

P9-2008-102

А. А. Ефремов, С. Л. Богомолов, О. А. Кочагов,
В. Н. Логинов, Н. Ю. Казаринов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭКРАНА С ОМИЧЕСКИМ
НАГРЕВОМ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКА ИОНОВ
Са ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКА

Ефремов А. А. и др.

P9-2008-102

Использование экрана с омическим нагревом для получения пучка ионов Са из ЭЦР-источника

Получение интенсивных ускоренных пучков ^{48}Ca является одной из ключевых проблем при синтезе новых сверхтяжелых элементов. Для этой цели в ЛЯР ОИЯИ на циклотроне У-400 используется источник многозарядных ионов ЭЦР-типа. Получение интенсивного пучка $^{48}\text{Ca}^{5+}$ при среднем расходе ^{48}Ca около 0,5 мг/ч обеспечивается за счет использования микроволновки в комбинации с горячим танталовым экраном, расположенным внутри разрядной камеры источника. При этом танталовый экран нагревается за счет взаимодействия с СВЧ-волной и электронами плазмы. Для нагрева экрана до температуры около 500 °С необходимо введение в разряд около 400 Вт СВЧ-мощности. С целью уменьшения вводимой в разряд СВЧ-мощности был разработан новый экран с прямым омическим нагревом. В данной работе описаны метод, его техническая реализация и результаты первых экспериментов по получению пучка ионов Са.

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

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

Efremov A. et al.

P9-2008-102

The Use of the Ohmic Heated Sheet in Combination with the ECR Ion Source for the Production of the Ca Ion Beam

The production of intense accelerated ^{48}Ca ion beams is the key problem in the experiments on the synthesis of new super heavy nuclei. For this purpose in the FLNR (JINR) an ECR ion source is used at the U-400 cyclotron. The combination of a microoven with a hot tantalum sheet inside the discharge chamber allowed the production of the intense $^{48}\text{Ca}^{5+}$ ion beam at the ^{48}Ca consumption of about 0.5 mg/h. In this case the tantalum sheet is heated by microwaves and plasma electrons. The microwave power of up to 400 W is required to heat the sheet to the temperature of about 500 °C. To decrease the required microwave power a new sheet with a direct ohmic heating was designed. The present paper describes the method, technique and preliminary experimental results on the production of the Ca ion beam.

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

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

ВВЕДЕНИЕ

Получение интенсивного ускоренного пучка ионов ^{48}Ca является одним из ключевых моментов для синтеза новых изотопов сверхтяжелых элементов, расположенных в районе «острова стабильности». Сечения реакций в этом случае составляют очень малую величину (~ 1 пб) [1], что предполагает проведение экспериментов с набором больших интегральных доз облучения мишени. Хорошо известно, что ^{48}Ca является редким и исключительно дорогим изотопом. Таким образом, основным требованием к ионному источнику становится получение стабильного ионного пучка с требуемыми для ускорения зарядом и интенсивностью при минимальном расходе рабочего вещества.

В середине 90-х гг. на циклотроне У-400 проводилось ускорение ионов $^{48}\text{Ca}^{6+}$, полученных из ионного источника типа РИГ [2]. При интенсивности ускоренного пучка $0,1$ мкА · частиц расход ^{48}Ca составлял $4\text{--}15$ мг/ч. В связи с тем, что для проведения дальнейших экспериментов требовалось увеличение интенсивности ускоренного пучка приблизительно на порядок, источник типа РИГ был заменен на источник ЭЦР-типа ECR-4M³. Известно, что источники ЭЦР-типа обладают достаточно высокой эффективностью ионизации при работе с газами, которая составляет величину порядка 70% . Однако при работе с твердыми веществами эффективность ионизации падает как минимум на порядок. Анализируя типичный спектр ионов Ca, полученный на источнике ECR-4M, и предполагая эффективность ионизации в диапазоне $5\text{--}10\%$, мы провели оценки расхода Ca при интенсивности пучка ионов Ca^{5+} около 100 мкА. Расход составил бы величину порядка $1,5\text{--}3$ мг/ч, что является достаточно большой величиной, учитывая необходимость проведения длительных экспериментов.

