

## АНОМАЛИИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В КРИСТАЛЛИЧЕСКОМ ВОДОРОДЕ

*А.В.Леонтьева, Г.А.Маринин, Т.Н.Анисимова*

Обнаружены аномалии низкочастотного внутреннего трения (НЧВТ) в кристаллическом  $n\text{-H}_2$  в области низких температур в виде пиков при  $T \simeq 5,5$  и  $9$  К, увеличения фона внутреннего трения при  $T < 8$  К по мере понижения температуры, а также относительное постоянство модуля сдвига и его низкие значения в интервале  $2 - 12,5$  К. Особенности НЧВТ в водороде в сравнении с твердым аргоном связываются с увеличением подвижности дефектов в низкотемпературной области.

Метод НЧВТ, дающий обширную информацию о процессах пластической деформации, фазовых переходах, диффузионных процессах, а также дефектности кристаллической структуры, к настоящему времени использовался лишь для исследования внутреннего трения в кристаллическом аргоне<sup>1, 2</sup>. Что касается квантовых криокристаллов, к которым относится твердый водород, то таких данных в литературе нет. Исследования ползучести<sup>3-5</sup> твердого  $n\text{-H}_2$  ( $T_{\text{пл}} = 13,96$  К) показали существенную роль в пластической деформации этого криокристалла квантовых флуктуаций. Данная работа посвящена исследованию НЧВТ твердого  $n\text{-H}_2$  в диапазоне температур  $2 - 12,5$  К. Объектом исследования были свободные поликристаллические образцы водорода чистотой  $99,99\%$  с линейными размерами зерен  $0,5 - 2$  мм, которые получались при скорости кристаллизации  $0,3 - 0,5$  мм/мин. После выращивания при температуре  $11 - 12$  К образец отслаивался от стенок ампулы с помощью вакуумной откачки, а затем производился отжиг в течение  $\simeq 1$  часа, что в соответствии с<sup>2</sup> достаточно для снятия внутренних напряжений и дефектов, образовавшихся при росте кристалла.

НЧВТ  $n\text{-H}_2$  изучалось методом обратного крутильного маятника, описанного в <sup>2</sup>, на свободных образцах с длиной рабочей части 30 мм, диаметром 4 мм, амплитуде деформации  $5 \cdot 10^{-5}$ .

Проведенные исследования показали, что во всей области температур амплитудная зависимость НЧВТ в твердом водороде отсутствует. На температурной зависимости внутреннего трения  $Q^{-1}(T)$  в твердом водороде (рис. 1) в интервале  $0,14 - 0,93 T_{\text{пл}}$  обнаружены характерные пики в районе температур  $T_1 \approx 5,5 \text{ К}$  ( $\approx 0,4 T_{\text{пл}}$ ) и  $T_2 \approx 9 \text{ К}$  ( $\approx 0,64 T_{\text{пл}}$ ).

На рис. 2 приведена температурная зависимость квадрата частоты  $f^2(T)$ , которая, как известно, пропорциональна модулю сдвига  $G(T)$ . Видно, что в интервале  $2 - 12,5 \text{ К}$   $f^2$  изменяется незначительно. При понижении температуры в интервале  $12,5 - 7 \text{ К}$   $f^2$  увеличивается на 13 %, ниже 5 К — уменьшается на 10 %. На зависимости  $f^2(T)$  наблюдаются перегибы, соответствующие пикам НЧВТ.

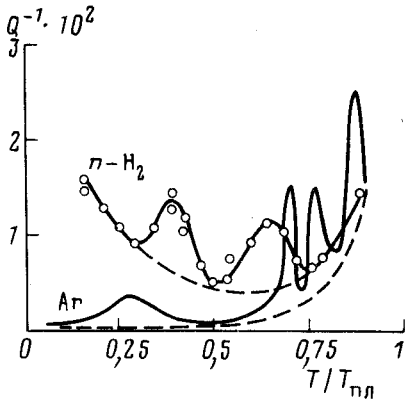


Рис. 1

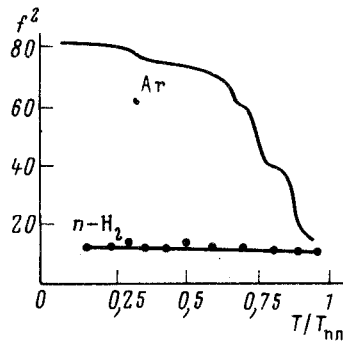


Рис. 2

Рис. 1. Зависимость НЧВТ кристаллических  $\text{Ar}$  и  $n\text{-H}_2$  от приведенной температуры  $T/T_{\text{пл}}$

Рис. 2. Зависимость  $f^2(T/T_{\text{пл}}) \sim G(T/T_{\text{пл}})$  кристаллических  $n\text{-H}_2$  и  $\text{Ar}$

