

P9-2003-57

М. Лепорис, А. А. Ефремов, С. Л. Богомолов,
Г. Г. Гульбежян

**ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ МЕТОДА $1^+ \rightarrow n^+$
(ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРИМЕНЕНИЯ
В ПРОЕКТЕ DRIBs)**

1. Описание проекта DRIBs

В соответствии с планом развития ЛЯР ОИЯИ, получение и исследование экзотических ядер является одним из главных научных направлений. Проект DRIBs (Dubna Radioactive Ion Beams) предполагает использование ускорителя первичного ионного или электронного пучка для генерации радиоактивных ядер, транспортируемых затем непосредственно в центральную область циклотрона, где происходит их дальнейшее ускорение. Эти функции могут быть выполнены двумя действующими ускорителями типа U-400 и компактным ускорителем электронов (микротрон МТ-25). Концептуальная схема проекта показана на рис.1.

Использование вторичных пучков радиоактивных ядер значительно расширяет возможности исследования свойств атомных ядер и изучения ядерных реакций. Основные области применения вторичных пучков:

- 1) Исследование свойств атомных ядер, расположенных вдали от острова стабильности.
- 2) Изучение особенностей динамики ядерных реакций для вышеупомянутых ядер.
- 3) Синтез и изучение свойств новых элементов и изотопов.

Первая стадия проекта (DRIBs I) предполагает ускорение легких однозарядных радиоактивных ионов в циклотроне U-400. Первичный пучок ионов, ускоренный циклотроном U-400M, образует в мишени легкие вторичные атомы (${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{11}\text{Be}$ и др.). В качестве ионизатора используется ионный источник ЭЦР-2.45 ГГц [1, 2], который предназначен для получения однозарядных ионов. После ионизации радиоактивных атомов пучок ионов транспортируется в циклотрон U-400 и затем, после ускорения, на экспериментальную установку. Для ускорения более тяжелых вторичных ядер необходимо использование дополнительного ионного источника (так называемого "charge breeder") для трансформации однозарядных ионов в ионы с требуемым для ускорения зарядом.

Вторая стадия проекта DRIBs предполагает получение пучков нейтроноизбыточных изотопов, возникающих в результате деления ядер урана или тория.

Concept of the RIB Accelerator Complex of the FLNR (JINR)

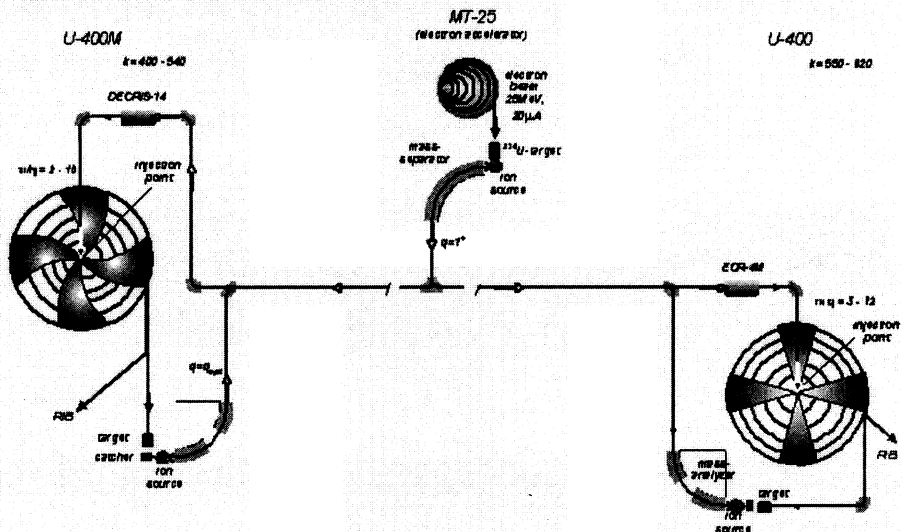


Рис. 1. Концептуальная схема проекта DRIBs

Отличие этого варианта состоит в использовании компактного электронного ускорителя MT-25. В данном случае гамма-кванты, образующиеся в результате торможения пучка электронов в мишени, вызывают фотоделение урана (или тория). Из нагретой урановой мишени осколки деления в результате термодиффузии переходят в горячую камеру источника однозарядных ионов. Извлекаемый пучок ионов 1^+ после масс-сепарации инжектируется в ионный источник "charge breeder", где пучок однозарядных ионов тормозится в плазменной камере и происходит ионизация из состояния 1^+ в ионы с требуемым для ускорения зарядом n^+ . Полученные многозарядные ионы инжектируются в циклотрон U-400, и ускоренный пучок транспортируется на экспериментальную установку.

Реализация проекта DRIBs предполагает модернизацию ионных источников, циклотронов и создание новых каналов для транспортировки пучка. Для ионизации и получения пучков ионов осколков деления газообразных элементов (изотопы Kг и Xe), металлических элементов (изотопы Rb и Cs), а также

элементов теллуровой группы, необходимо использовать разные типы ионных источников. Например, ионизация газообразных элементов может эффективно осуществляться в ионном источнике ЭЦР-типа со сравнительно низкой микроволновой частотой (2.45 ГГц). Для ионизации щелочных элементов подходит источник с поверхностной ионизацией. Для получения ионов твердых веществ возможно использовать ионный источник дугового типа с нагреваемой камерой [3, 7].

