

НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ТОКА, ВОЗБУЖДЕННОГО В СВЕРХПРОВОДНИКЕ ПОТОКОМ ТЕПЛА.

Н.В.Заварицкий

Экспериментально обнаружено, что в контуре из сверхпроводников градиент температуры вызывает появление сверхпроводящего тока. Исследована зависимость эффекта от температуры и характеристик сверхпроводника.

Согласно теории термоэлектрических эффектов [1] в сверхпроводнике при наличии градиента температуры возникает термоэлектрический ток нормальных возбуждений $j_n = \alpha \sigma \nabla T$ (α – дифференциальная термоэдс, σ – проводимость образца). Одновременно с j_n возникает ток сверхпроводящих электронов $j_s = -j_n$. Наличие j_s , как отмечено в работе [2], приведет к появлению в сверхпроводнике разности фаз параметра порядка $\Delta\phi = (2m/e\hbar)(\alpha\sigma/n_s)\Delta T$ (n_s – плотность сверхпроводящих электронов). Как известно, вдоль контура из сверхпроводника $\oint \Delta\phi = 0$. Следовательно, если две точки сверхпроводника, между которыми разность фаз $\Delta\phi$, соединить сверхпроводящей цепью, то в контуре возникнет магнитный поток $\Delta\Phi = (-\hbar/2e)\Delta\phi$, или что то же самое, ток $i_s = \Delta\Phi/L$ (L – индуктивность контура). Поскольку, поток тепла вызывает изменение фазы вдоль образца, очевидно, он может возбудить сверхпроводящий ток в контуре. Конечно, в данном случае $\Delta\phi$ возникает одновременно во всех участках контура с градиентом температуры, соответственно искомый эффект будет пропорционален $[(\alpha\sigma/n_s)_1 - (\alpha\sigma/n_s)_2]\Delta T$ (индексами обозначены различные участки цепи с неоднородной температурой). Однако, подбором элементов контура легко добиться того, что поток тепла приведет к существенному изменению $\Delta\phi$ лишь в одной части контура. Этому условию, например, удовлетворяет контур, составленный из сверхпроводников с различным T_c . В опытах предпринятых для поиска описанного выше эффекта использовалась в основном пара олово ($T_c = 3,72^\circ\text{K}$) и свинец ($T_c = 7,2^\circ\text{K}$).

Схема одного из вариантов опыта представлена на рис. 1. В сверхпроводящем контуре находится два идентичных контакта Sn – Pb, температуру которых можно изменять в ходе эксперимента. Все остальные соединения сверхпроводников находятся при постоянной температуре жидкого гелия. Исследуемые контакты выполнены следующим образом. Образец Sn – цилиндр диаметром $4 \times 2,5$ мм. Внутри цилиндра проходит провод Pb, контактирующий с Sn лишь в верхней части образца. Термометр находится в канале внутри олова. Нагреватель намотан на верхней части образца. Термометр и нагреватель электроизолированы от образца. Большая часть образца изолирована от окружающего жидкого гелия перевернутым дьюарчиком. Для измерения сверхпроводящего тока в контур включена катушка связи L установки сверхпроводящего интерферометра СКИМП [3]. Индуктивность $L \approx 150$ см, коэффициент связи магнитных потоков L и интерферометра $\approx 0,1$.

В опыте при постоянной температуре гелиевой ванны T_1 фиксировались во времени изменения показаний СКИМП'а в зависимости от температуры теплого спа T_2 . На кривых рис. 1. б видно, как изменение направления потока тепла приводит к изменению знака исследуемого эффекта. Токи через нагреватели в опыте коммутировались для устранения паразитного магнитного поля нагревателей. Основные измерения проводились при $T_1 \approx 3,68^\circ\text{K}$.

