УДК 533.9:621.03

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИОГЕННОЙ КОРПУСКУЛЯРНОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ЛАЗЕРНОМУ УСКОРЕНИЮ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

А.В. Бухаров[1], M. Büscher[2], А.С. Герасимов[3], А.Ф. Гиневский[1]
[1]Московский Энергетический Институт, Москва, Russia;
[2]Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany;
[3]Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия
E-mail: boukharov@mail.ru

Альтернативой современным ускорителям может стать ускоритель, использующий взаимодействие мощных ультракоротких лазерных импульсов с разреженной плазмой. Успешное продвижение в этом направлении связано как с оптимизацией параметров используемой лазерной системы, так и с оптимизацией параметров мишени. Мишенью может служить разработанная нами криогенная корпускулярная мишень. Работоспособность прототипа мишени была проверена в тестовых экспериментах. В экспериментах получен монодисперсный поток твёрдых гранул водорода малой расходимости с диаметром гранул D=12…60 мкм и скоростью V=70 м/с. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности прототипа мишени и возможности использования его в экспериментальных исследованиях по лазерному ускорению заряженных частиц.

1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие лазерных технологий сделало возможным получение ультракоротких лазерных импульсов с высокой интенсивностью. Наиболее интересно использование таких лазерных импульсов для лазерного ускорения заряженных частиц (электронов, протонов и тяжёлых ионов) [1]. Мощный лазерный импульс, попадая в мишень, возбуждает плазменные волны – они обычно называются кильватерными (wake waves). Под действием излучения образуется локальное смещение электронов и ионов. Сила притяжения электронов и ионов и стремится вернуть электроны назад и как следствие возникают осцилляции на плазменной частоте. Если пучок электронов правильно инжектировать в кильватерную волну, то его можно эффективно ускорить. Лазерные ускорители могут стать хорошей альтернативой современным ускорителям.

Применение лазерного ускорения позволит: создать компактные источники протонов для радиографии; проводить эксперименты по ядерной физике на сверхкоротких промежутках времени; даст возможность производить изотопы и разрабатывать новые методы в ядерной медицине.

Успешное продвижение в этом направлении связано как с оптимизацией параметров используемой лазерной системы, так и с оптимизацией параметров мишени.

В качестве мишени для лазерного ускорения заряженных частиц можно использовать разработанную нами криогенную корпускулярную мишень [2]. Корпускулярная мишень обладает следующими важнейшими свойствами, отличающими её от мишеней других типов: высокой светимостью; возобновляемостью мишени; малыми размерами частиц (диаметр гранул не превосходит нескольких десятков микрон); стабильностью размеров и траектории движения – разброс по диаметрам и траектории движения гранул не превосходит долей миллиметра.

Теоретической основой работы мишени является теория Релея [3]. В соответствии с этой теорией при определённом соотношении между скоростью и диаметром струи и частотой внешнего возбуждения струя распадается на капли с минимальным разбросом по скорости и размерам (монодисперсные капли).

Для монодисперсного распада криогенных струй необходимо дополнительно выполнить следующие условия: необходимо устранить внешние вибрации со стороны системы охлаждения; жидкая струя должна быть ламинарной; температурный градиент при ожижении газа и формировании жидкой струи должен быть минимальным.

Для выполнения условий, необходимых для монодисперсного распада струй криогенных жидкостей, была разработана специальная схема охлаждения. На базе новой схемы охлаждения создан прототип криогенной корпускулярной мишени, позволяющий получать поток твёрдых монодисперсных водородных гранул [4].

На Рис.1 изображен принцип работы криогенной корпускулярной мишени. Конструкционными элементами мишени являются: криостат; генератор сферических монодисперсных капель; система вакуумных камер и шлюзов; ловушка.

Работа мишени происходит следующим образом. Струя жидкого водорода вытекает из генератора капель в вакуумную камеру. Под действием специального возмущения, накладываемого на жидкую струю, струя распадается на одинаковые капли. В вакуумной камере за счет интенсивного испарения происходит охлаждение капель, которые замерзая, становятся твёрдыми гранулами.

PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY. 2010. № 2.
Series: Nuclear Physics Investigations (53), p.60-63.

