

к бочкообразной форме канала при длительных экспозициях. Такая форма канала наблюдалась ранее [5].

Некоторые предварительные экспериментальные данные приведены на рис. 3. Эксперименты проводились с использованием непрерывного CO<sub>2</sub>-лазера с гауссовым распределением интенсивности в луче в диапазоне мощности 300–800 Вт. Наблюдается хорошее согласие данных эксперимента с расчетами.

#### Литература

1. Рыкалин Н. Н., Углов А. А., Зуев И. В., Кокора А. Н. Ла-

зерная и электронно-лучевая обработка материалов. М., 1985.

2. Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М., 1985.
3. Niziev V. G. // Laser Physics. 1993. 3, № 3. P. 629.
4. Черепанов Г. П., Черепанов А. Г. // Физика и химия обработки материалов. 1990. № 2. С. 133.
5. Гладуш Г. Г., Левченко Е. Б., Низьев В. Г., Сейдгазов Р. Д. // Квант. электроника. 1984. 11, № 11. С. 2294.

Поступила в редакцию  
19.03.97

## АКУСТИКА И МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

УДК 534.222

### ПОГЛОЩЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ ВОЛН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ТИТАНЕ В ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР 120–220 К

А. И. Коробов, А. Н. Экономов

(кафедра акустики)

Проведены измерения коэффициента поглощения продольных звуковых волн в поликристаллическом титане в области температур 120–220 К. Обнаружены особенности типа пика Бордони, связанные с рассеянием энергии на точечных дефектах. Рассчитан ряд величин, характеризующих данный механизм поглощения.

Исследование температурных зависимостей акустических свойств титана представляет интерес в связи с тем, что в районе 167 К в данном металле существует электронно-топологический переход (ЭТП) [1]. В работе [2] приведены результаты экспериментального исследования зависимости коэффициента теплового расширения монокристалла титана от температуры. При 167 К обнаружена особенность (смена знака) коэффициента теплового расширения в направлении гексагональной оси, связанная с ЭТП.

Температурная зависимость коэффициента поглощения при ЭТП также должна иметь особенность, а именно испытывать скачок на величину, равную коэффициенту электронного поглощения, однако наряду с электронным существует поглощение, связанное с взаимодействием акустической волны с точечными дефектами. Были проведены экспериментальные исследования коэффициента поглощения продольных акустических волн частоты 5 МГц в поликристалле титана при температурах 120–220 К. В данном диапазоне температур действительно имеется особенность. После проведения контрольных измерений на стали и других металлах, в указанном диапазоне температур не имеющих ЭТП, а также на отожженном титане было установлено, что данная особенность коэффициента поглощения в основном связана с взаимодействием акустической волны с точечными дефектами.

Впервые пик на кривой зависимости коэффициента поглощения акустической волны от температуры в металле был обнаружен Бордони [3] и назван его именем. Наличие пика связывается с релаксацией концентрации

точечных дефектов. В случае простого релаксационного процесса зависимость времени релаксации  $\tau$  от температуры  $T$  записывается в виде уравнения Аррениуса:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{W}{kT}\right), \quad (1)$$

где  $W$  — энергия активации точечного дефекта,  $k$  — постоянная Больцмана и  $\tau_0$  — некоторая константа (не зависящая от температуры). Если измерения проводятся на частоте звуковой волны  $f$ , то внутреннее трение, обусловленное данным релаксационным процессом, является функцией произведения  $\omega\tau$  (где  $\omega = 2\pi f$ ) и имеет максимальное значение при  $\omega\tau = 1$ . Таким образом, температура  $T_m$ , при которой наблюдается максимум внутреннего трения, связана с частотой колебаний следующим соотношением:

$$f_m = \frac{1}{2\pi\tau_0} \exp\left(-\frac{W}{kT_m}\right), \quad (2)$$

а коэффициент поглощения на частоте  $\omega$

$$\alpha = 2\alpha_m \frac{\omega/\omega_m}{1 + (\omega/\omega_m)^2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_m$  соответствует максимальному значению коэффициента поглощения,  $\omega_m = \omega_0 \exp(-W/kT)$ . В работах [4] и [5] указано следующее условие максимума на температурной зависимости коэффициента поглощения:

