

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ  
И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА

УДК 537.622.3:537.621

АНИЗОТРОПИЯ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПРОНИЦАЕМОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛА  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_{4+\delta}$

© 2021 г. А. С. Клепикова<sup>а</sup>, Т. Б. Чарикова<sup>а</sup>, М. Р. Попов<sup>а, \*</sup>,  
А. Б. Ринкевич<sup>а</sup>, Д. В. Перов<sup>а</sup>, Е. А. Кузнецов<sup>а, б</sup>

<sup>а</sup>Институт физики металлов УрО РАН, ул. С. Ковалевской, 18, Екатеринбург, 620108 Россия

<sup>б</sup>ФГАОУВО Российский государственный профессионально-педагогический университет,  
ул. Машиностроителей, 11, Екатеринбург, 620012 Россия

\*e-mail: popov\_mr@imp.uran.ru

Поступила в редакцию 17.12.2020 г.

После доработки 21.12.2020 г.

Принята к публикации 30.12.2020 г.

Исследованы диэлектрические и магнитные свойства объемного монокристалла  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  при  $x = 0.1$ . Обнаружена анизотропия полевых и температурных зависимостей удельной намагниченности. Величина удельной намагниченности в магнитном поле, направленном параллельно плоскостям  $\text{CuO}_2$  больше, чем в перпендикулярном направлении, что связано с дополнительным вкладом магнитных моментов ионов неодима. При этом в плоскостях  $\text{CuO}_2$  при ориентации магнитного поля  $\mathbf{H}$  перпендикулярно плоскостям  $\text{CuO}_2$ , при температурах  $T < 100$  К существует область антиферромагнитного взаимодействия между ионами, которая не наблюдается при ориентации магнитного поля, направленного параллельно плоскостям  $\text{CuO}_2$ . Микроволновые исследования показали наличие сильной дисперсии диэлектрической проницаемости, что свидетельствует о существовании собственной резонансной частоты, значение которой находится вне частотного интервала выполненных измерений.

**Ключевые слова:** анизотропия, диэлектрическая проницаемость, магнитный момент

**DOI:** 10.31857/S0015323021050065

ВВЕДЕНИЕ

Соединение  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  – сверхпроводник с электронным типом проводимости, который имеет объемно-центрированную кристаллическую решетку и соответствует тетрагональной  $T$ -фазе. Этот сверхпроводник имеет только одну плоскость  $\text{CuO}_2$  на элементарную ячейку, не имеет медных цепочек и апексных атомов кислорода между соседними проводящими плоскостями. В связи с этим  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  обладает ярко выраженными двумерными свойствами [1, 2].

Чистый  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  является диэлектриком, и сверхпроводимость появляется только у твердых растворов на основе этого соединения  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $0.135 \leq x \leq 0.20$ ) при дополнительном отжиге в бескислородной атмосфере, температура сверхпроводящего перехода  $T_c \sim 24$  К для  $x = 0.145$  при оптимальном легировании [2–5].

Хорошо известно, что электронная структура высокотемпературных сверхпроводников из оксида меди имеет сильную анизотропию, которая обычно проявляется как металлическая температурная зависимость сопротивления вдоль плос-

кости  $ab$  и полупроводниковая – вдоль оси  $c$ . При оптических измерениях в нормальном состоянии вдоль оси  $c$  наблюдается край поглощения в инфракрасной области спектра, в отличие от металлоподобных спектров вдоль плоскости  $ab$ . В сверхпроводящем состоянии наблюдается резкий край отражения вдоль оси  $c$  в дальней инфракрасной области. Край отражения рассматривается как плазменный край конденсированных носителей в сверхпроводящем состоянии, а частота края определяется пересечением нуля частотной зависимостью действительной части диэлектрической проницаемости [6].

Более ранние микроволновые эксперименты на  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  в плоскости  $\text{CuO}_2$  оказались совместимыми с обычными предсказаниями Бардина–Купера–Шриффера для  $s$ -волн [7]. Однако последующие данные, включая квантование потока [8] и глубину проникновения в микроволновом [9] и высокочастотном диапазонах [10], предоставили убедительные экспериментальные доказательства  $d$ -волновой симметрии состояния спаривания [11].

В отличие от ряда экспериментов в плоскости  $ab$ , существует минимальная информация о свойствах  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  вдоль оси  $c$ , в первую очередь из-за малых размеров образцов в этом направлении. Большинство подобных экспериментов [5] было выполнено на керамических образцах  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$ . В качестве альтернативы, метод скользящего отражения известен как мощный метод выявления свойств сильно анизотропных сверхпроводников вдоль оси  $c$  [11, 12].