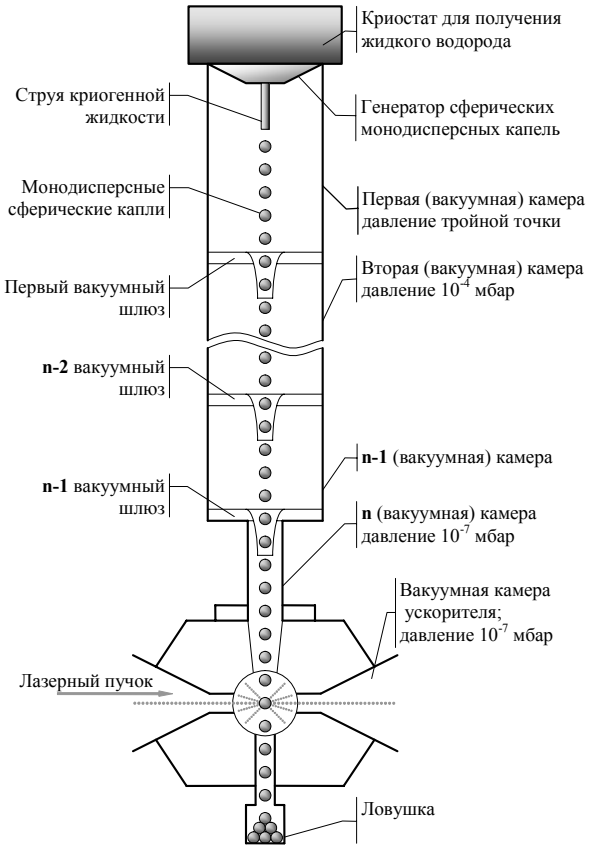

Рис.1. Принцип работы криогенной корпускулярной мишени

Монодисперсные твёрдые гранулы через систему отверстий (шлюзов) поступают в рабочую камеру, где происходит взаимодействие с лазерным излучением. Шлюзы обеспечивают минимальное натекание в рабочую камеру.

Для уменьшения натекания можно использовать две и более вакуумные камеры, разделенные между собой шлюзами.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основным элементом мишени является криостат. Именно в криостате происходит: ожижение водорода, распад жидкой водородной струи на одинаковые капли, образование из капель твердых гранул и уменьшение давления от давления тройной точки до давления, необходимого для нормальной работы ускорителя.

Криостат представляет собой цилиндрический сосуд с внешним диаметром 410 мм и высотой 1300 мм, изготовленный из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Криостат содержит: гелиевую и азотную ванны, теплообменники, конденсатор, генератор монодисперсных капель, камеру тройной точки, две вакуумные камеры со шлюзами и юстировочный узел. Емкости гелиевой и азотной ванн – 9 и 14 л соответственно.

Для снижения теплопритоков к низкотемпературным частям криостата установлены медные радиационные экраны. Наружная обечайка криостата состоит из трех отдельных узлов, что обеспечивает легкий доступ к камере тройной точки и генератору капель.

Генератор монодисперсных капель представляет собой медный цилиндр, внутри которого расположены пьезоэлементы. С помощью пьезоэлементов на поверхности струи возбуждаются капиллярные волны, и струя распадается на одинаковые капли. Для формирования тонкой струи на конце генератора крепится сопло с малым выходным отверстием. Минимальный диаметр выходного отверстия сопла составляет 16 мкм.

Основные элементы криостата приведены на Рис.2. Для начального охлаждения водорода используется предварительный теплообменник из медной трубки 1. Трубка свернута в спираль и погружена в ванну с жидким азотом 4. Особенностью схемы ожижения является использование одного и того же потока гелия как для охлаждения водорода в предварительном теплообменнике, так и для конденсации и переохлаждения в конденсаторе. Пары гелия с температурой 4,5 К поступают из гелиевой ванны 5 сначала в переохладитель и конденсатор 3, потом, проходя через них, нагреваются и используются далее для охлаждения водорода в предварительном теплообменнике 2.

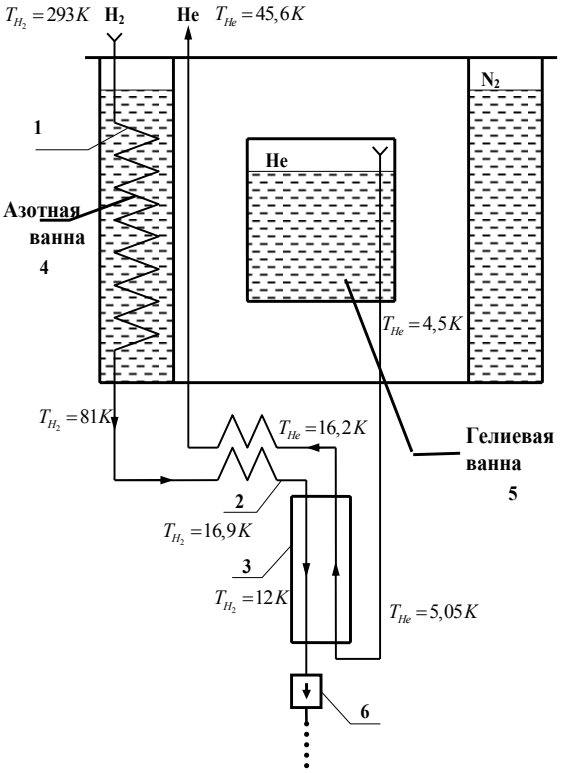

Рис.2. Основные элементы криостата

Из второго предварительного теплообменника охлажденный до 16,9 К водород поступает в конденсатор. Конденсатор проточного типа с винтовым каналом обеспечивает дальнейшее охлаждение водорода до температуры ожижения.

