

УДК 621.039.633

КРИОГЕННОЕ ВОДОРОДНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ УПРАВЛЯЕМОГО ИНЕРЦИАЛЬНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА (ПОЛУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО СЛОЯ ИЗ ТВЁРДЫХ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА)

И.В. Александрова¹, Е.Р. Корешева^{1, 2}, О.Н. Крохин^{1, 2}, И.Е. Осипов³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

³ООО «ЦЭ Интер РАО ЕЭС», Москва, Россия

Физический институт им. П.Н. Лебедева (ФИАН) добился выдающихся результатов в области развития структурно-чувствительных методов для формирования криогенных мишеней с требуемой структурой топливного слоя. На основании проведённых исследований в ФИАН впервые показано, что криогенное водородное топливо (изотопы водорода и их смеси) можно получить в виде ультрадисперсных модификаций или наносистем, которые характеризуются новыми, зачастую уникальными свойствами. Проведённое в работе сравнение свойств твёрдого топлива, находящегося в различных структурных модификациях, позволило заключить, что топливный слой в ультрадисперсном состоянии (типа «водородное стекло») позволяет решить острые проблемы, которые на сегодняшний день крайне актуальны для реализации целей ИТС: минимизация температуры инжекции мишени, снижение интенсивности процессов тепломассопереноса, минимизация неоднородности температуры на поверхности слоя. Отличительные особенности ультрадисперсных слоёв позволяют определить их как новый тип твёрдого топлива, применение которого минимизирует риск механического и теплового разрушения криогенной мишени в процессе её доставки в зону термоядерного горения.

Ключевые слова: инерциальный термоядерный синтез (ИТС), водородное топливо, криогенная мишень, ультрадисперсный слой топлива.

CRYOGENIC HYDROGEN FUEL FOR CONTROLLED INERTIAL FUSION ENERGY (MANUFACTURE OF STABLE SUPERDISPERSED LAYER OF SOLID HYDROGEN ISOTOPES)

I.V. Aleksandrova¹, E.R. Koresheva^{1, 2}, O.N. Krokhin^{1, 2}, I.E. Osipov³

¹P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

³Co Ltd «Inter RAO UES Power Efficiency Centre», Moscow, Russia

The Lebedev Physical Institute (LPI) has outstanding achievements in the development of structure-sensitive methods for cryogenic fuel layer formation with a required structure. For the first time, it was demonstrating that cryogenic hydrogen fuel (hydrogen isotopes and their mixtures) can be obtained in the form of ultrafine modifications or nanosystems, which exhibit peculiar and interesting mechanical and physical properties. Comparative investigations of different structural modifications have shown that the fuel layer in an ultrafine state (type of «glassy hydrogen») can serve acute problems on survivability of fuel layers within ICF targets during their delivery to the reactor chamber. Among them are minimization of the target injection temperature, reducing the rate of heat-and-mass transfer, minimization of the temperature gradient on the layer surface. Distinctive features of the ultrafine fuel layers allow defining them as a new type of the solid fuel, which has enhanced mechanical strength and thermal stability in the process of target acceleration and injection in the area of a thermonuclear burn.

Key words: inertial confinement fusion (ICF), hydrogen fuel, cryogenic target, ultrafine fuel layer.

ВВЕДЕНИЕ

В статье [1] показано, что важнейшей задачей технологии изготовления криогенных мишеней для реализации оптимальной схемы инерциального термоядерного синтеза (ИТС) является поиск условий получения криогенного слоя в изотропном ультрадисперсном состоянии.

Для дальнейшего изложения необходимо уточнить, что представляет собой ультрадисперсный материал. Как сформулировано в работе [2], «ультрадисперсные материалы» включают все конденсированные системы, чей дисперсный компонент настолько мал в одном, двух или во всех трёх измерениях (<100 нм), что геометрический размер морфологического элемента (частица, кристаллит, зерно, пора...)

становится соизмеримым с характеристическим корреляционным масштабом какого-либо физического явления или характерной длиной какого-нибудь транспортного процесса в этом веществе (размер электрического или магнитного домена, длина свободного пробега электронов, длина волны фононов, дислокация или дисклинация и др.).

Отметим, что для криогенных мишеней характерными масштабами такого физического явления, как формирование топливного слоя, являются следующие величины: толщина самого слоя (не менее 200 мкм для реакторных мишеней) и локальные неоднородности на его поверхности (не должны превышать 1 мкм во всех модах). В этом случае можно воспользоваться уточнённой классификацией ультрадисперсности, предложенной в работе [3]: субмикронный диапазон ($d = 0,1\text{—}0,3$ мкм), нанокристаллический диапазон ($d < 100$ нм), аморфное состояние (характерный размер параметра порядка ~ 1 нм). Очень часто для субмикронного диапазона используется термин мелкозернистая структура. Таким образом, термин «ультрадисперсный слой» относится к состоянию топлива, которое характеризуется малой длиной упорядоченности микроструктуры, т.е. малым размером зерна d , и благодаря этому обладает качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками.

К главным физическим причинам особенностей поведения ультрадисперсных материалов можно отнести три: ограничение действия законов классической физики из-за малого размера, значительный рост удельной поверхностной энергии и, наконец, экстремальные условия формирования. По этим причинам данные материалы находятся в неравновесном состоянии, когда могут реализовывать:

- нестабильные (метастабильные) структуры типа фуллеренов, нанотрубок и др.;
- высокотемпературные фазы (алмаз, кубический оксид циркония);
- структурную, концентрационную или фазовую неоднородности по радиусу зерна и др.

Согласно критерию Л.Д. Ландау [4] наноматериалы занимают промежуточное положение между кристаллами и аморфными веществами. Степень неравновесности необходимо учитывать качественно и количественно при разработке, хранении и применении наноматериалов.

Отметим, что вопрос необходимости применения наноматериалов в базовых элементах реактора ИТС (стенка реакторной камеры, активная среда лазерного усилителя, оболочка топливной мишени) неоднократно поднимался на совещаниях МАГАТЭ [5—8].

Что касается криогенного топливного слоя, то в работе [9] было предложено развивать нанотехнологии на основе метода FST (Free-Standing Targets, или бесподвесные мишени). Обоснованность интенсивного развития нанотехнологий в программе ИТС подтверждается результатами теоретических исследований, проведённых в Ливерморской группе (США) [10, 11] с целью оптимизации эффективности сжатия в схеме ИТС. Эти работы показали, что все элементы мишени, предназначенной для экспериментов на мощной лазерной установке NIF, должны представлять собой изотропные нанокристаллические (т.е. ультрадисперсные) среды, поскольку только в этом случае вероятность искажения фронта ударной волны в процессе имплозии мишени минимальна.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

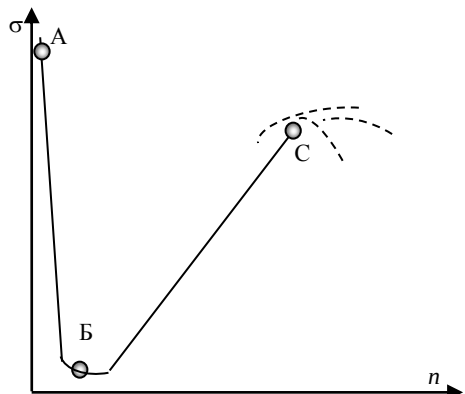


Рис. 1. Схема зависимости прочности материала σ от количества дефектов n кристаллической структуры с учётом возможных отклонений в области высокой концентрации дефектов

Существуют два принципиально различных пути получения высокопрочных материалов. Первый — создание бездефектной кристаллической структуры, второй — создание предельно неупорядоченной структуры [12, 13]. На рис. 1, взятом из работы [12], показана зависимость прочности материала от количества дефектов кристаллической структуры с учётом возможных отклонений в области высокой концентрации дефектов.

Получение бездефектных макрокристаллов в земных условиях практически нереализуемо. При накоплении дефектов прочность кристалла сначала резко падает (участок А—Б на рис. 1). Причиной такого поведения является анизотропия прочностных свойств кристалла и, в частности, наличие в нём выделенных плоскостей лёгкого скольжения дислокаций. В аморфных, мелко-

зернистых и других ультрадисперсных средах, отличающихся высокой плотностью дефектов (n), естественные плоскости скольжения отсутствуют и прочность материала возрастает пропорционально n (область Б—С на рис. 1). По данным работы [12] увеличение прочности можно ожидать вплоть до плотности дислокаций, оцениваемой величиной 10^{13} см^{-2} . При дальнейшем увеличении концентрации дефектов наступает разупрочнение материала вследствие нарушения его сплошности.

Таким образом, перспективным путём повышения устойчивости топливного слоя по отношению к тепловым и механическим воздействиям является его формирование в изотропном ультрадисперсном состоянии. Поиск условий получения топливного слоя именно в этом состоянии, включая аморфное и нанокристаллическое, является важнейшей задачей технологии реакторных криогенных мишеней.

Сравнительный анализ способов получения и стабилизации ультрадисперсного состояния твёрдых водородов. Оценим принципиальную возможность получения твёрдых изотопов водорода в аморфно-нанокристаллическом состоянии.

Известно, что параметр $\varepsilon = \Delta U/kT_{\text{макс}}$ характеризует склонность вещества к стеклообразованию (здесь ΔU — энергия активации диффузии, k — постоянная Больцмана, $T_{\text{макс}} \approx (0,95—0,65)T_{\text{тр}}$ — температура, при которой скорость образования зародышей кристаллизации в расплаве максимальна, $T_{\text{тр}}$ — температура тройной точки вещества). Вещества, легко образующие стёкла, обычно имеют значение параметра аморфизации $\varepsilon > 20—25$, в то время как для металлических расплавов, не образующих стёкол, $\varepsilon \approx 2$. Изотопы водорода занимают промежуточное положение в этой классификации, причём по параметру ε они даже ближе к хорошим стеклообразователям. Действительно, отношение $\Delta U/k$ для водорода составляет 175—280 К, для дейтерия — 276—336 К (данные для DT отсутствуют) [14]. Соответствующие параметры аморфизации составляют: $\varepsilon > 12,6—20$ для H_2 ($T_{\text{тр}} = 13,9 \text{ К}$), $\varepsilon > 14,8—18$ для D_2 ($T_{\text{тр}} = 18,65 \text{ К}$).

Важным параметром процесса стеклования вещества является темп охлаждения расплава q . Из кинетической теории аморфизации следует, что в расплаве не успеет образоваться ни один зародыш кристаллизации в том случае, если темп охлаждения удовлетворяет соотношению [15]

$$q > \left[\frac{\pi^2 k T_{\text{тр}} (1 - \chi)^3 \beta z' L}{8 \alpha R \gamma \chi h} \right] \exp(-\Delta U / k T_{\text{макс}}), \quad (1)$$

где $\chi = T_{\text{макс}}/T_{\text{тр}} = \{[\varepsilon(\varepsilon + 6) + 1]^{1/2} - (\varepsilon - 1)\}/2$; α , z' , β — кинетические коэффициенты; R — универсальная газовая постоянная; γ — относительное пересыщение; h — постоянная Планка; L — скрытая теплота плавления.

Для хороших стеклообразователей требуемый темп охлаждения $q < 100 \text{ К/с}$, в то время как для металлов q может превышать $10^4—10^{10} \text{ К/с}$. По нашим оценкам, чистые изотопы водорода могут быть аморфизованы при темпе охлаждения $q \sim 100 \text{ К/с}$.

В научной литературе имеются некоторые данные по условиям получения твёрдых слоев из изотопов водорода в неравновесном мелкозернистом состоянии. Например, в работе [16] экспериментально показано, что размер кристаллических зёрен твёрдого водорода уменьшается при увеличении скорости роста слоя, а также при снижении температуры подложки. В частности (рис. 2), при увеличении скорости осаждения от 0,4 до 22 мкм/ч характерный размер зерна получаемого слоя уменьшается от 70 до 2,5 мкм (при температуре подложки $\sim 4 \text{ К}$).

В экспериментах Миллера по скоростному вымораживанию D_2 и DT на внутренней поверхности стеклянных оболочек методом FIF (Fast Isothermal Freezing) [17] при температуре стенки

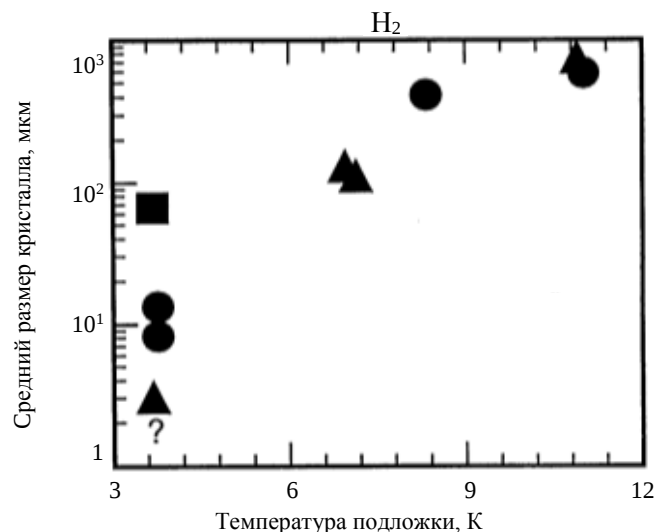


Рис. 2. Зависимость среднего размера зерна от скорости осаждения водорода и температуры подложки (взято из [16]): скорость осаждения 0,4 мкм/ч (■), 2,2 мкм/ч (●), 22 мкм/ч (▲)

4,2—6 К были достигнуты скорости роста слоя 5 мкм/с (или 18 000 мкм/ч), т.е. на ~ 3 порядка выше, чем в экспериментах [16]. Скорость охлаждения топлива при этом составила $q > 100$ К/с. Получаемый твёрдый криогенный слой был прозрачным.

Из сравнения приведённых результатов можно предположить, что размер зёрен в слоях, полученных Миллером, составляет менее 15 нм, т.е. слой находится в ультрадисперсном (аморфно-нанокристаллическом) состоянии.

Мы воспроизвели эксперименты Миллера и получили сходные результаты для D_2 , H_2 и ряда других веществ [18—20]. Схема эксперимента по реализации скоростной переcondенсации кристаллического слоя внутри оболочки методом FIF показана на рис. 3.

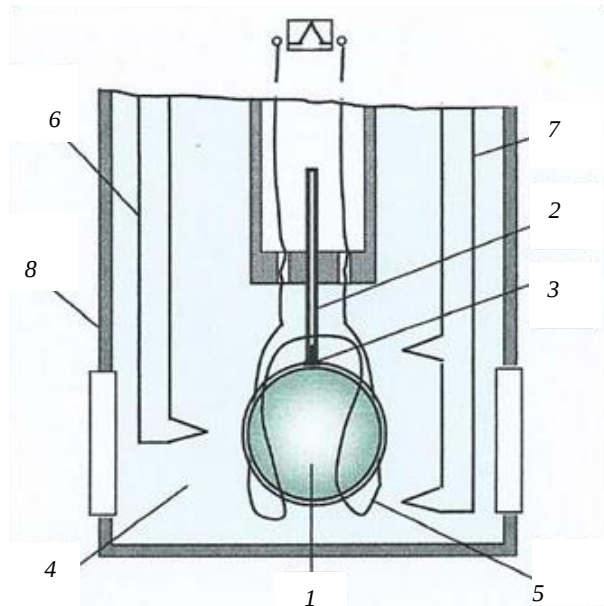


Рис. 3. Схема эксперимента по реализации метода FIF: 1 — оболочка; 2 — капилляр; 3 — клей; 4 — камера с теплообменным гелием; 5 — нихромовый нагреватель диаметром 0,08 мм; 6 — абсолютная термопара Cu/Cu + Fe; 7 — дифференциальная термопара Cu/Cu + Fe; 8 — медный экран

Метод состоит в следующем:

— размещение оболочки, заполненной изотопом водорода, в камере с теплообменным гелием и её охлаждение ниже 6 К. В конце этого этапа на внутренней стенке оболочки образуется крупнозернистый кристаллический слой;

— кратковременный нагрев топлива с помощью импульсного источника тепла выше температуры испарения изотопа с последующей его конденсацией на холодной стенке оболочки с образованием однородного прозрачного слоя.

В качестве импульсного источника тепла в наших экспериментах применялся миниатюрный нагреватель мощностью 2 Вт из нихромовой проволоки диаметром 0,08 мм, размещённый вблизи оболочки с криогенным слоем в тест-камере криостата (см. рис. 3). Тест-камера была заполнена теплообменным гелием под давлением 1 атм. либо жидким гелием при температуре 4,2 К. Достигнутые в системе скорости охлаждения ($q \geq 100$ К/с) позволяли получить внутри оболочки прозрачный слой на основе твёрдых изотопов водорода, если его толщина не превышала 15 мкм.

Чтобы подтвердить гипотезу об аморфно-нанокристаллической природе получаемого прозрачного слоя, мы исследовали его поведение при нагреве от 4,2 К до температуры тройной точки. Было обнаружено, что при нагреве полученного прозрачного слоя выше некоторой пороговой температуры T_a происходила его необратимая кристаллизация. Такое поведение полученного слоя аналогично поведению аморфных и нанокристаллических плёнок. Экспериментально обнаруженные значения пороговой температуры T_a для всех исследованных веществ приведены в табл. 1. Как следует из таблицы, величина T_a может изменяться от $\sim 0,4T_{тр}$ до $\sim 0,5T_{тр}$, т.е. находится в тех же пределах, которые обнаружены для аморфных плёнок металлов, сплавов и полупроводников [21].

Т а б л и ц а 1. Верхняя граница температуры T_a существования прозрачного слоя, полученного по методу скоростной переcondенсации

Материал		$T_{тр}$, К	T_a , К	$T_a/T_{тр}$
Слой	Оболочка			
n- H_2	Стекло	13,9	$6,0 \pm 1,0$	0,43
n- D_2	Стекло	18,65	$9,0 \pm 1,0$	0,48
H_2/D_2 (50/50)	Стекло	15,8—16,4	$8,0 \pm 0,8$	0,49—0,51
Ne	Стекло	24,54	$12,0 \pm 0,4$	0,49
N_2	Лавсан	63,15	$32,0 \pm 2,0$	0,51
Ar	Лавсан	83,81	$38,0 \pm 2,0$	0,45

Примечание: n- H_2 — нормальный водород, n- D_2 — нормальный дейтерий.

