

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ МОЛЕКУЛ H_2 И D_2

© 2019 г. Д. К. Топорков^{a,b,*}, С. А. Зеваков, Д. М. Николенко^a,
И. А. Рачек^a, Ю. В. Шестаков^{a,b}, А. В. Юрченко^b

^a Институт ядерной физики СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

* e-mail: D.K.Toporkov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 14.03.2018 г.

После доработки 04.06.2018 г.

Принята к публикации 20.06.2018 г.

Стенд предназначен для получения поляризованных по ядерному спину молекул водорода и дейтерия. Для пространственного разделения молекул с различными магнитными моментами методом спиновой фильтрации в неоднородном магнитном поле использованы сверхпроводящие секступольные магниты с индукцией магнитного поля вблизи полюсов 3.4 Тл и градиентом поля 320 Тл/м. Обоснован выбор расположения элементов источника поляризованных молекул. С целью получения сверхвысокого вакуума в камере регистрации молекулярного пучка применены криогенные насосы. При температуре сопла 7 К измеренный поток поляризованных по ядерному спину молекул водорода $3 \cdot 10^{12}$ молекул/с. Для дейтерия измеренный поток меньше в 7 раз из-за малости магнитных моментов.

DOI: 10.1134/S0032816219010257

ВВЕДЕНИЕ

Получение поляризованных молекул водорода и его изотопов имеет важное значение для изучения динамики поляризации в молекулах при их столкновениях со стенками или при конденсации в жидкую или твердую фазу. В литературе обсуждается возможность применения поляризованного топлива в термоядерных реакциях синтеза для производства энергии [1]. Так в случае полностью поляризованных ядер дейтерия и 3He сечение реакции синтеза увеличится на 50%. Столь сильный эффект от наличия поляризации частиц, участвующих в реакции, был подтвержден экспериментально [2].

Современные источники поляризованных атомов водорода и дейтерия позволяют получать пучки интенсивностью около 10^{17} атомов/с. Подробный обзор существующих источников поляризованных атомов водорода приведен в работах [3, 4]. Интенсивность таких источников принципиально ограничена рассеянием атомов друг на друге в плотном пучке, поэтому ожидать прогресса в развитии таких источников не приходится. Другой недостаток таких источников состоит в том, что накапливать и хранить поляризованный дейтерий/водород в атомарном состоянии не представ-

ляется возможным — неизбежно происходит рекомбинация атомов в молекулы.

Прямое получение поляризованных молекул водорода с помощью обыкновенного магнита Штерна Герлаха было предложено в [5], однако реализовано не было. В [6] было приведено исследование поляризации водородного льда при температуре 0.3 К, полученного в результате рекомбинации поляризованных атомов водорода. К удивлению авторов, поляризация исследуемого образца оказалась равной нулю. Образец был ортоводородом, и его поляризация с характерным временем 11 мин возрастала к равновесному значению 3.4% в поле 6.7 Тл. Объяснение полученному результату не было дано. Похожее исследование по измерению ядерной поляризации молекул водорода и дейтерия, получаемых в результате рекомбинации поляризованных атомов из источника, ведется в настоящее время в [7]. Авторы измеряют высокую ядерную поляризацию в молекулах, полученных таким образом. Однако скорость производства молекул ограничена интенсивностью поляризованного пучка из источника.

Здесь мы описываем экспериментальный стенд для получения поляризованных молекул, созданный на базе компонентов имеющегося у