Для выяснения особенностей НЧВТ в  $\text{H}_2$  имеет смысл сравнить его с аргоном ( $T_{\text{пл}} = 83,75 \text{ К}$ ) <sup>1, 2</sup>, который, как известно, является "классическим" криокристаллом. Данные по температурной зависимости НЧВТ и квадрата частоты  $f^2(T/T_{\text{пл}})$  для аргона также приведены на рис. 1, 2. Видно, что на температурной зависимости внутреннего трения в  $\text{Ar}$  и  $\text{H}_2$  имеются две области ниже и выше  $0,5 T_{\text{пл}}$ . В высокотемпературной области водород ведет себя подобно аргону, имеет место увеличение фона НЧВТ с повышением температуры до  $0,9 T_{\text{пл}}$ . Энергии активации высокотемпературных пиков у  $\text{H}_2$  и  $\text{Ar}$ , оцененные, как было описано ранее в <sup>2</sup>, составляют  $U \approx 200 \text{ К}$  и  $1500 \text{ К}$  соответственно, и близки к энергии активации самодиффузии в  $\text{H}_2$  и  $\text{Ar}$ . Что касается низкотемпературной области (ниже  $0,5 T_{\text{пл}}$ ), то поведение  $n\text{-H}_2$  по сравнению с  $\text{Ar}$  имеет ряд особенностей. Прежде всего, обращает на себя внимание увеличение фона в НЧВТ в  $n\text{-H}_2$  по мере понижения температуры от  $4 \cdot 10^{-3}$  при  $7 \text{ К}$  до  $1,5 \cdot 10^{-2}$  при  $T = 2 \text{ К}$ , в то время как у аргона фон внутреннего трения практически не изменяется с температурой, оставаясь на сравнительно низком уровне (ниже  $10^{-3}$ ) (рис. 1). Низкотемпературный пик в аргоне, как отмечалось <sup>2</sup>, соответствует температуре начала интенсивного протекания пайерлсовского механизма пластической деформации ( $U = 0,1 E_c$ ). Энергия активации низкотемпературного пика в водороде составляет  $0,3 E_c$ , что близко к данным по релаксации напряжений в водороде <sup>8</sup>, из которых следует, что при  $T < 5 \text{ К}$  происходит смена механизма пластической деформации и уменьшение пластичности нормального водорода. Од-

нако, описанное выше повышение фона НЧВТ в области низких температур не согласуется с данным предположением о понижении пластичности водорода. Действительно, в аргоне при  $T < 0,5 T_{пл}$  наблюдается резкое понижение пластичности, обусловленное появлением "абсолютной" хрупкости<sup>9</sup>, что приводит к уменьшению фона внутреннего трения. Характерной особенностью внутреннего трения водорода является то, что среднее время релаксации  $\tau_{ср}$  для низкотемпературного и высокотемпературного пиков практически одинаково, тогда как у Аг оно с понижением температуры пика увеличивается. Большая высота низкотемпературного пика и степени релаксации в сравнении с высокотемпературным (в 1,3 раза), увеличение его полуширины (в 2 раза) и увеличение фона внутреннего трения свидетельствуют об увеличении интенсивности протекания релаксационных процессов при понижении температуры в кристаллическом водороде в отличие от Аг, у которого степень релаксации и величина фона внутреннего трения сильно уменьшается при понижении температуры и значительно ниже, чем у водорода. Еще одной существенной особенностью водорода является аномальное поведение модуля сдвига  $G(T) \sim f^2$  в температурном интервале  $0,15 - 0,95 T_{пл}$ . На рис. 2 представлены в приведенных координатах температурные зависимости усредненных значений  $f^2$  для водорода и аргона. Значения  $G_0$ , полученные экстраполяцией к  $T = 0$  температурных зависимостей модуля сдвига  $G = \rho v_t^2$  по данным работы<sup>10</sup>, отличаются подобно  $f^2(0)$  этих кристаллов.

Обращает на себя внимание то, что  $f^2(T)$  для водорода, в отличие от аргона, практически не изменяется с температурой, оставаясь на постоянном уровне, близком  $f^2(0)$ , причем абсолютные значения  $f^2$  в водороде на порядок ниже, чем в аргоне. Полученные в работе аномалии НЧВТ в кристаллическом водороде, видимо, обусловлены делокализацией дефектов, приводящей к росту внутреннего трения в квантовых кристаллах, как это было показано в<sup>11, 12</sup>.

Авторы благодарны М.А.Стржемечному, И.Н.Крупскому, В.Д.Нашику за полезную дискуссию и ценные советы.

#### Литература

1. Маринин Г.А., Леонтьева А.В., Оберемченко И.А., Стрельцов В.А. ФТТ, 1983, 25, 2301.
2. Леонтьева А.В., Маринин Г.А., Оберемченко И.А. ФНТ, 1984, 10, 1279.
3. Крупский И.Н., Леонтьева А.В., Индан Л.А., Евдокимова О.В. ФНТ, 1977, 3, 933.
4. Крупский И.Н., Леонтьева А.В., Индан Л.А., Евдокимова О.В. Письма в ЖЭТФ, 1976, 24, 297.
5. Алексеева Л.А., Литвин О.В., Крупский И.Н. ФНТ, 1982, 8, 211.
6. Леонтьева А.В., Маринин Г.А., Романуша В.А., Феоктистов Ю.А. ФНТ, 1980, 6, 943.
7. Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода. Справочник под ред. Веркина Б.И. Киев, Наукова думка, 1984.
8. Стеценко Ю.Е. Пластическая деформация твердого водорода. Автореферат кандидатской диссертации, Харьков, ФТИНТ АН УССР, 1972.
9. Леонтьева А.В., Романуша В.А., Степанчук Л.В., Анисимова Т.Н. УФЖ, 1985, 30, 286.
10. Кристаллы. Под ред. академиков АН УССР Веркина Б.И., Прихотько А.Ф. Киев, Наукова думка, 1983.
11. Мейерович А.Э. ЖЭТФ, 1976, 71, 1180.
12. Маркелов А.В. ЖЭТФ, 1985, 88, 205.