

УДК 621.384.633.5

**ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ НА ЭЦР-ИСТОЧНИКЕ DECRIS-3  
МЕТОДАМИ НАГРЕВА ТВЕРДЫХ ВЕЩЕСТВ**

<sup>1)</sup> Иванов И.А., <sup>1)</sup> Самбаев Е.К., <sup>1)</sup> Козин С.Г., <sup>1)</sup> Курахмедов А.Е., <sup>1)</sup> Мустафин Д.А.,  
<sup>1)</sup> Александренко В.В., <sup>2)</sup> Бондарченко А.Е., <sup>2)</sup> Логинов В.Н., <sup>2)</sup> Богомолов С.Л.

<sup>1)</sup> Астанинский филиал Института ядерной физики, Астана, Казахстан  
<sup>2)</sup> Объединённый институт ядерных исследований, ЛЯР, Дубна, Россия

Для проведения ряда научно-технических задач в области радиационной физики твердого тела требуются ускоренные пучки ионов металлов, так, например, единственным методом для экспрессных оценок исследования радиационной повреждаемости, разрабатываемых конструкционных материалов ядерной техники является облучение ионами. Стандартные методы получения пучков ионов на ЭЦР-источниках из газовых смесей не могут полностью удовлетворить требования, предъявляемые экспериментом. Для увеличения спектра ускоряемых ионов на циклотроне ДЦ-60 проводятся работы по отработке методик нагрева твердых веществ для получения многозарядных пучков ионов металлов на ЭЦР-источнике DECRIS-3. Статья посвящена описанию методов получения пучков ионов металлов двумя способами: метод прямого введения вещества в плазму и метод нагрева тигля с рабочим веществом микрочашкой. В результате проведенной работы на циклотроне ДЦ-60 впервые были получены пучки ионов лития  ${}^{6,7}\text{Li}$ , магния  ${}^{24}\text{Mg}$ , фосфора  ${}^{31}\text{P}$  и кальция  ${}^{40}\text{Ca}$ . С использованием данных методов были получены пучки ионов лития  ${}^7\text{Li}^{1+}$  с расходом металла 1,1 мг/час и выведенным током пучка 500 мкА, магния  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$  с расходом вещества 2,1 мг/час и интенсивностью 81 мкА, фосфора с расходом вещества 1,7 мг/час при токе пучка  ${}^{31}\text{P}^{5+}$  60 мкА и кальция  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  с расходом вещества 0,7 мг/час при токе пучка 140 мкА.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время к ускорителям заряженных частиц предъявляют особые требования по типам ионов, их энергии, интенсивности и другим различным параметрам пучка ускоренных ионов. Для успешного выполнения ряда научно-технических задач в области радиационной физики твердого тела, нанотехнологии и ядерной физики требуется проводить работы по получению новых типов ионов на ускорителях.

Одним из путей создания веществ с модифицированными свойствами является облучение существующих материалов различными типами ионов и флюенсами. Изменяя условия облучения можно придавать определенные свойства не только поверхностным слоям металлов и полупроводников, но и высокопрочным материалам, тем самым расширяя область дальнейшего применения облученного материала [1]. Необходимым этапом создания новых радиационно-стойких конструкционных материалов ядерных и термоядерных установок являются радиационные испытания. Единственным методом для экспрессных оценок исследования радиационной повреждаемости разрабатываемых конструкционных материалов ядерной техники является облучение ионами. Моделирование нейтронного (реакторного) облучения осуществляется облучением альфа-частицами, тяжелыми ионами инертных газов и ионами металлов. Наиболее точное моделирование нейтронного облучения – облучение сплавов ионами того же сорта, что сам материал. При этом ион моделирует первично-выбитый нейтроном атом облучаемого материала, создает радиационные дефекты и не изменяет элементного состава материала [2].

В качестве основных методов получения пучков ионов металлов на электронно-циклотронных резонансных источниках (ЭЦР-источниках) можно выделить два способа: нагрев рабочего вещества и испарение металлоорганических соединений. Метод испарения металлоорганических соединений MIVOC (Metal Ion from Volatile Compound) впервые был предложен группой под руководством Н. Koivisto [3]. MIVOC метод основан на использовании высокого давления пара металлических соединений при комнатной температуре, при котором металлическое соединение помещают в контейнер и подключают к ЭЦР-источнику, вводя в плазму пары вещества, где и происходит его ионизация. MIVOC метод, в основном, применяют для получения пучков ионов из веществ с высокой температурой плавления. Метод нагрева рабочего вещества, в основном, применяется для получения пучков ионов из веществ с низкой температурой плавления. Два данных метода дополняют друг друга, так как спектр получаемых ионов практически не пересекается. В данной статье описан метод получения ионов с использованием нагрева рабочего материала.

