

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК: 621.3.038.612

ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ИЗ ЭЦР-ИСТОЧНИКОВ В
ЛЯР ОИЯИ¹

© 2024 г. А. Е. Бондарченко^{а*}, С. Л. Богомолов^а, **А. А. Ефремов^а**,

В. Н. Логинов^а, В. Е. Миронов^а, Д. К. Пугачев^а, А. А. Протасов^а

^аОбъединенный институт ядерных исследований, лаборатория ядерных исследований
Россия, 141980, Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6

*e-mail: bondarchenko@jinr.ru

Поступила в редакцию 29.02.2024 г.

После доработки 11.03.2024 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

Представлены исследования по получению пучков ионов Al и Ti различными методами. Эксперименты проводились с источниками ионов DECRIS-2M и DECRIS-PM на стенде электронно-резонансных источников ионов и на циклотроне ДЦ-280.

1. ВВЕДЕНИЕ

Программа исследований Лаборатории ядерных реакций им. Флерова (ОИЯИ) по синтезу сверхтяжелых элементов и прикладным исследованиям предполагает создание интенсивных ускоренных пучков твердых материалов. Постоянно ведутся разработки по расширению диапазона доступных пучков для физики.

Разработаны несколько методов получения ионов из твердых веществ. Твердые вещества можно испарять из контейнера или индукционной печи, которые вставлены в камеру источника [1, 2]. Тугоплавкие металлы можно распылять ионами плазмы [3] или вводить в плазму с последующим нагревом энергетичными электронами плазмы (“метод введения”) [4]. Другим способом получения ионов твердых тел является подача в плазму металлоорганического соединения методом MIVOC [5, 6].

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

Эксперименты по получению пучков ионов Al и Ti проводились на стенде электронно-циклотронных резонансных (ЭЦР) источников ионов и на циклотроне ДЦ-280 с ЭЦР-источниками ионов DECRIS-2М [7] и DECRIS-PM [8] соответственно.

2. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ АЛЮМИНИЯ

Для получения пучка ионов Al из ЭЦР-источников ионов методом испарения необходимая температура находится в диапазоне 1300–1400 °С, при которой Al имеет жидкую фазу. С помощью резистивной [1] и индукционной [9] печей были получены интенсивные пучки ионов Al. Результаты получения ионов Al методом введения (в качестве рабочего вещества использовался стержень Al₂O₃) представлены в [10].

Для экспериментов по получению ионов Al методом введения мы использовали стержни Al₂O₃ и Al. Оба стержня имеют диаметр 4 мм и длину 74 мм. Образец фиксируется на держателе печи с помощью адаптера. Позицией образца относительно плазмы можно было управлять дистанционно. Фото образцов после операции представлено на рис.1.

Рис. 1. Образцы Al₂O₃ (вверху) и Al (внизу) после эксплуатации.

В эксперименте в качестве дополнительного газа для обоих образцов использовался кислород. Спектры пучка ионов Al, полученного из образцов Al₂O₃ и Al, представлен соответственно на рис. 2 и 3.

Рис. 2. Спектр ионов алюминия, полученный из образца Al₂O₃ с помощью источника DECRIS-2М на стенде ЭЦР.

Рис. 3. Спектр ионов алюминия, полученный из образца Al с помощью источника DECRIS-2М на стенде ЭЦР

На обоих образцах, использованных в эксперименте, работа источника была стабильной и воспроизводимой.

Альтернативным способом получения ионов твердых веществ является использование летучих соединений – MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds). Этот метод успешно использовался для получения ионов B, Fe, Cr, Co, V и др. [6].

Для получения ионов Al использовались соединения триметилалюминия (CAS 75-24-1) – (CH₃)₃Al. Это вещество представляет собой жидкость с довольно высоким давлением паров – несколько десятков Торр при комнатной температуре и чувствительно к воздуху и влаге, что

требует особой осторожности при обращении с составом. Соединение подавалось в источник через регулируемый вручную клапан. Спектр ионов Al представлен на рис. 4. Настройки источника были оптимизированы для получения ионов Al⁵⁺.

