

Петербургский институт ядерной физики
им. Б.П. Константинова

М.С. Микиртычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев, А.И. Ковалев,
П.А. Кравцов, М.Е. Некипелов, Х. Зайферт*, Б. Лорентц*, Ф. Ратманн*,
Р. Энгельс*

**Источник поляризованного атомарного
водорода и дейтерия для
внутренней газовой мишени
спектрометра ANKE**

*Институт ядерной физики
Национального исследовательского центра,
г. Юлих, Германия

Гатчина

2002

УДК 536.24

Polarized hydrogen and deuterium atomic beam source

M.S. Mikirtychiants, V.P Koptev, A.I. Kovalev, P.A. Kravtsov,
M.E. Nekipelov, A.A. Vassiliev, R. Engels*, B. Lorentz*, F.Rathmann*,
H. Seyfarth*

Abstract

This work is done in the frame of the development of the polarized atomic beam source (ABS) for the ANKE spectrometer at the COSY-Jülich accelerator. Investigations of the deuteron break-up planned at ANKE will make use of the polarized target. This paper is dedicated to the design of the atomic beam source and its major components.

*Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, D-52425, Jülich, Germany

© ПИЯФ, 2002

Аннотация

Настоящая работа выполнена в рамках разработки и тестирования источника поляризованного атомарного водорода или дейтерия (ABS¹) для спектрометра ANKE² на накопительном кольце COSY-Jülich³. Планируемый на ANKE эксперимент, связанный с исследованиями развала дейтрона, потребует использования поляризованной водородной и дейтериевой газовой мишени. В работе приводится описание конструкции поляризованного источника и его основных составных элементов.

1 Краткое описание конструкции

На рис. 1 изображена позиция ANKE ABS на накопительном кольце COSY между отклоняющим магнитом D1 и центральным магнитом ANKE-спектрометра D2 [1], а также показана специальная вакуумная камера, предназначенная для установки различных типов мишеней (накопительной ячейки, твердотельной, кластерной и пеллет-мишени). Поскольку пространство в тоннеле накопительного кольца ограничено, источник будет установлен вертикально. Такая схема установки также позволит поместить источник наиболее близко к центральному магниту спектрометра, что, в свою очередь, является одним из основных факторов, определяющих угловой захват спектрометра.

Детальный чертеж ABS представлен на рис. 2. Созданная конструкция учитывает опыт создания и эксплуатации подобных источников в IUCF [2] и HERMES/DESY [3], однако имеет перед ними ряд преимуществ.

Промежуточный фланец между верхней и нижней вакуумными камерами крепится к несущему мосту, соединяющему ярмо магнитов D1 и D2 (см. рис. 1). Такое крепление обеспечивает движение ABS и вакуумной камеры накопительной ячейки, как одного целого при сдвиге центрального магнита D2, а также допускает быстрый демонтаж источника и несущего моста как единого целого.

¹ Atomic Beam Source.

² Apparatus for studies of Nucleon and Kaon Ejectiles.

³ COoler Synchrotron, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany.

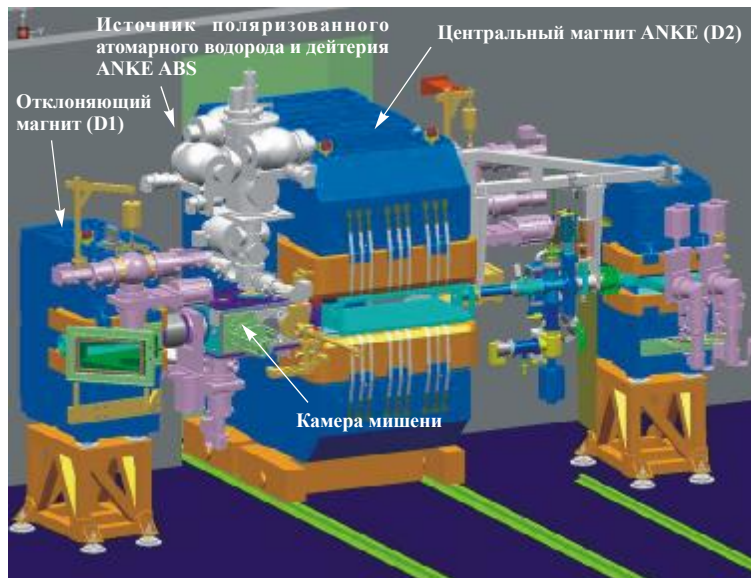


Рис. 1. ANKE ABS и специальная вакуумная камера для установки различных типов мишеней на накопительном кольце COSY. Источник поляризованного атомарного водорода и дейтерия расположен между отклоняющим магнитом D1 и центральным магнитом спектрометра D2. Направление пучка COSY слева направо.

Для создания водородного или дейтериевого атомарного пучка используется радиочастотный диссоциатор (1, рис. 2). Радиочастотная мощность подается в параллельный LC-контур от генератора с частотой 13.56 МГц. Охлаждение разрядной трубки обеспечивается потоком спиртоводной смеси между двумя внешними коаксиальными трубками большего диаметра. Для стабилизации температуры сопла в диапазоне 40-100 К применен криогенератор (2), соединенный с соплом посредством гибкого медного теплового моста (3). Скиммер, служащий для формирования газовой струи, закреплен на перегородке, разделяющей камеры I и II. Применение гибкого вакуумного соединения между фланцем диссоциатора и верхним фланцем вакуумной камеры позволяет варьировать расстояние между соплом и скиммером без

нарушения вакуума. На перегородке, разделяющей камеры *II* и *III*, установлен коллиматор, окончательно формирующий газовую струю.

Первая группа спин-сепарирующих секступольных магнитов (5) [4] обеспечивает, согласно принципу Штерна-Герлаха, пространственное разделение пучка по электронному спину. При этом компонента с $m_j = +1/2$ фокусируется в сильном неоднородном магнитном поле секступоля и попадает в блок сверхтонких переходов (6), а компонента с $m_j = -1/2$ дефокусируется и удаляется насосами, обеспечивающими откачку вакуумной камеры. Блок сверхтонких переходов (6), как и магниты (5), жестко закреплен на центральном фланце ABS (7), определяющем всю геометрию источника.

В *IV* камере расположены вторая группа спин-сепарирующих секступольных магнитов (8) и дополнительные блоки сверхтонких переходов (9), отвечающие за создание тензорной поляризации дейтериевого пучка.

Наконец, в самом низу показан прототип накопительной ячейки (10), планируемой для использования на накопительном кольце COSY.

На рис. 3 представлена фотография ANKE ABS и поляриметра, использующего лэмбовский сдвиг в лаборатории ИКР⁴.

Конструкция верхнего фланца позволяет перемещение оси сопла относительно оси скиммера во всех направлениях. Верхняя вакуумная камера разделена двумя подвижными алюминиевыми перегородками (3) на три ступени дифференциальной откачки (*I*, *II*, *III*).