В соответствии с задачей настоящей работы важным моментом является подтверждение возможности формирования ультрадисперсного твёрдоговодородного слоя внутри незакреплённых движущихся оболочек, которое и было выполнено экспериментально при использовании метода FST.

Эксперименты показали, что скорость охлаждения расплава из изотопов водорода внутри оболочки в методе FST достигает 110 К/с, т.е. превышает установленное значение скорости охлаждения, необходимой для аморфизации изотопов водорода ($q \sim 100$ К/с). В процессе эксперимента из канала формирования вылетала мишень с прозрачным криогенным слоем, который оставался прозрачным при нагреве от 4,2 К до некой пороговой температуры $T_a = (0,4—0,5)T_{тр}$. При температуре T_a происходила необратимая рекристаллизация прозрачного слоя (рис. 4). Таким образом, можно сделать вывод, что метод FST позволяет сформировать внутри незакреплённой движущейся оболочки твёрдый прозрачный слой из изотопов водорода в состоянии аморфно-нанокристаллическое.

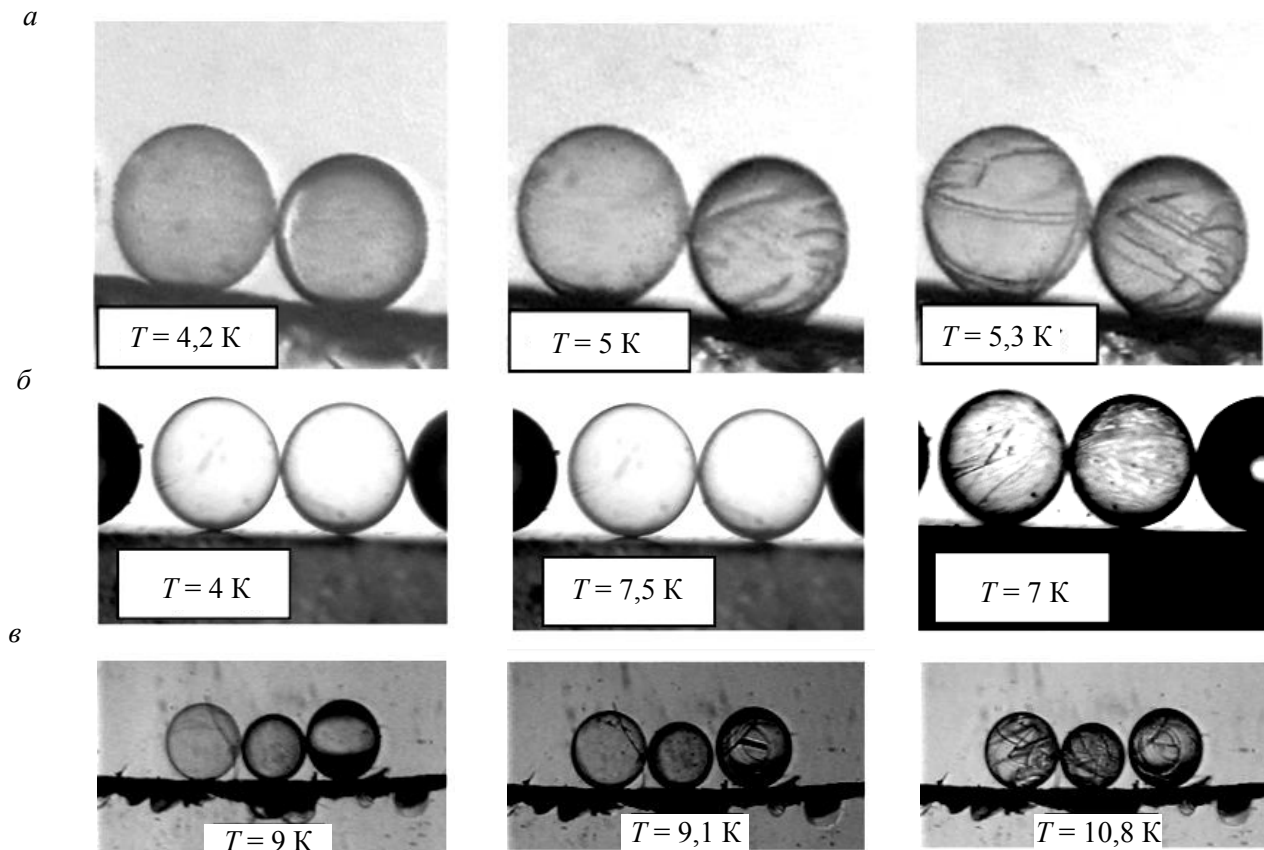


Рис. 4. Рекристаллизация прозрачного криогенного слоя при нагреве оболочки до пороговой температуры T_a : *a* — оболочки из стекла (Ø 540 и 450 мкм) заполнены нормальным водородом (n-H₂) до 27 атм. (300 К), толщина слоя 2 мкм, $T_a = 5$ К, разрежение в канале формирования (КФ) 0,02 торр; *б* — оболочки из полистирола (Ø 938 и 949 мкм) заполнены равнопроцентной смесью H₂ + D₂ до 112 атм. (300 К), толщина слоя 16 мкм, $T_a = 7,5$ К, разрежение в КФ 0,01 торр; *в* — оболочки из стекла (Ø 550—600 мкм) заполнены нормальным дейтерием (n—D₂) до 80 атм. (300 К), толщина слоя 6,3 мкм, $T_a = 9$ К, разрежение в КФ 0,02 мм рт. ст.

Однако данное ультрадисперсное состояние вещества метастабильно и потому имеет тенденцию к рекристаллизации, что и было обнаружено экспериментально.

Способы стабилизации ультрадисперсного слоя. Существуют ли способы стабилизации аморфно-нанокристаллического состояния?

Известно, что введение в вещество определённых примесей позволяет, с одной стороны, повысить уровень дисперсности материала в процессе его кристаллизации, с другой, затормозить процесс роста кристаллических зёрен при нагреве, т.е. повысить тепловую устойчивость ультрадисперсной структуры.

При сопоставимых условиях формирования образца кристаллические зёрна в сплавах и металлах с примесями являются, как правило, более мелкими, чем в чистых металлах [22—24]. При этом большинство примесей задерживают процессы рекристаллизации, но в различной степени. В работах [25—29] имеются указания, что на температуру рекристаллизации материала оказывают влияние температура плавления примесей, их атомный радиус и валентность. Хотя в литературе отсутствуют прямые указания на возможность получения ультрадисперсного водорода, можно ожидать, что основные закономерности формирования и стабилизации такого класса структур, известные для металлов, полупроводников и других веществ, сохраняются и для изотопов водорода.

В случае реакторных мишеней, когда толщина криогенного слоя достигает 200 мкм и более, в методе FST проблематично получить скорость охлаждения мишеней порядка 100 К/с, необходимую для формирования аморфных слоёв из чистых изотопов водорода. Однако наличие определённых примесей может привести к увеличению энергии активации диффузии ΔU и, тем самым, к увеличению параметра аморфизации вещества ε ($\varepsilon = \Delta U/kT_{\text{макс}}$).

Из исследований по аморфизации металлов [30] известно, что введение некоторых примесей позволяет снизить требуемую скорость охлаждения расплава на несколько порядков. Например, если для стеклования чистых металлов необходимы сверхвысокие скорости охлаждения расплава — выше 10^{10} К/с, то в жидких сплавах, содержащих до 20% определённых добавок (сплавы металл—металлоид), стеклование возможно при реально достижимой скорости охлаждения 10^4 — 10^6 К/с. Кроме того, рост энергии активации диффузии тормозит диффузионные процессы в веществе, что снижает риск рекристаллизации ультрадисперсного слоя при нагреве.

Таким образом, можно ожидать, что наличие определённых примесей к водородному топливу приведёт:

— к снижению скорости охлаждения расплава, необходимой для получения ультрадисперсного криогенного слоя;

— к увеличению тепловой устойчивости ультрадисперсного слоя и расширению температурной области его существования.

Экспериментальный комплекс. Для проверки высказанных предположений был проведён цикл экспериментальных исследований [31—35], на основании которых была разработана методика получения топливного слоя в термостойком ультрадисперсном состоянии. Данная методика запатентована в России [36].

В наших исследованиях использовался специализированный экспериментальный FST-комплекс, созданный в ФИАН. Комплекс позволяет варьировать ключевые параметры эксперимента в широких пределах, что даёт возможность изменять микроструктуру формируемого внутри оболочки криогенного слоя, а также исследовать его устойчивость по отношению к тепловым и механическим нагрузкам. Рабочие параметры комплекса следующие:

Плотность газа внутри оболочки (нормировано к плотности газа в критическом состоянии $\rho_{\text{кр}}$) . . .	0,044—1,49
Давление заполнения при 300 К . . .	1—1000 атм.
Давление теплообменного гелия в модуле формирования . . .	1 атм. — 10^{-4} мм рт. ст.
Добавки (изотопы водорода или неон) . . .	0,2—20% (об.)
Температура охлаждения мишени, К/с . . .	$\sim 10^{-3}$ — $2 \cdot 10^3$
Температура мишени . . .	4,2—40 К
Частота внешних механических воздействий . . .	0,3 Гц — 3 МГц
Система оптического наблюдения:	
пространственное разрешение . . .	От 1 до 2,5 мкм
временное разрешение . . .	40 мс

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕРМОСТОЙКОГО УЛЬТРАДИСПЕРСНОГО КРИОГЕННОГО СЛОЯ НА ОСНОВЕ ТВЁРДЫХ ВОДОРОДОВ

Условия эксперимента. Отличительной особенностью экспериментов являлось формирование топливного слоя внутри замкнутого микрообъекта (сферической оболочки), что потребовало разработки новых оригинальных устройств и методов для реализации различных факторов воздействия на формируемый криогенный слой.

Ультрадисперсный прозрачный слой формировался методом FST при относительно высокой скорости охлаждения (не менее 1 К/с). В качестве примесей был использован либо изотоп водорода с отличной от основного компонента тройной точкой, либо неон. В экспериментах изучена рекристаллизация твёрдого прозрачного криогенного слоя под воздействием термоциклической обработки (ТЦО). Один цикл ТЦО проводился в следующем порядке: изотермический отжиг ($T = 4,4$ — 6 К, $t = 20$ — 45 мин) $\rightarrow$ нагрев до $T = 16$ — 40 К $\rightarrow$ охлаждение до $T = 5$ — 6 К.

Эксперименты были проведены при следующих условиях:

— параметры сферических оболочек: $\varnothing$ 0,4—0,6 мм (стеклянные оболочки), $\varnothing$ 0,9—1,5 мм (полистироловые оболочки);

- давление заполнения смесью газов: 20—500 атм. при 300 К;
- основной компонент смеси: H_2 или D_2 (от 50 до 99,9% по объёму);
- примесный компонент смеси: HD (0,03—9%), D_2 (1—50%), Ne (20%);
- способ формирования криогенного слоя: теплоотвод через пятно контакта между оболочкой и охлаждённой стенкой (по методу FST).

Методы получения и измерения концентрации примесей и заполнения сферических оболочек газом изложены в [37].

Ультрадисперсный слой на основе смесей $H_2 + HD$. В серии экспериментов изучена смесь на основе водорода с примесью HD, концентрация которой составляла от 0,03 до 9,9%. Диагностика состава смеси осуществлялась с помощью масс-спектрометра МИ3305, который имеет следующие пределы обнаружения изотопов водорода: 0,01% для H_2 и D_2 , 0,02% для HD [38]. Заметим, что в данных экспериментах тройная точка примеси превышала тройную точку основного компонента.

Температура оболочек перед входом в канал формирования составляла 300 К (стеклянные оболочки) или 30—45 К (полистироловые оболочки), давление заполнения газом внутри оболочек составляло от 40 до 100 атм. (300 К). Время пребывания оболочки в канале формирования составляло ~0,5—4 с, скорость охлаждения — 1—100 К/с, минимальная температура оболочки с вымороженным внутри неё прозрачным криогенным слоем — 5 К. При исследовании температурной устойчивости прозрачности слоя, образовавшегося внутри оболочки, её нагревали от 5 до 16—40 К, а затем вновь охлаждали до 5 К со средней скоростью ~1 К/мин. Эволюция слоя наблюдалась визуально с помощью оптической системы, а также записывалась на видеомagneтофон. Пространственное разрешение оптической системы составляло от 1 до 2,5 мкм.

Как правило, при первом цикле нагрева прозрачный криогенный слой не изменял своего качества. Обнаружено, что два или более циклов нагрева-охлаждения приводят к возникновению переходного состояния, когда в прозрачном слое появляются отдельные крупномасштабные неоднородности (рис. 5). Результаты экспериментов представлены в табл. 2. Как следует из таблицы, начальная температура исчезновения неоднородностей варьируется в диапазоне $T = (14,3—22,2) \pm 1,5$ К. Зависимость температуры исчезновения неоднородностей от числа циклов термообработки для оболочки № 3 показана на рис. 6. В ряде экспериментов

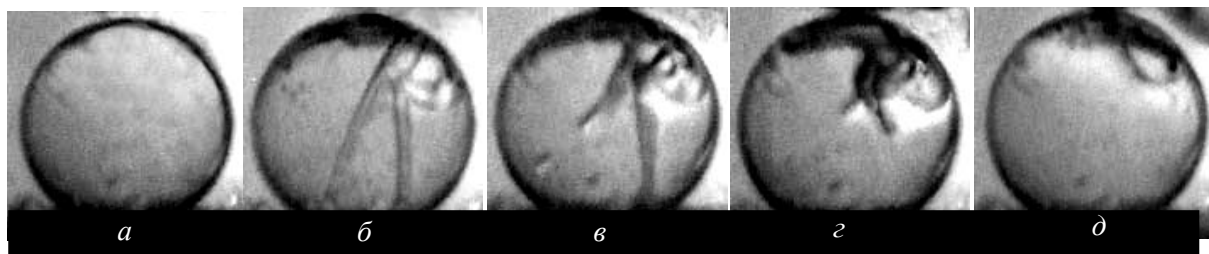


Рис. 5. Появление и эволюция неоднородности в криогенном слое при втором нагреве оболочки (см. табл. 2, оболочка № 3): а — прозрачный слой при $T = 5$ К; б — появление неоднородности в прозрачном слое при $T = 8,4$ К; в—д — процесс исчезновения неоднородности в диапазоне температуры $(16,0—16,5) \pm 1,5$ К

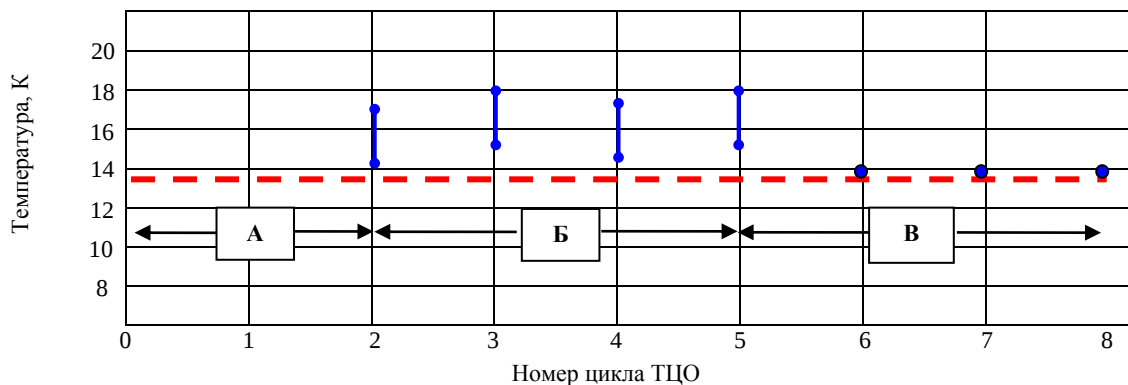


Рис. 6. Эволюция прозрачного криогенного слоя в процессе ТЦО в оболочке № 3 (см. табл. 2). Состав слоя: 99,47% H_2 , 0,53% HD, $D_2 < 1\%$. Крупномасштабная неоднородность возникла в слое при $T = 8,4$ К в процессе вторичного отогрева оболочки. Область А: прозрачный слой; 3 мм рт. ст. теплообменного (т/о) гелия в тестовой камере. Область Б: переходное состояние; 3 мм рт. ст. т/о гелия в тестовой камере. Область В: кристаллический слой; 20 мм рт. ст. т/о гелия в тестовой камере: — температура начала исчезновения неоднородностей, - - - тройная точка водорода (13,96 К)

было исследовано влияние ортопара состава водорода на термостойкость прозрачного слоя с малой примесью HD. Проброс стеклянных оболочек, заполненных водородом с разным ортопара составом (75, 60 и 50% орто- H_2), был осуществлён при разрежении в канале формирования 0,01 мм рт. ст. Давление заполнения оболочек газом составляло 50—73 атм. при 300 К, состав газа: H_2 (99,47%) и примесь HD (0,53%).

Т а б л и ц а 2. Стабильность криогенного слоя при тепловой обработке

№	P , мм	n	Стабильность криогенного слоя	T , К	ΔT , К
1	0,001	3	Первый и второй нагрев до 20 К — слой прозрачен	5,7	17,5—18,9
2	0,001	3	Первый и второй нагрев до 20 К — слой прозрачен	10,0	22,2—24,2
3	0,003	2	Первый нагрев до 20 К — слой прозрачен	8,4	16,0—16,5
4	0,003	4	1—3-й нагревы до 20 К — слой прозрачен	8,2	15,2—16,2
5	0,01	1	Отжиг в течение 22 мин при 5 К: в прозрачном слое образуется неоднородность	5,0	14,3—15,6
6		1	Полная кристаллизация слоя после заполнения камеры гелием до 15 мм рт. ст.	5,0	14,0—14,1

Примечание: № — номер стеклянной микросферы, P — давление в тестовой камере, n — номер цикла, когда появляется неоднородность, T — температура появления неоднородности, ΔT — диапазон исчезновения, ошибка в измерении температуры: $\pm 1,5$ К (№ 1—5), $\pm 0,1$ К (№ 6).

