

УДК 534.2

## ОСОБЕННОСТИ УПРУГИХ СВОЙСТВ ВТСП-КЕРАМИКИ В ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА В СВЕРХПРОВОДЯЩУЮ ФАЗУ

© 2019 г. А. И. Коробов<sup>а, \*</sup>, А. И. Кокшайский<sup>а</sup>, Н. В. Ширгина<sup>а</sup>, Н. И. Одина<sup>а</sup>,  
А. А. Агафонов<sup>а</sup>, В. В. Ржевский<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: aikor42@mail.ru

Поступила в редакцию 19.06.2019 г.

После доработки 19.06.2019 г.

Принята к публикации 09.07.2019 г.

В работе приведены результаты исследований упругих свойств высокотемпературной сверхпроводящей керамики  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  в окрестности фазового перехода в сверхпроводящее состояние при температуре 91.3 К, а также при комнатной температуре 293 К. В окрестности температуры фазового перехода шириной порядка 10 К впервые обнаружено локальное увеличение продольного нелинейного акустического параметра  $N$ , характеризующего ангармонизм межатомного взаимодействия в материале. Проведенные экспериментальные исследования линейных и нелинейных упругих свойств ВТСП-керамики  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  в области сверхпроводящего перехода показывают, что электронный фазовый переход оказывает существенное влияние на ее упругие свойства.

**Ключевые слова:** скорость ультразвуковых волн, сверхпроводящая керамика, нелинейный упругий параметр

**DOI:** 10.1134/S0320791919060066

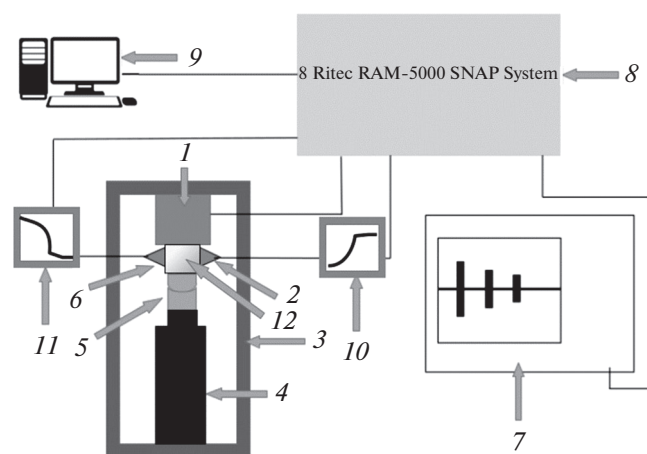
### ВВЕДЕНИЕ

Открытие в 1986 г. высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) у металлооксидных соединений – керамик – стимулировало интенсивное исследование их физических свойств, в том числе упругих. Интервал экспериментально найденных критических температур ВТСП соединений разной природы к настоящему времени составляет от  $T_c = 30$  К для  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  [1] до  $T_c = 265$  К для  $LaH_{10}$  при давлении  $\sim 170$  Мбар [2]. Причем в последнем случае  $T_c$  была не только обнаружена, но и предсказана [3]. Последнее стало возможным благодаря численному моделированию новых ВТСП структур на основе уравнений из первых принципов, которые ведут к лучшему пониманию физических и химических явлений в материалах. С другой стороны, для уже найденных высокотемпературных сверхпроводников улучшаются прежние и разрабатываются новые методики их изготовления, что позволяет получать материалы ВТСП нового поколения, обладающие определенными заданными характеристиками: большим содержанием сверхпроводящей фазы, оптимальной пористостью, способностью пропускать большие плотности как постоянного, так и переменного тока, с малыми энергетическими потерями. При этом упругие свойства материалов, получаемых с помощью новых техно-

логий изготовления, могут значительно отличаться от ранее изученных образцов.

В настоящей работе рассматриваются линейные и нелинейные упругие свойства ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$ , с критической температурой  $T_c = 91$  К, которая является первым соединением с температурой перехода в сверхпроводящее состояние выше температуры кипения азота (77 К) [4]. Большой интерес к исследованию свойств этой керамики, в том числе, к изучению ее упругих характеристик [5–7], вызван тем, что она является перспективным ВТСП материалом в различных областях электроники и электроэнергетики, при этом способы ее изготовления в последнее время значительно усовершенствованы. Наноструктурированные ВТСП материалы на основе  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  отличаются высокой долей сверхпроводящей фазы, оптимально насыщенной кислородом, обеспечением структуры образцов центрами пиннинга из элементов этого же соединения [8]. В частности, исходные компоненты нанопорошка претерпевают несколько фазовых превращений в процессе синтеза, что вызывает отклонение стехиометрии частиц и приводит к структурным и механическим дефектам.

