

Немонотонное d -волновое спаривание в электронно-легированных сверхпроводниках

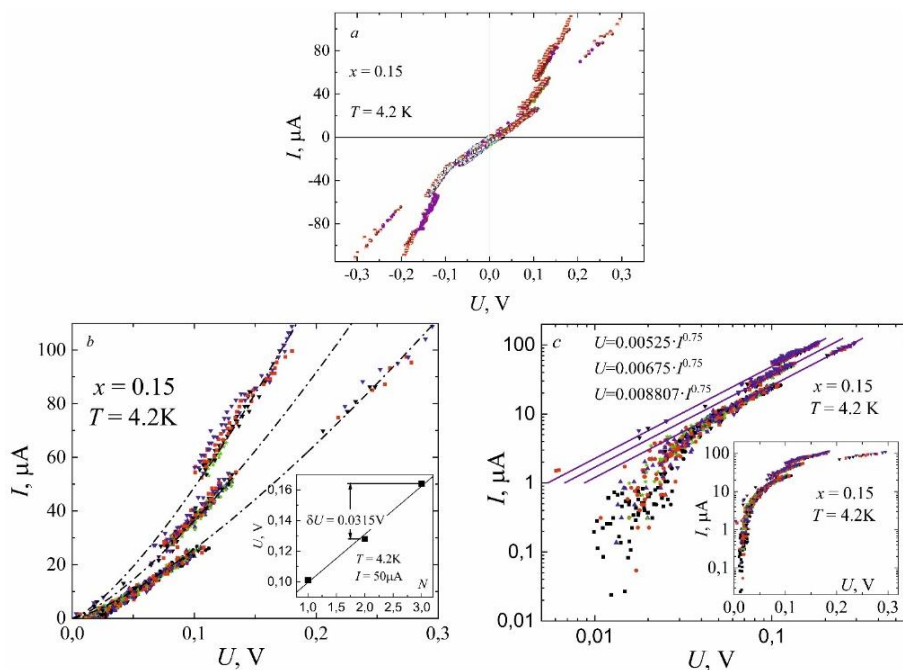
Т.Б. Чарикова, Н.Г. Шелушинина, В.Н. Неверов, М.Р. Попов, Д.И. Девятериков,

А.А. Иванов¹

Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, г. Екатеринбург

¹ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) на эпитаксиальных пленках $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ с оптимальным легированием ($x = 0.145, 0.15$). Установлено, что ВАХ демонстрируют несколько резистивных ветвей, которые соответствуют резистивным состояниям отдельных джозефсоновских переходов. Результаты подтверждают идею о туннельном механизме проводимости между слоями CuO_2 (переход сверхпроводник - изолятор – сверхпроводник (SIS)) для исследуемого соединения $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$. Вольт-амперная характеристика этого соединения с $x = 0.15$ указывает на немонотонный характер параметра порядка d -волновой или анизотропной s -волновой симметрии, связанный с сосуществованием сверхпроводимости и антиферромагнитных флуктуаций.



(а) ВАХ оптимально отожженной эпитаксиальной пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ ($x = 0.15$) при $T = 4.2$ К; (б) ВАХ с тремя резистивными ветвями собственных джозефсоновских туннельных переходов при $T = 4.2$ К. Штриховые линии соответствуют зависимости $U \sim I^{0.75}$. Вставка: напряжение, измеренное при 50 мкА для каждой подсчитанной ветви ($N = 1, 2, 3$); (с) скейлинговое поведение собственных ВАХ для различных ветвей переходов. Вставка: общая ВАХ пленки.

Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика (ВАХ) пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ ($x = 0.15$)

Публикации:

- 1) [Эффекты туннелирования в сильно анизотропных слоистых сверхпроводниках](#) / Т.Б. Чарикова, Н.Г. Шелушинина, В.Н. Неверов, М.Р. Попов. – Текст: непосредственный // Успехи физических наук. — 2024. — V. 194. — P. 740—752.
- 2) [Intrinsic Josephson junction characteristics of \$\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3\$ epitaxial films](#) / T.B. Charikova, D.I. Devyaterikov, V.N. Neverov, M.R. Popov, N.G. Shelushinina,

Работа выполнена по теме шифр «Электрон» № 122021000039-4.

