

ИСТОЧНИКИ ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ И КОЛЛАЙДЕРОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

А. Н. Зеленский *

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Долгопрудный, Россия

Представлены последние достижения в разработке источников пучков поляризованных протонов, отрицательных ионов водорода H^- , $D^+(D^-)$ и ${}^3He^{++}$. Разработка новых методов поляризации ионов проводится в BNL, ОИЯИ, ИЯИ РАН и других лабораториях. Поляризованные дейтронные пучки потребуются для поляризационной программы на коллайдере NICA и в эксперименте по поиску электрического дипольного момента протона и дейтрона. Эксперименты с поляризованными пучками ионов ${}^3He^{++}$ являются частью экспериментальной программы на коллайдере NICA и будущем электрон-ионном коллайдере (Electron Ion Collider — EIC).

The latest achievements in the development of polarized proton, negative hydrogen ions H^- , $D^+(D^-)$ and ${}^3He^{++}$ are presented. The development of new polarization techniques is carried out at BNL, JINR, INR RAS and other laboratories. Polarized deuteron beams will be required for the polarization program at the NICA collider and in the experiment to search for the electric dipole moment of the proton and the deuteron. Experiments with polarized ${}^3He^{++}$ ion beams are part of the experimental program at the NICA collider and the future Electron Ion Collider (EIC).

PACS: 9.25.Lg; 29.27.Hj

ВВЕДЕНИЕ

Поляризация является фундаментальным свойством фотонов, электронов, протонов, ядер, и изучение поляризационных эффектов дает важную информацию о структуре частиц и их взаимодействиях. Эксперименты на коллайдерах с поляризованными пучками на RHIC и HERA (на HERA завершена экспериментальная программа с поляризованным электронным пучком и поляризованной внутренней мишенью HERMES) обеспечивают проверку теоритических предсказаний КХД и электрослабого взаимодействия. Спиновые асимметрии и нарушение пространственной четности позволяют идентифицировать вклады фундаментальных

* E-mail: zelenskii.an@mipt.ru

процессов, недоступных иными способами. Такие эксперименты требуют максимальной светимости, поэтому поляризация должна быть получена в качестве дополнительного качества пучков без потерь интенсивности. Это может быть реализовано при ускорении пучков, поляризованных в источнике, и обеспечением сохранения поляризации при ускорении и накоплении пучков в коллайдере. Высокоинтенсивные поляризованные источники ионов H^- в настоящее время являются лучшим выбором для ускорителей высоких энергий, поскольку перезарядная инжекция в кольцо ускорителя позволяет увеличить яркость пучка и получить пучки поляризованных протонов с максимальной интенсивностью, равной интенсивности неполяризованных пучков, ограниченной только акцептансом накопительных колец [1]. Поляризованный дейтронный пучок потребует для эксперимента по поиску EDM (Electric Dipole Moment) протонов и дейтронов, который планируется на коллайдере NICA в ОИЯИ (Дубна) [2]. Эксперименты с ускоренными поляризованными пучками ионов ${}^3He^{++}$ входят в программу будущего электрон-ионного коллайдера EIC BNL [3].

МЕТОДЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Методы спиновой фильтрации. Основной особенностью этих методов поляризации является подавление интенсивности (рассеяние, адсорбция, дефокусировка) электронных, атомарных или нейтронных пучков, имеющих направление поляризации, противоположное заданной. Например, сильная спиновая зависимость сечения захвата нейтронного пучка с тепловыми энергиями в поляризованной газовой ячейке 3He используется для поляризации нейтронного пучка и анализа поляризации. В поляризованных источниках на основе лэмбовского сдвига метастабильные атомы водорода переводятся селективно по спиновому состоянию с помощью спинового фильтра из метастабильного $H(2S)$ в основное состояние, а оставшиеся поляризованные атомы могут ионизироваться посредством селективной ионизации из метастабильных состояний. Селективная фокусировка с помощью секступольных разделяющих магнитов используется для поляризации пучка водорода (дейтерия) по спинам электронов в источниках с атомарным пучком, для получения поляризованных ионов и поляризованных внутренних мишеней водорода. В этих источниках атомарный водород образуется путем диссоциации молекул водорода в высокочастотном разряде. Газообразный водород вытекает из объема диссоциатора в вакуум, образуя газовую струю. Затем пучок атомарного водорода формируется из центральной части струи с помощью системы скиммеров и диафрагм. Типичная скорость атомов в пучке составляет около $2 \cdot 10^5$ см/с, что достигается охлаждением сопла диссоциатора до температуры ~ 80 К. Шестипольное магнитное поле действует на магнитный момент электрона с положительной проекцией спина на градиент поля как фокусирующая линза. Другая компонента, имеющая противоположное направление спина электронов, дефокусируется. Затем

поляризация электронов переносится протонам посредством радиочастотных переходов. Поляризованный пучок протонов или ионов H^- может быть получен при ионизации атомного пучка в магнитном поле около 1,5 кГс, что достаточно для разрыва спиновой связи электрон–протон с сохранением поляризации протонов. Пучок атомарного водорода может быть использован в качестве внутренней мишени в накопительном кольце ускорителя-коллайдера (поляризованная струйная мишень-поляриметр в RHIC [4]) или для инъекции во внутренние мишени типа накопительной ячейки.