Вместе с тем, актуальной остается задача создания контролируемых дефектов в ВТСП соединениях и определения условий, при которых кон-



**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной ультразвуковой установки для измерения упругих свойств твердых тел: 1 – датчик давления, 2 – пьезоэлектрический преобразователь, 3 – рама, 4 – домкрат, 5 – шарнир, 6 – образец, 7 – цифровой осциллограф DSO7034B.

центрация этих дефектов вела бы к повышению критического тока сверхпроводников. Критический ток является параметром, весьма чувствительным к наличию дефектов, поскольку он определяется взаимодействием решетки вихрей Абрикосова с системой центров пиннинга, роль которых выполняют различные дефекты кристаллической решетки образца. Максимальная величина критического тока достигается при оптимальной концентрации дефектов. Избыточная концентрация дефектов ведет к разрушению сверхпроводимости.

Целью данной работы является исследование особенностей упругих свойств ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$ , изготовленной современным промышленным способом в Национальном исследовательском центре “Курчатовский институт”. Особое внимание уделено экспериментальному исследованию продольного нелинейного упругого параметра второго порядка при нелинейной диагностике структуры сверхпроводящего соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  в окрестности температуры сверхпроводящего перехода при  $T_c = 91.3 \text{ K}$ .

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОБРАЗЦЫ, УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальные исследования линейных и нелинейных упругих свойств ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  проводились ультразвуковыми методами с помощью автоматизированного измерительного комплекса, состоящего из ультразвуковой системы Ritec RAM-5000, 4-канального цифрового осциллографа DS09104A и механического устройства для создания в исследуемом материале контролируемого одноосного давления  $P$ , ко-

торый ранее нами применялся в работах [9–11]. Ультразвуковой комплекс Ritec RAM-5000 SNAP SYSTEM работает в импульсном режиме и предназначен для измерения линейных и нелинейных упругих свойств твердых тел (рис. 1).

В комплексе реализованы следующие методики для одновременного исследования механических и упругих свойств твердых тел:

а) Импульсный метод измерения скорости ультразвуковых волн для определения всех компонент тензора упругости второго порядка  $C_{ijkl}$  в исследуемых образцах твердых тел.  
б) Квазистатический метод Терстона–Браггера для определения всех компонент тензора упругости третьего порядка  $C_{ijklq}$  в твердых телах.

в) Спектральный метод для определения нелинейных упругих свойств твердых тел, основанный на исследовании эффективности генерации высших гармоник при распространении акустических волн конечной амплитуды в исследуемом образце. Исследование эффективности генерации второй гармоники объемной акустической волны (ОАВ)  $A_{2f}$  проводилось на частоте  $2f = 10 \text{ МГц}$  при распространении в исследуемом материале ОАВ конечной амплитуды  $A_f$  на частоте  $f = 5 \text{ МГц}$ . Для выделения сигналов амплитуд первой и второй гармоник из спектра сигнала, прошедшего через образец, применялись фильтры нижних и высоких частот. Это позволило по двум независимым каналам проводить одновременное измерение амплитуды  $A$  и фазы  $\varphi$  сигналов первой и второй гармоник в зависимости от амплитуды зондирующего сигнала при различных температурах исследуемого образца.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения ультразвуковых измерений линейных и нелинейных упругих свойств ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  из одной заготовки были изготовлены три образца в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами  $36.22 \times 9.79 \times 7.19 \text{ мм}$ . Противоположные грани образцов тщательно полировались. В этих образцах ультразвуковым методом вдоль трех ортогональных направлений, параллельных 3-м ребрам параллелепипеда, были измерены скорости продольных и сдвиговых ОАВ при комнатной температуре  $T = 300 \text{ K}$ . Численные значения как для продольных, так и для сдвиговых скоростей ОАВ в образце в пределах погрешности 1.5% совпали. Это позволило считать исследуемые образцы акустически изотропными материалами. Также была измерена плотность образцов ВТСП  $\rho_0 = 5690 \pm 70 \text{ кг/м}^3$ . В изотропных твердых телах имеется 12 отличных от нуля коэффициентов упругости второго порядка (КУВП), но только 2 из них являются независи-

**Таблица 1.** Упругие параметры ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$ 

Плотность, кг/м <sup>3</sup>	$V_L$ , м/с	$V_S$ , м/с	$C_{11}$ , ГПа	$C_{44} = \mu$ , ГПа	$S_{11}$	$S_{12}$	$K$ , ГПа	$E$ , ГПа	$\sigma$ , Па	$\lambda$ , ГПа
$5690 \pm 70$	$4530 \pm 70$	$2630 \pm 40$	$116.74 \pm 3.48$	$39.35 \pm 1.18$	$(1.02 \pm 0.03) \times 10^{-11}$	$(-2.5 \pm 0.07) \times 10^{-12}$	$64.2 \pm 1.9$	$98 \pm 3$	$0.25 \pm 0.07$	$38 \pm 1$

