

УДК 621.039

Установка для разделения изотопов методом ИЦР-нагрева (проект)

В. И. Волосов, В. В. Деменев, А. Г. Стешов, И. Н. Чуркин
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

Рассмотрен проект установки для разделения изотопов методом ионно-циклотронного резонансного (ИЦР)-нагрева. Обсуждены основные системы установки: системы ИЦР нагрева и сепарации, источник плазменного потока. Рассмотрены также требования на пространственную однородность и временную стабильность магнитного поля, систему ВЧ-нагрева, параметры плазменного потока. Приведены результаты моделирования работы системы ВЧ-нагрева в одночастичном приближении и оценки основных параметров проектируемой установки.

Метод селективного ИЦР-нагрева является универсальным для разделения изотопов и особенно эффективен для разделения изотопов материалов, не имеющих газовой фазы [1–4]. Ниже рассматривается проект установки для разделения изотопов с массой в диапазоне 100–180 а. е. в “узком” плазменном потоке (диаметр плазменного потока — порядка нескольких диаметров ларморовских орбит иона) с высокой плотностью (10^{12} см⁻³) и при степени одностадийного разделения не менее 10.

Использование “узкого” плазменного потока с высокой плотностью — это принципиально новый подход к разделению изотопов методом ИЦР-нагрева, позволяющий получить высокую производительность при снижении затрат на создание магнитного поля. Совмещение системы ИЦР-нагрева и сборников целевого изотопа на основе электродно-емкостной антенны в сочетании с “узким” пучком позволяет осуществить “прямой” сбор ионов искомого изотопа по мере нагрева.

Краткое описание установки

Общий вид установки представлен на рис. 1. Источник плазменного потока 1 формирует “узкий” плазменный поток, в поперечный размер которого вписываются два—три ларморовских диаметра ионов [5, 6]. Плазменный поток проходит через выпускной канал 2 в зону ИЦР-нагрева. Селективный ИЦР-нагрев осуществляется с помощью ВЧ-антенны электродно-емкостного типа 3. В такой антенне осуществляется “прямой” сбор, т. е. ионы искомого изотопа по мере нагревания приобретают больший ларморовский радиус (большую поперечную энергию) и собираются на внешние пластины антенны. Остальные ионы уходят вдоль оси и попадают на торцевые сборники 4. Магнитная система, состоящая из соленоидальных катушек 5, формирует аксиальное магнитное поле (рис. 2). Вакуумная система откачки 6 обеспечивает рабочее давление в камере установки.

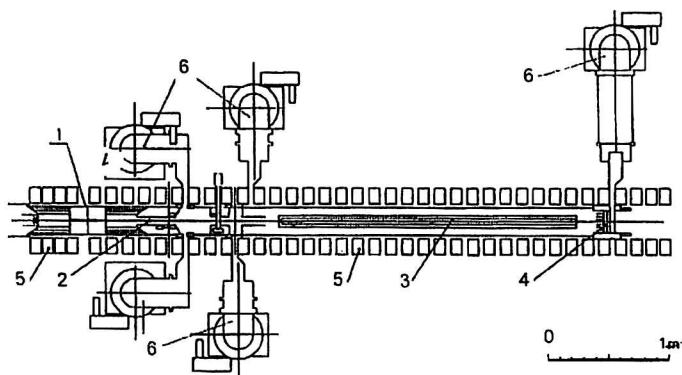


Рис. 1. Общий вид установки

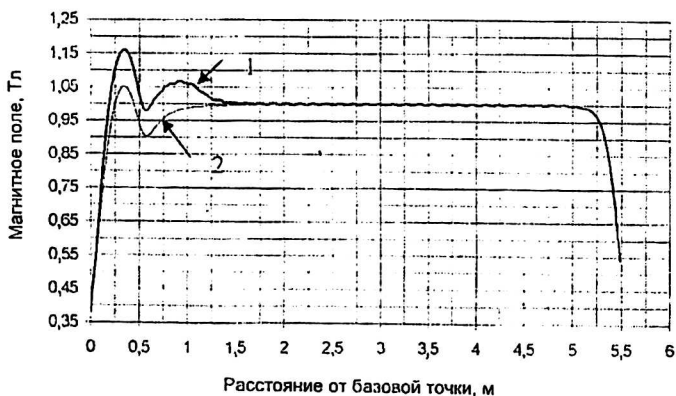


Рис. 2. Профиль магнитного поля при различных токах в катушках плазменного источника и токе 4,59 кА в оставшихся катушках:
1 — 5,0 кА; 2 — 4,59 кА

