

ПРЕДЛОЖЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ИОНОВ ${}^3\text{He}^{++}$ С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ ДЛЯ КОЛЛАЙДЕРА NICA

А. Н. Зеленский^{a,1}, *В. В. Фимушкин*^b, *А. С. Белов*^c, *В. П. Овсянников*^c,
Ю. Н. Филатов^a, *Н. В. Дунин*^b, *К. А. Ившин*^b, *А. Ю. Рамздорф*^b,
А. Н. Соловьёв^b, *И. С. Юдин*^a

^a Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Долгопрудный, 141701, Россия

^b Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

^c Институт ядерных исследований РАН, Москва, 117312, Россия

^c Независимый эксперт, Дубна, Россия

Для получения пучка поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ с высокой интенсивностью предлагается инжектировать поляризованный (методом оптической накачки и обмена метастабильностью, МЕОР — Metastability Exchange Optical Pumping) газ ${}^3\text{He}$ в EBIS (Electron Beam Ion Source) для ионизации и накопления ионов ${}^3\text{He}^{++}$ (высокое магнитное поле $\sim 5,0$ Тл в источнике должно сохранять поляризацию при ионизации). В данной работе представлена схема источника для получения ионов ${}^3\text{He}^{++}$, конфигурация магнитного поля, электронная пушка, система фокусировки электронного пучка, инжекция газа в дрейфовую трубку (которая также работает как накопительная ячейка для увеличения эффективности ионизации), система криогенной очистки и хранения газа ${}^3\text{He}$, лазерная система для оптической накачки ${}^3\text{He}$. В этот источник можно будет также инжектировать другие газы через импульсный клапан в накопительную ячейку и получать многозарядные ионы, в том числе ионы Xe^{28+} . С добавлением внешней инжекции в EBIS однозарядного пучка твердых тяжелых ионов в источнике можно будет также получать пучки многозарядных ионов вплоть до Au^{33+} и Bi^{38+} с полным зарядом свыше 10 нКл/цикл.

A proposal for development of a high-intensity polarized source of ${}^3\text{He}^{++}$ ions is based on injection of ${}^3\text{He}$ gas polarized by the Metastability Exchange Optical Pumping (MEOP) technique into the Electron Beam Ion Source (EBIS) for ionization and accumulation of ${}^3\text{He}^{++}$ ions. A high magnetic field of ~ 5.0 T in the source should preserve the polarization during ionization process. This paper presents a scheme of the EBIS for ${}^3\text{He}^{++}$ ion production, magnetic field configuration, electron gun, electron beam focusing system, injection system to the source drift tube, which also works as a storage cell to increase ionization efficiency, the ${}^3\text{He}$ cryogenic gas purification and storage system. It will also be possible to inject other gases into this source by a pulse valve into the drift-tube (storage cell) and produce multicharged ions, including Xe^{28+} ions. With the addition of external injection of a single-charge solid heavy ion beam into the EBIS, this source can also produce multicharged ion beams up to Au^{33+} and Bi^{38+} with a full charge of more than 10 nC/cycle.

PACS: 29.20.–c; 29.20.D.–; 07.77.Ka; 29.25.Lg

¹E-mail: zelenskii.an@mipt.ru

Программа поляризационных исследований на коллайдере NICA (ОИЯИ) основана на ускорении и столкновениях поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергии до $\sqrt{S} = 27$ ГэВ. Также рассматривается возможность получения для экспериментов пучков поляризованных ядер ${}^3\text{He}^{++}$.

Ядерная поляризация в поляризованном пучке ${}^3\text{He}^{++}$ переносится в основном нейтронами, поэтому пучок поляризованных нейтронов высоких энергий может быть доступен для фундаментальных исследований столкновений с поляризованными протонами, дейтронами, пучками ${}^3\text{He}^{++}$ (и другими пучками тяжелых ионов), а также для экспериментов на внешних мишенях в нуклотроне (ОИЯИ). Предлагаемый способ получения пучков поляризованных ядер ${}^3\text{He}^{++}$ основан на уникальном опыте, накопленном в ОИЯИ по разработке методики EBIS [1] и в работах по получению высокой ядерной поляризации газа ${}^3\text{He}$ методом оптической накачки и обмена метастабильностью в сильном магнитном поле.

Предложение по разработке этого источника находится в стадии разработки в ОИЯИ для коллайдера NICA, а также в других лабораториях за рубежом.

