

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ
АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 537.548

**АНОМАЛЬНОЕ ПОВЕДЕНИЕ СКОРОСТИ И ЗАТУХАНИЯ
УПРУГИХ ВОЛН В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННО-ТОПОЛОГИЧЕСКОГО
ПЕРЕХОДА В ТЕРБИИ**

А. В. Андрианов, А. А. Коробов

(кафедра физики низких температур и сверхпроводимости)

E-mail: akor@acs465a.phys.msu.su

Экспериментально исследованы зависимости скорости и затухания упругих волн в тербии при одноосном растяжении. В области давлений 60 МПа обнаружены аномалии упругих свойств, характерные для электронно-топологического перехода.

Изменение формы поверхности Ферми металлов с помощью легирования или внешних воздействий может приводить к качественному изменению топологии поверхности Ферми. Такие изменения связности поверхности Ферми металлов, предсказанные И. М. Лифшицем, были названы электронно-топологическим переходом (ЭТП), который сопровождается специфическими особенностями кинетических [1], а также акустических свойств металлов [2, 3]. Необходимо отметить, что все проведенные экспериментальные исследования ЭТП были выполнены при низких температурах. Недавно в монокристалле тербия при температуре близкой к комнатной предположительно наблюдался ЭТП [4]. Поэтому экспериментальные исследования влияния ЭТП на акустические свойства тербия представляют интерес.

Тербий обладает гексагональной плотноупакованной кристаллической структурой с параметрами элементарной ячейки $a = 360.4$ пм и $c = 569.8$ пм и имеет акустическую ось C шестого порядка. Акустические измерения проводились на образце тербия Tb (плотность $\rho = 8272$ кг/м³), имеющего форму цилиндра диаметром приблизительно 2.5 мм и длиной 19.5 мм, ось которого параллельна оси C . Продольный звук частоты $f = 10$ МГц и поперечный звук $f = 5$ МГц распространялись вдоль оси цилиндра. Измерения скорости и поглощения звука проводились импульсным методом при комнатной температуре с помощью компьютеризованного ультразвукового измерительного комплекса. Погрешность измерения относительного изменения скорости не превышала 10^{-5} , амплитуды волны — 1%, силы, приложенной к образцу, — 0.1%. Предварительно были проведены измерения скорости продольного $V_{||} = 2780$ м/с и поперечного звука $V_{\perp} = 1610$ м/с, которые позволили определить модули упругости $C_{33} = \rho V_{||}^2 = 64$ ГПа и $C_{44} = \rho V_{\perp}^2 = 21.4$ ГПа. Эти значения находятся в хорошем согласии с результатами, полученными в работах [5, 6]. Затем

были проведены измерения изменения скорости и поглощения звука в зависимости от статического растягивающего напряжения. Напряжение прикладывалось вдоль гексагональной оси C и изменялось от 0 до 80 МПа. Растяжение образца проводилось в специально сконструированной измерительной ячейке с помощью гидравлического пресса. Остаточные деформации после снятия растягивающего напряжения контролировались микрометром и в пределах точности измерения (0.05%) не обнаружены. Это указывает на то, что возникающие в образце деформации при статической нагрузке были упругими.

Зависимости относительного изменения скорости и поглощения продольного и поперечного звука

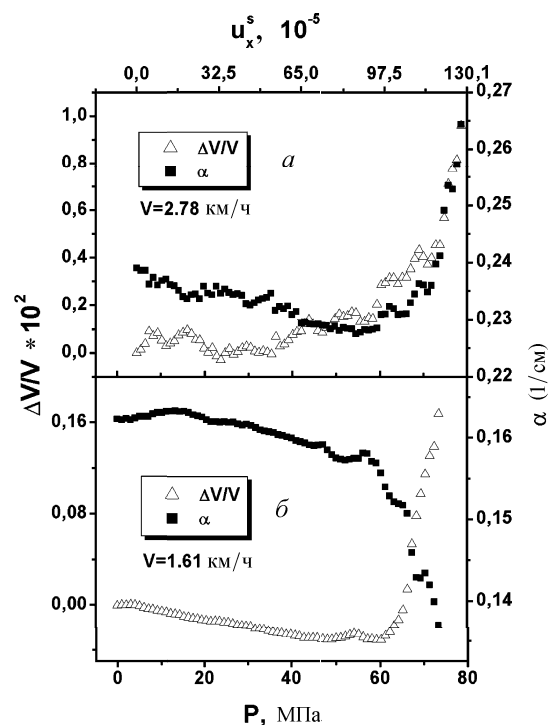


Рис. 1. Зависимость относительного изменения скорости и поглощения продольного (а) и поперечного (б) звука в кристалле тербия от одноосного растяжения (деформации)

в тербии от одноосного статического напряжения приведены на рис. 1. При напряжениях до 60 МПа наблюдается плавное практически линейное уменьшение скорости поперечного и увеличение скорости продольного звука. При дальнейшем увеличении напряжения выше 60 МПа происходит резкое увеличение скорости как продольного, так и поперечного звука. Одновременно с изменением скорости наблюдалось резкое изменение поглощения: увеличение приблизительно на 10% для продольного звука и уменьшение приблизительно на 20% для поперечного звука.