Также широко изучают магнитные свойства высокотемпературных сверхпроводников с электронной проводимостью, поскольку было высказано предположение, что антиферромагнитное взаимодействие между ионами  $\text{Cu}$  в слоях играет важную роль в возникновении сверхпроводящего состояния [13, 14].

В нашей предыдущей работе [15] была исследована анизотропия удельной намагниченности и магнитной восприимчивости в монокристаллических пленках с различной ориентацией оси  $c$   $\text{Nd}_{1.82}\text{Ce}_{0.18}\text{CuO}_4$  с оптимальным отжигом. Была обнаружена сильная анизотропия магнитной восприимчивости  $\chi(H)$  при  $H < 10$  кЭ, что связывали с антиферромагнитными флуктуациями и флуктуациями параметра порядка. В слабом магнитном поле  $H = 100$  Э также существует сильно анизотропная температурная зависимость магнитной восприимчивости, что связано с различным магнитным упорядочением редкоземельных магнитных ионов  $\text{Nd}^{3+}(\text{Ce}^{4+})$  при разной ориентации внешнего магнитного поля по отношению к проводящим плоскостям  $\text{CuO}_2$ . В этом случае наличие остаточного антиферромагнитного упорядочения ионов меди даже в перелегированной области ( $x > 0.15$ ) приводит к магнитной анизотропии в проводящих плоскостях. При температуре  $T < 30$  К флуктуации антиферромагнитного упорядочения приводят к уменьшению магнитной восприимчивости вдоль  $\text{CuO}_2$ , что может указывать на наличие антиферромагнитных спиновых флуктуаций несколько выше температуры сверхпроводящего перехода и появление флуктуаций параметра порядка в проводящих плоскостях  $\text{CuO}_2$  в интервале температур  $T \sim 10\text{--}30$  К. Дополнительный вклад магнитного момента ионов  $\text{Nd}$  в суммарный магнитный момент наблюдали, в частности, в низкотемпературной области [15].

В данной работе проведено комплексное исследование магнитных и микроволновых диэлектрических свойств несверхпроводящего оптимально отожженного ( $\delta \rightarrow 0$ ) соединения  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  с содержанием церия 10% в плоскости  $\text{CuO}_2$  и между плоскостями  $\text{CuO}_2$  с целью получения данных анизотропного поведения магнитных и диэлектрических характеристик в

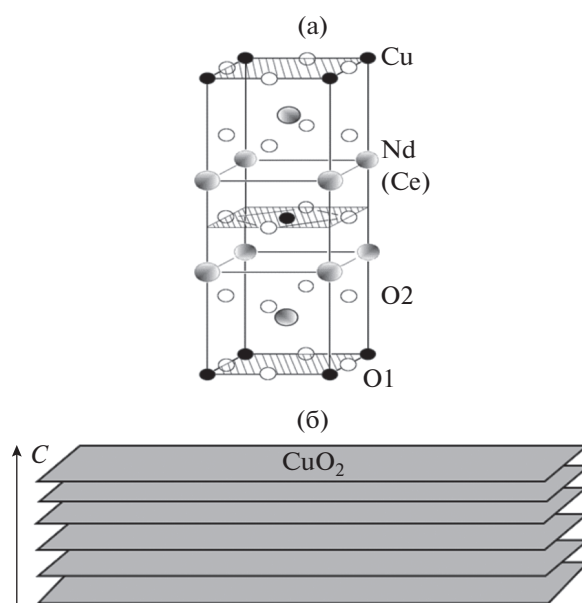


Рис. 1. Структура образца (а) и схематический вид (б).

области квантового фазового перехода антиферромагнетик-сверхпроводник.

## ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Объемные монокристаллы  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  с  $x = 0.1$  были выращены из расплава в керамическом тигле Леонюк (МГУ) и представляли собой пластины толщиной  $d = 0.4$  мм, длиной  $a = 4.5$  мм и шириной  $b = 4.0$  мм. Ориентация монокристалла была определена с помощью рентгеновского аппарата УРС-55. Объемные монокристаллы  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_4$  имеют объемно-центрированную кристаллическую решетку и соответствует  $T'$ -фазе (рис. 1а). Ионы кислорода  $\text{O}$  из вершинных положений сдвинуты в узлы на гранях тетрагональной ячейки, таким образом структуру соединения схематически можно представить в виде набора проводящих плоскостей  $\text{CuO}_2$ , разделенных непроводящими буферными  $\text{Nd}(\text{Ce})\text{O}$ -слоями (рис. 1б).

