

УДК 621

## ЭЦР-источник плазмы для разделения изотопов ИЦР-методом

А. П. Бабичев, Н. М. Горшунгов, Д. А. Долголенко,  
Г. Е. Зотин, А. И. Карчевский, В. С. Лазько, Ю. А. Муромкин,  
В. Г. Пашковский, А. Т. Пешков

Институт молекулярной физики РНЦ "Курчатовский институт", Москва, Россия

*Проведены эксперименты по созданию потоков плазмы металлов вдоль сильного (до 3 Тл) магнитного поля для разделения изотопов ИЦР-методом. Поток плазмы создавался путем ионизации нейтралов в СВЧ-разряде (37,5 ГГц) в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). СВЧ-излучение в зону разряда подавалось под небольшим углом со стороны сильного магнитного поля. Поток плазмы проходил через магнитную пробку ( $B_{\max} = 3,0$  Тл) и регистрировался на противоположном конце установки в поле 0,85 Тл. Пары цинка и свинца получались термическим испарением. При уровне СВЧ-мощности  $P_w \sim 1$  кВт параметры плазмы для обоих элементов составляли:  $n_e \sim 1,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e = 10$  эВ,  $W_{\parallel} \sim 10$  эВ. В области максимума магнитного поля плотность плазмы достигала  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Эквивалентный ионный ток в потоке плазмы составлял  $0,5 \div 1,5$  А. Для получения нейтральных атомов меди и гадолиния использовалось катодное распыление. Медная пластина распылялась ионами ксенона и свинца, гадолиниевая — ионами ксенона. Плотность паров меди в зоне разряда составляла  $(3 \div 8) \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>, а гадолиния —  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>.*

Для осуществления разделения изотопов методом ИЦР необходимо создать поток плазмы разделяемого элемента в магнитном поле, затем селективно нагреть ионы целевого изотопа и, наконец, разделить нагретые и холодные ионы на коллекторной системе. Исследования физических процессов при селективном ИЦР-нагреве и последующем отборе нагретой компоненты проводились нами ранее при разделении изотопов лития [1].

Источник плазмы — наиболее сложный элемент разделительной ИЦР-установки. Установка промышленных масштабов должна иметь источник плазмы с эквивалентным током ионов порядка 100 А. Необходимо создать поток плазмы в сильном магнитном поле (3–5 Тл) с плотностью  $\sim 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, температурой ионов  $5 \div 10$  эВ, площадью сечения  $(1 \div 2) \cdot 10^3$  см<sup>2</sup> (плотностью эквивалентного ионного тока  $j \sim 100$  мА/см<sup>2</sup>). Это может быть достигнуто путем ионизации нейтральных атомов в СВЧ-разряде в условиях ЭЦР. Для получения паров может применяться катодное распыление [2, 3] или термическое испарение металлов [4, 5]. Цель настоящей работы — получение потоков плазмы ряда металлов: цинка, свинца, меди и гадолиния.

### Экспериментальная установка

Схема разрядной камеры показана на рис. 1. СВЧ-излучение из гиротрона (мощность  $P_w$  — до 10 кВт; 37,5 ГГц) через систему зеркал и сверхразмерных волноводов попадает в вакуумную камеру, расположенную в отверстии

сверхпроводящего магнита. Волновод 5 заканчивается окном из нитрида бора, разграничивающим атмосферу и вакуум. Внутренний диаметр разрядной камеры 260 мм, длина 990 мм. За окном продолжением СВЧ-тракта служит корругированный волновод 12. Далее излучение с помощью двух зеркал М5 и М6, изготовленных из нержавеющей стали, направляется на водоохлаждаемый электрод-катод  $\varnothing$  100 мм, на котором крепится распыляемая металлическая мишень и последняя вместе с катодом может находиться под отрицательным потенциалом ( $V_c \leq -3$  кВ). На противоположном конце установки располагается водоохлаждаемый анод  $\varnothing$  160 мм, соединенный с корпусом установки через сопротивление, равное 0,5 Ом. Атомы легколетучих металлов получают в установке термическим испарением в тигле, который закрывается крышкой с выходным отверстием диаметром 3–10 мм.

