

ОБНАРУЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СОСТОЯНИЯ НА ПОДВИЖНОСТЬ ДИСЛОКАЦИЙ В Nb

И.В.Карпов, Е.Б.Лейко, Э.М.Надгорный

Измерена подвижность дислокаций в термоактивированной области движения дислокаций в монокристаллах ниобия при 4,2 К и обнаружено заметное различие подвижности дислокаций в нормальном и сверхпроводящем состояниях.

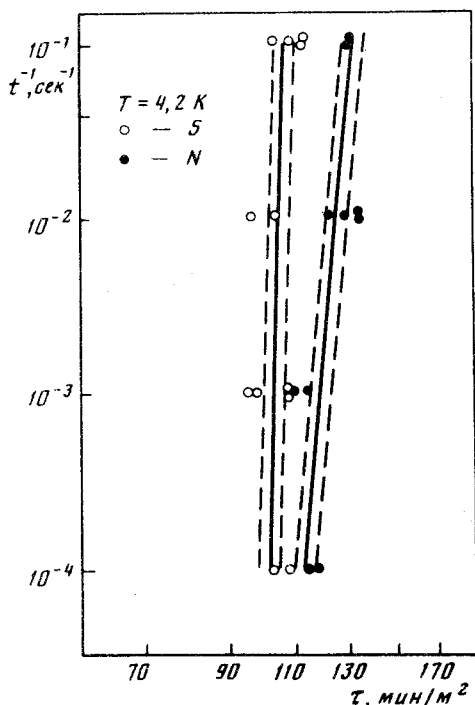
Со времени обнаружения уменьшения критического напряжения сдвига и напряжения пластического течения сверхпроводников при переходе из нормального (N) в сверхпроводящее (S) состояние [1, 2], этот эффект изучался в различных материалах и условиях деформирования, см. [3, 4]. Наблюдаемое влияние сверхпроводящего фазового перехода на механические характеристики обычно интерпретировалось как результат изменения взаимодействия движущихся дислокаций с электронами проводимости [5, 6]. Однако проверка теоретических представлений с помощью прямых экспериментов по измерению подвижности дислокаций до сих пор не была проведена. В настоящей работе измерена подвижность дислокаций в монокристаллах Nb при 4,2 К в N - и S -состояниях.

Образцы прямоугольного сечения с осью $\langle 001 \rangle$ вырезались из монокристалла Nb ($R_{300\text{K}} / R_{10\text{K}} \approx 50$), полировались и отжигались (1000 К, 30 мин, 10^{-4} Па) для удаления водорода. Плотность дислокаций "фона" в образцах была 10^5 см^{-2} .

Дислокации вводились в поверхность образца $\{140\}$ уколом индентора, они были расположены в системах скольжения $\{110\} \langle 111 \rangle$ с ориентационным множителем $n = 0,41$. Последовательность проведения экспериментов была следующей. 1) При 300 К равномерно по всей рабочей поверхности образца длиной 25 мм наносились отпечатки индентором в виде поперечных рядов с шагом 1 мм (всего около 300 отпечатков). 2) Образец помещается в нагружающее устройство со сверхпроводящим соленоидом, охлаждался до 4,2 К и нагружался трехточечным изгибом в течение времени $t = 10 \div 10^4$ сек; создаваемое на поверхности образца напряжение возрастает при этом линейно от 0 на крайних опорах до $\tau = 200 \text{ МН/м}^2$ в центре образца. Переход в N -состояние осуществлялся включением продольного магнитного поля 7 кЭ. 3) Образец отогревался до комнатной температуры и выявлялись дислокации в розетках укола на стороне сжатия специальным травителем [7].

Из-за особенностей движения дислокаций при низких температурах [8], вместо обычно принятого измерения длин пробегов дислокаций при заданном времени нагружения t , здесь использовалась другая методика. Как оказалось, в определенной области напряжений, зависящих от времени нагружения, вид дислокационных розеток меняется по сравнению с исходным: число дислокаций в лучах уменьшается, а в направлении их движения возникают короткие и тонкие треки, обнаруживаемые при травлении. Ушедшие дислокации теряются среди дислокаций "фо-

на". Поэтому определялось напряжение начала движения дислокаций τ , соответствующее данному времени нагружения t , по расстоянию между опорой и тем рядом розеток, где в 70% розеток наблюдалось движение дислокаций¹⁾. Получаемая зависимость $t(\tau)$ характеризует подвижность дислокаций, а t имеет смысл среднего времени прохождения "трудного" положения.