Актуальность исследования: изучение процесса туннелирования куперовских пар между соседними проводящими слоями (через собственные джозефсоновские переходы) актуально по следующим причинам:

- возможность исследования ряда фундаментальных явлений;
- использование внутренних (собственных) джозефсоновских переходов для туннельной спектроскопии;
- напряжение, ограничивающее высокочастотные свойства собственных джозефсоновских переходов, находится в диапазоне 30 мВ, что допускает переменные джозефсоновские токи на частотах в несколько ТГц. Таким образом, такие переходы очень перспективны для терагерцовых приложений в биологии или медицинской диагностике, широкополосной связи, неразрушающем контроле и в других областях.

Цель: выяснить условия проявления и возможности использования внутренних джозефсоновских контактов в естественных объектах – системах слоистых перовскитов с редкоземельными элементами на примере естественного слоистого электронно-легированного сверхпроводника $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$.

Задачи исследования:

- определить критерии протекания джозефсоновских токов в системе внутренних джозефсоновских контактов соединения $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$,
- провести анализ вольт-амперных характеристик и установить симметрию параметра порядка соединения $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$.

Объект исследования: эпитаксиальные пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ с оптимальным легированием и отжигом с ориентацией $(1\bar{1}0)$ – ось c соединения параллельна плоскости подложки – естественная система собственных джозефсоновских переходов.

Методы исследования: в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН на автоматизированной установке Oxford Instruments для проведения физических исследований и установке PPMS Quantum Design в диапазоне температур 1.8 – 300 К проведены измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) при фиксированной температуре для пленок $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}/\text{SrTiO}_3$ с ориентацией $(1\bar{1}0)$ и проведен анализ полученных результатов.

Авторский вклад сотрудников ИФМ: идея исследования, постановка задачи, проведение расчёта, анализ результатов исследования, написание текста статей.

1. Проведены рентгеноструктурные исследования.

Рентгеноструктурные исследования пленок проведены на дифрактометре PANalytical Empyrean Series 2 с использованием излучения $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) в параллельной геометрии пучка. Установлено, что все пленки с ориентацией $(1\bar{1}0)$ были преимущественно эпитаксиальными. На Рисунке 2 представлен спектр рентгеновской дифракции для эпитаксиальной пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ с $x = 0.145$. Для пленки с $x = 0.15$ были получены аналогичные спектры рентгеновской дифракции.

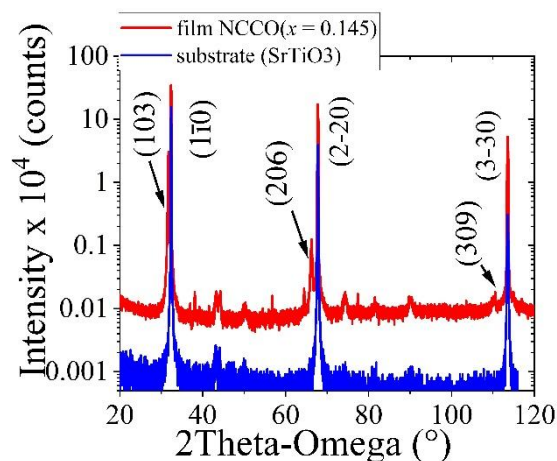


Рисунок - 2 Спектры рентгеновской дифракции для эпитаксиальных пленок $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ ($x = 0.145$)

2. Измерены вольт-амперные характеристики.

Общая ВАХ оптимально отожженной эпитаксиальной пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$ ($x = 0,15$) при $T = 4.2$ К (рисунок 3) демонстрирует сверхток нулевого напряжения при $I < I_c$ с критического тока $I_c \cong 10$ мкА. На ВАХ для тока в направлении с проявляются признаки собственных джозефсоновских переходов в области $I > I_c$, наблюдаются $N = 3$ резистивные ветви, разделенные равными интервалами $\delta U = 31.5$ мВ при $I = 50$ мкА (см. вставку на рисунке 3). Линейная зависимость $U(N)$ свидетельствует об однородности переходов в пленке.