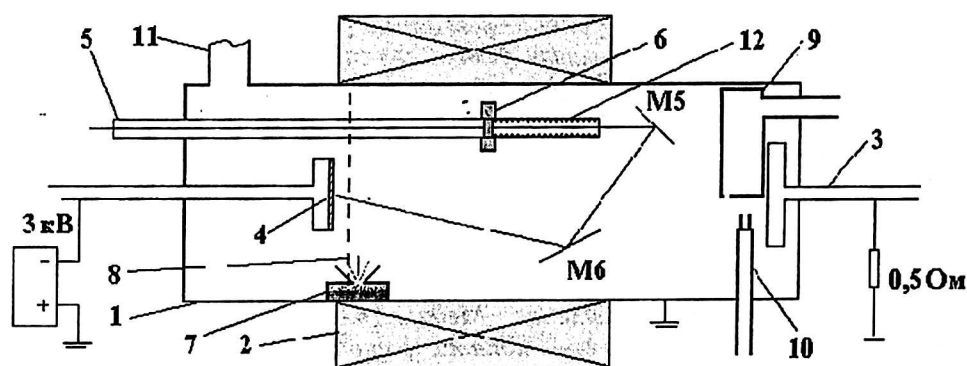


Рис. 1. Разрядная камера:

- 1 — вакуумная камера; 2 — сверхпроводящий магнит; 3 — анод; 4 — катод;  
 5 — волновод  $\varnothing$  40 мм; 6 — керамическое окно; 7 — испаритель металла;  
 8 — ЭЦР-зона; 9 — масс-спектрометр; 10 — двойной электрический зонд;  
 11 — к насосу; 12 — корругированный волновод

Перед началом экспериментов вакуумная камера и находящиеся в ней детали обезгаживались путем многократного возбуждения СВЧ-разряда в инертном газе (Xe) при давлении  $p = 3 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-4}$  торр.

Плазма, создаваемая СВЧ-разрядом вблизи катода ( $B \approx 1,3$  Тл), распространялась через магнитную пробку ( $B_{\max} = 3$  Тл) к аноду. Параметры плазмы измерялись перед анодом в сечении, где магнитное поле составляет 0,85 Тл. Плотность плазмы  $n_e$  и температура электронов  $T_e$  измерялись двойным электрическим зондом. Электроды зонда устанавливались в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю, и не затеняли друг друга. Влияние магнитного поля при анализе вольт-амперных характеристик не учитывалось. Для измерения продольной энергии ионов применялся многосеточный электростатический анализатор, также изготовленный в виде зонда (на рис. 1 не показан). Температура ионов  $T_{i||}$  определялась по зависимости тока ионов на коллектор анализатора  $I_i$  от задерживающего потенциала  $V_{ret}$  на управляющей сетке.

Плотность атомов легколетучих металлов в зоне разряда  $n_n$  рассчитывалась с использованием данных об упругости паров при температуре испарителя. Для определения плотности нейтральной компоненты применялись также датчики напыления, представляющие собой водоохлаждаемую трубку,

закрытую цилиндрическим корпусом с небольшим окном. Трубка поворачивается внутри корпуса и во время эксперимента путем ее поворота можно запылять через окно разные ее участки, распределенные по азимуту. По массе осадка и времени экспозиции можно определить плотность паров. Плотность нейтралов при катодном распылении оценивалась с учетом значений коэффициентов распыления, представленных в [6, 7].

### Получение плазмы легко испаряемых металлов

Эксперименты по получению плазмы легкоиспаряемых металлов проводились в отсутствие балластного газа в разрядной камере. Испаритель 7 (см. рис. 1) располагался в ЭЦР-зоне 8. Мощность нагревателя составляла ~500 Вт, что позволяло создавать потоки паров металлов до 20 мг/с. Плазма создавалась при подаче СВЧ-излучения в ЭЦР-зону. Для определения радиального профиля плотности плазмы измерения проводились при различных положениях двойного зонда.