Метод оптической накачки. Поляризация электронов и ядер в атомах может быть осуществлена в процессе поглощения поляризованных фотонов от внешнего источника поляризованного света и последующего спонтанного излучения неполяризованного фотона (оптическая накачка). В этом процессе меняется момент импульса электронной оболочки атома и атом приобретает электронную поляризацию. Поляризация электронов переносится ядрам посредством сверхтонкого взаимодействия, если оптическая накачка происходит в слабом магнитном поле. При оптической накачке меняется заселенность спиновых состояний атомов за счет поглощения поляризованных фотонов, которые передают атомам момент импульса. Для оптической накачки атомов рубидия используется лазерное излучение с длиной волны 795 нм для возбуждения переходов $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$. Поляризованные атомы 3He получают при возбуждении переходов в метастабильных состояниях $2^3S_{1/2} \rightarrow 2^3P_0$ (1083 нм). Для оптической накачки этих атомов разработаны эффективные лазеры с перестраиваемой длиной волны.

Метод переноса поляризации. Во всех поляризованных источниках протонов, дейтронов (ионов H^- , D^-) первым шагом является получение атомного пучка, поляризованного по электронному спину. Затем поляризация передается ядрам посредством сверхтонкого взаимодействия, и, наконец, пучок ионизируется. Различие заключается в скорости атомного пучка. Сравнительно легко поляризовать «медленный» пучок атомов тепловыми скоростями $\sim 2 \cdot 10^5$ см/с с помощью разделительных магнитов. Преимущества использования «быстрых» (энергия несколько килоэлектронвольт, скорости $\sim 10^8$ см/с) пучков заключаются в высокой интенсивности первичного пучка и более эффективной ионизации. Поляризация по электронному спину «быстрого» пучка осуществляется либо в процессе перезарядки, когда первичные протоны захватывают поляризованные электроны из поляризованных атомов в паровой ячейке, либо в спин-обменных столкновениях. При этом методе используется оптическая накачка для получения поляризованных электронов в парах атомов щелочных металлов (K, Na, Rb, Cs). Источники поляризованных ионов, в которых используется этот метод, называются OPPIS (Optically-Pumped Polarized Ion Source), хотя поляризованные электроны могут быть захвачены и из ферромагнитной фольги (как в пионерском пред-

ложении Е. К. Завойского) или из атомного пучка щелочного металла, поляризованного разделительными магнитами.

ИСТОЧНИК С АТОМАРНЫМ ПУЧКОМ И РЕЗОНАНСНЫМ ПЛАЗМЕННЫМ ИОНИЗАТОРОМ

В ИЯИ РАН разработан поляризованный источник ионов с резонансным плазменным ионизатором [5]. В этом источнике для получения поляризованных протонов и ионов H^- используется перезарядка пучка поляризованных атомов водорода в процессе квазирезонансных столкновений с ионами дейтерия в плазменной струе, создаваемой источником дейтериевой плазмы. Также в зеркальной моде могут быть получены поляризованные дейтроны D^+ , ионы дейтерия D^- . Перезарядка с образованием положительных ионов осуществляется в плазменной струе от источника плазмы с дугowym разрядом, которая инжектируется в соленоид ионизатора с полем 1,5 кГс навстречу поляризованному атомарному пучку (рис. 1). Для получения отрицательных ионов пучок плазмы обогащается отрицательными ионами в поверхностно-плазменном преобразователе. Поляризованный пучок атомарного водорода инжектируется в плазму, и в результате реакции $H^0 + D^- \rightarrow H^- + D^0$ образуются поляризованные ионы H^- . С помощью этого ионизатора получен поляризованный пучок ионов H^- с пиковым током 4 мА. Поляризация пучка ионов H^- составила $0,91 \pm 0,03$ [6]. Для поляризационных измерений использовался поляриметр на основе лэмбовского сдвига. Также получен пучок поляризованных ионов D^- с пиковой интенсивностью до 2 мА и поляризацией до 90% от номинала векторной поляризации ± 1 и тен-

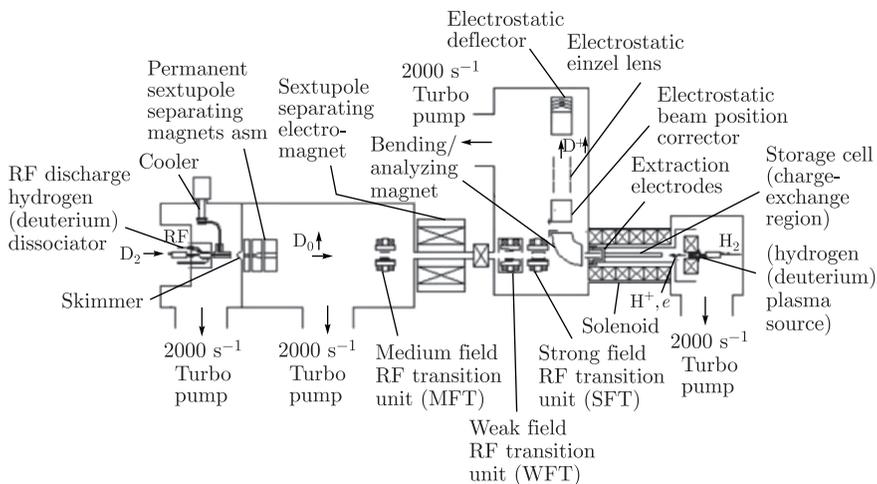


Рис. 1. Источник поляризованных протонов и дейтронов для коллайдера NICA

зорной поляризации $+1$, -2 в поляризованном источнике CIPIOS в IUCF. Источник был разработан в сотрудничестве IUCF и ИЯИ РАН [7]. Источник с зарядово-обменным ионизатором производил поляризованные ионы H^- (пик 1,8 мА) и неполяризованные ионные пучки H^- и D^- (40 и 30 мА соответственно) с длительностью импульса 300 мкс и частотой повторения 2 Гц.