Изменяя температуру или расход паров гелия, можно регулировать температуру водорода на выходе из генератора капель 6. Тем самым можно обеспечивать устойчивый распад жидкой струи на капли.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Работоспособность прототипа криогенной корпускулярной мишени была проверена в тестовых экспериментах по получению монодисперсных капель жидкого водорода. Предварительные эксперименты были проведены в Институте теоретической и экспериментальной физики. Окончательные эксперименты были проведены в Институте ядерной физики исследовательского центра г. Юлих [5]. Для получения капель разного диаметра использовались сопла с диаметрами выходных отверстий от 16 до 20 мкм.

Контроль над теплофизическими процессами, происходящими в криостате, осуществлялся с помощью системы датчиков давления и температуры. Для контроля давления использовали датчики фирмы "Balzers" следующих типов: APR 260 1000 мбар, APR 265 5000 мбар, TPR 260 и PKR.

Показания датчиков оцифровывались в блоке измерения давления TPG 265 "Balzers" и поступали на ЭВМ. Погрешность измерения давления составляла: для датчиков типа APR ±10 мбар, для датчиков типа TPR $\pm 10^{-4}$ мбар и для датчиков типа PKR $\pm 10^{-8}$ мбар.

Для контроля температуры использовали специально откалиброванные полупроводниковые датчики TG-120-SD фирмы "Lake Shore Cryotronics".

Показания термометров оцифровывались в блоке измерения температур Thermometer 208 "Lake Shore Cryotronics" и поступали на вход ЭВМ. Погрешность измерения температуры составляла ±0,3 К. С помощью ЭВМ осуществлялась обработка показаний датчиков и визуализация полученной информации.

Для контроля процесса каплеобразования использовали строботахометр СТ-МЭИ и цифровую телекамеру PixelFly фирмы “Pro.imaging”. Строботахометр подсвечивал струю и капли короткими световыми импульсами (длительность импульса порядка 1 мкс). Запуск строботахометра осуществлялся сигналом с частотой, синхронной частоте сигнала, подаваемого на генератор капель. Цифровая телекамера использовалась для фиксации процессов, происходящих при образовании капель.

Эксперименты по получению монодисперсных капель водорода проходили следующим образом. Предварительно проводилась откачка камер криостата и заполнение азотной ванны жидким азотом.

Через 8 ч основные внутренние элементы криостата охлаждались до температуры жидкого азота. После охлаждения гелиевой ванны до температуры жидкого азота ее заполняли жидким гелием. Пары гелия из ванны использовались для окончательного охлаждения внутренних частей криостата и теплообменников системы ожижения. Температура внутри криостата постепенно падала, и при охлаждении теплообменников системы ожижения до температуры 70 К в теплообменники и конденсатор подавали газообразный водород. Водород проходил через теплообменники и конденсатор, охлаждался и поступал в генератор капель. Через сопло генератора капель водород поступал в камеру тройной точки. При охлаждении генератора до температуры порядка 20 К начинался процесс ожижения водорода. Началу ожижения соответствует появление двухфазного потока. Для предотвращения замерзания водорода на выходе из генератора монодисперсных капель в камере тройной точки создавали давление, равное давлению тройной точки. При температуре около 17 К на выходе генератора капель появлялась струя, распадающаяся на одинаковые капли.

Процесс ожижения, появление устойчивой струи жидкого водорода и распад струи водорода на капли регистрировали с помощью специальной диагностической системы. В состав системы входят четыре CCD-камеры. Две камеры используются для пространственного наблюдения процесса каплеобразования. Две другие установлены на выходе из шлюза и используются для наблюдения и определения параметров гранул. Изображения капель и гранул оцифровываются, а затем обрабатываются с помощью специального программного обеспечения. Результатом обработки является следующая информация: размер капель и гранул, скорость капель и гранул, величина угловой и пространственной расходимости потока.

На установке впервые был получен монодисперсный распад тонких струй жидкого H_2. Фотографии наиболее характерных режимов распада струй жидкого H_2, истекающих из сопла с диаметром выходного отверстия 20 мкм, приведены на Рис.3. В экспериментах получен монодисперсный поток твёрдых гранул водорода с диаметром гранул D=12…60 мкм и скоростью V=70 м/с. Впервые измерены величины угловой и пространственной расходимости потока.

