

# Влияние инфракрасного излучения на пластичность твердого водорода

© Л.А. Алексеева

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины,  
Харьков, Украина

E-mail: alekseeva@ilt.kharkov.ua

(Поступила в Редакцию 12 ноября 2010 г.  
В окончательной редакции 22 марта 2011 г.)

Представлены первые результаты, полученные при исследовании влияния ИК-излучения на низкотемпературную ( $1.8 \leq T \leq 4.2$  К) пластичность твердого  $H_2$ . Обнаружено, что при подаче на образцы ИК-потока имеет место резкое, не сопровождающееся ростом их температуры приращение  $\Delta \epsilon_{IR}$  величины  $\epsilon$  относительного удлинения, достигнутого предварительно под действием постоянно приложенного к ним напряжения  $\sigma = \text{const}$ . Установлен пороговый характер эффекта, обнаруживаемого как в случае нормального водорода ( $n-H_2$ , 75%  $o-H_2$ ), так и параводорода ( $p-H_2$ ,  $\sim 0.2\%$   $o-H_2$ ) лишь при достаточно высокой мощности источника ИК-излучения. Выявлен обратный ход деформации  $H_2$  с прекращением воздействия потока ИК-фотонов — быстрое уменьшение величин  $\epsilon$  до обеспечиваемых только приложенной нагрузкой. Появление скачков  $\Delta \epsilon_{IR}^i$  интерпретируется как следствие существования фундаментальной полосы ИК-поглощения для твердых водородов. Установлено, что в зависимости от времени  $t$  выдержки образцов под воздействием ИК-излучения изменение величины  $\Delta \epsilon_{IR}^i(t)$  подчиняется характерному для дислокационной ползучести логарифмическому закону, как и в случае необлученного  $H_2$ . Обнаружено также, что в результате многократного сравнительно длительного воздействия ИК-излучения имеет место резкое понижение константы  $\alpha$  логарифмической ползучести  $n-H_2$  и заметный рост прочности образцов как  $n-H_2$ , так и  $p-H_2$ , что указывает на их явное упрочнение (вместо ожидаемого в результате ИК-облучения „сверхпластического“ поведения).

## 1. Введение

Способность поглощения твердым водородом значительного количества энергии в инфракрасной области [1,2] обусловлена дипольным или квадрупольным переходом между колебательно-вращательными состояниями в системе молекул  $H_2$ , связанным с собственным или наведенным электрическим дипольным или квадрупольным моментом. В результате воздействия ИК-излучения в водородных кристаллах возникают высокоэнергетические метастабильные состояния — долгоживущие возбуждения, именуемые на языке вторичного квантования „ротонами“ и „вибронами“ (см. [1,2]), которые способны когерентно в виде волновых пакетов или посредством прыжковой диффузии перемещаться на значительные расстояния в решетке  $H_2$ . Эти возбуждения могут вовлекаться в кинетику деформации  $H_2$  и существенно изменять ее характер. Наличие широких полос ИК-поглощения у твердого  $H_2$  может, в частности, инициировать в нем кроссовер [3,4] в состояние, характеризующееся появлением в квантовом кристалле не обладающего вязкостью конденсата (жидкоподобной фракции типа Supersolid [5]). Благодаря воздействию ИК-излучения это состояние принципиально может реализовываться даже в самом неблагоприятном случае — сравнительно жесткого твердого нормального ( $n-H_2$ ) водорода, в котором 75% молекул (молекул  $o-H_2$ , обладающих суммарным ядерным спином  $I = 1$  и являющихся эллипсоидами вращения) взаимодействуют между собой

в решетке посредством электростатических квадруполь-квадрупольных сил (см., например, [6]).

## 2. Методика экспериментов

С целью выявления влияния на пластичность твердого  $H_2$  ИК-излучения измерены временные зависимости относительного удлинения  $\epsilon$  образцов, подвергнутых в интервале температур 1.8–4.2 К действию приложенного механического напряжения  $\sigma = \text{const}$  и одновременно воздействию ИК-потока.

Образцы имели форму цилиндра (длиной 30 mm, диаметром 5–6 mm) с утолщениями диаметром  $\sim 20$  mm по обоим концам, в которые вмораживались „захваты“. Приготовление их осуществлялось из жидкой фазы  $n-H_2$  в охлаждаемой гелием стеклянной ампуле криостата [7]. Скорость роста образцов составляла  $\sim 0.2$ – $0.5$  mm/min. Освобожденные от стенок заключающего их контейнера водородные кристаллы отжигались вблизи температур  $\sim 11$ – $12$  К примерно 40–50 min и столько же времени выдерживались изотермически при заданной температуре  $T = \text{const}$ , затем испытывались в режиме ползучести под действием постоянно приложенного вдоль оси кристалла напряжения  $\sigma = \text{const}$  с помощью рычажных весов чувствительности  $\pm 200$  mg. Диаметр образцов измерялся с помощью длиннофокусного микроскопа типа МБС-2, приращение их длины — с помощью индуктивного датчика перемещений [8] с точностью  $\pm 10^{-5}$  cm. Температура кристаллов измерялась на обоих

торцах полупроводниковыми термометрами сопротивления с точностью  $\pm 2 \cdot 10^{-2}$  К. Зависимости деформации  $\epsilon$  кристаллов от времени  $t$  непрерывно регистрировались электронным пикирующим потенциометром КСП-4.

Для проведения измерений использовался обычный эффект возникновения фоторезистивного проводящего канала в селективном приемнике излучения с сопротивлением, изменяющимся при облучении его ИК-поток. Источником, генерирующим излучение, служила расположенная в 30 см от образца коммерческая лампа накаливания мощностью  $\sim 150$ –200 Вт.

