

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ БОРА И ЖЕЛЕЗА ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКА МЕТОДОМ MIVOC 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 получения интенсивных пучков тяжелых ионов бора и железа с использованием летучих металлоорганических соединений (Metal Ions from Volatile Compounds — MIVOC). В результате выполненных работ впервые на циклотроне ДЦ-60 получены пучки ионов железа и бора и оптимизированы режимы ускорения ионов $^{56}\text{Fe}^{10+}$ и бора $^{11}\text{B}^{2+}$ до энергии 1,75 и 1,5 МэВ/нуклон соответственно.

The article describes the experiments carried out in 2017–2018 at the accelerator complex DC-60 of Astana branch of the INP to develop methods for production of intense beams of multicharged ions of iron and boron with the use of volatile organometallic compounds (Metal Ions from Volatile Compounds — MIVOC). As a result, for the first time at DC-60 cyclotron beams of iron and boron ions were obtained, acceleration modes of $^{56}\text{Fe}^{10+}$ and $^{11}\text{B}^{2+}$ ions to the energy of 1.75 and 1.5 MeV/n, respectively, were optimized.

PACS: 07.77.Ка; 29.20.dg

ВВЕДЕНИЕ

Развитие ЭЦР-источников, повышение интенсивности и расширение спектра уско-ряемых ионов по-прежнему остаются актуальными задачами, решение которых в значительной мере определяет возможности ускорителей тяжелых ионов, используемых в прикладных и фундаментальных исследованиях.

Для получения ионов твердых веществ разработаны различные методы, такие как испарение из резистивного или индуктивного нагревателя для материалов с относительно низкой температурой испарения (до $\sim 1500^\circ\text{C}$) [1, 2], распыление для тугоплавких металлов [3], введение металла в плазму с последующим нагревом быстрыми электронами плазмы («insertion technique») [4, 5]. Альтернативным методом получения ионов твердых веществ является использование летучих металлоорганических соединений — метод MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds) [6].

¹E-mail: bondarchenko@jinr.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ $^{11}\text{B}^{2+}$ И $^{56}\text{Fe}^{10+}$ ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛЕТУЧИХ СОЕДИНЕНИЙ MIVOC

Метод MIVOC основан на использовании металлоорганических соединений, имеющих относительно высокое давление пара (10^{-3} Торр) при комнатной температуре. Такое давление пара является достаточным для работы ЭЦР-источника при *достаточной* проводимости тракта подачи пара.

Впервые метод MIVOC был использован группой из Университета Ювяскюля (Финляндия) для получения интенсивного пучка ионов железа [7]. В качестве рабочего вещества использовалось соединение $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$. Данное соединение представляет собой порошок ярко-желтого цвета, оно не чувствительно к воздуху, влаге, свету, может храниться при обычной температуре.

Вещество помещается в стеклянный контейнер (рис. 1) и после предварительной откачки присоединяется к тракту подачи газа через стандартный пьезоэлектрический вентиль.

Оптимизация режима работы ЭЦР-источника проводилась для получения максимального тока ионов $^{56}\text{Fe}^{10+}$. Спектр пучка ионов железа для данного режима представлен на рис. 2.



Рис. 1. Контейнер с рабочим веществом

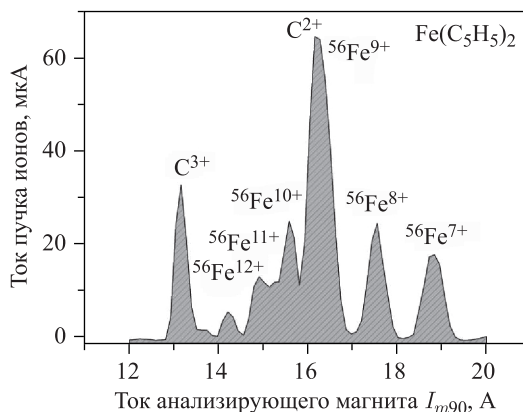
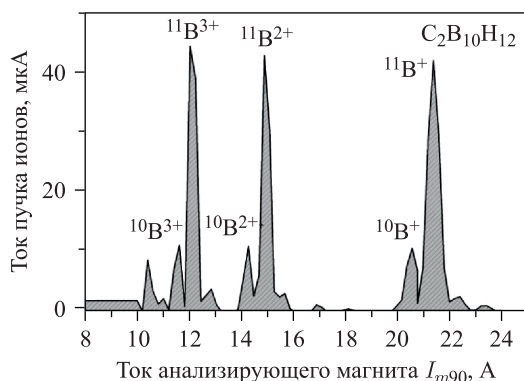


Рис. 2. Спектр ионов железа при оптимизации режима ЭЦР-источника на получение максимального тока ионов $^{56}\text{Fe}^{10+}$

Рис. 3. Спектр ионов бора $^{10,11}\text{B}$ после оптимизации работы ЭЦР-источника

При длительной работе ЭЦР-источника расход ферроцена составил 0,8 мг/ч.