Причина низкой эффективности ионизации твердых веществ состоит в том, что только небольшая часть введенных в плазменную камеру атомов извлекается в виде ионного пучка, тогда как основная их часть (в отличие от газообразных атомов) конденсируется на холодных стенках разрядной камеры. Одним из путей повышения эффективности ионизации в данном случае является использование горячего экрана с температурой, достаточной для испарения конденсированных на нем атомов. С этой точки зрения температура экрана должна быть близкой к температуре микropечи, использующейся для испарения рабочего вещества в разрядную камеру. Кроме этого, экран не должен существенно влиять на функциональные возможности ионного источника.

В связи с тем, что конструкция плазменной камеры источника ECR-4M (рис. 1, а) не позволяет использовать устройства для внешнего нагрева экрана, был предложен достаточно простой метод, позволяющий достигать требуемых температур без применения дополнительных внешних устройств. В основную

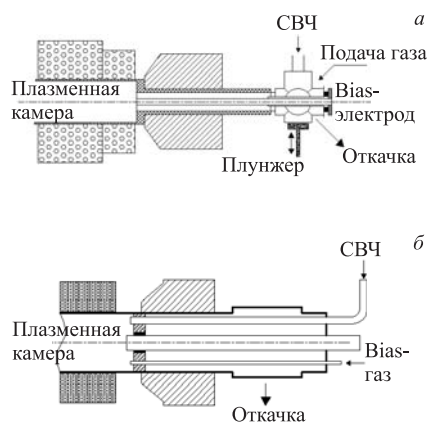


Рис. 1. Конструкция плазменной камеры источника ECR-4M (вверху) и источника DECRIS-4 (внизу)

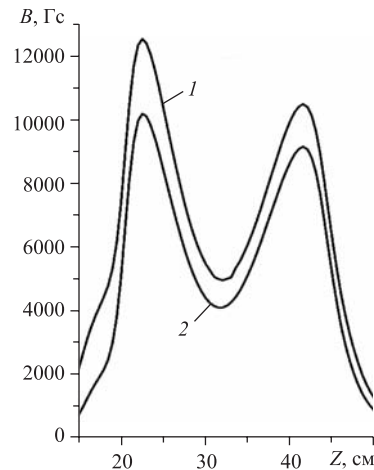


Рис. 2. Аксиальное распределение магнитного поля в источнике ECR-4M: 1 — для получения высокозарядных ионов и 2 — для получения Ca^{5+}

ионизационную камеру источника помещался тонкий танталовый цилиндр, диаметр которого на несколько миллиметров меньше диаметра разрядной камеры. Цилиндр за счет вакуумного зазора изолирован от охлаждаемых стенок разрядной камеры. Во время работы источника цилиндр нагревается за счет подаваемой внутрь камеры СВЧ-мощности и взаимодействия с плазмой ЭЦР-разряда. В результате температура экрана возрастает при увеличении вводимой в разряд СВЧ-мощности. Расчеты и измерения показали, что экран достигает температуры более $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ при вводимой мощности около 400 Вт, что достаточно для испарения конденсированных на нем атомов Ca (давление насыщенных паров — 10^{-3} торр при $528\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Впервые этот метод был использован в ионном источнике DECRIS-2 на циклотроне У-400М ЛЯР ОИЯИ для получения пучка ионов Li. В данном случае было достаточно мощности около 200 Вт для нагрева экрана до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Были получены токи ионов Li^{2+} около 300 мкА и Li^{3+} — около 50 мкА, в то время как без экрана токи составляли 50 и 25 мкА соответственно [4].

Начиная с 1999 г. «горячий экран» с успехом применяется в ионном источнике ECR-4M на циклотроне У-400 ЛЯР ОИЯИ для получения ускоренного пучка ионов ^{48}Ca , который затем используется в основном для синтеза изотопов сверхтяжелых элементов. При токе ионов $^{48}\text{Ca}^{5+}$ из источника в диапазоне 30–50 мкА расход ^{48}Ca составляет около 0,4 мг/ч, а при среднем токе ~ 100 мкА — около 1 мг/ч [5].

