

УДК 621.039+621.594

## ГЕНЕРАТОР МИШЕНЕЙ В ВИДЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТВЕРДОГО ВОДОРОДА ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2013 г. И. В. Виняр, А. Я. Лукин, П. В. Резниченко

ПЕЛИН

Россия, 195220, С.-Петербург, ул. Гжатская, 27а

Поступила в редакцию 21.12.2013 г.

Впервые для ядерных исследований изготовлены безоболочечные мишени в виде пленок твердого водорода толщиной до 25 мкм. Пленки шириной 3–10 мм подаются из генератора мишеней с постоянной скоростью 5–20 мм/с в открытое пространство вакуумной камеры для облучения их пучками тяжелых ионов.

DOI: 10.7868/S0032816213050091

### ВВЕДЕНИЕ

Водородные мишени широко используются в различных экспериментах по изучению фундаментальных свойств материи. Особую привлекательность при изучении ядерных столкновений представляют мишени из твердого водорода, поскольку, в отличие от газовых или жидких мишеней, они не требуют оболочек для сохранения своей формы и объема. При облучении таких мишеней отсутствуют паразитные взаимодействия частиц со стенками оболочки и повышается точность анализа продуктов реакций.

Однако создание твердородных мишеней, помимо обеспечения в экспериментальной установке высокого вакуума и криогенных температур, требует разработки технологии изготовления кристаллов, пригодных для облучения. Как правило, такие кристаллы выращивают в замкнутом объеме, ограниченном либо фланцами, которые перед облучением удаляют [1, 2], либо тонкими майларовыми пленками, взаимодействие с которыми учитывается при анализе результатов [3]. Диаметр мишеней составляет обычно 20–30 мм, а их толщина  $\geq 1$  мм. Это не позволяет использовать для облучения пучки тяжелых ионов с низкой энергией (3–5 МэВ/нуклон), так как продукты реакции остаются внутри мишени и их невозможно зарегистрировать.

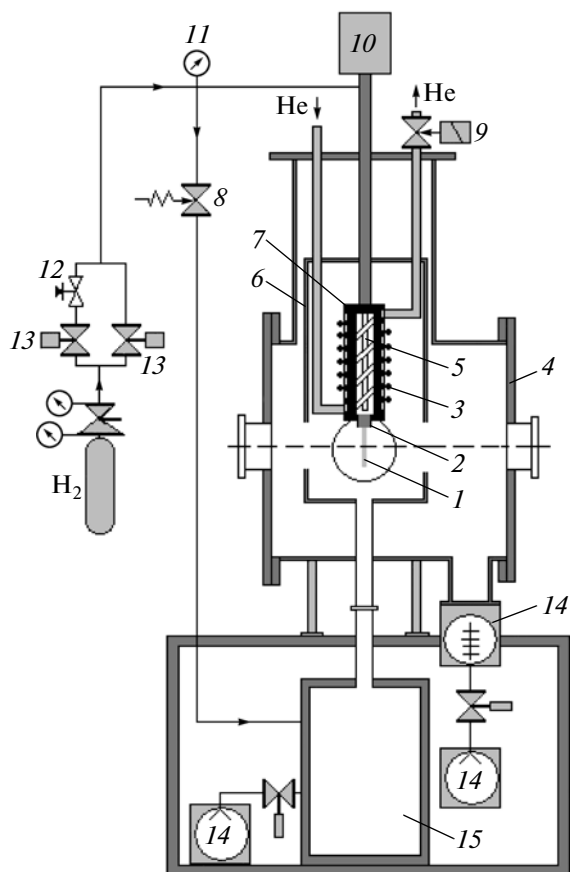
В данной статье представлен новый и более простой способ изготовления твердородных мишеней, которые могут быть использованы в экспериментах с пучками тяжелых ионов низкой энергии. Помимо полного отсутствия какой-либо оболочки и связанного с ее удалением нарушения поверхностных слоев, предлагаемый способ позволил впервые изготовить водородные мишени толщиной 0.025–0.200 мм.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ И КОНСТРУКЦИЯ ГЕНЕРАТОРА МИШЕНЕЙ

В основе нового способа изготовления мишеней лежит технология шнековой экструзии твердых изотопов водорода, разработанная компанией ПЕЛИН при создании инжекторов для ввода топлива в плазму термоядерных установок LHD и TORE-SUPRA [4, 5]. Внутри охлаждаемого экструдера непрерывно подается газообразный водород, где он замерзает и выдавливается шнеком сквозь фильеру в вакуум в виде прозрачного ледяного стержня. Методика моделирования течения водорода в шнековом экструдере с расчетом его параметров и количества производимого льда описана в [6].