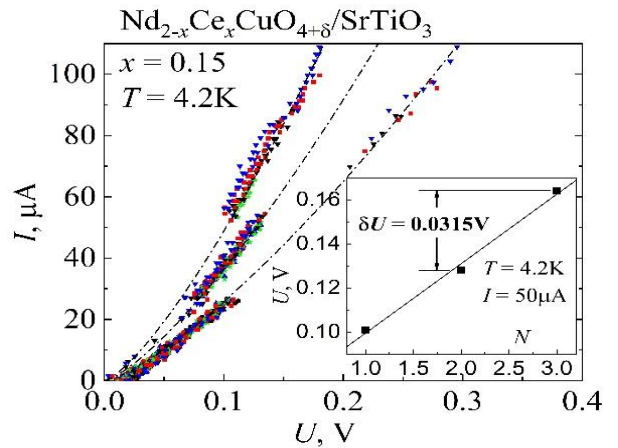


Рисунок - 3 ВАХ с тремя резистивными ветвями для собственных туннельных переходов при $T = 4.2$ К.

3. Интерпретированы степенные зависимости $U(I)$.

ВАХ для пленки с $x = 0.15$ представлена в двойном логарифмическом масштабе (Рисунок 4). При $I > \sim 5$ мкА экспериментальные данные для всех трех ветвей укладываются на прямые линии, соответствующие зависимости $U \sim I^{0.75}$. Для случая туннелирования между двумя сверхпроводниками с плотностью состояний типа BCS (для обычной s-волновой симметрии параметра порядка) крутой рост тока должен иметь место при напряжении $2\Delta/e$, где Δ — сверхпроводящая щель. Наличие узлов в щели для d-волнового параметра порядка приводит к существенному изменению туннельных характеристик ВАХ: туннельный переход сверхпроводников d-волнового типа должен показывать большой подщелевой ток в отличие от случая s-волнового. В рамках стандартного туннельного формализма для SIS-перехода с $d_{x^2-y^2}$ -волнового параметра порядка зависимость $U \sim I^\gamma$ справедлива при $\gamma \approx 1/2$ для когерентного туннелирования и $\gamma \approx 1/3$ для некогерентного случая, что наблюдается для большинства дырочно-легированных ВТСП. Наблюдаемые нами для NCCO значения $\gamma = 0.75$ соответствуют другому типу d-симметрии параметра порядка, характерному для электронно-легированных купратов - с немонотонной формой параметра порядка сверхпроводника d-типа.

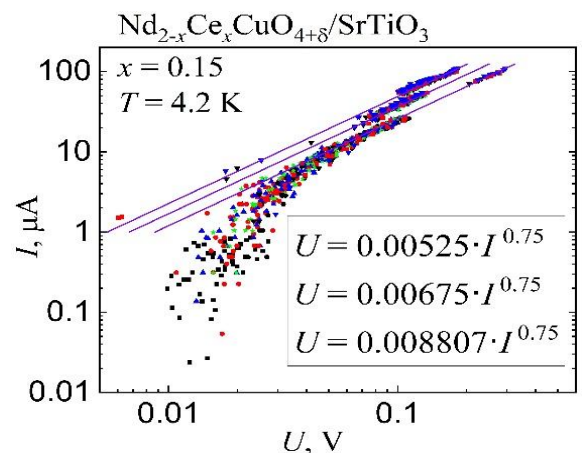


Рисунок - 4 скейлинговое поведение собственных различных ветвей ВАХ пленки при $T = 4.2$ К.

Выводы:

В результате проведенных нами исследований вольт-амперных характеристик проанализированы особенности симметрии спаривания в электронно-легированном

купрате $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ в области оптимального легирования. Степенная зависимость туннельных характеристик ВАХ $U \sim I^{0.75}$ свидетельствует о немонотонности d -волнового параметра порядка в $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$, что может быть вызвано сосуществованием сверхпроводимости и антиферромагнитных флуктуаций в области оптимального легирования.