

АНИЗОТРОПИЯ СВОЙСТВ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТРОЙНЫХ ХАЛЬКОГЕНИДОВ МОЛИБДЕНА.

Н. Е. Алексеевский, В. И. Нижанковский, А. В. Тандиш

Измерены критические магнитные поля и анизотропия магнито-сопротивления монокристаллов $Pb_2Mo_6S_{7,5}$, $Sn_2Mo_6S_{7,5}$, $Cu_{1,9}Mo_6S_8$. Из анализа полученных данных высказано предположение о возможной форме поверхности Ферми.

Наиболее важные особенности сверхпроводящих тройных халькогенидов молибдена (ТХМ), такие как исключительно большие критические магнитные поля и большие плотности критического тока, которые наблюдаются на образцах ТХМ с Pb, не имеют до настоящего времени достаточно однозначного и убедительного объяснения [1]. Весьма существенные данные могут быть получены при изучении свойств ТХМ на монокристаллах. Исходя из них можно попытаться получить представление о топологии поверхности Ферми (ПФ) этих соединений. Нами проведены измерения критических магнитных полей H_{K2} и магнито-сопротивления $\rho(H)$ на монокристаллах ТХМ с Pb, Sn и Cu в качестве третьей компоненты.

Монокристаллы получали методом кристаллизации из расплава в камере, заполненной чистым аргоном под давлением 170 – 180 ат. В процессе кристаллизации температура образца поднималась до 1900 – 2000 °С, выдерживалась от одного до трех часов, после чего понижалась со скоростью от 1 до 3 градусов в минуту. Фазовый состав приготовленных монокристаллов определялся на рентгеновском дифрактометре. Помимо основных линий, соответствующих фазе Шевреля, на рентгенограммах присутствовали слабые линии свободных третьих компонент для соединений с Pb и Sn и линии MoS_2 для соединения с Cu. Основные сверхпроводящие характеристики (T_K и dH_K/dT) приготовленных монокристаллов хорошо согласовались с данными, известными из литературы. Ширина перехода в сверхпроводящее состояние составляла $0,5 \div 1$ К; выше перехода наблюдалось линейное возрастание сопротивления с температурой [1]. Отношение сопротивления при $T = 300$ К к сопротивлению проэкстраполированному к 0 К составило 60, 10 и 15 для $Sn_2Mo_6S_{7,5}$, $Pb_2Mo_6S_{7,5}$ и $Cu_{1,9}Mo_6S_8$ соответственно. Образцы для измерения сопротивления сечением от $0,5 \times 0,5$ до 1×1 мм² длиной $5 \div 10$ мм вырезались электроэрозией из ориентированных методом обратной рентгеновской съемки слитков. В работе были проведены измерения на 9 образцах различных составов и ориентаций.

Магнитное поле до 150 кЭ создавалось сверхпроводящим соленоидом. Ток в образце был всегда перпендикулярен магнитному полку. Для измерений анизотропии H_{K2} и $\rho(H)$ в диапазоне температур $5 \div 15$ К использовалось устройство [2], дополненное медным блоком с нагревателем и термометрами. Точность поддержания температуры на заданном уровне была не хуже 0,02 К. Чтобы исключить влияние измерительного тока на результаты исследований H_{K2} , измерения проводились при $I \approx 1 \div 10$ мА.

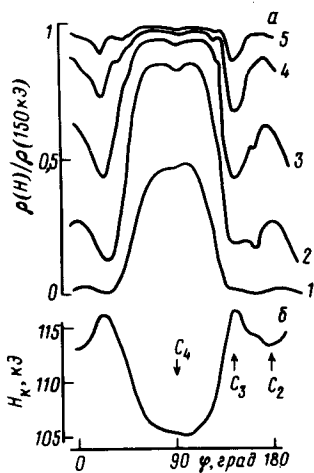


Рис.1.