мыми. Обычно такими принято считать коэффициенты  $C_{11}$  и  $C_{44}$ . В табл. 1 приведены результаты измерения скоростей продольной и сдвиговой ОАВ, значение плотности керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  и рассчитанные по формулам (1) и (2) значения КУВП в исследованном образце [12].

$$C_{11} = \rho_0 V_L^2, \quad (1)$$

$$C_{44} = \rho_0 V_T^2, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность образца,  $V_L$  – продольная скорость,  $V_T$  – сдвиговая скорость ОАВ. Измерение скорости продольных ОАВ проводилось на частоте 10 МГц, а сдвиговых ОАВ на частоте 5 МГц.

Для описания упругих свойств изотропных твердых тел наряду с тензорными коэффициентами  $C_{11}$  и  $C_{44}$  часто используются скалярные величины:  $\lambda$ ,  $\mu$  – коэффициенты Ламе,  $S_{ij}$  – модуль податливости второго порядка,  $E$  – модуль Юнга,  $K$  – коэффициент всестороннего сжатия,  $\sigma$  – коэффициент Пуассона. Любая пара этих коэффициентов однозначно описывает упругие свойства твердых тел. Экспериментально определенные коэффициенты  $C_{11}$  и  $C_{44}$  позволили рассчитать коэффициенты Ламе  $\lambda$ ,  $\mu$ , модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\sigma$ , коэффициент всестороннего сжатия  $K$ . Значение этих коэффициентов в ВТСП керамике приведено в табл. 1. Методика расчета коэффициентов приводится в [13].

Исследования нелинейных упругих свойств образцов ВТСП проводились двумя ультразвуковыми методами:

а) при комнатной температуре измерения проводились квазистатическим методом Терстона–Браггера, основанном на упругоакустическом эффекте – зависимости скорости ОАВ в исследуемом образце твердого тела от величины приложенного к нему внешнего давления;

б) в области сверхпроводящего перехода спектральным методом по эффективности генерации второй упругой гармоники.

В изотропном твердом теле имеется 18 отличных от нуля компонент тензора коэффициентов упругости третьего порядка (КУТП), но только три коэффициента ( $C_{111}$ ;  $C_{112}$ ;  $C_{123}$ ) считаются независимыми, а остальные являются их линейной комбинацией [14]. Для определения трех независимых КУТП методом Терстона–Браггера в об-

разцах ВТСП-керамики были измерены зависимости относительного изменения скорости ( $\Delta V/V$ ) продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия  $P$  при различных направлениях единичных векторов  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{U}$ , определяющих направление распространения и поляризацию акустических волн, и вектора  $\mathbf{M}$ , определяющего направление одноосного сжатия  $P$ . Направление одноосного сжатия  $\mathbf{M}$  при всех измерениях было перпендикулярно направлению распространения упругой волны  $\mathbf{N}$ . Расчет КУТП производился по методу Терстона–Браггера, заключающемуся в решении системы уравнений, полученной на основе результатов экспериментальных измерений зависимости скорости упругих волн от величины одноосного сжатия  $P$ :

$$\left[ \frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P} \right]_{P=0} = 2\rho_0 W^2 F + G, \quad (3)$$

где  $W$  – “естественная скорость” ОАВ,  $\rho_0$  – плотность,  $F = S_{jkab}^T M_a M_b U_j U_k$ ,  $G = S_{ipab}^T C_{jrksip} U_j U_k N_r \times N_s M_a M_b$ ,  $S_{ipab}^T$  – коэффициенты податливости второго порядка,  $C_{jrksip}$  – КУТП в исследуемом материале,  $U_k$  – компоненты вектора поляризации ОАВ  $\mathbf{U}$ ,  $N_r$  – компоненты волнового вектора ОАВ  $\mathbf{N}$ ,  $M_i$  – компоненты единичного вектора  $\mathbf{M}$  в направлении одноосного сжатия  $P$  [15].