Такое поведение упругих свойств тербия можно объяснить следующим образом. При одноосном растяжении монокристалла тербия вдоль оси C изменяется соотношение c/a параметров решетки без изменения ее симметрии. Это приводит к разрыву перемишки в точке L поверхности Ферми, т. е. происходит ЭТП (рис. 2). Как было показано в работе [1], вблизи ЭТП термодинамические потенциалы, описывающие состояние электронного газа, а соответственно и всего металла, получают сингулярные добавки, пропорциональные степени $5/2$ параметра перехода. Выражение для скорости звука вблизи перехода для одномерного случая, следуя работе [2], можно записать в виде

$$\begin{aligned}
 V^* &= \sqrt{\frac{C^*}{\rho}} = \\
 &= \sqrt{\frac{C}{\rho}} \sqrt{1 + \frac{C_N u_x^s}{2C} + \theta(u_x^s - u_x^k) \frac{3\gamma}{2C} (u_x^s - u_x^k)^{1/2}} = \\
 &= V \left[1 + \frac{C_N u_x^s}{2C} + \theta(u_x^s - u_x^k) \frac{3\gamma}{4C} (u_x^s - u_x^k)^{1/2} \right], \quad (1)
 \end{aligned}$$

где V^* , C^* — эффективные значения скорости звука и модуля упругости; C , C_N — модули упругости 2-го и 3-го порядков; $\theta(z)$ — функция Хевисайда ($\theta(z) = 1$ при $z > 0$ и $\theta(z) = 0$ при $z \leq 0$), u_x^s —

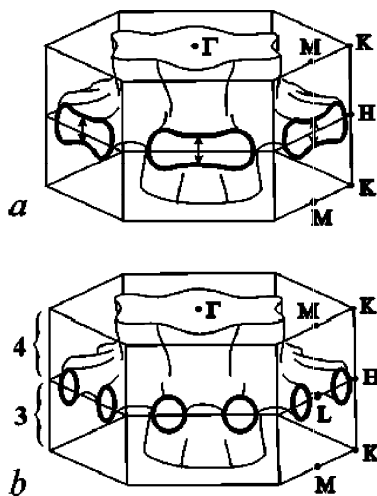


Рис. 2. Топология ПФ в редкоземельных металлах до (а) и после (б) ЭТП

компонента тензора статической деформации; u_x^k — критическая деформация, при которой происходит ЭТП; γ — параметр перехода. Оценки показывают, что для модулей упругости выполняется следующее равенство: $C_N \geq C \approx \gamma = B\Lambda^{5/2}$ (Λ — свертка компонент тензора деформационного потенциала, определяемая поляризацией и направлением распространения акустической волны).

Анализ экспериментальных результатов и проведенные численные оценки свидетельствуют о том, что аномальное поведение скорости звука при давлениях свыше 60 МПа, обнаруженное нами в тербии, хорошо описывается выражением (1) и связано с ЭТП. На то, что аномальное поведение скорости звука связано с ЭТП, также указывает и зависимость поглощения звука при этих давлениях (рис. 1). Скачок поглощения продольного и поперечного звука в области критических деформаций находится в качественном согласии с результатами статьи [7], где было показано, что при ЭТП электронный коэффициент поглощения α_e имеет особенность в точке $Z = 0$ и скачок $\Delta\alpha(Z)$ того же порядка величины, что и α_e .

В заключение необходимо сделать следующие замечания. Теоретические расчеты в работах [1, 2, 7] проведены для случая, когда металл, в котором происходит ЭТП, находится при температуре $T = 0$ К. Наши эксперименты выполнены при $T \approx 300$ К. В статье [2] сделаны оценки влияния теплового размытия $\Delta E_F = kT$ (k — постоянная Больцмана) уровня Ферми E_F на ЭТП. Из этих оценок следует, что в случае, когда величина $\Delta E_F \ll E_F$, тепловое размытие оказывает несущественное влияние на акустические явления при ЭТП. При температуре $T = 300$ К $\Delta E_F \approx 0.03$ эВ. Из экспериментальных данных, приведенных в работе [8], следует, что в тербии $E_F \approx 12$ эВ, т. е. в наших экспериментах выполнялось условие $\Delta E_F \ll E_F$ и величины, полученные в работах [1, 2, 7], применимы для анализа экспериментальных результатов, полученных в нашей работе.