Программа поляризационных исследований на ионном коллайдере NICA (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) основана на ускорении пучков поляризованных протонов до 12 ГэВ и дейтронных пучков до 5,6 ГэВ, энергии пучков нуклонов в ускорителе нуклотрон и инъекции пучка в кольца коллайдера. Для достижения числа ускоренных дейтронов $\sim 10^{10}$ дейтронов/цикл требуется импульсный источник поляризованных протонов и дейтронов высокой интенсивности (при имеющейся схеме инъекции в один оборот длительность импульса 8,34 мкс, частота повторения 0,2 Гц). Новый поляризованный источник был разработан в сотрудничестве ОИЯИ и ИЯИ РАН. Части источника из IUCF были доставлены в ОИЯИ и используются для поляризованного источника NICA (см. рис. 1). Целью проекта является поляризованный дейтронный пучок от источника с пиковой интенсивностью 10 мА и поляризацией 90% от номинальной векторной поляризации ± 1 и тензорной поляризации $+1$, -2 . Поляризованный ток 2 мА и поляризация дейтронов до $(88 \pm 5)\%$ были получены в сеансах 2016–2017 гг. [8], позднее ток поляризованных дейтронов был увеличен до 6 мА [9].

Для увеличения интенсивности и поляризации пучка поляризованных ионов от источника разрабатывается новая схема плазменного перезарядного ионизатора с поперечной инъекцией пучков поляризованных атомов водорода и дейтерия в накопительную ячейку и новой системой вывода пучка и управлением направления спинов, что позволит увеличить интенсивность и поляризацию пучков.

ИСТОЧНИК С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА RHIC

OPPIS с инжектором пучка атомов водорода. Поляризованный пучок для экспериментальной программы RHIC создается в источнике ионов с оптической накачкой (OPPIS) [10]. В качестве первичного источника протонов в старом рабочем поляризованном источнике с непрерывным током использовался источник ионов на основе электронного циклотронного резонанса (Electron Cyclotron Resonance, ECR). Источник ECR работал в сильном магнитном поле. Пучок протонов, полученный в источнике ECR, имел сравнительно низкую плотность тока излучения и высокую расходимость пучка. В импульсном режиме, подходящем для применения на ускорителях и коллайдерах высоких энергий, ограничения источника ECR могут быть преодолены за счет использования источника протонов высокой яркости вне магнитного поля вместо ис-

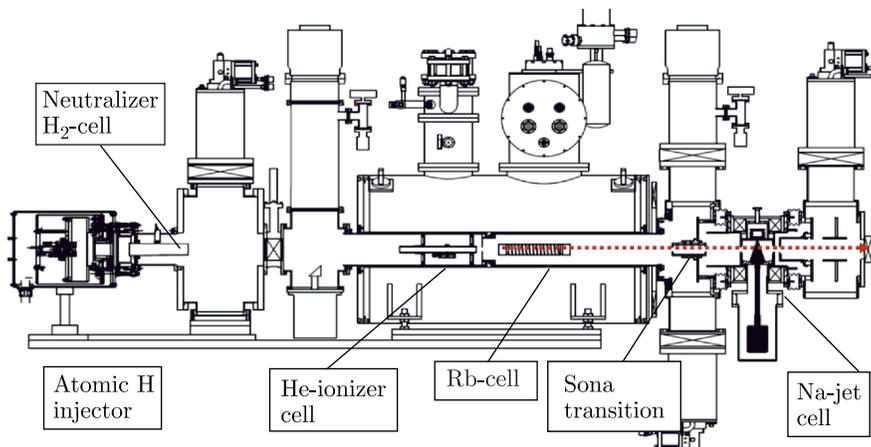


Рис. 2. Источник с оптической накачкой и атомарным инжектором водорода для коллайдера RHIC

точника ECR [11]. При этом методе (впервые реализованном в ИЯИ РАН [12]) пучок протонов с током $\sim 3,5$ А фокусируется и нейтрализуется в водородной ячейке, образуя атомарный пучок H^0 с высокой яркостью при энергии пучка 6,5 кэВ. Атомарный пучок H^0 инжектируется в сверхпроводящий соленоид, где в однородном поле соленоида 3,0 Тл расположены газовая гелиевая ячейка-ионизатор и оптически ориентированная по электронному спину ячейка с парами атомов Rb. Пучок атомов водорода ионизируется в ячейке He с эффективностью 60–80 % с образованием пучка протонов высокой интенсивности и малой расходимостью и затем попадает в ячейку с парами атомов Rb (рис. 2). При захвате поляризованных электронов из атомов Rb образуются атомы водорода, поляризованные по электронному спину. Отрицательное смещение около 4,0 кВ, приложенное к ячейке He, замедляет пучок протонов, образованный в ячейке, до энергии пучка 2,5 кэВ, оптимальной для процессов перезарядных столкновений в рубидиевой и натриевой ячейках. Замедление протонов позволяет разделить по энергии пучок поляризованных атомов водорода, образующихся после нейтрализации протонов с более низкой энергией в парах Rb, и пучок остаточных атомов водорода с энергией 6,5 кэВ, прошедших He-ячейку без перезарядки.