При транспортировке вдоль установки часть плазменного потока может теряться из-за взаимодействия с нейтральным газом (рассеяние, перезарядка), в первую очередь теряется “низкоэнергетическая” часть. Для уменьшения этих потерь с помощью дифференциальной откачки поддерживается оптимальное распределение давления в вакуумной камере установки: в источнике — давление порядка $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-4}$ торр (оптимальное для работы источника), в области ИЦР-нагрева и сбора изотопов — $5 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-4}$ торр. Уменьшение потерь

происходит также за счет формирования специального профиля магнитного поля (см. рис. 2 поз. 1), который ускоряет ионы в продольном направлении при переходе от повышенного магнитного поля источника к магнитному полю зоны ВЧ-нагрева.

Совмещенная система ИЦР-нагрева и сепарации

Основным элементом установки является совмещенная система ИЦР-нагрева и сепарации изотопов на основе электродно-емкостной антенны (рис. 3). Внешние пластины антенны 1 и торцевые электроды (сборники) 4 подключаются к ВЧ-системе, создавая равномерное распределение потенциалов в плазме за счет продольной электронной проводимости. Электронная проводимость вдоль силовых линий магнитного поля поддерживает постоянство ВЧ-потенциала с точностью до величины дебаевского потенциала. Если температура электронов в плазменном потоке 2 не зависит от радиуса, то падение потенциала в дебаевском слое одинаково для всех пластин и поэтому оно не влияет на структуру ВЧ-поля, и напряженность электрического поля внутри плазмы не зависит от распределения плотности плазмы. Метод создания электрических полей (и токов) в объеме плазмы в этом случае аналогичен созданию электрических полей в системах с вращающейся плазмой [6, 7].

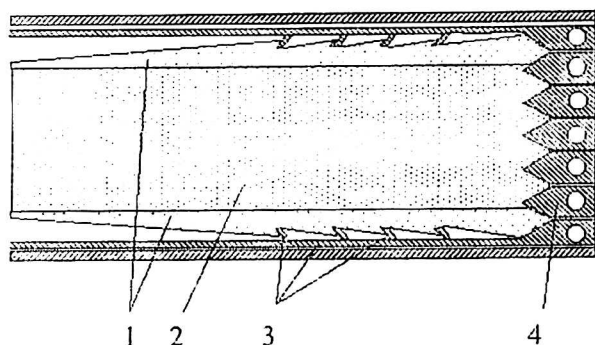


Рис. 3. Электродно-емкостная антенна: 1 — поток плазмы с нагретыми ионами; 2 — поток плазмы с нерезонансными ионами; 3 — пластины емкостной антенны и сборники резонансных ионов; 4 — торцевые электроды (сборники) нерезонансных ионов

В такой ВЧ-антенне реализуется нагрев плазмы омическими, а не емкостными токами, но при этом сохраняется структура поля емкостной антенны. Ларморовский радиус резонансного иона в результате ИЦР-нагрева увеличивается больше, чем у нерезонансного, и резонансные ионы оседают на поверхности сборника 3, расположенного на внешних пластинах антенны (см. рис. 3). Основная часть нерезонансных ионов падает на сборники 4.

Селективность ИЦР-нагрева зависит от начальной поперечной энергии, продольной скорости и начальной фазы (относительно ВЧ-поля) иона, что накладывает требования на входные параметры плазменного потока и ВЧ-антенны. Для селективного нагрева резонансных ионов требуется, чтобы ион совершил не менее $N = A$ ларморовских оборотов иона при прохождении зоны ИЦР-нагрева, т. е. $\frac{L_{\text{ант}}}{V_{\parallel \text{max}}} \geq N t_l$, где $L_{\text{ант}}$ — длина ВЧ-антенны;

A — атомный вес иона; t_l — время оборота иона по ларморовской орбите [2].