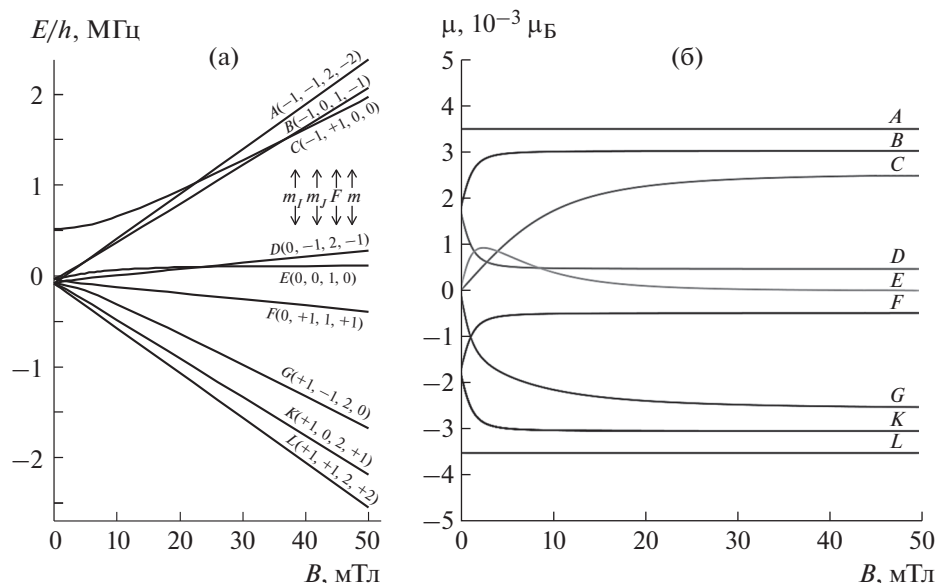


Рис. 1. а – сверхтонкая энергетическая структура молекулы водорода в магнитном поле [12]; m_l, m_j, m – проекции спинового I , орбитального J и полного F моментов соответственно; б – магнитные моменты молекул в соответствующих состояниях в единицах магнетона Бора (μ_B).

нас источника поляризованных атомов дейтерия [8]. Первые результаты по получению поляризованных молекул были приведены в [9, 10].

СВОЙСТВА МОЛЕКУЛ ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРИЯ

Как водород, так и дейтерий имеют два спиновых изомера, орто-состояние, когда спиновая волновая функция симметрична (спины ядер в молекуле водорода параллельны), и пара-состояние, когда спины антипараллельны. При обычных условиях нормальный водород представляет собой смесь 3/4 орто- и 1/4 пара-модификации, а нормальный дейтерий – 2/3 орто- и 1/3 пара-модификации. При низких температурах термодинамически стабильны орто-модификация дейтерия и пара-модификация водорода. Самопроизвольное орто-пара-превращение при низких температурах происходит очень медленно. Молекулы водорода, имеющие различные проекции магнитного момента, могут быть пространственно разделены в неоднородном магнитном поле, что впервые было продемонстрировано в работе [11]. Энергетическая структура 9-ти уровней основного состояния молекулы водорода в магнитном поле и магнитные моменты этих уровней приведены на рис. 1. Поскольку молекулы имеют магнитный момент порядка ядерного магнетона, градиент отклоняющего магнитного поля должен быть большим.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА

Как было сказано ранее, стенд создан на базе компонентов имеющегося у нас источника поляризованных атомов дейтерия. Источник содержит пять сверхпроводящих секступольных магнитов, заключенных в двух цилиндрических объемах, соединенных с криостатом, содержащим 130 л жидкого гелия. Гелиевый объем криостата и объемы, содержащие магниты, соединены друг с другом и заполняются жидким гелием. Они окружены экранами, имеющими температуру, близкую к температуре жидкого азота, содержащегося в дополнительных объемах источника. Для сепарации молекул водорода или дейтерия применяются два магнита, находящиеся в одном из объемов. Внешний вид установки и ее схема приведены на рис. 2. На рис. 3 показан внешний вид этих магнитов до их помещения в криостат. Обмотки магнитов выполнены из сверхпроводящего многожильного провода NbTi диаметром 0.85 мм и упрочнены заливкой компаунда на основе эпоксидной смолы. Подробное описание изготовления магнитов и их характеристик приведено в работе [13].

Внутренний диаметр трубки вакуумной камеры определяет доступную апертуру магнитов, она равна 42 мм. Два магнита длиной 7.0 и 12.5 см, разделенные промежутком в 31 см, были применены для фокусировки пучка молекул. Магнитное поле на расстоянии 21 мм от оси магнита при токе в обмотке 350 А имеет индукцию 3.4 Тл и градиент магнитного поля 320 Тл/м. Угол, на который отклоняется молекула водорода в области

