

ТУННЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ СМЕШАННОЙ ГАНТЕЛИ В ТВЕРДОМ РАСТВОРЕ Al – Zn

Э.Л.Андроникашвили, В.А.Мелик-Шахназаров, И.И.Мирзоева, И.А.Наскидашвили

Методом низкочастотной (~ 1 кГц) акустики измерялась кинетика переориентации смешанных гантелей в твердых растворах Al – Zn, которая сопровождается диффузионными скачками атомов Zn между равновесными положениями внутри элементарной ячейки. Показано, что при $T < 20$ К скорость релаксации τ^{-1} возрастает с понижением температуры в соответствии с закономерностью подбарьерной когерентной диффузии.

Известно, что в слабых растворах замещения, таких, например, как Al – Fe, Al – Zn, примесные атомы образуют с междоузельными атомами пары, устойчивые при $T < 200 - 250$ К¹. Геометрически они имеют конфигурацию гантелей, ориентированных вдоль направлений $\langle 100 \rangle$ (рис. 1). Поскольку при низких температурах диффузионная подвижность примесных атомов ничтожна, смешанные гантели локализованы и могут лишь переориентироваться между шестью направлениями вдоль осей $\langle 100 \rangle$. Примесный атом (темный кружок на рис. 1) при этом совершает переходы между шестью равновесными положениями внутри элементарной ячейки, а решеточные атомы (светлые кружки на рис. 1) только смещаются из своих узельных позиций. Высота энергетического барьера, разделяющего равновесные состояния гантели ≈ 15 мэВ^{2,3}.

В данной работе кинетика переориентации гантелей в сплаве Al + 150 ppm Zn исследовалась методом низкочастотной (~ 1 кГц) акустики. Выбор метода продиктован тем известным обстоятельством, что симметрия деформации решетки вокруг гантелей ниже кубической, в результате чего они взаимодействуют с упругими полями. В переменном поле переориентация "упругих диполей", сопровождаемая диффузионными межъямными переходами, вызывает диссипацию энергии упругих колебаний. Частотная зависимость упругой восприимчивости кристалла, содержащего упругие диполи, описывается формулой Дебая, $\chi(\omega) = \chi(0) / (1 - i\omega\tau)$, где ω – частота, τ – время релаксации, $\chi(0)$ – восприимчивость, соответствующую $\omega = 0$. Измерение мнимой χ'' и вещественной χ' частей упругой восприимчивости (т.е. поглощения и дисперсии) позволяют определять температурную зависимость $\tau(T)$.

Образцы представляли собой пластинки с размерами $0,3 \times 1 \times 10$ мм³, зажатые с одной стороны в массивный блок. Собственные изгибные колебания образца (первая четвертьволновая мода) возбуждались с помощью регенеративной схемы⁴. Измерялись поглощение звуковых колебаний и модуль упругости (ниже в единицах обратной добротности Q^{-1} и квадрата собственной частоты ν^2 акустического вибратора, соответственно).

После облучения электронами (4 МэВ) при $T \approx 77$ К дозой $6 \cdot 10^{18}$ е/см² образцы без отогрева выше ≈ 100 К перегружались в гелиевый криостат. Способ облучения и перегрузки образцов соответствовали условию сохранения в них смешанных гантелей, образующихся в результате захвата примесными атомами цинка междоузельных атомов, подвижных при $T \gtrsim 40$ К. Кроме сплава Al – Zn в качестве контрольного в идентичных условиях облучался чистый Al (99,9996%).

В необлученных образцах, а также облученном чистом Al при повышении температуры наблюдалось монотонное понижение модуля упругости и возрастание поглощения звука, объясняемое ангармонизмом решетки и движением дислокаций. Температурная зависимость ν^2 и Q^{-1} облученного электронами сплава показана на рис. 2. Характерными особенностями этих кривых являются понижение модуля упругости при $T < 20$ К и максимум затухания при $T \approx 11$ К. Эти аномалии исчезают в результате отжига образцов при $T \approx 200$ К в течение нескольких минут (условие отжига гантелей). Эти результаты позволяют заключить, что

максимум поглощения при $T \approx 11$ К и аномальное уменьшение модуля упругости при $T < 20$ К связаны со смешанными гантелями.

Очевидно, что единственным добавочным (при введении гантелей) видом движения в области низких температур, приводящим к поглощению звука и дисперсии модуля упругости, является их переориентация между шестью равновесными положениями (рис. 1). Именно такое движение было обнаружено при температуре 10 – 30 К в облученном электронами сплаве Al – Fe методами поглощения звука ² и мессбауэровской спектроскопии ³.