Эксперимент проводился по следующей схеме: инъекция оболочки из канала формирования в тест-камеру ($T = 5$ К) → отжиг ($T = 5$ К, $t = 20$ мин) → нагрев до $T = 23,5$ К → охлаждение до $T = 5$ К. Результаты экспериментов приведены в табл. 3. Как следует из таблицы, в каждой из восьми исследованных оболочек сначала образовывался прозрачный криогенный слой. Только в одном случае (оболочка № 3 из табл. 3) слой рекристаллизовался в процессе первого отжига. В остальных случаях слой оставался прозрачным в процессе отжига и первого цикла ТЦО (нагрев—охлаждение). Таким образом, можно заключить, что изменение концентрации ортоводорода в диапазоне 50—75% не оказывает существенного влияния на поведение прозрачного слоя.

Т а б л и ц а 3. Влияние ортосостава водорода на стабильность прозрачного слоя

№	α , %	А	Б	В
1	60	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
2	50	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
3	75	Прозрачный	Появление неоднородности	Кристаллический
4	60	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
5	75	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
6	60	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
7	75	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный
8	60	Прозрачный	Прозрачный	Прозрачный

Примечание: № — номер исследованной оболочки, α — концентрация ортомодификации водорода внутри оболочки, А — состояние слоя сразу после инъекции оболочки ($T = 5$ К), Б — состояние слоя после отжига ($T = 5$ К, $t = 20$ мин), В — состояние слоя после первого цикла ТЦО, проведённого в диапазоне температуры $T = 5—23,5$ К.

Состояние слоя при первом нагреве оболочки № 7 (см. табл. 3) со скоростью 5 К/мин показано на рис. 7. Видно увеличение толщины слоя на дне оболочки при нагреве выше тройной точки водорода, которое образуется как результат гравитационного стекания жидкого водорода.

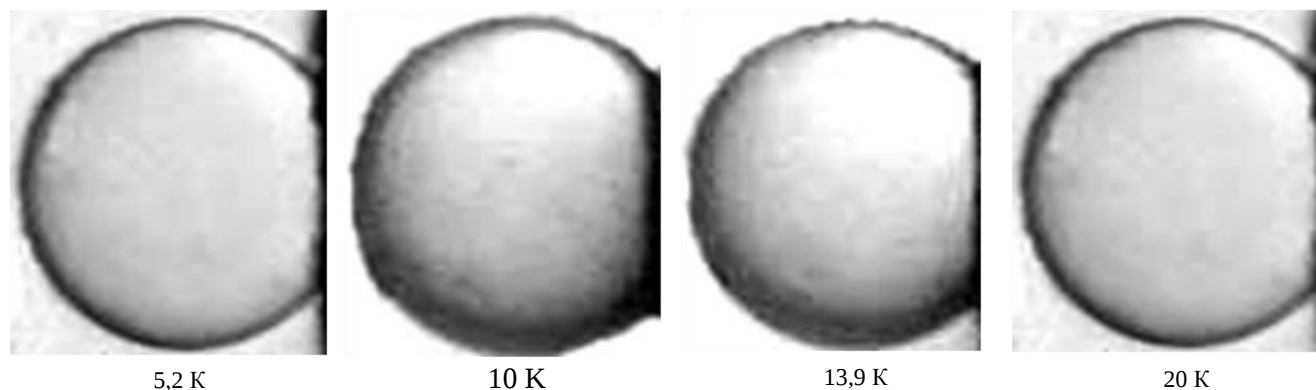


Рис. 7. Прозрачный криогенный слой (H_2 с примесью 0,53% HD) не кристаллизуется при первом нагреве от 5 К до тройной точки водорода ($T_{тр} = 13,96$ К) и выше

Стабилизирующее воздействие HD-примеси на слой водорода было обнаружено также в экспериментах, в которых было исследовано несколько оболочек из стекла. Давление заполнения оболочек га-

зом составляло 65—75 атм. при 300 К, состав газа: 90,9% H_2 , 8,9% HD, остальные примеси (CO_2 , CO, N_2 и др.) — менее 0,2%. При пробросе через канал формирования (при разрежении в канале 0,08 мм рт. ст.) в оболочках образовался прозрачный слой, который не изменил своего качества в течение трёх циклов ТЦО. Лишь при четвёртом нагреве появились неоднородности в прозрачном слое.

В этих же экспериментах было проведено исследование эволюции кристаллического слоя при импульсном нагреве. Было обнаружено, что в результате соударения с горячей мишенью, инжектированной в камеру, кристаллический слой внутри оболочки, находящейся при $T = 5$ К, просветляется и сохраняет свою прозрачность в последующих двух циклах ТЦО.

Сравнительные эксперименты на смеси водорода с малым количеством HD (0,015—0,11%), а также на водороде без примесей показали, что слой водорода с примесью HD менее 0,11% ведёт себя так же, как и слой из чистого H_2 , т.е. кристаллизуется при нагреве до пороговой температуры T_a (см. табл. 1).

В серии экспериментов, проведённых с оболочками из полистирола, был сформирован прозрачный слой из смеси 95% H_2 + 5% HD. Оболочки имели диаметр 1,2—1,5 мм и были покрыты снаружи тонким слоем из Pd либо из сплава Pt/Pd. Давление заполнения — 275 атм. при 300 К, средняя толщина слоя — 44—51 мкм. Начальная температура входа оболочек в канал формирования составляла 45 К, конечная температура — 5 К, время движения оболочки в канале — ~2 с, скорость охлаждения оболочки в процессе формирования слоя $dT/dt > 20$ К/с.

Эти эксперименты впервые продемонстрировали возможность формирования толстого прозрачного криогенного слоя методом FST с применением малых примесей в составе водорода. Результаты вымораживания показаны на рис. 8.

Следует отметить, что длительный отжиг часто приводит к появлению крупномасштабных неоднородностей в прозрачном слое. Например, отжиг в течение 45 мин, проведённый при $T = 5$ К для оболочки из полистирола с первоначально прозрачным слоем толщиной 44 мкм (состав слоя: H_2 + 5% HD), привёл к появлению неоднородности, которая исчезла лишь при нагреве до 21,0—22,5 К, т.е. при температуре, превышающей как тройную точку H_2 ($T_{тр} = 13,9$ К), так и тройную точку HD ($T_{тр} = 16,6$ К). Фотография мишени после отжига показана на рис. 9.

Эксперименты показали, что необходимым условием формирования стабильного прозрачного криогенного слоя внутри оболочки является достаточно высокое разрежение в модуле формирования и тестовой камере (не хуже 0,01 мм рт. ст.). Заполнение камеры теплообменным гелием приводит к кристаллизации прозрачного слоя (рис. 10). Полученные кристаллы плавятся в узком диапазоне температуры 14,0—14,1 К, т.е. вблизи тройной точки чистого H_2 (циклы 6—8 на рис. 6 и оболочка № 6 в табл. 2).

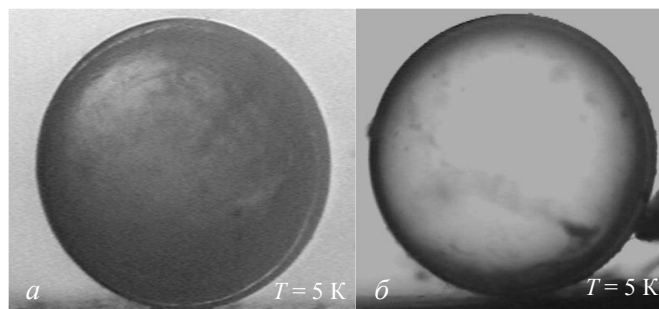


Рис. 8. Вымораживание толстого слоя твёрдого водорода с небольшой примесью HD: а — оболочка из полистирола $\varnothing 1400$ мкм, внешнее покрытие из сплава Pt/Pd толщиной 150 Å, состав слоя: 95% H_2 , 5% HD, средняя толщина слоя 50 мкм; б — оболочка из полистирола $\varnothing 1250$ мкм (без покрытия), состав слоя: 95% H_2 , 5% HD, средняя толщина слоя 41 мкм

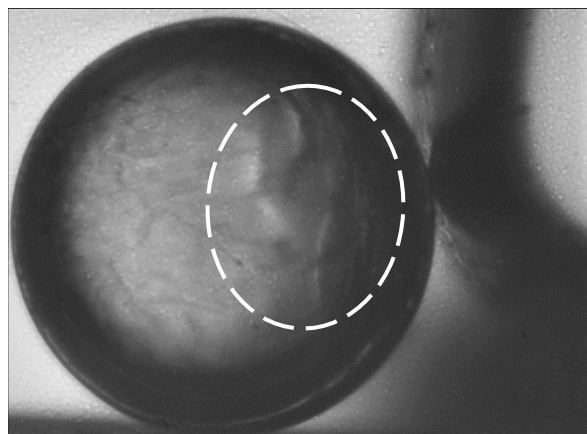


Рис. 9. Отжиг при $T = 5$ К в течение 45 мин приводит к образованию неоднородностей в прозрачном криогенном слое. Оболочка из полистирола $\varnothing 1200$ мкм. Толщина криогенного слоя 44 мкм. Состав слоя: 95% H_2 , 5% HD

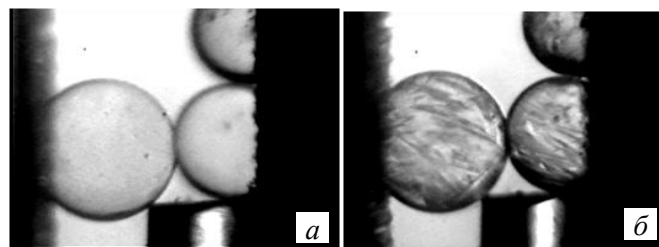


Рис. 10. Кристаллизация прозрачного слоя при охлаждении оболочек в присутствии теплообменного гелия при давлении 15 мм рт. ст.: а — $T = 18$ К, жидкий слой; б — $T = 4,5$ К, оболочка из стекла, давление заполнения 75 атм., состав газа: 99,7% H_2 , 0,3% HD

Таким образом, в условиях вакуума была продемонстрирована возможность формирования криогенного слоя, прозрачного в широкой области существования твёрдой фазы водорода от 5 К до тройной точки. Установлено, что концентрация HD-примеси в H_2 должна превышать 0,11%, при этом количество примеси, обеспечивающее максимальную стойкость прозрачного слоя при ТЦО, соответствует 8,9%.

Ультрадисперсный слой на основе смеси D_2 с различными примесями. Смесь D_2+H_2 . В серии экспериментов была исследована температурная эволюция криогенного слоя, приготовленного из смеси водорода и дейтерия при вариации каждого компонента от 0 до 100%. Проброс стеклянных оболочек, заполненных исследуемой смесью до давления 44—70 атм. при 300 К, осуществлялся в вакуумном канале FST-формирования с винтовой 17-витковой вставкой. Разрежение в канале и тестовой камере при этом составляло 0,01 мм рт. ст. Всего в этих экспериментах было исследовано 18 оболочек из стекла.

Эксперименты убедительно свидетельствуют о следующем:

— отсутствию рекристаллизации слоя из смеси H_2 с добавкой дейтерия в количестве 5—20% (от объёма) при ТЦО в диапазоне температуры 5,0—23,5 К (поведение, аналогичное слою из смеси H_2 с малой добавкой HD). Слой также сохранял свою прозрачность при отжиге: температура отжига 5 К, длительность 20 мин;

— рекристаллизации слоя из смеси 50% D_2 + 50% H_2 при нагреве выше 9,4—11 К;

— рекристаллизации слоя из смеси 95% D_2 + 5% H_2 при нагреве выше 9 К.

Температура рекристаллизации смеси с малой примесью водорода примерно совпадает с значением T_a , обнаруженным для чистого дейтерия в опытах по скоростной перекомденсации (см. табл. 1).

То же самое относится к эквимольной смеси $D_2 + H_2$.

Таким образом, результаты экспериментов, в основном, подтверждают общие закономерности поведения прозрачных аморфно-нанокристаллических слоёв, обнаруженные ранее (см. рис. 4).

В то же время в диапазоне концентрации дейтерия ~1—20% прозрачный слой не претерпевал рекристаллизации по крайней мере в первом цикле ТЦО.

Зависимость температуры рекристаллизации от концентрации D_2 в смеси $D_2 + H_2$ показана на рис. 11.

Смесь $D_2 + HD$. В эксперименте были исследованы шесть стеклянных оболочек диаметром 400—500 мкм, заполненных дейтерием с примесью HD до давления 60—70 атм. (300 К). Концентрация примеси в различных оболочках варьировалась в пределах 4,95—10%. Элементный состав газовой смеси, которой были заполнены оболочки, показан в табл. 4.

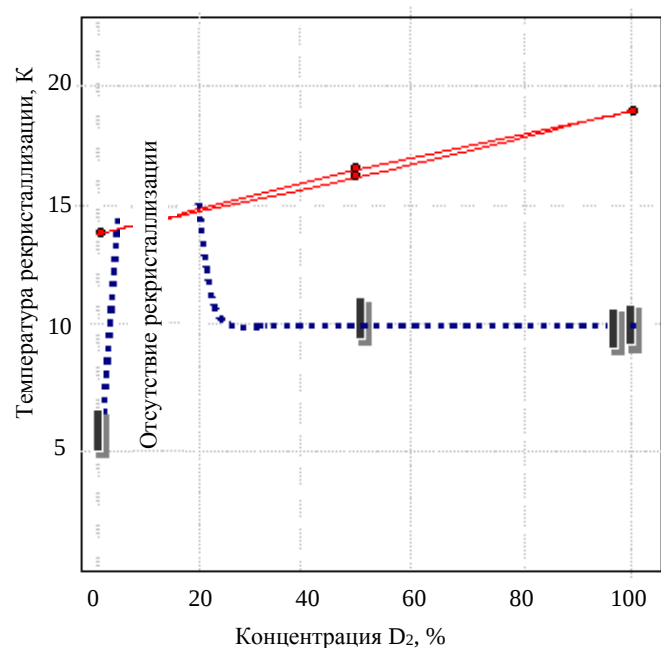


Рис. 11. Тепловая устойчивость криогенного слоя в зависимости от концентрации D_2 в смеси $D_2 + H_2$: ● — температура плавления смеси

Т а б л и ц а 4. Состав газовой смеси в эксперименте со смесью $D_2 + HD$

№ камеры	D_2 , %	HD, %	H_2 , %	Другие примеси	
				Тип газа	%
1	94,15	5,85	Нет	N_2 , CO, CO_2 , C—H	0,23
2	95,50	4,95	< 0,01	O_2 , CO_2 , C—H	0,09
3	90,00	10,00	< 0,02	N_2 , CO, O_2 , CO_2 , C—H	0,13
4	91,10	9,90	Нет	N_2 , CO, O_2 , CO_2 , C—H	0,18
5	99,55	0,04	< 0,01	Нет	Нет

Во всех оболочках, независимо от концентрации добавки, методом FST был первоначально сформирован прозрачный слой. В течение 20-минутного отжига, который происходил при $T = 5,5$ К, во всех оболочках образовались крупномасштабные неоднородности (рис. 12).

Смесь D_2+Ne . В данном эксперименте исследованы стеклянные оболочки, заполненные дейтерием с примесью неона в количестве 20%. Давление заполнения оболочек газом составляло ~125 атм. (стеклянные) и 300 атм. (полистироловые). Проброс мишеней осуществлялся в винтовом канале формирования. Общее количество исследованных оболочек составило 30 штук. Экспериментально исследовано три режима охлаждения смеси внутри оболочки: быстрый, средний и медленный.

Режим быстрого охлаждения: формирование слоя при пробросе оболочек в канале, заполненном теплообменным гелием до давления 3 мм рт. ст. Теплоотвод осуществляется через пятно контакта между оболочкой и стенкой канала формирования, а также через окружающий теплообменный гелий. Согласно нашим оценкам [39] скорость охлаждения в этом случае составляет 100 К/с и выше. В условиях эксперимента ошибка в определении температуры составляла не более 0,1 К.

В данном режиме внутри оболочек образовывался непрозрачный криогенный слой со структурой типа «мелкозернистая» и характерным размером зерна 10—20 мкм (рис. 13, а). Особенности эволюции слоя при нагреве иллюстрирует рис. 13, а—ж.