⁴ Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, D-52428 Jülich, Germany

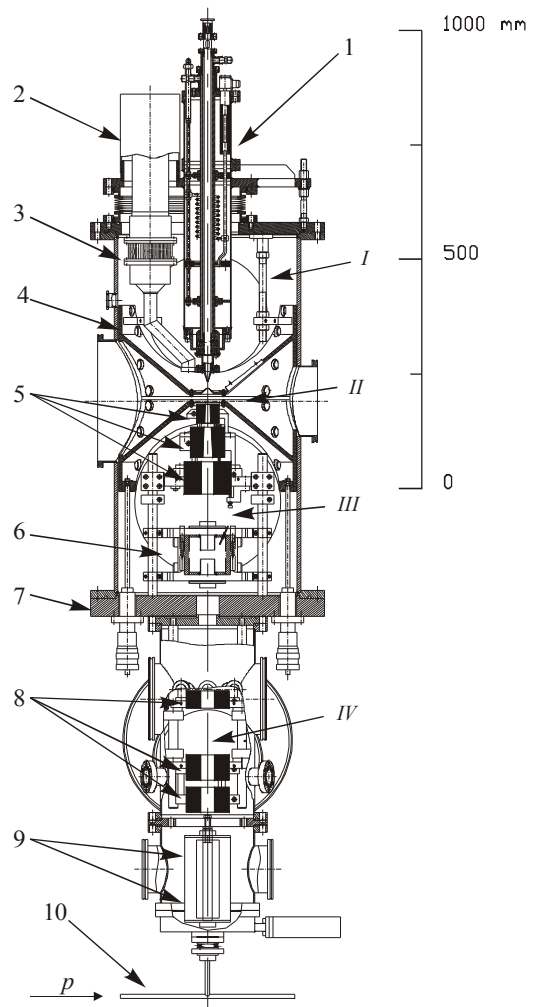


Рис. 2. Чертеж ANKE ABS. Пояснения даны в тексте.

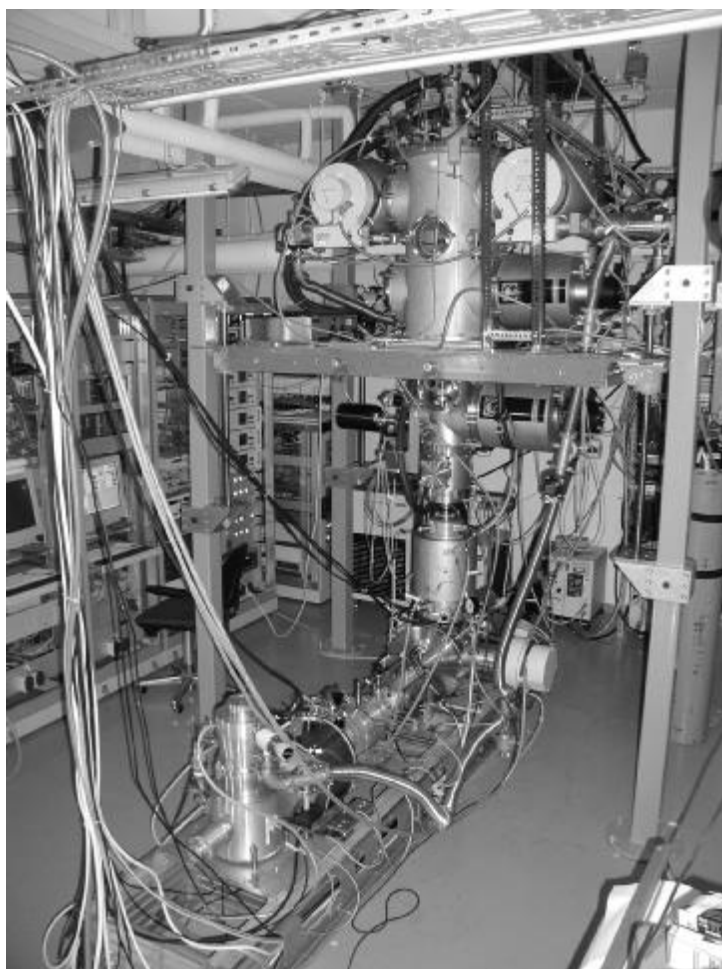


Рис. 3. Фотография ANKE ABS в лаборатории. Высота верхней вакуумной камеры – 80 см.

Специфика конструкции, продиктованная использованием источника в условиях эксперимента на ускорителе (дорогое ускорительное время, ограниченный доступ для обслуживания, серьезные ограничения в объемах для экспериментального оборудования) состоит:

- в компактности, что позволяет установить источник в ограниченном пространстве туннеля накопительного кольца COSY и при этом обеспечить необходимое пространство для системы детекторов спектрометра ANKE.
- в мобильности источника для быстрого монтажа и демонтажа на накопительном кольце, что позволяет резко сократить потери ускорительного времени при замене источника одной из неполяризованных мишеней (твердотельная, кластерная, пеллет-мишень), используемых в других физических экспериментах на спектрометре ANKE.

2 Вакуумная система

Одним из основных факторов, определяющих интенсивность атомарного пучка, а, следовательно, и плотность мишени, является скорость откачки рассеянных атомов и молекул в первой и второй камерах источника (I, II см. рис. 2). Взаимодействие остаточного газа с частицами пучка разрушает направленный поток атомов и, в конечном итоге, приводит к уменьшению плотности мишени. Для сведения к минимуму влияния эффектов рассеяния и ослабления пучка на остаточном газе в источниках атомарных пучков применяется мощная система дифференциальной откачки, обеспечивающая вакуум в первой и второй камерах на уровне 10^{-4} – 10^{-5} мбар.

2.1 Конструкция вакуумной камеры

Вакуумный объем ABS состоит из двух цилиндрических вакуумных камер, закрепленных сверху и снизу центрального несущего фланца (7, рис. 2) с размерами $400 \times 500 \times 50$ мм³. Толщины стенок верхней и нижней вакуумных камер, выполненных из нержавеющей стали, равны соответственно 8 и 2.5 мм. Для обеспечения дифференциальной откачки верхняя вакуумная камера, имеющая внутренний диаметр 390 мм, разделена на три части двумя разделительными перегородками. В

отличие от других источников, разделительные перегородки сделаны подвижными, что в последующем существенно упростило процедуру оптимизации системы формирования газовой струи.

Сложная форма перегородок (рис. 4) вызвана стремлением улучшить вакуумные условия вблизи сопла, скиммера и коллиматора и обеспечить максимально открытое пространство для турбомолекулярных насосов, производящих откачку первой и второй вакуумных камер. Верхняя перегородка, разделяющая камеры I и II, имеет диагностическое стеклянное окно для наблюдения и смены сопла через специальный фланец в камере II. Обе перегородки диаметром 389 мм и высотой 200 мм выполнены из алюминия путем точного литья. Несмотря на то, что алюминиевое литье имеет пористую поверхность, в ходе работы не возникало проблем, связанных с ухудшением вакуума в верхней вакуумной камере. Перегородки обработаны таким образом, что проводимость зазора, составляющего менее 0.5 мм, между внутренней поверхностью вакуумной камеры и поверхностью перегородки пренебрежимо мала. Это позволило избежать дополнительного уплотнения и существенно упростило конструкцию верхней вакуумной камеры.