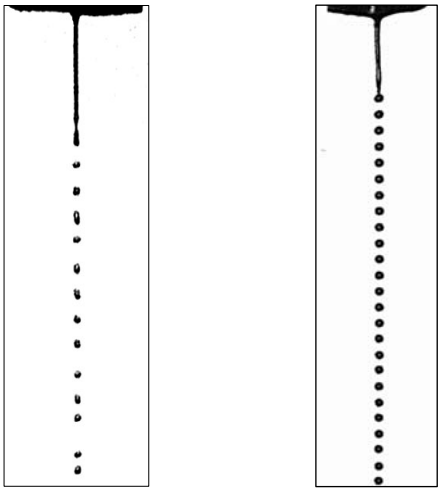

Рис.3. Фотографии наиболее характерных режимов распада струй жидкого H_2, истекающих из сопла с диаметром выходного отверстия 20 мкм. Правая фотография соответствует монодисперсному распаду

Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности прототипа мишени и возможности использования его в экспериментальных исследованиях по лазерному ускорению заряженных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создан прототип криогенной водородной мишени. Проведены тестовые эксперименты, показавшие работоспособность мишени. В экспериментах полу-

чен монодисперсный поток твёрдых гранул водорода малой расходимости с диаметром гранул D=12…60 мкм и скоростью V=70 м/с.

В дальнейших работах планируется использовать лазерную систему Дюссельдорфского Университета со следующими характеристиками: длительность лазерного импульса порядка 10 фс, мощность импульса 100 TW. В соответствии с предварительными расчётами совместное использование криогенной водородной мишени и лазерной системы Дюссельдорфского Университета даст возможность получать потоки ионов с энергией ~10 МэВ.

Работа была поддержана следующими грантами: РФФИ 07-08-00747-а, РФФИ 08-08-91950-ННИО_а, РФФИ 09-08-91331-ННИО_а.

ЛИТЕРАТУРА

1. J.M. Dawson. Plasma Particle Accelerators // *Scientific American*. 1989, v.260, №3, p.54-61.
2. Патент на изобретение №2298090 RU. Способ получения криогенной корпускулярной мишени и устройство для его осуществления.
3. Lord Rayleigh. On the instability of a cylinder of viscous liquid under capillary force // *Phil. Mag.* 1892, v.34, p.145-154.
4. А. В. Бухаров, В. Боргс, В. Н. Афанасьев и др. *Криогенные корпускулярные мишени. Генерация гранул водорода: расчет основных конструкционных элементов, экспериментальный стенд, тесты* / Препринт ИТЭФ №9-05. Издательство ИТЭФ, 2005.
5. A. Bukharov, M. Buescher, A. Gerasimov, V. Chernetsky. Dynamics of Cryogenic Jets: Non-Rayleigh Breakup and Onset of Non-Axisymmetric Motions // *Phys. Rev. Lett.* 2008, 100:174505.

Статья поступила в редакцию 07.09.2009 г.

.

USE OF A CRYOGENIC CORPUSCULAR TARGET FOREXPERIMENTS ON LASER ACCELERATION OF THE CHARGED PARTICLES

A.V. Boukharov, M. Büscher, A.S. Gerasimov, A.F. Ginevskii

The accelerator using interaction of powerful ultra short laser impulses with rarefied plasma can become alternative to modern accelerators. Successful advancement in this direction is connected as with optimization of parameters of used laser system, and with optimization of parameters of a target. As a target used was made of the cryogenic corpuscular target, developed by us. The efficiency of a target prototype has been checked up in the test experiments. The monodisperse stream of the firm hydrogen granules of the narrow divergence with diameter of granules D=12…60 μm, and speed V=70 m/s is received in experiments. The results show the efficiency of a target prototype and the possibility of its use in experimental researches in the laser acceleration of charged particles.

ВИКОРИСТАННЯ КРИОГЕННОЇ КОРПУСКУЛЯРНОЇ МІШЕНІ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ПО ЛАЗЕРНОМУ ПРИСКОРЕННЮ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК

А.В. Бухаров, M. Büscher, А.С. Герасимов, А.Ф. Гіневський

Альтернативою сучасним прискорювачам може стати прискорювач, що використовує взаємодію потужних ультракоротких лазерних імпульсів з розрідженою плазмою. Успішне просування в цьому напрямі пов'язане як з оптимізацією параметрів використовуваної лазерної системи, так і з оптимізацією параметрів мішені. Мішенню може служити розроблена нами криогенна корпускулярна мішень. Працездатність прототипу мішені була перевірена в тестових експериментах. У експериментах отримано монодисперсний потік твердих гранул водню малої розбіжності з діаметром гранул D=12…60 мкм і швидкістю V=70 м/с. Отримані результати свідчать про працездатність прототипу мішені і можливості використання його в експериментальних дослідженнях по лазерному прискоренню заряджених часток.