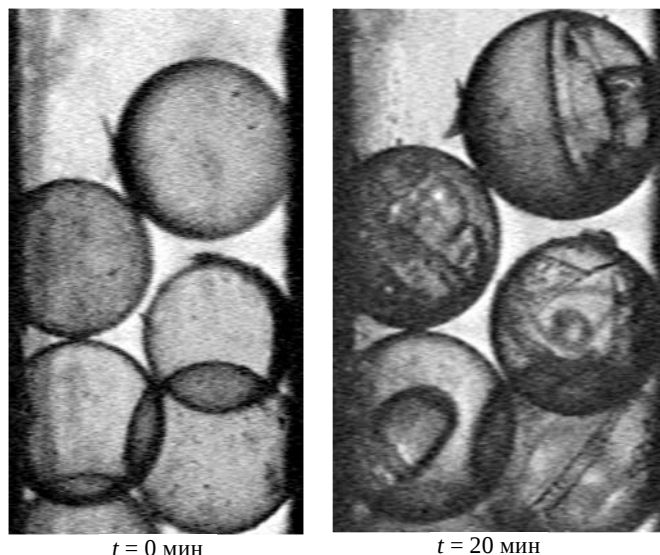


Рис. 12. Смесь $D_2 + 5\text{—}10\%$ HD. Появление неоднородностей в прозрачном слое в процессе отжига при $T = 5,5$ К

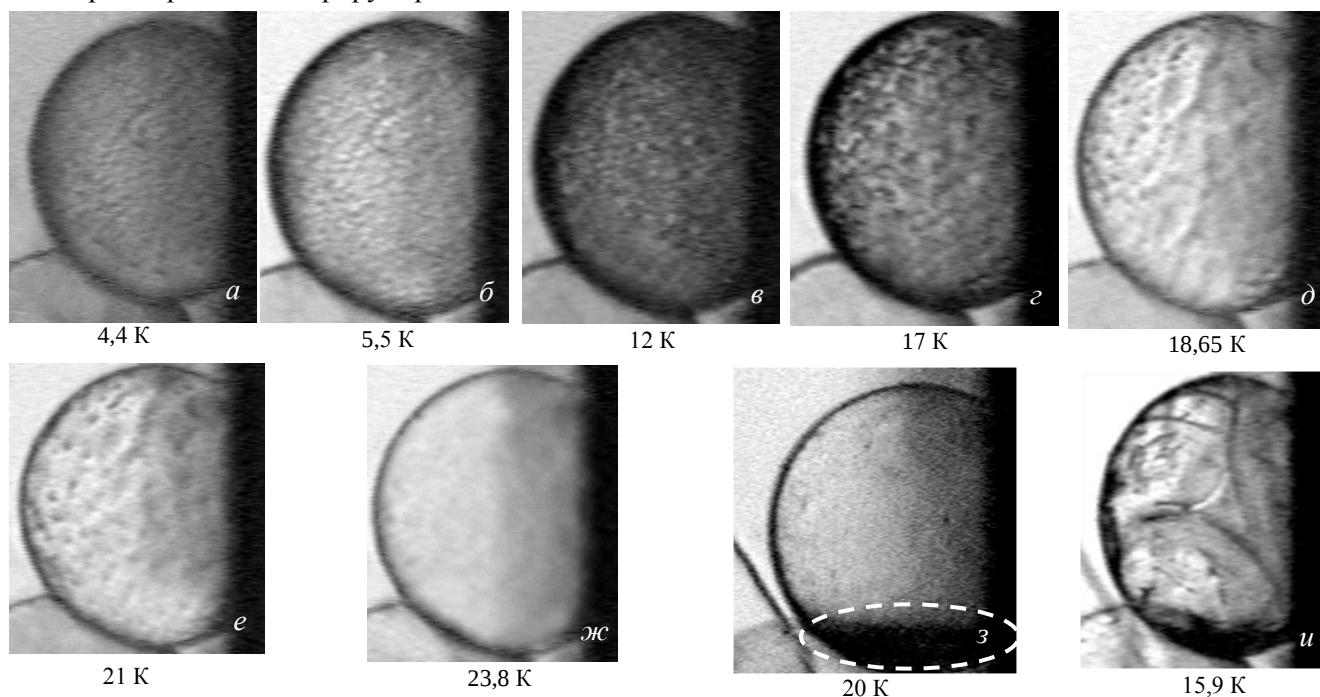


Рис. 13. Особенности температурной эволюции криогенного слоя из смеси 80% $D_2 + 20\%$ Ne. В камере теплообменный гелий под давлением 3 мм рт. ст.: а—ж — процесс нагрева; ж—и — процесс охлаждения

При температуре тройной точки дейтерия ($T_{тр} = 18,65$ К) заметная часть вещества слоя плавится. По завершении процесса плавления на стенке оболочки остаётся некая «сетка локальных уплотнений» (см. рис. 13, д, е), которая плавится в диапазоне температуры от $T_1 = 23,5$ К (начало плавления) до $T_2 = 23,8$ К (конец плавления). Такое поведение слоя показывает, что данная «сетка локальных уплотнений» пред-

ставляет собой твёрдый раствор неона с небольшой примесью дейтерия. Оценим количество дейтерия в данном твёрдом растворе.

Из закона Рауля для идеальных растворов следует [40]

$$T = \sum_{i=1}^n X_i T_i, \quad (2)$$

где T — температура начала плавления твёрдого раствора, состоящего из n компонентов; X_i — концентрация i -го компонента; T_i — тройная точка i -го компонента.

Предполагая, что «сетка локальных уплотнений» образует идеальный раствор $D_2 + Ne$, из соотношения (2) можно оценить количество дейтерия в этом растворе:

$$T_1 = X_1 T_{\text{тр}1} + X_2 T_{\text{тр}2}, \quad (3)$$

где T_1 — температура начала плавления раствора; X_1, X_2 — количество дейтерия и неона в растворе соответственно; $T_{\text{тр}1} = 18,65 \text{ К}$ — тройная точка дейтерия; $T_{\text{тр}2} = 24,54 \text{ К}$ — тройная точка неона.

Из (3) следует, что содержание неона в «сетке локальных уплотнений» составляет 82% (соответственно количество дейтерия равно 0,18%):

$$X_2 = (T - T_1)/(T_2 - T_1) \approx 0,28. \quad (4)$$

Таким образом, лишь около 4% от общего количества дейтерия образует твёрдый раствор с неоном в исходной смеси (80% D_2 + 20% Ne).

Сделаем несколько замечаний к обсуждаемому эксперименту.

Образование твёрдого раствора. Как показали наши исследования по скоростному вымораживанию прозрачного слоя методом FIF, при отводе тепла от поверхности оболочки через теплообменный гелий процесс образования слоя из чистых изотопов водорода всегда сопровождается капельной конденсацией в объёме. При использовании примесей процесс капельной конденсации в объёме инициируется легче, поскольку молекулы примеси, отличающиеся по своей массе от молекул основного вещества, увеличивают флуктуации плотности, играющие роль затравок при образовании капель. При последующем быстром отверждении из этих капель может образоваться твёрдый раствор. В процессе своего движения внутри канала формирования оболочки вращается. Капли падают на внутреннюю поверхность вращающейся оболочки, что способствует однородному распределению вещества по поверхности.

Увеличение концентрации одного из компонентов. В работе [29] экспериментально показано, что неон и дейтерий способны образовывать твёрдые растворы только при очень малом количестве одного из компонентов смеси (менее 0,5%). Этот факт находится в кажущемся несоответствии с нашей работой. Однако мы хотим подчеркнуть, что в работе [29] охлаждение смеси осуществляется в режиме, близком к равновесному, т.е. достаточно медленно. Наоборот, в наших экспериментах смесь $D_2 + Ne$ охлаждается быстро (по крайней мере, на два порядка быстрее, чем в [29]), т.е. процесс образования твёрдого раствора проходит в существенно неравновесных условиях.

Из литературы известно, что в процессе получения твёрдых растворов в неравновесных условиях (например, при высоком переохлаждении) область однофазных растворов из исходных компонентов может быть гораздо шире, чем номинальная. Данный факт подтверждается экспериментами [41], в которых были исследованы растворы смеси $D_2 + Ne$, формируемые на поверхности глубоко охлаждённой подложки (т.е. при строго неравновесных условиях).

Результаты наших исследований, проведённых при неравновесном процессе вымораживания смеси $D_2 + Ne$ на поверхности оболочки (при этом достигалась скорость охлаждения до 100 К/с), показали, что в этих условиях количество индивидуальных компонентов в твёрдом растворе $D_2 + Ne$ может быть значительным.

Режим медленного охлаждения в присутствии теплообменного гелия. При относительно медленном охлаждении ($\sim 0,05 \text{ К/с}$) мишеней с жидкой смесью $D_2 + Ne$ в присутствии в камере теплообменного гелия при давлении 3 мм рт. ст. наблюдается следующее. Сначала в районе тройной точки неона ($T_{\text{тр}} = 24,54 \text{ К}$) возникает тёмное образование, локализованное у дна оболочки. Это явление можно связать с образованием твёрдого неона. При последующем охлаждении до 20 К положение уплотнения не изменяется (см. рис. 13, з). Затем при $T = 18,65 \text{ К}$ (тройная точка D_2) возникают кристаллы, которые по-

крывают всю внутреннюю поверхность оболочки (см. рис. 13, *и*). В данных условиях эксперимента ошибка в определении температуры в месте расположения датчика составляла не более 0,1 К.

Эти наблюдения позволяют судить о характере взаимодействия отдельных компонентов смеси со стенкой стеклянной оболочки: жидкий неон не смачивает поверхность стекла, в то время как дейтерий хорошо её смачивает. Эти наблюдения находятся в согласии с данными работы [42].

Средний темп охлаждения: формирование слоя при пробросе оболочек в вакуумном винтовом канале формирования (разрежение 0,035 мм рт. ст.). При пробросе в вакуумном винтовом канале формирования во всех оболочках образовывался прозрачный слой (рис. 14, *а*). В данном режиме теплоотвод от оболочки осуществлялся только через пятно контакта с охлаждённой стенкой канала. Скорость охлаждения в экспериментах составляла от 1 до 50 К/с. Ошибка в определении температуры составляла не более 3 К.

Интересно отметить, что прозрачность слоя не нарушалась при подаче в камеру теплообменного гелия вплоть до давления 3 мм рт. ст. Во всех предыдущих экспериментах со смесями изотопов водорода в этом случае происходила быстрая кристаллизация прозрачного слоя.

Изотермический отжиг прозрачного слоя при температуре 4,4 К в течение более 40 мин приводил к появлению в слое крупномасштабных неоднородностей (рис. 14, *б*).

При нагреве оболочки неоднородности постепенно исчезали в диапазоне температуры от $T_1 = 20,0$ К до $T_2 = 21,5$ К. Оценки по формуле (3)

показывают, что в пределах ошибки измерения ± 3 К это совпадает с условиями плавления твёрдого раствора, в котором дейтерий составляет ~77%, неон ~23%. Отсюда можно заключить, что при данном режиме охлаждения примесь равномерно распределяется по основному компоненту.

Таким образом, эксперименты, проведённые на смеси 80% D_2 + 20% Ne, показали:

— медленное охлаждение со скоростью $dT/dt \sim 0,05$ К/с; теплосъём от поверхности оболочки идёт как через пятно контакта, так и через теплообменный гелий (3 мм рт. ст.). В этом случае компоненты смеси вымораживаются на внутренней стенке стеклянной оболочки независимо друг от друга — сначала примесь с более высокой тройной точкой Ne, затем D_2 . При этом видно, что неон не смачивает поверхность стекла, тогда как дейтерий хорошо её смачивает. Таким образом, в данном режиме невозможно достичь равномерного распределения примеси по объёму конденсированного слоя и выморозить ультрадисперсный твёрдый раствор;

— быстрое охлаждение со скоростью $dT/dt \geq 100$ К/с; теплосъём от поверхности оболочки идёт как через пятно контакта, так и через теплообменный гелий (3 мм рт. ст.). В этом случае криогенный слой имеет характерную мелкозернистую структуру и состоит из двух различных веществ: чистого твёрдого дейтерия и твёрдого раствора D_2 + Ne. Лишь малое количество дейтерия (не более 4% от общего количества D_2 в смеси) участвует в образовании твёрдого раствора. Причём распределение этого раствора в криогенном слое имеет специфический вид «сетки локальных уплотнений», равномерно покрывающей внутреннюю поверхность оболочки;

— средняя скорость охлаждения с $dT/dt \sim 1$ —50 К/с; в канале формирования разрежение 0,035 мм рт. ст., теплосъём от поверхности оболочки идёт только через пятно контакта. В этом случае на стенке оболочки вымораживается однородный прозрачный слой из твёрдого раствора D_2 + Ne. Именно этот режим позволяет получить твёрдый прозрачный слой, устойчивый к нагреву.

Введение термина «водородное стекло». Итак, экспериментально доказано, что введение определённых примесей в водород или дейтерий на стадии заполнения оболочки газом позволяет расширить область температурного существования ультрадисперсного состояния криогенного слоя вплоть до тройной точки основного компонента.

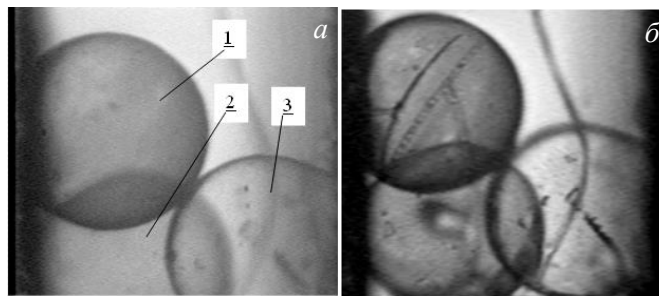


Рис. 14. Формирование и эволюция прозрачного слоя из смеси 80% D_2 + 20% Ne: *а* — образование прозрачного криогенного слоя, оболочки № 1, 2, 3 сразу после проброса в винтовом канале формирования при давлении остаточного газа в канале 0,035 мм рт. ст., $T = 4,4$ К; *б* — появление неоднородностей в процессе изотермического отжига, $T = 4,4$ К, $t = 40$ мин

Количество и тип примеси существенно определяют возможность получения термостойкого ультрадисперсного слоя. Влияние количества примесей на тепловую устойчивость слоя иллюстрирует сводная таблица экспериментальных данных (табл. 5). Из таблицы следует, что количество примесей не должно быть слишком велико или слишком мало. В частности, для H_2 с примесью HD оптимальное количество примеси находится в диапазоне 0,53—8,9%.

Т а б л и ц а 5. Влияние количества примеси к H_2 на термостойкость прозрачного слоя

№	n	ΔT , К	Примесь, %	T_{CR} , К
1	0	4,2—14	0	5—7
2	0	6,2—20	0,11	6,3
3	1	5,6—20	0,53	8,4
4	2	5,6—20	0,53	10,0
5	3	5,6—20	0,53	8,2
6	3	6,2—20	8,90	6,3
7	4	6,2—20	8,90	6,2
8	0	4,2—18	50,00	7—9

Примечание: n — число ТЦО до появления неоднородностей в прозрачном слое, ΔT — температурный диапазон ТЦО, T_{CR} — температура появления неоднородностей. Примеси к основному компоненту (H_2): HD для № 2—7, D_2 для № 8.

Эксперименты показали, что температура плавления примеси должна быть выше температуры плавления основного компонента. Только в этом случае возникает прозрачный слой, устойчивый к нагреву. Эти результаты находятся в соответствии с результатами исследований термостабильности металлических аморфных плёнок, получаемых методом закалки паровой фазы в присутствии примесей. В работах [25—27] отмечается, что температура рекристаллизации аморфно-нанокристаллической плёнки тем выше, чем выше температура плавления $T_{пл}$ примеси, при этом всегда $T_{пл}$ выше температуры плавления основного компонента.

Отметим также, что наши результаты с использованием неона в качестве примеси находятся в соответствии с результатами экспериментов [28], которые показали, что примесь неона к водороду или дейтерию тормозит рост кристаллических зёрен при нагреве до 16 К (более высокие температуры в [28] не исследовались).

Поскольку тритий может исполнять роль высокоплавкой примеси по отношению к дейтерию, развитый способ перспективен для получения термостойкого ультрадисперсного слоя в мишенях с альтернативным топливом типа DT_x , где $x \leq 20\%$ — количество радиоактивного трития в топливной смеси.

Подтверждение этой возможности дают опыты по вымораживанию смеси $D_2 + Ne$. Эти опыты позволили также определить ещё два необходимых фактора, позволяющих получить термостойкий ультрадисперсный прозрачный слой внутри замкнутых полых сферических оболочек:

— при формировании слоя теплоотвод осуществляется только через ограниченную область контакта между оболочкой и подложкой, т.е. именно так, как в методе FST;

— процессу формирования слоя должен сопутствовать эффект капельной конденсации в объёме оболочки.

Эксперименты показали, что применение соответствующих примесей позволяет увеличить допустимую толщину прозрачного ультрадисперсного слоя от 15 до 51 мкм (большие толщины не исследовались), что продемонстрировано для слоёв из смеси $H_2 + HD$, замороженных на внутренней поверхности полистироловых оболочек диаметром 1,2—1,5 мм. Наконец, присутствие примеси снижает требуемую скорость охлаждения вещества внутри оболочки от 100 К/с (чистые изотопы) до 1—50 К/с (изотоп + примесь).

По аналогии с термином «металлические стёкла» будем в дальнейшем называть состояние твёрдых изотопов водорода, обладающих перечисленными свойствами, термином «водородные стёкла».

ПРИРОДА «ВОДОРОДНОГО СТЕКЛА»

Методология. Особенность изучаемого объекта — сферический криогенный слой толщиной 5—50 мкм, находящийся внутри оболочки диаметром 0,5—1,5 мм, помещённой в оптическую камеру крио-

стата при $T = 4,2\text{—}20\text{ К}$, не позволяет осуществить прямое измерение его микроструктуры ни одним из известных на сегодняшний день способов, таких, как электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, нейтронная, инфракрасная и ультразвуковая диагностика и др. В частности, из-за того, что материал, расположенный вне оболочки на пути распространения рентгеновского излучения, является оптически более плотным, увидеть оболочку в центре камеры практически невозможно.

Оптические наблюдения в проходящем свете (длина волны излучения $0,4\text{—}0,7\text{ мкм}$) дают возможность увидеть теневое изображение оболочки с криогенным слоем. Однако это изображение позволяет только заключить, что размер зерна в сформированном прозрачном слое, во всяком случае, не превышает длины волны излучения.

Диагностику прозрачного слоя облегчает тот факт, что мелкозернистые структуры (с зерном менее 1 мкм), аморфные и нанокристаллические плёнки, а также стёкла ведут себя по-разному при нагреве. В частности:

— при нагреве мелкозернистой плёнки наблюдается постепенный и беспороговый переход в крупнозернистую структуру, связанный с процессом собирательной рекристаллизации (рис. 15). Процесс происходит тем интенсивнее, чем ближе температура слоя к тройной точке вещества плёнки;

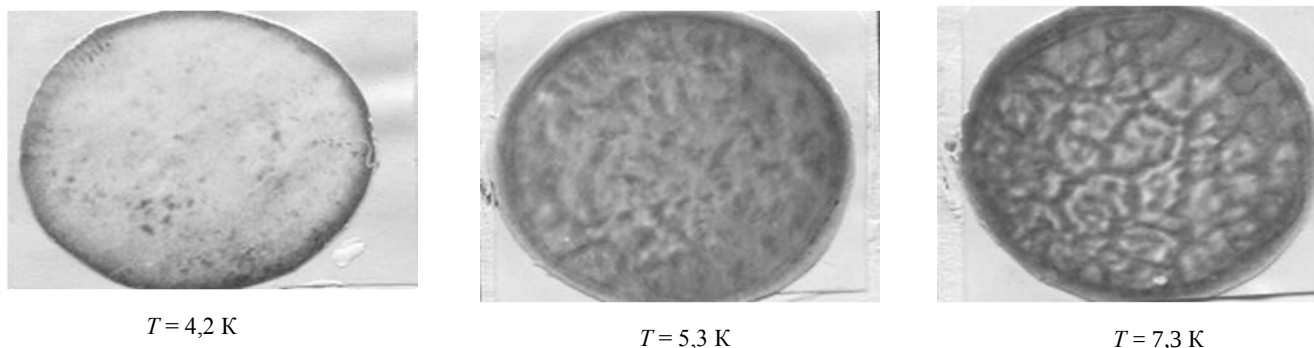


Рис. 15. Процесс собирательной рекристаллизации, происходящий при нагреве мелкозернистого водородного слоя, вымороженного на внутренней стенке оболочки из стекла (средняя толщина слоя $3,8\text{ мкм}$)

— при первом нагреве аморфно-нанокристаллической плёнки до некоторой пороговой температуры $T_a < T_{тр}$ наблюдается процесс быстрой рекристаллизации (см. рис. 4). Фазовое превращение аморфно-нанокристаллической плёнки в кристалл, начавшееся при T_a , является мощным источником энергии для поддержания лавинообразного процесса кристаллизации;

— характерный признак стекла — способность переходить в расплавленное состояние без кристаллизации, а затем вновь возвращаться в состояние стекла при охлаждении. Кроме того, температурное поведение стёкол существенно зависит от тепловой предыстории образца.