Измерения относительного изменения скорости ОАВ  $\Delta V/V$  в образце, вызванного приложенным к нему одноосным статическим давлением  $P$ , проводились импульсным ультразвуковым методом. Ультразвуковой комплекс автоматически измеряет изменение фазы акустической волны  $\Delta\varphi = 2\pi f \Delta\tau$ , вызванное изменением времени ее распространения  $\tau$  в образце при приложении к нему давления  $P$ . Измерение величины  $\Delta\varphi$  позволяет определить относительное изменение скорости акустической волны согласно выражению  $\Delta V/V = -\Delta\tau/\tau = \Delta\varphi/2\pi f\tau$  (где  $f$  – частота ОАВ). Измерения зависимости относительного изменения скорости в образце от величины одноосного сжатия  $P$  проводились в интервале давлений 0–1.4 МПа. В этом интервале зависимость относительного изменения скорости  $\Delta V/V$  ОАВ в образце от величины его одноосного сжатия  $P$  была близка к линейной. При этом направление одноосного сжа-

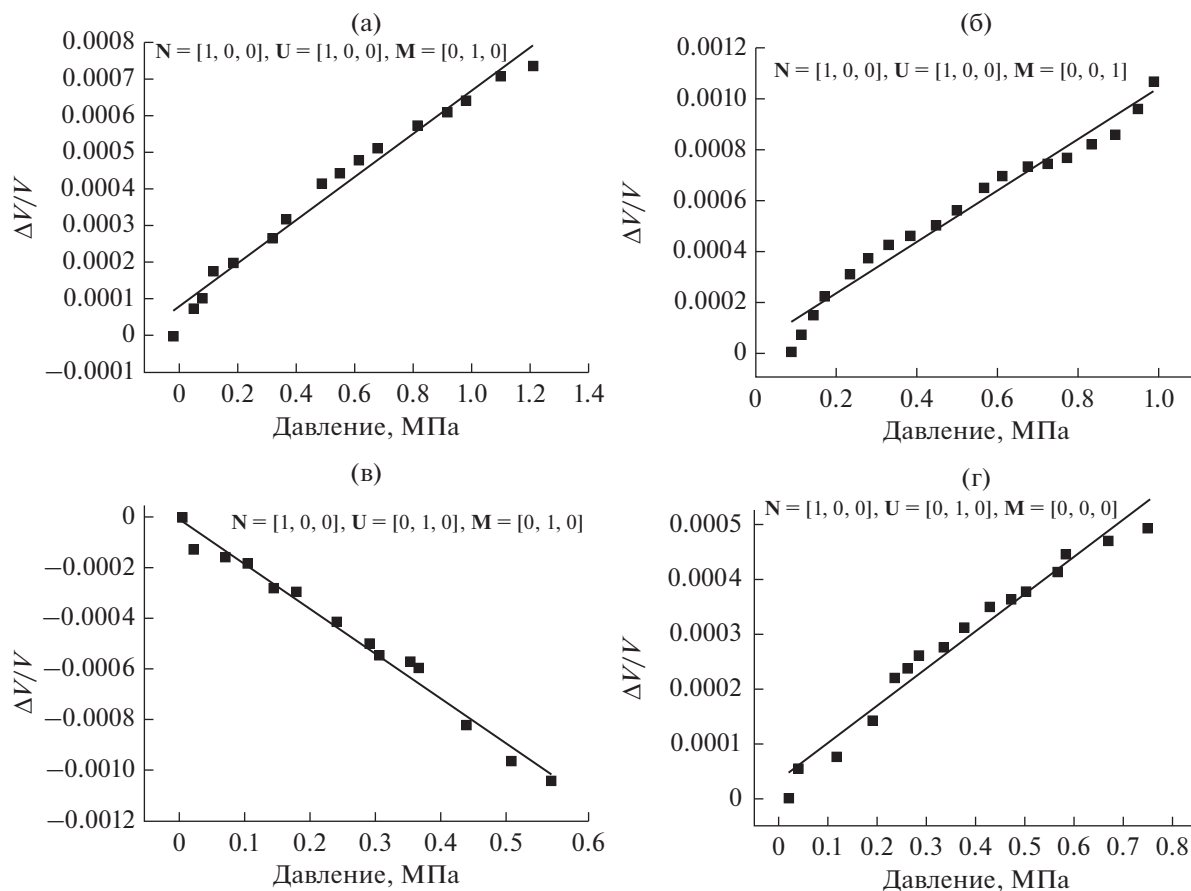


Рис. 2. Зависимости относительного изменения скоростей продольных и сдвиговых ОАВ от величины одноосного сжатия образца  $P$  при различных направлениях единичных векторов  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{M}$ .

тия  $\mathbf{M}$  при всех измерениях было ортогонально направлению распространения ОАВ в образце  $\mathbf{N}$ .