Получение ионов бора $^{11}\text{B}^{2+}$ происходит аналогично получению ионов ^{56}Fe . Бор-содержащий компаунд $\text{C}_2\text{B}_{10}\text{H}_{12}$, который представляет собой белый порошок, также помещался в стеклянный контейнер.

Так же как и в случае ферроцена, источник ионов работал стабильно без использования поддерживающего газа. Получен максимальный ток $^{11}\text{B}^{2+}$ до 60 мкА при вводимой СВЧ-мощности 48 Вт. Спектр ионов бора представлен на рис. 3.

Расход рабочего вещества, измеренный после работы ЭЦР-источника при токе пучка ионов $^{11}\text{B}^{2+}$ 45 мкА, составил 1,2–1,4 мг/ч.

УСКОРЕНИЕ ИОНОВ ЖЕЛЕЗА $^{56}\text{Fe}^{10+}$ И $^{11}\text{B}^{2+}$

В ходе проведенных работ на ускорителе ДЦ-60 Астанинского филиала ИЯФ были получены и ускорены ионы $^{56}\text{Fe}^{10+}$ до энергии 1,75 МэВ/нуклон, а также ускорены ионы $^{11}\text{B}^{2+}$ до энергии 1,5 МэВ/нуклон. В табл. 1 и 2 представлены коэффициенты трансмиссии ускоренных ионов железа и бора соответственно.

Таблица 1. Ток пучка ионов $^{56}\text{Fe}^{10+}$ и коэффициенты трансмиссии

Режим ускорения	Ток пучка на инъекции, мкА	Ток пучка на радиусе 125 мм, мкА	Ток пучка на радиусе 680 мм, мкА	Ток TIFC1, мкА	К, %
Без банчера	15,59	0,20	0,160	0,033	0,21
С банчером	15,59	0,63	0,532	0,219	1,40

Таблица 2. Ток пучка ионов $^{11}\text{B}^{2+}$ и коэффициенты трансмиссии

Режим ускорения	Ток пучка на инъекции, мкА	Ток пучка на радиусе 125 мм, мкА	Ток пучка на радиусе 680 мм, мкА	Ток TIFC1, мкА	К, %
Без банчера	24,2	0,20	0,47	0,19	0,78
С банчером	24,2	0,46	1,40	0,69	2,85

Транспортировка пучка ионов осуществлялась стандартными ионооптическими элементами циклотрона. В итоге проведенной работы получены пучки ионов $^{56}\text{Fe}^{10+}$ с энергией 1,75 МэВ/нуклон и интенсивностью в канале 219 нА, а также получены и ускорены пучки ионов $^{11}\text{B}^{2+}$ с энергией 1,5 МэВ/нуклон и интенсивностью 690 нА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной целью данной работы являлась отработка методики MIVOC для получения ионов твердых веществ и расширение спектра ускоряемых ионов на циклотроне ДС-60.

С расширением спектра ускоряемых элементов появляются возможности постановки новых экспериментов в области экспериментальной ядерной физики, радиационной физики твердого тела и для различных прикладных задач, что придает особую актуальность цели исследования. В результате выполненной работы впервые на циклотроне ДС-60 отработаны режимы получения пучков ускоренных ионов железа $^{56}\text{Fe}^{10+}$ и $^{11}\text{B}^{2+}$.

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. *Clark D. J., Lyneis C. M.* The Production of Beams from Solid Materials at the LBL ECR Source // J. Phys. Colloq. 1989. V. 50. P. C1-759–C1-766.
2. *Harkewicz R.* Efficient Production of a ^{48}Ca Beam from Oxide Material in an Electron Cyclotron Resonance Ion Source Using a Low Power Miniature Oven // Rev. Sci. Instr. 1996. V. 67. P. 2176–2178.
3. *Harkewicz R. et al.* Ion Plasma Sputtering as a Method of Introducing Solid Material into an Electron Cyclotron Resonance Ion Source // Rev. Sci. Instr. 1995. V. 66. P. 2883–2887.
4. *Geller R., Ludwig P., Melin G.* Metal Ion Production in ECRIS // Rev. Sci. Instr. 1992. V. 63. P. 2795–2800.
5. *Nakagawa T. et al.* Recent Developments of RIKEN ECR Ion Sources // Proc. of the 10th Intern. Workshop on ECR Ion Sources, ORNL, Oak Ridge, USA, Nov. 1–2, 1990. P. 163–172.
6. *Koivisto H., Arje J., Nurmia M.* Metal Ions from the Volatile Compounds Method for the Production of Metal Ion Beams // Rev. Sci. Instr. 1998. V. 69, No. 2. P. 785–787.
7. *Koivisto H., Arje J., Nurmia M.* Metal Ion Beams from an ECR Ion Source Using Volatile Compounds // Nucl. Instr. Meth. B. 1994. V. 94. P. 291–296.

Получено 10 мая 2018 г.