Таким образом, исследование температурной эволюции образца при различных режимах отжига, охлаждения и нагрева может служить инструментом для определения структурного типа вещества. Этот инструмент и являлся тем диагностическим средством, который был доступен в наших исследованиях.

Деградация «водородного стекла»: кристаллизация или структурная релаксация? Полученный прозрачный термостойкий слой обладает следующими свойствами:

- не плавится при повышении температуры от 5 К до $T_{тр}$;
- не кристаллизуется при снижении температуры от $T_{тр}$ до 5 К ;
- выдерживает более одного ТЦО в указанном диапазоне температуры.

Проявлением деградации слоя является переходное состояние, которое сопровождается возникновением устойчивых зон оптической неоднородности в прозрачной фазе. Эти зоны занимают ограниченную часть объёма слоя и сосуществуют с прозрачной фазой. Исчезновение неоднородностей происходит постепенно при нагреве слоя до температуры, на несколько градусов превышающей температуру тройной точки основного компонента, причём исчезновение неоднородностей происходит в диапазоне $1\text{—}2$ градуса.

Можно предположить, что данный процесс связан с образованием стабильной кристаллической фазы внутри аморфной матрицы. Следует, однако, констатировать, что картина образующихся неоднород-

ностей и их характерная эволюция при нагреве существенно отличаются как от картины пороговой кристаллизации «аморфных плёнок», так и от процесса плавления кристаллической фазы. Это различие проявляется прежде всего в следующем:

— в слоях типа «аморфная плёнка» неоднородности возникают как результат лавинной кристаллизации при первом нагреве слоя до температуры примерно вдвое меньше значения тройной точки и переходят в жидкую фазу в тройной точке. Таким образом, можно однозначно отнести «неоднородности» «аморфных плёнок» к кристаллическому состоянию;

— в термостойких прозрачных слоях неоднородности возникают только через несколько ТЦО в диапазоне от 5 К до $T_{тр}$, а их исчезновение происходит при температуре несколько выше $T_{тр}$. Поэтому данные неоднородности нельзя однозначно отнести к кристаллическому состоянию.

На рис. 16 показаны теневые фотографии оболочки со слоем твёрдого водорода, полученные при различных условиях: при кристаллизации расплава, при рекристаллизации прозрачной аморфной плёнки, в результате циклической тепловой обработки прозрачного термостойкого слоя H_2 с примесью HD.

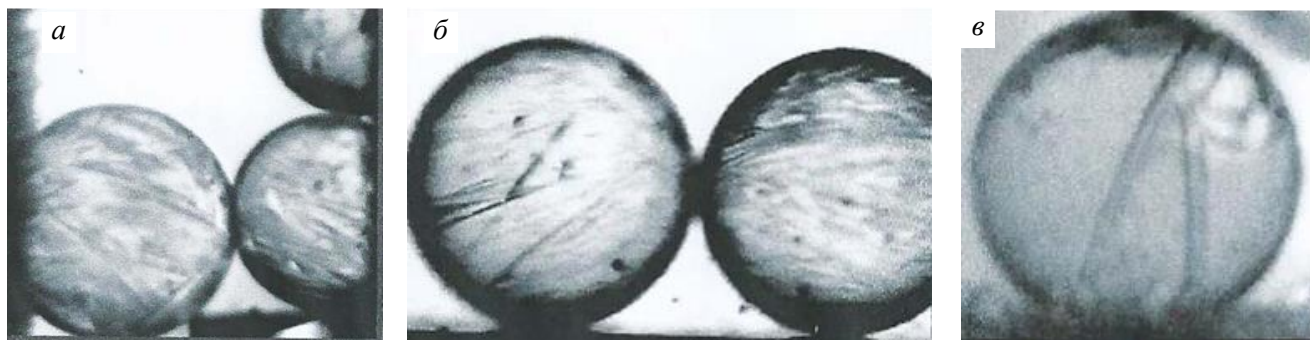


Рис. 16. Состояние твёрдого H_2 -слоя после кристаллизации расплава в тройной точке (а), рекристаллизации прозрачной аморфной плёнки (б), деградации прозрачного термостойкого слоя после нескольких циклов ТЦО (в)

Предположим, что в результате вымораживания в присутствии примесей на стенке оболочки формируется слой типа «стекло». Каким образом должна была бы проявляться его деградация? Для описания этого процесса воспользуемся данными работ [26—29, 43—52].

Поскольку в состоянии термодинамического равновесия система обладает минимумом энергии, зависимость свободной энергии F от структурного параметра (объёма V) при различных температурах системы имеет вид потенциальной ямы как для твёрдого кристаллического, так и для жидкого состояния. Например, упругую часть свободной энергии можно представить как квадратичную функцию объёма

$$U(V) - U(V_0) = \frac{1}{2} K(V - V_0)^2/V_0, \quad (5)$$

где V_0 — равновесное значение объёма; K — модуль всестороннего сжатия.

Два возможных энергетических положения равновесия молекулы в твёрдом теле (рис. 17, а—в) — стабильное кристаллическое состояние и метастабильное аморфное — разделены потенциальным барьером, высота которого зависит как от способа получения аморфной фазы, так и от наличия в веществе определённых примесей.

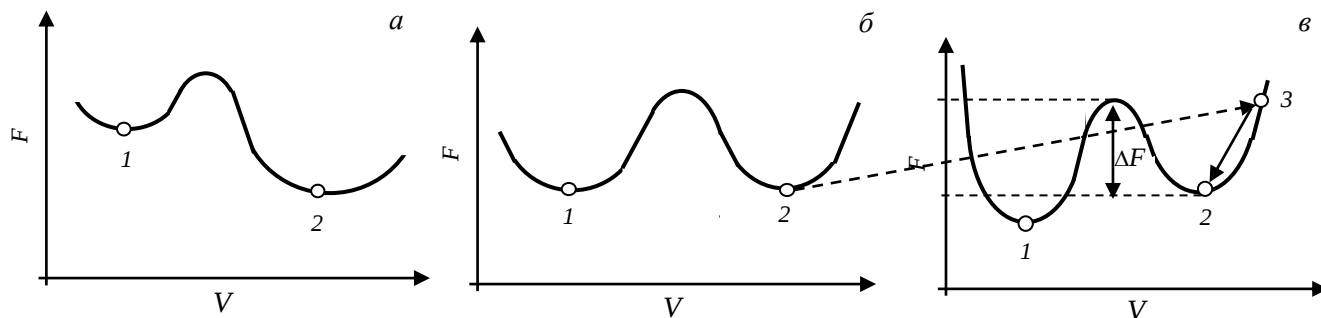


Рис. 17. Изменение свободной энергии F конденсированного состояния в зависимости от температуры и объёма V : а — кристаллическое состояние, $T > T_{пл}$; б — метастабильное стекло, $T = T_{пл}$; в — нестабильное стекло, $T < T_{пл}$

При температуре выше температуры плавления $T > T_{пл}$ уровень дна потенциальной ямы F для жидкого состояния ниже, чем для твёрдого (см. рис. 17, а), а при $T < T_{пл}$ — наоборот. Быстрой закалкой расплава

можно добиться того, что при $T < T_{пл}$ система останется в метастабильном состоянии, характерном для переохлаждённой жидкости. При температуре ниже точки стеклования T_g структура замораживается и состояние системы характеризуется точкой 3 на рис. 17, в, которая соответствует нестабильному, наиболее рыхлому аморфному состоянию. Такое состояние является неравновесным не только относительно стабильного кристаллического, но и относительно метастабильного, характерного для переохлаждённой жидкости (стекла).

Процесс перехода стекла из неравновесного состояния (3 на рис. 17, в), полученного при быстром охлаждении расплава, в состояние метастабильного равновесия (2 на рис. 17, в) принято называть структурной релаксацией в отличие от процесса кристаллизации, связанного с переходом системы в состояние с абсолютным минимумом энергии.

Какова же роль примеси в этих процессах? Как известно, для преодоления энергетического барьера между метастабильным и стабильным состояниями требуется активация процесса диффузии. Из теории переходного состояния [50] вытекает известное уравнение Аррениуса, которое для случая диффузии имеет вид

$$D = D_0 \exp(-\Delta U/kT), \quad (6)$$

где D — коэффициент диффузии; D_0 — предэкспоненциальный множитель; ΔU — энергия активации процесса диффузии.

Энергия активации процесса и температура существенным образом характеризуют устойчивость системы. Чем больше значение энергии активации и ниже температура, тем медленнее идёт диффузия при прочих равных условиях и, следовательно, тем легче сохраняется метастабильное состояние. Кроме того, энергия активации диффузии примеси тем выше, чем выше температура её плавления [51].

Атомы примеси представляют собой центры упругих искажений, которые тем больше, чем сильнее эти атомы отличаются по размерам и свойствам от атомов основного вещества. В результате взаимодействия примесей с дефектами структуры, в частности, с вакансиями и границами зёрен (в том числе границами кластеров аморфной структуры) упругая энергия данного структурного состояния уменьшается — потенциальная яма становится глубже, а энергетический барьер соответственно выше (см. рис. 17, в).

Свойства стеклообразного состояния и его однородность являются структурно-чувствительными и существенно зависят от тепловой предыстории образца. Если провести быстрый нагрев нестабильного стекла, то процесс релаксации не успеет произойти и образец останется структурно однородным. Напротив, изотермический отжиг или медленный нагрев приводит к изменению структурных, механических и других свойств материала, в том числе к увеличению плотности, возрастанию модуля упругости, уменьшению коэффициента диффузии. Эти изменения связаны с протеканием процесса структурной релаксации. В начале этого процесса внутри нестабильной фазы появляются области с повышенной плотностью (метастабильное стекло), которые занимают достаточно ограниченную область. С течением времени происходит процесс расстекловывания, т.е. трансформация метастабильного состояния стекла в равновесное кристаллическое состояние, в котором вещество имеет максимальную плотность.

На рис. 18, а, б, взятом из работы [46], показано изменение удельного объёма стекла при нагреве со скоростью меньше (а) и больше (б), чем скорость охлаждения при формировании стеклообразного состояния. Здесь же для сравнения показана температурная эволюция удельного объёма равновесного кри-

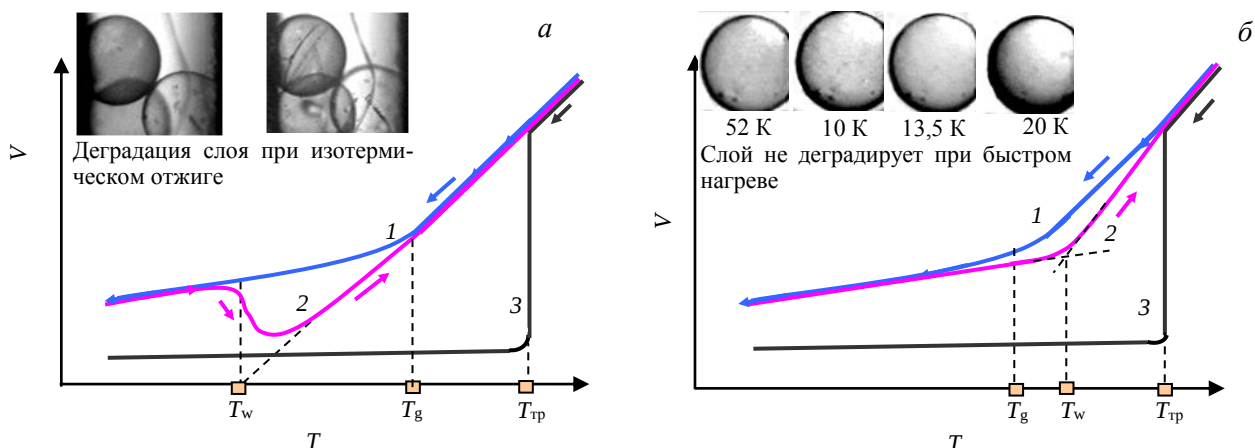


Рис. 18. Изменение удельного объёма стекла при различном темпе нагрева: 1 — быстрое охлаждение, 2 — медленный нагрев (а); 1 — быстрое охлаждение, 2 — быстрый нагрев (б); 3 — реализация равновесного кристаллического состояния; T_g — температура стеклования; $T_{тр}$ — температура тройной точки; T_w — температура размягчения

сталлического состояния вещества. Видно, что при быстром охлаждении получается малоплотное стекло, структура которого слабо изменяется при быстром нагреве (линия 2 на рис. 18, б). В то же время при медленном нагреве (линия 2 на рис. 18, а) стекло переходит в метастабильную, более плотную модификацию. Разница в плотности нестабильного и метастабильного стёкол исчезает постепенно при нагреве образца до температуры стеклования.

Анализ экспериментальных результатов. Сравним теперь результаты наших исследований с изложенным поведением стекол. Как отмечалось, процесс структурной релаксации сопровождается появлением более плотных областей внутри менее плотных, что можно обнаружить при оптическом наблюдении в проходящем свете. Похожий эффект мы наблюдали в экспериментах.

На рис. 7 показан прозрачный слой (H_2 с примесью HD). Как видно на рисунке, нагрев слоя от 5 до 20 К со скоростью 5 К/мин не выявил следов образования неоднородности, за исключением образования разнотолщинности при $T > 13,5$ К, которую можно объяснить гравитационным стеканием криогенного слоя за счёт снижения его вязкости.

На рис. 9 видно появление неоднородности в прозрачном слое (водород с примесью HD), которое произошло в процессе изотермического отжига в течение 45 мин при $T = 5$ К. Сравнительные фотографии поведения прозрачного слоя при соответствующей тепловой обработке показаны также вверху на рис. 18, а, б.



Рис. 19. Образование структурных неоднородностей в прозрачном слое $D_2 + 20\% Ne$, отжиг при $T = 9$ К

На рис. 14 прослеживается процесс появления неоднородности в прозрачном слое, приготовленном из смеси $80\% D_2 + 20\% Ne$. Неоднородность возникла в процессе отжига в течение 40 мин при $T = 4,4$ К. Неоднородность занимает ограниченный объём, который не увеличивается при последующем нагреве слоя со скоростью 5 К/мин. Это может означать, что область с метастабильным стеклом не растёт по причине слишком быстрого нагрева (кривая 2 на рис. 18, б).

На рис. 19 виден прозрачный слой из смеси $D_2 + 20\% Ne$, в котором в процессе изотермического отжига при $T = 9$ К образовались два характерных уплотнения. При дальнейшем нагреве размеры уплотнений не изменились. При последующем отжиге при $T = 19,8$ К (тройная точка дейтерия $T_{тр} = 18,65$ К) данные неоднородности постепенно исчезли (рис. 20). В этом процессе не наблюдалось «стекания» вещества на дно оболочки. Это означает,

что прозрачная матрица — твёрдая, несмотря на то, что температура отжига выше тройной точки основного компонента (дейтерия). Напротив, в процессе плавления кристаллического слоя, когда вещество находится в состоянии твёрдое-в-жидком, всегда наблюдается движение отдельных кристаллических областей под действием сил гравитации. Для того чтобы осуществить переход из стеклообразного в кристаллическое состояние (т.е. из 1 в 2 на рис. 17, в), необходимо передать энергию, превышающую величину энергетического барьера ΔF . Как уже отмечалось, высота барьера зависит от наличия в веществе определённых примесей.

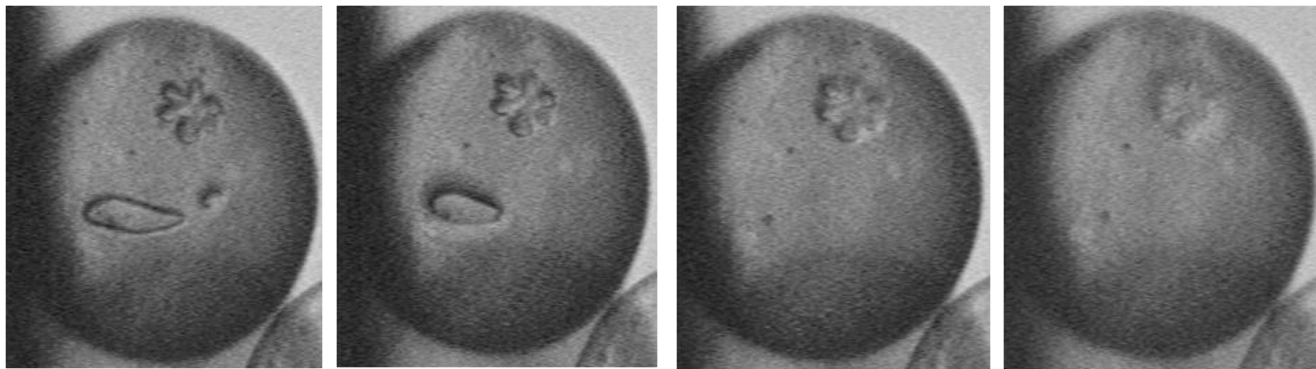


Рис. 20. Процесс разрушения неоднородностей слоя из смеси $D_2 + 20\% Ne$ вблизи тройной точки дейтерия. Отжиг в течение 10 мин при $T = 19,8$ К. Разрежение в камере 0,035 мм рт. ст.