Поскольку приемлемая для облучения пучками тяжелых ионов толщина пленки должна быть минимальной ( $\leq 0.2$  мм) при ширине в несколько миллиметров и скорости движения 5–20 мм/с, в генераторе мишеней необходимо использовать шнековый экструдер производительностью  $Q = 20\text{--}40$  мм<sup>3</sup>/с твердого водорода.

Схема генератора мишеней приведена на рис. 1. В вакуумной камере, вдоль горизонтальной оси которой может быть направлен пучок тяжелых ионов, на трубке подвешен экструдер, окруженный теплоизолирующим экраном. К трубке подсоединен трубопровод газовой системы для подачи газообразного водорода. Внутри экструдера вставлен шнек, вал которого уплотнен в верхней части, соединенной с мотором. На вал шнека вблизи мотора надета крыльчатка, по вращению лопастей которой оптическим датчиком измеряется скорость вращения шнека. На верхнем фланце камеры размещены регулятор потока жидкого гелия и патрубков для подачи жидкости в теплообменник экструдера, на который намотан нагреватель. В совокупности с нагревателем регулятор



**Рис. 1.** Схема генератора мишеней. 1 – мишень; 2 – фильера; 3 – нагреватель; 4 – вакуумная камера; 5 – шнек; 6 – теплоизолирующий экран; 7 – экструдер; 8 – предохранительный клапан; 9 – регулятор потока гелия; 10 – мотор; 11 – датчик давления; 12 – игольчатый клапан; 13 – клапаны газовой системы; 14 – вакуумные насосы; 15 – буферная камера.

потока позволяет изменять и поддерживать температуру экструдера в требуемом рабочем диапазоне.

К выходу экструдера прикреплена фильера, которая расположена вблизи оси облучения мишени на уровне пары окон вакуумной камеры, предназначенных для наблюдения за экструзией льда. Вакуумная камера оснащена мощной системой откачки для снижения влияния на температуру экструдера сублимационного потока при экструзии непосредственно в открытое пространство камеры. Газовая система состоит из датчика давления, соединенного трубопроводом с предохранительным клапаном, и двух линий подачи водорода в экструдер, оснащенных клапанами. В одной из линий находится дополнительный игольчатый клапан, позволяющий минимизировать поток водорода в экструдер на этапе его первичного заполнения.

Генератор оснащен также системой управления, которая обеспечивает автоматическое заполнение и опустошение экструдера, а также экструзию с заданной скоростью. Система использует информацию с датчиков температуры, давления и скорости вращения шнека для управления клапанами, нагревателями, регулятором расхода гелия и приводом шнека. Управление генератором осуществляется оператором с персонального компьютера, к которому через USB-модуль, содержащий многоканальные а.ц.п. и ц.а.п., а также цифровые входы/выходы сигналов, подключен исполнительный электронный блок с блоками питания, силовыми ключами, усилителями и т.д.

При работе генератора газообразный водород охлаждается и замерзает внутри экструдера. Непрерывно вращаемый мотором шнек выдавливает твердый водород через фильеру, форма канала которой определяет форму экструдированного материала. Между экспериментами, при необходимости, фильеру достаточно просто заменить, например, на фильеру с регулируемой толщиной канала [5] после отогрева экструдера до комнатной температуры. На выходе из фильеры экструдированная пленка водорода движется вниз перпендикулярно оси, вдоль которой направлен пучок тяжелых ионов для облучения мишени.

#### ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРА МИШЕНЕЙ

При выборе конструктивных параметров основного узла генератора мишеней – шнекового экструдера – использована модель, описанная подробно в работе [6]. Для заданной геометрии шнека рассчитывались “нагрузочные” характеристики экструдера, связывающие производительность  $Q$  твердого водорода и давление  $P$  на выходе экструдера. Характеристики экструдера со шнеком, имеющим радиус 6 мм, шаг винтовой нарезки 12 мм и глубину канала 1.5 мм, при скоростях вращения шнека 4–16 оборотов/мин приведены на рис. 2 (кривые 1–4). В расчетах в качестве параметров зафиксированы также расход жидкого гелия (12 л/ч) и его температура на входе в экструдер (5 К). Очевидно, что максимальная производительность экструдера достигается при отсутствии фильеры, когда давление на выходе равно нулю. При вращении шнека со скоростью 16 оборотов/мин производительность  $Q$  может достигать 60 мм<sup>3</sup>/с, но водород при этом практически не сжимается и качественных образцов получить не удастся.

