

УДК 548.4 : 534.8

© 1990

ДИСПЕРСИЯ СКОРОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН В NaCl

А. М. Петченко

Проведено измерение скорости распространения продольных акустических волн в кристаллах NaCl ориентации $\langle 100 \rangle$ в диапазоне частот 7.5—217.5 МГц при комнатной температуре. Опыты проводились на недеформированных и тех же образцах после деформации, изменяющейся в интервале 0.2—1 %. Обнаружено смещение дисперсионных кривых по амплитуде и частоте с ростом деформации и при последующем облучении кристалла рентгеновскими лучами. Установлены зависимости коэффициента демпфирования B и средней эффективной длины дислокационной петли L от плотности дислокаций.

Исследования дисперсии упругих волн в кристаллах, содержащих легкоподвижные дислокации, проводились крайне редко [1], хотя полезность сведений, получаемых в таких опытах, очевидна. В частности, из измеренных частотных спектров для скорости ультразвука можно определить такие важные параметры дислокационной структуры, как плотность дислокаций Δ , длину дислокационного сегмента L , а также найти коэффициент демпфирования дислокаций B , которые могут быть использованы для проверки соответствующих дислокационных теорий. Недавно [2] изучалось влияние деформации ϵ на частотную зависимость дислокационного декремента $\Delta(f)$ и было установлено, что величина ϵ существенно влияет на поведение резонансных кривых $\Delta(f)$, смещая их по амплитуде и частоте. При этом коэффициент вязкости B , определенный из соответствующих высокочастотных асимптот указанных кривых, оказался не зависимым от Δ . Можно надеяться, что аналогичный эффект смещения должен проявиться и на дисперсионных кривых $v(f)$ в силу определенной взаимосвязи акустических характеристик — затухания и скорости звука, что явилось бы дополнительным экспериментальным подтверждением надежности данных [2]. Заметим, что некоторые свидетельства на этот счет уже имеются [1]. Так, проводя опыты на исходных, а затем деформированных кристаллах ($\epsilon=0.06\%$) в области частот 10—100 МГц, авторы [1] обнаружили, что деформация увеличивает дисперсию от 0.5 до 4 % и смещает область дисперсии в сторону более низких частот. Однако данные [1] следует пока считать предварительными. Для более полного изучения явления дисперсии безусловно требуется расширить диапазон используемых частот и деформаций, что и является целью настоящей работы.

Для изучения дисперсии скорости ультразвука использовались монокристаллы NaCl, ориентированные вдоль оси $\langle 100 \rangle$, размер которых $20 \times 20 \times 30$ мм. Технология приготовления, режим отжига и примесный состав приведены в [2, 3]. Опыты проводились импульсным эхо-методом на продольных волнах в диапазоне частот 7.5—217.5 МГц на установке [4]. Кристаллы подвергали деформации сжатием до появления остаточной деформации 0.2—1 % на испытательной машине типа «Инстрон». Скорость перемещения захвата машины $3 \cdot 10^{-8}$ с⁻¹. Точность измерений абсолютных значений скорости в указанном диапазоне частот 0.08—0.15 %. Чтобы исключить временной фактор, связанный со старением образца,

измерения проводились через 20 мин после деформации в соответствии с [5] при комнатной температуре.

На рис. 1 представлены результаты экспериментального исследования частотной зависимости скорости ультразвука для исходного и деформированных кристаллов NaCl. Видно, что ход кривых $v(f)$ для указанных кристаллов существенно отличается. В случае недеформированного образца величина скорости v линейно нарастает с увеличением частоты f . Однако с появлением в кристалле при его деформировании легкоподвижных дислокаций характер в поведении кривых $v(f)$ резко меняется. По мере увеличения деформации образца область дисперсии расширяется и все более смещается в сторону низких частот. При этом наиболее сильными изменениями подвергается низкочастотная ветвь зависимостей $v(f)$ (см. вставку к рис. 1). Видно, что кривая 1 ($f=7.5$ МГц) идет значительно круче кривой 2 ($f=82.5$ МГц). Однако начиная с деформации $\sim 0.7\%$ указанное смещение прекращается и в дальнейшем протекает в противополо-

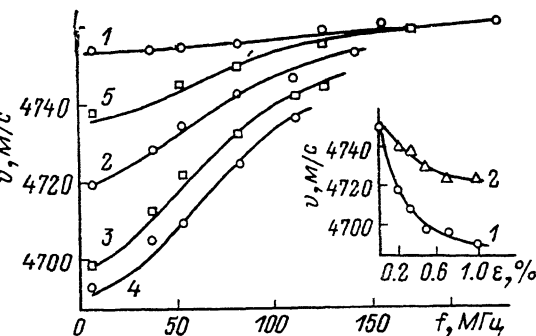


Рис. 1. Зависимость скорости ультразвука от частоты.

1 — недеформированный образец; 2, 3, 4 — с остаточной деформацией 0.2, 0.5, 1 % соответственно; 5 — с остаточной деформацией 0.5 % и облученного рентгеновскими лучами дозой 300 Р.