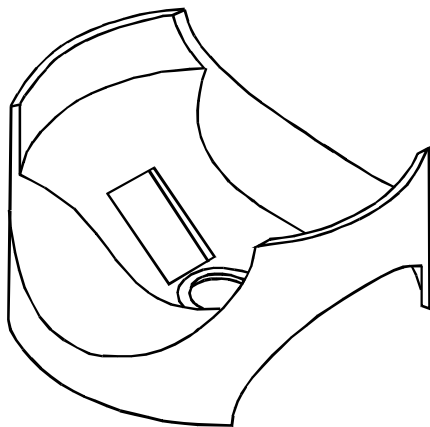


Рис. 4. Верхняя подвижная перегородка.

Закрепленные на перегородке шарики, скользящие по внутренней поверхности вакуумной камеры, позволяют легко перемещать перегородки вдоль оси пучка. Позиция нижней перегородки, на которой закреплен коллиматор, может изменяться с помощью двух микрометрических вакуумных вводов, закрепленных на центральном несущем фланце, без нарушения вакуума.

Впервые из-за применения подвижных перегородок первые три ступени источника объединены в одной камере, что существенно уменьшило линейные размеры вакуумной камеры и минимизировало количество вакуумных уплотнений.

Из-за применения перегородок сложной формы существенно удалось улучшить условия откачки, так как уменьшены как расстояния от источника газа до вакуумного насоса, так и отношения "пассивной" поверхности камер к "откачивающей".

Впервые из-за применения подвижных перегородок оптимизация геометрии проводилась экспериментально.

2.2 Система дифференциальной откачки

Схема вакуумного оборудования источника изображена на рис. 5.

Система дифференциальной откачки спроектирована таким образом, чтобы обеспечивать необходимый вакуум на уровне от 10^{-4} до 10^{-7} мбар в *I-IV* камерах при входных потоках газа до 5 мбар л/с. Откачка первой камеры производится двумя, параллельно соединенными, большими турбомолекулярными насосами (ТР1, ТР2, см. рис. 5) со скоростью откачки 2200 л/с каждый. Их выход последовательно соединен с малыми турбомолекулярными насосами (ТР4, ТР5) со скоростью откачки 260 л/с каждый, которые, в свою очередь, соединены с общим турбомолекулярным насосом (ТР6) того же типа. Выход насоса ТР6 соединен с двумя, параллельно соединенными, мембранными насосами (МР1, МР2), являющимися последней ступенью. Такая схема включения насосов явилась результатом работы по оптимизации вакуумной системы источника [5], в которой сравнивались три различные схемы откачки, представленные на рис. 6.

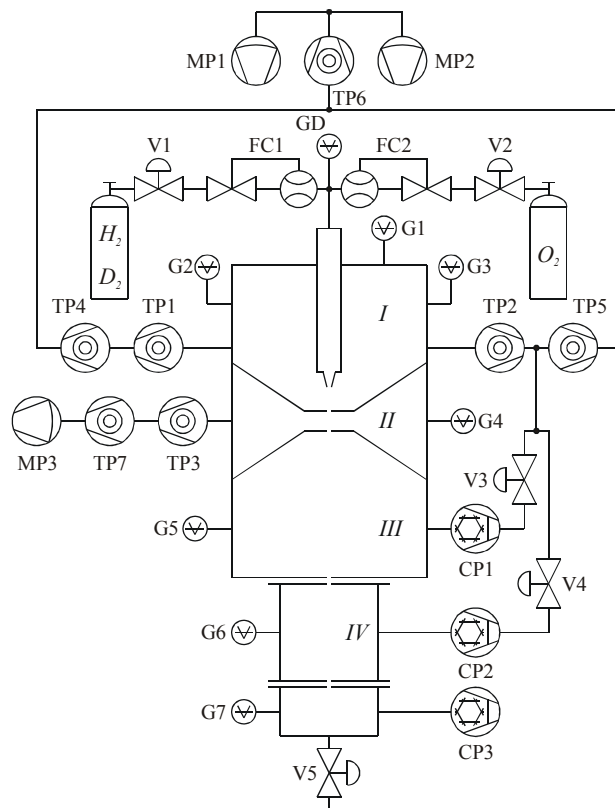


Рис. 5. Схема вакуумного оборудования источника ANKE ABS. Полный список вакуумного оборудования приведен в таблице 1.

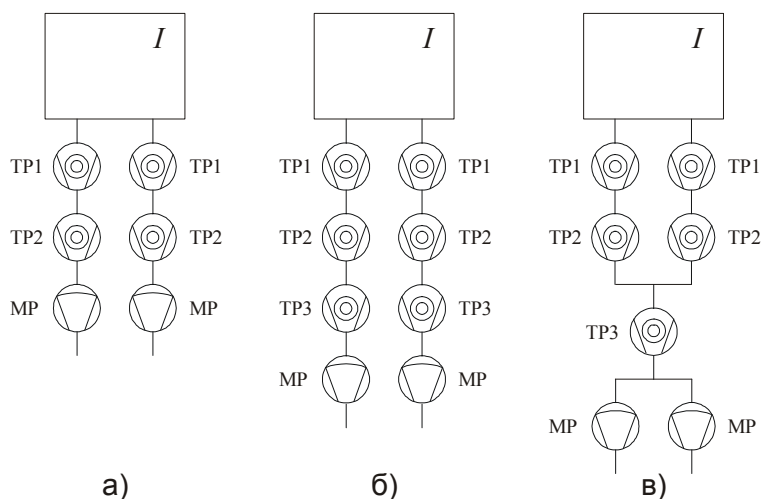


Рис. 6. Различные схемы откачки камеры *I*.

Первоначально планировалось применить последовательное включение насосов (рис. 6.а), но в результате тестов выяснилось, что подобная схема включения показывает резкое снижение скорости откачки при входных потоках ~ 2 мбар л/с. Включение в каждую из ветвей дополнительного малого турбомолекулярного насоса (рис. 6.б) позволило сохранить скорость откачки постоянной при потоках вплоть до ~ 5 мбар л/с. Схема, представленная на рис. 6.в, позволяет сохранять постоянную скорость откачки при потоках чуть меньше 5 мбар л/с, но имеет преимущество перед схемой рис. 6.б, так в ней использовано на один насос больше.

Откачка второй камеры (*II*) производится по канонической схеме с тремя последовательно включенными насосами – большой турбомолекулярный насос (ТР3), малый турбомолекулярный насос (ТР7) и мембранный насос (МР3). При входном потоке газа ~ 2 мбар л/с давление в этой камере составляет $P_{II} \sim 10^{-5}$ мбар.

Как следует из принципов действия источника поляризованных атомов, в камере *III* спин-сепарирующими магнитами рассеивается 50 % пучка, прошедшего систему формирования. Это накладывает условие

обеспечения высокой скорости откачки во избежание ослабления сфокусированного магнитами пучка на рассеянном газе. Те же рассуждения справедливы и для камеры IV, содержащей вторую группу спин-сепарирующих магнитов. Для обеспечения сверхвысокого вакуума в этих камерах применены криосорбционные насосы (CP1, CP2) со скоростью откачки до 3000 л/с каждый.

В силу того, что нижний блок сверхтонких переходов расположен близко к последнему спин-сепарирующему магниту, в него попадает часть атомов с «неправильным» электронным спином ($m_J = -1/2$), что может привести к уменьшению поляризации пучка. Для сведения к минимуму таких потерь, откачка камеры IV*, содержащей нижний блок сверхтонких переходов, производится отдельным криосорбционным насосом CP3 со скоростью откачки 800 л/с.

