

Влияние легирования на анизотропию транспортных свойств $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ и $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$

Т.Б. Чарикова, А.И. Пономарев, А.Н. Игнатенков, А.О. Ташлыков, А.В. Хрустов, Н.Г. Шелушина,
Институт физики металлов УрО РАН, 620219, Екатеринбург, Россия
А.А. Иванов

Московский государственный инженерно-физический институт, 115409, Москва, Россия

Исследованы температурные зависимости сопротивления монокристаллических пленок $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ ($x = 0.12; 0.15$ и 0.17) с ориентацией (001) и (1 $\bar{1}$ 0) c -оси кристалла относительно подложки, а также $\rho_{ab}(T)$ и $\rho_c(T)$ монокристаллов $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ ($0 \leq x \leq 2$). Изменение характера температурной зависимости сопротивления от металлической к диэлектрической при увеличении содержания нестехиометрического кислорода в $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ и изовалентного легирования в $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ обсуждается в рамках перехода Андерсона для неупорядоченных квазидвумерных систем.

Легированная церием электронная купратная ВТСП-система $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$, и легированный стронцием рутенат $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ имеют слоистую квазидвумерную перовскитоподобную кристаллическую структуру [1]. Соединение $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ характеризуется способностью обратимо поглощать и выделять кислород, что приводит к изменению температурных зависимостей сопротивления $\rho_{ab}(T)$ в проводящих плоскостях CuO_2 от неметаллической при $\delta > 0$ к металлической при $\delta \cong 0$ [2]. Переход от металлического к неметаллическому поведению наблюдается в системе $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ при легировании Sr_2RuO_4 кальцием [3]. Наличие металлического ($d\rho_{ab}/dT > 0$) поведения электросопротивления в проводящих плоскостях и неметаллического ($d\rho_c/dT < 0$) поведения в ортогональном к ним c -направлении является объектом пристального внимания теоретиков [4]. В данной работе исследовано влияние нестехиометрического беспорядка и примесного легирования на анизотропию транспортных свойств монокристаллических пленок $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ и объемных монокристаллов $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$.

Методом импульсного лазерного напыления [5] в МИФИ были синтезированы две серии эпитаксиальных пленок $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ ($x = 0.12; 0.15$ и 0.17) с различной ориентацией c -оси относительно подложки: пленки со стандартной ориентацией (001) – c -ось перпендикулярна подложке SrTiO_3 с ориентацией (001) и пленки с ориентацией (1 $\bar{1}$ 0) – c -ось параллельна подложке SrTiO_3 с ориентацией (1 $\bar{1}$ 0). Пленки с одинаковой концентрацией церия и упомянутых ориентаций c -оси были подвергнуты термообработке (отжигу) при различных условиях для получения образцов с разным содержанием кислорода. В результате получено три типа образцов: “as grown” – только что выращенные; “reduced” –

оптимально-отожженные в вакууме; “oxidized” – отожженные в кислороде. Толщина пленок составляла 1200-2000 Å.

Монокристаллы $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ размером $(3 \times 2 \times 0.2) \text{mm}^3$ были выращены методом зонной плавки [3] с содержанием Sr $0.0 \leq x \leq 2.0$.

Рентгеноструктурный анализ (Co-K α излучение) показал, что все монокристаллические пленки и монокристаллы имели высокое качество. Измерения проводились в интервале температур 1.5K - 300K.

На рис.1 представлены температурные зависимости сопротивления $\rho_{ab}(T)$ и $\rho_c(T)$ для оптимально отожженной пленки $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$.

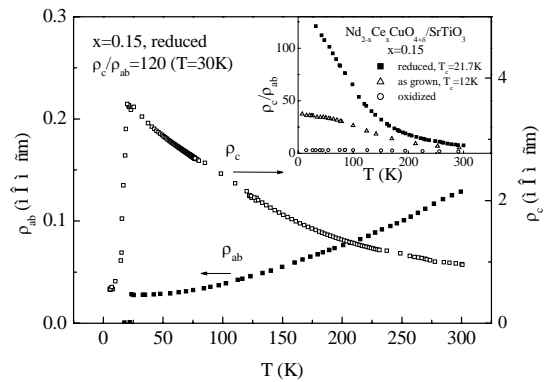


Рис.1. Температурные зависимости $\rho_{ab}(T)$ и $\rho_c(T)$ для оптимально отожженного образца $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$. На вставке: температурная зависимость коэффициента анизотропии для трех различных типов отжига.

В интервале температур от 300K до сверхпроводящего перехода сопротивление в CuO_2 -плоскости оптимально отожженной пленки имеет металлическую зависимость от температуры: $\rho_{ab}(T) \sim T^2$. Одновременно с этим ρ_c увеличивается с понижением температуры: $\rho_c(T) \sim 1/T$.

Согласно [4,6] такое поведение в слоистой квазидвумерной системе можно понять, если допустить, что сверхпроводник находится в фазе андерсоновского проводника, обусловленной наличием в нем сильного внутреннего беспорядка, с сильно-анизотропной длиной локализации носителей в проводящей плоскости и в направлении, перпендикулярном к ней ($R_{loc}^{ab} \gg R_{loc}^c$). Нами были сделаны

оценки длины локализации носителей в ab - плоскости $R_{loc}^{ab} = \ell \exp(\pi/2 \times k_F \ell)$ и длины неупругого рассеяния $L_\varphi^{ab} = \sqrt{D_{ab} \tau_\varphi}$ для образцов $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4+\delta}$, отожженных в разных режимах (ℓ - средняя длина свободного пробега, k_F - волновой вектор на уровне Ферми, D_{ab} - коэффициент диффузии в ab -плоскости, τ_φ - время фазовой когерентности). Сравнение величин R_{loc}^{ab} и L_φ^{ab} дает информацию о характере температурной зависимости сопротивления [4].