Рис. 4. Спектр ионов алюминия, полученных из соединения (CH₃)₃Al с помощью источника DECRIS-2M на стенде ЭЦР.

3. ПОЛУЧЕНИЕ ПУЧКОВ ИОНОВ ТИТАНА

Эксперименты по синтезу сверхтяжелых элементов требуют создания интенсивных пучков ускоренных нейтронно-обогащенных изотопов, таких как ⁵⁰Ti, ⁵⁸Fe и ⁶⁴Ni. Использование новых изотопов для получения ускоренных пучков требует поиска путей оптимизации режима работы ЭЦР-источника и разработки технологии подачи материала.

С использованием метода MIVOC проведено несколько серий длительных экспериментов по спектроскопии сверхтяжелых элементов на циклотроне У-400 с пучком ускоренных ионов ⁵⁰Ti⁵⁺. Интенсивность пучка 0.5 пмкА поддерживалась на мишени в течение нескольких недель без каких-либо помех [6].

Для экспериментов на циклотроне ДЦ-280 необходимая интенсивность ионов ⁵⁰Ti¹⁰⁺ составляет 5–10 пмкА. В ходе экспериментов мы не достигли проектных значений интенсивности пучка ионов титана. В стабильном режиме работы интенсивность пучка ионов ⁵⁰Ti¹⁰⁺ находилась в диапазоне 3–5 пмкА [11, 12].

В качестве альтернативного пути мы провели эксперименты по созданию пучка ионов Ti с использованием плазмы SF₆. Этот метод был успешно использован для получения ионов Ta и Ge [13, 14].

Первый эксперимент был выполнен на стенде с источником DECRIS-2M. В камере источника был установлен тонкий цилиндрический лист из Ti. Сначала источник был запущен в работу на газе Ar, пиков ионов Ti не наблюдалось. Потом в плазменную камеру вводился элегаз с соответствующим уменьшением потока Ar. Из-за перекрытия пиков ионов S, F, Ar и Ti источник был настроен на Ti⁴⁺, что можно четко идентифицировать, интенсивность пучка Ti⁴⁺ составляла около 150 мкА с достаточно хорошей стабильностью. Затем аналогичный эксперимент был проведен на циклотроне DC-280 с источником DECRIS-PM. В камеру источника устанавливался тонкий цилиндрический лист и крышка со стороны экстракции из Ti (рис.5).

Рис. 5. Титановый цилиндрический лист и крышка.

Источник настроен на Ti^{11+} , который можно четко идентифицировать. Соответствующий спектр показан на рис.6, интенсивность Ti^{11+} составляет около 70 мкА. После настройки ионы источника Ti^{10+} были ускорены, и выведенный пучок с интенсивностью 32 мкА был получен с хорошей стабильностью.

Рис. 6. Спектр ионов титана, полученный с помощью источника DECRIS-PM на циклотроне DC-280.

Для второго эксперимента, выполненного с источником DECRIS-PM, цилиндрический лист и экстракционная крышка были удалены из камеры, а bias-электрод был изготовлен из Ti вместо Al в первом эксперименте диаметром 30 мм (рис.7).

Рис. 7. Bias-электрод из титана. Площадь зоны эрозии (треугольная звезда) оценивается в 250 мм².