Однако в любом случае при получении тяжелых ионов с относительно большой атомной массой требуется повышение их заряда для ускорения в циклотроне. Основным отличием источника “charge breeder” от традиционных ЭЦР-источников является то, что ввод рабочего вещества в него осуществляется в виде пучка однозарядных ионов, а не в виде нейтральных атомов или молекул. Присутствие достаточно сильных магнитных полей в области инжекции требует создания специальной системы ввода пучка ионов в рабочую зону источника. Данная система должна обеспечивать эффективный “захват” инжектируемых ионов в область ионизации и максимально эффективное осуществление процесса $1^+ \rightarrow n^+$.

2. Принципы метода $1^+ \rightarrow n^+$

2.1. Описание метода $1^+ \rightarrow n^+$

Для получения ускоренного пучка радиоактивных ионов необходимо обеспечить ионизацию вторичных атомов до требуемого зарядового состояния. Эта задача может быть решена двумя способами. В первом случае вторичные атомы инжектируются непосредственно в источник многозарядных ионов [4]. Недостатком данного метода является ограниченное время жизни такой относительно дорогой установки как источник многозарядных ионов из-за радиационного повреждения используемых в нем постоянных магнитов. Другим методом является использование относительно дешевого источника однозарядных ионов с последующей их инжекцией в источник многозарядных ионов, который может находиться вдали от радиационных полей, создаваемых производящей мишенью. Этот так называемый метод трансформации $1^+ \rightarrow n^+$

был предложен Geller [5] и впервые реализован в ISN-SSI (Гренобль, Франция). Процесс трансформации предполагает выполнение трех основных требований:

- Эффективность процесса трансформации $1^+ \rightarrow n^+$ должна быть достаточно высокой из-за ограниченного количества вторичных атомов.
- Процесс трансформации должен быть применим к ионам различных веществ, как газообразных, так и твердых.
- Время всех процессов должно быть коротким по сравнению с временем полураспада радиоактивных ионов.

Для обеспечения эффективности всего процесса необходимо обеспечить эффективный захват инжектируемых однозарядных ионов ЭЦР-плазмой. Теоретически было показано [6, 9], что наиболее эффективный захват осуществляется, когда скорость инжектируемых ионов равна скорости ионов в плазме, т.е. необходимо торможение инжектируемого пучка до тепловых скоростей. Реализацию замедления можно осуществлять по крайней мере двумя способами.

Первый основан на использовании сборника (catcher), расположенного непосредственно в камере источника, для торможения пучка однозарядных ионов. При нагреве сборника в результате термодиффузии атомы испаряются и диффундируют в камеру ионного источника. Как уже было упомянуто выше, для радиоактивных ионов необходимо иметь достаточно короткое время инжекции и испарения, что достаточно трудно реализовать в данной конструкции. Кроме этого, испарение осуществляется изотропно, возможно попадание атомов на холодную стенку разрядной камеры, что также увеличивает время попадания вторичных атомов в плазму и приводит к значительному снижению эффективности процесса [7, 8].

Другой метод состоит в электростатическом замедлении пучка однозарядных ионов, инжектируемых в ЭЦР-источник. Основная идея этого метода, называемого “плазменный захват”, состоит в том, что ионный пучок 1^+ инжектируется в источник многозарядных ионов “charge breeder” с энергией $e(V+\Delta V)$, где V - потенциал источника “charge breeder” и ΔV - потенциал плазмы источника многозарядных ионов. В этом случае пучок однозарядных ионов имеет

энергию, достаточную для преодоления плазменного потенциала ϕ , и эффективно захватывается плазмой, не касаясь стенок разрядной камеры. В этом случае время всего процесса определяется временем ионизации до требуемого состояния.

Замедление частиц, поступающих в плазму, было изучено теоретически различными авторами [6, 9]. Понижение энергии происходит за счет передачи импульса однозарядного иона при столкновении с частицами плазмы (электронами и ионами), скорости которых соответственно V_{therm}^- и V_{therm}^+ . Когда отношение $V_{incident}^+/V_{therm}^+ \leq 10$ ($V_{incident}^+$ - скорость инжектируемых ионов), механизм ион-ионных столкновений является доминантным. Для больших значений отношения $V_{incident}^+/V_{therm}^+$ эффективность замедления $V_{incident}^+/V_{therm}^-$ частиц быстро снижается. Когда отношение достигает единицы, столкновения между ионами и электронами плазмы также способны поглотить энергию иона. Однако в этом случае средняя длина пробега λ_{i-e} между двумя электрон-ионными столкновениями очень велика и замедление возможно только в астрофизической плазме и практически неэффективно для лабораторной плазмы, имеющей следующие параметры: ($l \sim 30$ см, $n_e \sim 10^{12}$ см $^{-3}$, $T_e > 100$ эВ, $T_i \sim 2$ эВ). Следовательно, в ЭЦР-плазме может быть эффективно осуществлено торможение инжектируемых ионов за счет ион-ионных столкновений, когда $V_{incident}^+$ соответствует энергии порядка 10 эВ и ионы плазмы имеют энергию порядка единиц эВ. Замедление происходит на нескольких длинах свободного пробега λ_{i-i} (на расстояниях приблизительно 10 см). При этих условиях более энергичные ионы после нескольких ион-ионных столкновений термализуются и оказываются захваченными плазмой ионного источника. Математическое выражение для этого типа замедления дано выражением Delcroix и Bers [9]

$$\frac{\Delta V_{incident}^+}{\Delta t} = -\frac{n_e}{2\pi\epsilon_0^2} \left(\frac{e^2}{m_e V_{therm}^-} \right)^2 \ln \Lambda B(V_{incident}^+), \quad (1)$$

где n_e , m_e , e и V_{therm}^- представляют плотность электронов в плазме, массу и заряд электрона, скорость "тепловых" электронов, $\ln \Lambda \sim 10$ и $B(V_{incident}^+)$ - функция уменьшения энергии иона при столкновении (рис.2).