На рис. 2 приведены также характеристики фильер (штриховые кривые 5, 6), рассчитанные в предположении течения водорода в канале прямоугольного сечения шириной 10 мм и высотой 0.1 и 0.2 мм при температуре 11 К. Характеристика фильеры показывает, какое давление  $P$  необходимо для продавливания сквозь нее водорода при

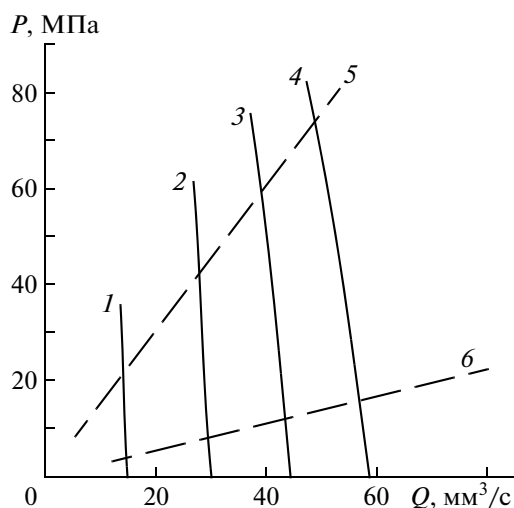


Рис. 2. Расчетные характеристики шнека (1–4) при различных скоростях его вращения: 4 (1), 8 (2), 12 (3), 16 оборотов/мин (4) – и фильер (5, 6) с шириной прямоугольной щели 10 мм и толщиной 0.1 (5) и 0.2 мм (6).

заданном расходе  $Q$ . Пересечение характеристик фильеры и экструдера дает рабочую точку, в которой давление, развиваемое шнеком, обеспечивает расход водорода сквозь данную фильеру, равный производительности экструдера. Как показали наблюдения, при давлении  $\geq 5$ –10 МПа [7] и температуре 10–11 К на выходе из фильеры можно наблюдать прозрачный твердый водород. Таким образом, согласно расчету, стабильный режим экструзии с производительностью  $\sim 30$  мм<sup>3</sup>/с можно получить в экструдере длиной 160 мм с указанными выше размерами шнека при его вращении со скоростью  $\sim 8$  оборотов/мин.

При испытаниях экструдер охлаждался до 8 К за 2 ч при расходе жидкого гелия 5 л/ч. После стабилизации температуры экструдера на уровне 9 К водород под давлением 0.1 МПа подавали в экструдер по линии с игольчатым клапаном. Подача

водорода регулировалась системой управления так, чтобы температура в фильере не превышала 10 К, а вакуум в камере не опускался ниже  $10^{-2}$  Па. В начале напуска водород подавали импульсами длительностью  $< 2$  с. По мере замерзания водорода в экструдере клапан открывали на более длительное время, пока температура фильеры не переставала реагировать на поступление водорода в экструдер, а температура в верхней части экструдера не начинала снижаться. Одновременно открывали клапан в основной линии подачи водорода, при этом его давление возрастало до 0.4–0.5 МПа, а вакуум в камере повышался до  $10^{-5}$  Па из-за прекращения просачивания газообразного водорода сквозь фильеру. На этом цикл первичного заполнения экструдера завершался. Во время работы генератора обе линии подачи водорода были открыты, и по мере его расхода пополнение экструдера происходило автоматически.

Перед изготовлением мишени мотор постепенно раскручивал шнек до скорости 6 оборотов/мин. Водородная пленка появлялась на выходе фильеры спустя  $\sim 100$  с после начала вращения шнека и двигалась со скоростью  $\sim 5$  мм/с. При увеличении скорости вращения шнека до 10–12 оборотов/мин скорость движения пленки повышалась до 20 мм/с. Чтобы увеличить адсорбционные свойства криогенных узлов и снизить влияние на температуру экструдера сублимирующего водорода, выдавленного из фильеры, расход гелия увеличивали до 10–15 л/ч. В экспериментах использовались прямоугольные фильеры шириной 10 мм с щелями толщиной 0.1 и 0.2 мм и фильера шириной 3 мм с щелью толщиной 25 мкм.

