

Поглощение энергии низкочастотного звука в сверхпроводниках на основе висмута

Г. Г. Сергеева

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Украина, 310108, г. Харьков, ул. Академическая, 1

Статья поступила в редакцию 2 марта 1998 г., после переработки 11 мая 1998 г.

Для соединения Bi-2212 с учетом $d_{x^2-y^2}$ -симметрии сверхпроводящего параметра порядка (СПП) и динамического аналога фазового расслоения рассмотрено поглощение энергии низкочастотного звука полосами низкотемпературной тетрагональной фазы. Вклад в плотность энергии взаимодействия деформаций с СПП приводит к конечной величине поглощения в сверхпроводниках с необычным СПП. Проведен анализ частотной и температурной зависимостей поглощения, а также сравнение с экспериментальными результатами. Показано, что эти данные являются косвенными свидетельствами симметрии СПП: для фазы Bi-2212 — это $d_{x^2-y^2}$ -симметрия, для фазы 2223 — s-симметрия. Высказано предположение о существовании упорядоченного низкотемпературного состояния, ответственного за низкочастотный максимум поглощения и другие аномалии свойств висмутовых сверхпроводников в области температур 20–40 К.

Для сполучення Bi-2212 з урахуванням $d_{x^2-y^2}$ -симетрії надпровідного параметра порядку (НПП) і динамічного аналога фазового розшарування вивчено поглинання енергії низькочастотного звука смугами низкотемпературної тетрагональної фази. Внесок в густину енергії взаємодії деформацій з НПП приводить до кінцевої величини поглинання. Проведено аналіз частотної та температурної залежностей поглинання, а також порівняння з експериментальними даними. Показано, що ці дані є непрямим свідченням симетрії НПП — для фази Bi-2212 це $d_{x^2-y^2}$ -симетрія, для фази Bi-2223 — s-симетрія. Висловлено припущення про існування впорядкованого низкотемпературного стану, відповідного за низькочастотний максимум поглинання та інші аномалії властивостей висмутових надпровідників при температурах 20–40 К.

PACS: 74.72.Ns

Введение

Изучению особенностей поглощения энергии звуковых колебаний в ВТСП посвящено много работ [1–6]. Результаты исследований в [3–4] показали, что температурная зависимость коэффициента поглощения $\delta(T)$ в висмутовых сверхпроводниках в основном согласуется с теорией БКШ спаривания носителей заряда. Однако нерешенным остался ряд вопросов, таких как неэкспоненциальная температурная зависимость $\delta(T)$ в сверхпроводящем состоянии, наличие одного или двух максимумов на этой зависимости [3–6], отсутствие существенной частотной зависимости $\delta(\omega)$: изменение частоты от 0,8 Гц [3,4] до нескольких кГц [5,6] приводит к незначительному изменению величины δ (рис. 1). Так, в работе [4] для

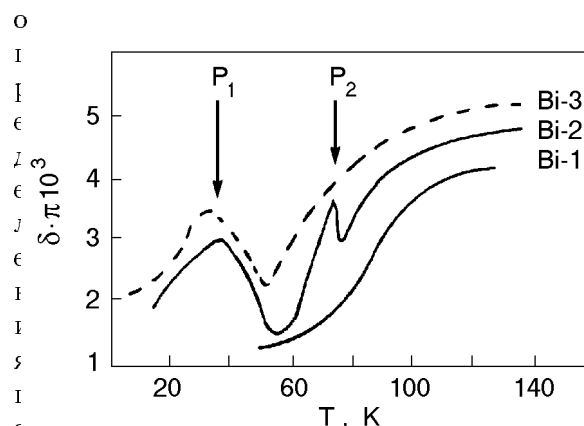


Рис. 1. Температурная зависимость поглощения низкочастотного звука в трех различных висмутовых образцах: Bi-2223 (кривые 1, 3 из работ [6,3]) и 90% Bi-2223–10% Bi-2212 (кривая 2 из работы [4]). Положение низкотемпературного максимума P_1 и максимума P_2 отмечено

ния δ звука с частотой 0,8 Гц отмечалась необходимость учета диффузионного смещения точек закрепления движущейся дислокации и процесса отрыва дислокаций [7].