Магнитные измерения выполнены на установке MPMS-5XL. Были измерены кривые намагничивания при нескольких температурах и температурная зависимость магнитного момента. Магнитный момент определялся для двух ориентаций магнитного поля: параллельно и перпендикулярно плоскостям  $\text{CuO}_2$ .

Температурные зависимости магнитного момента получены в интервале температур  $T = 4.2\text{--}300$  К после предварительного охлаждения образца до температуры 4.2 К в отсутствие внешнего магнитного поля.

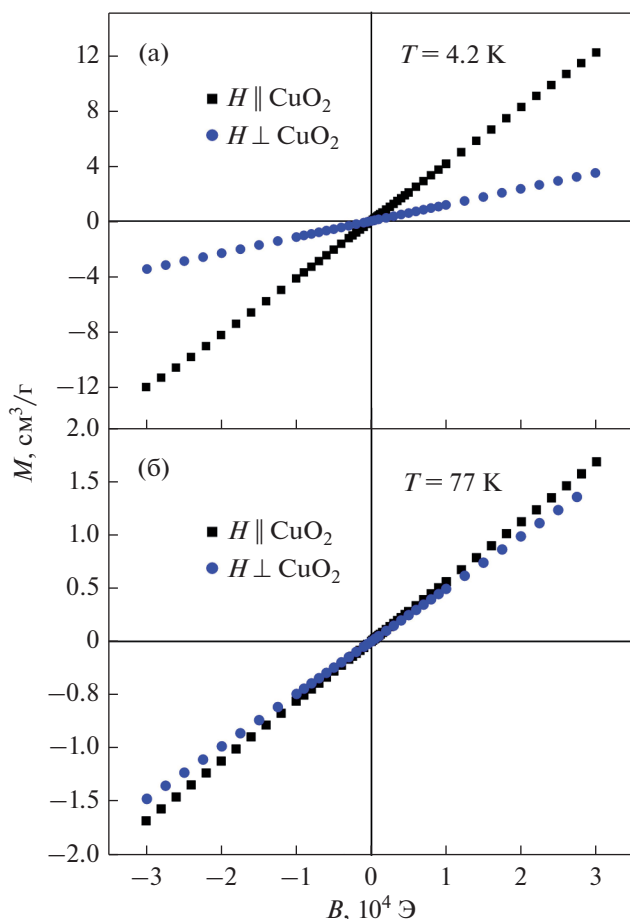


Рис. 2. Кривые намагничивания при  $T = 4.2$  (а) и  $77 \text{ K}$  (б) монокристалла  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_{4+\delta}$ .

Для измерения полевой зависимости магнитного момента образец был охлажден до нужной температуры, после чего было приложено внешнее магнитное поле в диапазоне от  $-30$  до  $+30 \text{ кЭ}$ .

Микроволновые исследования выполнены в частотном интервале от  $53$  до  $78 \text{ ГГц}$  при комнатной температуре по методике, описанной в [16]. Образец помещали в поперечное сечение стандартного прямоугольного волновода, работающего на моде  $H_{10}$ . Размеры волновода:  $3.6 \times 1.8 \text{ мм}$ , толщина образца  $d = 0.4 \text{ мм}$ . Волновой вектор электромагнитной волны  $\mathbf{k}$  был направлен параллельно оси  $c$ , т.е. перпендикулярно  $\text{CuO}_2$  плоскостям. Вектор микроволнового электрического поля лежал в плоскости  $\text{CuO}_2$ . Микроволновое магнитное поле было расположено в горизонтальной плоскости, параллельно большей стороне волновода. С помощью измерителя коэффициента стоячей волны и отражения были получены модули коэффициента прохождения  $D$  и коэффициента отражения  $R$  и их частотные зависимости. Полученные значения  $D$  и  $R$  использованы для определения комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon = \epsilon' - i\epsilon''$  [16, 17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведены зависимости удельной намагниченности от магнитного поля в диапазоне магнитных полей  $H = (-30 \dots +30) \text{ кЭ}$  при двух фиксированных температурах:  $T = 4.2$  и  $77 \text{ K}$ .

Как было установлено ранее [3, 18, 19], соединение  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  с содержанием церия  $10\%$  не является сверхпроводящим даже при оптимальном отжиге в бескислородной атмосфере ( $\delta \rightarrow 0$ ), однако находится в непосредственной близости к сверхпроводящей области: уже при содержании церия  $x = 0.135$  в оптимально отожженных соединениях наблюдается переход в сверхпроводящее состояние (СП переход) при температуре  $T \sim 21.1 \text{ K}$  [20].

