

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВОЗБУЖДЕННОГО В МЕТАЛЛЕ ПОТОКОМ ТЕПЛА

Н. В. Заварицкий

Как известно, в идеальном монокристалле наличие стационарного потока тепла не может вызвать появление магнитного поля. Однако, в случае нарушения идеальности структуры, как показали описанные ниже опыты, в образце может возникнуть поле, вполне измеримое современными методами.

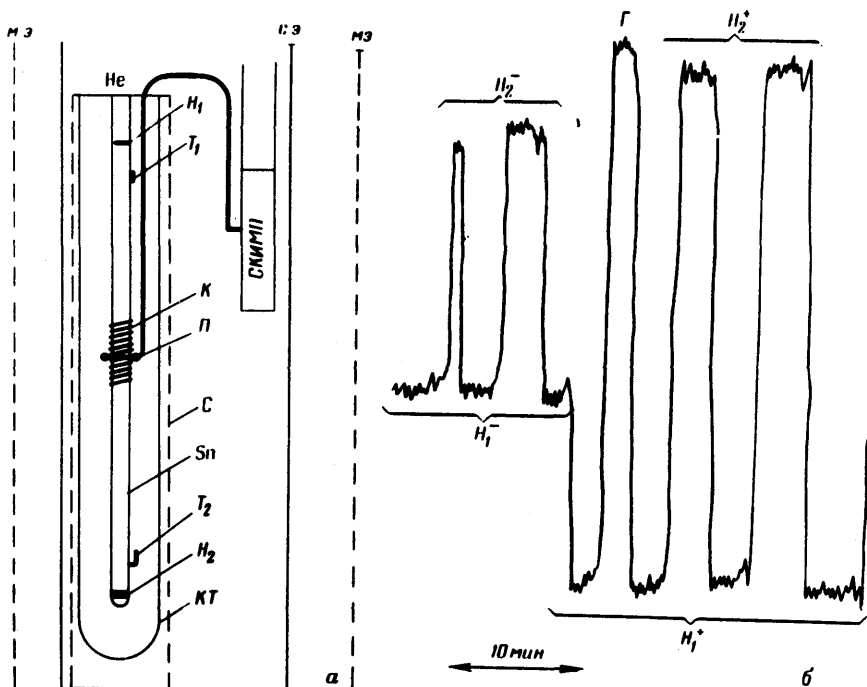


Рис. 1. *а* – Прибор для измерения магнитного поля: Sn – исследуемый образец, T_1 , T_2 – термометры угольные, H_1 , H_2 – нагреватели, K – катушка градуировки поля, P – петля связи с СКИМП'ом, $КТ$ – камера, теплоизолирующая образец от гелия, C – соленоид сверхпроводящий свинцовый, $СЭ$ – сверхпроводящий экран, $MЭ$ – магнитный экран из пермаллоя. *б* – Образец записи показаний СКИМП'а; объяснения в тексте статьи.

Прибор, использовавшийся для исследования, изображен на рис. 1, *а*. Магнитное поле измерялось при помощи сверхпроводящего квантового измерителя магнитного потока СКИМП, аналогичного описанному Циммерманом [1]. Как известно, СКИМП позволяет измерять изменение магнитного потока до $10^{-10} \text{ э} \cdot \text{см}^{-2}$. В опыте схема настраивалась таким образом, чтобы в нагревателях H_1 и H_2 выделялась одинаковая мощность. В этом случае при переключении от H_1 к H_2 состояние образца в области под петлей связи будет отличаться лишь наличием потока тепла.

Первым объектом исследования было выбрано олово. Для изготовления образцов использовался металл предельной чистоты. Теплопроводность образцов при T_c составляла $\sim 50 \text{ вт см}^{-1} \text{ град}^{-1}$. Типичный образец записи показаний СКИМП^а представлен на рис. 1, б. H_1 и H_2 отмечает какой из нагревателей включен, Γ отмечает включение тока в катушке градуировки поля, в представленной записи оно соответствует 10^{-5} э в сечении образца, плюс и минус отмечают направление тока через нагреватель. Все измерения проводились при двух направлениях тока, что позволяло устранить паразитный эффект, связанный с магнитным полем нагревателей.