В этом эксперименте также был получен стабильный пучок ионов Ti от источника с СВЧ-мощностью 227 Вт, но с меньшей интенсивностью – около 30 мкА ионов Ti^{11+} . Коэффициент уменьшения интенсивности Ti^{11+} составляет около 2, но соотношение площадей зон эрозии для двух экспериментов составляет около 20. Следует отметить, что bias-электрод поддерживается при отрицательном потенциале около 500 В, поэтому во втором эксперименте распыление Ti -электрода может дать вклад в извлекаемый ток.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлены несколько методов получения пучка ионов Al . По результатам экспериментов можно сделать вывод, что наибольший ток ионов Al^{6+} (до 250 мк) получен методом введения с использованием образца Al_2O_3 . Метод надежен, но требует дистанционного контроля положения образца и тщательной настройки. Метод MIVOC для получения ионов Al также показывает довольно хорошие результаты, и, вероятно, настройка сложного потока с помощью дистанционно управляемого клапана может обеспечить более высокий ток. Также мы продемонстрировали возможность получения ионов Ti с использованием элегаза SF_6 . Этот метод обеспечивает интенсивный и стабильный пучок и не требует какого-либо оборудования для испарения твердого металла. Для этого метода необходимо провести оптимизацию положения образца и его поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Wutte D., Abbott S., Leitner M.A., Lyneis C.M.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2002. V. 73. № 2. P. 521. <https://doi.org/10.1063/1.1425781>
2. *Harkewicz R.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1996. V. 67. P. 2176. <https://doi.org/10.1063/1.1147033>
3. *Harkewicz R., Billquist P., Pardo R. et al.*, // *Rev. Sci. Instrum.* 1995. V. 66. P. 2883. <https://doi.org/10.1063/1.1146501>
4. *Ohshiro Y., Yamaka S., Watanabe S. et al.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2014. V. 85. P. 02A912. <https://doi.org/10.1063/1.4825076>
5. *Koivisto H., Arje J., Nurmi M.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1998. V. 69. P. 785. <https://doi.org/10.1063/1.1148539>
6. *Bogomolov S.L., Bondarchenko A., Efremov A. et al.* // *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2015. V. 12. № 7. P. 824. <http://doi.org/10.1134/S1547477115070043>
7. *Bondarchenko A.E., Bogomolov S., Efremov A. et al.* // *Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia.* 2021. P. 307. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB37>
8. *Bogomolov S.L., Bondarchenko A., Efremov A. et al.* // *Phys. Part. Nuclei Lett.* 2018. V. 15. № 7. P. 878. <http://doi.org/10.1134/S1547477118070191>
9. *Lu W., Feng Y.C., Guo J.W. et al.* // *Proc. ECRIS'20. East Lansing, MI, USA.* 2020. P. 65. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ECRIS2020-TUWZO03>
10. *Nakagawa T., Yano Y.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2000. V. 71. P. 637. <https://doi.org/10.1063/1.1150335>
11. *Bogomolov S.L., Bondarchenko A., Efremov A. et al.* // *Proc. ECRIS'20. East Lansing, MI, USA.* 2020. P. 43. <https://doi.org/10.18429/JACoW-ECRIS2020-MOZZO01>
12. *Pugachev D.K., Bogomolov S., Bondarchenko A. et al.* // *Proc. RuPAC'21. Alushta, Russia.* 2021. P. 303. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB36>
13. *Saitoh Y., Ohkoshi K., Yokota W.* // *Rev. Sci. Instrum.* 1998. V. 69. P. 703. <https://doi.org/10.1063/1.1148569>
14. *Leherissier P., Barue C., Canet C. et al.* // *Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. B.* 2003. V. 211. P. 274. [http://doi.org/10.1016/S0168-583X\(03\)01213-8](http://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)01213-8)

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Образцы Al_2O_3 (верхний) и Al (нижний) после эксплуатации.

Рис. 2. Спектр ионов алюминия, полученный из образца Al_2O_3 с помощью источника DECRIS-2M на стенде ЭЦР. Настройки источника оптимизированы для получения ионов Al^{6+} при СВЧ-мощности 417 Вт.

Рис. 3. Спектр ионов алюминия, полученный из образца Al с помощью источника DECRIS-2M на стенде ЭЦР. Настройки источника оптимизированы для получения ионов Al^{6+} при СВЧ-мощности 421 Вт.

Рис. 4. Спектр ионов алюминия, полученных из соединения $(CH_3)_3Al$ с помощью источника DECRIS-2M на стенде ЭЦР. Настройки источника были оптимизированы для получения ионов Al^{6+} при СВЧ-мощности 45 Вт.

Рис. 5. Титановый цилиндрический лист и крышка. Красными прямоугольниками обозначены зоны эрозии материала после эксплуатации. Расчетная площадь зон эрозии составляет около 5000 мм^2 .