СХЕМА ИСТОЧНИКА ПОЛЯРИЗОВАННЫХ ЯДЕР ${}^3\text{He}^{++}$

В концепции поляризованного источника ионов ${}^3\text{He}^{++}$ атомы ${}^3\text{He}$ поляризуются с помощью метода МЕОР в стеклянной ячейке под давлением 1–10 мбар в магнитном поле 5,0 Тл внутри соленоида EBIS, а затем вводятся в дрейфовую трубку EBIS для ионизации и накопления [2]. Высокая (90%) поляризация ядер ${}^3\text{He}$ была получена в сильном магнитном поле 3–5 Тл в МЕОР-процессе [3]. В EBIS ионы ${}^3\text{He}^{++}$ могут быть получены и накоплены в области ловушки EBIS эффективной длиной 100 см, общим зарядом около 10^{12} (для тока электронного пучка 10 А).

В настоящее время источник высокозарядных ионов «Крион-6Т» [1], работающий в режиме «электронной струны», является основным источником высокозарядных ионов в инжекционном ускорительном комплексе NICA. Использование в «Крион-6Т» криогенной откачки (холодной апертуры) и малый диаметр соленоида не позволяют разместить ${}^3\text{He}$ -ячейку внутри источника. Предлагается разработать новый источник (на основе прототипа BNL EBIS) с прямым током 5 А и рекуперацией тока электронного пучка. Магнитная компрессия электронного пучка (Magneto immersed electron gun MIEG) позволяет создать ионную ловушку для EBIS с емкостью 10^{12} элементарных зарядов.

Электронный пучок из электронной пушки, катод которой с радиусом r_c находится в относительно низком магнитном поле $B_c \sim 0,1$ Тл, вводится в нарастающее магнитное поле, $B_e = 5,0$ Тл, где сжимается до меньшего радиуса r_e . В предположении, что магнитный поток через сечение электронного пучка постоянен на всей длине, радиус пучка и плотность тока равны

$$r_e = r_c \sqrt{\frac{B_c}{B_e}}, \quad J_e = J_c \frac{B_e}{B_c},$$

где J_e и J_c — плотности тока на катоде и внутри соленоида. В таком источнике электронный пучок высокой интенсивности (5 А, 10 кэВ) инжектируется в магнитное поле соленоида 5,0 Тл. Электронный пучок радиально сжимается магнитным полем

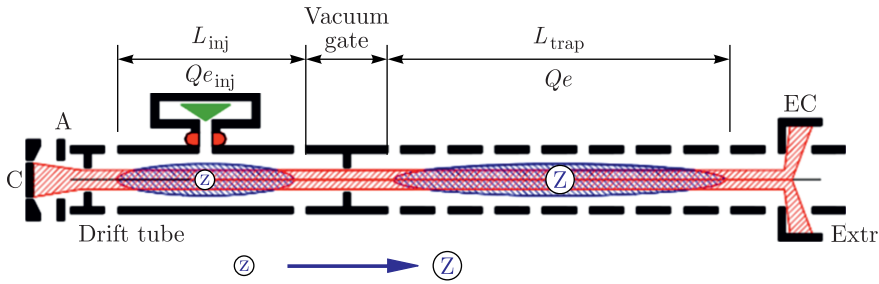


Рис. 1. Схема электронно-лучевого источника для получения поляризованных ионов ${}^3\text{He}^{++}$ и других многозарядных ионов. Фокусировка электронного пучка для создания ионной ловушки с емкостью — $5 \cdot 10^{11}$ элементарных зарядов

до диаметра около 1,5 мм в области ионизации (в результате достигается плотность тока 50–100 А/см²), а затем расширяется перед сбросом в электронный коллектор на другом конце соленоида.

В этой схеме необходимо обеспечить возможно более малую начальную расходимость электронного пучка, чтобы избежать отражения электронов в «магнитном зеркале»,

$$\frac{v_{\perp}}{v} < \frac{1}{\sqrt{r_{\text{mir}}}}, \quad r_{\text{mir}} = \frac{B_{\text{max}}}{B_{\text{min}}},$$

где v_{\perp}/v — отношение поперечных и продольных скоростей электронов.

Ионы радиально ограничены пространственным зарядом электронного пучка и продольно захвачены электростатическими барьерами на концах области ловушки. Ионы извлекаются за счет повышения потенциала ловушки и понижения барьера. Поляризованный газ ${}^3\text{He}$ инжектируется в дрейфовую трубку и последовательно ионизируется в ионы ${}^3\text{He}^{+}$ и далее в состояния ${}^3\text{He}^{++}$ (рис. 1).