Полученные данные по подвижности дислокаций в N -и S -состояниях представлены на рисунке в координатах $\lg t^{-1} - \lg \tau$. Пунктиром показан доверительный интервал, определенный с надежностью 0,9 для серии экспериментальных точек в каждом состоянии²⁾. Результаты измерений демонстрируют заметно различную подвижность дислокаций в N -и S -состояниях: $\Delta\tau_{NS} = \tau_N - \tau_S = 25 \pm 5$ и $12,5 \pm 5$ МН/м² соответственно при $t^{-1} = 10^{-1}$ и 10^{-4} сек⁻¹, а $t_S^{-1} \gg t_N^{-1}$ при $\tau = \text{const}$. Наблюдаемая зависимость $t^{-1}(\tau)$ ($m_N = 45 \pm 26$ и $m_S = 130 \pm 100$, где $m = \Delta \lg t^{-1} / \Delta \lg \tau$) свидетельствует об активационном, а не о вязком ме-

¹⁾ Такое поведение дислокаций соответствует представлениям [8] о том, что при низких температурах движение дислокаций становится существенно неравномерным: медленное прохождение группы труднопреодолимых препятствий ("трудное" положение) чередуется с быстрым переходом в следующее трудное положение. При этом, хотя протяженность "трудных" положений много меньше расстояний между ними, основное время затрачивается дислокацией именно на их преодоление.

²⁾ Приведенные далее погрешности всех измеренных или вычисленных величин найдены с доверительной вероятностью 0,9 за исключением m_S (см. ниже), где она выбиралась равной 0,7.

ханизме движения дислокаций. Оценка показала, что напряжение Пайерлса $\tau_p \approx 1 \text{ МН/м}^2 \ll \tau$, т.е. движение дислокаций контролируется преодолением локальных барьеров.

Эксперименты по макродеформации изгибом на этих же образцах показали, что N - S -переход приводит к типичному для Nb [3, 9] уменьшению напряжения течения на 4 МН/м^2 (для $n = 0,41$), а напряжение начала пластического течения примерно в три раза превышает напряжение движения дислокаций.

Существующие теоретические модели предсказывают [5], что для термоактивированного движения дислокаций, как и для вязкого движения, отношение скоростей дислокаций в S - и N -состояниях может быть обратно пропорционально отношению соответствующих компонент электронной вязкости дислокаций B : $v_S / v_N = B_N / B_S = 1/2 [1 + \exp(\Delta/kT)]$, где Δ — параметр щели сверхпроводника. Взяв теоретическое значение $2\Delta(4,2) = 3,4 kT$ для Nb [10], получаем оценку $v_S / v_N \approx 20$. Так как $v = Lt^{-1}$, $L_S \geq L_N$ и $L = \text{const}$ при $\tau = \text{const}$, из эксперимента имеем $v_S / v_N \geq t_S^{-1} / t_N^{-1} = 7 \cdot 10^4$. Такая величина, значительно превышающая теоретическую, свидетельствует о необходимости уточнения моделей движения дислокаций, дающих $v_S / v_N = B_N / B_S$ [5].

Большее отношение v_S / v_N могут давать инерционные эффекты движущейся дислокации [11, 12], за счет динамического понижения критического напряжения преодоления барьера при понижении вязкости B_N до B_S и связанного с этим уменьшением числа препятствий, которые необходимо преодолевать активационно [8]. Другой возможностью является изменение активационных параметров движения дислокации при S - N -переходе [4], однако детальные расчеты таких моделей отсутствуют.

Авторы признательны В.Г.Глебовскому за предоставление монокристаллов Nb и В.С.Боброву за полезные дискуссии.

Институт физики твердого тела
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
3 марта 1980 г.

Литература

- [1] В.В.Пустовалов, В.И.Старцев, В.С.Фоменко. ФТТ, 11, 1382, 1969.
- [2] Н. Kojima, Т. Suzuki. Phys. Rev. Lett., 21, 896, 1968.
- [3] G. Kosterz. Phys. Stat. Sol. (b) 58, 9, 1973.
- [4] В.И.Старцев, В.Я.Ильичев, В.В.Пустовалов. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. М., Металлургия, 1975.
- [5] М.И. Каганов, В.Я.Кравченко, В.Д.Нацк. УФН, 111, 655, 1973.
- [6] V Indenbom, J. Estrin. J. Low. Temp. Phys., 19, 83, 1975.
- [7] G. K. Baranova. Scripta Metall., 11, 827, 1977.
- [8] С.И.Зайцев, Э.М.Надгорный. ФТТ, 15, 2669, 1973.
- [9] J. H. Tregilgas, J. M. Galligan. J. Appl. Phys., 50, 3990, 1979.

- [10] Дж. Бардин, Дж. Шриффер. Новое в изучении сверхпроводимости.
М., Физматгиз, 1962.
- [11] A.V. Granato, Phys. Rev. Lett., 27, 660, 1971; Phys. Rev.. B4. 2196,
1971.
- [12] А.М. Ландау. Физика низких температур, 5, 97, 1979.
-