В изученном интервале магнитных полей и температур при двух ориентациях внешнего магнитного поля по отношению к плоскостям  $\text{CuO}_2$  установлено, что соединение  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_4$  является парамагнетиком. Следует отметить, что в исследованном несверхпроводящем соединении  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_4$  при  $T = 4.2 \text{ K}$  наблюдается сильная анизотропия удельной намагниченности, которая достигает  $M_{\parallel}/M_{\perp} = 3.5$  в магнитном поле  $H = 30 \text{ кЭ}$ . Как и в работе [15], удельная намагниченность во внешнем поле, направленном параллельно плоскостям  $\text{CuO}_2$ , больше, чем в перпендикулярном направлении, что связано с дополнительным вкладом магнитных моментов ионов  $\text{Nd}$  в области низких температур [21]. При температуре  $T = 77 \text{ K}$  удельная намагниченность в поле, параллельном плоскостям  $\text{CuO}_2$ , уменьшается на порядок:  $M_{\parallel}(T = 4.2 \text{ K}) = 12.2 \text{ см}^3/\text{г}$ ,  $M_{\parallel}(T = 77 \text{ K}) = 1.5 \text{ см}^3/\text{г}$ , а анизотропия исчезает.

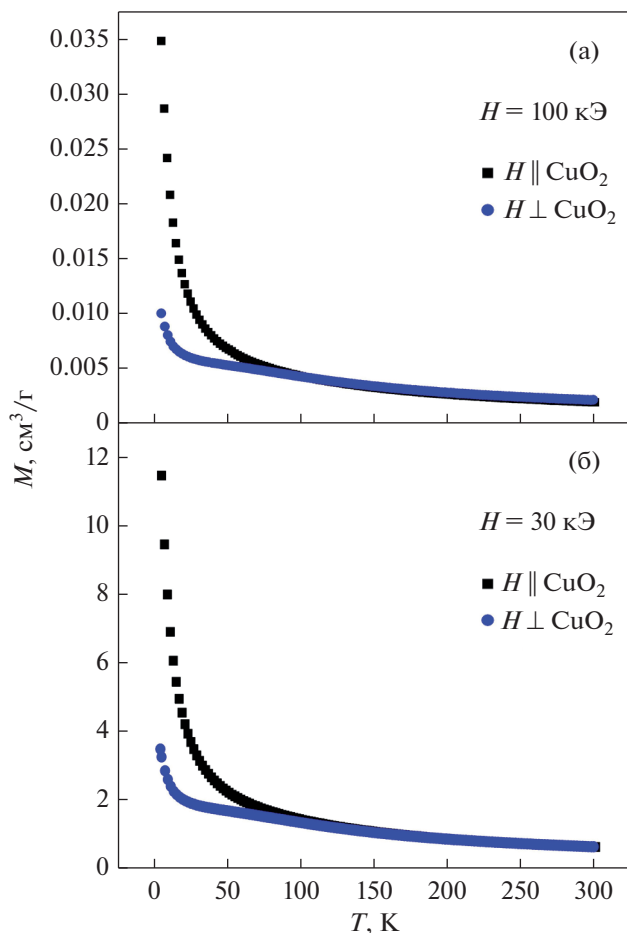
Полученные значения магнитного момента для объемного монокристаллического образца  $\text{Nd}_{0.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_4$  в  $\sim 10^3$  раз больше, чем для монокристаллических пленок  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $0 \leq x \leq 0.18$ ) [2, 15, 19].

Температурные зависимости удельной намагниченности были измерены во внешнем магнитном поле  $H = 100 \text{ Э}$  и  $H = 30 \text{ кЭ}$  (рис. 3).