Из экспериментов с изотопами водорода без добавок (см. табл. 1 и рис. 4) следует, что нагрев прозрачного слоя водорода до 6—7, а дейтерия до 8—9 К, т.е. примерно до половины тройной точки изотопа, приводит к возникновению коллективного эффекта — его лавинной кристаллизации.

Эти результаты находятся в соответствии с наблюдениями по рекристаллизации аморфно-нанокристаллических плёнок полупроводников, металлов и сплавов, полученных методом быстрого вымораживания пара на глубоко охлаждённой подложке [30, 47, 48, 52]. При нагреве таких плёнок рекристаллизация происходит в диапазоне температуры $(1/3—2/3)T_{\text{тр}}$. Исследования [26—29] показали, что при внесении в пары металла определённых примесей, термостойкость аморфных плёнок возрастает, причём температура рекристаллизации тем выше, чем выше температура плавления примеси. В соответствии с работой [29] известно также, что примесь неона к H_2 и D_2 существенно тормозит рост кристаллических зёрен при нагреве.

Наши эксперименты подтвердили, что наличие в изотопе высокоплавких примесей повышает термостойкость прозрачного слоя. Например, при наличии в H_2 -слое примеси более высокоплавкого изотопа HD слой сохраняет свою прозрачность вплоть до тройной точки водорода и выше, если нагрев идёт не очень медленно (см. рис. 7). Однако напуск в камеру теплообменного гелия, температура которого несколько выше температуры стенок камеры, до давления всего несколько торр приводит к полной рекристаллизации слоя (рис. 21). Точно такой же приём в отношении оболочек, содержащих прозрачный слой дейтерия с добавкой неона, не приводит к рекристаллизации прозрачного слоя.

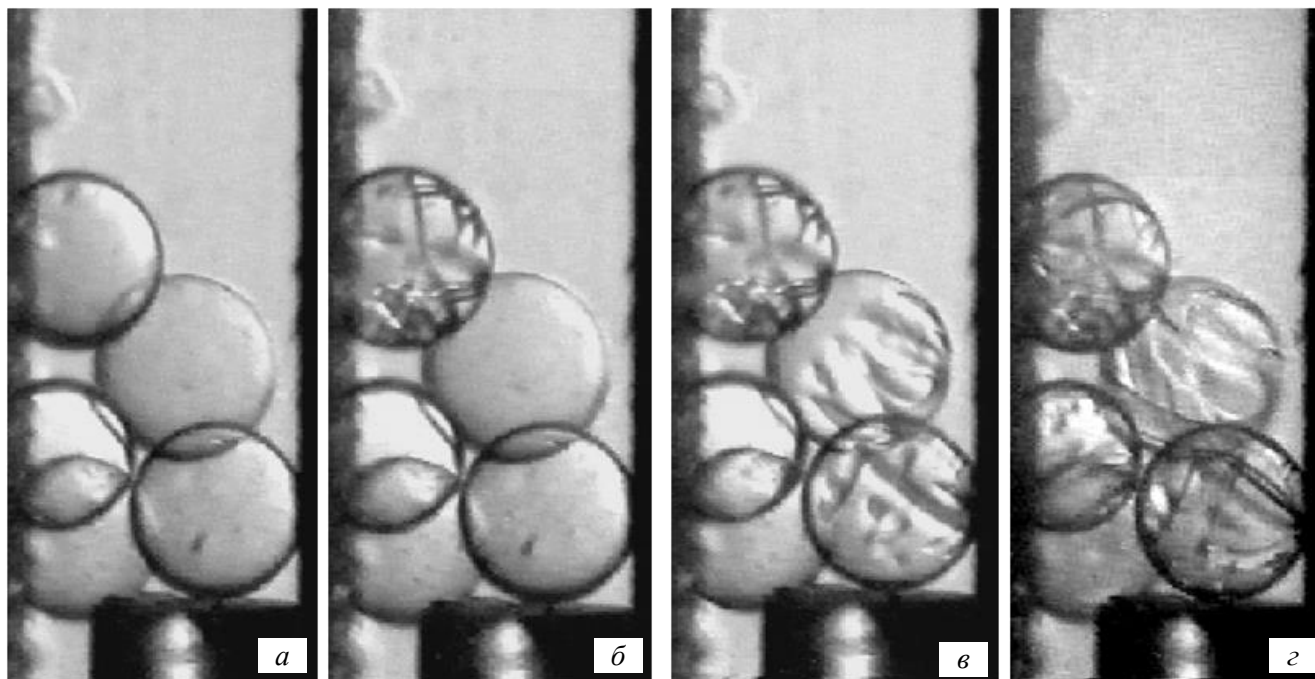


Рис. 21. Процесс кристаллизации прозрачного слоя водорода с примесью HD (0,3%) при напуске в камеру теплообменного гелия. Оболочки из стекла диаметром 450—500 мкм, давление заполнения 30 атм. при 300 К, температура стенок камеры $T = 7$ К: а — в оболочках сформирован прозрачный слой, разрежение в камере 0,01 мм рт. ст.; б—г — в камеру поступил газ гелий при давлении 5 мм рт. ст.; б — начало процесса кристаллизации; г — завершение процесса кристаллизации

Из этих наблюдений следует, что энергетический барьер между метастабильной (стекло) и стабильной (кристалл) фазами в смеси $\text{H}_2 + \text{HD}$ ниже, чем в смеси $\text{D}_2 + \text{Ne}$. Соответствующие температуры плавления этих веществ: 13,96 К для H_2 , 16,6 К для HD, 18,65 К для D_2 , 24,54 К для Ne. Значит, термостойкость прозрачного слоя тем больше, чем больше различаются температуры плавления примеси и основного компонента: в смеси $\text{H}_2 + \text{HD}$ это различие составляет $\Delta T = 2,64$ К, в смеси $\text{D}_2 + \text{Ne}$ — $\Delta T = 5,89$ К. Эти результаты находятся в соответствии с данными работ [26—29].

Итак, наши экспериментальные исследования показали, что:

— рекристаллизация прозрачных слоёв из чистых изотопов водорода происходит при первом нагреве до $T_a \sim 0,5T_{\text{тр}}$;

— существенное увеличение термостойкости прозрачных слоёв из изотопов водорода происходит при введении в них высокоплавких примесей;

— более высокоплавкие примеси (Ne) обеспечивают большую термостойкость прозрачного слоя, чем менее высокоплавкие примеси (HD).

Отметим, что исследованные нами прозрачные криогенные слои состоят из веществ с ван-дер-ваальсовой связью между молекулами, в то время как хорошие стеклообразователи являются веществами с ковалентной (направленной) связью. Конечно, физика образования и микроструктура стекол с ковалентной и ван-дер-ваальсовой связью различна. Тем не менее существуют универсальные эмпирические закономерности, их объединяющие [45, 46].

Проведённые исследования позволяют прийти к следующему заключению:

— состояние криогенного слоя (относительно устойчивая прозрачная модификация), полученного при средней скорости вымораживания изотопа водорода в присутствии более высокоплавкой примеси, по-видимому, представляет собой нестабильное стеклообразное состояние, которое в процессе изотермического отжига либо медленного циклического нагрева-охлаждения претерпевает структурную релаксацию в состояние метастабильного стекла;

— тип и количество примеси определяют высоту энергетического барьера между метастабильным стеклообразным и стабильным кристаллическим состояниями, т.е. устойчивость прозрачного слоя к воздействию ТЦО.

Заметим, что указанное состояние твёрдых водородов, которое мы условно называли «водородное стекло», получено впервые.

Следует отметить, что методика изготовления оболочек и процедура их заполнения газом могут повлиять на условия формирования слоя и его характеристики, поскольку в системе «оболочка + смесь» могут содержаться небольшие примеси окиси углерода, двуокиси углерода, окиси азота и др. Нельзя также исключать возможность иных толкований результатов проведённых исследований.

Влияние вибраций на структуру криогенного слоя. Из [53] известно, что наличие внешних периодических воздействий на расплав в процессе его кристаллизации позволяет регулировать дисперсность твёрдого вещества. Внешнее воздействие приводит к тому, что, начиная с некоторого момента времени, определяемого амплитудой и частотой воздействия, рост зародышей кристаллической фазы прекращается. Дальнейшая их эволюция происходит двумя путями:

— часть зародышей полностью растворяется;

— выжившие зародыши попадают в режим динамического равновесия, при котором размеры их осциллируют около постоянного значения, а их концентрация во времени уже не меняется.

При этом растворение наиболее быстро происходит в низкочастотном поле, когда частота внешнего воздействия ω меньше обратного времени диффузии растворённого (или осаждённого) вещества τ^{-1} [53]:

$$\omega < 1/\tau \sim D/d^2, \quad (7)$$

где D — коэффициент самодиффузии изотопа; τ — время диффузии молекулы на расстояние d , равное характерному размеру микрон неоднородности среды.

Коэффициент самодиффузии жидких изотопов водорода в районе тройной точки составляет $\sim 5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ [14, с. 108]. Откуда следует, что пороговая частота для образования слоя твёрдого дейтерия с размером микрон неоднородностей $\sim 1 \text{ мкм}$ составляет 5 кГц, для получения дисперсности на уровне 0,1 мкм — 500 кГц.

В серии экспериментов нами изучена возможность диспергирования криогенного слоя за счёт периодических механических воздействий на расплав в процессе его кристаллизации, а также совместного воздействия двух диспергирующих факторов: скорости охлаждения расплава и частоты вибраций.

В этих исследованиях использовался вибратор, который размещался внутри тестовой камеры модуля формирования. Принцип действия вибратора основан на обратном пьезоэлектрическом эффекте.

Схема и общий вид тестовой камеры с вибратором показаны на рис. 22. В экспериментах также использовались оболочки из стекла диаметром 0,4—0,6 мм и полистирола диаметром 1,0—1,8 мм, заполненные газообразным дейтерием или водородом под давлением 100—300 атм. при 300 К. Частота вибраций варьировалась в пределах от 0,3 до 3 МГц, скорость охлаждения оболочки варьировалась в пределах от 10^5 до 30 К/с.

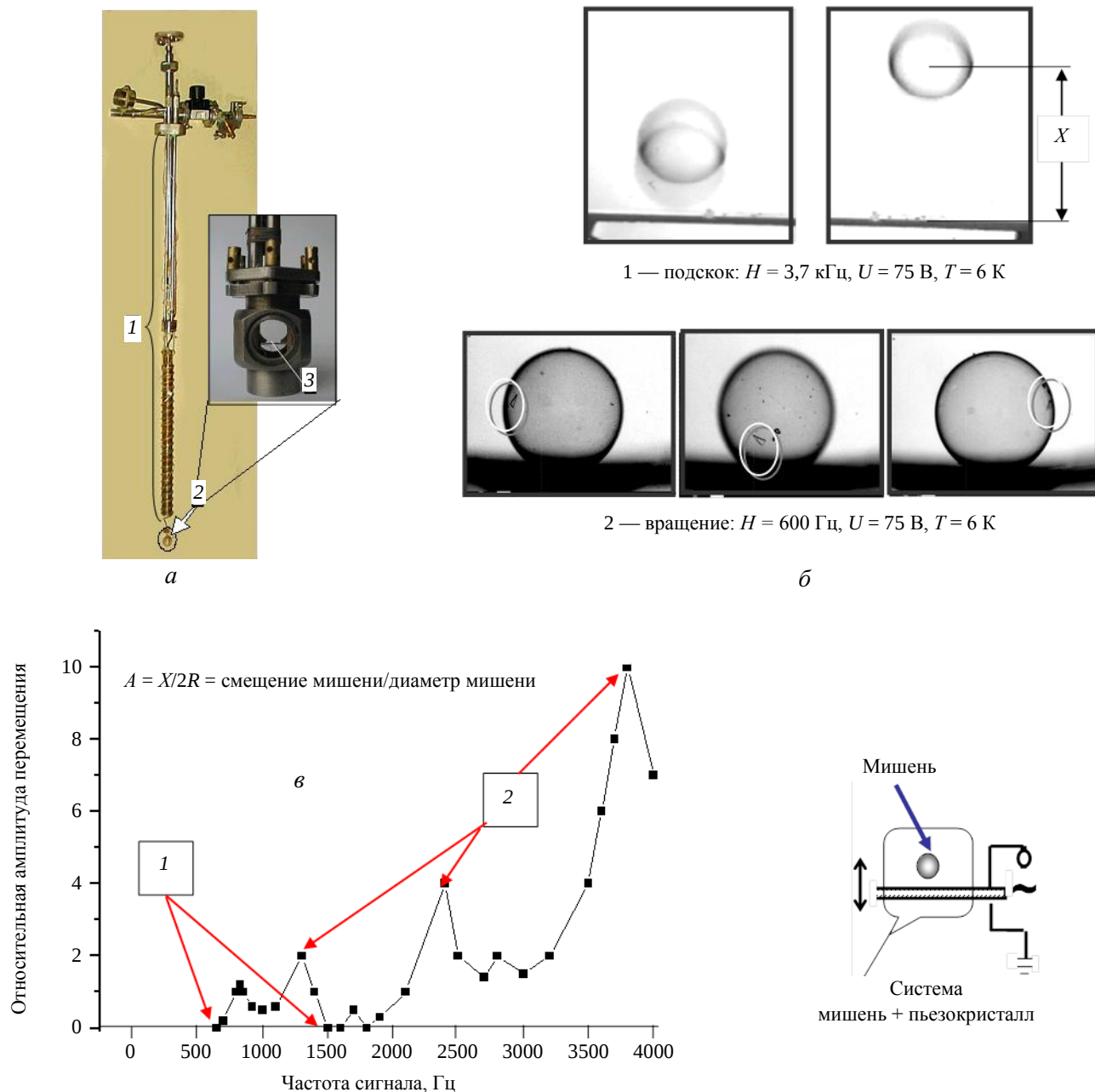


Рис. 22. Устройство для исследования влияния вибраций на микроструктуру слоя (R&B cell): *a* — размещение вибратора внутри тестовой камеры модуля формирования: 1 — вставка в криостат, 2 — тестовая камера, 3 — пьезопластина (вибратор); *б* — движение оболочки относительно пьезопластины при различных параметрах сигнала; *в* — зависимость амплитуды перемещения мишени от частоты управляющего импульса для различных напряжений при $T = 77$ К, $U = 75$ В: 1 — подскок, 2 — вращение

Эксперимент проводился следующим образом. Оболочки с предварительно вымороженным слоем размещались на пьезопластине вибратора, установленного в оптической тестовой камере модуля формирования. Далее оболочка нагревалась до температуры, при которой вещество слоя полностью переходило в жидкую фазу. После этого осуществлялось охлаждение оболочки (через пятно контакта с охлаждаемой пьезопластиной) в присутствии либо в отсутствие вибраций.

Предварительные исследования показали, что вариация скорости охлаждения расплава, находящегося внутри вибрирующей оболочки, позволяет получить твёрдый слой с различным уровнем дисперсности. Результаты этих исследований иллюстрирует рис. 23.

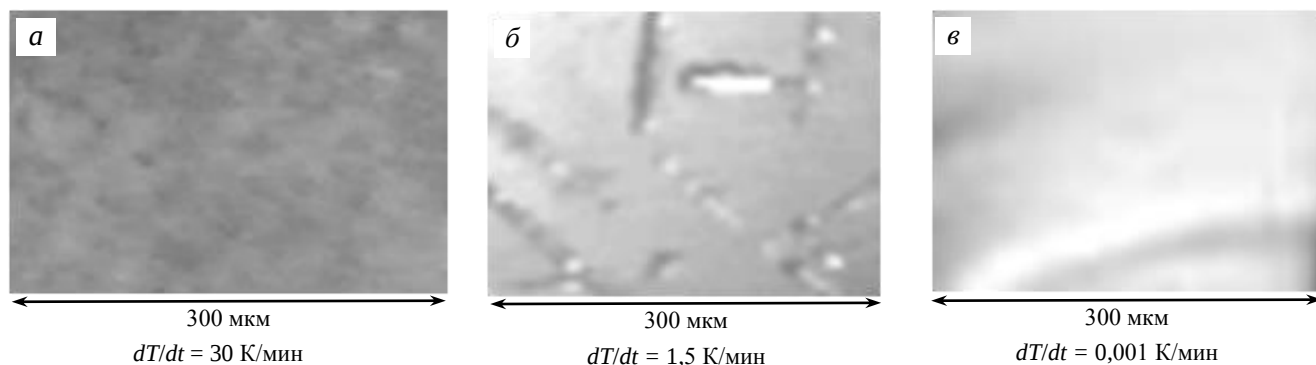


Рис. 23. Результаты исследования по диспергированию криогенного слоя при воздействии вибраций на расплав в процессе его охлаждения с различной скоростью: *а*, *б* — деталь оболочки из полистирола $2R = 1,2$ мм, 300 атм. D_2 (300 К); *в* — деталь оболочки из стекла $2R = 0,6$ мм, 220 атм. $H_2 + 2\% D_2$ (300 К); частота вибраций 1—2 кГц; режим — беспорядочное вращение: *а* — вымораживание D_2 -слоя при скорости охлаждения 30 К/мин, начальная температура оболочки $T_{in} = 21,3$ К, конечная температура $T_{form} = 5,8$ К; *б* — вымораживание D_2 -слоя при скорости охлаждения 1,5 К/мин, $T_{in} = 22,8$ К, $T_{form} = 10,8$ К; *в* — вымораживание H_2 -слоя (2% добавки D_2) при скорости охлаждения 0,001 К/мин, $T_{in} = 15$ К, $T_{form} = 10,6$ К

На основании проведённых исследований можно сделать заключение, что периодическое внешнее воздействие на расплав в сочетании с различным темпом охлаждения позволяет эффективно управлять дисперсностью структуры образующегося твёрдого слоя.

Закономерности теплового разрушения криогенного слоя. Исследования закономерностей массопереноса изотопов водорода под действием разности температуры вдоль поверхности слоя показали, что слой, находящийся в состоянии «водородного стекла», более устойчив к воздействию тепловых нагрузок, чем кристаллический [9]. Здесь мы рассмотрим данный вопрос качественно (соответствующие расчёты приведены в следующем разделе).