Газовая ячейка ${}^3\text{He}$ устанавливается внутри соленоида, и импульсный газовый клапан используется для инъекции газа в дрейфовую трубку длиной 30 см и небольшим диаметром 12 мм, которая работает как «накопительная ячейка», увеличивая эффективную толщину ячейки ${}^3\text{He}$ и эффективность ионизации. Ионизация в EBIS происходит в магнитном поле 5,0 Тл, которое сохраняет поляризацию ядра ${}^3\text{He}$ в промежуточном однозарядном состоянии ${}^3\text{He}^{+}$. Количество ионов ограничено максимальным зарядом, который может быть накоплен в EBIS, и при токе электронного пучка — 5 А, 10 кэВ — составляет $2,0 \cdot 10^{11}$ ионов ${}^3\text{He}^{++}$.

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЯДЕР ${}^3\text{He}$

Для поляризации ядер ${}^3\text{He}$ в процессе МЕОР в газовой (стеклянной) ячейке ${}^3\text{He}$ при давлении 1,0–5,0 Торр используется слабый радиочастотный разряд, в котором электроны приобретают энергию 20–50 эВ, необходимую для возбуждения атомов ${}^3\text{He}$ в метастабильные состояния ${}^3\text{He}(2S)$. Метастабильные атомы в состоянии ${}^2{}^3S_1$ поляризуются в процессе оптической накачки с помощью лазера с круговой поляризацией с длиной волны 1083 нм (${}^2{}^3S_1 - {}^2{}^3P_0$). Высокая поляризация ядер ${}^3\text{He}$ до 90 %

была достигнута методом обмена метастабильностью в герметичной стеклянной ячейке в сильном магнитном поле 2,0–4,0 Тл. Любые примеси в газообразной ячейке гелия (водород, водяной пар и т. д.) снижают поляризацию ${}^3\text{He}$ вследствие гашения метастабильных в основное состояние.

Чистота газа в герметичной (запаянной) ячейке может быть достигнута за счет использования многоступенчатой процедуры очистки стеклянной ячейки, отжига, дегазации и сложной системы очистки газа. В источнике поляризованных ионов ячейка с оптической накачкой должна быть соединена с клапаном для инъекции газа в дрейфовую трубку и линией для откачки и заполнения газом. Для устранения примесей и поддержания необходимой чистоты газа в данной конфигурации «открытой ячейки» разработана система очистки и наполнения газом ${}^3\text{He}$ на основе крионасоса, который поглощает все газы, кроме гелия. Для этого в обычном криогенном насосе удалена половина криопанели (вторая часть требуется для поддержания изоляционного вакуума) и установлен дополнительный холодный цилиндр (прикрепленный к холодной головке крионасоса), заполненный гранулами углерода, применяемого для криоадсорберов. Цилиндр крионасоса соединен с вакуумной системой предварительной откачки и наполнения газом ${}^3\text{He}$ с помощью тонкого сильфонного шланга. Вся система подачи газа предварительно откачивается и прогревается турбомолекулярным насосом с анализом остаточного газа до уровня $5 \cdot 10^{-8}$ Торр. Далее, при охлаждении крионасоса до 10–20 К и отключении турбины, насос непрерывно поглощает и снижает парциальные давления водорода, воды, углеводородов и аргона до уровня ниже 10^{-8} Торр. Этот насос поглощает также довольно значительное количество газа ${}^3\text{He}$ (около 50 см^3). Поглощенный газ выделяется за счет нагрева сосуда с помощью встроенного нагревателя. Это обеспечивает хранение и подачу газа для работы ${}^3\text{He}$ -cell при оптимальном для оптической накачки давлении $\sim 3\text{--}5$ Торр. Давление поддерживается системой обратной связи нагревателя по давлению газа, измеряемому баратроном.

Стеклянная ячейка ${}^3\text{He}$ с оптической накачкой прикреплена к системе заправки газом с помощью нержавеющей трубки длиной 200 см. Ячейка и система наполнения были смонтированы на подвижной опоре и вставлены внутрь сверхпроводящего соленоида. Для предотвращения деполяризации атомов ${}^3\text{He}$ при прохождении через градиентное поле соленоида необходимо исключить диффузию поляризованного газа из ячейки в процессе оптической накачки. Это может быть сделано при установке. Для дополнительного запорного клапана вблизи ячейки в области однородного магнитного поля разработан дистанционно управляемый (пневматический) клапан с сильфоном. Чтобы открыть клапан, его подключают к вакуумному насосу и закрывают под действием атмосферного давления. Муфта клапана с ячейкой ${}^3\text{He}$ спроектирована таким образом, чтобы свести к минимуму поверхность контакта с уплотнительными кольцами из алюминия и силиконовой уплотнительной прокладкой.