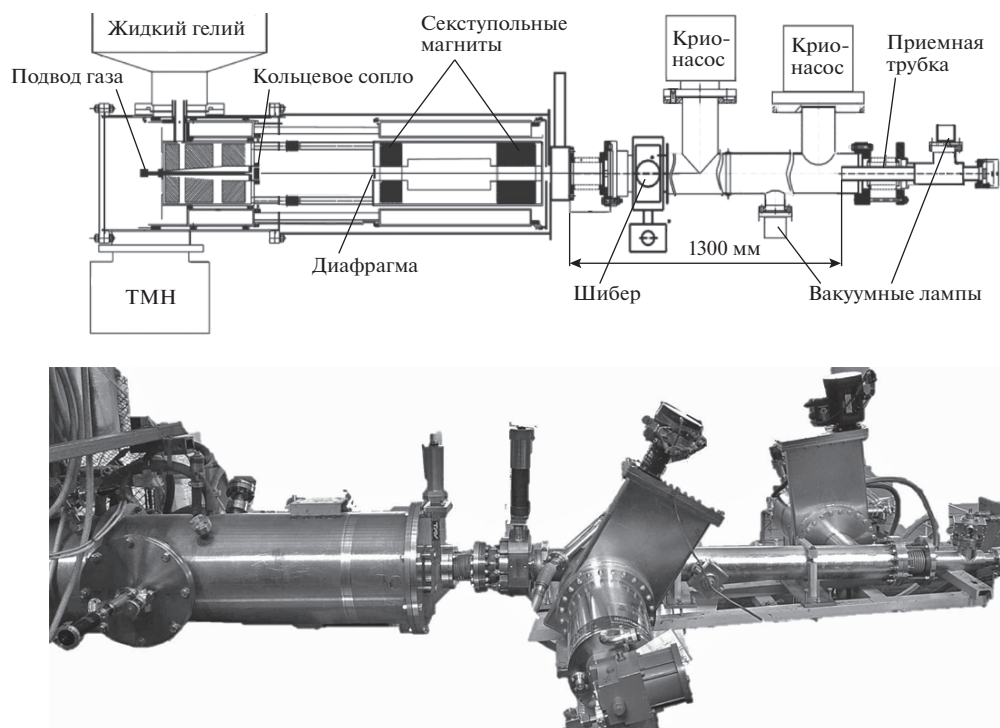


Рис. 2. Схема экспериментального стенда и его внешний вид. ТМН – турбомолекулярный насос.

поля с таким градиентом, движущаяся вначале вдоль полюса магнита и имеющая магнитный момент $3 \cdot 10^{-3} \mu_B$ и скорость 300 м/с, составляет около $1.5 \cdot 10^{-3}$ радиан. Если входное отверстие магнита закрыть диском $\varnothing 40$ мм, то на его входе образуется кольцевая диафрагма шириной 1 мм. Разместив на расстоянии 330 мм (это расстояние близко к максимально возможному для нашего источника поляризованных атомов) от диафрагмы кольцевое сопло $\varnothing 41$ и шириной щели 0.1 мм, получим разброс угловых скоростей $\sim \pm 1.5 \cdot 10^{-3}$ радиан на диафрагме $\pm 0.5/330$ для молекул, летящих из сопла вдоль оси магнита.

Диск, установленный на входе в магнит, образует тень за магнитом, куда молекулам невозможно попасть при выключенных магнитах, если они откачиваются криогенной поверхностью апертуры магнита с вероятностью, равной единице. На расстоянии 135 см от магнитов эта тень имеет диаметр > 30 мм. На этом расстоянии по оси магнитов установлена приемная трубка $\varnothing 30$ мм и длиной 20 см. Она оканчивается объемом, в котором установлена высоковакуумная манометрическая лампа, служащая для измерения давления газа на конце трубки.

Приемная трубка могла перемещаться в поперечном направлении на расстояние ± 6 см, что позволяет измерить пространственное распределение интенсивности пучка в этом месте и выставить трубку по оси магнитов. При включении

магнитного поля молекулы в состояниях с отрицательной проекцией спинового момента (на рис. 1 – это уровни *A*, *B*, *C* и, в меньшей степени, *D*) отклоняются к оси и, попадая в трубку, повышают в ней давление. На рис. 4 приведены распределения молекул в плоскости расположения входного отверстия приемной трубки, полученные моделированием методом Монте-Карло при включен-



Рис. 3. Внешний вид сверхпроводящих секступольных магнитов до их помещения в криостат.