Высокоинтенсивный источник атомарного пучка с высокой яркостью. Источник атомарного водорода был разработан в сотрудничестве с ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН [10]. В этом источнике первичный пучок протонов генерируется четырехсеточной многоапертурной оптической системой для извлечения и фокусировки протонного пучка и затем нейтрализуется (с эффективностью около 90 %) в водородной ячейке с импульсным напуском газа. Первичный протонный пучок высокой

яркости был получен в этом инжекторе при использовании плазменного генератора с низкой поперечной температурой ионов (около 0,2 эВ), который образуется за счет расширения плазменной струи от дугового плазменного генератора. Сеточные электроды изготовлены из молибденовых пластин толщиной 0,4 мм и имеют сферическую форму для обеспечения «геометрической» фокусировки луча. Отверстия (диаметром 0,8 мм) в пластинах были получены методом фототравления. Массив из 1820 отверстий образует шестиугольную структуру с шагом 1,1 мм и диаметром массива 50 мм. При плотности эмиссионного тока около 200 мА/см² угловая расходимость полученного пучка составила ~ 10–12 мрад. Фокусное расстояние сферической системы экстракции ионов было оптимизировано для применения в новой схеме источника, которая характеризуется удлиненной структурой зарядово-обменных ячеек и небольшим акцептансом ячейки ионизатора, расположенной в 240 см от источника. Оптимальная длина дрейфового промежутка (около 140 см) требуется для сходимости пучка 50 мм (начальный диаметр) к ячейке He-ионизатора диаметром 25 мм.

Гелиевая ячейка-ионизатор. Разделение поляризованного пучка по энергии. Ячейка He-ионизатора представляет собой трубку из нержавеющей стали длиной 40 см с внутренним диаметром 25 мм (рис.3). Разработан новый быстрый электромагнитный клапан для напуска гелия в ячейку для работы в электромагнитном поле 3,0 Тл. В этом клапане импульсный ток около 50 А пропускается через гибкую пружинную пластину (изготовленную из бериллиевой бронзы толщиной 0,5 мм). Сила Ампера составила $F = eL[\mathbf{I} \times \mathbf{B}] \sim 5 \text{ Н}$ для пластины длиной $L = 5 \text{ см}$. При этой силе изгибается пластина и открывается отверстие диаметром 0,15 мм, которое закрывается уплотнительным кольцом из эластомера. Время нарастания импульсного тока составляет ~ 50 мкс, а время нарастания давления газа в ячейке около 100 мкс. Пучок протонов,

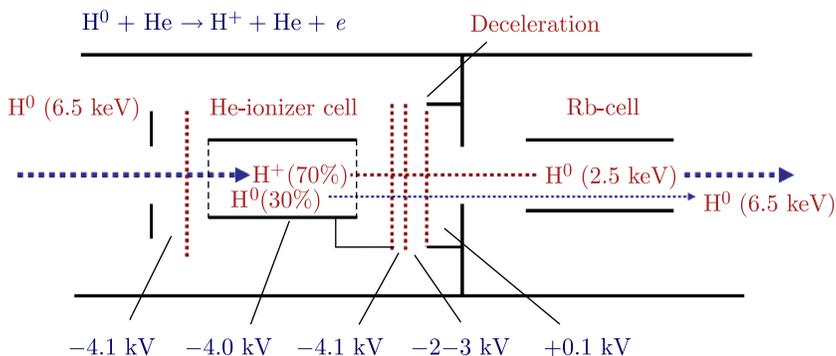


Рис. 3. Гелиевая импульсная газовая ячейка-ионизатор с замедлением пучка протонов, образующихся в ячейке

образующийся в He-ячейке, замедляется с 6,5 до 2,5 кэВ отрицательным потенциалом, приложенным к ячейке. При энергии пучка 2,5 кэВ выход ионов H^- в ячейке ионизатора натрия близок к максимальному (около 8,4%), а сечение захвата поляризованных электронов атомами Rb также близко к максимуму ($\sim 0,8 \cdot 10^{-14} \text{ см}^2$). Торможение проводилось с помощью прецизионно отъюстированной (для уменьшения потерь пучка) трехсеточной ионно-оптической системы.

Около 40% прошедшего через He-ячейку без ионизации атомного пучка при энергии 6,5 кэВ пройдет через систему замедления и Rb-ячейку и ионизируется в Na-ячейке с образованием пучка ионов H^- . Выход ионов H^- при 6,5 кэВ составляет около 4%. Это значительное подавление по сравнению с основным пучком 2,5 кэВ, однако эта остаточная компонента пучка могла бы сильно разбавить поляризацию. Замедление пучка протонов, образованных в He-ячейке с 6,5 до 2,5 кэВ, приводит к разделению неполяризованной компоненты по энергии, что позволяет в дальнейшем отделить эту компоненту от поляризованного пучка.

Струйная натриевая мишень-ионизатор. Процесс передачи поляризации электронов протонам осуществляется посредством сверхтонкого взаимодействия в области изменения направления магнитного поля. Этот метод Sona-перехода впервые был предложен для источников «быстрых атомов» (энергия несколько килоэлектронвольт, скорость $\sim 10^8 \text{ см/с}$) на основе лэмбовского сдвига и успешно реализован в источниках с оптической накачкой. Направление магнитного поля в соленоиде ионизатора противоположно полю сверхпроводящего соленоида, и условия для эффективного Sona-перехода выполняются в области изменения знака продольной компоненты поля, если выполнены ограничения на градиент поля в области перехода.