Из этого условия оценим максимальную продольную скорость ионов на входе в систему ИЦР-нагрева:

$$V_{\parallel \max} \leq \frac{L_{\text{ант}} q B}{2\pi M A^2}, \quad (1)$$

где B — аксиальное магнитное поле установки; M — масса протона.

Ион-ионные столкновения в плазменном потоке между резонансным и остальными ионами приводят к тому, что резонансный ион теряет часть полученной энергии. Поэтому для избежания этих потерь резонансный ион за время пролета через зону ИЦР-нагрева $\tau_{\text{ант}} = Nt_l$ не должен взаимодействовать с другим ионом, т. е. $\tau_{\text{ант}} < \tau_{ii}$, где $\tau_{ii} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{A}{2}\right)^{1/2} \frac{T_i^{3/2}}{n_i}$ — время ион-ионных взаимодействий; T_i — температура ионов; n_i — концентрация ионов [2].

Таким образом, минимальная температура ионов

$$T_{\min} \geq A^3 \sqrt{\left(\frac{\pi 10^{-6} M n_i}{q B}\right)^2}. \quad (2)$$

Как видно из выражений (1) и (2), в плазменном потоке энергетическое распределение ионов — анизотропно, т. е. продольная энергия ниже поперечной энергии. Для “узкого” плазменного потока поперечная энергия ионов ограничена его поперечным размером D : $W_{\perp \max} = \frac{q B^2 D^2}{32 A M}$. Диапазон поперечных энергий ионов в плазменном потоке — от T_{\min} до $W_{\perp \max}$.

Нижнюю границу продольной скорости ($V_{\parallel \min}$) можно оценить, взяв среднюю энергию ионов в плазменном потоке $W_{\perp 0} \sim \frac{W_{\perp \max}}{2}$, тогда

$$V_{\parallel \min} \geq \frac{5 \cdot 10^{-7} n_i L_{\text{ант}}}{\sqrt{W_{\perp 0}^3 A}}.$$

Оптимальные параметры плазменного потока, системы ИЦР-нагрева и сепарации приведены в таблице.

Параметры	Материал				
	¹⁰² Pd	¹¹² Cd	¹³⁰ Ba	¹⁵⁷ Gd	¹⁸⁰ W
T_{\min} , эВ	10,5	11,5	13,3	16,1	18,4
$W_{\perp \max}$, эВ	108	99	85	70	62
$W_{\perp 0}$, эВ	54	50	43	35	30
$V_{\parallel \min}$ ($W_{\perp \min}$), 10 ⁵ см/с (эВ)	0,3 (0,05)	0,3 (0,07)	0,4 (0,1)	0,48 (0,19)	0,54 (0,27)
$V_{\parallel \max}$ ($W_{\perp \max}$), 10 ⁵ см/с (эВ)	3,7 (7,2)	3,0 (5,4)	2,3 (3,5)	1,5 (1,9)	1,2 (1,3)
$q = 10$	$E = 220$ В/м, $Q \sim 1$	$E = 185$ В/м, $Q \sim 1$	$E = 138$ В/м, $Q \sim 1$	$E = 94$ В/м, $Q \sim 1$	$E = 72$ В/м, $Q \sim 1$

Данные приведены для однозарядных ионов рассматриваемых изотопов при равномерной радиальной плотности плазмы, диаметре потока $D = 60$ мм, магнитном поле $B = 1$ Тл и проектируемых параметрах ВЧ-антенны ($L_{\text{ант}} = 2,5$ м; $h = 82$ мм — расстояние между сборниками антенны).

$Q = \frac{N_{col}}{N_{in}}$ — эффективность системы ИЦР-нагрева и сепарации, где N_{col} —

резонансные ионы, попавшие на сборники;

N_{in} — резонансные ионы, входящие в область ИЦР-нагрева.

$q = \frac{C(1 - C_0)}{C_0(1 - C)}$ — степень разделения определяет способность системы вы-

делять искомый изотоп, где C_0 — начальная концентрация резонансных ионов на входе в область ВЧ-нагрева;

C — концентрация резонансных ионов в конечном продукте на сборнике.