Рис. 6. Спектр ионов титана, полученный с помощью источника DECRIS-PM на циклотроне DC-280. Настройки источника были оптимизированы для получения ионов Ti^{11+} при СВЧ-мощности 278 Вт.

Рис. 7. Bias-электрод из титана. Площадь зоны эрозии (треугольная звезда) оценивается в 250 мм^2 .



Рис. 1.

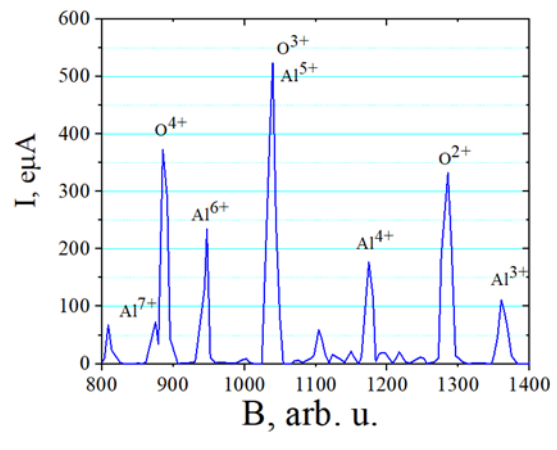


Рис. 2.

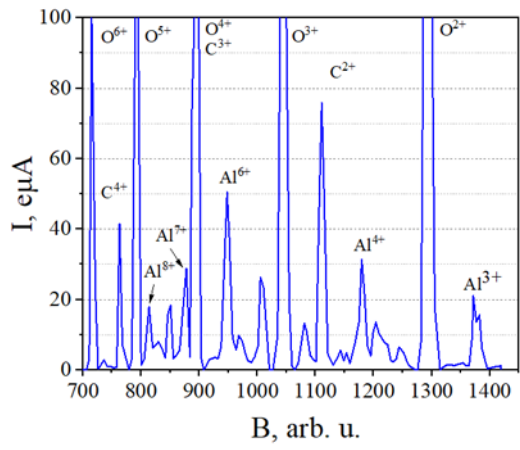


Рис. 3.

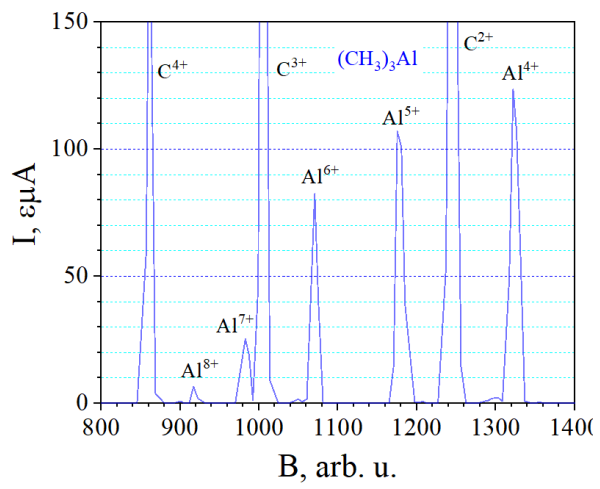


Рис. 4.

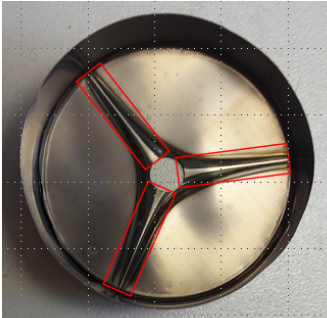
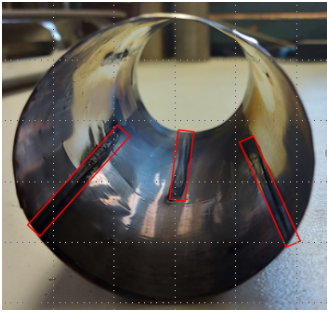


Рис. 5.