На рис. 3 показаны фотографии пленки водорода различной толщины, полученные при использовании этих фильер. Пленки водорода были прозрачными. Характерные неоднородности пленки, как удалось установить, уменьшаются при использовании фильер с более гладкой внутренней поверхностью. В зависимости от технологии изго-

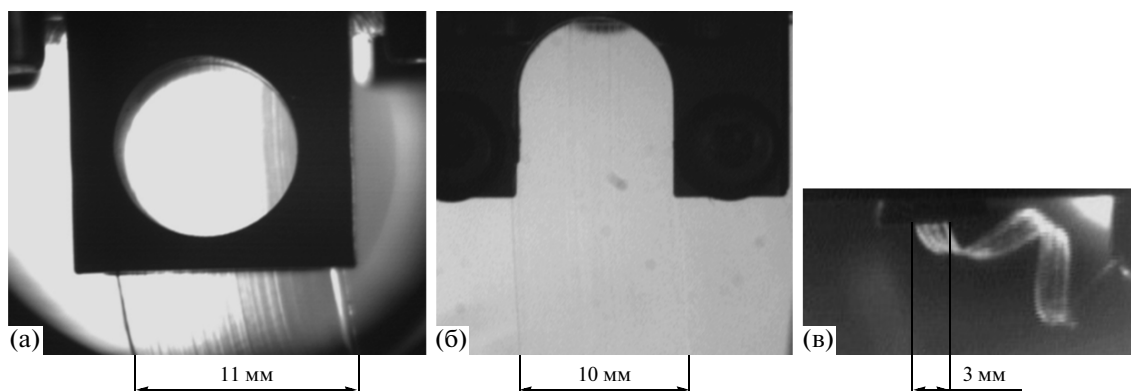
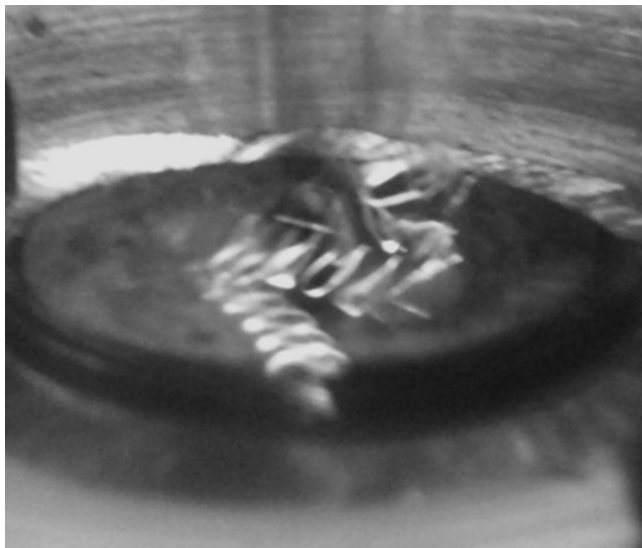


Рис. 3. Пленки твердого водорода толщиной 0.2 (а), 0.1 (б) и 0.025 мм (в) различной ширины.



**Рис. 4.** Гофрированная пленка твердого водорода толщиной 0.025 мм.

товления фильер нам удавалось получать прямые, слегка изогнутые, загнутые в спираль или даже гофрированные пленки (рис. 4).

Анализ экспериментальных данных по экструзии водородных пленок сквозь различные фильеры показал, что расчетные значения рабочих точек генератора по заданным характеристикам шнека и фильер (рис. 2) удовлетворительно совпадают с экспериментально полученными. Это позволяет использовать модельные расчеты шнекового экструдера для создания генераторов мишеней различных размеров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный способ изготовления безоболочечных мишеней для ядерных исследований позволил получать пленки твердого водорода толщиной 0.025–0.200 мм. Часть изготовленных пленок была успешно использована при облучении ионными пучками на ускорителе в СЕА/DAM/DIF [8]. Важным преимуществом таких мишеней является полное отсутствие каких-либо оболочек как при их создании, так и при использовании в экспериментах.

Авторы благодарны сотрудникам СЕА/Saclay А. Gillibert и СЕА/Grenoble J.-P. Perin за инициирование разработки генератора пленочных водородных мишеней и частичное финансирование его испытаний, а также за проведение совместной разработки новой модели генератора мишеней.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ishimoto S., Kobayashi T., Morimoto K. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A 480. P. 304.
2. *Matsuda Y., Sakaguchi H., Zenihiro J. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2011. V. A 643. P. 6.
3. *Dolegieviev P., Gillibert A., Mittig W. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. A 564. P. 32.
4. *Виняр И.В., Лукин А.Я., Умов А.П. и др.* // ПТЭ. 2006. № 5. С. 148.
5. *Виняр И.В., Умов А.П., Лукин А.Я. и др.* // ПТЭ. 2006. № 4. С. 143.
6. *Виняр И.В., Лукин А.Я.* // ЖТФ. 2000. Т. 70. Вып. 1. С. 107.
7. *Виняр И.В., Кутеев Б.В., Скобликов С.В. и др.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 7. С. 167.
8. *Obertelli A., Uesaka T.* // Eur. Phys. Jour. 2011. V. A 47. P. 105.