Эффективность трансформации частицы из зарядового состояния 1^+ в n^+ определяется выражением

$$\eta = \frac{1}{n} \frac{I_{n^+}}{I_{1^+}}, \quad (2)$$

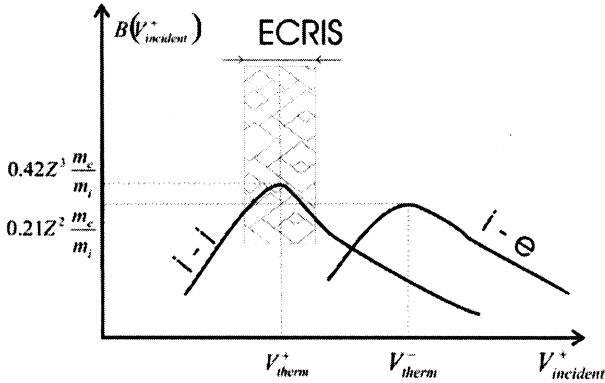


Рис. 2. Функция уменьшения энергии иона при столкновениях в плазме

где I_{1+} и I_{n+} – интенсивность пучка однозарядных и многозарядных ионов, p – заряд иона. Если известна эффективность трансформации всех зарядовых состояний, можно оценить глобальную эффективность – “breeding efficiency”, которая включает в себя эффективность плазменного захвата, ионизации и экстракции, как

$$\eta_X = \sum_{i=1}^N \eta_i. \quad (3)$$

Инжекция пучка однозарядных ионов в “charge breeder” может быть выполнена двумя различными экспериментальными способами:

- ▷ В первом случае пучок однозарядных ионов вводится в ионный источник со стороны экстракции. Этот метод называется “retro injection”, или “backward injection”.
- ▷ Во втором случае пучок вводится со стороны источника, противоположной экстракционному отверстию. Этот метод называется “forward injection”.

2.2. Метод “backward injection”

Концептуальная схема данной экспериментальной конфигурации показана на рис.3. Пучок однозарядных ионов (в данном случае ионов Rb) извлекался

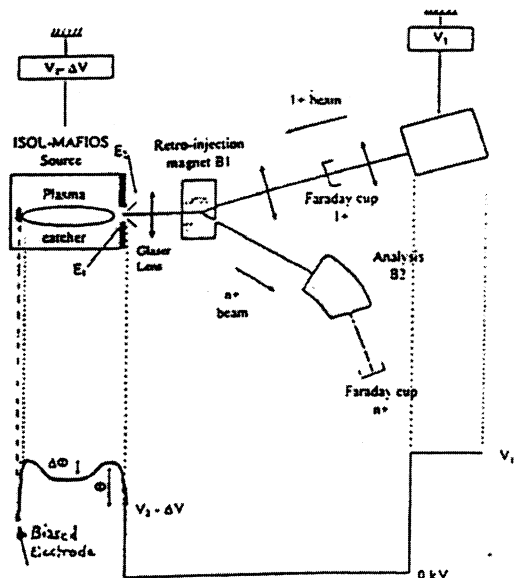


Рис. 3. Концептуальная схема метода "backward injection"

из ионного источника и после фокусировки и измерения интенсивности транспортировался в источник многозарядных ионов. Ввод производился через так называемый "retro injection" магнит. Замедление пучка происходило между извлекающим электродом (пулером) и плазменным электродом с потенциалом V . Ионы захватывались ЭЦР-плазмой, где происходила их дальнейшая ионизация. Извлеченные многозарядные ионы, сфокусированные магнитной линзой, проходили через "retro injection" магнит, анализировались и попадали на цилиндр Фарадея, где измерялась их интенсивность.

Как видно из рис.4, интенсивность извлекаемого пучка (Rb^{9+}) зависит от разности потенциалов ΔV , приложенной между ионными источниками. Для значений ΔV меньше чем 7 эВ, интенсивность пучка Rb^{9+} почти нулевая, т.к. энергия ионов Rb^{1+} недостаточна для преодоления потенциала плазмы в источнике многозарядных ионов. Если напряжение выше 10 эВ, то ионы Rb^{1+} имеют слишком высокую энергию для эффективного захвата плазмой.

В связи с тем, что источником однозарядных ионов являлся источник с по-

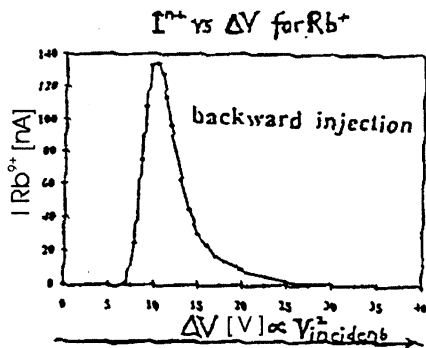


Рис. 4. Интенсивность пучка ионов Rb^{9+} как функция напряжения ΔV

верхностной ионизацией, имеющий разброс энергии извлекаемых ионов ≤ 0.5 эВ, можно заключить, что кривая на рис.4 отображает максимальный энергетический разброс ионов, захватываемых плазмой. При увеличении энергетического разброса происходит уширение кривой при снижении максимальной интенсивности.