На начальном этапе откачка III и IV камер производится турбомолекулярными насосами первой ступени (TP5, TP6) через вентили V3 и V4 (см. рис. 5).

Впервые для поляризованных источников использована система с последовательным применением 3-х турбонасосов, что позволило сохранить скорость откачки в первой ступени постоянной при входных потоках газа до 5 мбар л/с без использования больших масляных насосов как, например, в источнике HERMES ABS [3].

Впервые, для такого типа источников, применена система безмасляной откачки, в которой последовательное использование компрессионных отношений турбомолекулярных насосов позволяет в качестве конечного применить мембранный насос.

3 Диссоциатор

Конструкция радиочастотного диссоциатора базируется на опыте создания и эксплуатации диссоциатора HERMES ABS [6] и легко позволяет менять условия газового разряда.

Для проведения обслуживания диссоциатор может быть легко демонтирован, в то время как сопло и его охлаждающая система остаются на своих местах. На фотографии (рис. 7) диссоциатора ANKE ABS, слева направо видны: фланец для подачи водорода (дейтерия), фланец диссоциатора, колебательный контур (2 емкости с одной потенциальной обкладкой в середине и катушка индуктивности), нижнее крепление 3-х коаксиальных трубок и нижний конец разрядной трубки.



Рис. 7. Радиочастотный диссоциатор ANKE ABS.

3.1 Механическая конструкция

На рис. 8 изображен разрез диссоциатора и показана часть системы охлаждения сопла.

Разрядная трубка со внутренним диаметром 10 мм и толщиной стенки 2 мм выполнена из боросиликатного стекла⁵ и имеет длину 745 мм. Две из трех коаксиальных трубок (1), показанных на рис. 9, используются для водяного охлаждения разрядной трубки. Охлаждающая жидкость подается в зазор между разрядной и центральной трубками через специальное быстроразъемное соединение (2, рис. 8). Нагретая жидкость через зазор между центральной трубкой и нижним уплотнением охлаждающего контура (7, рис. 8 и 2, рис. 9) поступает в зазор между центральной и внешней трубками и затем выводится через такое же быстроразъемное соединение (10, рис. 8). Особое внимание при проектировании было уделено элементам, находящимся при комнатной температуре и расположенным вблизи сопла, находящегося при криогенных температурах. Так, например, для ограничения теплового потока от нижнего края кожуха диссоциатора к соплу была применена тефлоновая вставка (3, рис. 9).

⁵ DURAN®, Schott Werke, Type 8330.

В отличие от других источников [2, 3] где сопло жестко связано с разрядной трубкой посредством индиевого уплотнения, в диссоциаторе ANKE ABS применяется другой способ крепления. Торец разрядной трубки заточен под 45° и трубка прижимается к внутренней поверхности сопла посредством уплотнительного кольца, расположенного во фланце (1, рис. 8). Такая конструкция позволяет легкую и быструю смену сопла, а также возможность демонтажа самого диссоциатора без снятия сопла. Для удобства наблюдения за разрядом во время настройки параметров диссоциатора в его кожухе имеется окно (12, рис. 8).

Элементы колебательного контура – 2 емкости (6, рис. 8) и катушка индуктивности (5, рис. 8) закреплены на четырех шпильках, одна из которых видна на рис. 8. Три из них выполнены из нержавеющей стали и служат лишь для крепления элементов. Четвертая выполнена из меди и используется как земляная шина для колебательного контура. Такая конструкция позволяет легко изменять расстояния между обкладками двух конденсаторов и тем самым подстраивать резонансную частоту контура. Винт (11), находящийся под нулевым потенциалом, служит для перемещения области разряда внутри трубки во время работы. Подача ВЧ-мощности в колебательный контур производится через разъем (3) и скользящее соединение (4).

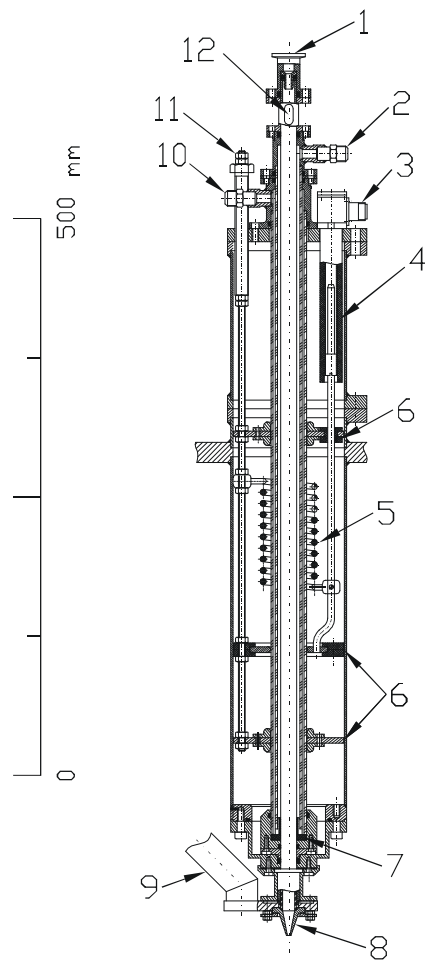


Рис. 8. Диссоциатор ANKE ABS в разрезе. 1: фланец подачи газа, 2: вход охлаждающей жидкости, 3: ВЧ-ввод, 4: скользящее ВЧ-соединение, 5: катушка индуктивности, 6: конденсаторы, 7: нижнее уплотнение охлаждающего контура, 8: сопло, 9: часть системы охлаждения сопла (медный тепловой мост)

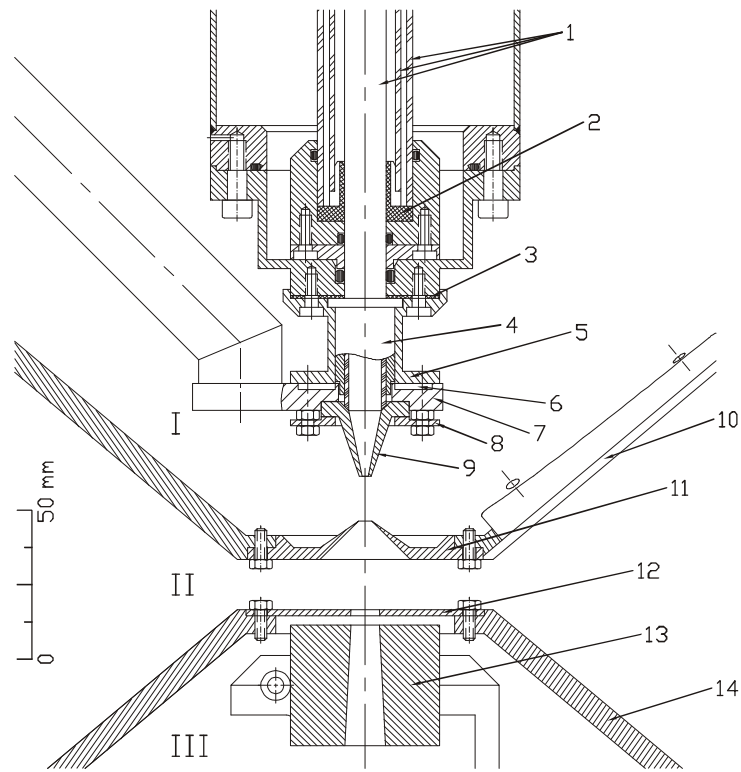


Рис. 9. Нижний конец диссоциатора и система формирования газовой струи. 1: разрядная трубка и трубки системы охлаждения, 2: нижнее уплотнение охлаждающего контура, 3: тефлоновый ограничитель теплового потока, 4: скользящее соединение, 5: поддержка сопла и системы охлаждения, 6: канавка для нагревателя, 7: медный тепловой мост, 8: крепление сопла, 9: сопло⁶, 10: окно в верхней вакуумной перегородке, 11: скиммер⁷, 12: коллиматор, 13: первый секступольный магнит, 14: нижняя вакуумная перегородка.

