

Сверхпроводящие свойства упорядоченного нанокompозита In-опал

М. С. Конончук, С.Г. Романов, А.В. Фокин, А.В. Черняев, Д.В. Шамшур
Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Россия

Экспериментально изучена электропроводность и определены параметры сверхпроводящего (СП) перехода регулярной пространственной сети многосвязных субмикронных гранул индия, стабилизированных в полостях упорядоченной диэлектрической матрицы опала. Путем целенаправленного изменения характерных геометрических размеров полостей опала приготовлены решетки гранул с различными размерами In частиц, что позволило наблюдать количественные и качественные изменения в температурном ходе сопротивления и исследовать размерные зависимости параметров сверхпроводящего перехода нанокompозитов.

Опал представляет собой плотную гранецентрированную кубическую (ГЦК) упаковку одинаковых силикатных шаров [1] с диаметром D порядка сотен нм, пустоты между которыми образуют регулярную решетку. Решетка пустот состоит из полостей двух видов: тетраэдрические и октаэдрические, с характерными размерами $d_O = 0.41D$ и $d_T = 0.23D$ соответственно, которые соединены между собой каналами переменного сечения с наименьшим размером $d_b = 0.15D$. Доля свободного объема в матрице опала составляет 26%.

Для приготовления нанокompозита In-опал расплавленный металл вводился под давлением в полости образцов опала.

Изменение размеров наночастиц In достигалось за счет:

- (i) использования опалов с различными размерами силикатных шаров;
- (ii) осаждения оксида кремния из раствора полисиликата для достижения значительной глубины геометрической модуляции канала протекания тока, т.е. соотношения между его максимальным и минимальным сечением;
- (iii) наслаивания заданного количества монослоев диоксида титана на внутреннюю поверхность опала для прецизионного изменения размеров полостей; метод молекулярного наслаивания оксидов на внутреннюю поверхность силикогеля в применении к опалу позволяет изменять размеры полостей с точностью до толщины монослоя осаждаемого оксида [2].

Размеры образцов составляли около $5 \times 2 \times 0.4$ мм. Образцы нанокompозитов были изучены методом электронного дисперсионного микроанализа, показавшим, что полости опала полностью заполнены металлом [3]. In в этом случае образует точную реплику полостей опала.

Измерения электрического сопротивления образцов R проводились четырехзондовым методом на постоянном токе в области температур $300 \text{ K} \pm 0.4 \text{ K}$ и в магнитных полях до 60 кОе.

Исследованы несколько серий образцов In-опал, которые различались между собой размерами силикатных шаров: в серии N1 $D=230 \text{ nm}$, в серии N2 $D=290 \text{ nm}$. Разброс размеров силикатных шаров составлял $\Delta D / D \leq 5\%$. Образцы одной и той же серии различались количеством слоев TiO_2 в матрице (до 60 монослоев) и/или дополнительно осажденным SiO_2 .

Во всех исследованных образцах нанокompозита In-опал при понижении T наблюдается переход в СП состояние. Критические температуры T_c и критические магнитные поля H_c СП перехода для всех образцов заметно превышают (рис.1) соответствующие значения для объемного In ($T_c^{\text{bulk}} = 3.41 \text{ K}$ и $H_c^{\text{bulk}}(0) = 280 \text{ Oe}$ при $T=0 \text{ K}$). Для образца N1.4 с минимальным размером мостиков $d_b=10 \text{ nm}$ критическое магнитное поле, экстраполированное к нулю температуры, превышает $H_c^{\text{bulk}}(0)$ почти на два порядка (в 70 - 80 раз), достигая величины более 20 кОе.

Прослеживается корреляция параметров СП перехода с размерами наногранул индия: уменьшение размеров гранул In, соответствующее уменьшению объемной доли индия k_{In} в образце, сопровождается монотонным увеличением T_c и H_c (рис.1). При этом удельное сопротивление в нормальной фазе увеличивается, а наклон температурной зависимости $\rho(T)$ становится более пологим. Заметим, что в образце N1.4 с наименьшим размером мостиков $d_b=10 \text{ nm}$ температурная зависимость сопротивления приобретает неметаллический характер: $R_{300}/R_{4.2}=0.7$. Для образцов с $k_{\text{In}} < 16\%$ на зависимостях $R(T)$ и $R(H)$ появляются ступени (рис.2).

Расчеты показывают, что изменение вида сверхпроводящего перехода сети наногранул In, а именно, появление ступеней при значительном (в 2 раза и более) уменьшении доли свободного объема связано с уменьшением длины когерентности (вплоть до размера гранул). При этом наблюдаемые критические температуры удовлетворительно описываются выражением для T_c/T_c^{bulk} в зависимости от размера частиц d , полученным авторами [4] из формулы Мак-Миллана [5], вывод которой основан на теории «сильной связи» Элиашберга [6].