Величина телесного угла для светового потока ограничивалась с помощью тубуса с тем, чтобы облучению подвергалась только поверхность образца, но не элементы конструкции криостата. Инфракрасный участок (0.75–4.6  $\mu\text{m}$ ) выделялся с помощью светофильтра ИКС-1. Для защиты образца от других видов излучений использовались внешние черные экраны и подвешенная непосредственно в жидком азоте зеркальная подвижная шторка.

Проходящий через образец поток ИК-излучения регистрировался фоторезистором типа ФСВ 16АН с вольтовой чувствительностью 500 В/Вт. С учетом большой величины „темнового“ сопротивления всех фоторезисторов, пригодных для приема излучения в ИК-области спектра [9,10], была применена амплитудная модуляция светового потока вращающимся диском с отверстиями. В результате модуляции было получено два обладающих одинаковой частотой сигнала, один из которых (измерительный) определялся падением напряжения на нагрузочном сопротивлении в цепи фоторезистора, второй — опорный (в форме, близкой к симметричным прямоугольным импульсам) — был получен в цепи фототранзистора. Оба сигнала подавались на вход обладающего частотной и фазовой избирательностью прибора УПИ-1, предназначенного для усиления и преобразования малых сигналов методом синхронного детектирования переменных напряжений. Для индикации поглощения водородом ИК-излучения к выходу УПИ-1 был подключен электронный цифровой вольтметр Щ68003. Понижение измеряемого по мере затвердевания  $\text{H}_2$  сигнала соответствовало уменьшению примерно на 37% интенсивности ИК-поглощения, что согласуется с установленной (см. ссылки в [1,2]) зависимостью ее величины от плотности  $\text{H}_2$ . Вычисленное по падению напряжения в цепи фоторезистора число фотонов с характерными длинами волн  $\lambda \sim 2 \cdot 10^{-4}$  см (см. [1,2]), отвечающими энергиям вблизи  $E_{\text{ph}} = hc/\lambda \sim 10^{-12}$  эрг ( $h$  — постоянная Планка,  $c$  — скорость света), в пересчете на единицу времени составляло  $\sim 2 \cdot 10^9$  с $^{-1}$  на входе в образец.

Измеренные в процессе воздействия на твердый  $\text{H}_2$  ИК-излучения параметры деформации сопоставлялись с характерными для необлученного  $\text{H}_2$ , полученными [7,11–17], как обычно, в темноте.

Следует сразу отметить, что вплоть до достаточно низких по сравнению с дебаевской  $\Theta_{\text{D}}$  ( $\sim 120$  К [6]) температур  $T/\Theta_{\text{D}} \sim 1.5 \cdot 10^{-2}$  не удалось за счет ИК-излу-

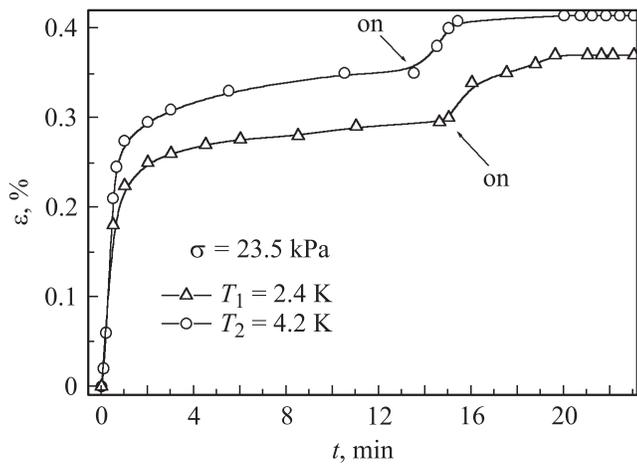
чения достичь „сверхпластичности“<sup>1</sup> твердого  $\text{H}_2$  ни в случае поликристаллического  $n\text{-H}_2$ , ни для монокристаллов параводорода ( $p\text{-H}_2 \sim 0.2\%$   $o\text{-H}_2$ ), для которого выборочно были проведены контрольные эксперименты с единственной целью — инициирования ИК-излучением его „сверхпластического“ поведения [14,15].

### 3. Результаты экспериментов

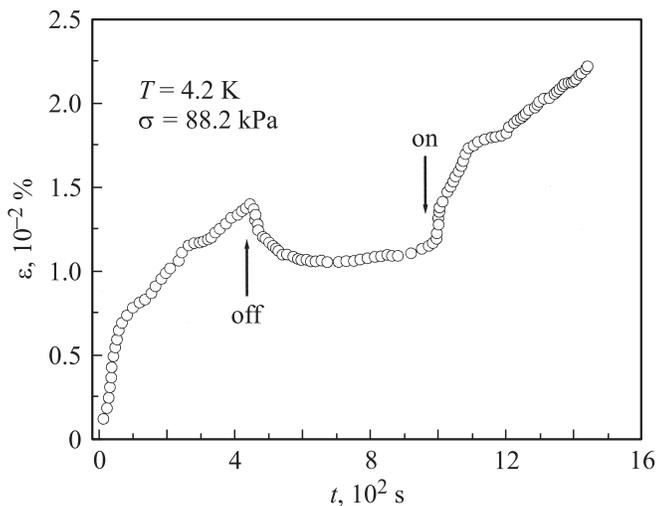
Проведенные эксперименты показали, что при подаче на образцы  $\text{H}_2$  ИК-излучения с интенсивностью значительно выше обеспечиваемой критическим значением ( $\geq \sim 30$ –40 Вт) мощности источника величина  $\epsilon$  их относительного удлинения, достигнутого предварительно за счет приложения механического напряжения  $\sigma = \text{const}$ , получает резкое приращение  $\Delta\epsilon_{\text{IR}}^i$ , не сопровождающееся изменением температуры образцов. Значения  $\epsilon$  деформации  $\text{H}_2$  в результате ИК-излучения начинают стремиться к новому положительному пределу  $\epsilon_1 > \epsilon_0$ , где  $\epsilon_0$  — уровень, достигнутый для необлученных кристаллов. Измерение температуры торцов водородных кристаллов при этом не выявляет с указанной выше точностью ( $\pm 2 \cdot 10^{-2}$  К) какого-либо даже малого изменения величины  $T$ . По мере продолжающегося воздействия на твердый  $\text{H}_2$  ИК-излучения для величины  $\Delta\epsilon_{\text{IR}}^i$  деформации возникает временной ход  $\Delta\epsilon_{\text{IR}}^i(t)$ . При выключении источника ИК-излучения обнаруженные скачки деформации образцов полностью исчезают, а величина  $\epsilon$ , следуя примерно экспоненте, достаточно быстро уменьшается до характерной для необлученного водорода, обеспечиваемой только приложенным напряжением.