⁶ Выполнено из сверхчистого алюминия (Al 99.5)

⁷ Выполнен из нержавеющей стали

Впервые применена система жидкостного охлаждения разрядной трубки с коаксиальными потоками, что вывело подводы жидкости в безопасную (верхнюю) область.

Впервые применено скользящее соединение для подачи ВЧ-мощности и перемещаемый резонатор, что позволило оптимизировать систему по положению плазменного разряда относительно сопла диссоциатора.

Впервые сопло отделено от диссоциатора, что существенно упростило смену как сопла, так и диссоциатора, что особенно важно при использовании источника в экспериментах на ускорителе.

Впервые организован перехват тепла, поступающего из диссоциатора к соплу, что приводит к более однородному распределению температуры вдоль сопла и, тем самым, сужает распределение по скоростям атомов, вылетающих из сопла.

3.2 Радиочастотная система

Для создания высокочастотного поля, в котором образуется газовый разряд, был использован промышленный генератор Hüttinger PFG 600 RF с частотой 13.56 МГц и максимальной мощностью 600 Вт. Для минимизации отраженной мощности в качестве дополнительного элемента системы было применено устройство сопряжения Hüttinger RFM 1500A. Устройство сопряжения, управляемое генератором по оптоволоконной линии, автоматически минимизировало отраженную мощность путем изменения переменных емкостей C_{Load} и C_{Tune} . На рис. 10 представлена структурная схема радиочастотной системы и показана эквивалентная электрическая схема плазмы.

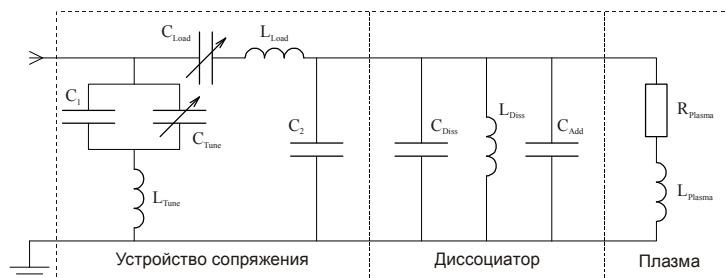


Рис. 10. Структурная схема радиочастотной системы.

Полностью автоматическая система минимизации отраженной мощности впервые была применена в источниках подобного типа. Это позволило существенно упростить и ускорить работу по оптимизации характеристик поляризованного источника при изменении режимов работы (температура сопла, поток газа и т.д.).

3.3 Система охлаждения сопла

Поскольку доступ к источнику во время эксперимента ограничен, одной из основных задач является создание надежной системы стабилизации температуры сопла. Она должна удовлетворять следующим условиям:

- обеспечивать стабилизацию температуры в диапазоне $50 \div 120$ К с точностью ± 1 К при тепловом потоке до 20 Вт;
- обеспечивать быстрое охлаждение и быстрый нагрев сопла до комнатных температур;
- конструкция должна быть компактной и занимать минимум места в области между соплом и скиммером, что особенно важно для улучшения условий откачки остаточного газа.

Система стабилизации температуры сопла источника ANKE ABS представляет из себя совокупность трех основных элементов:

- криогенератор⁸, обеспечивающий охлаждение сопла вплоть до 40 К;
- нагревательный элемент резистивного типа с управляемым источником питания, которые обеспечивают необходимое для стабилизации тепло и нагрев до комнатной температуры;
- электронный блок ПИД-регулятора⁹, управляющий источником питания нагревательного элемента.

Криогенератор (2, рис. 2) закреплен на том же фланце, что и диссоциатор (1, рис. 2). Такая конструкция обеспечивает их совместное движение в ходе юстировки сопла и позволяет свести к минимуму применение гибких тепловых мостов с малой теплопроводностью. Тем не менее, для снятия механического напряжения, возникающего в ходе охлаждения поверхности криогенератора применено гибкое соединение,

⁸ Leybold RGS 120

⁹ Siemens, FM355

представляющее собой два медных диска диаметром 115 мм и толщиной 6 мм, связанные двумя медными проволочками. Следует отметить, что, в отличие от других источников [2, 3], это гибкое соединение расположено вблизи криогенератора, а не сопла, что существенно улучшает условия откачки в этой критической, для формирования газовой струи, области.

На рис. 9 показана канавка для нагревательного элемента (6), расположенная в тепловом мосту, соединяющем криогенератор (через гибкую вставку) и сопло.

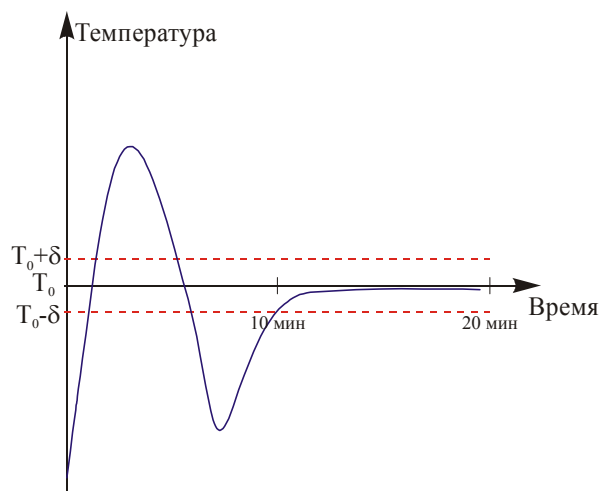


Рис. 11. Характерная зависимость температуры сопла от времени при стабилизации с помощью ПИД-регулятора.

На рис. 11 показана характерная зависимость температуры сопла от времени при использовании блока ПИД-регулятора. Время, необходимое для стабилизации, сильно зависит от разницы между текущим значением температуры сопла и заданной точкой стабилизации. При изменении температуры сопла на 10 К это время не превышало 15 минут.

Применение в системе охлаждения сопла лишь одного гибкого теплового моста позволило сократить время, необходимое для охлаждения сопла с комнатной температуры до 60 К, на 2-3 часа по

сравнению с аналогичным источником HERMES ABS [3] и составило приблизительно 3 часа.

Таким образом, система охлаждения сопла ANKE ABS полностью удовлетворяет предъявленным требованиям и имеет следующие характерные особенности:

- впервые гибкие элементы системы охлаждения удалены от сопла, что позволило свести до минимума наличие холодных поверхностей и, тем самым, улучшить условия откачки;
- впервые гибкие элементы вынесены в область более низких температур, где теплопроводность меди существенно выше, что позволило уменьшить сечение гибких элементов.