Далее пучок атомов водорода, поляризованный по протонному спину, может захватить еще один электрон в парах щелочных металлов (натрия или рубидия) с образованием отрицательных ионов водорода H^- , поляризованных по протонному спину (спины двух электронов в ионе H^- скомпенсированы и больше не связаны со спинами протонов). Ионизация может быть осуществлена также с отрывом электрона в гелиевой газовой мишени с образованием протонов. В этом случае эффективность ионизации будет около 80% и на стенде будет получен ток поляризованных протонов 40 мА. Величина магнитного поля в области ионизации должна быть достаточной для разрыва сверхтонкого взаимодействия ($\sim 1,5 \text{ кГс}$), тогда потери поляризации не превысят $\sim 2\%$ (величина критического поля 507 Гс).

В ионизаторе происходит изменение зарядового состояния пучка, что позволяет менять энергию пучка на выходе ионизатора. Струйная натриевая перезарядная мишень-ионизатор вместе с соленоидом 1,5 кГс изолирована от источника, и ко всей сборке ионизатора прикладывается импульсный отрицательный потенциал 32,5 кВ. В ионизатор входит пучок поляризованных атомов водорода с энергией 2,5 кэВ. На выходе

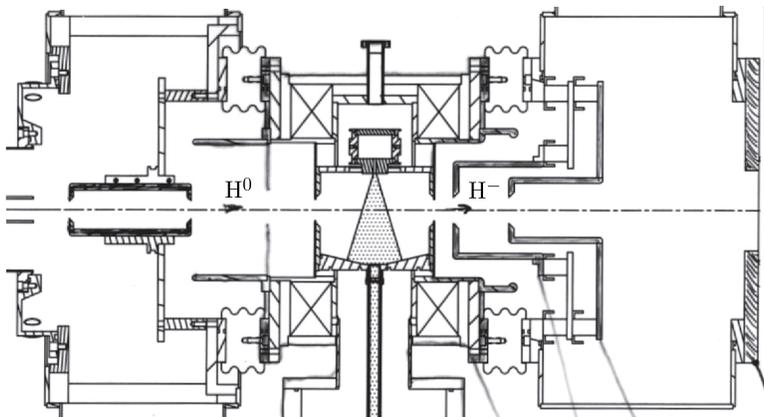


Рис. 4. Струйная перезарядная мишень-ионизатор. Ионы H^- ускоряются до 35 кэВ в трехзорной ускоряющей системе на выходе ионизатора

пучок H^- ионов, образованный в натриевой струе, ускоряется до полной энергии 35 кэВ, оптимальной для транспортировки и инжекции в ускоритель RFQ (Radio Frequency Quadrupole) (рис. 4). Неполаризованная компонента атомарного пучка с энергией 6,5 кэВ (прошедшая He-мишень-ионизатор без перезарядки) при перезарядке в натрии (с меньшей эффективностью) будет ускоряться до энергии 39,0 кэВ и уберется из пучка после поворотного магнита в канале транспортировки. В измерениях эффективности разделения энергия пучка менялась при изменении приложенного к ионизатору ускоряющего напряжения. При оптимизации настройки формы пучка (с помощью фокусирующих квадруполов в канале транспортировки) остаточная неполяризованная составляющая пучка с энергией 6,5 кэВ была подавлена до менее чем 2% от поляризованной составляющей пучка.

Ускорение осуществляется в трехзорном ускоряющем промежутке, с дополнительными независимо регулируемыми источниками питания, что позволяет оптимизировать фокусирующее действие ускоряющих зазоров и улучшает формирование пучка.

Возможность реализации этой схемы ионизатора основана на успешной разработке струйной натриевой перезарядной мишени с циркуляцией натрия. Применение струйной мишени с поперечным потоком паров существенно уменьшает вынос натрия из мишени вдоль оси источника. Это позволило увеличить апертуру мишени, исключить проникновение паров натрия в Rb-ячейку (что могло бы привести к потере поляризации) и исключить попадание паров натрия в область скрещенных электрических и магнитных полей, что могло бы привести к высоковольтным пробоям.

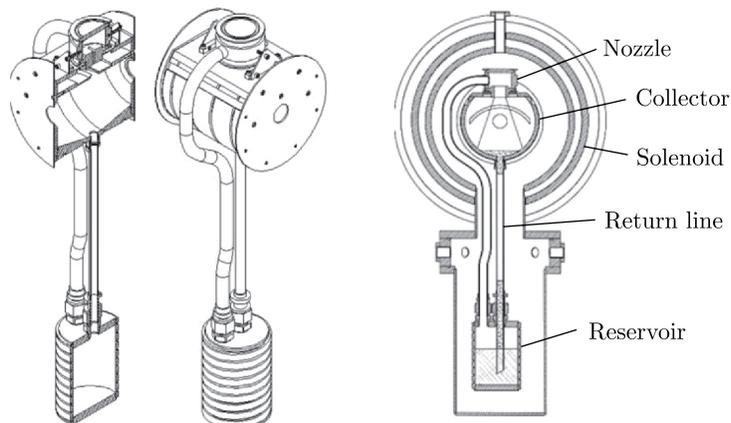


Рис. 5. Натриевая струйная перезарядная мишень-ионизатор

В струйном ионизаторе циркуляция осуществляется при конденсации струи паров натрия из сопла (нагретого до температуры 500°C) в коллекторе, поддерживаемом при температуре $\sim 120^{\circ}\text{C}$ (температура плавления натрия 98°C). В сопло пары доставляются из резервуара, нагретого также до температуры 500°C , через горячую транспортную трубку. Жидкий натрий, сконденсированный в коллекторе, стекает обратно в резервуар по возвратной трубке. Конец трубки был продлен до дна резервуара, что улучшило стабильность циркуляции натрия (рис. 5). В резервуар загружается около 150 г металлического натрия. Без циркуляции этого количества хватило бы на 2–3 ч работы ионизатора. В режиме циркуляции ионизатор непрерывно и стабильно работал в течение 20-недельного сеанса на ускорителе с минимальными потерями натрия вдоль оси источника.