Типичные зависимости деформации от времени  $\epsilon(t)$ , полученные для поликристаллического  $n\text{-H}_2$  при двух различных температурах ( $T_1 = 2.4$  К и  $T_2 = 4.2$  К) в отсутствие и при наличии одновременного действия на образцы приложенного напряжения ( $\sigma = 23.5$  кПа) и ИК-излучения, показаны на рис. 1. Реакция исследованных водородных кристаллов на ИК-излучение проявляется в виде резких скачков  $\Delta\epsilon_{\text{IR}}$  деформации  $n\text{-H}_2$ , возникающих на кривых  $\epsilon(t)$  непосредственно в моменты подачи излучения на образец. Полученные для облученных кристаллов зависимости  $\Delta\epsilon_{\text{IR}}(t)$  располагаются в поле рисунка выше, чем первоначальные кривые  $\epsilon(t)$ , характеризующие деформирование необлученного  $n\text{-H}_2$ . Начальные участки приведенных на рис. 1 кривых ползучести относятся к необлученным водородным кристаллам. Деформация  $n\text{-H}_2$  накапливается здесь только в результате действия на образец механического напряжения. Различие в величинах  $\epsilon$ , полученное для различных температур при условии ( $\sigma, t = \text{const}$ ), соответствует

<sup>1</sup> Использование термина „сверхпластичность“ применительно к твердому  $p\text{-H}_2$  обусловлено высокими, ограниченными лишь конструкцией криостата, величинами  $\epsilon$  деформации образцов и наблюдением при  $T \sim 1.8$  К образования ими мягких петель при последующем слабом поджатии, а также их низкотемпературного „гравитационного стекания“ под действием силы тяжести (см. [14,15]).



**Рис. 1.** Зависимости величины  $\varepsilon$  относительного удлинения образцов твердого  $n\text{-H}_2$  от времени  $t$ , полученные при температурах  $T_1 = 2.4$  К и  $T_2 = 4.2$  К в условиях одновременного воздействия на образец механического напряжения  $\sigma = 23.5$  кПа и ИК-излучения. Моменты подачи ИК-излучения обозначены стрелками.



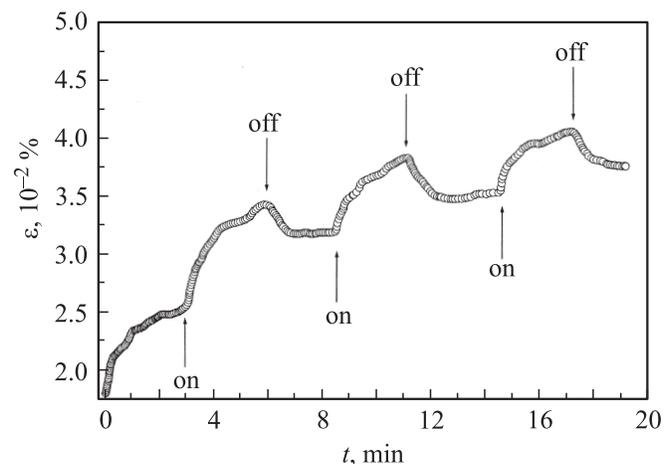
**Рис. 2.** Изменение характера зависимости величины  $\varepsilon$  деформации твердого  $n\text{-H}_2$  от времени  $t$ , полученное при выключении и повторном включении источника ИК-излучения.

установленному в [7,13] термоактивационному характеру деформации  $n\text{-H}_2$ .

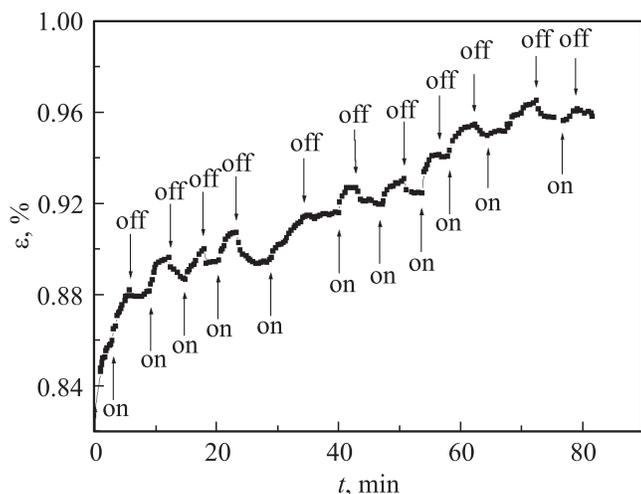
На рис. 2 показана эволюция во времени — типичное исчезновение возникшего в результате ИК-излучения скачка  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}$  деформации  $n\text{-H}_2$ . Представлено изменение величины  $\varepsilon(t)$  относительного удлинения одного из испытанных образцов, находящегося первоначально под действием нагрузки  $\sigma = 88.2$  кПа и — одновременно — потока ИК-фотонов. Эволюция является типичной для всех исследованных водородных кристаллов при прерывании действия на них ИК-излучения. Видно, что с выключением источника ИК-фотонов приращение  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}$  деформации  $n\text{-H}_2$  полностью исчезает. Значения  $\varepsilon$  при

этом сравнительно быстро возвращаются к характерным для начальных условий (для обычного деформирования в темноте) значениям, уменьшаясь во времени согласно зависимости, близкой к экспоненциальной. Видно также, что при последующей подаче на образец ИК-излучения вновь возникает скачок деформации образца и последующий временной ход  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}(t)$  деформации.