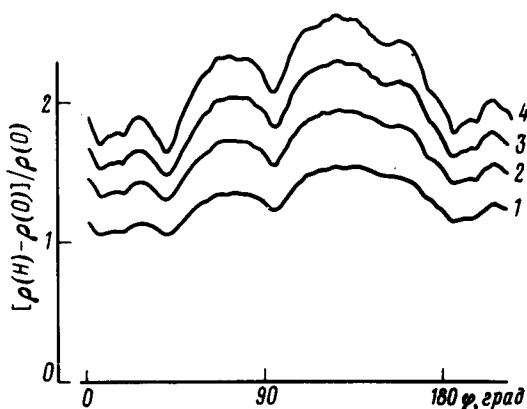


Рис.2

Рис.1. *a* – Угловые зависимости сопротивления образца $\text{Cu}_{1,9}\text{Mo}_6\text{S}_8$ ориентации C_2 в области $S-N$ -перехода при $T = 4,2$ К: 1 – $H = 105$; 2 – 110; 3 – 115; 4 – 120; 5 – 125 кЭ; *б* – анизотропия критического поля

Рис.2. Розетки магнитосопротивления, снятые на образце $\text{Sn}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ при $T = 11$ К: 1 – $H = 90$; 2 – 110; 3 – 130; 4 – 150 кЭ

Критические магнитные поля, измеренные на образцах состава $\text{Cu}_{1,9}\text{Mo}_6\text{S}_8$, зависели от направления поля относительно кристаллографических осей; эта анизотропия при $T = 4,2$ К достигала 8 кЭ. Так как ширина кривой перехода составляла, в зависимости от температуры, $10 \div 20$ кЭ и всегда была больше анизотропии H_{K2} , оказалось удобным определять анизотропию H_{K2} из кривых $\rho(\phi)$, снятых в области $S-N$ -перехода, т.е. перехода в нормальное состояние. Примеры таких записей, полученных на образце с осью вдоль C_2 приведены на рис.1, *a*, а на рис.1, *б* показана соответствующая зависимость $H_{K2}(\phi)$. В качестве H_{K2} бралось значение магнитного поля, при котором сопротивление образца составляло половину сопротивления в нормальном состоянии. Из этих данных видно, что $H_{K2}(\phi)$ имеет максимумы для $\mathbf{H} \parallel C_3$. Аналогичная зависимость была получена на образце ориентации C_2 , приготовленном методом химического транспорта¹⁾.

Угловые зависимости сопротивления в магнитных полях, соответствующих области перехода в нормальное состояние, записывались и для образцов $\text{Pb}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ и $\text{Sn}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ различных ориентаций. Оказалось, что сигнал, снимаемый с этих образцов, слабо зависел от направления магнитного поля, а величина возможной анизотропии критического поля не превышала 3%.

Магнитосопротивление в нормальном состоянии исследовалось как при $T > T_K$, так и при $T < T_K$ (в последнем случае для $H > H_{K2}$). Маг-

¹⁾Выражаем благодарность д-ру Шеврелю за любезно предоставленный образец.

нитосопротивление образцов $\text{Sn}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ и $\text{Cu}_{1,9}\text{Mo}_6\text{S}_8$ в полях выше 30 кЭ изменялось линейно с полем; магнитосопротивление образцов $\text{Pb}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ в полях до 150 кЭ было мало и менялось пропорционально H^2 . Квадратичная зависимость магнитосопротивления соответствует области слабых эффективных магнитных полей, что, по-видимому, определяется малым отношением сопротивлений образцов состава $\text{Pb}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$.

На рис. 2 приведены угловые зависимости сопротивления образца состава $\text{Sn}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$, ось вращения которого составляла с осью C_3 угол $10 \div 15^\circ$. Характерной особенностью этих кривых являются минимумы, относительная глубина которых растет как с увеличением магнитного поля, так и с понижением температуры. Анизотропия магнитосопротивления образцов $\text{Pb}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ и $\text{Cu}_{1,9}\text{Mo}_6\text{S}_8$ была меньше; примеры $\rho(\phi)$ для образца $\text{Pb}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ приведены на рис. 3. Минимумы на этой розетке лежат вдоль осей четвертого порядка.

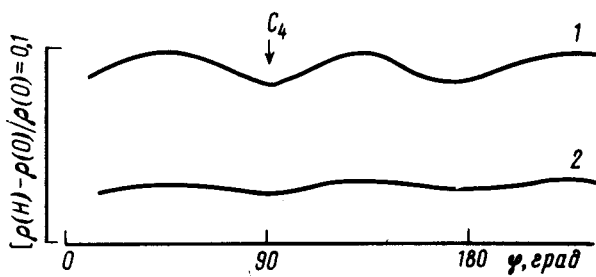


Рис. 3. Розетки магнитосопротивления для образца $\text{Pb}_2\text{Mo}_6\text{S}_{7,5}$ ориентации C_4 в поле 150 кЭ: 1 - $T = 11,5$; 2 - 15 К