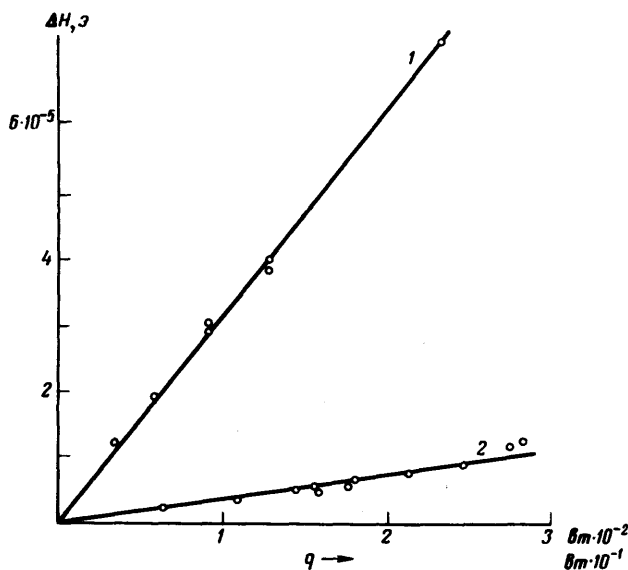


Рис. 2. Зависимость возбужденного магнитного поля от величины потока тепла вдоль образца. 1. — $T = 4,2^\circ\text{K}$ (Sn 5), 2. — $T = 3,5^\circ\text{K}$ (Sn 3). Нижняя и верхняя шкалы q относятся соответственно к 1 и 2 кривым.

На записи отчетливо видно, как включение потока тепла q вызывает изменение магнитного поля образца ΔH . Величина ΔH в пределах точности измерений, оказалась прямо пропорциональной потоку тепла q , как в нормальном так и в сверхпроводящем состояниях (рис. 2). При изменении направления q изменяет направление и ΔH . Дополнительные опыты, проведенные при $T < T_c$, показали, что ΔH направлено вдоль оси образца.

Отношение $\Delta H/q = H_q$ в нормальном состоянии ($3,7 + 4,2^\circ\text{K}$) практически постоянно, при T_c H_q резко уменьшается примерно на два порядка и далее в интервале $3,5 - 2,5^\circ\text{K}$ лишь незначительно уменьшается (рис. 3, а). Внешнее магнитное поле до 1 э не влияет на величину H_q , обычно опыты проводились в полях $\lesssim 10^{-2}$ э. В сверхпроводящем состоянии ΔH было больше поля, возникавшего при изменении температуры образца от $2,5$ до $3,5^\circ\text{K}$, градиент же температуры вдоль образца не превосходил $0,02^\circ\text{K}$.

Из соображений симметрии ясно, что магнитное поле, пропорциональное потоку тепла, может быть направлено вдоль оси образца, если искажения однородности кристаллической структуры имеют осевую симметрию. Такие искажения возникают при деформации кручения. Соответственно с этим были поставлены опыты по исследованию влияния деформации кручения на величину H_q . Оказалось, что подобная деформация существенным образом изменяет величину H_q . При нагрузках M , меньших некоторой критической величины M_K (для образцов диаметром 5 мм $M_K \approx 2 \text{ кг}\cdot\text{см}$), H_q обратимым образом зависит от M (рис. 3, б). После наложения нагрузки $\approx M_K$ величина H_q начинает необратимым образом зависеть от M , и при снятии нагрузки у образца может остаться H_q заметной величины. Приведенные на рис. 3, а зависимости получены у таких образцов. У образца олова выращенного вдоль направления [101] при M_K было обнаружено скачкообразное возрастание величины H_q .

