

## ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ИОНОВ НИКЕЛЯ, ХРОМА, КРЕМНИЯ И КОБАЛЬТА НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-60

*В. Н. Логинов, С. Л. Богомолов, А. Е. Бондарченко,  
В. Е. Миронов, Д. К. Пугачев<sup>1</sup>*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Дано описание экспериментальных работ по получению высокоинтенсивных пучков ионов металлов из ЭЦР-источника циклотрона ДЦ-60 (Институт ядерной физики, Алма-Ата, Казахстан) с использованием метода испарения металлоорганических соединений MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds). В результате проведенных работ получены пучки ионов никеля, хрома, кремния и кобальта. Проведена оптимизация режимов ускорения полученных пучков ионов до энергии 1,75 МэВ/нуклон.

The article describes the experiments carried out from 2018 to 2019 at the DC-60 accelerator complex of Astana branch of the INP (Almaty, Kazakhstan) to develop methods for production of intense beams of multicharged ions of nickel, chrome, silicium, and cobalt with the use of volatile organometallic compounds MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds). As a result, for the first time at the DC-60 cyclotron beams of nickel, chrome, silicium, and cobalt ions were obtained. Acceleration modes of  $^{58}\text{Ni}^{11+}$ ,  $^{52}\text{Cr}^{10+}$ ,  $^{28}\text{Si}^{5+}$ , and  $^{59}\text{Co}^{12+}$  ions to the energy of 1.75 MeV/nucleon are optimized.

PACS: 29.20.dg; 29.27.-a; 29.27.Fh

### ВВЕДЕНИЕ

Получение высокозарядных пучков ионов твердых веществ является актуальной задачей для современной физики. Облучение ионами металлов и полупроводников необходимо для таких сфер, как радиационная физика, физика твердого тела, нанотехнологии и др.

На данный момент существуют три основных метода получения металлов из ЭЦР-источников — испарение из тигля с использованием микropечи, прямое введение вещества в плазму и метод MIVOC. Ограничение на получаемые ионы из тигля определяется максимальной температурой нагрева печи. Получение ионов из ЭЦР-источника методом введения рабочего вещества в опорную плазму характеризуется высокой нестабильностью работы источника. Преимуществом метода MIVOC является низкий расход рабочего вещества, а также высокая интенсивность и стабильность пучков ионов [1–3].

---

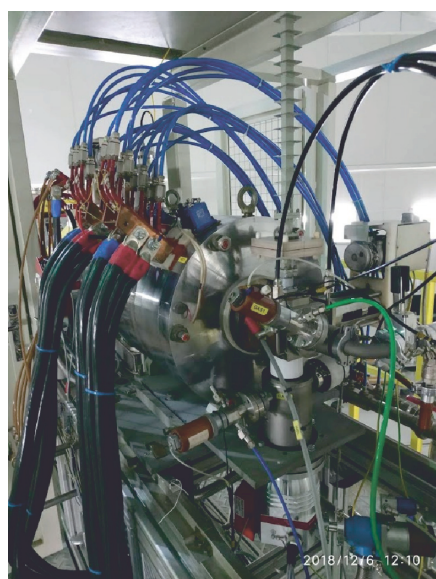
<sup>1</sup>E-mail: pugachev@jinr.ru

Метод MIVOC основан на испарении металлоорганических соединений, имеющих относительно высокое давление паров ( $10^{-3}$  Торр) при комнатной температуре. Он был разработан в 1994 г. группой из Университета Ювяскюля (Финляндия) для получения интенсивного пучка ионов железа с использованием ферроцена ( $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ) [4]. В дальнейшем с помощью этого метода группа ученых из Института им. Гана и Мейтнер (Германия) получила пучки таких элементов, как V, Co, Ge, Sn, I и Os [5].

В рамках данного эксперимента получение высокозарядных пучков ионов металлов осуществлялось из ЭЦР-источника DECRIS-3 с последующим ускорением на циклотроне ДЦ-60 [6, 7]. Ускорение получаемых пучков ионов проводилось до энергии 1,75 МэВ/нуклон (см. таблицу). В период 2018–2019 гг. из ЭЦР-источника были получены пучки следующих ионов из металлоорганических соединений с использованием метода MIVOC с интенсивностями: порядка 43 мкА для  $^{58}\text{Ni}^{11+}$ , 24 мкА для  $^{28}\text{Si}^{5+}$ , 12 мкА для  $^{59}\text{Co}^{12+}$ , 18 мкА для  $^{52}\text{Cr}^{10+}$ .

### ПОЛУЧЕНИЕ ИОНОВ $^{58}\text{Ni}^{11+}$ , $^{28}\text{Si}^{5+}$ , $^{52}\text{Cr}^{10+}$ И $^{59}\text{Co}^{12+}$ ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА MIVOC

Получение пучков ионов осуществляется из ЭЦР-источника DECRIS-3 циклотрона ДЦ-60. Ионизация рабочего вещества проводится СВЧ-волной с частотой 14–14,5 ГГц в области резонансного магнитного поля. Магнитное поле источника формируется магнитными катушками и гексаполем с конфигурацией минимум «В» в центре ионизационной камеры. Магнитное поле формирует резонансную зону со значением 0,5 Тл и удерживает плазму в пределах ионизационной камеры. Значение поля со стороны инжекции составляет 1,3 Тл, со стороны экстракции — 1,0 Тл. Подача СВЧ-волны в ионизационную камеру осуществляется через вакуумное окно и



а



б

Рис. 1. ЭЦР-источник DECRIS-3 (а); аргонный бокс (б)

высоковольтный изолятор. Для экстракции пучка ионов с энергией, необходимой для последующей инжекции в циклотрон, корпус источника изолирован от ионизационной камеры и системы постоянных магнитов до 25 кВ. Источник представлен на рис. 1.

Работа по подготовке контейнера с компаундом происходила в камере, заполненной аргоном (см. рис. 1). Подача вещества в ионизирующую камеру осуществлялась посредством испарения рабочего соединения, при этом давление со стороны инжекции варьировалось в диапазоне  $1,6 \cdot 10^{-7}$ – $2,9 \cdot 10^{-7}$  Торр в зависимости от регулировки подачи рабочего вещества.

Соединение MIVOC-камеры с ЭЦР-источником, а также регулировка интенсивности натекания паров компаундов в ионизационную камеру осуществлялись с использованием ручного или игольчатого вентиля. На рис. 2, а и б представлен контейнер с компаундом  $\text{Co}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ , присоединенный к ручному вентилю регулировки подачи вещества.

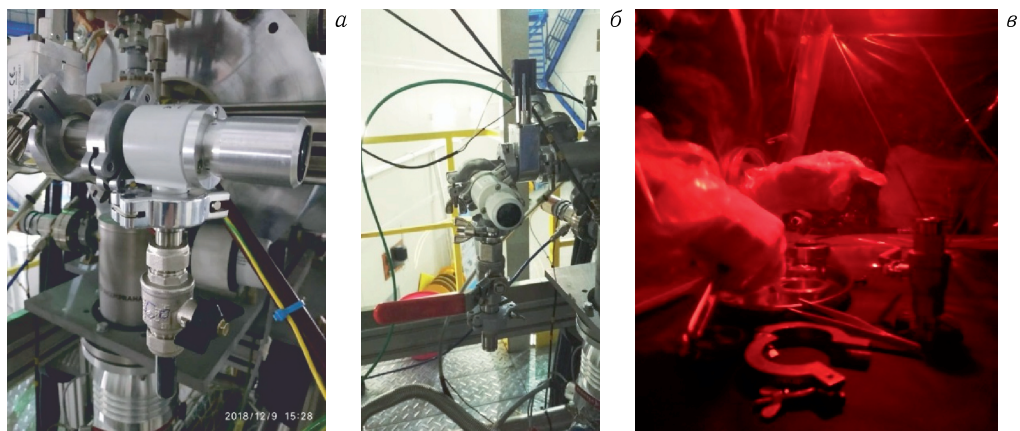


Рис. 2. а) Компаунд  $\text{Co}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ , присоединенный к ручному вентилю; б) компаунд  $\text{Ni}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ , присоединенный к ручному вентилю; в) процесс подготовки контейнера с  $\text{Ni}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$

Металлоорганическое соединение  $\text{Ni}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  обладает высокой химической активностью при взаимодействии с кислородом и является высокочувствительным к видимому свету. Поэтому подготовка MIVOC-камеры с компаундом  $\text{Ni}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$  проводилась в аргонном боксе при красном свете. На рис. 2, в представлен процесс подготовки компаунда.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ $^{58}\text{Ni}$ , $^{59}\text{Co}$ , $^{52}\text{Cr}$ И $^{28}\text{Si}$

Получение пучков ионов никеля осуществлялось при мощности СВЧ-генератора 260 Вт и кобальта при мощности 207 Вт. Спектры ионов никеля и кобальта представлены на рис. 3.

Для получения пучка ионов хрома ЭЦР-источник был настроен на выходную мощность 72 Вт, а для получения пучков ионов кремния — на 50 Вт. Спектры ионов хрома и кремния представлены на рис. 4.

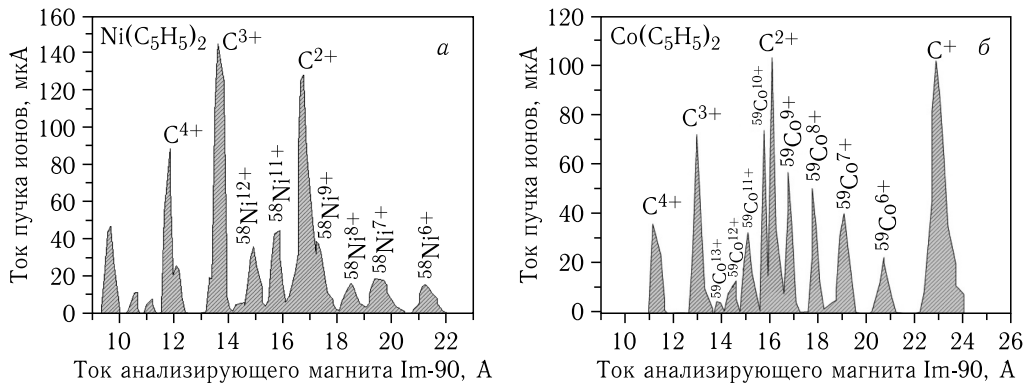


Рис. 3. а) Спектр ионов никеля, полученный из ЭЦР-источника DECRIS-3, оптимизация на  $^{58}\text{Ni}^{11+}$ ; б) спектр ионов кобальта, полученный из ЭЦР-источника DECRIS-3, оптимизация на  $^{59}\text{Co}^{12+}$

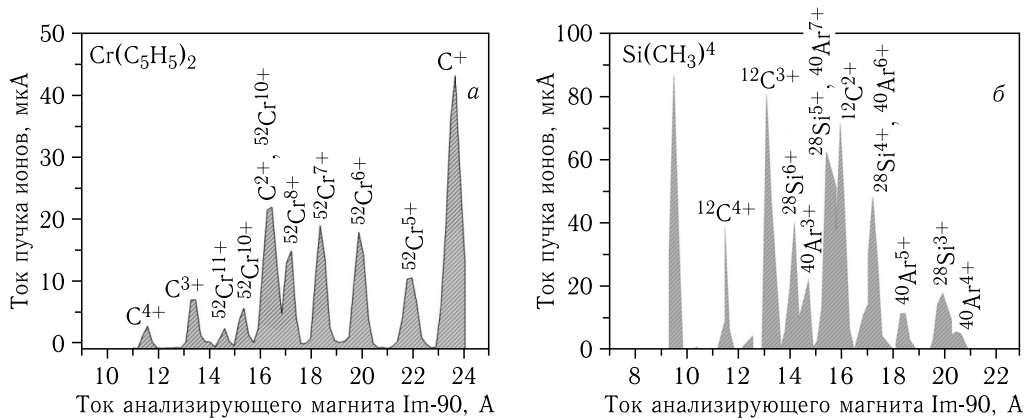


Рис. 4. а) Спектр ионов хрома, полученный из ЭЦР-источника DECRIS-3, оптимизация на  $^{52}\text{Cr}^{10+}$ . б) Спектр ионов кремния, полученный из ЭЦР-источника DECRIS-3, оптимизация на  $^{28}\text{Si}^{5+}$

### УСКОРЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ИОНОВ НА ЦИКЛОТРОНЕ ДЦ-60

Ускорение всех вышеперечисленных ионов проводилось до значения энергии 1,75 МэВ/нуклон (таблица). Т1FC1 — цилиндр Фарадея, расположенный на выходе пучка из циклотрона.

Ток пучка ионов до и после инъекции в циклотрон

Ион	Ток пучка на инъекции, мкА	Ток Т1FC1, мкА
$^{28}\text{Si}^{5+}$	24	0,63
$^{52}\text{Cr}^{10+}$	18	0,40
$^{58}\text{Ni}^{11+}$	43	1,50
$^{59}\text{Co}^{12+}$	12	0,70

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В филиале Института ядерной физики (Нур-Султан, Казахстан) были получены и ускорены до энергии 1,75 МэВ/нуклон ионы следующих элементов: никель, кобальт, хром и кремний.

Основное направление эксперимента — оптимизация процесса получения пучков ионов металлов из источника DECRIS-3. Критериями оценки результата являются интенсивности пучков описываемых ионов.

В результате проведенных исследований достигнуто расширение спектра ускоряемых ионов на циклотроне ДЦ-60. Это значительно увеличивает возможности для постановки экспериментов в области физики твердого тела, радиационной физики и нанотехнологий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bogomolov S. L. et al.* Production of Intense Metal Ion Beams from ECR Ion Sources Using the MIVOC Method // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2015. V. 12, No. 7. P. 824–830.
2. *Loginov V. N. et al.* Production of Intense Ion Beams of Boron and Iron Using the MIVOC Method from ECR Ion Source on the DC-60 Cyclotron // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2018. V. 15, No. 6. P. 627–629.
3. *Koivisto H., Arje J., Nurmi M.* Metal Ions from the Volatile Compounds Method for the Production of Metal Ion Beams // *Rev. Sci. Instr.* 1998. V. 69. P. 785–787.
4. *Koivisto H., Arje J., Nurmi M.* Metal Ion Beams from an ECR Ion Source Using Volatile Compounds // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1994. V. 94. P. 291–296.
5. *Waldmann H., Martin B.* // *Nucl. Instr. Meth. B.* 1995. V. 98. P. 532.
6. *Loginov V. N. et al.* Production of Intense Metal Ion Beams at the DC-60 Cyclotron // *J. Instrum.* 2019. V. 14, No. 2.
7. *Gikal B. et al.* DC-60 Heavy Ion Cyclotron Complex: The First Beams and Project Parameters // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5, No. 7. P. 642–644.

Получено 19 августа 2019 г.