4 Система формирования газовой струи

Одним из основных элементов, определяющим интенсивность атомарного пучка, инжектируемого в накопительную ячейку, является система формирования газовой струи, состоящая из следующих элементов:

- сопло с возможностью регулировки температуры поверхности;
- скиммер, представляющий из себя коллиматор в форме обратного конуса и позволяющий формирование сверхзвуковой газовой струи;
- коллиматор, используемый для окончательного формирования струи и предотвращающий перегрев первого спин-сепарирующего магнита в результате рекомбинации атомарного водорода на его торцевой поверхности.

Именно система формирования газовой струи определяет важнейшие параметры пучка, такие как скорость, угловая расходимость и т.д. Теория, к сожалению, до сих пор не пришла к единому мнению по поводу формирования газовой струи в гидродинамическом режиме. Поэтому при проектировании источников подобного рода геометрия отдельных элементов (сопло, скиммер, коллиматор) выбирается скорее эмпирически или является результатом численного моделирования, нежели следует из строгих расчетов.

4.1 Конструкция

Конструкция системы формирования газовой струи источника ANKE ABS представлена на рис. 9. При ее проектировании за основу была взята геометрия системы источника HERMES ABS [3]. Однако в результате интенсивных тестов было выяснено, что данная схема (Схема-1, табл. 2) не является оптимальной в силу того, что рабочие условия двух источников разные.

Было высказано предположение, что часть атомов, испущенных из сопла в телесный угол ω (см. рис. 12), определяемый входной апертурой первого магнита, не проходят через скиммер и коллиматор и выбывают из пучка. С целью избежать этих потерь диаметр скиммера и коллиматора был увеличен таким образом, чтобы не пересекать крайние траектории атомов, изображенные пунктиром на рис. 12. Внесенные изменения (Схема-2, табл. 2) позволили увеличить интенсивность пучка приблизительно на 7%.

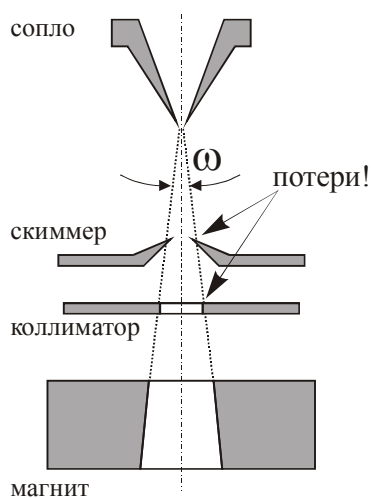


Рис. 12. Потери в системе формирования газовой струи.

Для сравнения в таблице 2 приводятся геометрические размеры (диаметр d , длина ℓ и расстояние между элементами Δ) и полученные

интенсивности пучка при использовании первоначальной и оптимизированной систем формирования пучка.

Впервые смена всех элементов, формирующих газовую струю, осуществляется через один наружный фланец. Это существенно упрощает процедуру оптимизации характеристик источника по параметрам системы формирования газовой струи.

4.2 Спин-сепарирующие секступольные магниты ANKE ABS

Пространственное разделение пучка атомов по ориентации электронного спина происходит в неоднородном магнитном поле секступольных магнитов.

Для разделения атомарного пучка по ориентации электронного спина в ABS применены 6 постоянных секступольных магнитов (две группы по три магнита в каждой) [4], произведенные компанией Vakuumschmelze Nanau [7]. Свойства многосегментных мультипольных магнитов достаточно подробно описаны в работе К. Хальбаха [8]. Согласно этой работе, поле на поверхности магнита, состоящего из 24 сегментов, на 15.5% превышает поле магнита, состоящего из 12 сегментов, поэтому при проектировании магнитов выбор пал на 24-сегментные магниты.

Магнитная система фокусировки пучка атомарного водорода была рассчитана при помощи программы MAFIA [9], позволяющей моделировать трехмерные поля. Кроме того, с помощью этой же программы были проведены исследования самих секступольных магнитов, особенно критических участков с максимальной напряженностью поля (полюс сегмента 3, рис. 13).

При производстве магнитов использованы три различных материала, различающихся по намагниченности и коэрцитивной силе (рис. 13). Стрелки показывают направление намагниченности, цифры определяют материал сегмента (1-VACODYM 510HR, 2-VACODYM 383HR, 3-VACODYM 400HR). Применение материалов нового поколения на основе ниодима, железа и бора, разработанных в Сумимото, Япония [10], позволило значительно увеличить величину магнитного поля в полюсах, по сравнению с существующими магнитами на базе самария и кобальта. Магнитное поле 3.2-4.6 Т для секступольного магнита с внутренним диаметром 14-44 мм было получено [11] с применением гибридных магнитов, состоящих из

сверхпроводящих катушек, окруженных железным ярмом. Обычные сверхпроводящие секstupольные магниты без железа дают поле 1.54 Т при внутреннем радиусе 65 мм [12]. Постоянные магниты с новыми материалами обеспечивают поле порядка 1.4 Т.

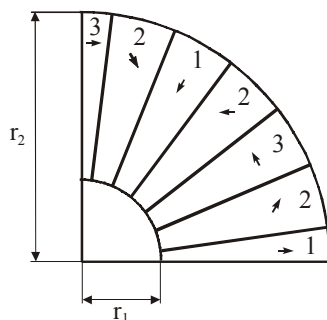


Рис. 13. Часть цилиндрического секstupольного магнита, состоящего из 24 сегментов.

В таблице 3 перечислены геометрические размеры магнитов, рассчитанные с помощью программы MAFIA значения магнитного поля на поверхности, а также результаты измерений поля.

Подводя итог, следует сказать, что применение современных магнитных материалов позволило создать рекордную по своим параметрам спин-сепарирующую магнитную систему, состоящую из шести постоянных 24-сегментных секstupольных магнитов с полем на внутренней поверхности магнитов до 1.65 Т.

5 Блоки сверхтонких переходов ANKE ABS

Вторым важнейшим элементом источника, помимо спин-сепарирующих секstupольных магнитов, отвечающим за создание поляризованного пучка, является система блоков сверхтонких переходов [13]. Именно здесь индуцируются переходы между уровнями сверхтонкого расщепления для создания той или иной конфигурации заселенности уровней.

Принцип действия блоков сверхтонких переходов описан в [13].

В источнике поляризованного атомарного водорода/дейтерия ANKE ABS применены все три типа блоков сверхтонких переходов: MFT (6),

WFT и SFT (9). На рис. 14 схематически показана конструкция блока сверхтонких переходов в промежуточном поле. Статическое магнитное поле, перпендикулярное оси пучка, задается двумя катушками (B_{stat} , рис. 14). Для создания градиентного поля используются две катушки (B_{grad}), расположенные с обеих сторон высокочастотного резонатора. Поскольку в отличие от других источников ANKE ABS будет работать в сильном магнитном поле, создаваемом центральным магнитом спектрометра (D2), в конструкцию блоков внесена защита от внешнего магнитного поля, выполненная из «мягкого» железа. Расчеты, выполненные с помощью программы MAFIA [9], показали, что в случае применения такого материала для экранировки внешнего магнитного поля (200÷500 Гс) толщина защиты составляет 5 мм.

