

## ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЗАТУХАНИЯ УЛЬТРАЗВУКА В ИНДИИ

*А.Н.Васильев, Ю.П.Гайдуков, Е.А.Попова, В.Ю.Федотов*

Бесконтактным методом исследованы температурные зависимости затухания поперечного ультразвука в индии. Вблизи температуры Дебая затухание имеет четко выраженный минимум, в высокотемпературной области затухание слабо уменьшается с ростом температуры.

Проведение настоящей работы стимулировалось противоречием в существующих моделях затухания ультразвука в металлах. Классический анализ распространения ультразвуковых волн <sup>1</sup> показывает, что затухание  $\Gamma$ , определяемое суммарным действием теплопроводностного и вязкостного механизмов, обратно пропорционально пятой степени температуры при

$T \ll T_D$  ( $T_D$  — температура Дебая) и пропорционально температуре при  $T \gg T_D$ . Этот результат был получен для произвольного направления распространения ультразвука в металле. В монокристаллах металлов при распространении ультразвука вдоль акустических осей происходит разделение колебаний на продольные и поперечные волны. Расчет температурных зависимостей затухания ультразвука, распространяющегося вдоль направления высокой симметрии <sup>2</sup>, показывает, что полученные в <sup>1</sup> асимптотики  $\Gamma(T)$  остаются справедливыми во всем интервале температур только для продольного ультразвука. Тогда как выключение теплопроводностного механизма при распространении поперечного ультразвука приводит к независимости затухания от температуры в области  $T \gg T_D$ . Расчет затухания в области  $T \sim T_D$  в <sup>1, 2</sup> не проводился, однако, по существующим моделям низкотемпературные и высокотемпературные асимптотики должны "сшиваться" вблизи  $T_D$ .

Затухание поперечного ультразвука в индии в окрестности  $T_D$  и в высокотемпературной области изучалось в настоящей работе бесконтактным методом. Необходимость такой постановки эксперимента обусловлена тем, что основную трудность при проведении прецизионных измерений температурного хода затухания в чистых металлах традиционными методами представляет создание надежного акустического контакта между преобразователем и образцом. Во-первых, создание такого контакта неизбежно приводит к деформации поверхностного слоя металла, что сказывается на результатах измерений. Во-вторых, с изменением температуры в широком интервале свойства самого акустического контакта изменяются, что зачастую приводит к невоспроизводимости результатов эксперимента.

Для проведения измерений в широком интервале температур необходимо было выбрать металл с относительно низкой температурой Дебая и высокой температурой плавления. Эти температуры, однако, коррелируют между собой, что не позволяет, строго говоря, проводить измерения на монокристаллах при  $T \gg T_D$ . Одним из наиболее выгодных объектов для проведения подобных исследований является индий. Его температура Дебая — 129 К <sup>3</sup>, температура плавления — 430 К. Измерения проводились на монокристалле индия высокой чистоты, имевшем форму диска диаметром 2 см и толщиной 0,2 см. Направление распространения ультразвука  $q_1$  совпадало с нормалью к плоскости диска, которая была отклонена от оси симметрии четвертого порядка [001] на  $3,5^\circ$ . Сущность бесконтактного метода генерации ультразвука в металлах описана в <sup>4</sup>. В эксперименте регистрировались резонансные особенности поверхностного импеданса пластины при установлении стоячих ультразвуковых волн на ее толщине.

Согласно теории электромагнитного возбуждения ультразвука, добавки к поверхностному импедансу пластины на резонансных частотах  $\omega_n$  могут быть записаны в виде

$$\Delta Z = \frac{2i\omega}{\rho d} \frac{H^2}{c^2} \frac{1 - i\beta}{1 + \beta^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos \pi n}{\omega^2 - \omega_n^2 - i\Gamma\omega S} \quad (1)$$

где  $\omega$  — частота,  $H$  — постоянное магнитное поле,  $\rho$  — плотность,  $d$  — толщина пластины,  $c$  — скорость света. Параметр  $\beta = \omega c^2 / 4\pi\sigma S^2$ , где  $\sigma$  — проводимость металла.  $S$  — скорость ультразвука. Затухание ультразвука  $\Gamma = \Gamma + \Delta\Gamma$  в присутствии  $H$  содержит слагаемое  $\Delta\Gamma$ , величина которого определяется выражением <sup>5</sup>:

$$\Delta\Gamma = \omega \frac{H^2 \beta}{8\pi\rho S^3 (1 + \beta^2)} \quad (2)$$

Видно, что при  $\beta \ll 1$   $\Delta\Gamma$  пропорционально  $\omega^2$  и не зависит от частоты при  $\beta \gg 1$ .

Из (1) следует, что амплитуды акустических резонансов в пластине пропорциональны квадрату постоянного магнитного поля и обратно пропорциональны затуханию ультразвука. Через параметр  $\beta$  амплитуды акустических резонансов зависят также от проводимости металла. В настоящем эксперименте этот фактор учитывался с использованием данных по температурной зависимости проводимости индия <sup>6</sup>.