Результаты. Источник с инжектором атомарного водорода и ячейкой He-ионизатора был разработан в 2010–2012 гг. и введен в эксплуатацию в 2013 г. Использование первичного источника протонов высокой яркости привело к более высокой интенсивности поляризованного пучка и степени поляризации для инъекции в ускорительный комплекс – линейный ускоритель – бустер – AGS – RHIC. Продемонстрирована высокая надежность работы и сокращение времени технического обслуживания.

Дальнейшее увеличение интенсивности и поляризации луча было достигнуто в результате оптимизации ионно-оптической системы первичного пучка протонов и режима работы ячейки He-ионизатора и повышения эффективности транспортировки пучка в канале транспортировки. В результате этих улучшений поляризованный источник обеспечил интенсивность пучка ионов H^+ 0,5–1,0 мА при поляризации 82–85 % на выходе линейного ускорителя при энергии пучка 200 МэВ. Ток ис-

точника значительно выше (более 4,0 мА). Наибольшие потери пучка возникают при транспортировке пучка с энергией 35 кэВ в длинном (около 6 м) канале траспортировки и в процессе разделения энергии. Эти потери могут быть снижены за счет дальнейшей оптимизации системы разделения энергии в ячейке He-ионизатора и системы ускорения пучка на выходе Na-мишени-ионизатора, а также улучшения оптики канала транспортировки. Поляризация пучка измеряется в абсолютном поляриметре, основанном на выделении упругой части протон-углеродного рассеяния, при энергии пучка 200 МэВ после линейного ускорителя [13]. При токе пучка ионов H^- 0,5 мА (на выходе линейного ускорителя) поляризация составляет $(85 \pm 0,5)\%$, при увеличении тока до 1,0 мА поляризация несколько ниже — 83% (систематическая ошибка измерений в абсолютном поляриметре 0,5%). Потери поляризации в AGS зависят от эмиттанса пучка и соответствующей интенсивности пучка. При экстраполяции на нулевую интенсивность (малый эмиттанс) величина поляризации согласуется с абсолютными измерениями поляриметра 200 МэВ. Интенсивность пучка AGS для инжекции в RHIC оптимизирована для получения максимальной светимости и поляризации и составила около $2,5 \cdot 10^{11}$ протонов/импульс с поляризацией 70–72%. Поляризация пучка в RHIC измеряется с помощью абсолютного поляриметра, основанного на упругом рассеянии ускоренного пучка поляризованных протонов в струе поляризованных атомов водорода в области кулон-ядерной интерференции [4]. В этом поляриметре получена рекордно малая систематическая ошибка для абсолютного значения поляризации — менее 0,5% [14]. Модернизированный источник надежно поставлял пучок в сеансах 2017–2022 гг. Это стало основным фактором, способствовавшим увеличению поляризации RHIC до более чем 60% и светимости $2,5 \cdot 10^{32} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ при энергии столкновений протонов $\sqrt{s} = 510 \text{ ГэВ}$.

РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ${}^3\text{He}^{++}$

Поляризация ядер в поляризованных ядрах ${}^3\text{He}$ в основном (88,6%) переносится нейтронами. Поляризация пучка ${}^3\text{He}^{++}$, полученная в источнике, может быть сохранена при ускорении в синхротронных ускорителях типа AGS, RHIC и нуклотроне с помощью метода «сибирских змеек». По сути, в столкновениях ядер ${}^3\text{He}$ в электрон-ионном коллайдере EIC можно исследовать фундаментальные взаимодействия поляризованного электронного пучка с высокоэнергетическим поляризованным пучком нейтронов, что является комплементарным исследованием поляризованных электронов со столкновениями поляризованных протонных пучков. Для получения необходимой светимости для программы экспериментов с пучками поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ в RHIC потребуются около $2 \cdot 10^{11}$ ионов в импульсе источника ионов. Чтобы обеспечить такую