Достигнутая эффективность в данном методе сравнима с методом “forward injection” (описанном в следующем разделе). Однако следует отметить, что сама экспериментальная установка достаточно сложна. Конструкция “retro injection” магнита является уникальной для каждого вводимого иона, имеются проблемы с фокусировкой пучка. Для анализа спектра многозарядных ионов требуется дополнительный анализирующий магнит.

2.3. Метод “forward injection”

Ввод пучка со стороны инжекции выглядит более универсальным с точки зрения технической реализации. Главное преимущество состоит в том, что инжекция пучка однозарядных ионов и экстракция многозарядных ионов в этой конструкции независимы. Блок-схема этой конфигурации показана на рис.5. После экстракции из источника пучок однозарядных ионов фокусируется электростатическими линзами и инжектируется через заземленную трубку в источник n^+ . За счет разницы потенциалов между источником однозаряд-

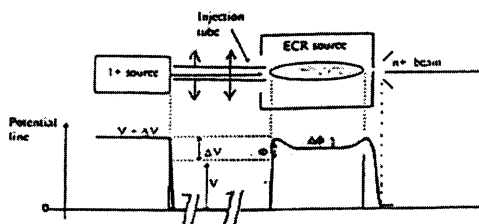


Рис. 5. Концептуальная схема метода “forward injection”

ных ионов и источником p^+ пучок тормозится, ионы захватываются плазмой и ионизируются. Извлекаемый пучок многозарядных ионов анализируется, и измеряется его интенсивность.

При вводе пучка 1^+ особую роль играет энергия $e \times \Delta V$. Экспериментально было показано, что ионы газов могут быть инжектированы с положительным или отрицательным потенциалом ΔV в относительно большом диапазоне (0–500 В). Это в значительной степени отличается от результатов, полученных с ионами Rb, для которых наблюдалась более острая зависимость между энергией ионов и эффективностью захвата. Объяснением этого является то, что ионы газов, нейтрализуясь на различных частях установки, имеют возможность попадать в плазму в виде нейтральных атомов. При отрицательной разности потенциалов пучок однозарядных ионов тормозится около выхода из заземленной трубки. Ионы нейтрализуются на стенках трубки и диффундируют в ЭЦР-плазму в виде нейтральных атомов. Обратным случаем является приложение большого положительного потенциала. Тогда ионы 1^+ имеют слишком высокую энергию для прямого захвата плазмой. В данном случае они проходят область плазмы и попадают на стенки плазменной камеры. При столкновении со стенкой они нейтрализуются, после чего могут быть захвачены плазмой.

Как и в варианте классического ЭЦР-источника, в источнике “charge breeder” возможно использование bias-электрода для повышения интенсивности извлекаемого пучка. В методе “backward injection” подача отрицательного потенциала на bias-электрод вносит значительный вклад в увеличении интенсивности извлекаемого пучка многозарядных ионов и оптимальная

величина напряжения находится в диапазоне $-20 \text{ В} < V_{bias} < -500 \text{ В}$. В методе “forward injection” трубка ввода, которая выполняет роль bias-электрода, находится на потенциале земли. Таким образом, в данном случае эта подстройка отсутствует. Однако в качестве существенных преимуществ данного метода следует отметить следующее:

- отсутствие проблем с транспортировкой и анализом извлеченного пучка ионов;
- интенсивную эмиссию вторичных электронов при столкновении ионов с заземленной трубкой, компенсирующей отсутствие bias-электрода с подстройкой потенциала.

Ниже приведено несколько случаев практической реализации метода $1^+ \rightarrow n^+$.

3. Инжекция в источник MINIMAFIOS

Ионный источник MINIMAFIOS-10GHz - это классический двухступенчатый ЭЦР-источник с “открытой” магнитной структурой, построенный в начале 80-х годов [9, 10, 11, 12]. Для реализации метода было сделано несколько конструктивных изменений в первой ступени источника, позволяющих установить трубку ввода ионов 1^+ , при этом основная ступень и плазменная камера остались неизменными ($L \sim 30 \text{ см}$ и $\phi = 6.8 \text{ см}$). Схема установки показана на

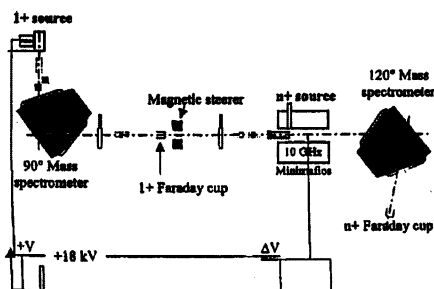


Рис. 6. Блок – схема экспериментальной установки

рис.6. Эксперименты были проведены с несколькими элементами разных типов: благородными газами, щелочными элементами, другими ионами металлов и неметаллов, с использованием различных типов ионных источников 1^+ (ЭЦР, источника с поверхностной ионизацией, источника дугового типа с нагреваемой камерой). Полученные результаты представлены в табл.1.