В настоящее время можно считать надежно установленными две существенные особенности сверхпроводящего состояния Bi-2212. Одна из них — динамический аналог «фазового расслоения» на страйп-фазы в медь-кислородных плоскостях (ab) (полосы низкотемпературной тетрагональной (НТТ) диэлектрической фазы и полосы орторомбической (НТО) проводящей фазы шириной $W = 2a$ и $L = 2,65a$ соответственно, a — удвоенное расстояние между позициями кислорода в этой плоскости). Эти полосы были обнаружены в Bi-2212 при изучении дальней тонкой структуры рентгеновского поглощения (EXAFS) [8]. К согласию относительно другой существенной особенности этого соединения, а именно $d_{x^2-y^2}$ -симметрии сверхпроводящего параметра порядка η , пришли совсем недавно [9]. С учетом этих особенностей сверхпроводящего состояния Bi-2212 в настоящей работе анализируется температурная и частотная зависимости коэффициента поглощения низкочастотного звука и проводится сравнение с полученными в работах [3–6] экспериментальными результатами.

Поглощение звука полосами НТТ фазы

Рассмотрим поглощение низкочастотного звука полосами НТТ фазы в образце Bi-2212. Аналогично тому, как это было сделано в работе [10] для плоских дефектов, эти полосы можно считать подобными упругим мембранам. Длина волны низкочастотного звука намного больше, чем ширина W полосы НТТ фазы, поэтому деформации, к которым приводит звук, можно считать практически однородными для большого числа полос. Коэффициент поглощения звука может быть вычислен из уравнений движения для тензора деформации ϵ и тензора напряжений σ :

$$\frac{\partial^2 \sigma_{ij}}{\partial x_j^2} = \rho \frac{\partial^2 \epsilon_{ij}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \epsilon_{ij}}, \quad (2)$$

где ρ — плотность образца; f — плотность энергии с учетом взаимодействия однородных деформаций со сверхпроводящим параметром порядка η (СПП) [11],

$$f = \frac{1}{2} \sum_{\gamma} B(\gamma) \epsilon^2(\gamma) +$$

$$+ \frac{1}{alW} \sum_{\gamma} \Delta V(\gamma, \eta) \epsilon(\gamma) \int \zeta dS + \frac{\epsilon_0}{2alW} \int (\nabla_{x,y} \xi)^2 dS, \quad (3)$$

где ϵ_0 — энергия образования одной полосы НТТ фазы длиной l , равной длине образца вдоль оси b ; ζ — малые отклонения полосы НТТ фазы в плоскости (ab); $B(\gamma)$ — упругие константы; $\Delta V(\gamma, \eta)$ — разность квадратичных по η форм (со всеми базисными функциями неприводимых представлений γ точечных групп, соответствующих кристаллической симметрии) ближайших сверхпроводящих полос, с параметрами порядка которых взаимодействуют деформации $\epsilon(\gamma)$. Поглощение звука конечно, если $\Delta V(\gamma, \eta) \neq 0$. Для сверхпроводников с s -волновой симметрией СПП эта величина равна нулю [12] и учет взаимодействия однородных деформаций с СПП не приводит к поглощению звука.

Для продольного звука, распространяющегося вдоль оси z ,

$$\sigma = \sigma_{zz}, \quad \epsilon = \epsilon_{zz}.$$

Для затухающего движения с коэффициентом трения Γ , при котором кинетической энергией полосы можно пренебречь, уравнение движения для смещений ζ от положения равновесия имеет вид

$$\Gamma \frac{\partial \zeta(x, y, t)}{\partial t} = - \frac{\partial f}{\partial \zeta}. \quad (4)$$

Дополнив систему (1), (2) уравнением движения (4) и записав решение в виде

$$\sigma(z, t) = \sigma_0 \exp[-\delta(\omega)z + i\omega(t - z/v)], \quad (5)$$

для моды с наименьшей частотой

$$\omega_1 = \frac{\pi^2 \epsilon_0}{\Gamma l W}$$

можно получить

$$\delta(\omega) = \frac{4\omega^2}{\pi^2 a \rho \Gamma v_0^3 (\omega^2 + \omega_1^2)} \sum_{\gamma} |\Delta V(\gamma, \eta)|^2, \quad (6)$$

v_0 — скорость звука.