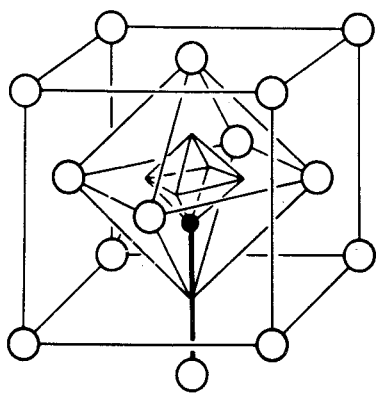


Рис.1.

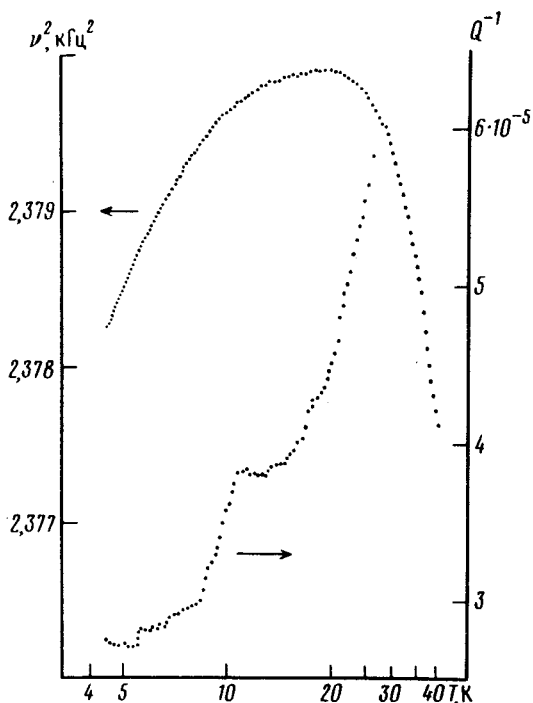


Рис.2.

Дебаевская дисперсия модуля упругости для образца, содержащего упругие диполи может быть записана следующим образом:

$$(G_0 - G(T)) / G_0 = A / (1 + \omega^2 \tau^2(T)), \quad (1)$$

Здесь G_0 – модуль упругости кристалла в отсутствии релаксации, $G(T)$ измеряемый ”динамический” модуль упругости, A – коэффициент, пропорциональный концентрации упругих диполей. Во всех исследованных до сих пор случаях релаксации упругих диполей, величина $G(T)$ в соответствии с (1) при повышении температуры понижалась в некоторой дисперсионной области около релаксационного резонанса $\omega \tau = 1$, поскольку время релаксации τ при этом всегда уменьшалось по классическому аррениусовскому закону $\tau(T) = \tau_0 \exp(U/T)$, где U – энергия активации, имеющая смысл высоты межъямного барьера. Понятно, что наблюдаемая обратная дисперсия модуля упругости (т.е. увеличение $G(T)$ с ростом температуры) может быть вызвана только уменьшением τ с понижением температуры. Такая зависимость $\tau(T)$ характерна для когерентной туннельной диффузии ⁵⁻⁷.

Обычно квантовая диффузия ассоциируется с низкими температурами, легкими частицами и квантовыми кристаллами. В данном случае ситуация оказалась благоприятной для туннелирования тяжелого атома вследствие таких специфических характеристик смешанной гантели как малая эффективная толщина межъямного барьера ($< 1 \text{ \AA}$), а также существование мягкой либрационной моды $\omega_0 \approx \omega_D / 10^8$.

Сравнение туннельной кинетики смешанных гантелей с хорошо изученным случаем квантовой диффузии He^3 в кристаллах He^4 ⁹, показывает, что скорость релаксации гантелей при

$T \approx 10$ К ниже примерно в сто раз. Наблюдение такой медленной туннельной релаксации оказалась возможным благодаря использованию низкой акустической частоты $\omega \approx 10^4$ с⁻¹, для которой дисперсионная полоса совпала с областью изменения $\tau(T)$ в подбарьерном режиме.

Литература

1. Dworshak F., Monsau Th., Wollenberger H. J. Phys., 1976, F6, 2207.
2. Rehn L.E., Robrock K.-H., Jacquis H. J. Phys., 1978, F8, 1835.
3. Vogl G., Mansel W., Dederichs P.H. Phys. Rev. Lett., 1976, 36, 1497.
4. Мелик-Шахназаров В.А., Наскидашвили И.А. ПТЭ, 1967, № 1, 181.
5. Андреев А.Ф., Лифшиц И.М. ЖЭТФ, 1969, 56, 2057.
6. Каган Ю., Максимов Л.А. ЖЭТФ, 1973, 65, 622.
7. Kagan Yu., Klinger M.I. J. Phys., 1974, C7, 2791.
8. Dederichs P.H., Lehmann C., Scholz A. Phys. Rev. Lett., 1973, 31, 1130.
9. Андреев А.Ф. УФН, 1976, 118, 251.

Институт физики
Академии наук Грузинской ССР

Поступила в редакцию
13 ноября 1983 г.