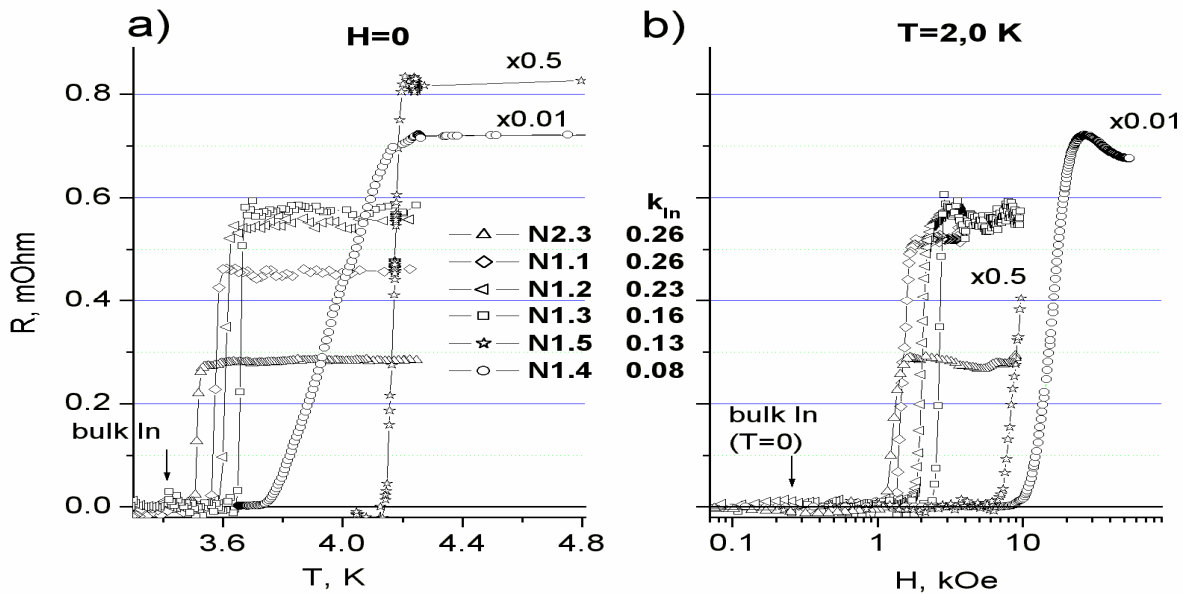


Рис.1. Сверхпроводящий переход в образцах In-опал с различной объемной долей индия: а) температурные зависимости; б) магнетопольные зависимости. Для образца N1.4 кривая $R(H)$ приведена при $T=2.48\text{K}$.

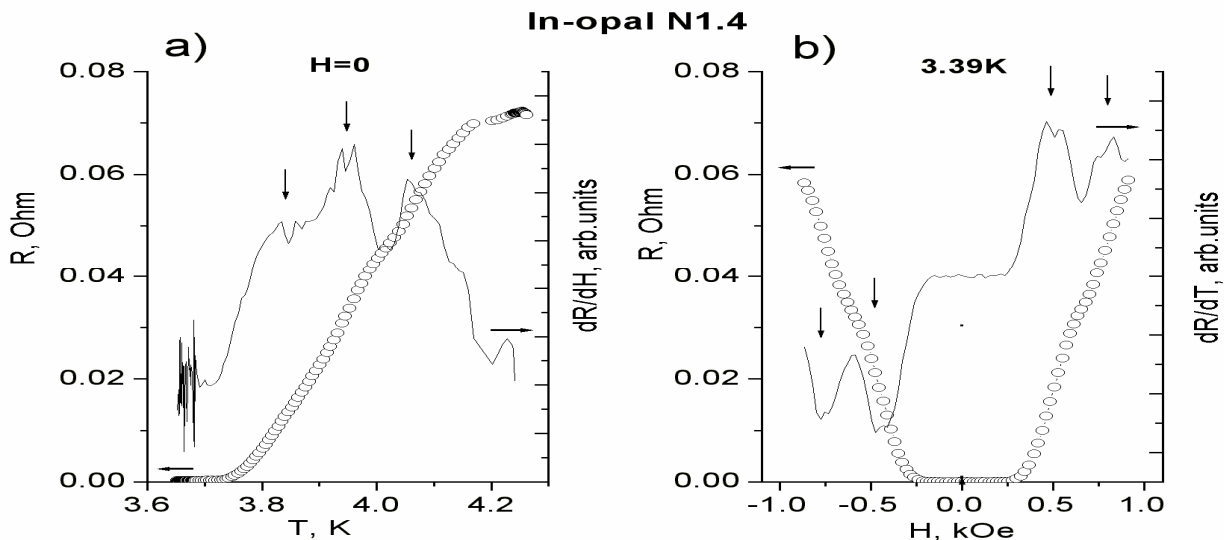


Рис2. Сверхпроводящий переход и соответствующие производные в образце N1.4: а) по температуре; б) по магнитному полю. Пики на производных соответствуют различным T_c и H_c (показаны стрелками).

Для образцов с относительно высоким значением $k_{In}=16 \div 26\%$ наблюдается количественное согласие H_c , измеренного на эксперименте, и среднего термодинамического критического магнитного поля $\langle H_c(T) \rangle$, рассчитанного на основе теории Гинзбурга – Ландау [7].

Таким образом, показана возможность прецизионного управления параметрами СП перехода нанокompозита In-опал путем целенаправленного изменения размеров матрицы опала. Когда длина когерентности становится соизмеримой с размерами сверхпроводящих гранул In, проявляется ступенчатый характер сверхпроводящего перехода, связанный со сложной структурой In сетки.

Работа поддержана грантом РФФИ 02-02-17685, Президиума РАН и грантом НШ – 2200.2003.

1. В.Н. Богомолов, Л.К. Казанцева, Е.В. Колла, Ю.И. Кумзеров, *ФТТ*, **29**, 622 (1987).
2. С.Г. Романов, А.В. Фокин, К.Х. Бабамуратов, *Письма в ЖЭТФ*, **58**, 883 (1993).
3. V.V. Tretyakov, S.G. Romanov, A.V. Fokin, V.I. Alperovich, *Mikrochimica Acta*, **S15**, 211 (1998).
4. S. Matsuo et al *J. Low Temp. Phys.*, **15**, 481 (1974).
5. W.L. McMillan, *Phys. Rev.* **167**, 331 (1968).
6. Ж.М. Элиашберг, *ЖЭТФ*, **39**, 1437 (1960).
7. В.Л. Гинзбург, *ЖЭТФ*, 1958, Т.34, С.113.