Расчеты показали, что с ростом амплитуды ВЧ-поля степень разделения q существенно падает, а эффективность сбора Q растет незначительно. Ограничение “снизу” на амплитуду ВЧ-поля связано с эффективностью сбора резонансных ионов $Q < 1$, нерезонансные частицы и часть резонансных частиц вообще не попадают на сборники.

Процесс ИЦР-нагрева для резонансного ^{157}Gd и нерезонансного ^{158}Gd ионов в проектируемой установке иллюстрируется на рис. 4, а, б при оптимальных параметрах плазменного потока (см. таблицу).

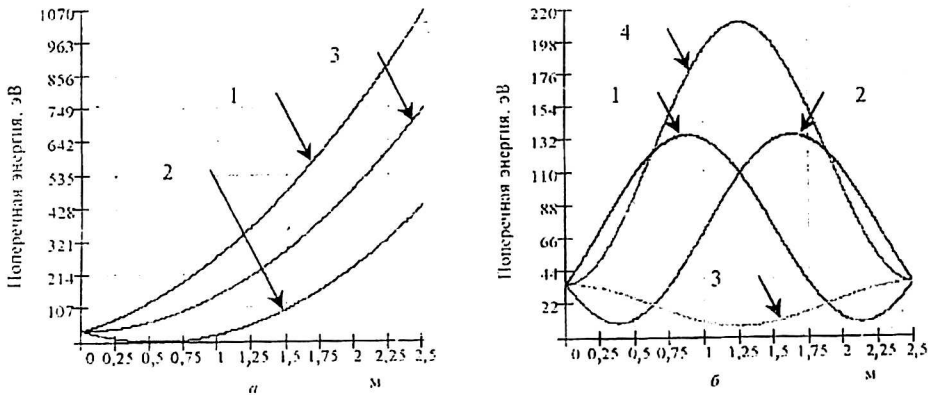


Рис. 4. Изменение поперечной энергии иона вдоль антенны:
а — резонансного (^{157}Gd); б — нерезонансного (^{158}Gd);
 $E = 60$ В/м; фазы ионов относительно фазы ВЧ-поля:
1 — 0° ; 2 — 180° ; 3 — 90° ; 4 — 270°

Пространственно-временные колебания основных параметров ИЦР-нагрева (частота, магнитное поле) влияют на селективность ВЧ-нагрева ионов. Из-за неточности механической сборки магнитной системы возникают пространственные колебания магнитного поля с характерной длиной T_m . “Длинные” ($L_{\text{ант}}/T_m \sim 1$) колебания в зоне ИЦР-нагрева значительно “сбивают” фазу ВЧ-нагрева. “Короткими” ($L_{\text{ант}}/T_m \gg 1$) колебаниями можно пренебречь из-за малости ухода фазы ВЧ-нагрева. Временные нестабильности тока в катушках магнитной системы и тока в антенне различаются по воздействию на селективность ВЧ-нагрева отношением характерного периода колебаний T_{osc} к характерному времени пролета ионом зоны ИЦР-нагрева $\tau_{\text{ант}}$. “Медленные” колебания ($T_{osc}/\tau_{\text{ант}} > 1$) значительно “сбивают” фазу ВЧ-нагрева. “быстрыми” колебаниями ($T_{osc}/\tau_{\text{ант}} < 1$) можно пренебречь из-за малости ухода фазы.

Поэтому условие селективности нагрева требует соблюдения суммарной точности на пространственную однородность магнитного поля, стабильность частоты генератора и тока в катушках магнитной системы не хуже, чем

$\frac{\Delta A}{A} \sim 5 \cdot 10^{-3}$ для рассматриваемого диапазона масс, где ΔA — разница в атомном весе между ближайшими изотопами.

Источник плазменного потока

Для рассматриваемой установки требуется стационарный источник "узкого" плазменного потока с параметрами, представленными в таблице. Стационарный источник спроектирован на основе импульсного источника плазменного потока со скрещенными радиальным электрическим и аксиальным магнитным полями ИСП (рис. 5) [5, 6]. Аксиальное магнитное поле несимметричной "пробочной" конфигурации формируется восемью катушками 5, входящими в магнитную систему установки. Радиальное электрическое поле вводится в плазму с помощью торцевых электродных узлов 2, центральный электрод является катодом 1 и находится на "нулевом" потенциале.