При многократном воздействии ИК-излучения на водородные кристаллы величины возникших приращений деформации остаются во времени монотонно возрастающей функцией. На рис. 3 приведена типичная зависимость  $\varepsilon(t)$ , полученная в результате троекратного, повторявшегося через примерно одинаковые промежутки времени воздействия ИК-излучения на  $n\text{-H}_2$ , нагруженный предварительно механическим напряжением той же величины  $\sigma = 88.2$  кПа. (Во избежание возрастания температуры  $T$  образцов воздействие ИК-излучения на твердый  $\text{H}_2$  дозировалось — ограничивалось интервалами  $\Delta t \sim 5\text{--}10$  min, к концу которых мог регистрироваться слабый рост температуры образцов — на величину  $\delta T \sim 0.2\text{--}0.3$  К). Представленная зависимость состоит из отдельных участков, отражающих изменение величин приращений  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i(t)$ , возникающих в случае включения источника ИК-излучения и исчезающих при его выключении. Для каждого участка с нарастающим временным ходом зависимостей  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i(t)$  значения производных  $d\varepsilon/dt$  в каждой точке кривых  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i(t)$  (скорость деформации твердого  $n\text{-H}_2$  под действием ИК-излучения и нагрузки) непрерывно понижаются во времени. Таким образом, эти участки  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i(t)$  полной кривой  $\varepsilon(t)$  являются типичными кривыми кратковременной неустановившейся ползучести. Видно также, что начальное значение возникшего скачкообразного изменения  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i$  деформации, соответствующее включению источника ИК-излучения, не сохраняется во времени неизменным, заметно уменьшаясь при переходе от одного участка к другому.



**Рис. 3.** Зависимость от времени  $t$  величины  $\varepsilon$  деформации твердого  $n\text{-H}_2$ , полученная в результате одновременного действия механического напряжения ( $\sigma = 88.2$  кПа) и ИК-излучения при троекратном его воздействии на образец.



**Рис. 4.** Зависимость от времени  $t$  величины  $\varepsilon$  деформации твердого  $n\text{-H}_2$ , полученная в результате одновременного действия механического напряжения ( $\sigma = 88.2 \text{ kPa}$ ) и ИК-излучения при многократном его воздействии на образец.

На рис. 4 представлена типичная зависимость  $\varepsilon(t)$ , полученная при многократном воздействии ИК-излучения на  $n\text{-H}_2$ , включающая кривые  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i(t)$  кратковременной неустановившейся ползучести  $n\text{-H}_2$ , регистрируемые в цикле  $N$ -кратного повторения процедуры включения–выключение потока инфракрасных фотонов. Моменты времени, соответствующие подаче на образец ИК-излучения и выключению ИК-источника, обозначены стрелками. Видна полная аналогия в поведении приращений  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i(t)$  деформации  $n\text{-H}_2$  со временем при выдержке кристалла под действием одновременно нагрузки и ИК-излучения с описанным выше для рис. 3. Обратимый характер деформации твердого  $\text{H}_2$  (появление скачков  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}^i$  и их полное исчезновение) регистрировался для всех испытанных водородных кристаллов при каждом включении и выключении источника ИК-излучения.

Измеренные для  $n\text{-H}_2$  зависимости  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}(t)$  величины скачка деформации от времени для каждого включения источника ИК-фотонов (временной ход  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}$ , обусловленный действием помимо напряжения ИК-излучения) были аппроксимированы двумя — логарифмической