Таблица 1. Эффективность трансформации $1^+ \rightarrow n^+$ для разных элементов

Элемент	$1^+ \rightarrow n^+$	η	η_X
^{84}Kr	$Kr^{1+} \rightarrow Kr^{11+}$	9%	51%
^{40}Ar	$Ar^{1+} \rightarrow Ar^{8+}$	9%	40%
^{89}Rb	$Rb^{1+} \rightarrow Rb^{15+}$	5.5%	35%
^{208}Pb	$Pb^{1+} \rightarrow Pb^{22+}$	5.1%	50%
^{64}Zn	$Zn^{1+} \rightarrow Zn^{9+}$	3.5%	23%
^{52}Cr	$Cr^{1+} \rightarrow Cr^{11+}$	3.5%	21%
^{32}S	$S^{1+} \rightarrow S^{7+}$	2.5%	11%

Для ионов газообразных элементов была получена довольно высокая эффективность. Например, для аргона глобальная эффективность η_X оказалась равна приблизительно 40%, что достаточно близко к величине $\eta_X = 43\%$, полученной при подаче аргона в виде нейтрального газа. Как уже было сказано выше, объяснением этого является возврат нейтральных атомов в плазму после электростатического замедления и столкновения со стенками камеры. В случае инжекции ионов щелочных элементов и металлов при их столкновении со стенками камеры они окончательно теряются. Поэтому при вводе однозарядных ионов твердых веществ накладывается строгое условие, чтобы при инжекции пучка не было касания со стенками камеры и ионы были сразу захвачены плазмой. В связи с этим процесс трансформации $1^+ \rightarrow n^+$ твердых веществ обычно имеет эффективность η_X меньше, чем для газов.

Характеристики инжектируемого пучка (эмиттанс) имеют значительное влияние на эффективность процесса плазменного захвата и, следовательно, на эффективность всего процесса. Характер кривой так называемого ΔV – спектра (зависимость эффективности от потенциала ΔV), как уже отмечалось, в значительной степени определяет энергетический разброс инжектируемого

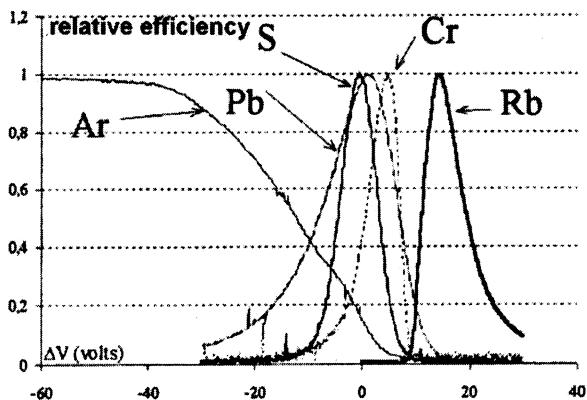


Рис. 7. Относительная эффективность процесса $1^+ \rightarrow n^+$ в зависимости от ΔV

пучка. Относительная эффективность для разных элементов при изменении ΔV показана на рис.7. Следует отметить, что для ионов твердых веществ имеется свой оптимум, тогда как для аргона распределение достаточно широкое.

Дальнейшие эксперименты были посвящены изучению влияния давления газа в ионном источнике на величину эффективности трансформации. Измерения проводились при двух, отличающихся приблизительно в два раза давлениях ($8 \times 10^{-5} - 1.6 \times 10^{-4}$). Измерение давления производилось в месте ввода рабочего вещества, т.к. прямое измерение давления в камере источника практически невозможно. Было обнаружено (рис. 8) уширение кривой зависимости эффективности от ΔV при более высоком давлении и, как результат, уменьшение глобальной эффективности. При увеличении давления также увеличивался и энергетический разброс извлекаемых ионов. Исходя из этого можно заключить, что ширина кривой в конечном итоге является фундаментальным параметром, измеряя который можно оптимизировать эффективность работы многозарядных ионов.

Для изучения влияния эмиттанса пучка на эффективность трансформации были проведены эксперименты с использованием диафрагмы $\phi=8$ мм, установленной в канале транспортировки пучка 1^+ и ограничивающей эмиттанс вводимого пучка. При инжекции 100 нА Cr^{1+} без диафрагмы, для $\text{Cr}^{1+} \rightarrow \text{Cr}^{12+}$ была получена эффективность $\eta = 1.5\%$. При использования диафраг-

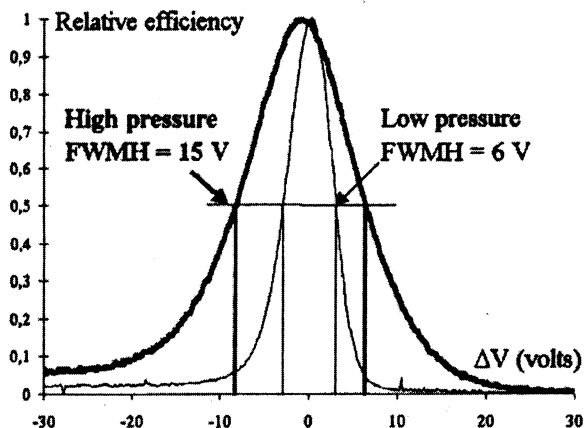


Рис. 8. Изменение относительной эффективности при увеличении FWHM (full width at half maximum) давлением газа

мы эффективность увеличилась до величины $\eta = 2.9\%$.

4. Инжекция в источник CAPRICE

В следующей серии экспериментов в качестве “charge breeder” был использован ионный источник CAPRICE (10 ГГц), который работает как инжектор многозарядных ионов в циклотрон INS/SARA (Гренобль, Франция) [12]. По сравнению с MINIMAFIOS, источник CAPRICE представляет из себя следующее поколение ЭЦР-источников с “закрытой” магнитной структурой. Из-за ограниченности свободного пространства для установки системы ввода однозарядных ионов снижение эффективности инжекции было предсказуемо.