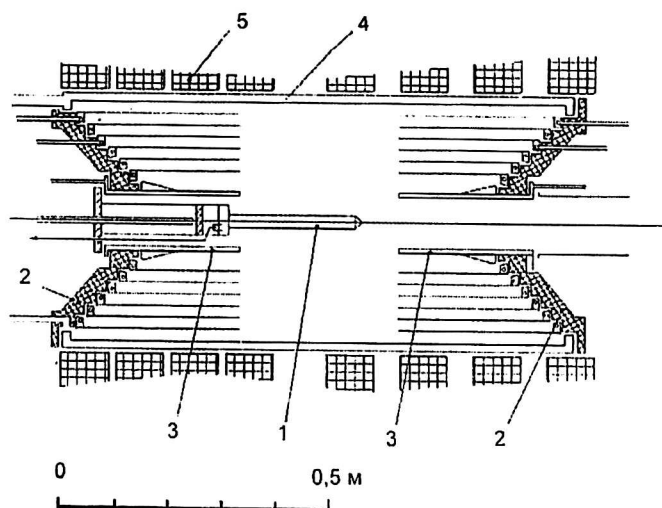


Рис. 5. Конструкция источника:

1 — катод; 2 — электродный узел; 3 — выпускной канал;
4 — анод; 5 — катушки магнитной системы

В источнике горит самоподдерживающийся S -заряд, плазма состоит в основном из ионов материала катода [5, 6]. Для стабильного горения S -заряда в прианодную область подается небольшое количество стабилизирующего газа (водород, азот). Профиль электрического поля в плазме источника формируется путем принудительного распределения потенциалов на торцевых электродах. В прикатодной области с малыми радиальными электрическими полями формируется плазма, состоящая преимущественно из однозарядных ионов, с температурой электронов несколько электронвольт и плотностью около $10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Часть этой плазмы выходит из источника в аксиальном направлении через выпускной канал 3. Параметры плазменного потока определяются условиями горения разряда и условиями ухода ионов из ловушки.

Экспериментальные результаты, полученные для титана на импульсном источнике ИСП [6], и оценки, выполненные для рассматриваемых материалов, показывают, что параметры плазменного потока должны удовлетворять

основным требованиям для проектируемой установки (см таблицу) [6]. Ионный ток в плазменном потоке, выходящем из источника, оценивается из отношения характерных времен жизни иона τ_{ii} и ухода его вдоль оси источника τ_f .

$$I_i \approx k \frac{\tau_{ii}}{\tau_f} I_{dis},$$

где I_{dis} — разрядный ток;

k — коэффициент, зависящий от несимметричности пробочной конфигурации (в нашем случае для оценки $k \sim 1/2$).

Время жизни иона определяется временем перезарядки иона материала катода в плазме источника, а время ухода иона из источника связано со временем ион-ионных взаимодействий. Для параметров разряда, при которых формируется плазменный поток с оптимальными для ИЦР-нагрева характеристиками ионов, эффективность источника по току составляет $\sim 1/50$. Таким образом, для ^{157}Gd при 50 А разрядном токе ионный ток может достигать 1 А.

Моделирование стационарного режима работы проводилось в квазистационарном режиме (длительность импульса до 0,22 с), и был получен ток ионов Tl в плазменном потоке ~ 1 А при разрядном токе ~ 40 А и напряжении на плазме 4 кВ.

Магнитная система

Магнитная система проектируемой установки содержит 40 идентичных, многослойных соленоидальных катушек (см. рис. 1). Первые восемь катушек — это катушки магнитной системы источника, следующие шесть катушек — переходная область от источника до ВЧ-антенны, оставшиеся 26 — относятся к магнитной системе зоны ИЦР-нагрева и сбора изотопов. Магнитная система формирует магнитное поле требуемой однородности и профиля (см. рис. 2).

Несимметричный “пробочный” профиль магнитного поля в источнике обеспечивает преимущественное вытекание плазменного потока со стороны выпускного канала, где перепад магнитного поля составляет от 2,5 до 9,5 %, с противоположной стороны ~ 15 % (см. рис. 2).