$$\omega^2 \tau^2 = \frac{\varphi_1 + kT}{\varphi_0 - kT}, \quad (4)$$

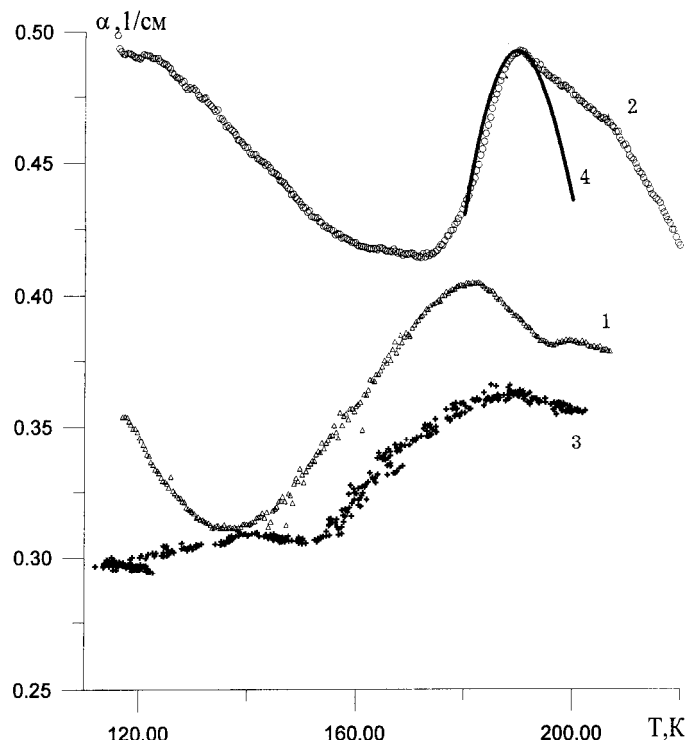
где  $T$  — температура, при которой наблюдается пик,  $\varphi_0$  и  $\varphi_1$  — флуктуации энергии, достаточные для перевода атома из узла в междоузлия и из междоузлия в вакантный узел решетки соответственно.

Экспериментальный образец представлял собой цилиндр, вырезанный из поликристалла титана, высотой 15 и диаметром основания 9 мм. На противоположные грани с помощью силиконового масла ГКЖ-94 наклеивались пьезокерамические электроакустические преобразователи. Для измерения амплитуды звуковой волны применялась автоматизированная установка, подробно описанная в работах [6] и [7]. Коэффициент поглощения акустических волн вычислялся по формуле  $\alpha = (1/b) \ln(A_N/A_{N+1})$ ,  $b$  — пройденный звуковой волной путь (удвоенная длина образца),  $A_N$  и  $A_{N+1}$  — амплитуды двух последовательных импульсов акустической серии ( $A_N > A_{N+1}$ ).

На рисунке приведена экспериментальная зависимость от температуры коэффициента поглощения  $\alpha$  продольной акустической волны частоты 5 МГц в поликристаллическом титане (кривая 1). В интервале температур 120–130 К коэффициент поглощения падает, затем при 130–180 К монотонно возрастает и достигает максимума в районе 180 К, после чего спадает. Там же приведена аналогичная зависимость для волны частоты 8 МГц (кривая 2): в интервале температур 120–160 К коэффициент поглощения падает, затем при 160–190 К монотонно возрастает и достигает максимума в районе 191 К, после чего монотонно спадает. Таким образом, при возрастании частоты до 5 МГц пик сдвинулся в область более высоких температур и высота его увеличилась, что находится в полном соответствии с теорией пиков Бордони [3]. После этого образец титана отжигался в течение  $\sim 6$  ч при температуре  $\cong 600$  К  $> \theta_D = 410$  К. На рисунке приведена экспериментальная зависимость от температуры коэффициента поглощения  $\alpha$  продольной акустической волны частоты 5 МГц в поликристаллическом титане после отжига образца при температуре выше температуры Дебая (кривая 3). Характер кривой такой же, как и до отжига, однако абсолютное значение коэффициента поглощения меньше.

Из полученных экспериментальных данных (температура пиков Бордони  $m = 190,1$  К для частоты 8 МГц и  $m = 181,4$  К для частоты 5 МГц в поликристаллическом титане) с использованием соотношений (2)–(4) были рассчитаны энергия активации точечного дефекта для данного образца ( $W = 0,16$  эВ), флуктуация энергии  $\varphi_0$  ( $\varphi_0 = 0,34$  эВ), флуктуация энергии  $\varphi_1$  ( $\varphi_1 = 0,18$  эВ), время релаксации концентрации то-

чных дефектов  $\tau \approx 2 \cdot 10^{-7}$  с, а также теоретическая температурная зависимость коэффициента поглощения продольной акустической волны частоты 8 МГц в районе максимума (рисунок, кривая 4). Некоторое различие между экспериментальной и теоретической кривыми объясняется, по-видимому, тем, что расчеты были сделаны в предположении, что энергия активации точечного дефекта и время релаксации концентрации точечных дефектов постоянны для всего образца.



Температурные зависимости коэффициентов поглощения акустической волны в титане частоты 5 МГц до отжига (1), частоты 8 МГц (2) и 5 МГц после отжига (3), теоретическая (4)

#### Литература

1. Лифшиц И. М. // ЖЭТФ. 1960. 38, № 5. С. 1569.
2. Нижанковский В. И., Кацнельсон М. И., Песчанских Г. В., Трефилов А. В. // Письма в ЖЭТФ. 1994. 59, № 10. С. 693.
3. Мэзон У. Физическая акустика. Т. III. М., 1974.
4. Гитис М. Б. // ЖЭТФ. 1974. 67, № 1(7). С. 363.
5. Васильев А. Н., Гайдуков Ю. П., Попова Е. А., Георгиус Р. Ш. // Физ. низ. температур. 1990. 16, № 9. С. 1148.
6. Коробов А. И., Асаинов А. Ф., Воронов Б. Б., Кокицкий И. Н. // Измер. техника. 1995. № 9. С. 60.
7. Коробов А. И. // Приб. и техн. эксперимента. 1995. № 3. С. 212.

Поступила в редакцию  
21.02.97