Измерения температурных зависимостей резонансных особенностей поверхностного импеданса пластины, обусловленных возбуждением поперечного ультразвука, проводились на первых четырех гармониках ( $n = 3, 5, 7, 9$ ) основной частоты  $\omega_1 = \pi S(T)/d$  в интервале 80 – 420 К. Температурные зависимости в поле  $H = 25$  кЭ представлены на рис. 1. Амплитуды всех акустических резонансов проходили через максимум вблизи  $T_D$ , в высокотемпературной области резонансы на частотах  $\omega_3$  и  $\omega_5$  монотонно возрастали, а на частотах  $\omega_7$  и  $\omega_9$  монотонно уменьшались с температурой.

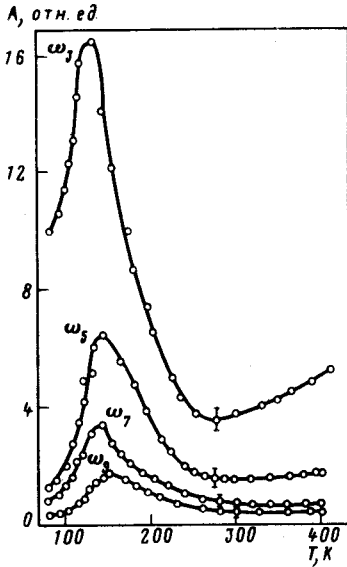


Рис. 1

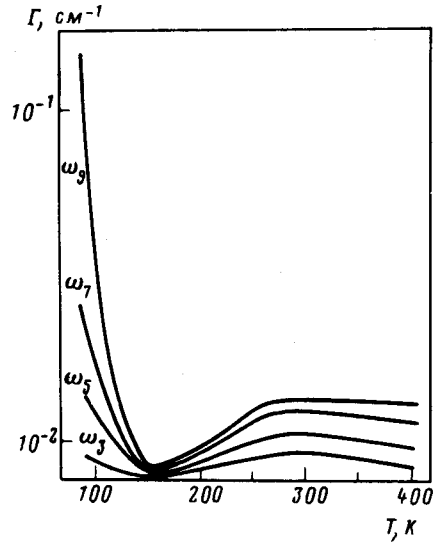


Рис. 2

Рис. 1. Температурные зависимости амплитуд акустических резонансов поперечного ультразвука в пластине индия.  $q_f \parallel [001]$ ,  $H = 25$  кЭ

Рис. 2. Температурные зависимости затухания поперечного ультразвука в индии. При  $T = 300$  К  $\omega_3 = 4,36 \cdot 10^6$  с $^{-1}$ ,  $\omega_5 = 7,27 \cdot 10^6$  с $^{-1}$ ,  $\omega_7 = 1,02 \cdot 10^7$  с $^{-1}$ ,  $\omega_9 = 1,31 \cdot 10^7$  с $^{-1}$

Затухание ультразвука рассчитывалось из измерений амплитуд акустических резонансов с учетом температурного хода  $\beta$ . Из полученных таким образом зависимостей вычиталась полевая добавка.  $\Delta\Gamma$  немонотонно изменяется с температурой, она мала при  $\beta \ll 1$  и  $\beta \gg 1$  и достигает максимума при  $\beta = 1$ . Максимум  $\Delta\Gamma$  достигался в эксперименте только на частотах  $\omega_7$  и  $\omega_9$ . Зависимости  $\Gamma(T)$  представлены на рис. 2. Нормировка значений  $\Gamma$  проводилась независимым образом по полуширинам резонансных линий при  $T = 80$  К.

Затухание приблизительно квадратично возрастает с частотой во всем исследованном интервале температур. С повышением температуры от 80 К до температуры Дебая происходит резкое уменьшение затухания, которое достигает минимума вблизи  $T_D$ . С дальнейшим повышением температуры затухание снова увеличивается, достигает максимума и слабо уменьшается с температурой. Прямое сопоставление с асимптотиками <sup>1,2</sup> затруднительно, поскольку предел  $T \gg T_D$  не достигнут, однако, отсутствие роста затухания поперечного ультразвука в области высоких температур свидетельствует, на наш взгляд, в пользу модели <sup>2</sup>.

В заключение авторы выражают благодарность В.Ф.Гантмахеру за предоставление образца и М.И.Каганову за полезные обсуждения.

#### Литература

1. Ахиезер А.И. ЖЭТФ, 1938, 8, 1330.
2. Трибельский М.И., Ржевский В.В. ЖЭТФ, 1981, 81, 1860.
3. de Launay J. In Solid State Physics, v. 2, eds Seitz F., Turnbull D., Academic Press, New York, 1956.

4. *Васильев А.Н., Гайдуков Ю.П.* УФН, 1983, 141,431.

5. *Ozimek E.J., Leisure R.G., Hsu D.K.* Phys. Rev. B, 1979, 20, 3502.

6. *Powell R.W., Woodman M.J., Tye R.P.* Phil. Mag., 1962, 7, 1183.

**Московский**

**государственный университет**

**им. М.В.Ломоносова**

---

**Поступила в редакцию**

**12 июля 1985 г.**