Принимая во внимание всю ширину спектра использования тяжелых ионов работы в направлении изучения и улучшения методик ионизации различного рода веществ являются одним из приоритетных и актуальных направлений в области ускорительной техники. Подводя итог, получение новых типов ионов на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 [4] является приоритетным направлением для расширения спектра ускоряемых пучков ионов на циклотроне.

### МЕТОДЫ НАГРЕВА ВЕЩЕСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПУЧКОВ ИОНОВ

Методы нагрева можно разделить на два способа: метод прямого нагрева вещества плазмой в ЭЦР-источнике и метод нагрева вещества с использованием микроречки. Эти два стандартных метода получения ионного пучка на ЭЦР-источниках для большинства металлов предполагают нагревание исходного вещества в целях повышения его давления пара до достаточного уровня. Данные методы характеризуются испарением твердых или расплавленных материалов в условиях высокого вакуума.

Начиная с 60-х годов 20-го века, когда ЭЦР-источники нашли своё первое применение в ускорительной технике и термоядерных испытаниях, ведутся работы по техническому усовершенствованию устройств и методик ионизации материалов [5]. Развитие методик ионизации материалов на ЭЦР-источниках значительно расширяет спектр получаемых ионов, используемых для решения научно-технических задач.

*Метод прямого введения* подробно изучался на источнике CAPRICE в Гренобле для широкого набора элементов, от алюминия до золота. Эксперименты показали эффективность данного метода для ионизации твердотельных элементов [6]. Сутью метода является преобразование агрегатного состояния рабочего вещества из твёрдого в газообразное за счёт высокой температуры плазмы вспомогательного газа. В камере источника предварительно разжигается плазма, состоящая из ионов вспомогательного газа He, Ar, O, для поддержания температуры испарения твёрдого вещества.

Основной проблемой метода прямого введения вещества в плазму является постоянная поддержка необходимой температуры для равномерного испарения рабочего вещества. При слишком высокой температуре плазмы в области контейнера существует высокая вероятность испарения всего материала, который впоследствии оседает на холодных элементах ЭЦР-источника вдали от плазмы. В такой ситуации расход вещества будет нерациональным и дальнейшая работа источника не представляется возможной вследствие ухудшения стабильности экстракции ионов из источника. Если же температура окажется недостаточной для поддержания процесса равномерного испарения материала, то вещество будет кристаллизоваться и тем самым процесс ионизации вещества прекратится. Для решения данных проблем на ионном источнике циклотрона ДЦ-60 контейнер с веществом устанавливается на подвижном держателе внутри коаксиального волновода таким образом, что его положение дистанционно регулируется в диапазоне  $\pm 15$  мм относительно края коаксиального волновода. Таким образом, изменяя положение держателя производится регулирование температуры нагрева материала.

Для подачи рабочего вещества в ЭЦР-источник используется специальный шлюз подачи твердых веществ. На рисунке 1 представлена схема шлюза подачи твёрдых веществ используемого на ЭЦР-источнике типа DECRIС-3 [7] ускорительного комплекса ДЦ-60.

Данная конструкция универсальна, так как держатель рассчитан на установку контейнера, тигля, а также металлического стержня рабочего материала. Держатель испарителя представляет собой коаксиальную конструкцию, центральный проводник которой входит в электрический контакт 3 испарителя (рисунок 2, а). Механизм подачи обеспечивает прецизионную установку рабочего вещества в плазменную камеру с точностью не хуже 0,1 мм.