$$\varepsilon(t) = \alpha \ln(\beta t + 1) \quad (1)$$

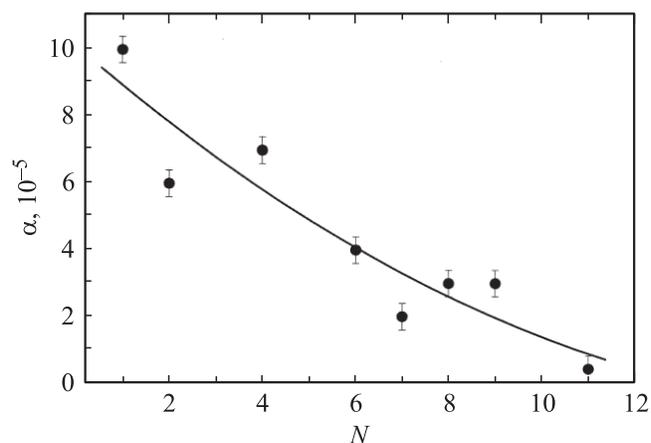
и степенной

$$\varepsilon(t) = \alpha t^\beta \quad (2)$$

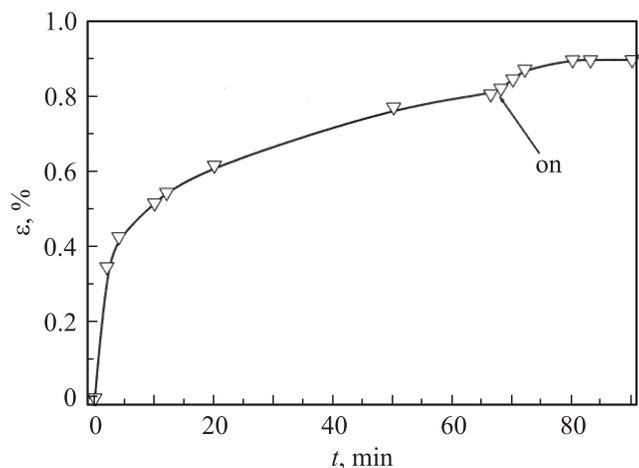
функциями (с постоянными  $\alpha$  и  $\beta$ , подлежащими определению), которые описывают неустановившуюся ползучесть большинства кристаллических веществ в области низких (1) и высоких (2) температур (см., например, [18]), включая квантовую за счет нулевых колебаний дислокационных струн [19] металлических кристаллов и неустановившуюся ползучесть твердого водорода (см. [11,13–17]). Анализ полученных временных зависимостей  $\Delta\varepsilon_{\text{IR}}(t)$  выявил, что для всех измеренных скачков деформации с высокой степенью надежности

они могут быть аппроксимированы логарифмической зависимостью (1). При этом оказалось, что при каждой последующей подаче на водородный кристалл ИК-излучения величина константы логарифмической ползучести непрерывно и резко понижается. На рис. 5 показано типичное поведение величины константы  $\alpha$  с ростом числа включений источника ИК-фотонов для многократно повторяющегося воздействия на образец  $n\text{-H}_2$  ИК-излучения. Учитывая столь резкое понижение константы логарифмической ползучести, следует ожидать, что в пределе большой последовательности воздействий ИК-излучения на  $n\text{-H}_2$  значение постоянной  $\alpha$  будет стремиться практически к нулю. Такое поведение зависимости  $\alpha(N)$  и, следовательно, величины приращения деформации кристаллов может являться следствием упрочнения твердого  $\text{H}_2$  в результате его облучения в ИК-области. Подтверждением возникновения упрочненного состояния  $n\text{-H}_2$  в результате многократного воздействия ИК-излучения явился заметный рост прочности образцов по сравнению с необлученными водородными кристаллами. Об этом же свидетельствует произведенная для режима крипа облученного  $n\text{-H}_2$  оценка эффективной энергии активации, величина  $U_{\text{eff}}$  которой оказалась много выше ( $\sim 15 \text{ K}$ ) полученной из измерений для  $\sigma = \text{const}$ , проведенных „в темноте“ ( $\sim 3.2 \text{ K}$  [7]).

Доказательство несомненного влияния ИК-излучения на пластичность твердого  $\text{H}_2$  было получено в дополнительных экспериментах при попытке инициирования деформации ползучести образцов другим излучением — полосой длин волн, обеспечиваемых синезеленым светофильтром типа СЗС-25. При замене им фильтра ИКС-1 в той же постановке опытов не было выявлено какого-либо влияния излучения на относительное удлинение образцов  $n\text{-H}_2$ , кроме обеспечиваемого приложенной нагрузкой. Так же как и при использовании источника ИК-фотонов малой мощности, в случае



**Рис. 5.** Зависимость величины константы логарифмической ползучести  $\alpha$  твердого  $n\text{-H}_2$ , подвергнутого одновременно воздействию механического напряжения ( $\sigma = 88.2 \text{ kPa}$ ) и ИК-излучения, от числа воздействий на образец ИК-излучения.



**Рис. 6.** Зависимость от времени  $t$  величины  $\varepsilon$  деформации твердого  $p$ - $H_2$ , полученная в результате одновременного воздействия на образец механического напряжения ( $\sigma = 9.8$  кПа,  $T = 1.8$  К) и ИК-излучения. Момент подачи ИК-излучения обозначен стрелкой.

подачи на  $H_2$  лучистого потока в интервале частот, отвечающих длинам волн  $0.32\text{--}0.75\ \mu\text{m}$ , приращение деформации (дополнительно к обеспечиваемой обычным временным ходом  $\varepsilon(t)$  кривых ползучести) не было зарегистрировано.

При подаче ИК-излучения на твердый  $p$ - $H_2$  столь же быстро, как и в случае  $n$ - $H_2$ , регистрировался скачок относительного удлинения, достигнутого в результате приложения механического напряжения  $\sigma = \text{const}$  (рис. 6). Поведение параметров деформации монокристаллических образцов находящихся в режиме ползучести  $p$ - $H_2$  с включением и выключением источника ИК-фотонов оказалось полностью аналогичным описанному выше для поликристаллов  $n$ - $H_2$  и соответствовало установленным ранее аномалиям в поведении с температурой его пластических свойств в области гелиевых температур (см. [14,15]). (Для исследованного  $p$ - $H_2$  ( $\sim 0.2\%$   $o$ - $H_2$ ) и области характерной для него температурной независимости параметров его пластичности кривая  $\varepsilon(t)$  показана только для одного значения температуры  $T = 1.8$  К). Интересно, что, как и в случае  $n$ - $H_2$ , вплоть до температур  $T/\Theta_D \sim 1.5 \cdot 10^{-2}$  не удалось достичь за счет ИК-излучения „сверхпластичности“  $p$ - $H_2$  (несмотря на то что наличие в  $p$ - $H_2$  молекул ортомодификации является идеальным условием для усиления поглощения ИК-фотонов (см. [1,2])). Напротив, вследствие многократного, сравнительно длительного воздействия ИК-излучения на образцы  $p$ - $H_2$  имело место заметное понижение скорости установившейся ползучести для уровня напряжений  $\sigma = \text{const}$  и ограничение достижимых величин деформации при последующем растяжении по сравнению с необлученными кристаллами, а также их хрупкое разрушение, что указывает на имеющее место упрочнение образцов.