Результаты измерений  $\Delta V/V$  в исследованном образце ВТСП приведены на рис. 2. Экспериментальные зависимости, приведенные на рис. 2, были аппроксимированы методом наименьших квадратов прямыми линиями, тангенс угла наклона которых равен  $\left(\frac{\partial V}{V \partial P}\right)_{P=0}$ . Коэффициент детерминации для каждой из прямых  $R^2$  составил более 0.97, что соответствует высокой точности аппроксимации. Выполненные измерения зависимостей скоростей ОАВ от одноосного сжатия позволили определить в исследуемых образцах

$$\text{величину } \left[\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P}\right]_{P=0} = \left[2\rho_0 V^2 \left(\frac{\partial V}{V \partial P}\right)\right]_{P=0} \text{ для}$$

всех случаев возможной взаимной ориентации векторов  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{U}$ .

На основе экспериментально измеренных ве-

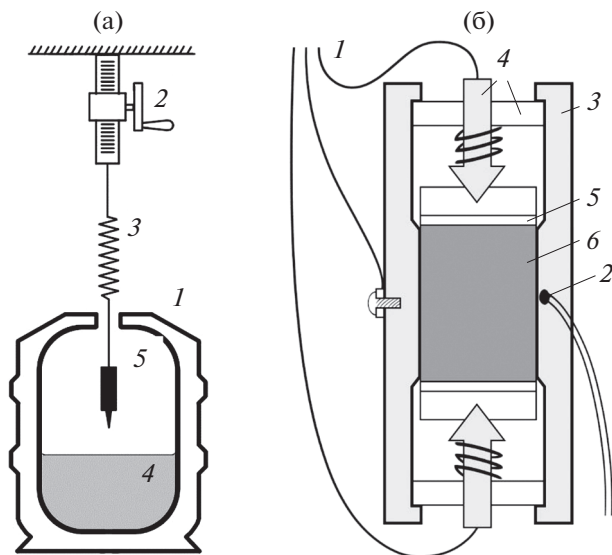
личин  $\left[\frac{\partial(\rho_0 W^2)}{\partial P}\right]_{P=0}$  и соотношения (3) для повы-

шения точности определения трех независимых КУТП в образцах была получена переопределенная система из четырех линейных уравнений. Эта система была решена на компьютере методом наименьших квадратов и определены все три независимые КУТП:  $C_{111}$ ,  $C_{112}$ ,  $C_{123}$ , значения которых представлены в табл. 2.

Для проведения ультразвуковых измерений в образцах ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  в интервале температур 78–300 К комплекс Rites RAM-5000 (рис. 1) был дополнен низкотемпературной

Таблица 2. Коэффициенты упругости третьего порядка ВТСП керамики

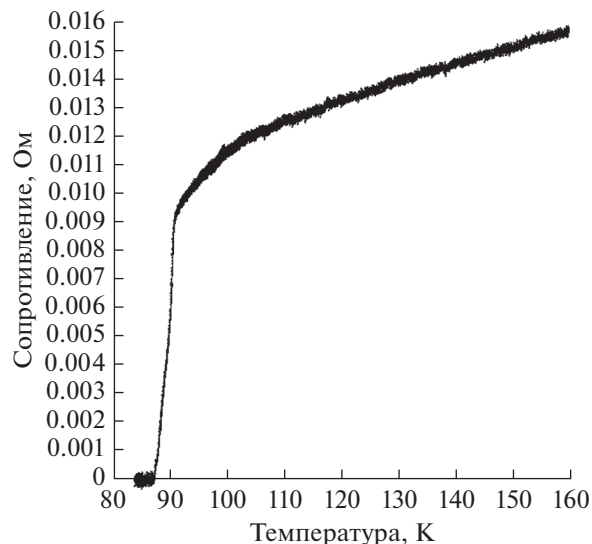
$C_{111}$ , Па	$C_{112}$ , Па	$C_{123}$ , Па
$-7.31 \times 10^{13} \pm 1.93 \times 10^{13}$	$0.058 \times 10^{13} \pm 0.03 \times 10^{13}$	$-0.247 \times 10^{13} \pm 0.09 \times 10^{13}$



**Рис. 3.** (а) – 1 – Сосуд Дьюара, 2 – ручная лебедка с миллиметровой подачей, 3 – упругая виброразвязка, 4 – жидкий азот, 5 – экспериментальная капсула с образцом. (б) – в сосуде Дьюара: 1 – сигнальные провода с общей землей, 2 – термопара, 3 – толстостенная медная оболочка капсулы, 4 – подпружиненный механизм закрепления преобразователей и образца, 5 – пьезоэлектрический преобразователь, 6 – образец.

термостатируемой акустической ячейкой с исследуемым образцом, электрической схемой для измерения сопротивления образца методом четырех точек (на рис. 3 не показана), системой для измерения температуры образца с помощью термопары (рис. 3). В качестве хладагента использовался жидкий азот. Акустическая ячейка помещалась в дьюар с жидким азотом. Ячейка состояла из кристаллодержателя, в который помещался исследуемый образец с термопарой. Температура образца изменялась путем плавного перемещения ячейки в парах азота. Скорость изменения температуры во всем диапазоне не превышала 0.5 К/мин, а в окрестности сверхпроводящего перехода – 0.1 К/мин. К противоположным полированным плоскопараллельным сторонам образца для возбуждения и приема продольных и сдвиговых акустических волн прикреплялись преобразователи из ниобата лития. Акустический контакт осуществлялся с помощью силиконового масла. Кристаллодержатель с образцом помещался в полый герметичный толстостенный цилиндр из бронзы. Бронза обладает высокими коэффициентами теплопроводности и теплоемкости, что позволяло предотвратить неоднородность температуры в исследуемом образце.

Экспериментальная установка была автоматизирована с помощью персонального компьютера (ПК). Разработанный пакет программ обеспечил автоматическую регистрацию измеряемых ком-



**Рис. 4.** Зависимость сопротивления ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  от температуры в области фазового перехода при  $T_c = 91.3$  К.

плексом величин и полный контроль над комплексом с помощью ПК.

Для определения температуры сверхпроводящего перехода из ВТСП керамики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-x)}$  был приготовлен образец размером  $1 \times 1 \times 7$  мм. Сопротивление образца было измерено в интервале температур 78–300 К методом четырех точек при токе через образец  $J = 1$  мА. Определенная в работе температура перехода материала в сверхпроводящее состояние равнялась  $T_c = 91.3 \pm 0.1$  К (ширина перехода порядка 1 К) (рис. 4).

Линейные упругие свойства керамики в интервале 79–300 К исследовались импульсным методом путем измерения скорости продольных и сдвиговых волн. Были измерены температурные зависимости амплитуды первой продольной гармоники, а также температурные зависимости скоростей продольной и сдвиговой ОАВ. На фоне монотонного роста с понижением температуры у скорости как продольных, так и сдвиговых волн обнаружено аномальное поведение при температуре порядка 91 К. Особенно тщательно были проведены измерения температурных зависимостей скоростей ОАВ в области сверхпроводящего перехода.

В случае продольных волн при  $T = T_c = 91.3$  К отмечены аномалии как самой зависимости, так и ее производной по температуре (рис. 5). Для оценки величин наблюдаемых скачков кривая зависимости была кусочно аппроксимирована отрезками прямых с использованием метода наименьших квадратов на участках выше ( $T = 92.5$ –94 К) и ниже ( $T = 88$ –90 К) температуры перехода, после чего обе прямые были экстраполированы до точ-

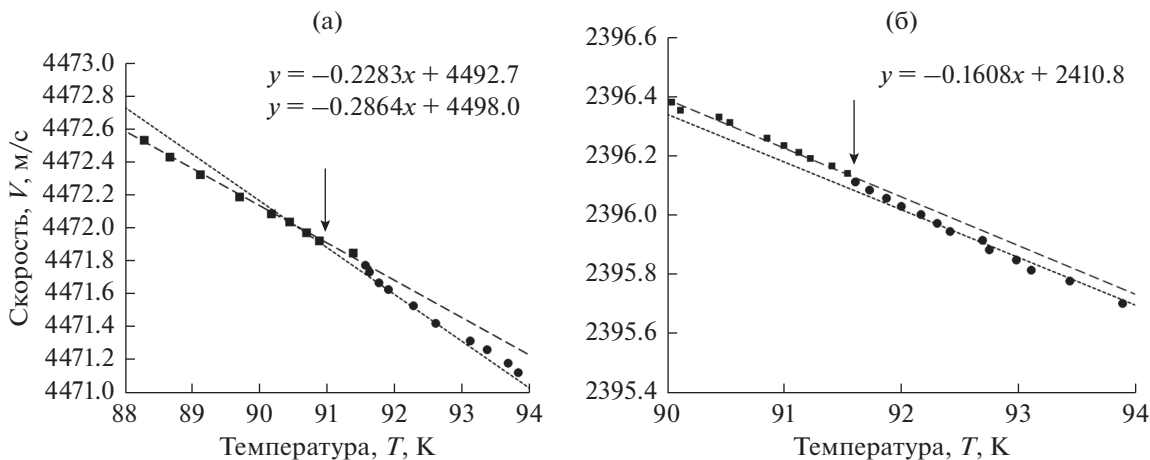


Рис. 5. Зависимость скорости: (а) – продольных ОАВ и (б) – сдвиговых ОАВ от температуры в ВТСП керамике вблизи температуры фазового перехода  $T_c = 91.3$  К.

ки  $T_c$ . Согласно оценкам скачок относительного изменения скорости  $V_L$  продольной волны  $\frac{\Delta V_L}{V_L}(T_c) = 1.5 \times 10^{-4}$  (рис. 5а), при этом изменение производной было равно  $\Delta \left[ \frac{d}{dT} \left( \frac{\Delta V_L}{V_L} \right) \right] = 1.3 \times 10^{-4} \text{ 1/К}$ . Для зависимости скорости сдвиговой волны от температуры  $\frac{\Delta V_T}{V_T}(T_c)$ , аппроксимированной аналогично  $\frac{\Delta V_L}{V_L}(T_c)$ , в пределах ошибки измерений скачка величины  $\frac{\Delta V_T}{V_T}$  не наблюдалось, величина же скачка производной при  $T = T_c$  составила (рис. 5б)  $\Delta \left[ \frac{d}{dT} \left( \frac{\Delta V_T}{V_T} \right) \right] = 1.02 \times 10^{-4} \text{ 1/К}$ .

Нелинейные свойства ВТСП керамики в области фазового перехода исследовались спектральным методом по эффективности генерации второй продольной упругой гармоники. В спектре гармонической продольной ОАВ конечной амплитуды, распространяющейся в твердом теле, кроме волны основной частоты  $A_f = A_1 \sin(2\pi ft - kl)$  наблюдается вторая гармоника ОАВ  $A_{2f} = A_2 \sin[2(\omega t - kl)]$ :

$$A = A_1 \sin(\omega t - kl) + A_2 \sin[2(\omega t - kl)]. \quad (4)$$

Зависимость амплитуды второй гармоники  $A_2$  от амплитуды продольной ОАВ первой гармоники  $A_1$  в (4) определяется уравнением [16]:

$$A_2 = \frac{1}{8} (N k_f^2 L) A_1^2, \quad (5)$$

где  $k_f = 2\pi f / V_L$  – волновое число,  $f$  – частота первой упругой гармоники,  $L$  – длина области взаи-

модействия,  $N = (3C_{11} + C_{111}) / C_{11}$  – нелинейный акустический параметр для продольной ОАВ в изотропном твердом теле,  $C_{11}$  и  $C_{111}$  – коэффициенты упругости второго и третьего порядков соответственно. Экспериментальные исследования температурных зависимостей амплитуды второй гармоники  $A_2(T)$  от амплитуды первой гармоники  $A_1(T)$  продольной ОАВ позволяют определить температурную зависимость нелинейного параметра  $N(T)$ .

Из уравнения (5) следует:

$$N(T) = \frac{8A_2(T)}{(k_f^2 L) A_1^2(T)}. \quad (6)$$

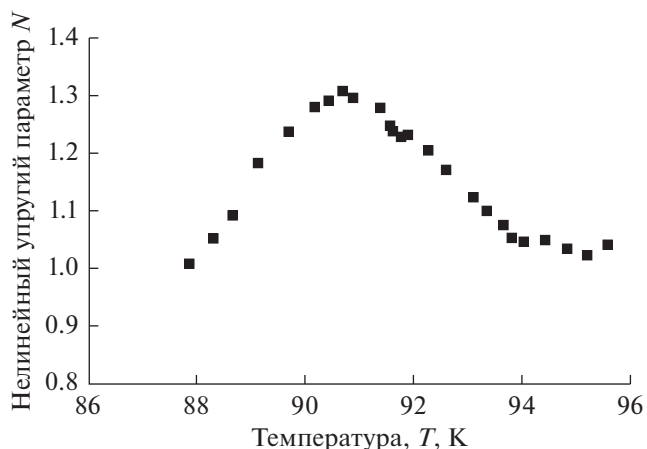


Рис. 6. Температурная зависимость нормированного нелинейного упругого параметра второго порядка  $N(T)$  для продольных упругих волн от температуры в ВТСП керамике вблизи температуры фазового перехода при  $T_c = 91.3$  К.

На рис. 6 представлена температурная зависимость упругого нелинейного параметра второго порядка  $N(T)$  в области сверхпроводящего перехода при  $T = 91.3$  К, нормированного на его значение при температуре 88 К.

Как следует из рис. 6, в окрестности температуры  $T = 91.3$  К, соответствующей сверхпроводящему фазовому переходу, было обнаружено локальное увеличение продольного нелинейного акустического параметра: его величина увеличилась примерно в 1.3 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ВТСП керамике  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  при температуре 293 К в приближении изотропного материала измерены все независимые компоненты тензоров упругости второго и третьего порядков. В диапазоне температур 87–300 К измерена зависимость сопротивления образца от его температуры. При  $T = 91.3$  К обнаружен переход исследуемого образца в сверхпроводящее состояние.

В области температур вблизи перехода ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  в высокотемпературное состояние при  $T \sim 91.3$  К в исследованном образце было обнаружено аномальное поведение линейных и нелинейных упругих характеристик, которое связывается с его переходом в сверхпроводящее состояние.

В окрестности температуры фазового перехода шириной порядка 10 К впервые обнаружено локальное увеличение продольного нелинейного акустического параметра  $N$ , характеризующего ангармонизм межатомного взаимодействия в ВТСП керамике  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$ .

Проведенные экспериментальные исследования упругих свойств  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  в области сверхпроводящего перехода при  $T = 91.3$  К показывают, что его переход в сверхпроводящее состояние оказывает существенное влияние на линейные и нелинейные упругие свойства ВТСП керамики  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$ .

Полученные результаты могут быть использованы в физике твердого тела, материаловедении, при создании новых методик неразрушающего контроля конструкционных материалов методами нелинейной акустической диагностики.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят В.С. Круглова за предоставленные образцы.

Исследования упругих характеристик выполнены за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-22-00042).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bednorz J.G., Muller K.A.* Possible high- $T_c$  superconductivity in the Ba–La–Cu–O system // *J. Phys. B. Condens. Matter.* 1986. V. 64. № 2. P. 189–193.
2. *Somayazulu M., Ahart M., Mishra A.K., Geballe Z.M., Baldini M., Meng Y., Struzhkin V.V., Hemley R.J.* Evidence for superconductivity above 260 K in Lanthanum superhydride at megabar pressures // *Phys. Rev. Lett.* 2019. V. 122. № 2. P. 027001–6.
3. *Boeri L., Bachelet G.B.* Viewpoint: the road to room-temperature conventional superconductivity // *J. Phys. B. Condens. Matter.* 2019. V. 31. № 23. P. 234002.
4. *Wu M.K., Ashburn J.R., Torng C.J., Hor P.H., Meng R.L., Gao L., Huang Z.J., Wang Y.Q., Chu C.W.* Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y–Ba–Cu–O compound system at ambient pressure // *Phys. Rev. Lett.* 1987. V. 58. № 9. P. 908–910.
5. *Воронов Б.Б., Коробов А.И.* Термодинамический анализ поведения скорости звука в соединении  $YBaCuO$  вблизи  $T_c$  // *Физ. низких температур.* 1991. Т. 17. № 11–12. С. 1573–1576.
6. *Воронов Б.Б., Коробов А.И., Мошталков В.В.* Экспериментальное исследование линейных и нелинейных упругих свойств керамики  $YBa_2Cu_3O_{(7-x)}$  // *Сверхпроводимость: физика, химия, техника.* 1990. Т. 3. № 12. С. 2733–2744.
7. *Nikiforov V.N., Bulychiev N.A., Rzhetskii V.V.* Elastic properties of HTSC ceramics // *Bull. Lebedev Phys. Inst.* 2016. V. 43. № 2. P. 74–79.
8. *Гаджимагомедов С.Х., Палчаев Д.К., Рабаданов М.Х., Мурлиева Ж.Х., Шабанов Н.С., Палчаев Н.А., Мурлиев Э.К., Эмиров Р.М.* Керамические материалы на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ , полученные из нанопорошков // *Письма в ЖТФ.* 2016. Т. 42. № 1. С. 9–16.
9. *Коробов А.И., Кокшайский А.И., Прохоров В.М., Евдокимов И.А., Перфилов С.А., Волков А.Д.* Механические и нелинейные упругие характеристики поликристаллического алюминиевого сплава  $AMg6$  и нанокompозита  $n-AMg6/C60$  // *ФТТ.* 2016. Т. 58. № 12. С. 2384–2392.
10. *Волков А.Д., Кокшайский А.И., Коробов А.И., Прохоров В.М.* Коэффициенты упругости второго и третьего порядков в поликристаллическом сплаве алюминия марки  $AMg6$  // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 6. С. 685–691.
11. *Коробов А.И., Ширгина Н.В., Кокшайский А.И., Прохоров В.М.* Влияние статической реверсивной нагрузки на механические и упругие свойства поликристаллического сплава алюминия  $AMg6$  // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 4. С. 424–431.
12. *Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б.* Ультразвуковые методы в физике твердого тела. М.: Мир, 1972. 307 с.
13. *Мэзон У.* Физическая акустика. Т. 1. Методы и приборы ультразвуковых исследований. М.: Мир, 1966. 588 с.
14. *Сиротин Ю.И., Шаскольская М.П.* Основы кристаллоакустики. М.: 1975. 680 с.
15. *Brugger K., Thurston R.N.* Third-order elastic constants and the velocity of small amplitude elastic waves in homogeneously stressed media // *Phys. Rev.* 1964. V. 133. № 6A. P. A1604–A1610.
16. *Зарембо Л.К., Красильников В.А.* Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966. 309 с.