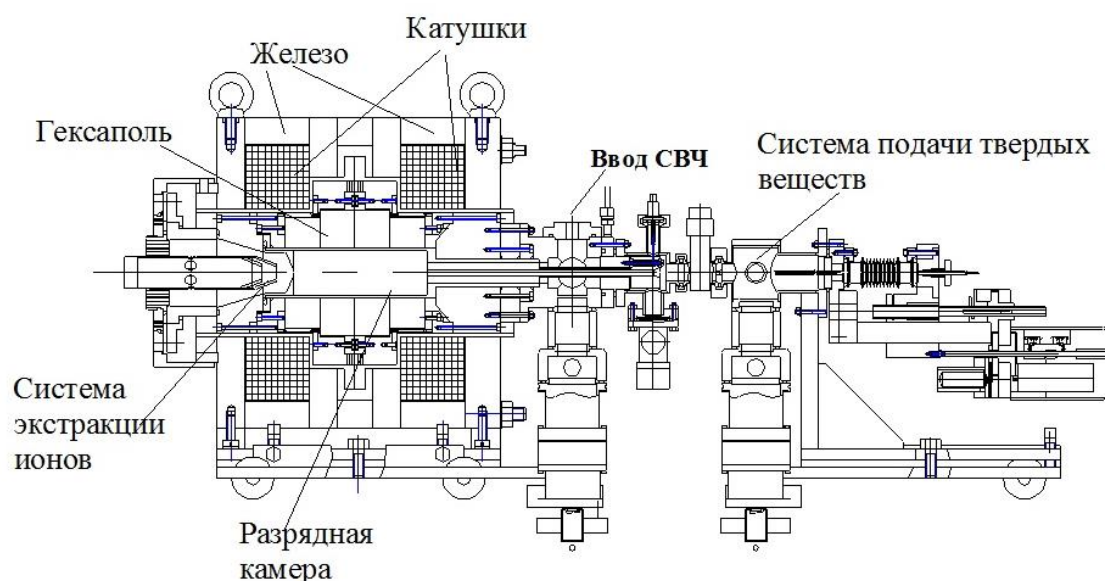


Рисунок 1. Система подачи твердых веществ в ЭЦР источник

Металлы с низкой температурой плавления под действием высоких температур, исходящих от плазмы, быстро расплавляются и стекают на стенки ионизационной камеры, делая процесс неконтролируемым. Поэтому в случае использования легкоплавких материалов в качестве рабочего вещества, таких как Li, Bi и др., материал помещается в специальный контейнер, изготовленный из тугоплавкого металла, чаще всего тантала. На выходе из контейнера устанавливается пористый барьер, предотвращающий выход расплавленного металла и не препятствующий выходу паров. Чаще всего контейнеры используются в совокупности с микропечами, которые позволяют дополнительно регулировать температуру.

Метод нагрева вещества с использованием микропечи хорошо работает в случае низкотемпературных материалов, например лития, магния, кальция и висмута. Устойчивая работа и эффективное использование печи обеспечиваются благодаря контролю её температуры. Печь размещается таким образом, чтобы атомы испарённого металла попадали в ЭЦР-плазму и ионизировались электронным ударом. При работе печи плазма в источнике ионов поддерживается с помощью введения опорного газа (гелия или кислорода). Количество металла в плазме регулируется изменением температуры печи. Для поддержания постоянной температуры используется пропорциональный терморегулятор. Стабильность выводимого пучка из источника при работе микропечи очень высока. За счёт этого достигаются оптимальные характеристики пучка ионов с минимальным расходом рабочего вещества.

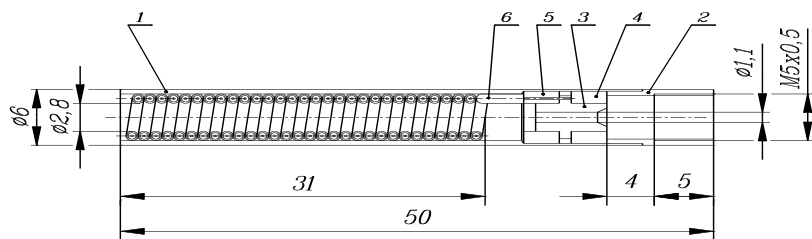
#### ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ

Работы по получению пучков ионов металлов произведены в Астанинском филиале Института ядерной физики на циклотроне ДЦ-60. Циклотрон ДЦ-60 предназначен для получения ионов от Li до Xe с соотношением  $A/Z$  в диапазоне  $6 \div 12$  и энергиями выведенных пучков от 0,4 до 1,75 МэВ/нуклон. Ускоритель оснащен ЭЦР-источником DECRIS-3 с СВЧ-генератором частотой 14,5 ГГц. Основные па-

раметры источника: магнитное поле со стороны инжекции и экстракции пучка ионов 1,3 и 1,1 Тл соответственно, постоянное поле на стенках ЭЦР-камеры от гексаполя 1,0 Тл, длина камеры источника 20 см, диаметр камеры источника 6,4 см. Камера источника электрически изолирована до 25 кВ.