При оценке температурной зависимости $\delta(T)$ можно предположить, что только параметр порядка $\eta \sim (T - T_c)^{1/2}$ (T_c — температура сверхпроводящего перехода) и поверхностная

энергия ϵ_0 зависят от температуры. Зависимость $\epsilon_0(T)$ можно найти, умножив объемную энергию, пропорциональную $|\eta|^4$, на длину когерентности $\sim |\eta|^{-1}$ [12]:

$$\epsilon_0 \sim |\eta|^3 \sim (T - T_c)^{3/2}.$$

Из уравнения (6) для $\delta(T)$ можно получить такую же зависимость от температуры, как и в работе [12] для поглощения ультразвука доменными стенками в анизотропном сверхпроводнике с многокомпонентным параметром порядка:

$$\delta(T) \sim \frac{\omega^2 \eta^4}{\omega^2 + \hat{\omega}^2 \epsilon_0^2} \sim \frac{\omega^2 |T - T_c|^2}{\omega^2 + \hat{\omega}^2 |T - T_c|^3}. \quad (7)$$

Здесь $\hat{\omega}$ — не зависящий от температуры коэффициент в выражении для ω_1 . Из уравнения (7) следует, что на зависимости $\delta(T)$ в сверхпроводящем состоянии при $T < T_c$ имеется пик, и поглощение с понижением температуры уменьшается как $|T - T_c|^{-1}$. Частотная зависимость $\delta(\omega)$ определяется соотношением между слагаемыми в знаменателе (7): при $\omega \sim \hat{\omega}$ поглощение не зависит от частоты.

Обсуждение экспериментальных результатов

К сожалению, данные о поглощении низкочастотного звука в сверхпроводнике Bi-2212, для которого установлены и зарядовое упорядочение, и $d_{x^2-y^2}$ -симметрия СПП, автору неизвестны. Сравним полученные выше результаты с измерениями коэффициента поглощения низкочастотного звука в сверхпроводниках $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223), чистых (образцы Bi-1 и Bi-3) и содержащих примесь фазы 2212 (образец Bi-2). На рис. 1 приведена зависимость $\delta(T)$ для этих образцов:

Bi-1: $T_c = 104$ К, $\Delta T_c \approx 2,9$ К [6],

Bi-3: $T_c = 106$ К, $\Delta T_c \approx 3$ К [3],

Bi-2: 90% фазы 2223–10% фазы 2212,

$T_c = 106$ К, $\Delta T_c \approx 3,5$ К [4]

(ΔT_c — ширина сверхпроводящего перехода).

При измерениях $\delta(T)$ частота колебаний равна 0,8 Гц для образцов Bi-2 и Bi-3 и 0,81 кГц для Bi-1. Как следует из рис. 1, ход кривой $\delta(T)$ почти не зависит от частоты и способа изготовления образцов: величина поглощения отличается не более чем на 14–20%. Для образцов Bi-3 и Bi-2 при $T \approx 30$ К наблюдается низкотемпературный максимум P_1 , для двухфазного образца Bi-2 ниже температуры перехода фазы 2212 $T_{2c} = 86$ К в области 69–75 К имеется второй

максимум P_2 . В [3,4] высказано предположение о том, что оба максимума связаны с эффектом распаривания при скоростях дислокаций больше критической. При отсутствии данных об измерениях скорости движущихся дислокаций в ВТСП можно предположить, что максимум P_2 связан с рассмотренным выше поглощением звука полосами НТТ фазы в Bi-2212 при $T < T_{2c}$ (7).