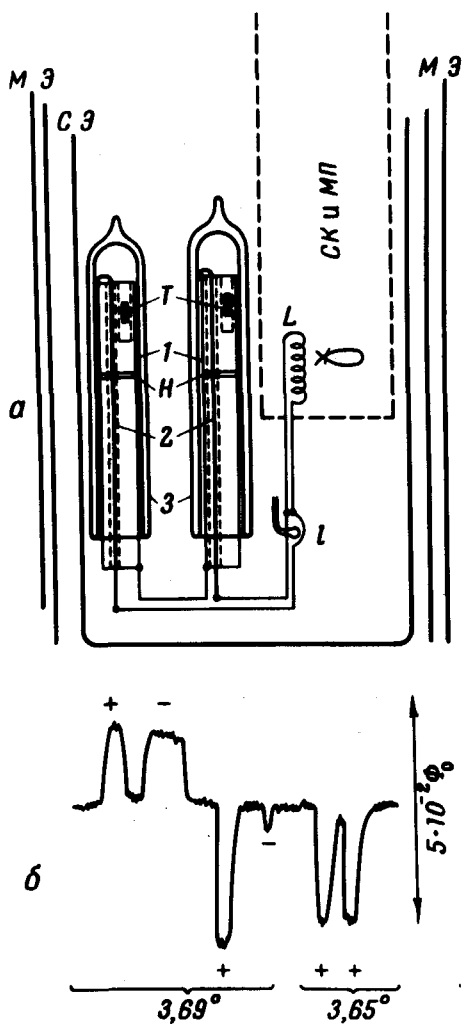


Рис. 1. а — Схема установки для измерений: 1 — образец Sn, 2 — образец Pb, T — термометры, H — нагреватели, L — катушка связи с контуром сверхпроводящего интерферометра СКИМП, l — контур и катушка проверки чувствительности установки, 3 — перевернутый дьюарчик, СЭ — сверхпроводящий экран из свинца, МЭ — магнитные экраны из пермаллоя. б — Образец записи показаний "установки СКИМП" во времени, — $T_1 = 3,51^\circ$, T_2 — отмечено под кривыми. Отбросы от нуля в разные стороны соответствуют повышению температуры в двух различных образцах Sn. + направление тока через нагреватель, Φ_0 — квант магнитного потока $2 \cdot 10^{-15}$ вб

Используя записи подобные рис. 1, б можно определить как изменяется поток в СКИМП'е $\Delta\Phi$, или что то же самое, сверхпроводящий ток в контуре, в зависимости температуры от теплого спа T_2 . В случае, если разность температур между теплым и холодным спаем $T_2 - T_1 \ll T_c - T_1$, то $\Delta\Phi$ пропорционально $T_2 - T_1$ (см. рис. 2).

На рис. 3 проведено сравнение начального наклона кривой $\Delta\Phi(T_2)$. Как видно, величина $\Delta\Phi(T_2 - T_1)^{-1}$ убывает при уменьшении T_1 , в первом приближении, обратно пропорционально $T_c - T_1$. Эта зависимость отмечена на рис. 3 пунктиром. Напомним, что в сверхпроводнике вблизи T_c $n_s \propto T_c - T$. На рис. 3, а отображены результаты, полученные при исследовании нескольких образцов: 1 – результаты двух независимых измерений одного из образцов; 2 – данные, полученные в опыте с парой контактов. Из приведенных данных видно, что величина эффекта воспроизводится для каждого из образцов. Это позволяет сопоставить величину эффекта с характеристиками олова.

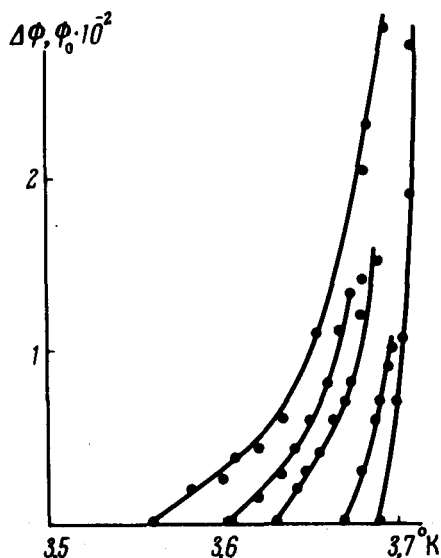


Рис. 2. а – Зависимость изменения потока в контуре СКМПП и $\Delta\Phi$ от температуры контакта T_2 .