В системе подачи газа ${}^3\text{He}$ должны использоваться полностью металлические клапаны, безмасляный турбомолекулярный насос, анализатор остаточных газов (RGA). После интенсивного обжига и откачки криомодуль охлаждается, и система заполняется примерно стандартными 50 см^3 газа ${}^3\text{He}$, который сначала поглощается крионасосом, а затем высвобождается путем нагрева сосуда примерно до 20–25 К, для создания давления газа 3–5 Торр в ячейке и коллекторе подачи газа. RF-разряд в ${}^3\text{He}$ -ячейке индуцируется индуктивной связью с катушкой на 100 витков. Эта индуктивная связь работает лучше, чем емкостная связь для ячейки в сильном магнитном поле.

Индуктивная связь обеспечивает более равномерное распределение плотности плазмы по объему ячейки (в отличие от емкостной связи, где разряд в основном индуцируется вблизи стенок клетки). Для индуцирования разряда используется задающий генератор и широкополосный ВЧ-усилитель на 60 дБ. Частота РЧ-сигнала настраивается для наилучшего согласования с импедансом катушки. Область рабочих частот для разряда ~ 40 МГц. Чистота He-газа в РЧ-индуцированном разряде в элементе контролируется измерениями относительной яркости водородной линии Бальмера-альфа на длине волны 656 нм и смежной спектральной линии ^3He на длине волны 668 нм. При криооткачке основной остаточной примесью является водород от остаточного равновесного давления газа в крионасосе, или диссоциации воды ВЧ-разрядом в ячейке. Примесь водорода хорошо контролируется оптическим спектрометром.

ПОЛУЧЕНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ

В источнике можно будет также инжектировать другие газы через импульсный клапан в накопительную ячейку и получать многозарядные ионы, например Xe^{28+} . Оценки выхода ионов ксенона приведены на рис. 2, а.

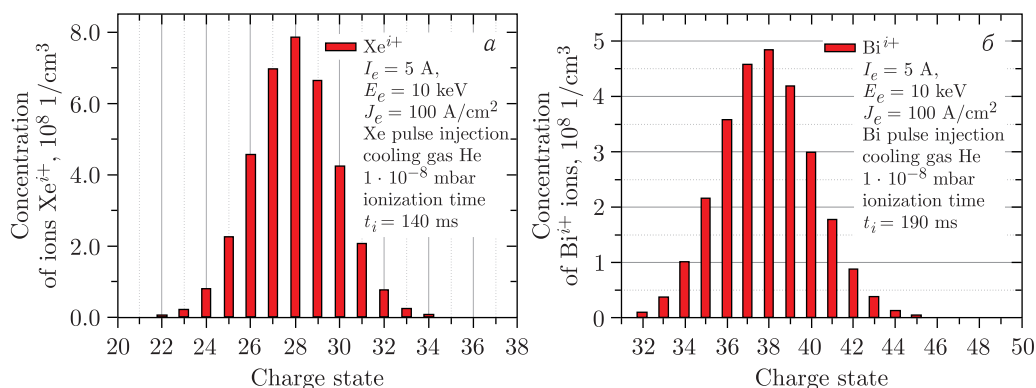


Рис. 2. Расчетный спектр ионов ксенона (а) и ионов висмута (б)

С добавлением внешней инжекции в EBIS однозарядного пучка твердотельных тяжелых ионов в источнике можно будет также получать пучки многозарядных ионов вплоть до Au^{33+} и Bi^{38+} с полным зарядом свыше 10 нКл/цикл (рис. 2, б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поляризация ядер ^3He в сильном магнитном поле методом МЕОР позволяет реализовать схему источника ионов $^2\text{He}^{++}$ при прямой инжекции поляризованного газа ^3He в дрейфовую трубку EBIS. В результате процессов последовательной ионизации и накопления ионов можно получить полный заряд пучка $\sim 5 \cdot 10^{11}$ для ускорения в комплексе NICA. Для эффективной работы таких ионных источников необходима разработка электронного коллектора с высокой степенью рекуперации энергии.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Московского физико-технического института (национальный исследовательский универ-

ситет) и Объединенного института ядерных исследований. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рассадов Д. Н. и др.* // Письма в ЭЧАЯ. 2024. Т. 21, № 3(254). С. 281–289.
2. *Zelenski A., Alessi J.* // ICFA Beam Dynamics Newslett. 2003. No. 30. P. 39.
3. *Zelenski A. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2023. V. 1055. P. 168494; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168494>.

Получено 4 ноября 2025 г.