Величина магнитной “пробки” определяется расстоянием между центральными катушками. Предусматривается возможность создавать различные перепады (от 0 до 10 %) между полями в магнитной “пробке” источника со стороны выпускного канала и полями в области ИЦР-нагрева, используя дополнительный источник питания катушек источника. Это позволяет увеличить продольную скорость ионов, выходящих из источника (в магнитной “пробке”), для обеспечения оптимального селективного ИЦР-нагрева и уменьшения потерь ионов на нейтральном газе при транспортировке.

В зоне ИЦР-нагрева однородное магнитное поле создается периодической (период $T_m = 138$ мм) расстановкой катушек; расстояния (49 мм) между которыми определяются компромиссными требованиями на однородность поля и конструктивными соображениями (обеспечение вакуумной откачки). В области сбора изотопов падение магнитного поля “сглаживается” за счет уменьшения расстояний между катушками в концевой части установки. При токе в катушках 4,59 кА магнитные поля во всех частях установки практически одинаковые (~ 1 Тл). Мощность систем питания медных катушек магнитной системы ~ 1600 кВт.

Неточность сборки магнитной системы установки может давать “длинные” колебания ($L_{\text{ант}}/T_m \sim 1$) и в этом случае уход фазы резонансной частицы $\sim 1,2$ рад при $\Delta B/B \sim 2,5 \cdot 10^{-3}$. Элементы конструкции установки также влияют на качество магнитного поля. На основании выполненных расчетов получены требования на магнитные свойства используемых конструкционных материалов $\mu \leq 1,05$, а также на изготовление и выставку элементов магнитной системы в зоне ИЦР-нагрева.

Требования к магнитной системе установки следующие:

- Отклонение магнитных центров катушек от расчетных положений, мм, не более..... ± 0
- Отклонение магнитных осей катушек от “идеальной” оси, мм, не более..... $\pm 0,5$
- Наклон магнитной оси катушки относительно оси установки, град, не более..... $\pm 0,1$

Заключение

Представленный проект установки для разделения изотопов имеет такие расчетные параметры: диапазон разделяемых масс — 100—180 а.е.; степень одностадийного разделения — не менее 10; производительность — до 6 кг/год для ^{157}Gd при ионном токе 1 А на выходе из источника.

Использование в установке системы ИЦР-нагрева и сборников целевого изотопа на основе электродно-емкостной антенны в сочетании с “узким” пучком позволяет получить более высокую производительность по сравнению с другими системами, использующими ИЦР-нагрев, и снизить затраты на создание магнитного поля. К техническим проблемам проекта относятся необходимость охлаждения энергонагруженных элементов установки (катод, анод, электродная система источника), а также выполнение жестких требований на точность изготовления и сборки магнитной системы установки.

Литература

1. Treacy J. G., Aaron W. S.//Nucl. Inst&Meth. 1993. A334. P. 45—50.
2. Муромкин Ю. А.//Итоги науки и техники. Сер. Физика плазмы. — М.: ВИНТИ, 1991. Т. 12. С. 83—110.
3. Treacy J. G.//Nucl. Inst&Meth, 1989. A282. P. 261—266.
4. Изотопы: свойства, получение, применение/Под ред. В. Ю. Баранова — М.: ИздАТ, 2000. С. 219—285.
5. Волосов В. И. Источник ионов: Патент РФ 2071137. Бюлл. изобр. № 36. пер. 27.12.96.
6. Churkin I. N., Volosov V. I., Steshov A. G.//Rev. of Scient. Instr. 1999. V. 69. № 2. P. 822—824.
7. Volosov V. I., Abrashitov G. F., Beloborodov A. V. et. al//Nucl. Fus. 1991. V. 31 (7). P. 1275.

Installation for isotope separation by ICR heating method (project)

V. I. Volosov, V. V. Demenev, A. G. Steshov, I. N. Churkin
The Budker Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk, Russia

Installation for isotope separation by the ICR heating method inside a “narrow” plasma flow is presented. Discussed are the basic systems of the Installation: ICR heating and separation systems and the source of a plasma flow. The requests on the spatial uniformity and the time stability of the magnetic field, the ICR heating system, and the parameters of the plasma flow are considered. The results of modeling the ICR heating for single particle approximation are showed.