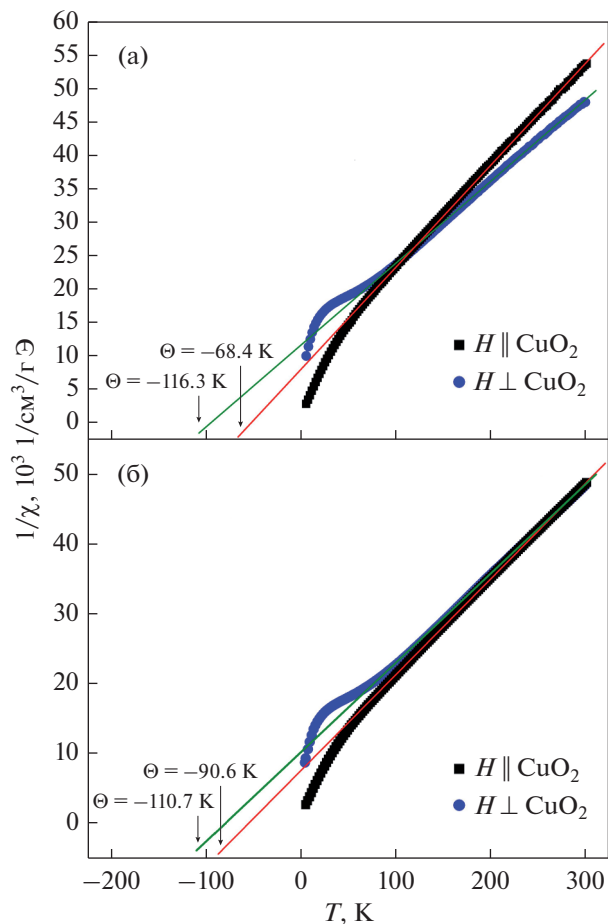
В интервале температур  $100 \text{ K} \leq T \leq 300 \text{ K}$  для двух ориентаций магнитного поля относительно плоскостей  $\text{CuO}_2$  ( $H_{\parallel}$  и  $H_{\perp}$ ) магнитная восприимчивость растет с уменьшением температуры согласно закону Кюри–Вейса для парамагнетиков (рис. 4):

$$\chi = \chi_0 + \frac{C}{T - \Theta}, \quad (1)$$

где  $\chi_0$  – восприимчивость при  $T = 0$ , экстраполированная из высокотемпературной области,  $C$  – постоянная Кюри–Вейса,  $C = p_{\text{eff}}^2/2.8284$ ,  $p_{\text{eff}}^2$  – эффективный магнитный момент на ион  $\text{Nd}^{3+}$ ,  $\Theta$  – парамагнитная температура Кюри [22]. Важной особенностью поведения  $\chi(T)$  в случае ори-



**Рис. 3.** Температурные зависимости удельной намагниченности при 100 Э (а) и 30 кЭ (б) монокристалла  $Nd_{1.9}Ce_{0.1}CuO_{4+\delta}$ .



**Рис. 4.** Температурные зависимости обратной магнитной восприимчивости при 100 Э (а) и 30 кЭ (б) монокристалла  $Nd_{1.9}Ce_{0.1}CuO_{4+\delta}$ .

ентации магнитного поля перпендикулярно плоскостям  $CuO_2$ , является некоторое отклонение (замедление роста восприимчивости с уменьшением температуры) от закона Кюри–Вейса в интервале температур  $T \sim 10–100$  К. Как и в работе [23], для монокристаллов  $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$  с  $x = 0$  и  $x = 0.16$  наблюдается небольшой рост  $1/\chi(T)$  (в интервале температур 30–50 К). Эта особенность отсутствует, когда приложенное поле параллельно плоскостям  $CuO_2$ . Такая стабилизация значения магнитной восприимчивости  $\chi \approx 5 \times 10^{-5} \text{ см}^3/\text{Г} \cdot \text{Э}$  в довольно широком температурном интервале свидетельствует о возникновении антиферромагнитных корреляций в плоскостях  $CuO_2$  при направлении  $H$  перпендикулярно плоскостям  $CuO_2$  (рис. 4).

Из аппроксимации высокотемпературных линейных участков зависимостей  $1/\chi(T)$  определена константа Кюри  $C$  и парамагнитная температура Кюри  $\Theta$  для двух конфигураций в магнитном поле  $H = 100$  Э и  $H = 30$  кЭ (табл. 1). Для всех образ-

цов параметр  $\Theta$  отрицателен, что отвечает возможности антиферромагнитного типа упорядочения.