Сведения о фазовом расслоении и о необычной симметрии СПП для Bi-2223 нам пока неизвестны. Отсутствие максимума, аналогичного P_2 , вблизи T_c перехода фазы 2223 образцов Bi-1 и Bi-3 согласуется с s -волновой симметрией СПП этой фазы: существование флуктуационных полос НТТ фазы при $T > T_{2c}$ для s -волнового сверхпроводника не приводит к такому эффекту [12]. Выяснение природы низкотемпературного максимума P_1 , высота которого в магнитном поле 950 Э увеличивается на два порядка [13], требует дополнительных исследований. Совпадение низкотемпературных аномалий при механических [3-6], магнитомеханических [13] и магнитных измерениях (обрыв линии плавления вихревой решетки [14], резкий скачок температурной зависимости остаточной намагниченности [15]) висмутовых сверхпроводников не случайно. Можно предположить существование низкотемпературного упорядоченного состояния с $T_{c0} \sim 35$ К и параметром порядка, отличающимся от СПП основной фазы. Это может быть либо сверхпроводящее состояние с другой симметрией СПП, либо антиферромагнитно упорядоченное состояние полос НТТ фазы. Как показано в [12], сосуществование сверхпроводящей фазы и другого упорядоченного состояния приводит к максимуму на кривой $\delta(T)$ при $T < T_{c0}$.

Таким образом, проведенное выше сравнение экспериментальных данных с теоретической зависимостью $\delta(T)$ (7) позволяет сделать вывод о том, что результаты измерения поглощения низкочастотного звука могут быть использованы как косвенные свидетельства симметрии СПП.

1. В. П. Солдатов, В. Д. Нацик, Н. Ф. Чайковская, *ФТТ* **33**, 1777 (1989)
2. В. С. Бойко, В. М. Горбатенко, Л. Ф. Кривенко, М. Б. Лазарева, В. И. Соколенко, П. А. Хаймович, *ФНТ* **15**, 988 (1989).
3. В. G. Lazarev, Ya. D. Starodubov, M. B. Lazareva, G. G. Sergeeva, E. V. Karaseva, V. A. Frolov, L. A. Chirkina, and V. S. Okovit, *Physica C* **235–240**, 1213 (1994); *ФНТ* **20**, 840 (1994).
4. Б. Г. Лазарев, Я. Д. Стародубов, Г. Г. Сергеева, М. Б. Лазарева, Л. А. Чиркина, С. В. Оковит, А. В. Чечкин,

- В. Т. Петренко, М. А. Тихоновский, *ФНТ* **22**, 819 (1996).
5. Y. N. Huang, Y. N. Wang, and Z. X. Zhao, *Phys. Rev.* **B49**, 1320 (1994).
 6. Y. N. Huang, X. Li., Q. M. Zhang, Z. X. Zhao, Y. N. Wang, and P. Esquinazi, *Physica* **C282–287**, 1523 (1997).
 7. Р. А. Варданян, Ю. О. Осипьян, *ЖЭТФ* **94**, 291 (1988).
 8. A. Bianconi and M. Missori, *J. Phys. (Paris)* **4**, 361 (1994).
 9. T. M. Rice, *Physica* **C282–287**, p. I, xix (1997).
 10. R. Truell and C. Elbaum, in: *Handbuch der Physik*, v. XI, S. Flugge (ed.) Springer, Berlin (1962), p. 153.
 11. M. Ozaki, *Progr. Theor. Phys.* **76**, 1008 (1986).
 12. M. Sigrist and K. Ueda, *Rev. Mod. Phys.* **63**, 239 (1991).
 13. G. d'Anna, *Phys. Status Solidi* **A125**, 589 (1991).
 14. B. Khaykovich, E. Zeldov, D. Majer, T. W. Li, P. H. Kes, and M. Konczykowski, *Phys. Rev. Lett.* **76**, 2555 (1996).
 15. C. D. Dewheerst and R. A. Doyle, *Phys. Rev.* **B56**, 10032 (1997).

The attenuation of low frequency acoustic energy in Bi-based superconductors

G. G. Sergeeva

The attenuation of low frequency acoustic energy caused by the stripes of low temperature tetragonal phase in Bi-2212 ceramics is studied taking into account the $d_{x^2-y^2}$ -symmetry of the superconducting order parameter (SOP) and the dynamic analogy with phase separation. The contribution to the energy density of the strain-order parameter coupling leads to the finite value of attenuation in superconductors with nonconventional SOP. The frequency and temperature dependences of attenuation are analysed and compared with experimental results. It is shown that these data are indirect evidence of the SOP symmetry: $d_{x^2-y^2}$ -symmetry for Bi-2212 phase, and s -symmetry for Bi-2223 phase. The existence of an ordered low-temperature state is assumed, which is responsible for the low temperature maximum of attenuation and other anomalies of the properties in Bi-based superconductors in the range 20–40 K.