

МАГНИТНЫЙ ПРОБОЙ В НИОБИИ  
В СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХН.Е.Алексеевский<sup>1)</sup>, К.-Х.Бертель<sup>2)</sup>, В.И.Нижанковский<sup>3)</sup>

Проведено исследование магнитосопротивления сверхчистого ниобия в полях до 170 кэ. Обнаружен магнитный пробой, приводящий к переходу открытых траекторий в замкнутые. Анализ экспериментальных результатов в рамках когерентной модели дает поле пробоя  $H_0 \approx 280$  кэ.

К настоящему времени поверхность Ферми ниобия исследована достаточно подробно как теоретически, так и экспериментально. Первые расчеты Маттхейза [1] методом ППВ показали, что она состоит из деформированных дырочных октаэдронов во второй зоне, в третьей зоне имеются дырочные эллипсоиды и открытая многосвязная поверхность. Экспериментальные результаты по магнитосопротивлению [2, 3], а также результаты по эффекту де Гааза – ван Альфена [4] подтвердили эту модель и позволили определить геометрические размеры некоторых деталей поверхности Ферми ниобия.

До сих пор оставался невыясненным вопрос о величине расстояния между дырочными октаэдронами второй зоны и многосвязной открытой поверхностью третьей. Теоретические модели, не учитывающие спин-орбитальное взаимодействие, дают касания этих поверхностей по окружностям шеек многосвязной открытой поверхности. Экспериментально эти касания обнаружены не были.

Нами были проведены исследования поперечного магнитосопротивления монокристаллических образцов ниобия различных ориентаций, вырезанных из сверхчистого ниобия [5]. Отношение сопротивлений  $\rho_{300^\circ\text{K}}/\rho_{0^\circ\text{K}}$  использовавшихся образцов было от  $2 \cdot 10^4$  до  $6 \cdot 10^4$ . Исследования проводились в гелиевой области температур в поле охлаждаемого водой медного соленоида Е-150 Международной лаборатории сильных магнитных полей и низких температур (г. Вроцлав ПНР). Для вращения образца использовалось устройство, аналогичное описанному в [6]. Измерения проводились в магнитном поле до 170 кэ.

На рис. 1 приведены угловые зависимости магнитосопротивления образца ниобия, ось которого составляет малый угол с направлением [001]. Угловые зависимости сняты в двумерной области открытых направлений (стереографическая проекция открытых направлений построена в [7]). С ростом поля наблюдаются провалы на угловой зависимости магнитосопротивления, отстоящие на  $\pm 7,5$  и  $\pm 10^\circ$  от направления [100]. Зависимости сопротивления от поля для различных направ-

<sup>1)</sup> Сотрудник Института физических проблем АН СССР.

<sup>2)</sup> Сотрудник Центрального института физики твердого тела и материаловедения Германской АН, Берлин.

<sup>3)</sup> Сотрудник Института спектроскопии АН СССР.