Форма зависимости  $1/\chi(T)$ , полученная на монокристаллах, когда  $H$  параллельно плоскостям

**Таблица 1.** Значения постоянной Кюри  $C$  и парамагнитной температуры Кюри  $\Theta$  монокристалла  $Nd_{1.9}Ce_{0.1}CuO_4$  для двух ориентаций магнитного поля относительно плоскостей  $CuO_2$

Образцы	$C, \text{ К см}^3/\text{Г} \cdot \text{Э}$	$\Theta, \text{ К}$
$H \parallel$ 100 Э	$7.4 \times 10^{-3}$	-68.4
$H \perp$ 100 Э	$9.7 \times 10^{-3}$	-116.3
$H \parallel$ 30 кЭ	$9.8 \times 10^{-2}$	-90.6
$H \perp$ 30 кЭ	$10.2 \times 10^{-2}$	-110.7

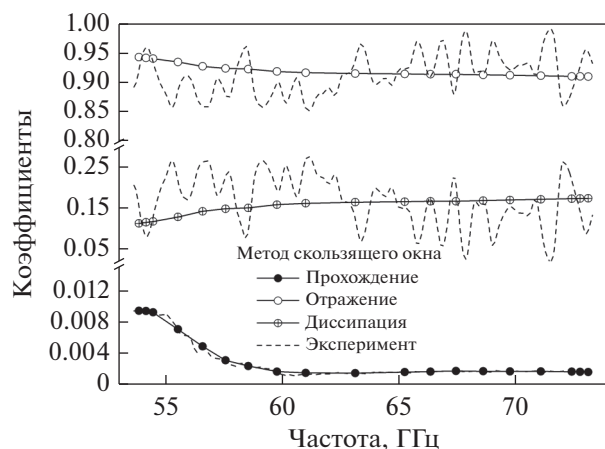


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициентов прохождения, отражения и диссипации монокристалла  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_{4+\delta}$ .

$\text{CuO}_2$ , идентична форме, рассчитанной для изолированного иона  $\text{Nd}^{+}$  под влиянием кубического кристаллического поля (если предположить, что только уровни, возникающие из расщепления нижнего уровня мультиплета,  $^4I_{9/2}$  термически заселены, и что обменные взаимодействия между ионами  $\text{Nd}^{+}$  не существенны [24]). Анизотропия температурной зависимости обратной восприимчивости как для легированных, так и для нелегированных кристаллов может возникать из-за анизотропии расщепления магнитного поля (т.е. разделения уровней энергии, которое возникает из-за приложенного магнитного поля и является функцией его направления) [23]. Почти полное отсутствие анизотропии при высоких ( $T > 150$  К) температурах указывает на малость значения  $B_2^0$  параметра гамильтониана кристаллического поля для случая тетрагональной точечной симметрии [25].

На рис. 5 представлены частотные зависимости коэффициентов прохождения, отражения и диссипации образцов  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_{4+\delta}$ , измеренные при температуре  $T = 300$  К. Осцилляционные изменения на экспериментальной зависимости коэффициента отражения вызваны неполным согласованием элементов микроволнового тракта. На основе этих данных были рассчитаны действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости и проводимость (рис. 6) по формулам из работы [16]. Средние значения параметров во всем частотном диапазоне:  $\epsilon' = 315$ ;  $\epsilon'' = 53$ ;  $\sigma = 188$  См/м. Полученное значение проводимости соответствует “плохому металлу”, на что также указывают большая величина коэффициента отражения на рис. 5 и значительная диссипация  $\sim 0.1$ – $0.2$ , т.е. доля поглощенной мощности, представленная на рис. 6.

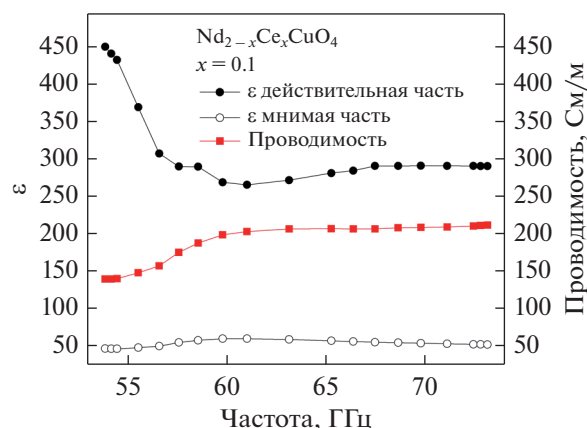


Рис. 6. Частотные зависимости действительной и мнимой части диэлектрической проницаемости и проводимости монокристалла  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_{4+\delta}$ .

Установлено, что на частотах 53–60 ГГц имеет место сильная дисперсия диэлектрической проницаемости, что, вероятно, свидетельствует о существовании собственной резонансной частоты, значение которой находится вне частотного интервала, в котором выполнены измерения. Данные результаты согласуются с проведенными нами ранее измерениями удельного сопротивления недолегированных соединений  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  ( $0 < x < 0.14$ ), в которых как в проводящих плоскостях  $\text{CuO}_2$ , так и в перпендикулярном направлении (вдоль оси  $c$ ) наблюдается неметаллическое поведение сопротивления при изменении температуры ( $dp/dT < 0$ ) [4].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы диэлектрические и магнитные свойства объемного монокристалла  $\text{Nd}_{1.9}\text{Ce}_{0.1}\text{CuO}_{4+\delta}$  в области квантового фазового перехода антиферромагнетик–сверхпроводник.