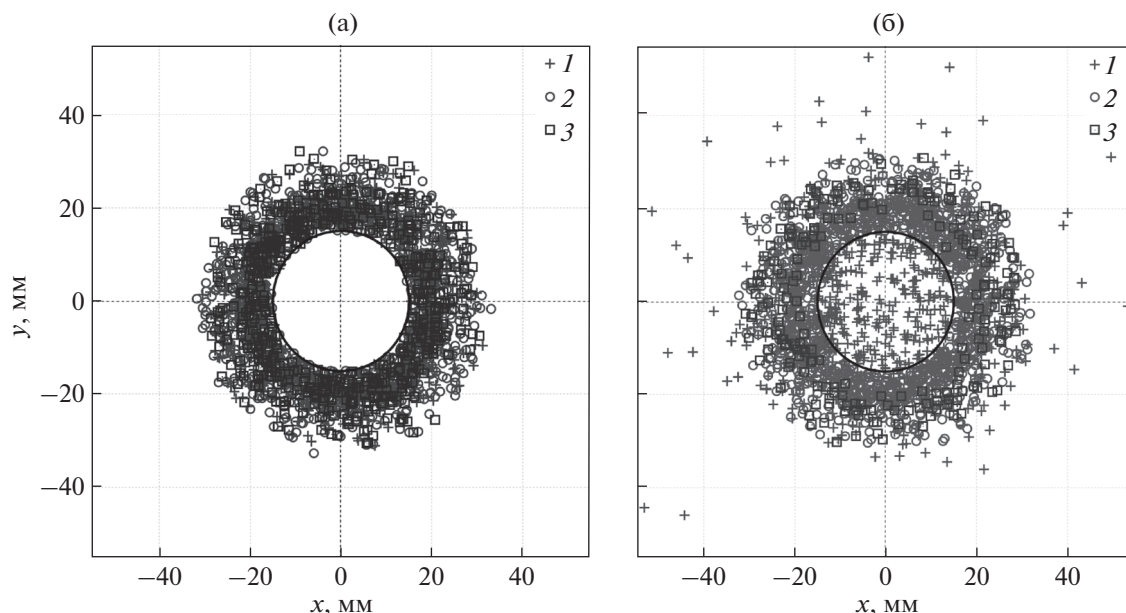


Рис. 4. Результаты Монте-Карло моделирования пространственного распределения молекул в месте расположения входного отверстия приемной трубки: **а** – секступольные магниты выключены, молекулы не попадают в приемную трубку; **б** – магниты включены, молекулы инжектируются в трубку. 1 – молекулы, фокусируемые в магнитном поле, 2 – свободно летящие, 3 – дефокусируемые в магнитном поле. Расчеты выполнены при индукции магнитного поля 3.4 Тл. Распределение по скоростям молекул в пучке максвелловское, при температуре 7 К.

ных и выключенных магнитах. Проводимость трубки, имеющей комнатную температуру, по водороду составляет 51 л/с. Зная повышение давления, нетрудно определить поток молекул, сфокусированных в приемную трубку.

Источник молекул, содержащий магниты, отсекается от высоковакуумной камеры, содержащей приемную трубку, пролетным клапаном. Камера источника сначала откачивается турбомолекулярным насосом до давления $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ Торр, затем в тепловой экран, окружающий гелиевый криостат, заливается жидкий азот. После заливки в криостат жидкого гелия давление в камере, содержащей сопло, понижается до предельного давления $\sim 5 \cdot 10^{-8}$ Торр без напуска водорода. Давление измеряется вакуумной лампой ПММ-46, имеющей комнатную температуру, с вакуумметром ВМБ 1/8-001.

В камере сопла поверхность с температурой жидкого гелия имеет площадь 950 см². При температуре водорода 60 К скорость его откачки этими поверхностями составляет около 18000 л/с, если принять коэффициент конденсации газа на поверхности равным единице. В этой камере установлена подвижная заслонка, позволяющая переключать поток молекул, летящих из сопла в приемную трубку. Через отдельный игольчатый клапан имеется возможность напуска газа в эту камеру для определения скорости откачки газа криогенными поверхностями, имитации фоно-

вых условий без пучка или изучения его ослабления на остаточном газе.