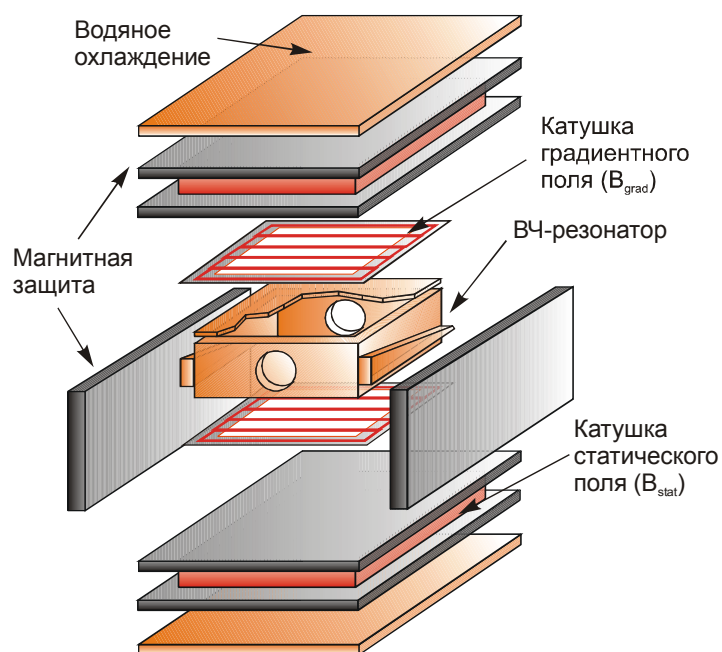


Рис. 14. Конструкция блока сверхтонких переходов ANKE ABS.

Катушки B_{grad} представляют собой алюминиевые рамки, проволока на которые наматывается сначала по часовой стрелке, а затем против (см. рис. 15), в результате чего поле в центре катушки компенсируется и равно нулю.

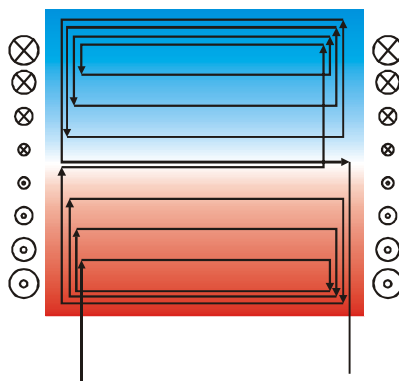


Рис. 15. Схема намотки катушки градиентного поля (B_{grad}).

В отличие от блоков WFT и MFT, где резонатор представляет из себя параллельный LC -контур, в блоке SFT, служащем для обеспечения переходов с $\Delta F = \pm 1$, что соответствует частотам ~ 1.5 ГГц, применен объемный резонатор [14], настроенный на частоту 1425.2 МГц в случае водородного пучка и 341.5 МГц в случае дейтериевого пучка [15]. Список использованного оборудования представлен в таблице 4.

Электрическая схема включения представлена на рис. 16. Для передачи ВЧ-сигнала от усилителя к колебательному контуру (блоки WFT и MFT) и объемному резонатору (блок SFT) использовался коаксиальный кабель с волновым сопротивлением 50Ω и вакуумные разъемы в стандарте SMA (VC_1 , VC_2). С целью минимизации отраженной мощности были применены переменные конденсаторы C_1 и C_2 емкостью 10–60 пФ. Измерение амплитуды ВЧ-сигнала производилось с помощью витка связи (L_p), расположенного сразу за основной катушкой (L) и присоединенного к осциллографу.

Использование высокочастотного оборудования последнего поколения, включенного в общую компьютерную систему управления, позволило существенно упростить работу по настройке блоков

сверхтонких переходов и получить высокую степень ядерной поляризации атомарного пучка.

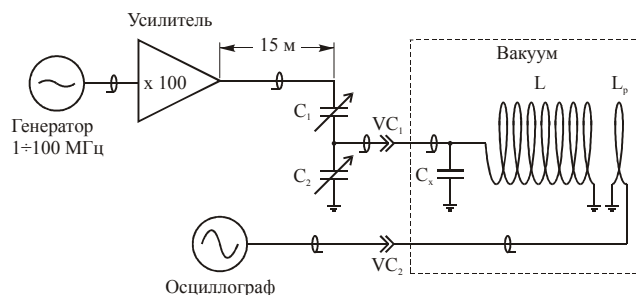


Рис. 16. Упрощенная электрическая схема включения блоков WFT и MFT.

6 Заключение

Планируемый на спектрометре ANKE ускорителя COSY-Jülich эксперимент, связанный с исследованиями развала дейтрона, потребует использования внутренней поляризованной водородной и дейтериевой газовой мишени, представляющей собой криогенную накопительную ячейку. Поляризованный газ, водород или дейтерий поступает в мишень из источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия (ANKE ABS).

В созданном источнике были использованы оригинальные решения, которые привели к созданию:

- компактной конструкции, необходимой для установки источника в ограниченном пространстве туннеля накопительного кольца COSY, а также для обеспечения необходимого пространства для системы детекторов спектрометра ANKE;
- конструкции, совместимой по требованиям с системами, работающими на накопительном кольце ускорителя:
 - вакуумной технологии;
 - системы управления и контроля;
 - системы безопасности;

- мобильного источника, допускающего быстрый монтаж и демонтаж на позицию мишени, что существенно сокращает потери ускорительного времени, т.к., помимо поляризационных экспериментов, на спектрометре ANKE проводятся исследования с неполяризованными мишенями (твердотельная мишень, кластерная мишень, пеллет-мишень).

В конструкцию источника заложены новые элементы, которые позволили увеличить интенсивность. Это такие оригинальные элементы как:

- оптимизированная система охлаждения сопла, имеющая минимальные холодные поверхности в области формирования атомарной струи;
- последовательное использование трех турбомолекулярных насосов позволило создать улучшенные вакуумные условия в первой камере источника, где происходит формирование газовой струи, с минимальными затратами;
- наличие средств регулировки геометрии источника без нарушения вакуума, что является существенным преимуществом в процессе оптимизации характеристик источника;
- система оптимизации газового разряда в диссоциаторе, увеличивающая степень диссоциации в атомарной струе;
- в источнике применена и расположена оптимальным образом рекордная по своим параметрам спин-сепарирующая магнитная система, состоящая из постоянных 24-сегментных секступольных магнитов с полем на внутренней поверхности магнитов до 1.65 Т.

Новые решения, использованные при построении поляризованного источника, позволили:

- получить максимальную интенсивность пучка атомарного водорода [16], измеренную с помощью компрессионной трубки диаметром 10 мм и длиной 100 мм на расстоянии 300 мм от последнего спин-сепарирующего магнита, составившую $(7.5 \pm 0.2) \times 10^{16}$ ат/с (для двух сверхтонких состояний), что на ~10% превышает лучшие мировые показатели для источников такого типа.

- получить интенсивность дейтериевого пучка $(3.9 \pm 0.1) \times 10^{16}$ ат/с (для трех сверхтонких состояний).
- ядерная поляризация атомарного пучка, измеренная с помощью поляриметра, использующего лэмбовский сдвиг, составила:
 - водород:
 - $P_z = +0.89 \pm 0.01$;
 - $P_z = -0.96 \pm 0.01$.
 - дейтерий (оценка снизу):
 - $P_z = +0.68 \pm 0.05$ (векторная поляризация);
 - $P_z = -0.76 \pm 0.06$ (векторная поляризация);
 - $P_{zz} = +0.72 \pm 0.06$ (тензорная поляризация);
 - $P_{zz} = -1.09 \pm 0.08$ (тензорная поляризация).