Концептуальная схема экспериментальной установки показана на рис.9. В данной конфигурации система инжекции однозарядных ионов располагается внутри центрального проводника коаксиального ввода СВЧ-мощности, что ограничивает ее внешний диаметр. Для электрической изоляции системы инжекции использовалась сборка из трех коаксиальных труб, как показано на рис.10. Внутренний размер плазменной камеры в месте ввода остался неизменным ($\varnothing 26$ мм), тогда как внутренний диаметр центрального проводника

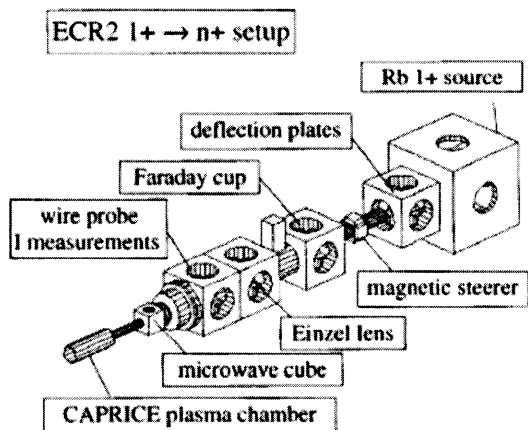


Рис. 9. Концептуальная схема экспериментальной установки

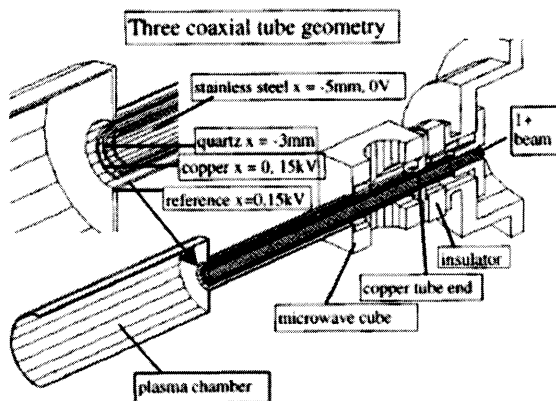


Рис. 10. Конфигурация ввода пучка

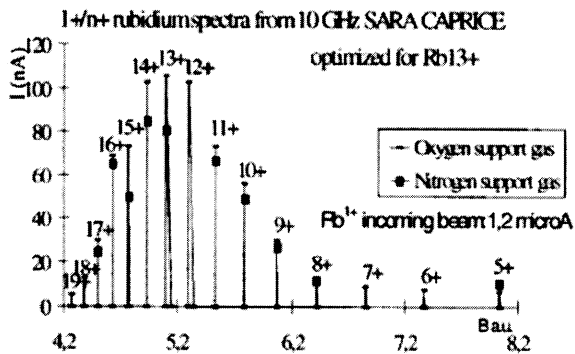


Рис. 11. Полученный спектр ионов рубидия. В качестве вспомогательного газа использовался кислород и азот

коаксиала был увеличен до $\varnothing 18$ мм. Внутренняя заземленная стальная трубка диаметра $\varnothing 12$ мм изолировалась трубкой из кварца.

В качестве источника однозарядных ионов был использован источник дугового типа со специальной пятиэлектродной системой экстракции, производящий пучок однозарядных ионов Rb^{1+} с эмиттансом $5 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ и низким энергетическим разбросом. Оптимизация прохождения инжектируемых ионов достигалась путем минимизации тока на внутренней стальной трубке. Соответствующие взаимные продольные положения элементов подбирались таким образом, чтобы гарантировать:

- отсутствие пробоев между внутренней и внешней трубкой канала инжекции;
- оптимальный ввод СВЧ мощности в плазменную камеру;
- эффективное замедление пучка однозарядных ионов.

Расчеты траекторий движения однозарядных ионов в области торможения (последние 100 эВ) показали их достаточно большой пространственный разброс даже для моноэнергетического параллельного пучка, что было подтверждено экспериментально измерениями токов внутри плазменной камеры. В

связи с этим система ввода располагалась как можно ближе к границе плазмы для лучшего захвата ионов.

В результате проведенных экспериментов получена эффективность трансформации: $\eta_{Rb^{1+} \rightarrow Rb^{13+}} = 0.7\%$ при токе $I_{Rb^{1+}} = 1.5$ мкА. Спектр ионов показан на рис.11.

5. Инжекция в источник PHOENIX

Приведенные выше результаты экспериментов с источниками MINIMAFIOS и CAPRICE показали принципиальную возможность реализации метода $1^+ \rightarrow n^+$. Однако полученные результаты были значительно ограничены возможностями достаточно старого ионного источника MINIMAFIOS, построенного около 20 лет назад, и габаритами системы ввода в случае источника CAPRICE. В связи с этим был разработан новый источник PHOENIX [11, 13, 14] (рис.12), сочетающий в себе возможности современных ЭЦР-источников и предназначенный специально для использования как charge breeder.

Конструкция источника имеет несколько особенностей: электрическая изоляция позволяет поднять напряжение экстракции до 60 кВ, уровень магнитного поля гексаполя, увеличенный до 1.1 Тл, возможность использования СВЧ-частот от 10 до 18 ГГц, возможность изменения профиля магнитного поля (рис.13). Все это дает широкие возможности для экспериментального исследования метода $1^+ \rightarrow n^+$.