При работе с водородом, для улучшения откачки газа, температура жидкого гелия понижалась до 2.5 К путем снижения давления паров над жидкостью. При температуре криопанелей 4.2 К давление насыщающих паров водорода составляет около 10^{-6} Торр, что приводит к потере пучка в камере сопла из-за рассеяния на остаточном газе, давление которого выше давления насыщающих паров. Источником молекул является кольцевое сопло, установленное соосно с магнитами, с наружным и внутренним диаметрами 41.9 и 41.7 мм (ширина щели сопла, соответственно, равна 0.1 мм), его внешний вид показан на рис. 5. Тепловым мостом сопло соединено с поверхностью, имеющей температуру жидкого гелия.

Для измерения температуры сопла был применен термодатчик фирмы Lake Shore Cryotronics Inc. Cernox. С помощью нагревателя температуру сопла можно изменять в широких пределах, начиная от температуры жидкого гелия. Давление в камере сопла измеряется термопарным датчиком Пирани TPR 270 с контроллером TPG 362. Расстояние от сопла до входа в фокусирующие магниты 33 см. Газ к соплу подается через игольчатый клапан. Расходы газа через оба игольчатых клапана были прокалиброваны при постоянном давлении на входе в 3 атм с точностью лучше 5%.

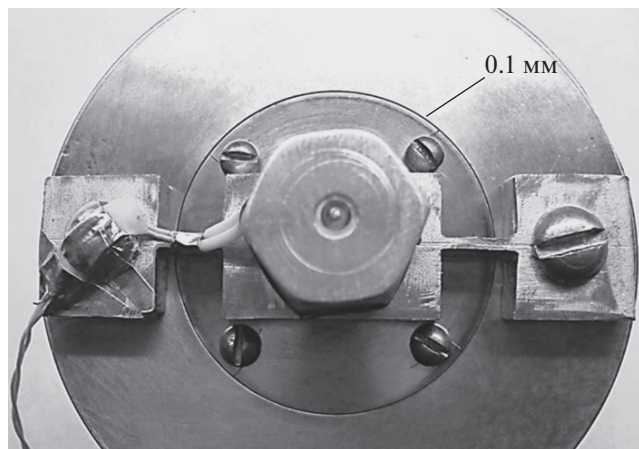


Рис. 5. Внешний вид щелевого кольцевого сопла.

В камере регистрации пучка для получения высокого вакуума установлены два крионасоса CRYO-PLEX 8 со скоростью откачки по водороду около 1000 л/с. Для уменьшения газовыделения из стенок камеры перед измерениями она прогревалась до температуры 300°C при одновременной откачке одним из крионасосов. В камере $\varnothing 100$ мм между крионасосами был установлен диск с трубкой $\varnothing 40$ мм и длиной 20 см для реализации режима дифференциальной откачки.

Два пробника, двигающиеся в горизонтальном и вертикальном направлениях, установлены недалеко от выхода из магнита для проверки положения молекулярного пучка по отклику показания лампы, измеряющей давление в приемной трубке, при их введении в пучок. Это позволяет провести дополнительное измерение распределения потока в пучке. Три высоковакуумные лампы ПММ-46 были установлены в этой камере, одна из них для измерения давления в трубке, принимающей фокусируемый пучок молекул. В рабочем диапазоне давлений паспортная относительная погрешность измерения давления манометрическим преобразователем ПММ-46 составляет не более $\frac{-30}{+50}\%$. Предельный вакуум в этой камере ниже $1 \cdot 10^{-9}$ Торр.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 6 приведено изменение давления водорода в приемной трубке при введении и выведении тока через обмотки фокусирующих магнитов. Измерения выполнены для разных температур сопла. Как и ожидалось, с понижением температуры газа (уменьшением скорости молекул) количество сфокусированных молекул растет, поскольку возрастает время действия отклоняющей силы. Тем не менее, для данного расхода

