

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ ЛИТИЯ, МАГНИЯ, ФОСФОРА И КАЛЬЦИЯ ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКА НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-60

*В. Н. Логинов^a, С. Л. Богомолов^a, А. Е. Бондарченко^{a,1}, В. Е. Миронов^a,
В. В. Александренко^b, М. В. Здоровец^b, И. А. Иванов^b, С. Г. Козин^b,
М. В. Колобердин^b, А. Е. Курахмедов^b, Д. А. Мустафин^b, Е. К. Самбаев^b*

^a Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^b Астанинский филиал Института ядерной физики, Астана

Статья посвящена описанию работ, проведенных в 2017–2018 гг. на ускорительном комплексе ДЦ-60 Астанинского филиала ИЯФ, по отработке методики получения высокоинтенсивных пучков тяжелых ионов лития, магния, фосфора и кальция с использованием микроиспарителя. В результате выполненных работ впервые получены пучки ионов ${}^7\text{Li}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{31}\text{P}$ и ${}^{40}\text{Ca}$. Оптимизированы режимы ускорения ионов этих металлов до энергии 1,75 МэВ/нуклон.

The paper describes the research activity at the DC-60 cyclotron (Astana Branch of the Institute of Nuclear Physics, Kazakhstan) during 2017–2018. Main efforts were put into production and acceleration of metal ion beams with the ECR ion source using the evaporation technique. As a result of performed study for the first time accelerated beams of ${}^7\text{Li}$, ${}^{24}\text{Mg}$, ${}^{31}\text{P}$ and ${}^{40}\text{Ca}$ were produced at the DC-60 cyclotron. The operating modes for production of accelerated beams with the energy of 1.75 MeV/nucleon were also optimized.

PACS: 07.77.Ka; 41.75.Ak; 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Циклотрон ДЦ-60 [1] спроектирован для ускорения ионов от Li до Xe с отношением массы к заряду A/Z от 6 до 12. Циклотрон оснащен ЭЦР-источником с рабочей частотой 14 ГГц DECRIS-3 [2]. Основные параметры источника: магнитное поле со стороны инжекции и экстракции — 1,3 и 1,1 Тл соответственно, магнитное поле гексаполя на стенке разрядной камеры — 1,0 Тл, диаметр разрядной камеры — 6,4 см. СВЧ-мощность инжектируется в источник по коаксиальному волноводу вдоль оси источника. Напряжение экстракции — до 25 кВ.

Для получения ионов твердых веществ с относительно невысокой температурой испарения были использованы методы испарения из контейнера, нагреваемого микроволнами в камере источника, и испарения из испарителя с резистивным нагревом.

При получении ионов твердых веществ в камеру источника устанавливался тонкостенный танталовый экран для обеспечения рециркуляции вещества со стенок [3]. В качестве балластного газа всегда использовался гелий.

¹E-mail: bondarchenko@jinr.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКА

Диапазон получаемых ионов твердых веществ ограничен максимальной температурой испарителя (рис. 1, 2), которая составляет 900 °С (рис. 3). Для нагрева стандартного танталового тигля длиной 28 мм, с внутренним диаметром 2 мм и внешним диаметром 2,8 мм был применен специальный коаксиальный кабель с внутренним нихромовым проводником с минеральной изоляцией и оболочкой из нержавеющей стали. Применение такого кабеля позволило свести к минимуму использование керамических деталей в конструкции испарителя. Испаритель устанавливается на подвижном держателе внутри коаксиального

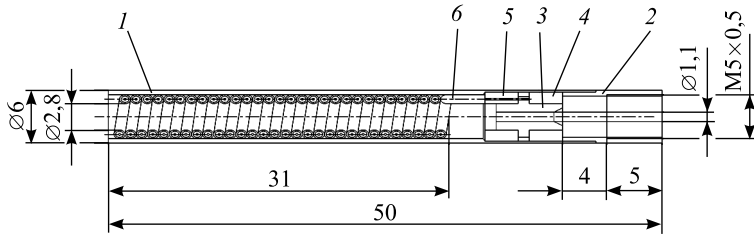


Рис. 1. Испаритель: 1, 2 — корпус; 3 — электрический контакт; 4, 5 — керамические изоляторы; 6 — нагреватель