Обнаружено, что удельная намагниченность при температуре  $T = 4.2$  К во внешнем поле, направленном параллельно плоскостям  $\text{CuO}_2$ , больше, чем в перпендикулярном направлении (вдоль оси  $c$  кристалла), что связано с дополнительным вкладом магнитных моментов ионов  $\text{Nd}$ .

Установлено, что в плоскостях  $\text{CuO}_2$  при ориентации магнитного поля  $H$  перпендикулярно плоскостям  $\text{CuO}_2$ , при температурах  $T < 100$  К существует антиферромагнитное взаимодействие между ионами, что подтверждается отрицательным значением параметра парамагнитной температуры Кюри. При ориентации магнитного поля вдоль плоскостей  $\text{CuO}_2$ , перехода к антиферромагнитному типу взаимодействия между ионами

не обнаружено на всем исследованном интервале температур. Наличие сильной анизотропии намагниченности при ориентации внешнего магнитного поля перпендикулярно и вдоль проводящих плоскостей  $\text{CuO}_2$  указывает на определяющую роль этих плоскостей в появлении квантового фазового перехода антиферромагнетик—сверхпроводник при увеличении концентрации носителей заряда.

В результате микроволновых исследований обнаружено увеличение коэффициента поглощения в полтора раза при изменении частоты от 53 до 78 ГГц при комнатной температуре и наличие сильной дисперсии диэлектрической проницаемости, что, по нашему мнению, свидетельствует о существовании собственной резонансной частоты, значение которой находится вне частотного интервала, в котором выполнены измерения.