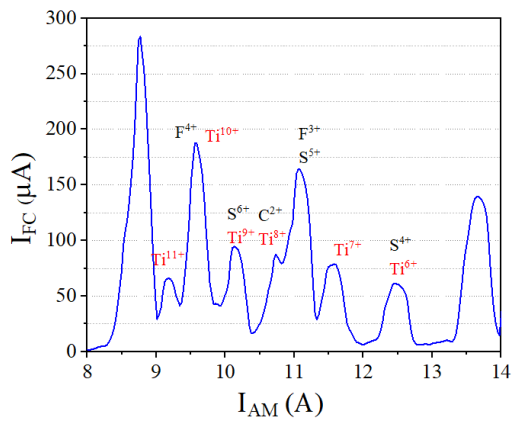


Рис. 6.

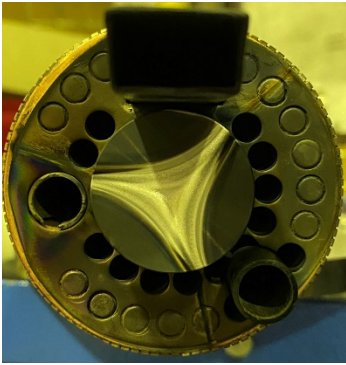


Рис. 7.

Для связи с авторами:

Бондарченко Андрей Евгеньевич

E-mail: bondarchenko@jinr.ru

Тел.: 8-910-401-42-17 (моб.)

Для переводчика:

Metallic ion beams development with ECR ion sources at FLNR JINR

A. Bondarchenko, S. Bogomolov, A. **Efremov, V.** Loginov, V. Mironov, D. Pugachev, A. Protasov
Joint Institute for Nuclear Research, FLNR, Dubna, Russia

Abstract

The research program of Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR) in the synthesis of Super Heavy Elements and in applied research requires the production of intense accelerated beams of solid materials. Constant developments are being made to broaden the range of available beams for physics.

In this paper we report the results of production Al and Ti ion beams with different methods. The experiments were performed with DECRIS-2M and DECRIS-PM ion sources at ECR test bench and at the DC-280 cyclotron.

Introduction

Several methods for the production of ions from solid materials have been developed. Solid materials can be evaporated from a resistor or inductive oven inserted into a source chamber [1, 2]. Refractory metals can be sputtered by plasma ions [3] or inserted into plasma with subsequent heating by energetic plasma electrons (“insertion technique”) [4]. Another way of producing ions of solids is to feed plasma of an organometallic compound using the MIVOC method [5, 6].

The experiments on production of Al and Ti ion beams were performed at the ECR ion sources test bench and at the DC-280 cyclotron with the ECR ion sources DECRIS-2M [7] and DECRIS-PM [8], correspondently.

Production of Al ion beam

For production of Al ion beam from ECR ion sources by evaporation method the required temperature is in the range of $1300 \div 1400$ °C, and at this temperature Al is in a liquid phase. With the use of resistive [1] and inductive [9] ovens the intense beams of Al ions were produced. The results of Al ions production with use of insertion technique (Al₂O₃ rod was used as a working substance) are reported in [10].

For the experiments on production of Al ions by insertion technique we used Al₂O₃ and Al rods. Both rods have diameter of 4 mm, and the length of 74 mm. The sample is fixed on the oven holder via an adapter. It was possible to remotely control the position of the sample with respect to plasma. The photo of the samples after operation is presented on the Figure 1.

Fig.1 The Al₂O₃ (a) and Al (b) samples after operation.

In the experiment oxygen was used as a support gas with both samples. The spectrum of Al ion beam, produced from the Al₂O₃ and Al samples are presented in Figures 2 and 3, correspondently.

Fig.2 Aluminum ion spectrum, produced from Al₂O₃ sample with the DECRIS-2M source at the test bench. The source settings are optimized for production of Al⁶⁺ ions at UHF power of 417 W.

Fig.3 Aluminum ion spectrum, produced from Al sample with the DECRIS-2M source at the test bench. The source settings are optimized for production of Al⁶⁺ ions at UHF power of 421 W.

