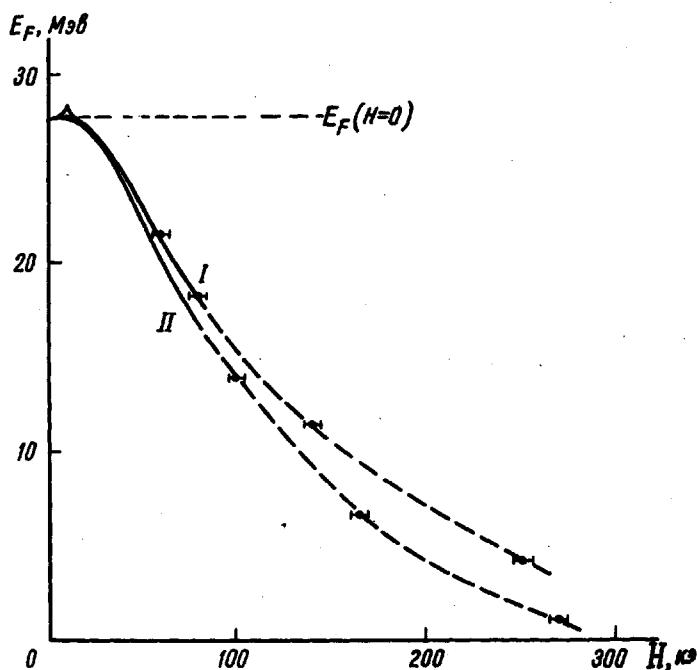


Рис. 3. Изменение энергии Ферми в магнитном поле. Кривые: I - $H \parallel$ бинарной оси, II - $H \parallel$ биссекторной оси. Сплошная кривая - результат расчета по данным работы [4]

Падение сопротивления в сильных полях при $H \parallel$ бинарной и биссекторной осям является, по-видимому, следствием перестройки энергетического спектра и появлением при $H > 320$ кэ у висмута новой "трехэллипсоидной" дырочной изоэнергетической поверхности, резко увеличивающей его электропроводность.

Для дальнейшего исследования этого вопроса необходимы измерения в больших магнитных полях.

Пользуемся случаем поблагодарить М.Я.Азбеля за обсуждение результатов и ценные замечания, А.И.Шальникова за интерес к работе, Н.Л.Шофман, Т.В.Горскую и А.Н.Радионова за помощь при измерениях и старшего мастера А.П.Попова за высокое качество механических работ.

Физический факультет
Московского государственного
университета им. М.В.Ломоносова

Поступило в редакцию
3 мая 1966 г.

Литература

- [1] М.Я.Азбелъ, Н.Б.Брандт. ЖЭТФ, 48, I206, I965.
- [2] И.И.Цидильковский, В.И.Соколов, М.М.Аксельрод .Физика металлов и металловедение, I6, 3I8, I963.
- [3] П.Л.Капица. Proc. Roy. Soc., All9, 358, I928.
- [4] G.E.Smith, G.A.Baraff, J.M.Rowell. Phys. Rev., I35A, III8, I964.
- [5] J.Vuillemin. Jornal of research and development, 8, N 3, I964.
- [6] Н.Е.Алексеевский, Н.Б.Брандт, Т.И.Костина. ЖЭТФ, 34, I339, I958.
- [7] M.M.Cohen. Phys Rev., I2I, 387, I96I.
- [8] E.H.Soudheimer. Proc. Roy. Soc., AI93, 484, I948.
- [9] И.М.Либштадт, М.И.Каганов. Успехи физ.наук, 69, 4I9, I959; 78, 4II, I962.