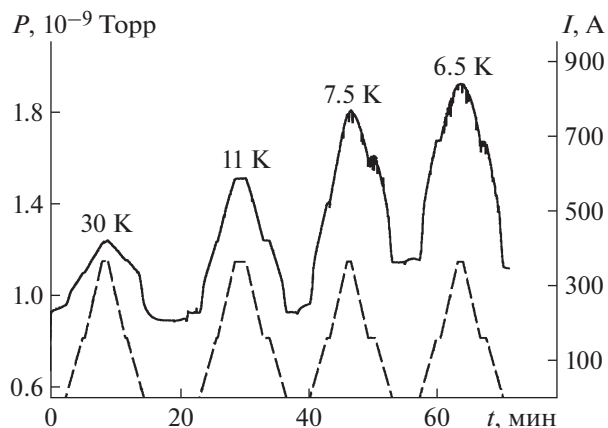


Рис. 6. Динамика давления водорода в приемной трубке (сплошная линия) и тока обмотки отклоняющих магнитов (штриховая) при постоянном расходе газа через сопло и для разных температур сопла.

газа при температуре сопла ниже 6.5 К для водорода и 11 К для дейтерия начинается конденсация газа и дальнейшее понижение температуры невозможно. На рис. 7 приведены зависимости интенсивности сфокусированного пучка от температуры сопла, измеренные экспериментально и полученные моделированием методом Монте-Карло. При температуре сопла 32 К данные были совмещены. С понижением температуры моделирование предсказывает более быстрый рост интенсивности пучка. Возможно это связано с увеличением рассеяния (потери) молекул пучка с понижением температуры, что не учитывалось при моделировании.

Максимальный поток поляризованных молекул водорода, сфокусированных магнитами в приемную трубку, равен $3 \cdot 10^{12}$ молекул/с при полном потоке газа через сопло $1.4 \cdot 10^{18}$ молекул/с. При дальнейшем увеличении расхода поток сфокусированных молекул уменьшается, возможно из-за рассеяния на остаточном газе между соплом и диафрагмой или изменения режима истечения из сопла.

Отношение сфокусированных молекул к полному потоку из источника изменяется от $3.5 \cdot 10^{-6}$ до $1.2 \cdot 10^{-6}$, уменьшаясь с увеличением расхода. Монте-Карло моделирование, с приведенными выше значениями магнитных моментов для молекулы водорода, дает значение для отношения $2.3 \cdot 10^{-6}$, что не противоречит результатам измерения. Для дейтерия поток сфокусированных молекул меньше в 7 раз, поскольку их магнитные моменты существенно меньше таковых для молекул водорода и, кроме того, для молекул дейтерия, имеющих одинаковую проекцию ядерного спина, магнитные моменты сильно отличаются.

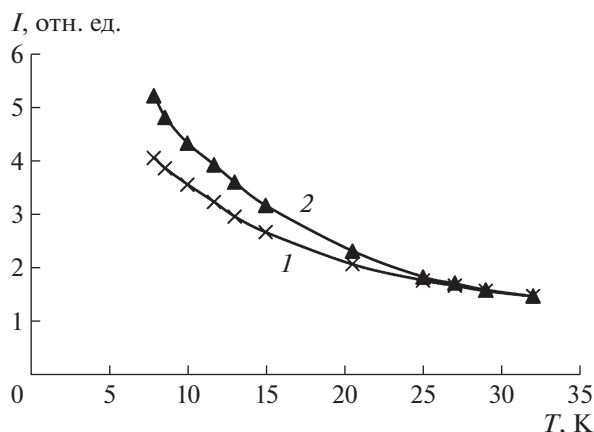


Рис. 7. Интенсивность сфокусированного пучка в зависимости от температуры сопла, измеренные экспериментально (1) и полученные моделированием методом Монте-Карло (2). Данные совмещены при температуре сопла 32 К.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывают экспериментальные результаты уже с имеющимися магнитами (не оптимальными для данной задачи), можно получать значимые потоки поляризованных по ядерному спину молекул водорода и дейтерия. Полученные результаты можно использовать при разработке прототипа источника поляризованных молекул, обладающего существенно большей интенсивностью [14].

Поскольку основным состоянием дейтерия при низких температурах является орто-дейтерий, то, по-видимому, можно получать твердый поляризованный дейтерий и использовать его в качестве топлива в инерциальных термоядерных реакциях и других исследованиях.