Эффект миграции твёрдого топлива при наличии градиента температуры связан с общей тенденцией всякой системы к переходу в состояние равновесия с минимальной энергией. Причиной переноса вещества, заключённого в замкнутую неизотермическую оболочку, является закономерное уменьшение давления его насыщенных паров при понижении температуры.

Если под влиянием внешних условий вдоль свободной поверхности криогенного слоя появляется разность температуры, то возникает поток молекул насыщенного пара, направленный в наименее нагретую область. Избыток пара над менее нагретой поверхностью конденсируется, а его недостаток над более нагретой поверхностью восполняется за счёт испарения. Поэтому для сохранения качества криогенной мишени в процессе её доставки неоднородность температуры на свободной поверхности слоя должна быть минимальной.

Заметим, что даже при симметричном теплопритоке на внешнюю поверхность мишени существует вероятность образования неоднородности температур вдоль поверхности криогенного слоя в процессе нагрева мишени. Дело в том, что в кристаллических диэлектриках, к которым относятся изотопы водорода в равновесном твёрдом состоянии, основную роль в механизме теплопереноса играет передача энергии связанных колебаний узлов кристаллической решётки. Согласно теории Дебая коэффициент решёточной теплопроводности λ прямо пропорционален значению скорости распространения упругих волн v (скорости звука) в кристалле:

$$\lambda = (1/3)cv\Lambda, \quad (8)$$

где c — теплоёмкость единицы объёма вещества; Λ — средняя длина свободного пробега фононов, которая является кинетической характеристикой, аналогичной средней длине свободного пробега молекулы.

Средняя скорость движения упругих волн в кристалле слабо зависит от температуры. Напротив, длина свободного пробега фононов увеличивается с понижением температуры, пока не достигнет размеров кристалла, и существенно снижается при наличии в кристалле дефектов (примесей, дислокаций

вакансий и др.). В температурном диапазоне существования твёрдой фазы D₂-топлива ($T = 4,2\text{—}18,65\text{ К}$) температура Дебая $\theta \gg T$ ($\theta = 105 \pm 6\text{ К}$ [54]). В этом случае теплопроводность кристаллического образца толщиной d в отсутствие дефектов определяется соотношением

$$\lambda \approx (1/3)cvd. \quad (9)$$

В равновесных условиях при $T > 4,2\text{ К}$ твёрдый водород и дейтерий представляют собой кристаллы с ГПУ-решёткой (ГПУ — гексагональная плотная упаковка), характерные параметры которой определяются известными соотношениями $c/a = 1,623\text{—}1,633$ (n-H₂) и $c/a = 1,60\text{—}1,634$ (n-D₂) [55]. В отличие от изотропных сред в таком кристалле скорость распространения упругих (звуковых) волн, их поляризация и поглощение зависят от направления распространения звука относительно кристаллографических осей. Например, скорость продольного звука в монокристалле n-H₂ (75% ортокомпонента) составляет 2230 м/с в направлении главной кристаллографической оси и 2030 м/с в перпендикулярном направлении [56]. Расчётная зависимость скорости распространения звука в ГПУ-решётке нормального водорода от угла α между кристаллографической осью и направлением распространения звука показана на рис. 24. Минимальное значение скорости звука (~1840 м/с) соответствует случаю, когда звук распространяется под углом ~50° к направлению главной кристаллографической оси. Таким образом, различие в скорости продольного звука достигает 19%. Еще больше различие в скорости распространения поперечного звука, которое достигает 33%.

Результаты моделирования тепловой деградации топливного слоя с различным уровнем дисперсности приведены в работах [9, 57]. Эти исследования подтвердили, что:

— рост шероховатости при нагреве мишени в процессе доставки является неотъемлемым свойством анизотропного кристаллического слоя (даже при симметричном теплопритоке);

— процесс роста шероховатости отсутствует, если слой находится в ультрадисперсном состоянии.

Как показали наши расчёты, структура топливного слоя существенно определяет риск разрушения мишени под действием тепловых нагрузок, возникающих в процессе доставки. Максимальным риском разрушения обладает мишень с анизотропным кристаллическим топливным слоем, минимальным — мишень со слоем, находящимся в ультрадисперсном состоянии, как вариант, в состоянии типа «водородное стекло».

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КРИОГЕННОГО СЛОЯ

Принципиально неустраняемыми источниками разрушения криогенного слоя, возникающими в процессе доставки мишени, являются:

— механическое разрушение слоя под действием перегрузок (стадия ускорения мишени). Чтобы избежать этого механизма разрушения (без изменения габаритов инжектора), необходимо снизить скорость инъекции мишени;

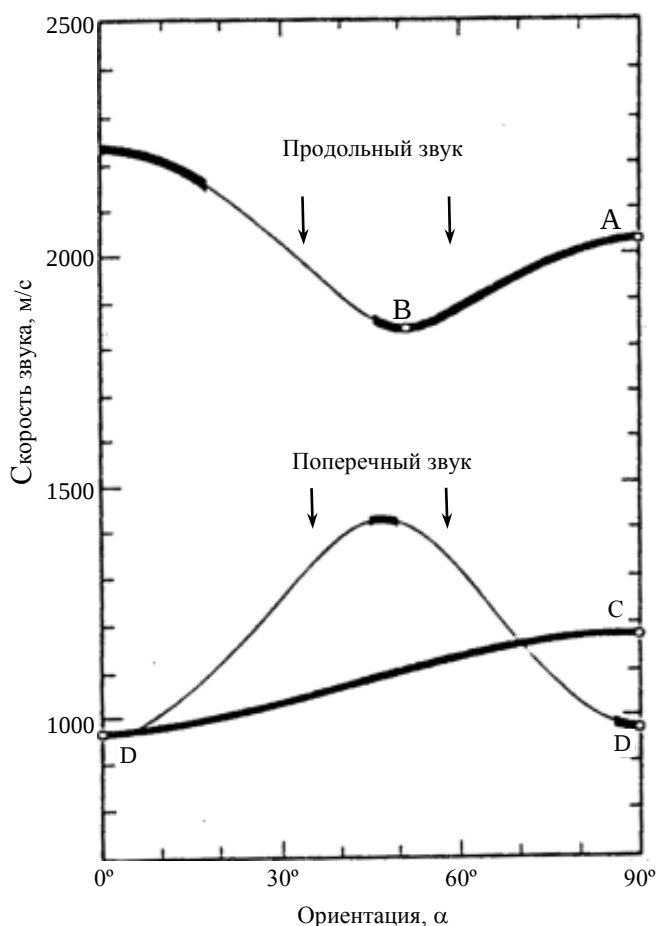


Рис. 24. Зависимость скорости распространения звука в ГПУ-решётке монокристалла n-H₂ от угла α между кристаллографической осью и направлением распространения звука (график взят из работы [56]): ГПУ — гексагональная плотная упаковка

— тепловое разрушение слоя под воздействием внешних теплопритоков на мишень (стадия полёта инжескированной мишени в камере реактора). Чтобы избежать этого механизма разрушения, необходимо снижать время пребывания мишени в камере, т.е. повышать скорость инжескиции мишени.

Мы имеем, таким образом, два взаимно исключающих требования на скорость инжескиции мишени в камеру реактора. Возможный путь решения проблемы — это формирование изотропного термостойкого топливного слоя. В этом случае время допустимого пребывания мишени в камере — максимально, так что скорость инжескиции может быть выбрана минимальной.

В серии экспериментов, проведённых в ФИАН [20, 31—36, 58, 59], а также в экспериментах, проведённых в ряде зарубежных лабораторий [16, 17, 60], были изучены свойства различных состояний твёрдого топлива (монокристаллы, крупно- и мелкозернистые кристаллические структуры, аморфно-нанокристаллическое состояние) и определены условия получения и деградации твёрдого водорода и его изотопов в этих состояниях.

Экспериментальные исследования показали, что тепловая устойчивость получаемых структур достигается за счёт подбора определённых легирующих добавок к основному компоненту топлива, а уровень дисперсности структуры можно регулировать за счёт изменения скорости и симметрии охлаждения. Обнаруженные интервалы скорости охлаждения топливного вещества для формирования заданного состояния его структуры показаны на рис. 25, условия температурной деградации прозрачного твёрдого слоя с различной структурой — на рис. 26.

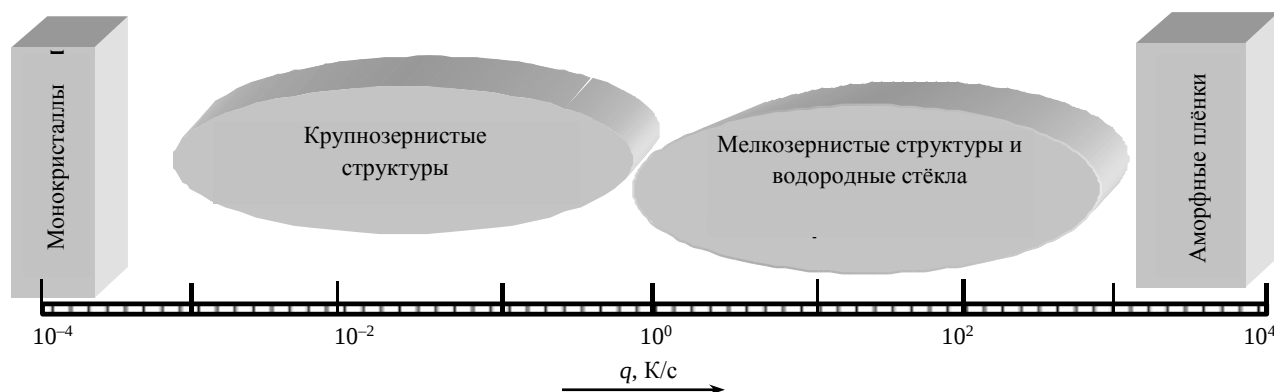


Рис. 25. Примерные интервалы скорости охлаждения топливного вещества для получения твёрдого криогенного слоя в заданном структурном состоянии

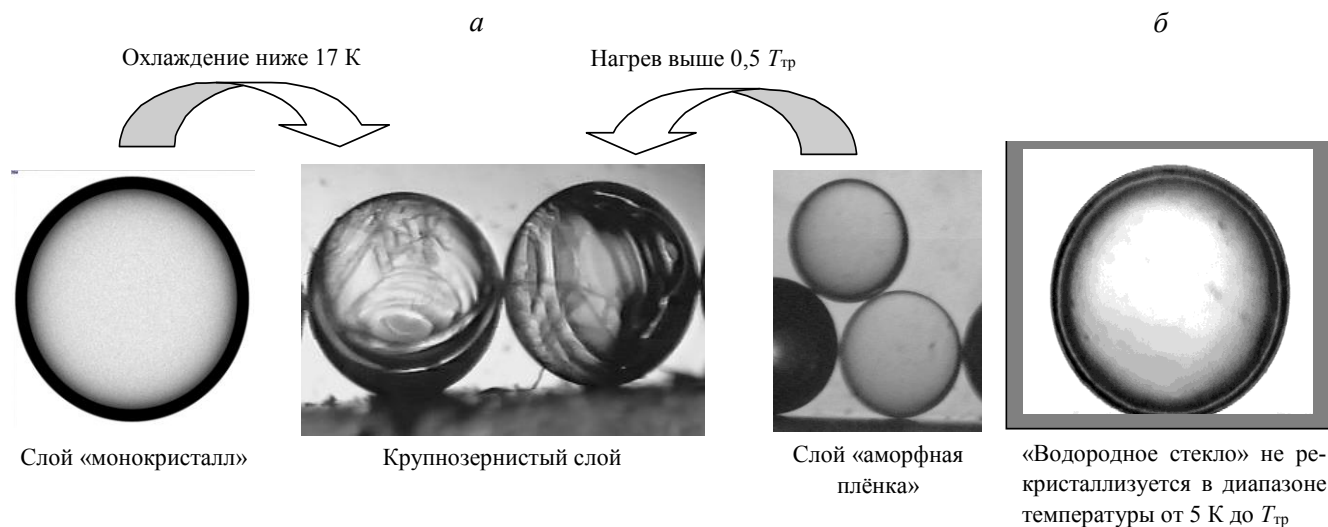


Рис. 26. Тепловая устойчивость прозрачного твёрдого криогенного слоя, находящегося в различных структурных состояниях: а — структуры, неустойчивые по отношению к температурной обработке; б — термостойкий прозрачный слой

Преимущества, которые даёт уникальный комплекс свойств «водородного стекла» при доставке мишеней в зону облучения иллюстрирует рис. 27. На рисунке показана тепловая история криогенной мишени, находящейся в вакуумной камере под воздействием только теплового излучения стенок камеры. Расчёт проведён для мишени реакторного класса в предположении, что поток излучения величиной 12 Вт/см^2 полностью поглощается внешней поверхностью мишени [61].

Из расчётов следует, что топливо в состоянии «водородное стекло» способно «прожить» в камере более чем в 2,5 раза дольше, чем другие модификации. Таким образом, применение «водородного стекла» позволяет снизить температуру инжекции мишени с 17 К (нижняя граница существования гладкого слоя в состоянии монокристалла) до 5 К, а соответствующую скорость инжекции — с 400 до 120 м/с, что резко снизит риск механического разрушения топливного слоя вследствие перегрузок. Дополнительные преимущества, которые даёт использование «водородного стекла»:

- снижение габаритов инжектора;
- снижение перегрузок в процессе ускорения мишени в инжекторе;
- осуществление ускорения мишени при $T = 5 \text{ К}$, т.е. в области, где прочность твёрдых изотопов водорода примерно в 2 раза выше, чем в районе $T = 17 \text{ К}$ (справочные данные для поликристаллических образцов см. в [14, 62]).

Следует упомянуть тот факт, что в случае аморфных и нанокристаллических веществ отсутствие дальнего порядка в расположении атомов, а также отсутствие дефектов, свойственных кристаллическому состоянию, приводит к тому, что предел прочности, например, металлических стёкол приближается к теоретическому значению $E/50$ (E — модуль Юнга), что существенно выше соответствующих значений для кристаллических сплавов ($\sigma \approx E/10^5$ — $E/10^2$) [49, 63]. Поэтому можно ожидать, что криогенный слой в состоянии «водородное стекло» будет более прочным, чем в кристаллическом состоянии. Этот эффект дополнительно снижает риск разрушения слоя под действием перегрузок, возникающих при ускорении мишени до необходимой скорости инжекции, а также под действием тепловых нагрузок (радиального градиента температуры), которые возникают при инжекции мишени в камеру реактора, содержащую заметное количество остаточных газов.

Сделаем ещё одно важное замечание. Оно связано с использованием DT-топлива в мишенях реакторного класса (диаметр оболочки более 2 мм). В работе [65] выполнены оценки влияния дополнительного источника нагрева мишени, возникающего за счёт собственного β -распада трития, входящего в состав топливной смеси, на время вымораживания слоя. Выделяемая в процессе β -распада мощность $\langle P_\beta \rangle$ сравнивалась с мощностью оттока тепла при охлаждении слоя $\langle Q_{\text{out}} \rangle$. Расчёты проводились для мишеней, предназначенных для экспериментов на установке HiPER (диаметр полимерной оболочки 2,097 мм, толщина стенки оболочки 3 мкм, толщина криогенного слоя 211 мкм), в которых криогенный слой состоял из DT-топлива в эквимольной композиции (50% молекул DT, 25% трития и 25% дейтерия). Отметим, что при этом мы исходили из того, что мишенью поглощается всё выделяющееся тепло от распада трития (реальное поглощение, безусловно, меньше). Поэтому полученная в этих предположениях величина $\langle P_\beta \rangle / \langle Q_{\text{out}} \rangle < 2\%$ [65] означает, что рассматриваемый источник теплопритока может не учитываться при производстве мишеней с оптимальной структурой криогенного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ научной библиографии и собственных экспериментальных и теоретических данных позволяет заключить следующее.

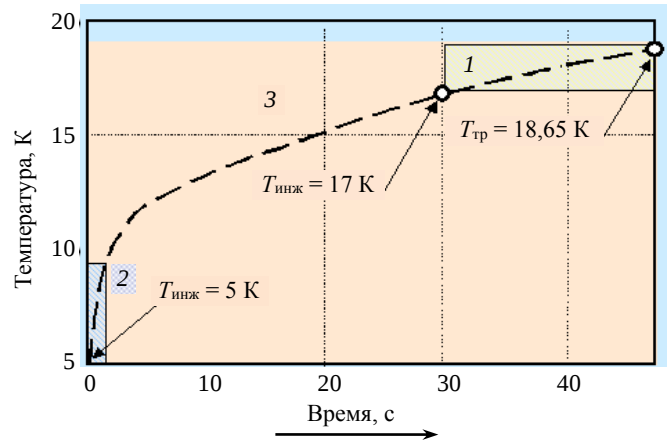


Рис. 27. Тепловая история мишени внутри вакуумной камеры под воздействием только теплового излучения стенок камеры реактора мощностью 12 Вт/см^2 . Параметры: диаметр оболочки из полистирола 4 мм, толщина стенки оболочки 45 мкм, толщина D₂-слоя 200 мкм (мишень «Накаи» [64]), $T_{\text{инж}}$ — температура инжекции: 1 — монокристалл; 2 — аморфная плёнка; 3 — водородное стекло

1. На основании проведённых исследований впервые показано, что изотопы водорода и их смеси можно получить в виде ультрадисперсных модификаций (или наносистем), которые характеризуются новыми, зачастую уникальными свойствами.

2. Основные области использования конкретно получаемых модификаций обуславливаются особенностями их свойств, в свою очередь, определяемых высокой дисперсностью, составом и структурой. Мы ввели термин «водородное стекло» для получаемых нами устойчивых ультрадисперсных слоёв.

Отметим, однако, что в настоящее время единой терминологии, как и общепринятого определения верхней границы размеров морфологических элементов наносистем (радиуса частиц, толщины плёнки, диаметра кристалла или трубки) ещё не сложилось. Например, высказываются предложения ввести понятие «элементарной единицы кристаллического твёрдого тела», или «кванта кристалла», или «мика» (минимального кристалла). Мик есть такое минимальное количество кристаллического твёрдого тела, которое ещё сохраняет нормальные («предельные») свойства, характерные для массивного образца данного вещества. Размеры мика для различных веществ лежат в пределах 10^{-7} — 10^{-8} м. Наиболее вероятное значение 30—40 нм. Однако окончательного решения по этому вопросу ещё нет.