Приложение

Таблица 1

Список вакуумного оборудования ANKE ABS

Обозначение на схеме	Тип	Комментарии
TP1÷3	TPH2200	Турбомолекулярный насос. Скорость откачки 2200 л/с
TP4÷7	TMH260	Турбомолекулярный насос. Скорость откачки 260 л/с
MP1÷3	MD-8	Мембранный насос
CP1÷2	COOLVAC-3000	Криосорбционный насос. Скорость откачки 3000 л/с
CP3	COOLVAC-800	Криосорбционный насос. Скорость откачки 800 л/с
FC1÷2	MKS Massflo Type 1479	Регулятор газового потока. Диапазон $10^{-3} \div 1$ мбар л/с
V1÷2	Nurpo	Электромагнитные вентили
V3÷4	Balzers	Электромагнитные вентили
V5	VAT	Специальный отсечной электромагнитный вентиль
G1	Analog	Вакуумный манометр
GD, G2	MKS Baratron	Вакуумные лампы емкостного типа
G3÷G7	HPT-100	Комбинированные вакуумные лампы

Таблица 2

Параметры первоначальной и оптимизированной систем формирования пучка и полученные максимальные интенсивности. Размеры указаны в мм

Элемент	Схема-1			Схема-2		
	d	ℓ	Δ	d	ℓ	Δ
Сопло	2.0	25.0	15.0	2.3	25.1	15.0
Скиммер	3.0	13.0	29.9	4.4	13.0	29.9
Коллиматор	8.0/8.7 ¹⁰	2.0	3.1	8.0/8.7	2.0	3.1
Магнит №1	10.0/14.0	41.0	8.4	10.0/14.0	41.0	8.4
Магнит №2	16.0/22.0	66.0	8.4	16.0/22.0	66.0	8.4
Магнит №3	14.0	71.0	428.7	14.0	71.0	428.7
Магнит №4	15.0	39.0	101.0	15.0	39.0	101.0
Магнит №5	15.0	56.0	15.0	15.0	56.0	15.0
Магнит №6	15.0	56.0	300	15.0	56.0	300
Компрессионная трубка	10.0	100.0	100.0	10.0	100.0	100.0
Максимальная интенсивность пучка, ат/с	6.9·10 ¹⁶			7.4·10 ¹⁶		

¹⁰ Коническая форма. Первое число показывает диаметр входной апертуры, второе – диаметр выходной апертуры.

Таблица 3

Размеры секступольных магнитов и магнитное поле на поверхности

№ Магнита	h , мм	r_1 , мм	r_2 , мм	B_{MAFLA} , Т	$B_{изм}$, Т
1	40	5/7 ¹¹	20	1.633	1.654
2	65	8/11	32	1.641	1.684
3	70	14	47	1.642	1.625
4	38	15	47	1.564	1.565
5	55	15	47	1.605	1.621
6	55	15	47	1.605	1.621

Таблица 4

Список оборудования

	Генератор	Усилитель
MFT	ТТИ TGR 1040 (10÷1000 MHz)	R.F.P.A. SA RF001100–10 (1÷100 MHz, 10 W)
WFT	Grundig FG 100 (0.5 Hz ÷ 20 MHz)	— “ — “ —
SFT	Rhode & Schwarz SML02 (9 kHz ÷ 2.2 GHz)	R.F.P.A. SA RF502000–10-BI (50÷2000 MHz, 10 W)

¹¹ Коническая форма. Первое число показывает диаметр входной апертуры, второе – диаметр выходной апертуры.

Литература

- [1] F. Rathmann, S. Dymov, ..., M. Mikirtychiants *et al.* The Polarized Internal Gas Target for the Deuteron Break-up Experiment of ANKE at COSY-Jülich. // Proc. Int. School-Workshop Praha-Spin-01, 15-28 July 2001, Prague, Czech Republic; Czechoslovak Journal of Physics, **52** (2002), Suppl. A *in print*.
- [2] T. Wise, A.D. Roberts and W. Haeberli. A High Brightness Source for Polarized Atomic Hydrogen and Deuterium. // Nucl. Instr. and Meth. **A 336**, (1993) pp. 410-422.
- [3] F. Stock, K. Rith, H.G. Gaul *et al.* The FILTEX/HERMES Polarized Hydrogen Atomic Beam Source. // Nucl. Instr. and Meth. **A 343**, (1994) pp. 334-342.
- [4] A. Vassiliev, V. Nelyubin ... M. Mikirtychiants *et al.* 24 Segment High Field Permanent Sextupole Magnets. // Rev. Sci. Instrum., **71**, №.9, (2000) pp. 3331-3341.
- [5] V.P. Koptev, A.I. Kovalev, P.A. Kravtsov *et al.* Optimization of the Vacuum System of the Atomic Beam Source. // Preprint PNPI-2266, Gatchina (1998) 17 p.
- [6] F. Stock, Report MPI H-V 20-1994, Max Planck Institut für Kernphysik, D-69117 Heidelberg, Germany (1994).
- [7] Rare-Earth Permanent Magnets, VACODYM, VACOMAX, Company Information Booklet PD-002, Vacuumschmelze GmbH, P.O.B. 2253, 63412 Hanau, Germany, 12 p.
- [8] K. Halbach, Nucl. Instr. and Meth. **A 169**, 1 (1980).
- [9] MAFIA, CST GmbH, Buedinger Str. 2a, D-64289 Darmstadt, Germany, <http://www.cst.de>
- [10] Sumitomo Special Metals Company Ltd., Egawa, Shimamotocho, Mishimagun, Osaka 618, Japan.
- [11] L.G. Isaeva, B.A. Lazarenko, S.I. Mishnev *et al.* Cryogenic Atomic Beam Source at VEPP-3. // Proc. 7th Int. Workshop on Polarized Gas

-
- Targets and Polarized Beams, eds. R.J. Holt, M.A. Miller, Urbana, Illinois, USA 1997, AIP Conf. Proc. **421**, (1997) pp. 109-118.
- [12] D. Krischel, M. Schillo, A. Hobl, H. Grünberg, and H.-J. Hergesell, *Rev. Sci. Instr.* **69**, 677 (1998).
- [13] М.С. Микиргычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Блоки сверхтонких переходов для создания ядерной поляризации в источнике поляризованного атомарного водорода и дейтерия ANKE ABS. // Препринт ПИЯФ-2487, Гатчина (2002) 22 с.
- [14] H.G. Robinson, W.M. Hooke, H.W. Lewis *et al.* RF Cavity Design and Performance for the TUNL Polarized Ion Source. // *Nucl. Instr. and Meth. A* **278**, (1992) pp. 655-659.
- [15] M. Rall, Report MPIH-V25-1993, Max-Planck-Institut Heidelberg (1993).
- [16] М.С. Микиргычянц, А.А. Васильев, В.П. Коптев и др. Измерения интенсивности пучка источника поляризованного атомарного водорода и дейтерия. // Препринт ПИЯФ-2481, Гатчина (2002) 36 с.