Авторы признательны В. В. Ржевскому за ценные замечания и рекомендации, высказанные им при обсуждении экспериментальных результатов.

Работа выполнена в Центре коллективного пользования по нелинейной акустической диагностике и неразрушающему контролю физического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова при поддержке грантов РФФИ № 00-15-96530, № 02-02-16186, № 02-02-17273.

Литература

1. Лифшиц И. М. // ЖЭТФ. 1960. **38**. С. 1569.
2. Лифшиц И. М., Ржевский В. В., Трибельский М. И. // ЖЭТФ. 1981. **81**. С. 1529.
3. Буга С. Г., Воронов Б. Б., Зарембо Л. К., Коробов А. И. // ФТТ. 1985. **27**, № 8. С. 2291.

4. *Andrianov A.V., Kosarev D.I.* // Phys. Rev. B. 2000. **62**. P. 13844.
 5. *Salama K., Brotzen F.R., Donoho P.L.* // J. Appl. Phys. 1972. **43**. P. 3254.
 6. *Palmer S.B., Lee E.W., Islam M.N.* // Proc. Roy. Soc. A. 1972. **338**. P. 429.

7. *Давыдов В.Н., Каганов М.И.* // ЖЭТФ. 1974. **67**, № 4. С. 1491.
 8. *Lang J.K., Baer Y., Cox P.A.* // J. Phys. F: Metal Phys. 1981. **11**. P. 121.

Поступила в редакцию
20.12.02

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

УДК 537.548

ДИНАМИЧЕСКИЕ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

А. И. Коробов, Ю. А. Бражкин, Ван Нин

(кафедра акустики)

E-mail: akor@att.phys.msu.su

Приводится методика возбуждения упругих импульсов сжатия большой амплитуды и результаты экспериментального исследования особенностей их распространения в медной проволоке. Обнаружена зависимость скорости распространения импульса и эффективного модуля Юнга в проволоке от амплитуды импульса.

В последнее время представляется актуальным исследование особенностей распространения акустических волн в структурно неоднородных материалах. Примером таких материалов являются поликристаллические металлы, состоящие из большого количества произвольно ориентированных монокристаллов (зерен). Акустические свойства таких материалов в области пластических деформаций исследованы недостаточно [1–3]. Представляется актуальным проведение экспериментальных исследований распространения таких упругих возмущений в поликристаллических металлах, которые могут создать пластические деформации в исследуемом материале. Удобным материалом для таких исследований являются тонкие металлические проволоки, в которых вследствие малой площади поперечного сечения проще достигать пластических деформаций.

Уравнение движения при конечных деформациях можно записать в виде [4]:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma^*}{\partial x}, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала, u — смещение, $\sigma^* = \sigma^*(\varepsilon)$ — механическое напряжение. Учитывая, что σ^* является функцией деформации $\varepsilon = \partial u / \partial x$, перепишем уравнение (1) в виде

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma^*}{d\varepsilon} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{E^*}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где $c = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{d\sigma^*}{d\varepsilon}}$ — скорость распространения акустической волны, а $E^* = \frac{d\sigma^*}{d\varepsilon} = \rho c^2$ — модуль Юнга. Из экспериментальной зависимости механического напряжения σ от деформации ε для медной проволоки

(рис. 1) видно, что уже при $\varepsilon \gg 10^{-4}$ эта зависимость становится нелинейной, эффективный модуль E^* зависит от величины деформации и следует ожидать зависимости скорости импульса от его амплитуды.

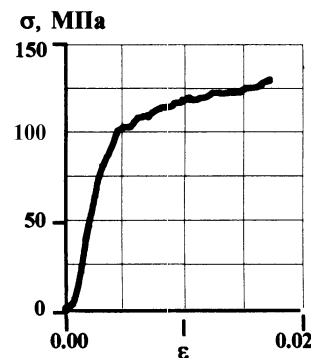


Рис. 1 Зависимость механического напряжения от деформации $\sigma = \sigma(\varepsilon)$

На образцах медной электротехнической проволоки ПЭВ-1 длиной $l = 1.28$ м и диаметром 0.75 мм были проведены экспериментальные исследования зависимости скорости распространения акустического импульса сжатия от величины деформации в нем. Для проведения измерений была создана экспериментальная установка (рис. 2). Импульс сжатия возникал при соударении стального шарика 1, подвешенного на нити длиной 1 м, со стальной полусферой 2 (контакт Герца). Далее импульс через концентратор 3 поступает в проволоку 5. Излучаемый в проволоку импульс контролировался с помощью пьезопреобразователя 4, а прошедший через образец импульс принимался пьезопреобразователем 6. Сигналы с преобразователей регистрировались с помощью двухканального цифрового осциллографа 7.