3. Проведённое в работе сравнение свойств твёрдого топлива, находящегося в различных структурных модификациях, позволило заключить, что топливный слой в ультрадисперсном состоянии (типа «водородное стекло») позволяет решить большинство проблем, которые в настоящее время крайне актуальны для реализации целей ИТС, в том числе:

3.1. Минимизация температуры инжекции.

Ультрадисперсные модификации топлива устойчиво существуют в широком диапазоне температур от 5 К до $T_{\text{тр}}$, что позволяет снизить температуру инжекции мишени от общепринятого уровня 17 К до 5 К, т.е. более чем в 3 раза.

В свою очередь, это позволяет снизить скорость инжекции, т.е. минимизировать риск разрушения слоя вследствие перегрузок, возникающих в процессе ускорения. Кроме того, ускорение мишени можно осуществлять при температуре, когда прочность твёрдых водородов примерно в 3 раза выше, чем при 17 К.

3.2. Снижение интенсивности процессов тепломассопереноса.

Введение в состав топлива добавок более высокоплавких компонентов. Согласно разработанной методологии ультрадисперсные модификации изотопов водорода и их смесей получают именно при введении в топливо высокоплавких добавок. В смеси DT_x роль такой добавки играет тритий (при $x \leq 20\%$).

В этих случаях процесс тепломассопереноса под действием разности температур проходит менее интенсивно, чем для слоя без примесей.

Минимизация неоднородности температуры на поверхности слоя. Формирование топлива в виде ультрадисперсных слоёв позволяет свести к минимуму неоднородность температуры на внутренней поверхности слоя, т.е. снизить скорость роста возмущений слоя в высоких и низких гармониках и обеспечить требуемое качество топлива непосредственно в фокусе мощной лазерной установки.

Таким образом, отличительные особенности ультрадисперсных слоёв позволяют определить их как новый тип твёрдого топлива, применение которого минимизирует риск механического и теплового разрушения криогенной мишени в процессе её доставки в зону термоядерного горения.

Благодарности

Авторы благодарны всем специалистам — участникам следующих научных проектов: контракт ФИАН — Лаборатория Резерфорда и Апплтона (Великобритания), выполненный в период 1989—1991 гг.; проект РФФИ № 06-08-01575-а, выполненный в период 2006—2007 гг.; проекты МАГАТЭ № 11536 и 13871, выполненные в период 2000—2009 гг.; контракт ФИАН — РФЯЦ ВНИИЭФ (Саров, РФ), выполненный в период 2005—2006 гг.; контракт ФИАН — GSI — коллаборация HEDGeNOB (Германия), выполненный в период 2007—2008 гг.; проекты МНТЦ № 512, 1557, 2814, 3927, выполненные в период 1996—2011 гг.

Ряд исследований проведён в рамках программы РАН совместно со специалистами из ОКРФ, Нейтронно-физического и Криогенного отделов ФИАН (к.ф.-м.н. А.И. Никитенко, к.ф.-м.н. Т.П. Тимашева, к.ф.-м.н. А.И. Громов, С.М. Толоконников, Е.Л. Кошелев, В.М. Дороготовцев, А.А. Акунец и др.), Лаборатории сверхпроводимости ФИАН (д.ф.-м.н. К.В. Мицен, к.ф.-м.н. О.М. Иваненко, С.Ю. Гаврил-

кин), ВЦ РАН им. А.А. Дородницына (профессор А.А. Белолипецкий, Е.А. Малинина и др.), ФГУП «Красная Звезда» (к. техн. н. Г.Д. Баранов, к. техн. н. И.Д. Тимофеев, к. техн. н. А.И. Сафронов, В.И. Листратов, Г.С. Усачев и др.), МГУ (профессор Л.С. Ягужинский, к.ф.-м.н. А.А. Тоньшин), СПбГПУ (профессор В.Ю. Сергеев, к.ф.-м.н. Г.В. Капралов), АО «ВНИИНМ им. А.А. Бочвара» (к.ф.-м.н. Н.Н. Рязанцева, Л.А. Ривкис), ООО «КриоТрэйд» (А.В. Кутергин, М.П. Алексеев, М.В. Кленов) и НИЦ «Курчатовский институт» (профессор Б.В. Кутеев).

В исследованиях использовались сферические оболочки из стекла, лавсана и полистирола (с покрытиями и без них, диапазон диаметра от 200 мкм до 1,8 мм), созданные под руководством профессора Ю.А. Меркульева и при участии коллектива Лаборатории термоядерных мишеней ФИАН. В ряде экспериментов использовались полимерные сферические оболочки диаметром 1,8—2,2 мм, предоставленные нам безвозмездно Лабораторией Резерфорда и Апплтона (Великобритания) и Лабораторией лазерной техники (Япония).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Александрова И.В., Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е.** Криогенное водородное топливо для управляемого инерциального термоядерного синтеза (Обзор мировых результатов). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 1, с. 55—77.
2. **Морохов И.Д., Петин В.И., Трусов Л.И., Петрунин В.Ф.** Структура и свойства малых металлических частиц. — УФН, 1981, т. 133, с. 653—692.
3. **Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J.** Mechanical properties of nanocrystalline materials. — *Progress in Materials Science*, 2006, vol. 51, p. 427—556.
4. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика. т. V. Часть 1. Статистическая физика. Изд. 4-е. — М.: Наука, 1995. 616 с.
5. **Perlado J.M.** Inertial fusion energy research in target design, safety and environment and materials for targets and blankets in future experimental facilities and reactors. — Report, 1st IAEA RCM «Pathways to Energy from Inertial Fusion — an Integrated Approach» November 6—10, 2006, Vienna, Austria.
6. **Nakai S.** Pathway to energy from inertial fusion (IFE) — an integrated approach. — Ibid.
7. **Koresheva E.R.** Optimizing cryogenic layering for inertial fusion energy (IFE) targets for providing target survival during the injection process. — Ibid.
8. **Rudraiah N.** Effects of laser radiation, nanostructured porous lining and electric field on the control of Rayleigh-Taylor instability at the ablative surface of the IFE target. — Report, 31st IAEA Fusion Energy Conf. October 16—21, 2006, Chengdu, China.
9. **Aleksandrova I., Belolipetskiy A., Koresheva E. et al.** Thermal and mechanical responses of cryogenic targets with a different fuel layer anisotropy during delivery process. — *J. Russian Laser Research*, 2008, vol. 29, № 5, p. 419—431.
10. **Cook R.C.** A model study of the possible effect of beryllium grain sound speed anisotropy on ICF capsule implosions. — *Fusion Science and Technology*, 2002, vol. 41, p. 155—163.
11. **Bringa E.M., Caro A., Victoria M. et al.** Atomistic modeling of wave propagation in nanocrystals. — *Minerals, Metals and Materials Society*, 2005, vol. 57, № 9, p. 67—70.
12. **Гиндин И.А., Стародубов Я.Д., Аксёнов В.К.** Структура и прочностные свойства металлов с предельно искаженной кристаллической решеткой. — *Металлофизика*, 1980, т. 2, № 2, с. 49—67.
13. **Бакай А.С.** Поликластерные аморфные тела. — М.: Энергоатомиздат, 1987. 190 с.
14. **Веркин Б.И., Манжелей В.Г., Григорьев В.Н. и др.** Свойства конденсированных фаз водорода и кислорода. Справочник. — Киев: Наукова Думка, 1984. 240 с.
15. **Кидяров Б.И.** Кинетика образования кристаллов из жидкой фазы. — Новосибирск: Наука, 1979. 134 с.
16. **Collins G.W.** Structure of vapor-deposited solid hydrogen films. — Report, 10th Target Fabrication Meeting. February 6—10, 1995, Taos, NM, USA.
17. **Miller J.R.** A new method for producing cryogenic laser fusion targets. — *Advances in Cryogenic Engineering*, 1979, vol. 34 (4), p. 669—675.
18. **Корешева Е.Р., Меркульев Ю.А., Никитенко А.И. и др.** Особенности разрушения криогенных мишеней и ввода их в фокус мощного лазера. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 1988, вып. 1, с. 57—61.
19. **Koresheva E.R., Merkuliev Yu.A., Nikitenko A.I. et al.** The peculiarities of laser cryogenic targets destruction and their injection into a powerful laser focus. — *Laser and Particle Beams*, 1988, vol. 6 (2), p. 245—253.
20. **Корешева Е.Р.** Структура криослоя в термоядерных мишенях. — *Краткие сообщения по физике ФИАН*, 1984, № 12, с. 35—38.
21. **Осипов К.А.** Аморфные и ультрадисперсные кристаллические материалы. — М.: Наука, 1972. 89 с.
22. **Burke J.E.** Atom Movements. — ASM, Cleveland, 1951. 209 p.
23. **Fullman R.L.** Metal Interfaces. — ASM, Cleveland, 1952. 179 p.
24. **Лариков Л.Н., Гейченко В.В., Фальченко В.М.** Диффузионные процессы в упорядоченных сплавах. — Киев: Наукова Думка, 1975.
25. **Lücke K., Detert K.** A quantitative theory of grain-boundary motion and recrystallization in metals in the presence of impurities. — *Acta Metallurgica*, 1957, vol. 5, p. 628—637.

26. **Granqvist C.G.** Comment on «Preparation of amorphous films of tin by quenching condensation with impurities». — *Z. Physik*, 1975, vol. B 21, p. 127—129.
27. **Granqvist C.G., Claesson T.** Localized phonons and lattice order transformations in thallium based alloys by superconductive tunneling. — *Z. Physik*, 1974, vol. 269, p. 23—30.
28. **Granqvist C.G., Claesson T.** Thin, quench-condensed lead-based alloy films investigated by resistivity and superconducting tunneling measurements. — *J. Low Temperature Physics*, 1973, vol. 13, № 1/2, p. 1—38.
29. **Barrett C.S., Meyer L., Wasserman J.** Crystal structure of solid hydrogen and deuterium, and of neon-hydrogen and neon-deuterium mixtures. — *J. Chemical Physics*, 1966, vol. 45, № 3, p. 834—837.
30. Судзуки К., Фудзиморо Х., Хасимото К. Аморфные металлы. — М.: Металлургия, 1987. 328 с.
31. **Koresheva E.R., Aleksandrova I.V., Osipov I.E. et al.** Progress in the extension of free-standing target technologies on IFE requirements. — *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 35, № 3, p. 290—300.
32. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Aleksandrova I.V.** Free-standing target technologies for inertial confinement fusion: fabrication, characterization, delivery. — *Laser and Particle Beams*, 2005, vol. 23, p. 563—571.
33. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Timasheva T.P., Yaguzinskiy L.S.** The issue of homogeneous solid H₂-layers formation inside free-standing microshells. — In: *Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001*. Elsevier, 2002, p. 767—771.
34. **Koresheva E.R., Osipov I.E., Timasheva T.P., Yaguzinskiy L.S.** A new approach to form transparent solid layer of hydrogen inside a microshell: application to inertial confinement fusion. — *J. Physics D: Applied Physics*, 2002, vol. 35, p. 825—830.
35. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al.** Ultra-fine fuel layers for application to ICF/IFE targets. — *Fusion Science and Technology*, 2013, vol. 63, p. 106—119.
36. **Корешева Е.Р., Крохин О.Н., Осипов И.Е., Тимашева Т.П., Ягузинский Л.С.** Криогенный слой топлива, топливное ядро и способ его получения. Патент РФ, заявка № 2001121680 от 2 августа 2001 г. — *Бюллетень изобретений*, 2002, № 31.
37. **Александрова И.В., Белолипецкий А.А., Корешева Е.Р. и др.** Криогенные мишени для реактора. Часть I. Диффузионное заполнение топливом сферических оболочек: Препринт ФИАН, 2012, № 4, Москва. 134 с.
38. **Ненарокова В.Т., Рязанцева Н.Н., Милешкин Ю.А.** Специализированные масс-спектрометры для определения изотопного состава водорода и гелия. — *Атомная энергия*, 1994, т. 76 (2), с. 120—124.
39. **Chhterbakov V.I., Bazdenkov S.V., Aleksandrova I.V.** Integrated FST-layering code for the optimization of fuel ice formation in moving ICF/IFE capsules. — Report, 27th European Conf. on Laser Interaction with Matter. October 7—11, 2002, Moscow, Russia. Book of abstracts, p. 166.
40. **Souers P.C.** Hydrogen Properties for Fusion Energy. — Lawrence Livermore National Laboratory, University of California Press, 1986. 203 p.
41. **Гальцов Н.Н., Прохвятилов А.И., Сржемечный М.А.** Влияние примеси молекул H₂ на структуру и параметры решетки Ne. — *Физика низких температур*, 2004, т. 30 (12), с. 1307—1314.
42. **Good R.J., Ferry G.V.** The wetting of solids by liquid hydrogen. — *Advances in Cryogenic Engineering*, 1963, vol. 8, p. 306—308.
43. **Золотухин И.В., Калинин Ю.Е.** Аморфные металлические сплавы. — *УФН*, 1990, т. 160, с. 75.
44. **Френкель Я.И.** Введение в теорию металлов. — Л.: Наука, 1972. 424 с.
45. **Бартенев Г.М.** Природа стеклования. — В сб.: Доклады Всесоюзного семинара «Новые идеи в физике стекла». 6—9 октября 1987 г., Москва, с. 3.
46. **Бартенев Г.М.** Строение и механические свойства неорганических стекол. — М.: Литература по строительству, 1966. 212 с.
47. **Мазурин О.В.** Стеклование и стабилизация неорганических стекол. — Л.: Наука, 1978. 621 с.
48. **Шальников А.И.** Сверхпроводящие свойства тонких металлических слоев. — *ЖЭТФ*, 1940, т. 10 (6), с. 630—640.
49. **Золотухин И.В., Калинин Ю.Е., Стогней О.В.** Новые направления физического материаловедения. — Изд. Воронежского государственного университета, 2000. 360 с.
50. **Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.** Физическая кинетика. — М.: Наука, 1979. 673 с.
51. **Grimval G., Sjodin S.** Correlation of properties of materials to Debye and melting temperatures. — *Physica Scripta*, 1974, vol. 10, p. 340—352.
52. **Захаров В.П., Герасименко В.С.** Структурные особенности полупроводников в аморфном состоянии. — Киев: Наукова Думка, 1976. 280 с.
53. **Нишанов В.Н., Собянин А.А., Цой Э.Н.** Пороговый характер диффузионного роста зародышей новой фазы во внешнем периодическом поле. — *Краткие сообщения по физике*, 1987, № 1, с. 18—20.
54. **Щербаков Г.Н.** Рентгеновские исследования твердого нормального дейтерия. — *Физика низких температур*, 1991, т. 17, № 2, с. 139—145.
55. **Roder H.M., Childs G.E., McCarthy R.D., Angerhofer P.E.** Survey of the properties of the hydrogen isotopes below their critical temperature. — NBS Technical Note, Monograph 74, 1965.
56. **Wanner R., Meyer H.** Sound velocity in solid hydrogen and deuterium. — *Physics Letters*, 1972, vol. A 41, № 3, p. 189—190.
57. **Александрова И.В., Корешева Е.Р., Кошелев Е.Л. и др.** К решению проблемы сохранения параметров криогенной мишени в процессе ее доставки в зону термоядерного горения. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2007, вып. 3, с. 27—47.
58. **Aleksandrova I.V., Koresheva E.R., Osipov I.E. et al.** Free-standing target technologies for ICF. — *Fusion Technology*, 2000, vol. 38, № 1, p. 166—172.
59. **Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A.** An efficient method for filling targets with a highly-pressurized gas fuel. Mathematical model for single- and multilayered target. — *J. Moscow Physics Soc.*, 1999, vol. 9, p. 325—335.
60. **Norimatsu T., Nagai K., Takeda T. et al.** Update for the drag force on an injection pellet and target fabrication for inertial fusion. — *Fusion Science and Technology*, 2003, vol. 43, № 3, p. 339—345.

61. Osipov I.E., Koresheva E.R., Baranov G.D. et al. A device for cryotarget rep-rate delivery in IFE target chamber. — Inertial Fusion Science and Application, State of the art 2001. Elsevier, 2002, p. 810—814.
62. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники. — М.: Энергия, 1973. 392 с.
63. Chen H.S. Glassy metals. — Reports on Progress in Physics, 1980, vol. 43, № 4, p. 353—432.
64. Nakai S., Miley J. Physics of High Power Laser and Matter Interactions. — In: World Scientific Publishing, Singapore, 1992.
65. Aleksandrova I.V., Belolipetskiy A.A., Kalabuhov V.A. et al. FST-technologies for high rep-rate production of HiPER scale cryogenic targets. — In: Proceed. SPIE, 2011, vol. 8080, p. 80802M(1—4).



Ирина Владимировна Александрова, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, участник многих российских и международных проектов, включая проекты РФФИ и МАГАТЭ по проблемам формирования топливных мишеней для ИТС; Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Ленинский пр. 53, Россия



Елена Ростиславовна Корешева, и.о. начальника отдела, д.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, руководитель многих российских и международных проектов, включая проекты РФФИ и МАГАТЭ по проблемам формирования топливных мишеней для ИТС; Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, 119991 Москва, Ленинский пр. 53, Россия; профессор; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
elena.koresheva@gmail.com



Олег Николаевич Крохин, д.ф.-м.н., академик, профессор, лауреат Ленинской премии (1950 г.), Государственной премии СССР (1984 г.), премии Президента РФ в области образования (2000 г.) и Демидовской премии (2005 г.); Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 119991 Москва, Ленинский пр. 53, Россия; заведующий кафедрой; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия



Игорь Евгеньевич Осипов, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности, участник многих российских и международных проектов, включая проекты РФФИ и МАГАТЭ по проблемам формирования топливных мишеней для ИТС; ООО «ЦЭ Интер РАО ЕЭС», 11935 Москва, ул. Большая Пироговская 27, стр. 2, Россия

Статья поступила в редакцию 29 октября 2014 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 2, с. 75—103.