Радиальная зависимость плотности цинковой плазмы в сравнении с данными для разряда в ксеноне показана на рис. 2. Условия разряда для цинка:  $P_w = 1,3$  кВт;  $n_n = 3,8 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Температура ионов и электронов  $T_{i||} = 5 \div 10$  эВ;  $T_e = 10 \div 15$  эВ. Условия разряда в ксеноне:  $P_w = 600 \div 700$  Вт;  $n_n = 2 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Температура ионов и электронов  $T_{i||} = 10 \div 15$  эВ;  $T_e = 10 \div 15$  эВ.

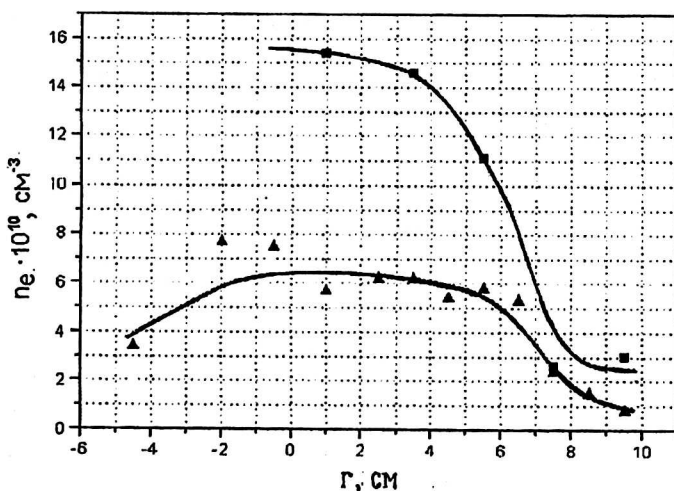


Рис. 2. Радиальная зависимость плотности цинковой (■) и ксеноновой (▲) плазмы в сечении перед анодом

Для оценки макроскопических параметров плазмы СВЧ-разряда измерялся ток катода при подаче на катод отрицательного потенциала  $U_c = 0 \div 60$  В. На рис. 3 показана зависимость тока катода от напряжения. Как видно из рис. 3, при отрицательных потенциалах катода порядка 30 В достигается насыщение ионного тока на катод ( $\approx 4$  А). Плотность плазмы вблизи анода при этих измерениях не изменялась. Условия разряда в парах цинка (см. рис. 3) следующие:  $P_w = 900$  Вт,  $n_n = 4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>,  $n_e = 1,3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>,  $T_e = 10 \div 12$  эВ,  $T_{i||} = 10 \div 15$  эВ.

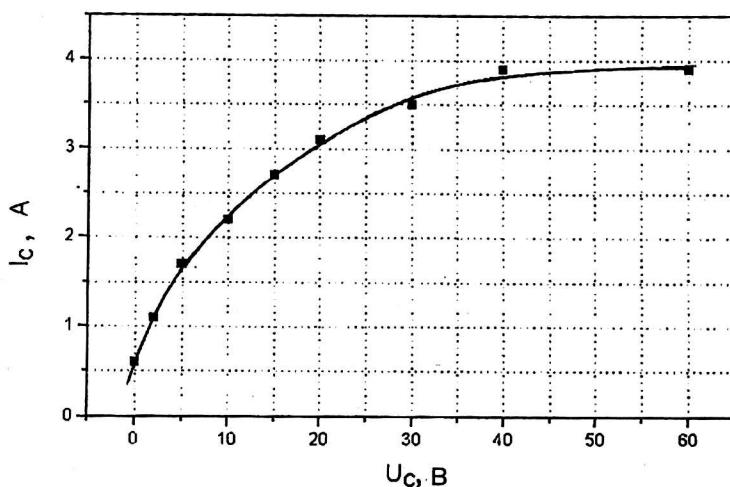


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика катода при ЭЦР-разряде в парах цинка