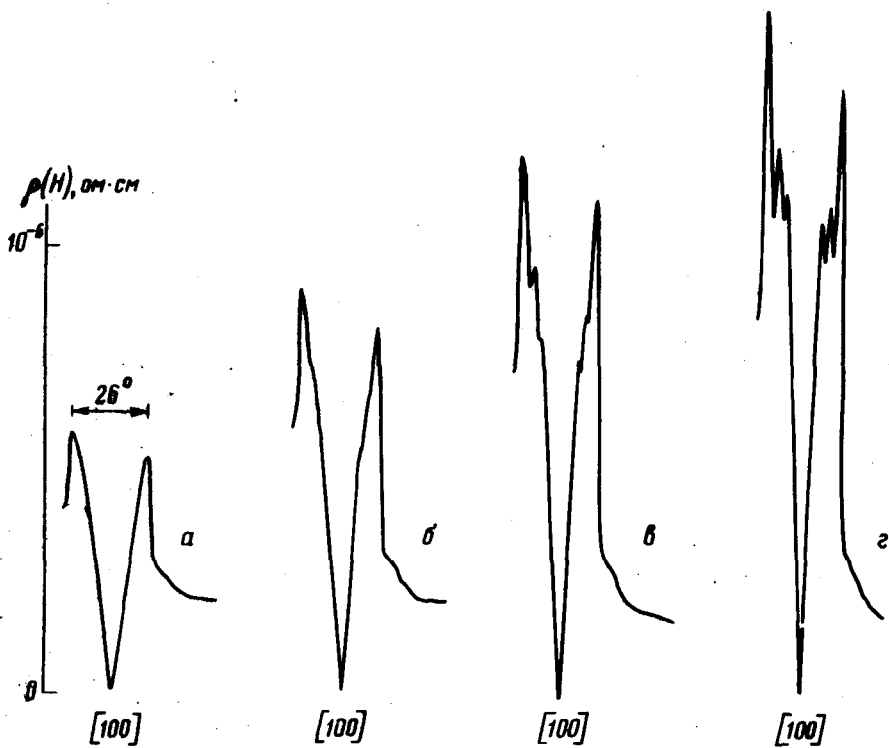


Рис. 1

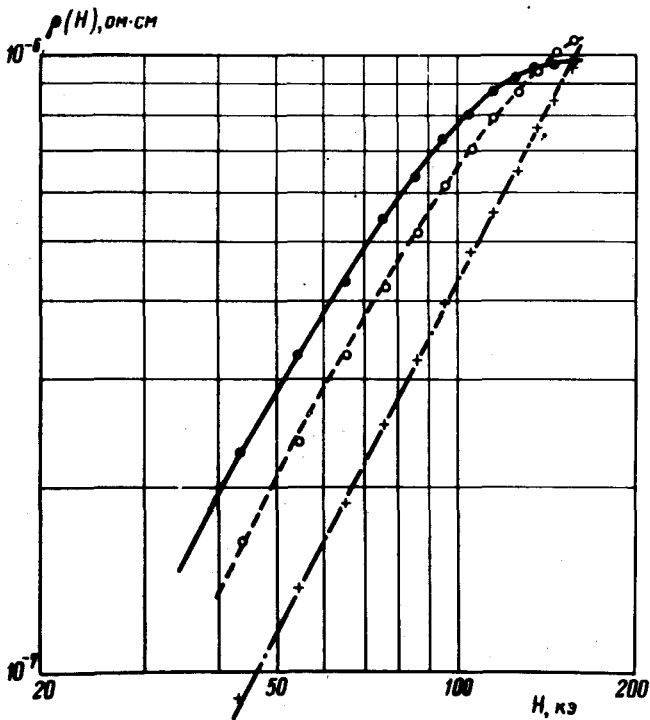


Рис. 2

лений магнитного поля приведены на рис. 2. Если магнитное поле отклонено от оси  $[100]$  на угол  $\alpha < 6^\circ$ , то магнитосопротивление квадратично зависит от поля; если  $\alpha = 7,5^\circ$ , на зависимости  $\rho_H(\alpha)$  появляется минимум, в котором возникает тенденция к насыщению. Когда  $\alpha = 10^\circ$ , магнитосопротивление полностью насыщается в поле  $155 \text{ кэ}$ .

Аналогичные особенности угловых диаграмм наблюдались на образцах других ориентаций ( $[011]$ ;  $8^\circ$  от  $[001]$  к  $[111]$ ;  $10^\circ$  от  $[011]$  к  $[111]$ ) в полях  $> 100 \text{ кэ}$ . Понижение температуры приводило к усилению особенностей, т. е. увеличению глубины минимумов на угловых диаграммах.

Обнаруженные нами особенности угловых зависимостей магнитосопротивления ниобия не могут быть связаны с образованием удлиненных траекторий, поскольку внутри двумерной области открытых направлений могут существовать лишь обычные замкнутые и открытые траектории. Наиболее вероятной причиной обнаруженных особенностей является магнитный пробой между открытой многосвязной поверхностью третьей зоны и дырочными октаэдронами второй.

Если считать такое объяснение справедливым, то можно оценить величину поля пробоя  $H_0$ . Для этой цели нужно проанализировать возможные электронные траектории. Когда магнитное поле отклонено от оси четвертого порядка на угол  $\alpha \geq 7,5^\circ$  между двумя открытыми траекториями (по многосвязной поверхности) с противоположными направлениями движения находится одна замкнутая (по октаэдрону). Очевидно, что магнитосопротивление в этом случае имеет вид  $\rho \sim H^2 W_{\text{откр}}$ , где  $W_{\text{откр}}$  — вероятность движения электрона по данной открытой траектории без перехода на траекторию с противоположным направлением движения.

Поскольку использовавшиеся нами образцы ниобия отличались высоким совершенством [5] (концентрация примесей не превышала  $5 \text{ ppm}$ , плотность дислокаций была меньше  $10^4 \text{ см}^{-2}$ ), для нахождения  $W_{\text{откр}}$  было естественно попытаться воспользоваться когерентной моделью магнитного пробоя [8]. Оценка поля пробоя, проведенная на основании анализа экспериментальных данных, дала значение  $H_0 \approx 280 \text{ кэ}$ .

Из формулы, полученной Блаунтом [9], можно оценить величину энергетического барьера  $\Delta$ , которая оказывается равной  $\Delta \approx 0,09 \text{ эв}$ . Следует заметить, что эта величина практически совпадает с энергией спин-орбитального взаимодействия, полученной спектроскопически для ионов  $\text{Nb}^{3+}$  [10].

Такое совпадение является достаточно интересным. Было бы желательно провести подобные исследования и на других металлах, в частности на ванадии, у которого спин-орбитальное взаимодействие должно быть на порядок меньше. В этом случае, вероятно, магнитный пробой должен был бы либо отсутствовать, либо наблюдаться в значительно более низких полях.

## Литература

- [1] L.F.Mattheiss. Phys. Rev., 139A, 1893, 1965.
  - [2] Н.Е.Алексеевский, К.-Х.Бертель, А.В.Дубровин, Г.Э.Карстенс. Письма в ЖЭТФ, 6, 637, 1967.
  - [3] E.Fawcett, W.A.Reed, R.R.Soden. Phys. Rev., 159, 553, 1967.
  - [4] G.V.Scott, M.Springford. Proc. Roy. Soc. (London), A320, 115, 1970.
  - [5] И.Бартель, К.-Х. Бертель, К.Фишер, Р.Гебель, Г.Гюнцлер, М.Юриш, В.Нейманн, И.Кунце, П.Мюль, Х.Опперманн, Р.Петри, Г.Собе, Г.Вейсе, У.Виснер. ФММ 35, 921, 1973.
  - [6] Н.Е.Алексеевский, А.В.Дубровин, Г.Э.Карстенс, Н.Н.Михайлов. ЖЭТФ, 54, 350, 1968.
  - [7] Н.Е.Алексеевский, К.-Х.Бертель, А.В.Дубровин. Письма в ЖЭТФ, 10, 116, 1969.
  - [8] A.V.Pippard. Phil. Trans. Roy. Soc. (London), 256, 317, 1964.
  - [9] E.J.Blount. Phys. Rev., 126, 1636, 1962.
  - [10] W.Gordy, W.V.Smith, R.F. Trambarulo. Microwave Spectroscopy, J.Wiley, N.Y. 1952.
-