With both samples, used in the experiment, the operation of the source was stable and reproducible.

The alternative way to produce ions of solids is the use of volatile compounds – MIVOC (Metal Ions from Volatile Compounds). This method was successfully used for production of ions of B, Fe, Cr, Co, V etc. [6].

For production of Al ions, the compound trimethylaluminum (CAS 75-24-1) - $(\text{CH}_3)_3\text{Al}$ – was used. This substance is a liquid with a rather high vapor pressure – several tens torr at room temperature, and is sensitive to air and moisture. This requires the special cares while handling compound. The compound was fed into the source through a manually regulated valve.

The spectrum of Al ions is presented in Figure 4. The source settings were optimized for production of Al^{5+} ions.

Fig.4 Aluminum ion spectrum, produced from $(\text{CH}_3)_3\text{Al}$ compound with the DECRIS-2M source at the test bench. The source settings were optimized for production of Al^{6+} ions at UHF power of 45 W.

Production of Ti ion beam

The experiments on synthesis of superheavy elements requires the production of intense beams of accelerated neutron enriched isotopes, such as ^{50}Ti , ^{58}Fe , and ^{64}Ni . The use of new isotopes for the production of accelerated beams calls for searching for ways of optimization of the ECR source operation mode and the development of a material feeding technique.

With the use of MIVOC technique several runs of long term experiments on the spectroscopy of superheavy elements were performed at the U400 cyclotron with the accelerated $^{50}\text{Ti}^{5+}$ ion beam. The beam intensity of 0.5 μA was maintained at the target for several weeks without any interference [6].

For the experiments at the DC-280 cyclotron the required intensity of $^{50}\text{Ti}^{10+}$ ions is 5 -10 μA . During the experiments we haven't reached the project values for the intensity of the titanium ion beam. In a stable mode of operation, the intensity of $^{50}\text{Ti}^{10+}$ ion beam was in the range of 3 – 5 μA [11, 12].

As an alternative way we have performed the experiments on production of Ti ion beam with the use of SF_6 plasma. This method was successfully used for production of Ta and Ge ions [13, 14].

First experiment was fulfilled at the test bench with the DECRIS-2M source. The thin cylindrical sheet made of Ti was installed in the source chamber. Firstly, the source was put into operation with the Ar gas, and no peaks of Ti ions were observed. Then, SF_6 gas was injected into plasma chamber with a corresponding reduction of Ar flow. Due to overlapping of peaks of S, F, Ar and Ti ions the source was tuned for Ti^{4+} , which can be clearly identified, the intensity of Ti^{4+} beam was about of 150 μA with a rather good stability.

Then similar experiment was performed at the DC-280 cyclotron with the DECRIS-PM source. The thin cylindrical sheet and a cap from injection side made of Ti were installed in the source chamber (Fig.5).

Figure 5. Titanium cylindrical sheet and extraction cap. Red rectangles indicate the erosion zones of material after operation. The estimated surface area of the erosion zones is about of 5000 mm^2 .

The source was tuned for Ti^{11+} , which can be clearly identified. The corresponding spectrum is shown in the Fig.6, the intensity of Ti^{11+} is about of 70 $e\mu A$. After tuning the source Ti^{10+} ions were accelerated, and the extracted beam with the intensity of 32 $e\mu A$ was obtained with a good stability.

Fig. 6. Titanium ion spectrum, produced with DECRIS-PM source at the DC-280 cyclotron. The source settings were optimized for production of Ti^{11+} ions at UHF power of 278 W.

For the second experiment, performed with the DECRIS-PM source, the cylindrical sheet and extraction cap were removed from the chamber, and the biased-electrode made of Ti, instead of Al in the first experiment, with the diameter of 30 mm (Fig.7) was installed.

Fig. 7. The Ti biased-disk. The surface area of erosion zone (triangle star) is estimated as 250 mm^2 .