Рис. 2. Внешний вид испарителя

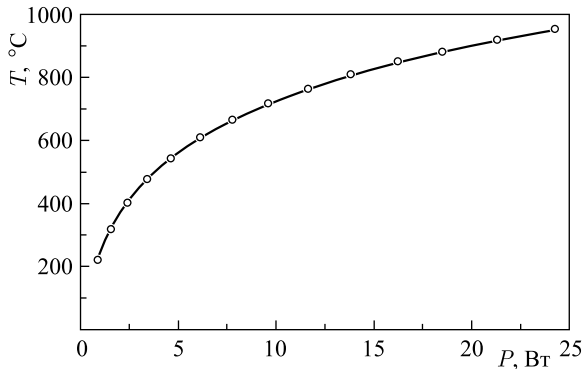


Рис. 3. Зависимость температуры испарителя от мощности нагрева

волновода таким образом, что его положение может дистанционно регулироваться в диапазоне ± 15 мм относительно края коаксиального волновода.

Для увеличения времени работы источника без перезагрузки тигля рабочим веществом для некоторых материалов мы использовали тигель увеличенного объема. На рис. 4 и 5 показаны стандартный тигель и тигель увеличенного объема соответственно. Центральный цилиндр (контейнер) содержит рабочее вещество; внутренний диаметр контейнера составляет 6 мм, внешний — 7 мм, длина — 20 мм. С одной стороны контейнер соединен со стержнем, который нагревается испарителем; стержень имеет те же размеры, что и стандартный тигель. Пары металла поступают в разрядную камеру через сопло длиной 10 мм и с внутренним диаметром 1 мм. Внутри сопла устанавливается скрученная танталовая проволока для предотвращения вытекания расплавленного вещества в разрядную камеру. Сопло и контейнер в основном нагреваются микроволнами с небольшим вкладом от плазмы. Температура контейнера контролируется изменением его положения в камере источника. Нагрев контейнера со стороны испарителя является дополнительной регулировкой для настройки скорости испарения материала.

На рис. 6 и 7 представлены спектры ионов Li, полученные при использовании тигля увеличенного объема и стандартного тигля соответственно.



Рис. 4. Стандартный тигель

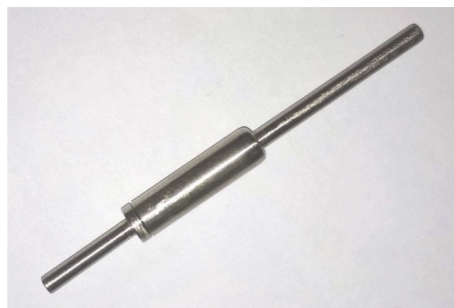


Рис. 5. Тигель увеличенного объема

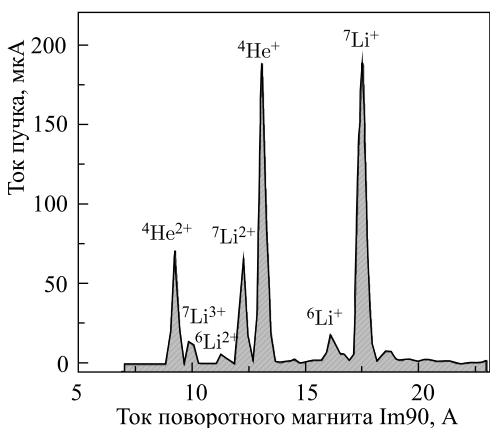


Рис. 6. Зарядовое распределение ионов Li, полученное при использовании тигля увеличенного объема