Работа проведена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования № 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024). Авторы выражают благодарность А.В. Королеву за проведение магнитных измерений на установке MPMS-5XL.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клепикова А.С., Чарикова Т.Б., Шелушинина Н.Г., Петухов Д.С., Иванов А.А. Анизотропия эффекта Холла в квазидвумерном электронно-легированном сверхпроводнике  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  // ФТТ. 2018. № 60. С. 2162–2165.
2. Galluzzi, A., Nigro, A., Fittipaldi, R., Guarino, A., Pace, S., Polichetti, M. DC magnetic characterization and pinning analysis on  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$  cuprate superconductor // J. Magn. Mater. 2019. V. 475. P. 125–129.
3. Klepikova A.S., Charikova T.B., Shelushinina N.G., Popov M.R., Ivanov A.A. Anisotropic temperature dependence of normal state resistivity in underdoped region of a layered electron-doped superconductor  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ . // Low Temp. Phys. 2019. V. 45. № 2. P. 217–223.
4. Klepikova A.S., Petukhov D.S., Petukhova O.E., Charikova T.B., Shelushinina N.G., Ivanov A.A. Incoherent interlayer transport in single-crystal films of  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4/\text{SrTiO}_3$  // J. Phys. Conf. Ser. 2018. V. 993. № 012002.
5. Чарикова Т.Б., Шелушинина Н.Г., Петухов Д.С., Харус Г.И., Петухова О.Е., Иванов А.А. Соотношение сопротивления Холла и магнитосопротивления в смешанной области электронного сверхпроводника  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}$  // ФММ. 2017. № 118. С. 1257–1265.
6. Shibata H., Yamada T. Far-infrared reflectivity along the c axis in  $\text{La}_2\text{CuO}_{4+\delta}$ ,  $\text{La}_{1.89}\text{Ca}_{0.11}\text{Cu}_2\text{O}_{6+\delta}$ , and  $\text{Nd}_2\text{CuO}_{4-x}\text{F}_x$  single crystals // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. № 22. R14275–R14278.
7. Andreone, A., Cassinese, A., Di Chiara, A., Vaglio, R., Gupta, A., Sarnelli, E. Temperature dependence of the penetration depth in  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4+\delta}$  superconducting thin films // Phys. Rev. B. 1994. V. 49. № 9. P. 6392–6394.
8. Tsuei C.C., Kirtley J.R. Phase-Sensitive Evidence for d-Wave Pairing Symmetry in Electron-Doped Cuprate Superconductors // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. № 1. P. 182–185.
9. Kokales J.D., Fournier P., Mercaldo L.V., Talanov V.V., Greene R.L., Anlage S.M. Microwave electrodynamic of the electron-doped cuprate superconductors  $\text{Pr}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$  and  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$  // Phys. C Supercond. 2000. V. 341–348. P. 1655–1658.
10. Prozorov R., Giannetta R.W., Fournier P., Greene R.L. Evidence for Nodal Quasiparticles in Electron-Doped Cuprates from Penetration Depth Measurements // Phys. Rev. Lett. 2000. V. 85. № 17. P. 3700–3703.
11. Pimenov A., Pronin A.V., Loidl A., Kampf A.P., Krasnovobodtsev S.I., Nozdrin V.S. Submillimeter spectroscopy of tilted  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-\delta}$  films: Observation of a mixed ac-plane excitation // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 77. № 3. P. 429–431.
12. Schützmann J., Somal H.S., Tsvetkov A.A., van der Marrel D., Koops G.E.J., Kolesnikov N., Ren Z.F., Wang J.H., Brück E., Menovsky A.A. Experimental test of the interlayer pairing models for high-Tc superconductivity using grazing-incidence // Phys. Rev. B. 1997. V. 55. № 17. P. 11118–11121.
13. Anderson P.W. The Resonating Valence Bond State in  $\text{La}_2\text{CuO}_4$  and Superconductivity // Science. 1987. V. 235. № 4793. P. 1196–1198.
14. Plakida N.M. High-Temperature Superconductivity: Antiferromagnetism in High-Temperature Superconductors, 1995. P. 33–61.
15. Klepikova A.S., Charikova T.B., Popov M.R., Stepanova E.A., Ivanov A.A. Magnetic susceptibility anisotropy of electron overdoped high temperature superconductor  $\text{Nd}_2\text{-Ce CuO}_4$  // J. Phys. Chem. Solids. 2021. V. 148. № 109770.
16. Ринкевич А.Б., Перов Д.В., Кузнецов Е.А., Пахомов Я.А., Рябков Ю.И. Диэлектрические свойства легированных титанатов переходных металлов на волнах миллиметрового диапазона // Журн. технической физики. 2016. № 86. С. 75–84.
17. Ринкевич А.Б., Кузнецов Е.А., Миляев М.А., Ромашев Л.Н., Устинов В.В. Прохождение микроволн через магнитные металлические наноструктуры // ФММ. 2020. № 121. С. 1239–1270.
18. Motoyama E.M., Yu G., Vishik I.M., Vajk O.P., Mang P.K., Greven M. Spin correlations in the electron-doped high-transition-temperature superconductor  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4\pm\delta}$  // Nature. 2007. V. 445. P. 186–189.
19. Klepikova A.S., Charikova T.B., Popov M.R., Stepanova E.A., Lugovikh A.M., Ivanov A.A. Magnetic Properties of Underdoped Epitaxial Films  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4+\delta}/\text{SrTiO}_3$  // J. Supercond. Nov. Magn. 2020. V. 33. P. 3487–3492.

20. Jia L.S., Chen X.L., Yang W., Yan X.L. Growth and characterization of superconductive  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$  single crystals // *Cryst. Res. Technol.* 2004. № 39. P. 567–571.
21. Uefuji T., Kurahashi K., Fujita M., Matsuda M., Yamada K. Electron-doping effect on magnetic order and superconductivity in  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  single crystals // *Phys. C Supercond.* 2002. V. 378–381. P. 273–277.
22. Lascialfari A., Ghigna P., De Gennaro S. Susceptibility and Evidences of Charge Carriers Interaction above  $T_c$  in  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4+\delta}$  // *Int. J. Mod. Phys. B.* 1999. V. 13. P. 1151–1156.
23. Tarascon J.-M., Wang E., Greene L.H., Bagley B.G., Hull G.W., D'Egidio S.M., Miceli P.F., Wang Z.Z., Jing T.W., Clayhold J., Brawner D., Ong N.P. Growth, structural, and physical properties of superconducting  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  crystals // *Phys. Rev. B.* 1989. V. 40. № 7. P. 4494–4502.
24. Puche R.S., Norton M., White T.R., Glaunsinger W.S. Magnetic properties of the semiconducting lanthanide cuprates  $\text{Ln}_2\text{CuO}_4$  and their interpretation: Evidence for a new series of planar copper antiferromagnets // *J. Solid State Chem.* 1983. V. 50. № 3. P. 281–293.
25. Натканец И., Сашин И.Л. Препринт Объединенного института ядерных исследований: Кристаллическое поле в соединении  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$ , 1991.