In this experiment also, the stable beam of Ti ions was produced from the source with UHF power of 227 W, but with lower intensity – about of 30 $e\mu A$ of Ti^{11+} ions. The reduction factor for intensity of Ti^{11+} is about of 2, but the area ratio of erosion zones for two experiments is about of 20. One should note, that biased-electrode is kept at negative potential about of 500 V, so in the second experiment the sputtering of Ti electrode can give a contribution to extracted current.

Conclusion.

In this paper, several methods for production of Al ion beam are presented. From the results of experiments we can conclude, that the highest current of Al^{6+} ions (up to 250 $e\mu$) produced by insertion method with the use of Al_2O_3 sample. The method is reliable, but requires the remote control of the sample position and careful tuning. The MIVOC method for production of Al ions also shows rather good results, and probably the tuning of the compound flow with remotely controlled valve can produce higher current.

Also, we demonstrated the possibility of production of Ti ions with the use of SF_6 plasma. This method provides intense and stable beam, and does not need any equipment for evaporating the solid metal. For this method the optimization of the sample position and its surface should be performed.

References

1. D. Wutte et al. High intensity metal ion beam production with ECR ion sources at the Lawrence Berkeley National Laboratory
REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 73, NUMBER 2 FEBRUARY 2002 pp. 521 – 524
2. R. Harkewicz, “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.Instrum.* **67**, 2176–2178 (1996).
- [3] R. Harkewicz et al., “Ion plasma sputtering as a method of introducing solid material into an electron cyclotron resonance ion source”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 66, pp. 2883–2887, 1995.
- [4] Y. Ohshiro et al. “Production of beams from solid materials at Center for Nuclear Study electron cyclotron resonance ion source”, *Rev. Sci. Instrum.* **85**, 02A912 (2014)
5. H. Koivisto, J. Arje, and M. Nurmia, “Metal ions from the volatile compounds method for the production of metal ion beams,” *Rev. Sci. Instrum.* **69**, 785–787 (1998).
6. S. L. Bogomolov et al. Production of Intense Metal Ion Beams from ECR Ion Sources Using the MIVOC Method
Physics of Particles and Nuclei Letters, 2015, Vol. 12, No. 7, pp. 824–830

- [7] A.E. Bondarchenko et al. MODERNIZATION OF THE ECR ION SOURCE DECRIS-2M. RESULTS OF THE FIRST TESTS
27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia JACoW Publishing
doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB37
- [8] S.L. Bogomolov et al. Production of High-Intensity Ion Beams from the DECRIS-PM-14 ECR Ion Source.
Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 878–881.
9. W. Lu et al. PRODUCTION OF METALLIC ION BEAMS WITH INDUCTIVE HEATING OVEN AT INSTITUTE OF MODERN PHYSICS
24th Int. Workshop on ECR Ion Sources ECRIS2020, East Lansing, MI, USA. doi:10.18429/JACoW-ECRIS2020-TUWZO03
<https://accelconf.web.cern.ch/ecris2020/html/author.htm>
10. T. Nakagawa et al. Recent performance of Japanese electron cyclotron resonance ion sources.
REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS VOLUME 71, NUMBER 2 FEBRUARY 2000 pp. 637 – 642
11. S. L. Bogomolov et al. PRODUCTION OF ^{48}Ca AND ^{48}Ti ION BEAMS AT THE DC-280 CYCLOTRON 24th Int. Workshop on ECR Ion Sources ECRIS2020, East Lansing, MI, USA
doi:10.18429/JACoW-ECRIS2020-MOZZO01
12. D.K. Pugachev et al. HIGH INTENSITY CALCIUM, CHROMIUM AND TITANIUM ION BEAMS FROM THE PERMANENT MAGNET ECR ION SOURCE DECRIS-PM
27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia
doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-TUPSB36A
13. Y. Saitoh, K. Ohkoshi, and W. Yokota Production of multiply charged metallic ions by compact electron cyclotron resonance ion source with SF_6 plasma
Review of Scientific Instruments **69**, 703 (1998); doi: 10.1063/1.1148569
14. P. Leherissier et al. Recycling effect of germanium on ECR ion source
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 211 (2003) 274–280