У всех исследованных образцов в интервале 4,2 – 3,73° К были измерены σ (ом · см)⁻¹ и α (в · град⁻¹). Величину исследуемого эффекта удобно характеризовать значением $\eta = \Delta\Phi(T_c - T_1)/(T_2 - T_1)$, которое лишь незначительно изменяется с температурой. Из приведенных выше оценок следует, что η должна изменяться прямо пропорционально $\alpha\sigma$. Полученные экспериментальные данные (рис. 3, б) не противоречат этой зависимости.

Исследуемый эффект, очевидно, можно наблюдать и в паре Sn – Sn, если α и σ контактирующих образцов различны. Дополнительные опыты подтвердили и эту возможность. Так у пары Sn ($\alpha\sigma = 54$) и Sn ($\alpha\sigma = 2$) были получены результаты совпадающие с данными пары Sn ($\alpha\sigma = 54$) – Pb см. рис. 3, б.

Все полученные результаты хорошо согласуются как с проведенными выше оценками, так и с подробной теорией исследуемого явления, разработанной независимо Ю. Гальпериным, В. Гуревичем, В. Козубом [4]. Детальное сравнение результатов эксперимента с расчетами будет проведено в дальнейшем.

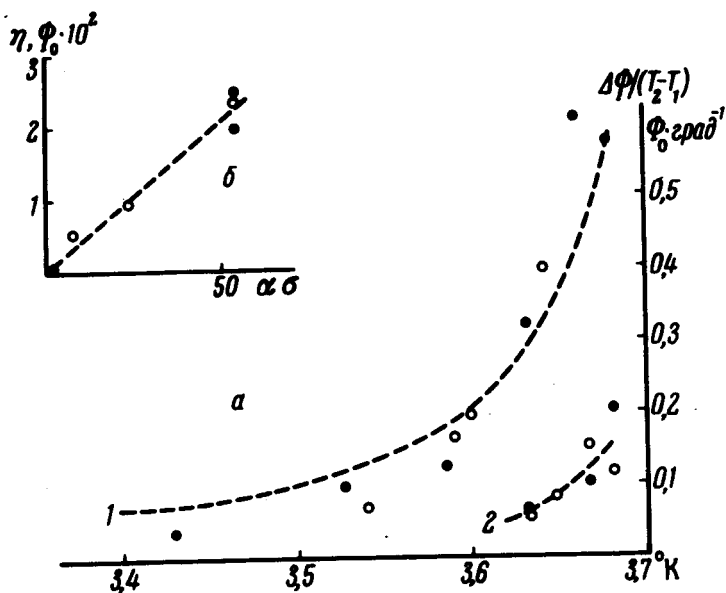


Рис. 3. *a* – Зависимость $\Delta\Phi/T_1 - T_2$ от температуры T_1 . Обозначения в тексте. *б* – Зависимость исследуемого эффекта от характеристик образцов олова. Кружок с точкой – парные опыты. Кружок контакт Sn($\alpha\sigma = 54$) и Sn($\alpha\sigma = 2$)

Автор признателен П.Л.Капице за поддержку работы, А.Ф.Андрееву и В.Л.Гуревичу за дискуссии, Н.А.Никитину за техническое содействие.

Институт физических проблем
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
12 января 1974 г.

Литература

- [1] В.Л.Гинзбург. ЖЭТФ, 14, 177, 1944.
- [2] Ю.М.Гальперин, В.Л.Гуревич, В.И.Козуб. Письма в ЖЭТФ, 17, 687, 1973
- [3] Н.В.Заварицкий, А.Н.Ветчинкин. Установка СКИМП, ПТЭ, №6, 1973.
- [4] Ю.М.Гальперин, В.А.Гуревич, В.И.Козуб. ЖЭТФ, №4, 1974.