ложном направлении, что более наглядно можно наблюдать на рис. 3, 1. К сожалению, область деформаций выше 1 %, при которой происходит укорочение дислокационных петель, приводящее к смещению зависимостей $\Delta(f)$ [2], в настоящей работе не исследовалась из-за сильного увеличения затухания в образце, влияющего на точность измерений v . В связи с этим было решено уменьшить величину L [6] путем облучения образца с остаточной деформацией 0.5 % рентгеновскими лучами дозой в 300 Р на установке типа РУП-200. В результате облучения кривая 3 переместилась в более высокочастотную область (рис. 1, 5), а при дозе облучения в 750 Р практически совпала с кривой 1 для недеформированного кристалла (на рисунке не показано).

Для анализа результатов по данным рис. 1 были определены зависимости дефекта модуля от частоты (рис. 2). Сплошные линии — теоретические кривые, взятые из [7]. При этом использовалось соотношение $\Delta C_{11}/C_{11} = 2\Delta v/v_\infty$, где $v_\infty = 4762$ м/с — скорость, измеренная при $f = 217.5$ МГц. Видно, что деформация и облучение существенно влияют на частотное положение и уровень величины $\Delta C_{11}/C_{11}$. Экспериментальные точки (рис. 2) хорошо описываются частотным профилем для изменения модуля, рассчитанного теоретически в случае экспоненциального распределения дислокационных петель по длинам. Согласно [8], выражения для дефекта модуля, экстраполированного на область низких частот $(\Delta C_{11}/C_{11})_0$, и частоты $\omega_m = 2\pi f_m$ максимума имеют вид

$$(\Delta C_{11}/C_{11})_0 = (24\Omega\Delta L^2/\pi^3) (1 - \nu), \quad (1)$$

$$\omega_m = 2\pi Gb^2 \cdot 0.084/BL^2 (1 - \nu), \quad (2)$$

где Ω — ориентационный фактор, G — модуль сдвига в действующей системе скольжения, b — вектор Бюргера, ν — коэффициент Пуассона, Δ — плотность дислокаций, L — длина дислокационного сегмента, B — константа демпфирования. Уравнения (1), (2) при подстановке соответствующих величин позволяют определить параметры B и L . Взяв значения $\Omega = 0.5$, $Gl^2 = 29.01 \cdot 10^{-5}$ дин, $\nu = 0.32$, экспериментальные кривые $\Delta(\epsilon)$, $f_m(\epsilon)$ из [2] и определив $(\Delta C_{11}/C_{11})_0$ из рис. 2, мы нашли функци-

нальные зависимости $B(\Delta)$ и $L(\Delta)$ (рис. 3). Можно отметить, что ход кривых качественно согласуется с полученным нами ранее на этих же кристаллах из частотной зависимости декремента $\Delta(f)$ [2]. Однако если говорить о количественном сравнении, то здесь обнаружено некоторое несогласие. Особенно это касается величины B , которая по абсолютной величине оказалась примерно в три раза ниже значений B из [2]. Анализ результатов показал, что такое различие в оценках B связано с ошибкой, которая допускается при определении экстраполяцией предельных значений $(\Delta C_{11}/C_{11})_0$. Сопоставляя результаты для $(\Delta C_{11}/C_{11})_0$, полученные на образцах NaCl с остаточной деформацией 1 % в настоящей работе, и результаты низкочастотных измерений [9], выявили, что экстраполированные значения $(\Delta C_{11}/C_{11})_0$ приблизительно в три раза выше найденных в [9]. Учет этого устраняет расхождение в значениях B , о котором упоминалось выше.

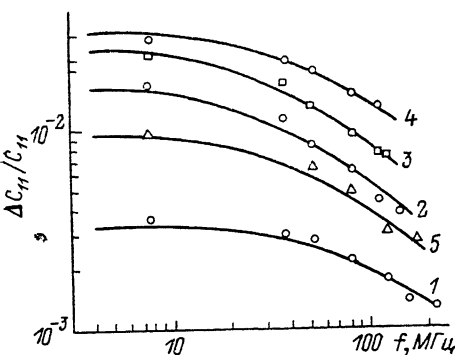


Рис. 2. Частотная зависимость изменения модуля $\Delta C_{11}/C_{11}$.

Обозначения те же, что и на рис. 1.

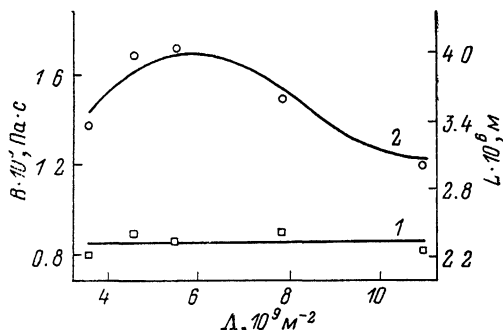


Рис. 3. Зависимость коэффициента демпфирования (1) и средней эффективной длины дислокационного сегмента (2) от плотности дислокаций.