Данный метод отличает конструктивная простота и надежность, что позволяет проводить сеансы облучения протяженностью в несколько месяцев. Однако метод имеет и некоторые недостатки. В частности — использование достаточно большой СВЧ-мощности при необходимости получать относительно низкий заряд ионов. Это требует принятия специальных мер для сдвига максимума ионного тока в спектре получаемых ионов из области более высоких зарядов на ион с требуемым зарядом.

На рис. 2 представлено распределение аксиального магнитного поля в источнике ECR-4M для случая получения ионов Ca^{5+} в сравнении с типичным распределением при получении более высокозарядных ионов. Низкий средний уровень магнитного поля при относительно высоком уровне вводимой СВЧ-мощности может приводить к возникновению дополнительных плазменных неустойчивостей, что в свою очередь может влиять на качество извлекаемого ионного пучка. Кроме этого, для подавления высокозарядных состояний Ca в разряд вводится достаточно большое количество балластного газа (He), который также влияет на транспортировку ионного пучка в канале внешней инжекции, особенно на начальном этапе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

Как видно из рис. 1, в источниках CAPRICE-типа, к которым относится ECR-4M, используется коаксиальный ввод СВЧ-мощности в ионизационную камеру. Таким образом практически невозможно расположение дополнительных элементов, например тоководов, для нагрева «горячего экрана». В источнике DECRIS-4 СВЧ-мощность вводится непосредственно в ионизационную камеру с помощью волновода [6], что освобождает пространство для расположения тоководов, измерителей температуры и т.д. Это позволило сконструировать «горячий экран» с использованием омического нагревателя с внешним питанием.

«Горячий экран» представляет собой тонкий цилиндр из нержавеющей стали, на котором с внешней стороны располагается нагреватель. Нагреватель, в свою очередь, окружен наружным тепловым экраном из тантала толщиной 0,1 мм. Вся конструкция имеет вакуумный зазор около 1 мм от охлаждаемой стенки разрядной камеры. В качестве нагревателя использован NiCr-провод, помещенный в минеральную изоляцию внутри нержавеющей

трубки с внешним диаметром 1 мм. Аналогичный нагреватель используется в микropечах, служащих для испарения Са в ионизационную камеру источника. Максимальная рабочая температура нагревателя — 900 °С. Температура «горячего экрана» измерялась на его внутренней поверхности с помощью термопары. Зависимость температуры экрана от мощности нагрева (постоянный ток) представлена на рис. 3.

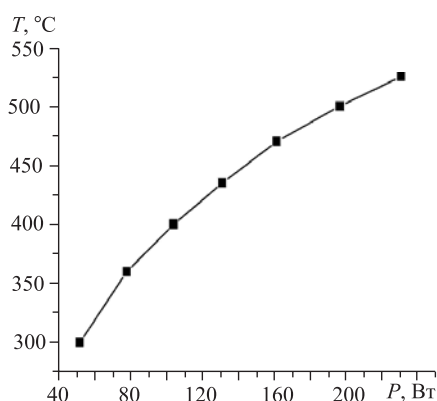


Рис. 3. Зависимость температуры экрана от мощности нагрева

Как видно из рисунка, для достижения температуры порядка 500 °С необходима мощность около 200 Вт. Измерения проводились при вакууме в ионизационной камере около $1 \cdot 10^{-5}$ торр. После проведения калибровочных измерений термопара была установлена на внешней стороне экрана для контроля его температуры во время работы ионного источника. Для защиты от теплового излучения других элементов, расположенных в ионизационной камере (плазменный электрод, задняя закоротка), на экран были установлены торцевые крышки из нержавеющей стали.

Сравнительные эксперименты по получению ионов Са проводились на ионных источниках DECRIS-2m [7], где был использован «горячий экран» традиционной конструкции, и на источнике DECRIS-4 с экраном, использующим омический нагрев. Для измерения характеристик ионного пучка использовался измеритель эмиттанса [8], позволяющий грубо (с точностью не выше 30 %) оценить величину одной из его компонент (в нашем случае вертикальной).

Схема измерителя эмиттанса показана на рис. 4. Прибор состоит из пластины с горизонтальными щелями, ширина которых составляет 0,2 мм, и профилометра (сканера) с вращающейся танталовой проволокой. Пластина разделяет ионный пучок на составляющие, профиль которых затем измеря-

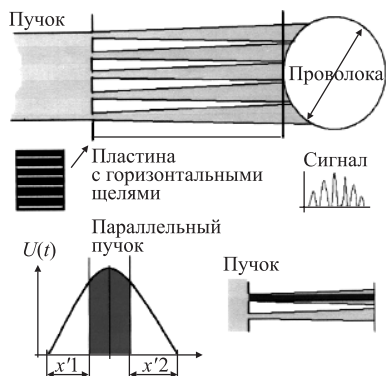


Рис. 4. Схема измерителя эмиттанса и анализа сигнала

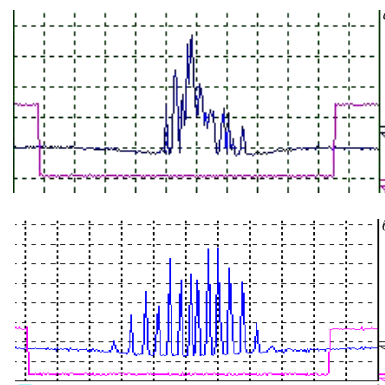


Рис. 5. Примеры сигналов со спирали профилометра

ется сканером. Пластина со щелями может быть выдвинута из пучка для измерения его интенсивности с помощью цилиндра Фарадея. Сигнал со сканера записывается на цифровой осциллограф, а затем в виде файла данных — на РС. Каждый из пиков соответствует известному вертикальному размеру пучка. Угловая расходимость рассчитывается из ширины каждого из пиков и известного расстояния между щелью и положением спирали. Примеры сигналов, записанных с профилометра, показаны на рис. 5.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерение эмиттанса пучка ионов Ca^{6+} при использовании экрана с омическим нагревом проводилось при мощности СВЧ-накачки в диапазоне от 50 до 100 Вт. В качестве балластного газа использовался He. При этом варьировалось также количество балластного газа. Измерения проведены при интенсивности тока ионов He^{1+} около 500, 100 мкА и на чистом Ca. Спектры ионов Ca при использовании балластного газа и без него показаны на рис. 6. Результаты измерений приведены в таблице. При мощности СВЧ-нагрева 50 Вт эмиттанс практически не менялся в диапазоне токов 50–100 мкА. При мощности нагрева 100 Вт эмиттанс существенно возрастает при использовании большого количества балластного газа, однако при уменьшении подачи He (ток ионов He^{+} порядка 100 мкА) величина эмиттанса падает до 100π мм · мрад. Использование режима работы источника без балластного газа не приводит к существенному уменьшению величины эмиттанса. Однако при этом возрастает расход Ca, необходимый для получения стабильного пучка ионов. При работе без балластного газа требовалось увеличение мощности нагрева микрочастицы, испаряющей Ca, примерно на 20 %.

Таблица. Результаты измерений эмиттанса пучка Ca^{6+} при использовании экрана с омическим нагревом

СВЧ-мощность, Вт	Ток Ca^{6+} , мкА	Ток He^{1+} , мкА	Эмиттанс, π мм · мрад
50	100	500	85
50	50	500	85
100	100	500	170
100	100	100	100
100	100	0	95
50	100	0	85

При использовании экрана традиционной конструкции ионный источник работал в режиме, который обычно используется на циклотроне У-400 для получения пучка ионов ^{48}Ca : мощность СВЧ-нагрева ~ 400 Вт, распределение магнитного поля — приведенное на рис. 2, балластный газ — He. Следует отметить, что в этом случае фактически не наблюдалась повторяемость результатов измерений. Если для экрана с омическим нагревом все пики, измеренные профилометром, отделены друг от друга (рис. 5, б), то в последнем случае пики часто перекрывались, что говорит о большой угловой расходимости ионного пучка (рис. 5, а). Расчет по некоторым профилям из проведенной серии измерений показал, что эмиттанс ионного пучка при использовании экрана традиционной конструкции лежит в диапазоне от 220 до 350 π мм · мрад.

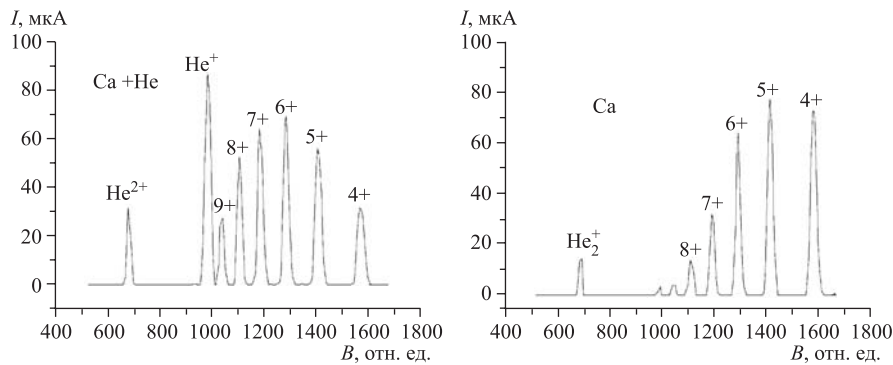


Рис. 6. Спектры ионов Ca

ВЫВОДЫ

Проведенные эксперименты показали, что при использовании для получения ионов Ca ЭЦР-источника с «горячим экраном», нагрев которого про-