Тигель с рабочим веществом устанавливается в испаритель (рисунок 2), который установлен на держателе. Микропечь с находящимся внутри контейнером с рабочим веществом обеспечивает его испарение в ионизационную камеру. Максимальная температура в микропечи составляет 900 °С (рисунок 3). Стандартный танталовый тигель длиной 28 мм, внутренним диаметром 2 мм и внешним диаметром 2,8 мм, нагревается посредством специального коаксиального кабеля с внутренним никромовым проводником с минеральной изоляцией, который размещен в оболочке из нержавеющей стали.

В некоторых случаях, для увеличения времени работы источника используется тигель с увеличенным объемом. На рисунках 4а, 4б представлены изображения стандартного тигля и тигля увеличенного объема, соответственно. В тигле с увеличенным объемом центральный 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 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 плазмы. Температура контейнера контролируется изменением его положения в камере источника. Мощность нагрева контейнера со стороны испарителя является дополнительной регулировкой для настройки скорости испарения материала.



1, 2 – корпус, 3 – электрический контакт, 4, 5 – керамические изоляторы, 6 – нагреватель

а)



б)

Рисунок 2. Конструкция (а) и внешний вид испарителя (б)

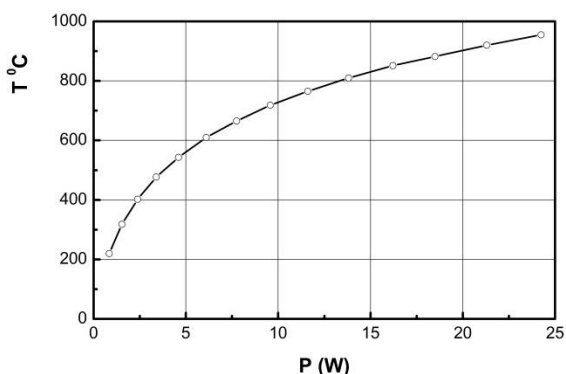
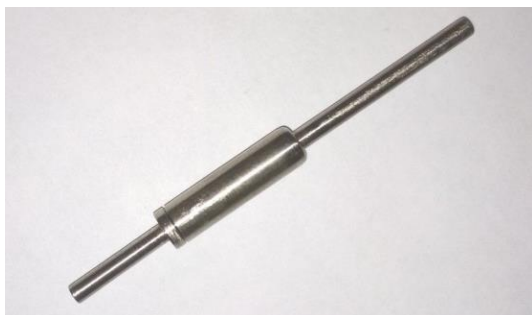


Рисунок 3. Зависимость температуры испарителя от мощности нагрева



а)



б)

Рисунок 4. Стандартный тигель (а) и тигель увеличенного объема (б)

На рисунке 5 представлен спектр ионов лития на ЭЦР-источнике, получаемый методом прямого введения в плазму контейнера с литием. На рисунке 6 представлен полученный спектр ионов лития в источнике с использованием нагрева тигля. Рабочая температура нагрева тигля составляла 200 °С. Расход металла при получении ионов лития с использованием контейнера и тигля составил 0,7 и 1,1 мг/час с выведенным током пучка ионов  ${}^7\text{Li}^{1+}$  200 и 500 мкА соответственно.

Ток пучка ионов магния  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$ , получаемый с использованием контейнера составил 81 мкА, с расходом вещества 2,1 мг/час. Полученный спектр ионов магния представлен на рисунке 7.

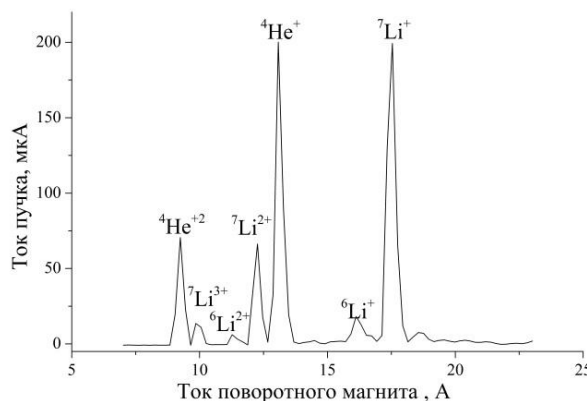


Рисунок 5. Спектр ионов лития, полученный с использованием контейнера

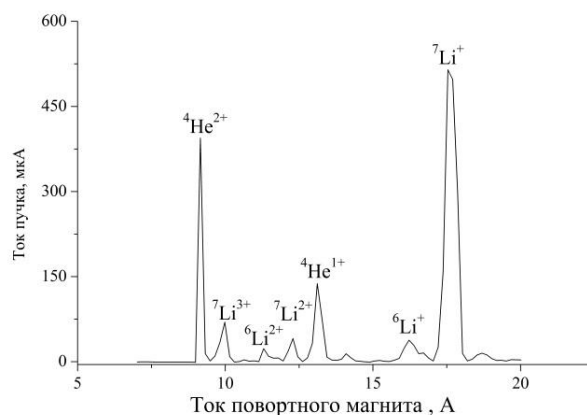


Рисунок 6. Спектр ионов лития, полученный с использованием тигля

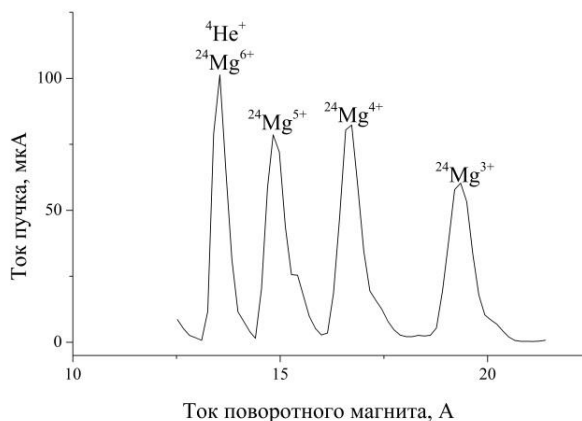


Рисунок 7. Спектр ионов магния, полученный с использованием контейнера

Получение ионов кальция проводилось с тигля, нагрев микropечи составил 720 °С. Настройка режима работы ЭЦР-источника оптимизировалась для получения ионов кальция  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  с ионным током 140 мкА и  ${}^{40}\text{Ca}^{7+}$  с током 75 мкА, расход рабочего вещества составил 0,7 мг/час. Полученный спектр ионов приведен на рисунке 8.

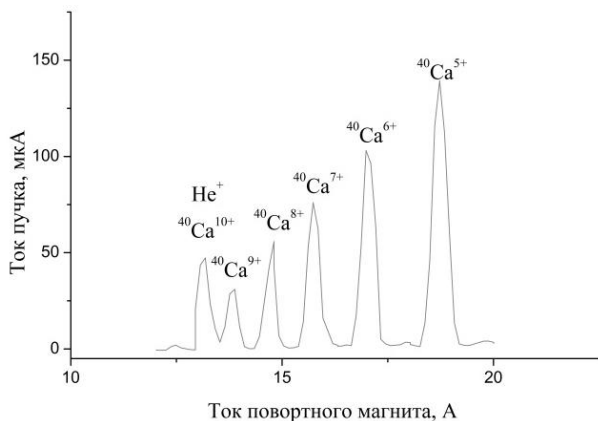


Рисунок 8. Спектр ионов кальция, полученный с использованием тигля

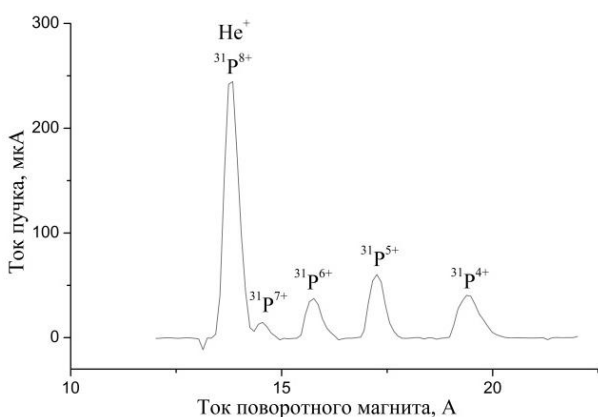


Рисунок 9. Спектр ионов фосфора, полученный с использованием тигля

Пучок ионов фосфора получали с использованием тигля. Полученный спектр ионов фосфора представлен на рисунке 9. Температура нагрева микропечи составила 100 °С. Расход фосфора составил 1,7 мг/час при токе пучка ионов фосфора  $^{31}\text{P}^{5+}$  60 мкА. В качестве рабочего вещества использовался красный фосфор.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие методик получения пучков ионов на ЭЦР-источниках из твердотельных веществ значительно расширяет возможности электрофизических установок. Основной целью данной работы являлась отработка методик получения пучков ионов металлов из твердых веществ на циклотроне ДЦ-60. В результате проведенной работы, на циклотроне ДЦ-60 впервые были получены пучки ионов лития  $^6,7\text{Li}$ , магния  $^{24}\text{Mg}$ , фосфора  $^{31}\text{P}$  и кальция  $^{40}\text{Ca}$ .

*Данная работа выполнена в рамках проекта ИРН №АР05133476 «Сравнительные исследования тонкой структуры области повреждения металлов и сплавов, облученных ионами металлов и инертных газов» финансируемого МОН РК.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. I.P. Jain, Garima Agarwal. Ion beam induced surface and interface engineering // Surface Science Reports. – 2011. – Vol. 66. – P. 77–172.
2. E.Getto, K.Sun, S.Taller, A.M.Monterrosa, Z.Jiao, G.S.Was. Methodology for determining void swelling at very high damage under ion irradiation // Journal of Nuclear Materials. – 2016. –V. – 477. – P. 273–27.
3. Koivisto H. The MIVOC method for production of metal ion beams. – University of Jyväskylä, 1998. – P. 84.
4. M. Zdorovets, I.A. Ivanov, M. Koloberdin, S. Kozin, V. Alexandrenko, E. Sambaev, A. Kurakhmedov, A. Ryskulov. Accelerator complex based on DC-60 cyclotron // Material of XXIV Russian particle accelerator conference RUPAC 2014 (Obninsk, Russia, 6-10 October 2014). – P. 287–289.
5. Браун Я. и др. Физика и технология источников ионов / пер. с англ.: под ред. Машковой Е.С. – М.: Издательство Мир, 1997. – 495 с.
6. G. Melin, D. Hitz, F. Bourg, M. Delaunay, A. Girard, H. Khodja, P. Ludwig // The CAPRICE ECR source of multicharged ions new results and new prototype. Epac 96: Proceedings of the Fifth European Particle Accelerator Conference. – V3. – 1996. – P. 2704–2706.
7. S.L. Bogomolov, A.A. Efremov, V.B. Kutner, A.N. Lebedev, V.N. Loginov, N. Yu. Yazvitsky. Operation and Resent Development of ECR Ion Sources at the FLNR (JINR) Cyclotrons // Cyclotrons'98: Material of 15<sup>th</sup> International Conference on Cyclotron and their Applications. – Caen, France. – 1998. – P.405–408.

## МЕТАЛДАР ИОНДАРЫНЫҢ ШОҒЫРЫН DECRIS-3 ЭЦР-КӨЗІНДЕ ҚАТТЫ ЗАТТАРДЫ ҚЫЗДЫРУ ӘДІСІМЕН АЛУ

<sup>1)</sup> И.А. Иванов, <sup>1)</sup> Е.К. Самбаев, <sup>1)</sup> С.Г. Козин, <sup>1)</sup> А.Е. Курахмедов, <sup>1)</sup> Д.А. Мустафин,  
<sup>1)</sup> В.В. Александренко, <sup>2)</sup> А.Е. Бондарченко, <sup>2)</sup> В.Н. Логинов, <sup>2)</sup> С.Л. Богомолов

<sup>1)</sup> *Ядролық физика институтының Астаналық филиалы, Астана, Қазақстан*

<sup>2)</sup> *Біріккен ядролық зерттеулер институты, ЯРЗ, Дубна, Ресей*

Қатты денелер радиациялық физикасы саласында бірқатар ғылыми-техникалық мәселелерді шешу үшін металдар иондарының үдетілген шоғыры қажет, мысалға, иондармен сәулелендіру – ядролық техникалардың құрылымдық материалдарын әзірлеу кезіндегі радиациялық зақымдануды зерттеуде экспресс бағалаудың жалғыз әдісі болып табылады. Газ қоспаларынан ЭЦР-көзінде иондардың шоғырын алудың стандартты әдістері тәжірибеде қойылған талаптарды толығымен қанағаттандыра алмайды. ДЦ-60 циклотронында үдетілітін иондардың спектрін ұлғайту үшін DECRIS-3 ЭЦР-көзінде көп зарядталған металдар иондарының шоғырын алу мақсатымен қатты заттарды қыздыру әдісін әзірлеу бойынша жұмыстар жүргізілуде. Мақалада металдар иондарының шоғырын алудың екі әдісі сипатталған: заттардың плазмаға тікелей енгізу әдісі және микро пешпен жұмыс істейтін зат салынған тигельді қыздыру әдісі. Жүргізілген жұмыстардың нәтижесінде ДЦ-60 циклотронында алғаш рет  ${}^{6,7}\text{Li}$  литий,  ${}^{24}\text{Mg}$  магний,  ${}^{31}\text{P}$  фосфор және  ${}^{40}\text{Ca}$  кальций иондарының шоғыры алынды. Осы әдістерді пайдалана отырып, металл шығыны 1,1 мг/сағ, шоғырдың шығу тоғы 500 мкА  ${}^7\text{Li}^{1+}$  литий, зат шығыны 2,1 мг/сағ, қарқындылығы 81 мкА  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$  магний, шоғырдың тоғы 60 мкА, зат шығыны 1,7 мг/сағ кезінде  ${}^{31}\text{P}^{5+}$  фосфор және шоғырдың тоғы 140 мкА, зат шығыны 0,7 мг/сағ кезінде  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  кальций иондарының шоғыры алынды.

## METAL ION BEAMS PRODUCTION AT ECR-SOURCE “DECRIS-3” WITH SOLID STATES HEATING TECHNIQUE

<sup>1)</sup> I.A. Ivanov, <sup>1)</sup> Y.K. Sambayev, <sup>1)</sup> S.G. Kozin, <sup>1)</sup> A.E. Kurakhmedov, <sup>1)</sup> D.A. Mustafin,  
<sup>1)</sup> V.V. Alexandrenko, <sup>2)</sup> A.E. Bondarchenko, <sup>2)</sup> V.N. Loginov, <sup>2)</sup> S.L. Bogomolov

<sup>1)</sup> *Astana branch of Institute of Nuclear Physics, Astana, Kazakhstan*

<sup>2)</sup> *Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

Accelerated beams of metal ions are required for a series of scientific and technical tasks in the field of radiation physics of a solid state, for example, the only method for rapid assessments of the radiation damage investigation, the developed structural materials of nuclear technology is ion irradiation. The standard methods for production ion beams at ECR-sources from gas mixtures cannot fully meet the requirements of the experiment. To increase the spectrum of accelerated ions at the cyclotron DC-60 is working on developing methods of heating the solid substances to produce multiply charged ion beams of metals into an ECR ion source DECRIS-3. The article is dedicated to description of methods of production ion beams of metals in two ways: the direct injection of a substance into plasma and a method of heating the crucible with a working substance by micro-furnace. As a result of the work carried out on the DC-60 cyclotron, beams of lithium ions  ${}^{6,7}\text{Li}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$  magnesium,  ${}^{31}\text{P}$  phosphorus and  ${}^{40}\text{Ca}$  calcium were produced for the first time. Using these methods was produced beams of lithium ions  ${}^7\text{Li}^{1+}$  metal consumption of 1.1 mg/hour and derived a ion beam current of 500  $\mu\text{A}$ , magnesium  ${}^{24}\text{Mg}^{4+}$  with the consumption of the substance 2.1 mg/hour and intensity of 81  $\mu\text{A}$ , phosphorus consumption of substances 1.7 mg/hour at the beam current  ${}^{31}\text{P}^{5+}$  60  $\mu\text{A}$  and calcium  ${}^{40}\text{Ca}^{5+}$  with the consumption of a substance of 0.7 mg/hour when the beam current is 140  $\mu\text{A}$ .