### Получение плазмы с использованием катодного распыления

В экспериментах нейтральные атомы получались путем катодного распыления металлической пластины из рабочего вещества, прикрепленной к поверхности водоохлаждаемого катода 4 (см. рис. 1). На катод подавался отрицательный потенциал 500–1500 В, и в камеру напускался инертный газ (ксенон). При подаче СВЧ-мощности возбуждался ЭЦР-разряд, материал катодной пластины распылялся ионами ксенона и часть распыленных атомов ионизировалась в плазме. В экспериментах по получению медной плазмы распыление осуществлялось также ионами свинца. В этом случае разряд возбуждался в парах свинца, а ксенон не использовался. Для оценки количества распыленного и ионизированного вещества применялись датчики напыления и определялись количество и состав осадка на аноде. Используя данные по коэффициентам распыления меди и гадолиния [6, 7], можно рассчитать поток распыленных атомов по напряжению и току катода.

Согласно оптическим измерениям и расчетам потока распыленных атомов, плотность атомов меди в зоне разряда составляла  $n_n = 5 \div 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . В экспериментах было распылено 9,6 г меди. Измерение элементного состава осадка на поверхности анода показало, что потоком плазмы было перенесено около 100 мг меди, что составляет 1 % от количества распыленного вещества.

Распыление гадолиниевой пластины производилось ионами ксенона. После эксперимента измеряли количество гадолиния, напыленного на стенки вакуумной камеры и на элементы конструкции установки. По этим данным была вычислена угловая зависимость плотности потока атомов гадолиния, представленная на рис. 4.

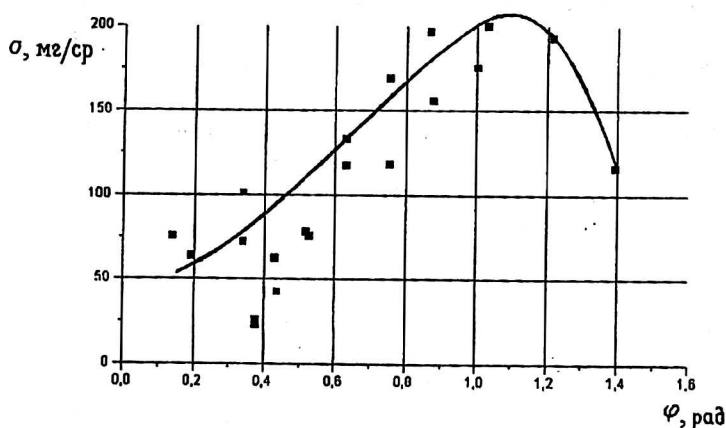


Рис. 4. Угловая зависимость плотности распыления гадолиния в единицу телесного угла; угол  $\varphi$  измеряется относительно оси установки

Кроме того, проводилось измерение плотности напыления гадолиния на анод, характеризующей поток ионов гадолиния, а также на поверхности вакуумной камеры в области за катодом. Суммирование показало, что на рабочую часть вакуумной камеры был напылен 1 г Gd, за катодом — 0,1 г, а в прямом плазменном потоке было перенесено 40 мг Gd, что составляет около 2,5 % от распыленного количества. Потеря массы гадолиниевой пластины составила 1,6 г. Всего было собрано 1,14 г гадолиния.

Таким образом, баланс вещества был составлен с точностью 30 %. Оценки показывают, что в течение эксперимента средняя плотность атомов гадолиния в зоне разряда  $n_n$  составляла порядка  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>.