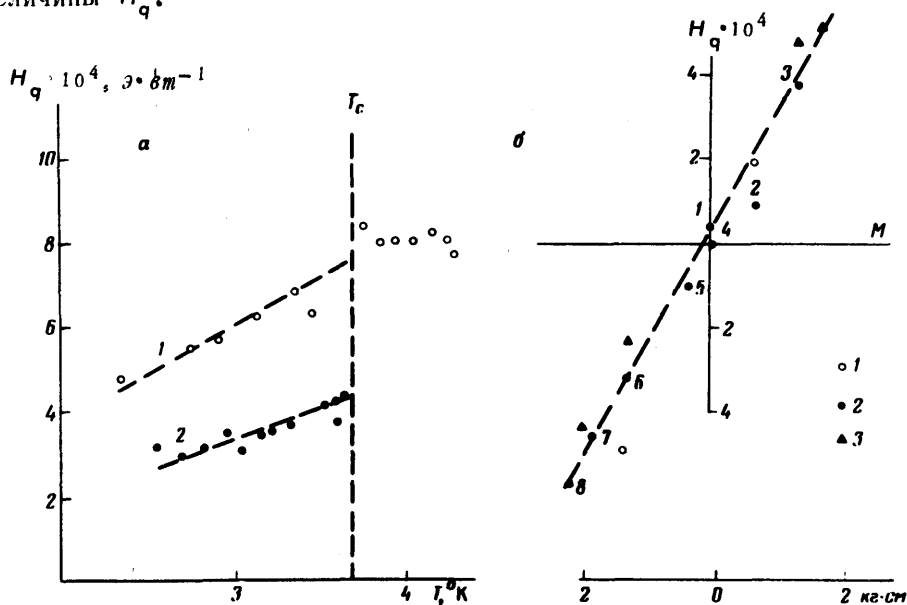


Рис. 3, а – Зависимость H_q от температуры: 1 – Sn 5, 2 – Sn 3. При $T = T_c$ масштаб H_q уменьшен в 20 раз; б – зависимость H_q от крутящего момента приложенного к образцу: 1, 2 – Sn 5, 3 – Pb 1. $H_{q, M=0}$ для кривых 1, 2, 3 соответственно равны +8, +3,5, $-2 \cdot 10^{-4} \text{ э}\cdot\text{вт}^{-1}$. Цифрами отмечен порядок измерений в одном из опытов. Деформация при максимальной нагрузке составляет $\sim 0,1 \text{ град}\cdot\text{см}^{-1}$ для олова и $0,4 \text{ град}\cdot\text{см}^{-1}$ для свинца.

Возникновение магнитного поля при наличии потока тепла, по-видимому, является характерным не только для одного олова. Предварительные опыты показали наличие H_q так же у свинца. Как в случае олова, так и свинца величина H_q чувствительна лишь к деформации кручения образца. Продольная нагрузка до $25 \text{ кг}\cdot\text{см}^{-2}$ в пределах точности измерения не изменяет величины H_q .

Совокупность полученных данных, по-видимому, свидетельствует, что в образце с кристаллической структурой, искаженной неоднородной деформацией, поток тепла приводит к возникновению магнитного поля. Появление этого поля связано с тем, что в деформированной решетке энергия и скорость электронов зависят от деформации (см. например [2]), и в решетке с деформацией кручения появляется, как, по-видимому, впервые заметил А.Ф. Андреев ¹⁾, круговая составляющая токов. В числе одного из возможных объяснений наличия H_c в сверхпроводнике можно рассматривать предположение о недокомпенсации сверхпроводящей и нормальной компоненты тока. Вопрос о возникновении этих токов в сверхпроводнике с градиентом температуры был рассмотрен в работе [3].

Автор благодарен П.Л.Капице за поддержку работы и советы.

Институт физических проблем
Академии Наук СССР

Поступила в редакцию
15 июня 1972 г.

Литература

- [1] J.E.Zimmerman. Cryogenics, 12, 19, 1972.
[2] S.C.Hunter, F.R.N.Nabarro. Pros. Roy. Soc., 220, 542, 1953.
[3] В.Гинзбург . ЖЭТФ, 14, 177, 1944

¹⁾ Частное сообщение