интенсивность в импульсе длительностью 20 мкс для инъекции в бустер, пиковый ток источника должен составлять около 2000 мкА, что на три порядка выше, чем когда-либо достигалось в источниках ионов ${}^3\text{He}^{++}$. Предложен новый метод получения пучка ионов высокой интенсивности ${}^3\text{He}^{++}$, основанный на инъекции и ионизации газа ${}^3\text{He}$, поляризованного методом МЕОР (Metastability-Exchange Optical Pumping — оптическая накачка в метастабильном состоянии атомов ${}^3\text{He}$ и передача поляризации атомам в основном состоянии в спин-обменных столкновениях) в источник с электронным пучком (EBIS — Electron Beam Ion Source) [15]. В настоящее время EBIS производит многозарядные ионы для инъекции в RHIC и остается основным источником заряженных ионов для EIC. В EBIS электронный пучок высокой интенсивности (10 А) создается электронной пушкой с катодом диаметром 9,2 мм и инжектируется в магнитное поле соленоида 5,0 Тл. Электронный пучок радиально сжимается магнитным полем до диаметра около 1,5 мм в области ионизации, а затем расширяется перед сбором в электронный коллектор на выходе соленоида. Ионы радиально удерживаются пространственным зарядом электронного пучка и электростатическими барьерами на концах области ловушки в продольном направлении. После повторных столкновений, приводящих к образованию и накоплению многозарядных ионов, пучок ионов извлекается за счет повышения потенциала ловушки и понижения барьера [16]. В рамках модернизации для получения поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ EBIS был дополнен вторым соленоидом 5,0 Тл. Поляризованный газ ${}^3\text{He}$ генерируется методом МЕОР и затем инжектируется в дрейфовую трубку EBIS в первом соленоиде, далее происходит ионизация и накопление ионов до максимального полного заряда, около 50% от заряда тока электронного пучка. Тем самым количество ионов ограничено максимальным зарядом, который может быть заключен в EBIS. Исходя из экспериментов с получением ионов Au^{32+} , можно ожидать, что будет произведено и извлечено более $2,0 \cdot 10^{11}$ ионов ${}^3\text{He}^{++}$ в импульс для последующего ускорения и инъекции в RHIC (рис. 6). Газовая ${}^3\text{He}$ -ячейка будет помещена внутри первого соленоида EBIS, а импульсный газовый клапан (аналогичный клапану OPPIS) будет использоваться для инъекции газа в центр системы дрейфовых трубок EBIS, чтобы минимизировать деполяризацию и повысить эффективность ионизации. Ионизация в EBIS происходит в магнитном поле 5,0 Тл, которое сохраняет поляризацию ядра ${}^3\text{He}$, в промежуточном однозарядном состоянии ${}^3\text{He}^+$.

Высокая поляризация ядра ${}^3\text{He}$ (более 80%) была достигнута методом МЕОР в герметичной стеклянной ячейке в сильном магнитном поле (2,0–4,0 Тл) [17]. В этих измерениях газ ${}^3\text{He}$ при давлении 1,0 торр содержался в запаянной стеклянной ячейке и слабый ВЧ-разряд использовался для возбуждения атомов в метастабильное состояние. Метастабильные атомы в состоянии 2^3S_1 поляризуются методом оптической

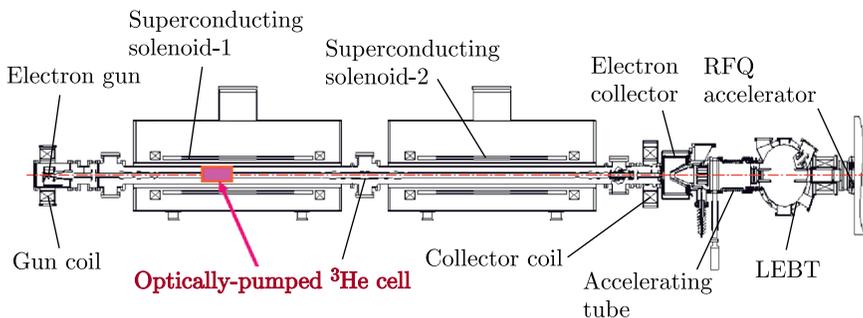


Рис. 6. Источник поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ на основе EBIS для RHIC. В первом соленоиде размещена ячейка с поляризованным ${}^3\text{He}$ и клапаном для инъекции ${}^3\text{He}$ в дрейфовую трубку EBIS

накачки циркулярно-поляризованным лазерным излучением с длиной волны 1083 нм (при возбуждении переходов $2^3S_1-2^3P_0$).

Любое загрязнение в гелиевой ячейке (водород, водяной пар и т. д.) уменьшает поляризацию ${}^3\text{He}$ за счет гашения метастабильных состояний. В поляризованном источнике ячейка с оптической накачкой должна быть соединена с клапаном для инъекции газа в дрейфовую трубку и линией для откачки и обезгаживания ячейки, а также для заполнения ${}^3\text{He}$ -ячейки. Для устранения загрязнений и поддержания необходимой чистоты газа была разработана криогенная система очистки и наполнения газа ${}^3\text{He}$. Внутри стандартного крионасоса был установлен дополнительный цилиндрический контейнер (прикрепленный к холодной головке крионасоса), заполненный гранулами адсорбента. Контейнер соединен с системой наполнения ${}^3\text{He}$ тонкостенной гофрированной трубкой. При температуре 20 К адсорбент поглощает все примеси и снижает парциальные давления водорода, воды, углеводородов и аргона до уровня ниже 10^{-7} торр. Этот насос поглощает также довольно значительное количество газа ${}^3\text{He}$ (около 20 нормальных см³). Поглощенный газ ${}^3\text{He}$ частично высвобождается при нагревании корпуса контейнера до температуры около 30 К, при этом парциальные давления примесей остаются очень малыми, что обеспечивает очистку, хранение и подачу газа для работы ${}^3\text{He}$ -ячейки при оптимальном давлении 10–5,0 торр [17]. Стеклоянная ${}^3\text{He}$ -ячейка с оптической накачкой была прикреплена к системе очистки газа с помощью трубки из нержавеющей стали длиной 200 см и соединена с ячейкой вакуумным уплотнением. Ячейка и система наполнения смонтированы на подвижной опоре и в рабочем положении вдвигаются внутрь сверхпроводящего соленоида. Для предотвращения деполяризации атомов ${}^3\text{He}$ из-за прохождения поляризованных атомов через неоднородное поле на краю соленоида был установлен дополнительный раздельный клапан на входе в ячейку в однородной области поля.