Положительные результаты по исследованию кинетики потери поляризации молекулами, возможно, позволят создавать внутренние поляризованные газовые мишени высокой плотности. Такие мишени востребованы для проведения ядерно-физических экспериментов в накопителях заряженных частиц [15].

В дальнейшем планируется измерение поляризации молекул пучка с помощью LambShift поляриметра, который будет поставлен из Германии в рамках совместного гранта.

Авторы благодарны А.М. Рудневу и Р.Ш. Садыкову за обслуживание стенда для получения поляризованных молекул водорода и дейтерия. Работа

выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-42-01009, совместного с грантом DFG BU 2227/1-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ciullo G., Engels R., Büscher M., Vasilyev A. // Springer Proc. Phys. 2016. V. 187. doi 10.1007/978-3-319-39471-8_1
2. Leemann Ch., Bürgisser H., Huber P., Rohrer U., Paetzgen. Schieck H., Seiler F. // Helv. Phys. Acta. 1971. V. 44. P. 141. doi 10.5169/seals-114273
3. Steffens E., Haerberli W. // Rep. Prog. Phys. 2003. V. 66. P. 1. doi 10.1088/0034-4885/66/11/R02
4. Toporkov D.K. // XV Inter. Workshop on Polarized Sources, Targets, and Polarimetry. Charlottesville, Virginia, USA. 2013. P. 064.
5. Garwin R.L. // Rev. Sci. Instrum. 1958. V. 29. P. 374. doi 10.1063/1.1716200
6. Xiao Y.M., Buchman S., Pollack L., Kleppner D., Greytak T.J. // Phys. Rev. B. 1993. V. 48. P. 15744. doi 10.1103/PhysRevB.48.15744
7. Engels R., Gaißer M., Gorski R., Grigoryev K., Mikirtychyan M., Nass A., Rathmann F., Seyfarth H., Ströher H., Weiss P., Kochenda L., Kravtsov P., Trofimov V., Tschernov N., Vasilyev A., Vznuzdaev M., Paetzgen. Schieck H. // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 115. P. 113007. doi 10.1103/PhysRevLett.115.113007
8. Dyug M.V., Lazarenko B.A., Mishnev S.I., Nikolenko D.M., Rachek I.A., Sadykov R.Sh., Toporkov D.K., Zevakov S.A., Osipov A.V., Stibunov V.N. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2002. V. 495. P. 8. doi 10.1016/S0168-9002(02)01572-3
9. Toporkov D.K., Gramolin A.V., Nikolenko D.M., Rachek I.A., Sadykov R.Sh., Shestakov Yu.V., Zevakov S.A. // JETP Letters. 2017. V. 1050. P. 289. doi 10.1134/S0021364017050125
10. Toporkov D.K., Gramolin A.V., Nikolenko D.M., Rachek I.A., Sadykov R.Sh., Shestakov Yu.V., Yurchenko A.V., Zevakov S.A. // Nucl. Instrum. and Methods A. 2017. V. 868. P. 15. doi 10.1016/j.nima.2017.06.038
11. Frisch R., Stern O. // Z. Phys. 1933. V. 85. P. 4. doi 10.1007/BF01330773
12. Ramsey N.F. // Phys. Rev. 1952. V. 85. P. 60. doi 10.1103/PhysRev.85.60
13. Isaeva L.G., Lazarenko B.A., Mishnev S.I., Nikolenko D.M., Popov S.G., Rachek I.A., Shestakov Yu.V., Toporkov D.K., Vesnovsky D.K., Zevakov S.A. // Nucl. Instrum. Methods A. 1998. V. 411. P. 201. doi 10.1016/S0168-9002(98)00352-0
14. Yurchenko A.V., Nikolenko D.M., Rachek I.A., Shestakov Yu.V., Toporkov D.K., Zorin A.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 938. P. 012023. doi 10.1088/1742-6596/938/1/012023
15. Kikola D., Echevarria M.G., Hadjidakis C., Lansberg J.P., Lorce C., Massacrier L., Quintans C., Signori A., Trzeciak B. // Few-Body Syst. 2017. V. 58. P. 139. doi 10.1007/s00601-017-1299-x