## 4. Обсуждение результатов экспериментов

Таким образом, в проведенных экспериментах обнаружено быстрое появление скачков  $\Delta\varepsilon_{IR}$  деформации в результате воздействия ИК-излучения на твердый  $H_2$ , находящийся под действием постоянно приложенного напряжения неизменной величины ( $\sigma = \text{const}$ ). Обнаруженные приращения  $\Delta\varepsilon_{IR}$  не обусловлены изменением температуры кристаллов, величина которой с высокой точностью измерений остается неизменной. Выявлен пороговый и обратимый характер регистрируемой в результате воздействия на образцы ИК-потока деформации  $H_2$  — полное исчезновение возникших при подаче его на  $H_2$  скачков  $\Delta\varepsilon_{IR}$  при выключении источника ИК-излучения. Учитывая несомненную корреляцию в появлении/исчезновении скачков  $\Delta\varepsilon_{IR}$  деформации  $H_2$  с включением/выключением источника ИК-потока, обнаруженные скачки  $\Delta\varepsilon_{IR}$  заведомо обусловлены взаимодействием водорода с электромагнитным ИК-излучением и могут быть классифицированы как „ответ“ на ИК-излучение. Доказательством этого служит быстрота изменения относительного удлинения водородных кристаллов с воздействием ИК-потока — отсутствие инерционности, характерной для традиционных тепловых эффектов, обычно связанной с низкой скоростью воздействия тепла на вещество по сравнению со скоростью света. Подтверждением вывода является также отсутствие реакции образцов на излучение при замене фильтра ИКС-1 фильтром СЗС-25. Возникновение скачков  $\Delta\varepsilon_{IR}$  деформации  $H_2$  может, таким образом, рассматриваться единственно как результат действия на кристаллы  $H_2$  ИК-излучения, поскольку характеризуется полным отсутствием на образцах даже малых температурных „всплесков“  $\geq 2 \cdot 10^{-2}$  К непосредственно в моменты подачи инфракрасных фотонов. (Благодаря чрезвычайно высокой теплопроводности („температуропроводности“) твердого водорода в исследуемой области температур (см. [6]) показания датчиков температуры с их высокой чувствительностью отражают реальную ситуацию в рабочей части испытываемых образцов).

Природа взаимодействия твердого водорода с инфракрасным излучением (см., например, [1,2]) предполагает, что интенсивность его ИК-поглощения на  $\sim 98\%$  обусловлена неполной локализацией колебательно-вращательного возбуждения, обеспечиваемой наличием „двойных“ переходов, когда две водородные молекулы совершают одновременно фундаментальный переход [1,2].

Для одной из них это колебательный  $v = 0 \rightarrow v = 1$  ( $v$  — колебательное квантовое число) переход, в то время как вторая за счет переданной ей дополнительной кинетической энергии изменяет свое основное  $J = 0$  вращательное состояние на  $J = 2$  ( $J$  — вращательное квантовое число). Из наблюдающегося характера индуцированной ИК-излучением деформации  $H_2$  (рис. 2–4)

следует, что величина относительного удлинения, достигнутого водородным кристаллом в результате его ИК-облучения, полностью восстанавливается с выключением источника ИК-фотонов. Обратимый характер деформации указывает обычно [20] на наличие в кристаллах областей, неравновесных относительно конфигурационно фиксируемого первоначального расположения в них молекул, часто разделенных сложными псевдодвойниковыми границами. В случае  $H_2$  это могут быть специфические („поворотного“ типа) [21] границы между областями (см., например, [22]) с нарушенной трансляционной и вращательной инвариантностью кристалла, в которых с поглощением ИК-фотонов возникли условия для опрокидывания молекулярных спинов и реориентации ортомолекул.

Из экспериментов следует, таким образом, что поток ИК-фотонов вносит возмущение в реальную структуру образцов и приводит к появлению областей, охваченных высокоэнергетическими вибранными состояниями вследствие возбуждения ИК-фотонами вращательно-колебательных переходов в молекулярном водороде. При выключении источника ИК-излучения имеет место типичная картина релаксации к „безвибранным“ стабилизированному нагрузкой начальному состоянию, в котором нагруженный кристалл находился до ИК-облучения. При этом деформация обратного знака, регистрируемая после „снятия“ ИК-излучения, являет собой пример „последствия“ [23] или структурной релаксации, характерной для плотных дислокационных ансамблей или обнаруживаемой в неоднородных твердых телах и сложных многофазных системах (см. [24,25]).

Логарифмический закон, установленный для неустановившейся ползучести облученного  $n-H_2$ , указывает [18,19] на дислокационный характер деформации. В охваченных вибранными состояниями областях либо модифицируются типичные для твердого водорода механизмы деформирования [7,11–17], либо появляются новые. Поскольку при температурах жидкого гелия развитие пластической деформации необлученного  $H_2$  определяется вероятностью перехода дислокаций через состояния с повышенной энергией, обеспечиваемые ортоподсистемой кристалла [7,11–17], энергия фотонов может изменить высоту и положение точки перевала (подобно тому как это делает приложенное к образцам механическое напряжение [18]). С другой стороны, дислокации в кристаллах (в том числе водородных) являются низкоэнергетическими осцилляторными возбуждениями. Поэтому за счет появления в спектре кристалла  $H_2$ , в том числе на дислокациях, высокоэнергетических метастабильных состояний — вибронов [1,2] — в результате поглощения ИК-фотонов может иметь место значительное возрастание дислокационной подвижности. В результате конкуренции этих двух аспектов частоты элементарных актов и энергия активации процесса пластического течения облученного  $H_2$  могут в ту или иную сторону отличаться от измерений в темноте.