Разработан дистанционно управляемый (пневматический) клапан между системой подготовки газа и стеклянной ячейкой. Для поляризационных измерений использовалась методика поглощения излучения пробного лазера. Лучшие результаты по оптической накачке газа ^3He в открытой ячейке составили 80 % при давлении газа $^3\text{He} \sim 2\text{--}5$ торр [18].

Для повышения эффективности использования газа (минимизация количества инжектируемого газа ^3He для насыщения ловушки EBIS) разработана новая конфигурация дрейфовых трубок EBIS. Поляризованный газ ^3He инжектируется в центр удлиненной (300 мм) дрейфовой трубки малого диаметра (20 мм ID) с помощью импульсного клапана. Трубка работает как накопительная ячейка, что увеличивает эффективную толщину поляризованного газа для повышения эффективности ионизации. Расчеты показывают, что для полного заполнения EBIS потребуется всего около $(2\text{--}5) \cdot 10^{12}$ атомов.

Разработан оригинальный импульсный клапан для впрыска ^3He -газа из ячейки в дрейфовую трубку EBIS, аналогичный клапану OPPIS, который работает в электромагнитном поле 5,0 Тл. Прототип клапана был испытан в поле соленоида 3,0 Тл. Расход газа до $5 \cdot 10^{12}$ атомов/импульс был измерен при токе 12 А через пластину. Система очистки, подачи газа, ^3He -ячейка и импульсный клапан находятся под земляным потенциалом, и изоляция от дрейфовой трубки (находящейся под потенциалом 20–30 кВ) осуществляется керамическим изолятором между клапаном и дрейфовой трубкой. Импульсное (пиковое) давление газа в канале изолятора в процессе инъекции не превышает 10^{-4} торр (при напуске $5 \cdot 10^{12}$ атомов/импульс), и было экспериментально доказано отсутствие высоковольтных пробоев вплоть до потенциала дрейфовой трубки 40 кВ.

Для измерений абсолютной поляризации ядер ^3He разрабатывается поляриметр на основе упругих столкновений $^3\text{He}\text{--}^4\text{He}$ при энергии пучка 2 МэВ/нуклон на выходе линейного ускорителя [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследований с поляризованными ионными пучками на новых и имеющихся ускорителях и коллайдерах требуются высокоинтенсивные пучки протонов, дейтронов и ионов $^3\text{He}^{++}$ с высокой степенью поляризации. В современных источниках с атомарным пучком с резонансным плазменным ионизатором и в источнике с оптической накачкой получены пучки поляризованных ионов водорода и дейтерия с высокой интенсивностью и поляризацией $\sim 85\%$, достаточной для инъекции в коллайдеры высоких энергий для получения максимальной светимости. Поляризованный источник ионов $^3\text{He}^{++}$ на основе инжектора EBIS разрабатывается в BNL для будущего коллайдера EIC, и разрабатывается предложение источника $^3\text{He}^{++}$ для коллайдера NICA.

Автор приносит благодарность А. С. Белову и В. В. Фимушкину за предоставленные материалы к статье и комментарию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Alekseev I. et al.* Polarized Proton Collider at RHIC // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 499. P. 392.
2. *Kekelidze V.D.* NICA Project at JINR: Status and Prospects // J. Instrum. C. 2017. V. 12. P. 06012.
3. *Willeke F. et al.* Electron Ion Collider Conceptual Design Report. 2021.
4. *Zelenski A., Haerberli W., Makdisi Y., Nass A., Ritter J., Wise T., Zubets V.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 536. P. 248.
5. *Belov A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1987. V. 255. P. 442.
6. *Belov A.* // AIP Conf. Proc. 2008. V. 980. P. 209.
7. *Derenchuk V.P., Belov A.S.* // AIP Conf. Proc. 2003. V. 675. P. 887.
8. *Fimushkin V.V. et al.* DSPIN 2017 // J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 938. P. 012017.
9. *Fimushkin V. et al.* The Source of Polarized Ions and Low Energy Polarimeter for the Nuclotron Facility // Proc. of Sci. (SPIN2018). 2019. V. 346. P. 114.
10. *Zelenski A.* // Proc. of SPIN2000. AIP Conf. Proc. 2000. V. 570. P. 179.
11. *Zelenski A. et al.* The RHIC Polarized Source Upgrade // Proc. of SPIN2010. J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 295. P. 012147.
12. *Zelenski A., Kokhanovski S., Lobashev V.* // Nucl. Instr. Meth. A. 1986. V. 245. P. 223.
13. *Zelenski A. et al.* Precision, Absolute Proton Polarization Measurements at 200 MeV Beam Energy // Proc. of SPIN2010. J. Phys.: Conf. Ser. 2011. V. 295. P. 012132.
14. *Poblaguev A., Zelenski A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 976. P. 164261.
15. *Zelenski A., Alessi J.* Prospects on High Intensity Optically-Pumped Polarized H^- , D^- and ${}^3\text{He}^{++}$ Ions // ICFA Beam Dynamics Newslett. 2003. V. 30. P. 39.
16. *Alessi J. et al.* // Rev. Sci. Instr. 2010. V. 81. P. 02A509.
17. *Maxwell J., Zelenski A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2020. V. 959. P. 161892.
18. *Zelenski A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1055. P. 168494.