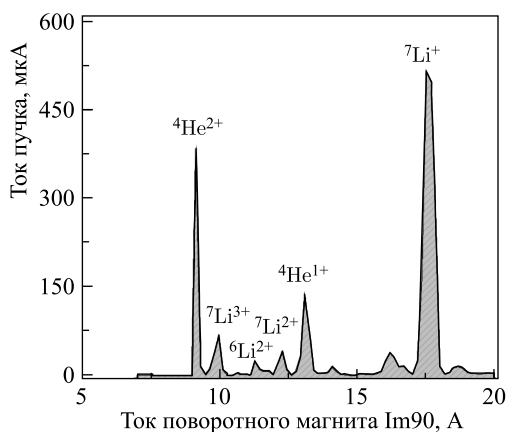


Рис. 7. Зарядовое распределение ионов Li, полученное при использовании стандартного тигля

Расход вещества составил 0,7 мг/ч для тигля увеличенного объема и 1,1 мг/ч для стандартного тигля при токах Li^{1+} 200 и 500 мкА соответственно.

Тигель увеличенного объема использовался также при получении ионов Mg. Ток ионов Mg^{4+} составил 80 мкА при расходе вещества 2,1 мг/ч. Зарядовое распределение ионов Mg показано на рис. 8.

Для получения ионов Ca использовался стандартный тигель, который нагревался до температуры приблизительно 720 °С. При оптимизации режима ионного источника на максимум тока ионов $^{40}\text{Ca}^{5+}$ была получена интенсивность 140 мкА, при этом ток ионов $^{40}\text{Ca}^{7+}$ составил 75 мкА. Расход вещества при данном режиме составил 0,7 мг/ч. Зарядовое распределение ионов Ca показано на рис. 9.

В качестве рабочего вещества для получения ионов $^{31}\text{P}^{5+}$ был выбран красный фосфор, который загружался в тигель стандартного размера. Температура, необходимая для получения рабочего давления паров фосфора ($\sim 10^{-3}$ Торр), составляет приблизительно 150 °С. До ввода в источник тигель с веществом предварительно прогревался в вакуумном объеме шлюза твердых веществ при температуре ~ 100 °С. После оптимизации

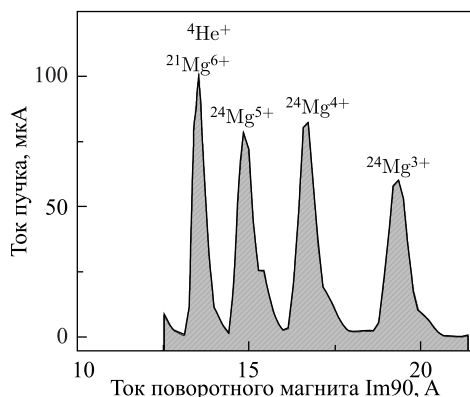


Рис. 8. Зарядовое распределение ионов Mg, полученное при использовании тигля увеличенного объема

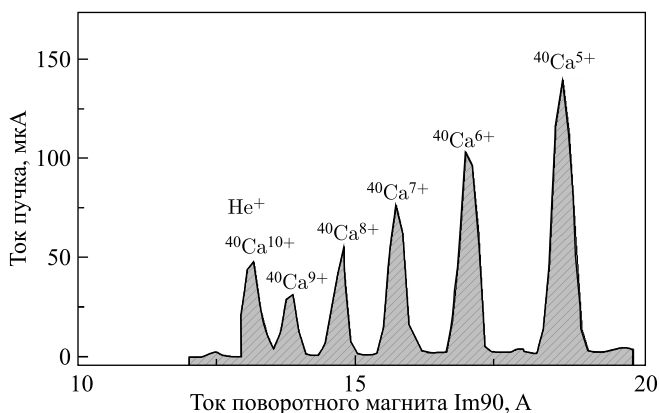
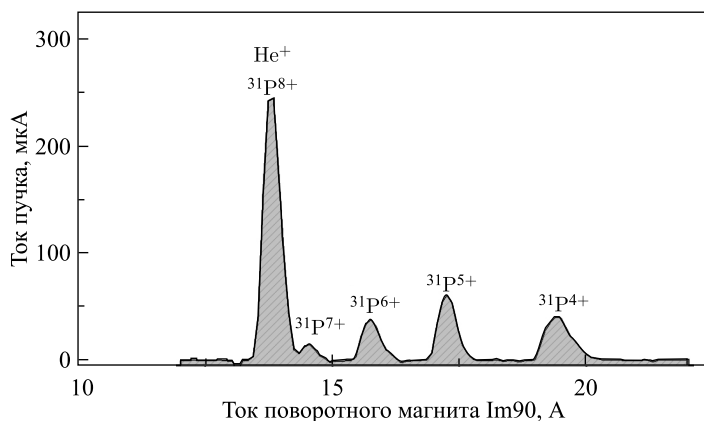


Рис. 9. Спектр ионов ^{40}Ca

Рис. 10. Спектр ионов ^{31}P

режима работы ЭЦР-источника был получен ток ионов $^{31}\text{P}^{5+}$ 60 мкА. Расход вещества, измеренный после 25 ч работы, составил 1,7 мг/ч. Спектр ионов ^{31}P показан на рис. 10.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-60

После оптимизации режимов работы ЭЦР-источника для получения ионов металлов на циклотроне ДЦ-60 были получены ускоренные пучки ионов $^{40}\text{Ca}^{7+}$, $^{31}\text{P}^{5+}$, $^{24}\text{Mg}^{4+}$ и оптимизированы режимы их ускорения. Полученные результаты представлены в таблице.

Параметры ускоренных пучков ионов ^{40}Ca , ^{24}Mg и ^{31}P

Тип пучка ионов	Энергия, МэВ/А	Ток пучка ионов в канале инъекции, мкА	Выведенный ток пучка ионов, мкА	Коэффициент трансмиссии, %
$^{40}\text{Ca}^{7+}$	1,75	50	1,35	2,75
$^{31}\text{P}^{5+}$	1,75	20	0,58	3,00
$^{24}\text{Mg}^{4+}$	1,75	46	1,14	2,48

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью данной работы являлась отработка методики получения пучков ускоренных ионов твердых веществ на циклотроне ДЦ-60. Отработка данной методики позволит существенно расширить спектр ускоряемых ионов, что придает особую актуальность цели исследования. С увеличением спектра ускоряемых элементов увеличиваются возможности постановки, поиска и решения новых задач и экспериментов в области экспериментальной ядерной физики, радиационной физики твердого тела и различных прикладных задач. В результате выполненной работы впервые на циклотроне ДЦ-60 получены ускоренные пучки ионов магния $^{24}\text{Mg}^{4+}$, кальция $^{40}\text{Ca}^{7+}$ и фосфора $^{31}\text{P}^{5+}$ с использованием методов испарения из тигля.

Работа выполнена в рамках гранта МОН РК ИРН проекта AP05133476 «Сравнительные исследования тонкой структуры области повреждения металлов и сплавов, облученных ионами металлов и инертных газов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гикал Б. Н., Дмитриев С. Н., Гульбекян Г. Г. и др. Циклотронный комплекс ДЦ-60 для научно-прикладных исследований и промышленного применения в области нанотехнологий. Препринт ОИЯИ Р9-2007-104. Дубна, 2007.
2. Efremov A. A., Bogomolov S. L., Lebedev A. N., Loginov V. N., Yazvitsky N. Y. // Proc. of the 14th Intern. Workshop on ECR Sources, ECRIS99, CERN, Geneva, May 3–6, 1999.
3. Efremov A. A., Bogomolov S. L., Kutner V. B., Lebedev A. N., Loginov V. N., Yazvitsky N. Y. Li and Ca Ion Beam Production // Proc. of the XV Intern. Conf. on Cyclotrons and Their Applications, Caen, France, June 14–19, 1998. P. 145.

Получено 10 мая 2018 г.