Оценена длина локализации носителей в направлении c -оси $R_{loc}^c \cong c/\ln(\frac{\tau_{esc}}{\tau})$, где τ_{esc} – время ухода из данной CuO_2 - плоскости в соседнюю, τ – время релаксации носителей в плоскости, c – расстояние между проводящими CuO_2 – плоскостями.

Для образцов $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4+\delta}$ с разным содержанием кислорода получены следующие результаты:

1). “reduced” – оптимально отожженная пленка в вакууме: $L_\varphi^{ab} \cong 1200 \text{ \AA}$, $R_{loc}^{ab} \rightarrow \infty$ ($L_\varphi^{ab} < R_{loc}^{ab}$), что соответствует металлическому поведению электросопротивления в ab - плоскости; $R_{loc}^c \cong 2.2 \text{ \AA}$, $c = 6 \text{ \AA}$ ($R_{loc}^c < c$), что соответствует неметаллической температурной зависимости электросопротивления в c -направлении.

2). “as grown” – только что выращенная пленка: $L_\varphi^{ab} \cong 380 \text{ \AA}$, $R_{loc}^{ab} \cong 2 \times 10^8 \text{ \AA}$ ($L_\varphi^{ab} < R_{loc}^{ab}$) - металлическое поведение электросопротивления в ab -плоскости; $R_{loc}^c \cong 3.4 \text{ \AA}$, $c = 6 \text{ \AA}$ ($R_{loc}^c < c$) - неметаллическая температурная зависимость электросопротивления в c -направлении.

3). “oxidized” – пленка, отожженная в кислороде: $L_\varphi^{ab} \rightarrow \infty$, $R_{loc}^{ab} \cong 10.5 \text{ \AA}$ ($L_\varphi^{ab} \gg R_{loc}^{ab}$) – неметаллическое поведение в ab -плоскости; $R_{loc}^c \cong 5.2 \text{ \AA}$, $c = 6 \text{ \AA}$ ($R_{loc}^c < c$) – неметаллическое поведение в c -направлении.

Полученные из оценок характеристики $\rho_{ab}(T)$ и $\rho_c(T)$ для образцов $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4+\delta}$ коррелируют с экспериментально наблюдавшимися температурными зависимостями сопротивления в этих пленках.

Таким образом, для “as grown” и оптимально отожженных образцов наблюдалась комбинация металлической зависимости электросопротивления в ab - плоскости и неметаллического поведения в c -направлении.

Такая комбинация температурных зависимостей сопротивления для одних и тех же образцов является по нашему мнению внутренним свойством квазидвумерных систем. Однако с ростом беспорядка вследствие увеличения содержания нестехиометрического кислорода (образцы, отожженные в кислороде) температурные зависимости сопротивления как в ab -плоскости, так и в c -направлении становятся неметаллическими.

На всех сериях образцов $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ было обнаружено, что отжиг в кислороде приводит к уменьшению коэффициента анизотропии (см. вставку на рис.1. Уменьшение коэффициента анизотропии сопротивления было обнаружено нами также на монокристаллах $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ при уменьшении содержания стронция (рис.2).

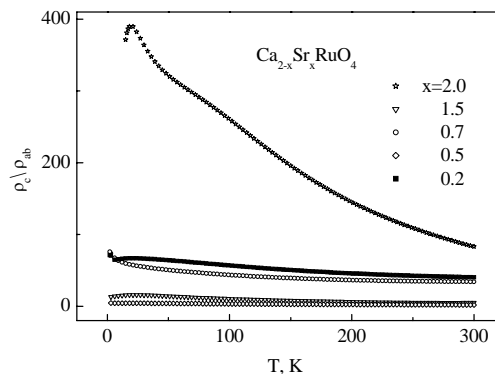


Рис.2. Температурная зависимость коэффициента анизотропии сопротивления монокристаллов $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ с разным содержанием стронция.

В работе получено, что в квазидвумерных системах $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ и $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$ нарушение стехиометрии за счет увеличения содержания кислорода в первом случае и вследствие увеличения содержания кальция во втором приводит к переходу металл-диэлектрик андерсоновского типа..

Авторы выражают благодарность Y. Maeno и S. Nakatsuji за предоставленные образцы $\text{Ca}_{2-x}\text{Sr}_x\text{RuO}_4$.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ-Урал №04-02-96084, РФФИ №02-02-16942 и Гос.контракта № 40.012.1.1.11.46(12/04).

1. Y. Maeno, H. Hashimoto, K. Yoshoda et al., Letters to Nature, 372, 532 (1994).
2. A. I. Ponomarev, G. I. Harus, T. B. Charikova et al., Modern Phys. Lett. B17, 701 (2003).
3. S. Nakatsuji, Y. Maeno, Phys.Rev.Lett 62, 6458 (2000).
4. M. V. Sadovskii, Superconductivity and Localization, World Scientific, 2000.
5. A. A. Ivanov, S. G. Galkin, A. V. Kuznetsov et al., Physica C 180, 69 (1991).
6. G. Kotliar, E. Abrahams, A. E. Ruckenstein et al., Europhys.Lett. 15, 655 (1991)