### Обсуждение результатов

Для оценки величины эквивалентного ионного тока цинка на анод  $I_{eq}$  были использованы измеренные величины плотности плазмы ( $n_e \sim 1,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>) и ионной температуры (10÷15 эВ). Распределение плотности плазмы по радиусу потока (см. рис. 2) измерялось только в горизонтальном направлении. Неоднородность плазмы по вертикали принималась соответственно расчетному распределению плотности нейтралов в зоне ЭЦР-разряда. При продольной скорости ионов цинка  $V_i(\text{Zn}) = 7 \cdot 10^5$  см/с величина  $I_{eq} = 1,0 \div 1,5$  А.

В результате проведенных экспериментов с цинковой плазмой оценен коэффициент использования вещества  $\eta = J_{i1} / J_0$ , где  $J_{i1}$  — поток ионов к аноду и  $J_0$  — поток нейтралов в зону разряда. Величина  $J_{i1}$  составляла  $\sim 1,0 \cdot 10^{19}$  ион/с,  $J_0 \sim 1,5 \cdot 10^{20}$  ат/с и  $\eta \sim 6$  %.

Представляет интерес и другая величина: коэффициент ионизации потока нейтралов  $\beta = J_{i2} / J_0$ , где  $J_{i2}$  — суммарный поток ионов на катод и анод. Согласно рис. 3, максимальный ток на катод составлял 4 А. Полному току, равному 5,5 А, соответствует поток  $J_{i2} \sim 3 \cdot 10^{19}$  ион/с. Таким образом, величина  $\beta \sim 20$  %.

Поток свинцовой плазмы оценивался по поверхностной плотности осадка на аноде. Интегрирование плотности напыления свинца по поверхности ано-

да дает оценку перенесенного плазмой количества свинца на анод около 1,5 г, что соответствует суммарному переносу  $4,4 \cdot 10^{21}$  ионов свинца или заряду  $7,1 \cdot 10^2$  А·с. Интегрирование по времени ионного тока на катод дает  $2,3 \cdot 10^3$  А·с.

Таким образом, отношение эквивалентного ионного тока на анод и тока катода составляет  $I_{eq}/I_c \cong 0,3$ . Если на основе измеренных параметров свинцовой плазмы ( $n_e \cong 1,5 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>,  $T_{i||} \cong 10$  эВ) и данных по напылению свинца на анод оценить эквивалентный ионный ток на анод, то величина  $I_{eq}$  составит  $0,5 \div 1,0$  А.

Приведем оценку коэффициента использования вещества  $\eta$  и степени ионизации потока паров свинца  $\beta$ . При температуре испарителя 925 °С,  $n \cong 1 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>,  $v \cong 3 \cdot 10^4$  см/с поток атомов свинца в сечении  $S = 0,8$  см<sup>2</sup> составляет:  $J_0 = nvS \approx 2,5 \cdot 10^{19}$  ат/с. С другой стороны, эквивалентный ионный ток свинца на анод при  $P_w \sim 1$  кВт составляет около 0,5 А, что соответствует потоку ионов свинца  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  ион/с. Коэффициент использования вещества в этом режиме составил  $\eta = J_{i1}/J_0 \sim 10$  %. Суммарный ионный ток свинца на катод и анод составляет 2 А (поток ионов  $J_{i2} \approx 1,2 \cdot 10^{19}$  ион/с) и коэффициент ионизации  $\beta = J_{i2}/J_0 \sim 50$  %. По результатам экспериментов, энергетическая цена образования ионов цинка и свинца для потока плазмы на анод составляет 1—2 кэВ/ион.

Полученные данные о параметрах плазмы вблизи анода позволяют оценить основные характеристики потока плазмы в зоне максимального магнитного поля. Магнитное поле в зоне измерений составляет 0,85 Тл, следовательно, в зоне максимального магнитного поля 3 Тл площадь сечения плазмы в 3,5 раза меньше. Кроме того, продольная скорость ионов плазмы в области максимального поля меньше, чем в прианодной области. Таким образом, можно оценить, что в зоне максимального магнитного поля плотность плазмы составляла  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>, а продольная энергия ионов  $T_{i||} \approx 3 \div 5$  эВ.