Если сопоставить данные по анизотропии H_{K2} с данными по анизотропии $\rho(H)$, то можно попытаться представить приблизительную форму ПФ ТХМ. Так как величина H_{K2} зависит от кривизны ПФ, причем максимальные значения H_{K2} соответствуют наиболее плоским участкам ПФ то из данных, полученных на ТХМ с Cu можно заключить, что плоские участки ПФ перпендикулярны осям третьего порядка. Если же обратиться к кривым $\rho(\phi)$, то можно отметить, что минимумы магнитосопротивления расположены в направлениях осей четвертого порядка. Как известно, в случае сильных эффективных магнитных полей, т.е. для $\omega_c \tau \gg 1$, для компенсированного металла минимумы на зависимости $\rho(\phi)$ расположены в области открытых направлений ПФ. В нашем случае $\omega_c \tau \sim 1$ и поэтому анизотропия $\rho(H)$ могла в значительной мере определяться анизотропией интеграла столкновений, однако увеличение поля и понижение температуры, приводящие к росту $\omega_c \tau$, вызывают увеличение анизотропии $\rho(H)$. Поэтому можно допустить, что и в нашем случае направление минимумов магнитосопротивления соответствует открытым направлениям ПФ. Считая, что ПФ ТХМ с Cu и Pb , Sn не очень сильно отличаются, можно представить модель такой поверхности в виде октаэдра, вершины которого лежат на осях четвертого порядка, а грани перпендикулярны осям третьего порядка,

при этом через вершины проходят открытые направления¹⁾. Такая форма ПФ, по-видимому, подобна открытому листу ПФ ТХМ, приведенной в [4]. Как отмечалось выше, анизотропия сопротивления в области $S-N$ -перехода для образцов ТХМ с РЬ и Sn была мала (существенно меньше, чем для ТХМ с Cu). Причина такого различия в настоящее время не ясна. Возможно, что она связана с различием свойств фаз Швереля первой и второй групп (см, например, [5]). Не исключено так же, что оптические моды колебаний Sn и РЬ могут быть причиной такого различия.

Следует отметить, что анизотропия H_{K2} на ТХМ с Sn наблюдалась ранее [6, 7]. В [7] были проведены подробные исследования анизотропии H_{K2} на ТХМ с РЬ и Sn. Величина анизотропии составляла $\sim 20\%$. Такая же величина анизотропии на Sn Mo_6S_8 отмечалась в [6], где было высказано предположение, что она могла быть связана с анизотропным распределением дефектов в кристалле. Надо однако иметь в виду, что в [7] при исследовании анизотропии ток через образец обычно не был перпендикулярен внешнему полю и угол между полем и током для разных ориентаций образца был разным, в то время как в наших экспериментах ток всегда был перпендикулярен H .

Измерения на более совершенных монокристаллах позволят, вероятно, более надежно определить форму ПФ ТХМ.

Международная лаборатория
сильных магнитных полей и
низких температур, Вроцлав, ПНР

Поступила в редакцию
18 октября 1981 г.

Литература

- [1] *Alekseevskii N. E.* Cryogenics, 1980, 9, 257.
- [2] *Bazan Cz.* Symposium "Physical Properties of Solids in High Magnetic Fields". Wroclaw. 1978, May 13–20, 219.
- [3] *Allgaier R.S.* Phys. Rev., 1968, 165, 775.
- [4] *Andersen O.K., Klose W., Nohl H.* Phys. Rev., 1978, B17, 1209.
- [5] *Alekseevskii N.E., Khlybov E.P., Novokshonov V.I., Evdokimova V.V., Kozintsev V.M., Mitin A.V.* J. of Low Temp. Phys., 1981 в печати
- [6] *Алексеевский Н.Е., Добровольский Н.М., Куоссе Г.А., Маркус М.М., Радауцан С.И., Самусь Д.П.* ДАН СССР, 1978, 242, 87.
- [7] *Decroux M., Fisher F., Fliikiger R., Seeber B., Delesclefs R., Sergent M.* Solid State Comm., 1978, 25, 393.

¹⁾ Плоские участки ПФ могут быть одной из причин [3], приводящих к линейной зависимости магнитосопротивления от поля, которая наблюдалась нами на образцах ТХМ с Cu и Sn в широком диапазоне магнитных полей.