Обнаруженное в результате облучения твердого  $n-H_2$  ИК-фотонами изменение величины относительного удлинения образцов, предварительно достигнутого приложением механического напряжения неменяющейся величины  $\sigma = \text{const}$ , по своей сути и по своему проявлению аналогично имеющему место для полупроводниковых соединений и щелочно-галогидных кристаллов, для которых изменение деформационных характеристик в результате взаимодействия с видимым светом идентифицированы как фотопластический эффект (ФПЭ) [26–28]. К случаю твердого водорода наиболее подходит аналогия с отрицательным ФПЭ [28], при котором облучение светом приводит к разупрочнению кристалла. Начальное разупрочнение образцов при воздействии ИК-излучения на твердый  $H_2$  на „вибранный“ частоте, соответствующей примерно  $4500 \text{ cm}^{-1}$  ( $\lambda \sim 2 \mu\text{m}$ ), меняется, однако их явным упрочнением в результате сравнительно длительного и многократного облучения. Объяснение изменения знака эффекта должно опираться, скорее всего, на квантовую природу исследованного вещества. Аномальный характер полученного в случае  $n-H_2$  неравенства  $\alpha_{i+1} \leq \alpha_i$  для константы  $\alpha$  с увеличением числа воздействий ИК-излучения может указывать на вовлечение туннельных эффектов в движение дислокаций. В случае твердого  $p-H_2$  развитие деформации обеспечивается, скорее всего, как и в необлученных кристаллах [14–17], дислокационными перегибами [29] — их узкозонным когерентным движением [3,4,30] во вторичном [30] пайерсовском рельефе кристаллической решетки. При поглощении ИК-фотонов может резко возрасти амплитуда колебания определенной моды осциллятора, в том числе входящего в набор образующих перегиб на дислокации. В результате воздействия ИК-излучения движение перегибов может еще более интенсифицироваться, и дислокация в целом должна приобретать еще более высокую подвижность, вследствие чего должен наблюдаться рост деформации  $p-H_2$ . Однако в условиях узкозонного когерентного движения перегибов в  $p-H_2$  даже чрезвычайно малое возрастание температуры образцов должно привести к появлению в кристалле помимо статического, обусловленного напряжением, дополнительного, обеспечиваемого фононами, динамического сбоя уровней перегибов. Когерентный характер их движения в этом случае оказывается существенно нарушенным, и скорость стационарного пластического течения  $p-H_2$ , деформируемого в условиях одновременного действия нагрузки  $\sigma = \text{const}$  и ИК-излучения, при этом должна оказаться заметно пониженной, что, по сути, и наблюдается в экспериментах. Для исследованных модификаций водорода их упрочнение в результате многократного, сравнительно длительного воздействия ИК-фотонов, таким образом, объясняется непротиворечиво в рамках квантовой подвижности обеспечивающих растяжение образцов дефектов. Вовлечение даже слабых тепловых влияний в случае квантовых кристаллов приводит к „гашению“ эффекта, что проявляется в заметном упрочнении образцов.

Обнаруженное упрочнение  $H_2$  в результате сравнительно длительного и многократного воздействия на него ИК-излучения согласуется с результатами [31]. В этой работе был зарегистрирован значительный скачок скорости  $v_t$  поперечного звука в твердом водороде при воздействии на него ближнего ИК-излучения (с характерными длинами волн порядка  $2\ \mu m$ ). С учетом известного соотношения  $G = \rho v_t^2$  между величиной  $G$  модуля сдвига кристалла плотности  $\rho$  с квадратом скорости  $v_t$  поперечного звука в нем (см., например, [18]) рост величины  $v_t$  практически соответствует росту модуля сдвига твердого водорода (при условии сохранения неизменной величины его плотности). Это, по сути, и наблюдалось в экспериментах (если не принимать во внимание возможное изменение ортопарасостава образцов).

В заключение следует снова подчеркнуть, что внешним воздействием электромагнитного поля в интервалах  $0.9\text{--}4.6$  и  $0.32\text{--}0.75\ \mu m$  не удалось обеспечить низкотемпературный переход в „сверхпластическое“ состояние даже в случае твердого  $p\text{-}H_2$ , образованного сферическими, находящимися в основном вращательном состоянии  $J = 0$  молекулами с нулевым ядерным спином. Инициирование такого перехода в твердом  $H_2$  воздействием других видов излучений и волн представляет несомненно большой научный интерес для дальнейших исследований.

## 5. Выводы

1) Обнаружено быстрое приращение относительного удлинения находящихся в режиме ползучести образцов твердого водорода, не сопровождающееся изменением температуры, как в случае  $n\text{-}H_2$  (75%  $o\text{-}H_2$ ), так и для  $p\text{-}H_2$  ( $\sim 0.2\%$   $o\text{-}H_2$ ) при подаче на них в области температур  $1.8\text{--}4.2\ K$  инфракрасного излучения.

2) Установлен пороговый характер эффекта, обнаруживаемого лишь для сравнительно высокой мощности источника ИК-излучения при его воздействии на  $H_2$ .

3) Обнаружено уменьшение относительного удлинения образцов при выключении источника ИК-излучения — обратный ход деформации  $H_2$ , в результате которого имеет место полное исчезновение ее скачков, возникших при облучении водородных кристаллов ИК-фотонами.

4) Для стадии неустановившейся ползучести установлен логарифмический закон изменения во времени индуцированной ИК-излучением деформации  $n\text{-}H_2$ , свидетельствующий о ее дислокационном характере. Обнаружено резкое понижение константы логарифмической ползучести  $n\text{-}H_2$  с нарастанием кратности воздействий ИК-излучения, указывающее на появление в результате многократного ИК-облучения упрочненного состояния образцов.