Если величину ω_m определить из экспериментальных кривых, следуя [1], как частоту, при которой изменение скорости равно половине максимального, то значения B получатся намного ниже, чем в [2]. В этом случае достичь согласия результатов за счет учета различия в модулях не представляется возможным. Следует заметить, что если использование уравнения (1) в указанных расчетах приводит к получению заниженных значений B , то его применение для таких целей в сочетании с декрементом затухания в случае низкочастотных измерений дает завышенные оценки B [10] по сравнению с данными, полученными обычно принятыми методами [2, 11], хотя в этом случае завышение оценок B , по-видимому, связано с большим затуханием, которое, по данным [12], примерно на 1.5 порядка выше определенного экстраполяцией из мегагерцевой области частот. В связи с этим в [12] сделан вывод о невозможности описания в рамках теории [8] измерений, проводимых в кГц- и МГц-диапазонах частот, с помощью единого механизма затухания. Согласно [12], результаты измерений, полученные в указанных диапазонах частот, могут быть описаны общим частотным профилем лишь в случае использования для каждой из частотных ветвей различных значений B .

Кроме этого, обнаружено также и количественное расхождение в значениях дисперсии скорости ультразвука между данными настоящей работы и результатами [1]. В отличие от [1] максимальное изменение скорости, которое нам удалось зафиксировать при $\epsilon = 1\%$, составляет 1.3 %, что согласуется с данными [6, 8]. Сравнительно большие изменения скорости, наблюдаемые в [1], пожалуй, можно получить лишь в условиях проведения измерений сразу после деформации образца [5], о которых в [1] не оговаривается. Однако, несмотря на некоторые различия в количествен-

ных оценках, результаты настоящей работы находятся в хорошем качестве в согласии с опытными данными [1] и теорией [8]. Согласно теоретическим представлениям [8], при низких частотах дислокация колеблется синхронно с приложенным напряжением и кажущаяся жесткость ниже, чем у кристалла с закрепленными дислокациями. С ростом частоты такая синхронность нарушается и модуль упругости достигает своего истинного значения, что обусловлено уменьшением амплитуды колебаний дислокаций, приводящим к снижению их вклада в общую деформацию кристалла.

Таким образом, изучая частотную зависимость скорости ультразвука в кристаллах NaCl, находящихся в исходном и деформированном состояниях, в настоящей работе удалось выявить ряд особенностей. В частности, установлено, что дисперсия скорости, связанная с рассеянием звука на дислокациях, существенно зависит от плотности подвижных дислокаций. Влияние дислокаций при этом может проявляться вплоть до частот 150—200 МГц, что, по-видимому, необходимо учитывать при измерениях модулей упругости в кристаллах.

Обнаружена инверсия в смещении частотных спектров $v(f)$ при непрерывном увеличении деформации образца, согласующегося с эффектом смещения резонансных кривых $\Delta(f)$, наблюдаемых ранее [2] в таких условиях.

Выявлено несоответствие данных для B и L , получаемых из частотных спектров для скорости и затухания ультразвука, что связывается с различием измеренных и экстраполированных из мегагерцевой области частот низкочастотных значений $(\Delta C_{11}/C_{11})_0$.

Список литературы

- [1] Granato A., Deklerk J., Truell R. // Phys. Rev. 1957. V. 108. N 3. P. 895—896.
- [2] Петченко А. М., Мозговой В. И., Сиренко А. Ф. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 6. С. 320—322.
- [3] Петченко А. М., Мозговой В. И., Урусовская А. А. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 10. С. 2992—2995.
- [4] Петченко А. М., Строилова Д. Л., Мозговой В. И. // Синтез и исследование оптических материалов. Харьков, 1987. № 19. С. 133—139.
- [5] Петченко А. М., Мозговой В. И., Сиренко А. Ф., Урусовская А. А. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 6. С. 127—130.
- [6] Труэлл Р., Эльбаум Ч., Чик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Под ред. И. Г. Михайлова. М.: Мир, 1972. 307 с.
- [7] Mason W. P., Douglas E., McDonald // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 5. P. 1836—1842.
- [8] Гранато А., Люкке К. // Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. 4. Ч. А. М.: Мир, 1969. С. 261—321.
- [9] Сивертсен Дж. М. // Внутреннее трение и дефекты в металлах / Под ред. В. С. Постникова. М.: Металлургия, 1965. С. 222—229.
- [10] Kardashev B. K., Kustov S. B., Lebedev A. B., Berezhkova G. V., Perstnev P. P., Appel F., Messerschmidt U. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 91. N 1. P. 79—87.
- [11] Alshits V. I., Darinskaya E. V., Urusovskaya A. A. // Phys. St. Sol. (a). 1985. V. 91. N 2. P. 533—542.
- [12] Наундорф В., Люкке К. // Механизмы внутреннего трения в твердых телах. М.: Наука, 1976. С. 91—95.

Харьковский институт
инженеров городского хозяйства

Поступило в Редакцию

19 декабря 1989 г.

В окончательной редакции
6 июня 1990 г.