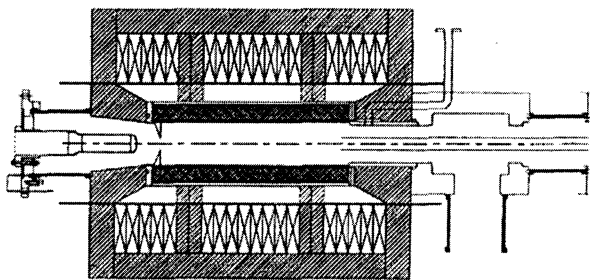


Рис. 12. Ионный источник PHOENIX

Таблица 2. Эффективность трансформации $1^+ \rightarrow n^+$ для разных элементов

Элемент	Интенсивность пучка однозарядных ионов [нА]	Заряд	Эффективность [%]
^{20}Ne	1000	4	7.5
^{23}Na	660	6	1.3
^{39}K	280	6	6.5
^{64}Zn	42	10	2.8
^{69}Ga	460	11	2
^{85}Rb	90	13	5
^{88}Sr	470	14	3.7
^{90}Y	178	14	3.3
^{109}Ag	175	17	3
^{115}In	130	18	3.3
^{120}Sn	167	19	4.1
^{208}Pb	700 (2^+)	25	6.8

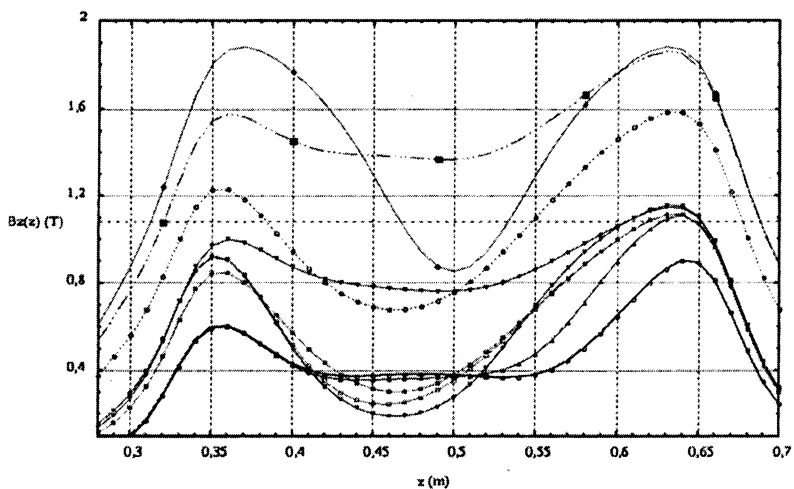


Рис. 13. Аксиальное поле ионного источника PHOENIX

По результатам многочисленных тестовых экспериментов с источником РНОENIX можно сделать вывод (табл.2), что за счет оптимизации конструкции и параметров ионного источника удалось значительно улучшить полученные ранее результаты. Следует отметить, что значения эффективности трансформации в требуемый заряд и значения “глобальной” эффективности приближаются к соответствующим величинам для “классического” варианта источника с подачей рабочего вещества в виде нейтралов. При работе с ионами металлов массой $A \geq 40$ а.е.м. достигается $\eta_m \approx 6\%$ и $\eta_x \approx 40\%$.

6. Выводы

- 1) Эксперименты в конфигурациях “backward injection” и “forward injection” ввода пучка однозарядных ионов в ионный источник ЭЦР-типа показали принципиальную возможность реализации $1^+ \rightarrow n^+$ метода. Из-за технологической простоты только конфигурация “forward injection” кажется перспективной для реализации. В качестве источника однозарядных ионов могут быть использованы источники различных типов: ЭЦР-ионный источник (2.45 ГГц), источник дугового типа, источник с поверхностной ионизацией и другие, обладающие подходящим для этой цели эмиттансом.
- 2) Результаты, полученные на MINIMAFIOS, были значительно ограничены конструкцией достаточно старого ионного источника. Главными недостатками являлись низкий уровень аксиального магнитного поля, низкая микроволновая частота. Обеспечивая достаточно высокий уровень захвата инжектируемых ионов, процесс трансформации $1^+ \rightarrow n^+$ был ограничен возможностями самого ионного источника.
- 3) При использовании компактного источника CAPRICE эти недостатки были частично устранены, но полученная эффективность по сравнению с результатами, достигнутыми с источником MINIMAFIOS, была приблизительно в 10 раз хуже из-за несовершенной системы ввода пучка.
- 4) Источник РНОENIX был разработан специально для работы в системе

$1^+ \rightarrow n^+$. Конструкция источника, позволяющая установить систему инжекции первичного пучка оптимальной конфигурации, дающая возможность выбора оптимального профиля магнитного поля для повышения эффективности захвата и трансформации однозарядных ионов в многозарядные, обеспечила значительное повышение эффективности процесса в целом. Проведенные эксперименты показали, что “плазменный захват” обеспечивает эффективность ионизации, сравнимую по величине с традиционной системой ввода вещества в виде нейтральных атомов. При этом время выхода (release time) иона из источника определяется только временем, затрачиваемым на ионизацию до требуемого зарядового состояния, что является определяющим при получении ионных пучков короткоживущих изотопов.

- 5) Характер кривой так называемого ΔV - спектра (зависимость эффективности от потенциала ΔV) в значительной степени определяет энергетический разброс инжектируемого пучка. При инжекции ионов газов зависимость эффективности от ΔV достаточно слабая, однако при инжекции ионов твердых веществ кривая носит резонансный характер. Можно заключить, что ширина кривой в конечном итоге является фундаментальным параметром, изменяя который можно оптимизировать эффективность наработки многозарядных ионов.
- 6) Эффективность процесса трансформации $1^+ \rightarrow n^+$ и энергетический разброс извлекаемого пучка многозарядных ионов зависят от вакуумных условий в плазменной камере ионного источника, т.е. необходимо получение соответствующего остаточного вакуума и тонкая регулировка подачи вспомогательного газа.
- 7) Эффективность захвата однозарядных ионов зависит от профиля кривой распределения аксиального магнитного поля.
- 8) Эффективность захвата и трансформации зависит от рабочей частоты ионного источника. Для источника PHOENIX при переходе от 10 ГГц на 14 ГГц получено увеличение эффективности трансформации в $1.5 \div 2$ раза для ионов твердых веществ.

Таким образом, для успешной реализации проекта по созданию системы $1^+ \rightarrow n^+$ для второй фазы DRIBs необходима разработка специального ионного источника, который с одной стороны, обеспечивает получение ионов с требуемым зарядом n^+ , а с другой стороны, имеет возможность для установки специальной системы торможения вводимого пучка и возможность трансформации профиля аксиального магнитного поля с целью обеспечения наибольшей эффективности всего процесса.

Список литературы

- [1] Oganessian Yu.Ts., Proc of the Int. Conf. "NUCLEAR SHELLS - 50 YEARS", Dubna, 1999, World Scientific (2000), p.61
- [2] Efremov A. et.al., *Cyclotrons and Their Application 2001*, Michigan, USA, 2001, p.268
- [3] R.Kirchner, *Rev. Sci. Instrum.* **67**, 1996, p.928
- [4] R.Leroy, Proceeding of TWIST II, Ganil 0003, Caen, France 2000, p. IV-4
- [5] R.Geller, C.Tamburella, J.L.Belmont, *Review of Scientific Instruments* **67** (3), 1996, p.1281
- [6] Spitzer L., *Physics of fully ionized gases*, Interscience, New York, 1956, p.162
- [7] R.Kirchner, *Nuclear Instruments and Methods* **131**, 1975, p.371
- [8] R.Kirchner, *14th Int. Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications*, Victoria, Canada, May 2002, will be published
- [9] R. Geller et.al., *Proceedings of 13th Int. Workshop On ECR Ion Sources*, Texas, USA, 1997, p.1
- [10] R. Geller, *Review of Scientific Instruments* **71** (2), febr. 2000, p.612
- [11] P.Sortais et.al., *Review of Scientific Instruments* **71** (2), febr. 2000, p.617

- [12] T.Lamy et.al., *Review of Scientific Instruments* **69** (2), febr. 1998, p.741
- [13] T.Lamy et.al., *Review of Scientific Instruments* **73** (2), febr. 2002, p.717
- [14] T.Lamy et.al., *8th European Particle Accelerator Conference*, Paris, France, June 2002, p.1724

Получено 31 марта 2003 г.

Лепорис М. и др.

P9-2003-57

Основные принципы метода $I^+ \rightarrow n^+$
(для дальнейшего применения в проекте DRIBs)

Проект DRIBs, реализуемый в настоящее время в ЛЯР ОИЯИ, направлен на исследования свойств атомных ядер в реакциях с вторичными радиоактивными ионными пучками. Первая стадия проекта DRIBs предполагает прямое ускорение пучков однозарядных ионов (типа ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$), получаемых методом ISOL, в циклотроне U-400. Вторая стадия основана на получении тяжелых радиоактивных ядер фотоделением урана. Главная цель этой стадии проекта — получение ускоренного в циклотроне U-400 пучка тяжелых радиоактивных ионов. После ионизации однозарядные ионы инжектируются в ионный источник ЭЦР-типа специальной конструкции (так называемый «charge breeder»), чтобы повысить их заряд до требуемой величины n^+ , необходимый для инжекции в циклотрон и ускорения. Этот процесс носит название « $I^+ \rightarrow n^+$ метод». В работе описаны основные принципы процесса $I^+ \rightarrow n^+$ с целью его дальнейшей реализации в проекте DRIBs.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод авторов

Leporis M. et al.

P9-2003-57

The Main Principle of $I^+ \rightarrow n^+$ Method
(Its Realization in Project DRIBs)

The project DRIBs which is now being realized at the JINR FLNR is dedicated to the research of nuclear reactions with accelerated radioactive ion beams. The first stage of the project DRIBs assumes direct injection and acceleration of light singly charged ions (of the ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$ type), produced with the use of the ISOL method, at the U-400 cyclotron. The second stage aims at the production of heavy radioactive nuclei by uranium target photofission. The main goal of this stage is production of the heavy radioactive elements beam accelerated at the U-400 cyclotron. After the ionization, singly charged ions are injected to a special ion source of the ECR type (the so-called charge breeder) to increase their charge states up to the value required for injection into the cyclotron and acceleration. This process is known as the « $I^+ \rightarrow n^+$ method». The paper presents the main features of the method in view of its further realization as part of the project DRIBs.

The investigation has been performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 15.04.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,43. Тираж 280 экз. Заказ № 53853.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru

www.jinr.ru/publish/