5) Выявлены рост прочности и понижение скорости низкотемпературного криша как  $n\text{-}H_2$ , так и  $p\text{-}H_2$  в результате сравнительного многократного воздействия

на образцы ИК-излучения, также свидетельствующие об упрочняющем характере его влияния на твердый  $H_2$ .

6) Изменение знака влияния ИК-излучения на кинетику ползучести твердого  $H_2$  непротиворечиво описывается с привлечением представлений о квантовой природе исследованных кристаллических веществ и о квантовом характере подвижности обеспечивающих деформацию дефектов.

7) В результате воздействия ИК-излучения на твердый  $H_2$  переход его в некое особое („сверхпластическое“) состояние не обнаружен.

Автор выражает глубокую благодарность А.В. Кузнецову и И.Б. Добрыденю за помощь соответственно в проведении экспериментов и в обработке экспериментальных результатов, а также М.А. Стржемечному, В.Г. Манжелию, В.Д. Надику, А.И. Прохвятилову, Б.Я. Городилову, А.Г. Белову и П.В. Зиновьеву за обсуждение полученных результатов и полезные замечания.

## Список литературы

- [1] J. Van Kranendonk, G. Karl. Rev. Mod. Phys. **40**, 531 (1968).
- [2] H.P. Gush, W.F.J. Hare, E.J. Allin, H.L. Welsh. Can. J. Phys. **38**, 176 (1960).
- [3] А.Ф. Андреев, И.М. Лифшиц. ЖЭТФ **56**, 2057 (1969).
- [4] А.Ф. Андреев. УФН **118**, 251 (1976).
- [5] E. Kim, M.H.W. Chan. Nature **427**, 225 (2004); Science **305**, 1941 (2004); Phys. Rev. Lett. **97**, 115 302 (2006).
- [6] Physics of cryocrystals / Eds V.G. Manzhelii, Yu.A. Freiman, M.L. Klein, A.A. Maradudin. AIP PRESS, Woodbury, N.Y. (1996); В.Г. Манжельский, М.А. Стржемечный. В кн.: Крио-кристаллы / Под ред. Б.И. Веркина, А.Ф. Прихотько. Наук. думка, Киев (1983). 526 с.
- [7] И.Н. Крупский, А.В. Леонтьева, Л.А. Индан, О.В. Евдокимова. ФНТ **3**, 933 (1977).
- [8] Л.И. Даниленко, М.В. Зиновьев, В.А. Коваль. ПТЭ **2**, 212 (1973).
- [9] Г.Г. Ишанин. Приемники излучения оптических и оптико-электронных приборов. Машиностроение, Л. (1986). 176 с.
- [10] В.А. Горохов. В сб.: Полупроводниковые приборы и их применение / Под ред. Я.А. Федотова. Сов. радио, М. (1961). В. 7. С. 28.
- [11] Д.Н. Большуткин, Ю.Е. Стеценко, Л.А. Индан, А.А. Худотеплая. В кн.: Физические процессы пластической деформации при низких температурах. Наук. думка, Киев (1974). С. 345.
- [12] И.Н. Крупский, А.В. Леонтьева, Л.А. Индан, О.В. Евдокимова. Письма в ЖЭТФ **24**, 297 (1976).
- [13] Л.А. Алексеева, О.В. Литвин, И.Н. Крупский. ФНТ **8**, 211 (1982).
- [14] Л.А. Алексеева, И.Н. Крупский. ФНТ **10**, 327 (1984).
- [15] Л.А. Алексеева, Д.Н. Казаков. ФТТ **49**, 2005 (2007).
- [16] Л.А. Алексеева, А.В. Пустовалова, В.И. Хатунцев, Ю.В. Бутенко. ФНТ **28**, 79 (2002).
- [17] Л.А. Алексеева, И.Б. Добрыденю. Вісн. ХНУ. Сер. Фізика **11**, 43 (2008).

- [18] Ж. Фридель. Дислокации. Мир, М. (1967). 644 с.
- [19] V.D. Natsik, A.I. Osetskij, V.P. Soldatov, V.I. Startsev. Phys. Status Solidi B **54**, 99 (1972).
- [20] В.С. Бойко, Р.И. Гарбер, А.М. Косевич. Обратимая пластичность кристаллов. Наука, М. (1991). 280 с.
- [21] В.В. Белоцерковский, М.А. Стржемечный. ФНТ **15**, 520 (1989).
- [22] J.L. Feldman, J.H. Eggert, J. De Kinder, H.-K. Mao, R.J. Hemley. J. Low Temp. Phys. **115**, 181 (1999).
- [23] Б.Я. Пинес. УФН **76**, 519 (1962).
- [24] Й. Чадек. Ползучесть металлических кристаллов. Мир, М. (1987). 304 с.
- [25] Л.А. Алексеева, В.Д. Нацик, Б.А. Халин, А.В. Пустовалова. ФНТ **14**, 1127 (1988).
- [26] Ю.А. Осипьян, И.Б. Савченко. Письма в ЖЭТФ **7**, 130 (1968).
- [27] Ю.А. Осипьян, В.Ф. Петренко. ЖЭТФ **63**, 1735 (1972); ЖЭТФ **69**, 1362 (1975); ДАН **226**, 803 (1976).
- [28] Ю.А. Осипьян, М.Ш. Шихсаидов. ФТТ **15**, 3711 (1973).
- [29] Б.В. Петухов, В.Л. Покровский. ЖЭТФ **63**, 385 (1972).
- [30] М.А. Стржемечный. ФНТ **10**, 663 (1984).
- [31] П.А. Безуглый, Р.О. Плахотин, Л.М. Тарасенко. ФТТ **13**, 309 (1971).