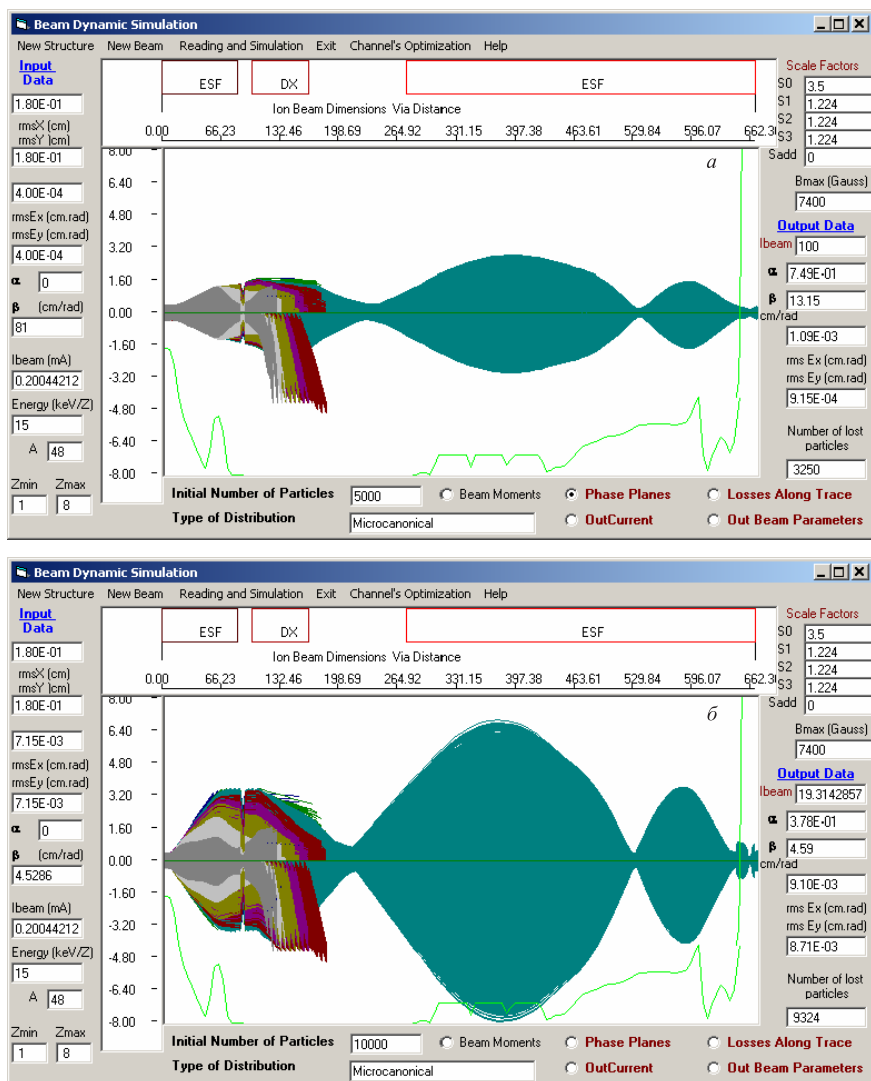


Рис. 7. Расчет транспортировки пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{5+}$ в системе аксиальной инжекции циклотрона У-400: *a* — эмиттанс $90 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$, *b* — $300 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Ток ионов He — 200 мкА

исходит за счет взаимодействия с СВЧ-волной и плазмой разряда, эмиттанс извлекаемого ионного пучка имеет достаточно большую величину, которая может превышать аксептанс канала аксиальной инжекции циклотрона У-400. Очевидно, что на характеристики пучка оказывает влияние высокий уровень вводимой СВЧ-мощности при относительно низком уровне среднего аксиального магнитного поля ионного источника, а также достаточно большое количество балластного газа. Как уже отмечалось, данный режим используется для смещения ионного спектра из высокозарядной части в область пяти- или шестизарядного Са, требуемого для ускорения. Использование экрана с внешним омическим нагревом позволяет получать пучки ионов с требуемым зарядом и эмиттансом в порядка $100 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. На рис. 7 представлены результаты расчета транспортировки пучка ионов $^{48}\text{Ca}^{5+}$ в канале аксиальной инжекции циклотрона У-400. Расчеты проведены с помощью 2S-программы, использующей метод транспортировки крупных частиц и имеющей возможность симуляции многокомпонентного пучка [8]. В первом случае, при эмиттансе $90 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ и токе He 200 мкА, практически 100 % пучка достигает медианной плоскости циклотрона. При эмиттансе $300 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$ и прочих равных условиях эффективность транспортировки не превышает 20 %. Влияние добавочного газа на транспортировку пучка ранее также было рассмотрено в работе [8].

Таким образом, предварительные эксперименты по получению пучка ионов Са с использованием экрана с внешним омическим нагревом показали его перспективность для применения на циклотроне У-400 с целью получения пучков ионов дорогостоящего изотопа ^{48}Ca .

ЛИТЕРАТУРА

1. *Oganessian Y. T. et al. // Nature. 1999. V. 400. P. 242.*
2. *Kutner V.B. et al. // Proc. of the Int. Conf. on Cyclotrons and Their Application, Caen, France, 1998. P. 405.*
3. *Leroy R. et al. // Proc. of the 11th Int. Workshop on ECR Ion Sources, Groningen, Netherlands, 1993. P. 133.*
4. *Efremov A.Á. et al. // Proc. of the 13th Int. Workshop on ECR Ion Sources, College Station, Texas, USA, 1997. P. 128.*
5. *Kutner V. B. et al. // Rev. Sci. Instr. 2000. V. 71, No. 2. P. 880.*
6. *Leporis M., Bogomolov S. L., Efremov A., Gulbekian G. // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75, No. 5. P. 1492–1493.*
7. *Loginov V. N. et al. // Nukleonika. 2003. V. 48–S2. P. S85–S88.*
8. *Kazarinov N. // Rev. Sci. Instr. 2004. V. 75, No. 5. P. 1665.*

Получено 7 июля 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 22.09.2008.

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

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,82. Тираж 270 экз. Заказ № 56311.

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

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/