

УДК 538.945

В. Ф. ГАНТМАХЕР, В. Т. ДОЛГОПолов, С. С. МУРЗИН,
Р. К. НИКОЛАЕВ, Л. В. ОВЧИННИКОВА, Н. С. СИДОРОВ

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ЗВУКА
В $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ КЕРАМИКЕ**

Показано, что в сверхпроводящих керамических пластинах $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ возможно электромагнитное возбуждение стоячих звуковых волн. Обнаружено, что скорость звука не является однозначной функцией плотности керамики и сильно зависит от процедуры термообработки.

Физические свойства сверхпроводящей керамики сильно зависят от условий ее предварительной термообработки. Поэтому при изучении физических свойств керамики полезно пользоваться такими методами измерений, которые не требуют нанесения на керамику припоя, клея и т. п. Тогда можно многократно чередовать измерения и термообработку.

Сказанное относится и к измерениям скорости звука. В настоящее время имеется немало работ, в которых исследованы акустические свойства сверхпроводящих керамик [1-8]. Основное внимание в этих работах уделено поиску разного рода особенностей на кривых зависимости скорости или затухания звуковых волн от температуры. Характерной чертой этих работ является не очень высокая степень воспроизводимости результатов. Согласно [3-8], например, в керамике $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ скорость продольного звука s возрастает с понижением температуры T , однако количественное изменение и даже качественный ход кривых зависимости $s(T)$ различны у разных исследовательских групп.

Естественно, что для выяснения причин этих различий важно иметь возможность измерять скорость звука на одном образце, но после различных термообработок. Мы использовали для этой цели метод электромагнитного возбуждения стоячих продольных звуковых волн [9, 10]. Образцы из $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ имели вид прямоугольных пластин размерами 5×5 мм и толщиной 1-0,5 мм либо дисков диаметром 10 мм и толщиной ~1 мм. Пластины помещались внутри скрепленных катушек индуктивности с взаимно перпендикулярными осями (рис. 1). Параллельно плоскости пластины по диагонали между осями катушек индуктивности было направлено магнитное поле напряженностью от 0,5 до 5,5 Т. Исследовали зависимость коэффициента взаимной индукции от частоты в диапазоне от 200 кГц до 15 МГц.

Возбуждение звуковых волн с частотой, совпадающей с частотой f переменного тока в возбуждающей катушке индуктивности, происходило за счет силы Лоренца

$$F = \frac{1}{c} [jH], \tag{1}$$

действующей на электроны. Здесь j — скин-ток частоты f , а H — постоянное внешнее магнитное поле. Для эффективного возбуждения звука важно, чтобы толщина слоя δ , в котором действует сила F , была меньше, чем длина волны λ . (Если монокристаллический образец находится в нормальном состоянии, то δ — глубина скин-слоя, а если в сверхпроводящем, то δ — глубина проникновения. В керамике δ зависит и от величины зерна). Поскольку λ порядка толщины образца d , для эффективного возбуждения необходимо выполнение условия

$$\delta \ll d. \tag{2}$$

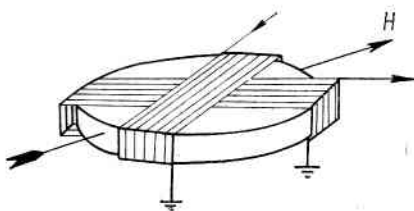


Рис. 1. Расположение катушек и магнитного поля при электромагнитном возбуждении звука.

Магнитное поле H , в которое помещали образец, было достаточно большим:

$$H \gg H_{\text{с}}. \quad (3)$$

Оно проникало в образец в виде системы вихрей, расстояния между которыми меньше их характерных размеров. Это означает, что пространственная модуляция поля H внутри образца очень незначительна, так что H в (1) — это внешнее поле.

Сила F направлена по нормали к поверхности пластины, поэтому возбуждаться может только продольный звук. Смещение поверхности керамики вдоль нормали приводило к возбуждению переменного тока, направленного вдоль поверхности пластины и ориентированного перпендикулярно к магнитному полю. Поскольку направление индуцированного тока не совпадало с направлением тока в возбуждающей катушке индуктивности, взаимодействие с акустическими волнами приводило к ненулевому коэффициенту взаимной индукции у возбуждающей и приемной катушек. Возбуждение стоячих звуковых волн проявлялось в резких изменениях коэффициента взаимной индукции на тех частотах, когда выполнялось условие $f_n = ns/d$ (n — целое число, d — толщина пластины). Антисимметричные с нечетными номерами n .

Измерения на сверхпроводящей керамике проводили при температуре 4,2 К. Пример одной из экспериментальных кривых приведен на рис. 2. Как видно из этого рисунка, имеется не один резонанс, а группа близко расположенных резонансов, являющихся, вероятно, комбинацией резонанса продольных колебаний с изгибными колебаниями пластины. Структура резонансных кривых ограничивала точность абсолютного определения скорости звука. Амплитуда резонансов, как и следовало ожидать, была пропорциональна квадрату напряженности поля H . Тонкая структура записей от величины H не зависела. Это означает, что вихревая решетка, изменяющаяся с полем, к этим резонансам не имеет отношения. На вставке к рис. 2 показана зависимость частоты резонанса от номера n . Как видно из этого рисунка, с нашей точностью дисперсия звуковых волн в мегагерцевом диапазоне частот отсутствует.

Таким образом, ни пористость керамики, ни наличие вихревой решетки не препятствует электромагнитному возбуждению звука в сверхпроводящей керамике. В принципе, возможны измерения и при нормальном состоянии керамики. Однако из-за сравнительно низкой электропроводности скин-глубина

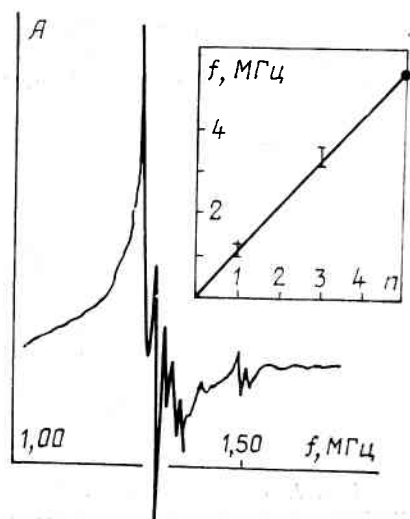


Рис. 2. Амплитуда сигнала в приемной катушке в зависимости от частоты.

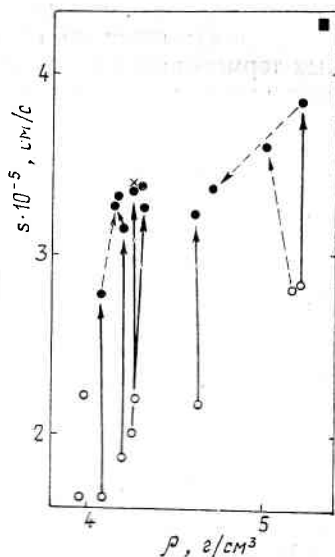


Рис. 3. Скорость звука в зависимости от плотности керамики.

δ велика, и в соответствии с (2) эффективность возбуждения падает. В настоящей работе мы этих измерений касаться не будем.

В качестве иллюстрации возможностей, которые предоставляет бесконтактный метод измерений, приведены результаты измерения скорости звука в зависимости от температуры отжига. На рис. 3 светлые точки соответствуют керамике, отожженной в кислороде при 900°C в течение 8 ч с последующим охлаждением до комнатной температуры в течение суток. Черные точки отвечают той же процедуре термообработки, но с температурой 980°C . Большинство образцов было подвергнуто в начале первой процедуре, а затем — второй. Соответствующие точки соединены стрелками. Сплошная стрелка означает отжиг в течение 8 ч, пунктирная — в течение 48 ч. Результатом термообработки при более высокой температуре явилось увеличение скорости звука примерно в полтора раза при практически неизменной плотности.

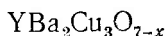
Увеличение скорости звука было необратимым. В контрольном опыте отжигом в вакууме из образца была удалена часть кислорода до состава $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.2}$, и образец потерял сверхпроводимость. При отжиге в кислороде при температуре 900°C сверхпроводимость восстановилась, но скорость звука осталась высокой (крестик на рис. 3). Для сравнения с нашими данными прямоугольником на рис. 3 отмечен результат из работы [6].

Можно было бы предполагать, что необратимые изменения скорости звука при высокотемпературном отжиге связаны с удалением из образца атомов посторонних элементов (например, углерода), а также с увеличением числа механических связей в образце. В любом случае можно ожидать коррелированных изменений скорости звука и сверхпроводящих свойств — в первую очередь, критического тока. Однако производившиеся параллельно измерения кривой сверхпроводящего перехода не показали заметных изменений после повторного отжига при более высокой температуре. (Критическая температура на различных образцах колебалась в пределах от 83 до 93 K, а ширина перехода не превышала 5 K). Измерения критического тока на образцах с разными значениями скорости звука при одной плотности также не обнаружили существенных различий.

На сегодняшний день причина увеличения скорости звука не ясна. Однако видно, что измерения скорости звука являются тонким инструментом, характеризующим состояние керамики.

V. F. GANTMAKHER, V. T. DOLGOPOLOV, S. S. MURZIN,
R. K. NIKOLAEV, L. V. OVCHINNIKOVA, and N. S. SIDOROV

ELECTROMAGNETIC EXCITATION OF SOUND IN CERAMICS



It is shown that electromagnetic excitation of acoustic waves is possible in the superconducting ceramic $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ plates. The sound velocity turned out to be an ambiguous function of the density. It also depends on the thermal treatment.

LIST OF SYMBOLS. H , magnetic field; i , electric current; s , sound velocity; d , thickness of the plate; δ , skin depth in the normal state; λ , penetration depth in the superconducting state.

FIGURE CAPTIONS. Fig. 1. Disposition of coils and direction of magnetic field for electromagnetic excitation of sound.

Fig. 2. Amplitude of signal in the receiving coil vs. frequency.

Fig. 3. Sound velocity as a function of the density of ceramics.

1. *Wide-temperature instability in high- T_c superconductors $\text{La}_{1-x}\text{Ba}_{0.15}\text{CuO}_4$* / K. Fosheim, T. Laegreid, N. Sandvold et al. // *Solid State Commun.* — 1987. — 63, N 6. — P. 531—533.
2. *Температурная зависимость скорости звука в металлокерамике на основе лантана* / В. Г. Барьяхтар, В. М. Пан, В. Ф. Тарасов и др. // ФНТ. — 1987. — 13, № 8. — С. 848—849.
3. *Bulk-modulus anomalies at the superconducting transition of single-phase $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$* / D. J. Bishop, A. P. Ramirez, F. L. Cammel et al. // *Phys. Rev. B.* — 1987. — 34, N 5. — P. 2408—2410.

4. *Ultrasonic anomalies T_c in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$* / A. Migliori, Ting Chen, B. Alavi, G. Gruner // *Solid State Communs.*— 1987.— 63, N 5.— P. 827—830.
5. *Особенности коэффициента поглощения ультразвука в $\text{L}_{185}\text{Sr}_{0,15}\text{CuO}_4$ и $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ сверхпроводящих керамиках* / В. И. Макаров, В. Ф. Ключко, Н. В. Заварицкий, С. В. Петров // *Письма в ЖЭТФ.*— 1987.— 46, вып. 7.— С. 156—157.
6. *Аномалии скорости звука и упругих модулей в окрестности сверхпроводящего перехода керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$* / А. И. Головашкин, В. А. Данилов, О. М. Иваненко и др. // *Письма в ЖЭТФ.*— 1987.— 46, вып. 7.— С. 273—275.
7. *Thermal expansion and velocity of ultrasonic waves in single phase $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$* / М. Н. Yericho, A. M. Simpson, J. M. Trascon et al. // *Solid State Communs.*— 1987.— 65, N 9.— P. 987—990.
8. *Thermal expansion, sound velocities, specific heat and pressure derivative of T_c in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$* / М. Lang, T. Lechner, S. Riegel et al. // *Z. Phys. Cond. Mater.*— 1988.— 69, N 3.— P. 459—463.
9. *Гантмахер В. Ф., Долгополов В. Т. Электромагнитное возбуждение звуковых волн в олове и висмуте* // *ЖЭТФ.*— 1969.— 57, вып. 1.— С. 132—140.
10. *Васильев А. И., Гайдуков Ю. П. Бесконтактное возбуждение звука в металлах* // *УФН.*— 1986.— 150, вып. 1.— С. 161—163.

Ин-т физики твердого тела
АН СССР,
Черноголовка, Московской обл.

Получено 14.10.88