При катодном распылении коэффициент использования вещества оказался ниже и составил около 1 % для меди и 2,5 % — для гадолиния.

### Заключение

Проведены эксперименты по получению плазмы металлов с характеристиками, необходимыми для ИЦР-разделения изотопов. Для создания паров использовалось как термическое испарение, так и катодное распыление. Сравнение двух способов создания паров металлов показало, что более предпочтительным является термическое испарение, поэтому целесообразно провести эксперименты по получению гадолиниевой плазмы при термическом испарении гадолиния.

### Литература

1. Dolgolenko D. A., Karchevsky A. I., Laz'ko V. S., Muromkin Yu. A., Pashkovsky V. G. Electrical Characteristics of Collector System at Lithium Isotope Separation by Ion Cyclotron Resonance Heating: Proc. of XXIV Int. Conference on Phenomena in Ionized Gases, Warsaw, Poland, 11—16 July, 1999. V. 2. P. 63.
2. Romesser T. E., Vanek V., Tang J., Dixon D., Bayless J., Musseto M., Strawitch, Higgins L. A Large Area Metallic Ion Plasma Source//IEEE Int. Conf. on Plasma Science, San Diego, Calif, 1983; IEEE Conf. Record Abstracts. 1983. P. 71.
3. Martinez R., Iskra M., Orthel J., Moffa P., Thomson J. Model of a sputter — produced metallic plasma source//Ibid.

4. *Compant la Fontaine A., Louvet P.* Recent development in stable isotope separation by Ionic Cyclotron Resonance (ICR)// In Proc. of the Second Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases, Versailles, 10–12 July. 1989. V. 1. P. 139.
5. *Compant la Fontaine A., Louvet P., Le Gourrierec P., Pailloux A.* Selective heating of high-pressure vapour elements by ion cyclotron resonance//J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. № 31. P. 847–865.
6. *Габович М. Д., Плишицев Н. В., Семашко Н. Н.* Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. —М.: Энергоатомиздат, 1986. С. 88.
7. *Compant la Fontaine A., Louvet P.* Study of an ECR sputtering plasma source//Plasma Sources Sci. Technol. 1999. № 8. P. 125–135.

Авторы благодарят О. П. Анашкина, В. Е. Кейлина,  
И. А. Ковалева и В. В. Лысенко за совместную эксплуатацию  
сверхпроводящего магнита.

## ECR-plasma source for separation of isotopes by ISR-method

*A. P. Babichev, N. M. Gorshunov, D. A. Dolgolenko,  
G. E. Zotin,, A. I. Karchevsky, V. S. Lazko, Yu. A. Muromkin,  
V. G. Pashkovsky, A. T. Peshkov*  
Molecular Physics Institute, RRC Kurchatov Institute, Moscow, Russia

*Experiments were made on SOURCE installation on obtaining of flows of metal plasma along the strong (up to 3 Tesla) magnetic field for isotope separation by ICR method. A plasma flow was created by ionization of neutrals in microwave discharge (37.5 GHz) in conditions of electron cyclotron resonance (ECR). Microwave radiation to the discharge zone was put under a small angle from the side to the magnetic field. The plasma flow created in these conditions passed through the magnetic mirror ( $B_{max} = 3.0$  Tesla) and registered on the opposite side of the installation in the field of 0.85 Tesla. Vapors of zinc and lead were obtained by thermal evaporation. At the level of microwave power  $P_w \sim 1$  kW plasma parameters for both elements were  $n_e \sim 1.5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_e = 10$  eV,  $W_{\parallel} \sim 10$  eV. In the area of maximum magnetic field plasma density reached  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . Equivalent ionic current in the plasma flow was  $0.5 \div 1.5$  A. For obtaining of neutral atoms in the discharge zone the cathode sputtering of targets (Cu, Gd) was also used. Density of copper vapors in the discharge zone was  $(3 \div 8) \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , density of gadolinium vapors was  $\sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ .*