

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЕКТОВ ПЛАЗМЕННЫХ СЕПАРАТОРОВ ИЗОТОПОВ С КОЛЕБАНИЯМИ НА ЦИКЛОТРОННЫХ ЧАСТОТАХ

*А.Н. Довбня, О.С. Друй, А.М. Егоров, В.О. Ильичева, В.И. Лапшин, М.В. Сосипатров, О.М. Швеиц, В.Б. Юферов, Д.В. Винников, Ю.В. Ковтун*

*ННЦ "Харьковский физико-технический институт"*

*61108, Харьков, ул. Академическая 1, Украина; тел. (0572 356326)*

*А.В. Моисеенко, Е.А. Шевченко*

*НТУ "Харьковский политехнический институт"*

*61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, Украина; тел. (0572 400052)*

Рассмотрена физика процессов разделения изотопов элементов в системах, использующих внешние ВЧ-поля и спонтанно возбуждаемые электрические поля, на частотах, равных циклотронным частотам некоторых ионов плазмы. Описаны конструкции действующего макета плазменного сепаратора изотопов легких элементов, использующего ионно-циклотронный резонанс, и сепаратора, использующего пеннинговский разряд для их разделения. Рассчитаны параметры систем, определены основные задачи макетирующего эксперимента.

### ВВЕДЕНИЕ

Более полувека развиваются различные методы разделения изотопов. Здесь и индустрия производства урана, где продукция исчисляется в десятках и сотнях тонн, и производство радиоактивных изотопов для аналитических целей в количестве десятков грамм. В последнее время появились задачи получения короткоживущих изотопов, в частности, и для медицинских целей, когда требуются небольшие количества веществ, одновременно необходима высокая оперативность и возможность быстрого перехода на другие массы. Именно в связи с этими требованиями, постоянно совершенствуются методы производства изотопов в малых количествах, одним из которых является электромагнитный метод, одной из разновидностей которого является метод разделения изотопов, использующий ионно-циклотронный резонанс (ИЦР) [1-8]. К его достоинствам следует отнести возможность работы в широком диапазоне атомных масс, т.е. универсальность и возможную одноступенчатость процесса разделения. По энергоэффективности и производительности он намного уступает методам, использующим центрифуги и газовую диффузию, однако, значительно превосходит обычные электромагнитные методы. Сепаратор не является крупногабаритным устройством, он может располагаться в обычных лабораторных помещениях, при выполнении некоторых специальных требований. В настоящее время имеется достаточно обширная литература, где описано разделение изотопов лития, калия, никеля, гадолиния, что свидетельствует о привлекательности и не тривиальности метода. Однако, имеющейся информации недостаточно для создания промышленной установки, поэтому целесообразно создание действующего макета сепаратора, с целью отработки на нем основных, не решенных вопросов.

Еще одним вариантом сепарационной установки, по-видимому, удовлетворяющей тем же требованиям, является система, использующая разряд Пеннинга, в котором при определенных условиях возникали самовозбуждающиеся колебания, приводившие к селективному ускорению ионов в продольном направ-

лении [10-12]. В этой системе, достаточно привлекательной по своим параметрам, для практического использования также необходимо ответить на ряд принципиальных вопросов. Поэтому, для выработки дальнейшей стратегии работ, делается попытка качественного сравнения этих систем.

### ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИЦР-МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

В [8] описаны основы ИЦР-метода разделения изотопов, здесь мы уточним основные положения, необходимые для практического использования. Как следует из рис.1 и 2, плазма из источника, размещенного в области между двух не симметричных магнитных пробков, вытекает преимущественно в сторону меньшей пробки и вдоль магнитного поля, через зону дрейфа, попадает в зону нагрева. Здесь, с помощью высокочастотных электрических полей, селективно нагреваются ионы нужной массы и затем холодные и горячие ионы пространственно разделяются с помощью различных систем отбора. На первом этапе работ мы будем рассматривать механическую систему сбора изотопов, использующую систему коллекторов, расположенную в области однородного магнитного поля, хотя эффективность сбора будет, безусловно, выше в тороидальном и высокоградиентном поле встречно включенных соленоидов, представленных на рис.2 в [8]. Эти системы являются вторым этапом работ.

Производительность сепаратора может быть определена:

$$m = M \Delta \mu V_{||} n_i \alpha \beta S t, \quad (1)$$

где  $M$  – атомный вес изотопа,  $\Delta \mu$  – его процентное содержание,  $V_{||}$  – продольная скорость плазмы. Для оценок введем некоторые числовые величины.  $V_{||} \approx 10^5$  см/с;  $n_i$  – концентрация ионов плазмы ( $n_i = 10^{11}$  см<sup>-3</sup>);  $S$  – сечение плазмы ( $S = 3 \cdot 10^1$  см<sup>2</sup>);  $\alpha$  – КПД ускорения ионов, оптимистическая оценка,  $\alpha \approx 0.8$ , реально может оказаться значительно меньше;  $\beta$  – КПД сбора ионов  $\beta \approx 0.6 \dots 0.7$ ;  $t$  – время наработки изотопов для медицинских целей может быть выбрано порядка  $10^5$  с. Представленные ниже усло-

вия ускорения ионов изотопов являются, по сути, сомножителями в коэффициенте  $\alpha = \delta k l \gamma$  и др.

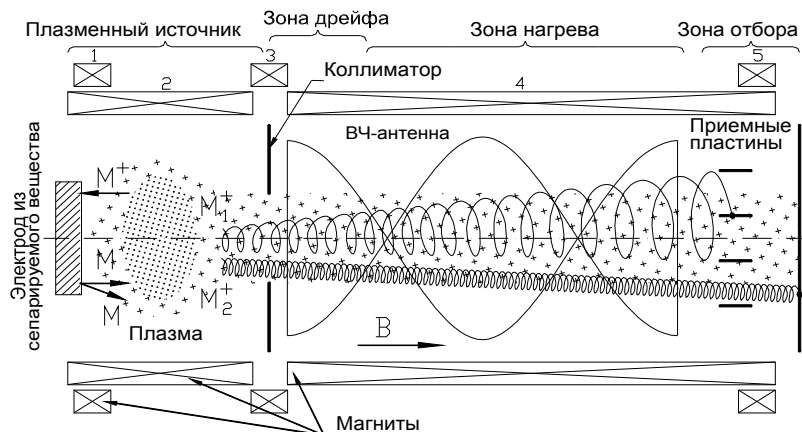


Рис.1. Схематический вид установки и физика процесса – создания плазмы, нагрева, сбора

Циклотронный нагрев или ускорение ионов происходит в условиях, когда на замагниченные ионы плазмы действует переменная компонента радиального или вихревого электрического поля  $E_r$  или  $E_\theta$  ( $E$ ), с частотой  $f$ , равной ларморовской частоте ионов,  $f_{ci}$ , в магнитном поле  $B$  (Эрс).

$$f_{ci} = 1.52 \cdot 10^3 Z M^{-1} B (\Gamma\text{ц}), \quad (2)$$

где  $Z$  – заряд ядра;  $M$  – атомный вес;  $Z$  – заряд иона, обычно равен 1. В результате этого воздействия за время  $t$ , когда ион находится в резонансе, в области однородного поля, в зоне нагрева, он набирает энергию:

$$W_1 = E^2 t^2 / 2M. \quad (3)$$

Процесс нагрева протекает за время пролета в действующем электрическом поле, т.е. на длине антенны. В реальных условиях нагрев ведется в плазме, имеющей начальную температуру, где  $V_{||}$  и  $V_{\perp 0} \neq 0$ . Поэтому возникает разброс поперечных энергий ионов  $\Delta W_{\perp} = \pm E \cdot e V_{\perp 0} \cdot t$ . Причина разброса связана с тем, что в начальный момент не все ионы находятся в фазе с ускоряющим полем. При циклотронном резонансе, т.е. при росте поперечной энергии, ларморовский радиус растет линейно со временем:

$$r_i = 1.02 \cdot 10^{-2} M^{0.5} Z^{0.5} T_i^{0.5} B^{-1} (\text{см}) = Et/B, \quad (4)$$

время пребывания частицы в области нагрева,  $t = L/V_{||}$ , где величина продольной скорости,  $V_{||}$ , является, приблизительно, постоянной величиной.

Осевые неоднородности магнитного поля  $\Delta B/B$  могут привести к нагреву частиц с массой  $M_i$ , отличающейся от резонансной в поле  $B$ , на величину  $\Delta M_i$ . Поэтому требование к однородности продольного магнитного поля в области нагрева, например при  $\Delta M = 2$  и  $M_i = 100$  запишется как:

$$\Delta B/B = \Delta M_i/M_i \approx 2 \cdot 10^{-2}, \quad (5)$$

где  $\Delta M_i$  – минимальная разница масс между выделяемыми соседними изотопами.

Соответственно, ширина спектра ВЧ-генератора  $\pm \Delta \omega_{ci}$  должна удовлетворять условию:

$$\Delta \omega_{ci} / \omega_{ci} \leq \Delta B/B. \quad (6)$$

Следующим фактором, влияющим на селективный нагрев в плазме, являются столкновения, ион-ионные и ион-нейтральные,  $v_{ст} = v_{ii} + v_{i0}$ , выводящие ионы из резонанса. предположим, что  $v_{ii} \approx v_{i0}$ . Известно, что:

$$v_{ii} = 5 \cdot 10^{-7} n_i / T_i^{3/2} M^{1/2}, \quad (7)$$

при этом величина кулоновского логарифма равна 10.

В этом случае, условие нагрева заключается в том, что время между столкновениями, приводящими к изменению скорости частицы (вектор) должно быть больше времени нагрева

$$v_{ст} / N \omega_{ci} \ll \Delta M_i / M \approx 2 \cdot 10^{-2}. \quad (8)$$

Величина продольной скорости ионов плазмы определится как:

$$V_{||} = V_{iz} \leq L_c \omega_{ci} / (\Delta E_{on} / E_{max})^{0.5} = L_c \omega_{ci} / 2\pi N, \quad (9)$$

где  $L_c$  – длина сепаратора;  $N$  – число оборотов ионов на длине ускорения,  $\Delta E_{on} / E_{max}$  – отношение величины прироста энергии за один оборот к максимальной энергии ускоренных ионов.

Наличие продольного разброса скоростей ионов, эффект Доплера, так же влияет на селективность нагрева

$$k \Delta V_z / \omega = 2\pi \Delta V_z / \lambda \omega < \Delta M_i / M_i. \quad (10)$$

Разброс продольных скоростей ионов в существенной мере зависит от конструкции и электрических параметров плазменного источника, а также величины и топографии магнитного поля в области «плазменный источник – область транспортировки потока плазмы – область циклотронного нагрева», в первом приближении от величины  $V_{ип} / V_0$ , т.е. величины пробочного отношения. Отсюда, имеется ряд причин, по которым не все ионы данного изотопа могут быть вовлечены в режим ускорения, т.е. величина  $\alpha = \delta k l \gamma < 1$ .

## НЕКОТОРЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ РЕШЕНИЮ

Реальность метода селективного нагрева-ускорения ионов изотопов не вызывает сомнений, однако, для ответов на вопросы о его эффективности и эко-

номичности следует решить ряд проблем научно-технического плана:

1. Выбор и создание системы плазменного источника. Транспортировка и стабилизация плазмы. (По-видимому, вряд ли стоит ожидать создания универсального источника для всех масс, хотя это было бы очень важно).
2. Исследовать процесс селективного нагрева ионов различных масс, для различных параметров плазмы, на различных типах антенн. (Вращение плазмы, скин-слой, гармоники, количество резонансных частиц.)
3. Исследовать различные системы сбора ускоренных ионов-изотопов: механические, магнитные, в существенной мере влияющие на конструкцию и стоимость магнитной системы, скорость извлечения – разгрузки продукта.
4. Исследовать на действующем макете указанные выше системы сепаратора для последующего составления Технического задания на "Опытно-промышленный плазменный сепаратор с селективным ускорением ионов". Такие эксперименты позволили бы испытать ряд узлов, не имеющих пока однозначного решения.

### ВЫБОР ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЕЛИЧИН ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Оценки процессов сепарации показывают однозначную связь атомного веса изотопов с величиной магнитного поля в системе, что, соответственно, определяет стоимость экспериментов. Поэтому, проведение работ при меньших величинах магнитного поля приводит, соответственно, к необходимости проведения экспериментов в диапазоне атомных масс до и около 20. Это: водород, дейтерий, гелий, литий, бор, углерод, азот, кислород, магний, алюминий (см. табл.1). Для последних атомные веса элементов различаются на величину  $\Delta M_i = 3$ , поэтому эти вещества также могут сыграть роль изотопов, облегчив при этом анализ полученных результатов, в виду существенного различия их химических свойств. Выбрана плотность плазмы в диапазоне  $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$  (см. ниже), диапазон частот ВЧ-генератора около  $10^6$  Гц.

Для проведения экспериментов выбрана частично имевшаяся в наличии магнитная система.

**Таблица 1.**

Некоторые свойства изотопов		
Элемент	Атомный вес	Содержание стабильных изотопов, %
${}_5\text{B}$	10	19,6
	11	80,4
${}_6\text{C}$	12	98,892
	13	1,108
${}_7\text{N}$	14	99,635
	15	0,365
${}_8\text{O}$	16	99,759
	17	0,037
	18	0,204

Исходя из данных, приведенных в таблице, можно сделать вывод, что возможно проводить эксперименты и с бором, и углеродом, и их смесями; для кислорода и азота целесообразен эксперимент со смесями. Для алюминия и магния – работа со сплавами. Итак, исходные данные:

$$B=10^4 \text{ Э}; E_0=10 \text{ эВ}, E_{\text{max}}=100 \text{ эВ}; Z=1.$$

Результаты расчетов скорости, ларморовского радиуса и ларморовской частоты приведены в таблице 2.

**Таблица 2.**

Элемент	$r_i$ , см		$v_{Ti}$ , $10^6$ см/с		$f_{ci}$ , МГц
	10эВ	100эВ	10эВ	100эВ	
${}_5\text{B}^{10}$	1.02	3.24	0.979	3.096	1.52
${}_5\text{B}^{11}$	1.07	3.383	0.933	2.952	1.38
${}_6\text{C}^{12}$	1.117	3.533	0.8937	2.826	1.26
${}_7\text{N}^{14}$	1.207	3.816	0.827	2.616	1.08
${}_8\text{O}^{16}$	1.29	4.08	0.774	2.4475	0.95
${}_{12}\text{Mg}^{24}$	1.58	4.99	0.632	1.998	0.96
${}_{13}\text{Al}^{27}$	1.67	5.3	0.596	1.88	0.56

Требование к однородности продольного магнитного поля:

$$\Delta B/B < \Delta M_i/M_i.$$

Здесь  $\Delta M_i$  – минимальная разница масс между выделяемым и соседними изотопами.

Отношение  $\Delta M_i/M_i$  для рабочих изотопов:

$${}_5\text{B}^{10} \text{ и } {}_6\text{C}^{12} \quad \Delta M_i/M_i = 2/12 = 0,16$$

$${}_5\text{B}^{11} \text{ и } {}_6\text{C}^{12} \quad \Delta M_i/M_i = 1/12 = 0,083$$

$${}_7\text{N}^{14} \text{ и } {}_8\text{O}^{16} \quad \Delta M_i/M_i = 2/16 = 0,125.$$

Минимальное значение  $\Delta M_i/M_i = 8,3\%$ . Следовательно, отношение  $\Delta B/B \leq 0,083$ .

Еще один фактор, влияющий на селективность нагрева в плазме, – соударения между ионами.

$$v_{ii}/\omega < \Delta M_i/M_i v_{ii} = 5 \cdot 10^{-7} n_i T^{-3/2} \cdot \sqrt{A},$$

$A$  – массовое число;  $T$  – температура в электрон-вольтах;  $n$  – плотность плазмы.

Для:  $n=10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;  $T=10 \text{ эВ}$ .

$$v_{iB(10)}=0.5 \cdot 10^5, \quad v_{iB(11)}=0.524 \cdot 10^5, \quad v_{iC(12)}=0.547 \cdot 10^5,$$

$$v_{iN(14)}=0.592 \cdot 10^5, \quad v_{iO(16)}=0.633 \cdot 10^5.$$

Найдем время между соударениями соседних изотопов,  $\tau_{ii} = 1/v_{ii}$ , где  $L$  – длина пролета:

$$\tau_{iB(10)}=2 \cdot 10^{-5} \text{ с}, L=19,58 \text{ м}$$

$$\tau_{iB(11)}=1 \cdot 10^{-5} \text{ с}, L=17,8 \text{ м}$$

$$\tau_{iC(12)}=1.83 \cdot 10^{-5} \text{ с}, L=16,3 \text{ м}$$

$$\tau_{iN(14)}=1.69 \cdot 10^{-5} \text{ с}, L=14,57 \text{ м}$$

$$\tau_{iO(16)}=1.58 \cdot 10^{-5} \text{ с}, L=12,64 \text{ м}.$$

Область ускорения имеет длину около 60...70 см, следовательно, с учетом движения по спиральной траектории однократные столкновения возможны при  $n_e=10^{12} \text{ см}^{-3}$ ;  $T_i=10 \text{ эВ}$ . Поэтому диапазон плотностей плазмы должен быть порядка  $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Этот же диапазон плотностей целесообразен и исходя из условия проникновения волн в плазму. Величина скин-слоя:  $\delta=c/\omega_{pe}=5.31 \cdot 10^5/n^{0.5}$ , что для  $n=10^{11} \text{ см}^{-3}$  дает  $\delta=1.5 \text{ см}$ . Здесь мы не будем обсуждать возможности перехода на плотности  $10^{12} \text{ см}^{-3}$  и выше.

## ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка включает в себя следующие системы: магнитная система, вакуумная, плазменный источник ВЧ-нагрева, диагностики и контроля параметров установки и плазмы, выделения изотопов (элементов).

### МАГНИТНАЯ СИСТЕМА

Желаемое распределение магнитного поля вдоль оси системы, описанное в работе [8], было рассчитано для имевшихся в наличии элементов и представлено на рис.2. На первом этапе магнитная система включает 5 соленоидов, обеспечивающих получение продольного магнитного поля.

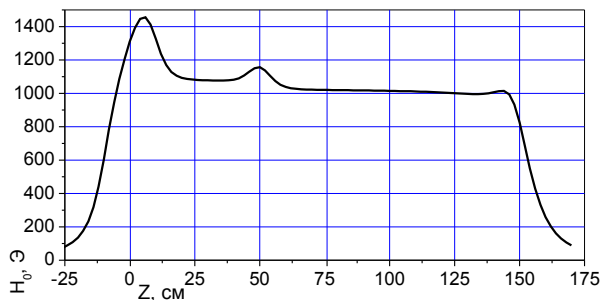


Рис.2. Распределение магнитного поля по оси системы

Расчет производился по методу суперпозиции полей от элементарных витков с током, используя соотношение:

$$H_z(z,0) = 0.2 \cdot \pi \cdot I \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (11)$$

где  $I$  – ток через элементарный виток;  $a$  – радиус витка;  $z$  – расстояние от витка по оси. Параметры соленоидов магнитной системы, для среднего поля  $10^3$  Э, (см. рис.2) представлены ниже.

**"Короткий соленоид", соленоид плазменного источника №2:** число витков  $N=1705$ , диаметр провода  $d_{np}=3$  мм; средний радиус витка  $a_{cp}=11.7$  см; длина соленоида  $2b=46,6$  см; ток  $I=24,3$  А; длительность импульса  $t_u=10$  с. Величина магнитного поля в центре соленоида  $H_{max}=996,6$  Э; напряжение питания  $U=11,25$  В; максимальное изменение магнитного поля за счет нагрева  $\Delta H_{max}=0,082\%$ ; соленоид охлаждается жидкими азотом или неоном.

**Соленоид области ВЧ-нагрева №3:**  $N=325$ ,  $d_{np}=3$  мм;  $a_{cp}=11,3$  см;  $2b=98$  см;  $I=245,1$  А;  $t_u=10$  с,  $H_{max}=1000,4$  Э;  $U=20,5$  В;  $\Delta H_{max}=3,63\%$ ; охлаждение, как у первого.

**Внешняя пробка соленоида источника №1:**  $N=1360$ ,  $d_{np}=2,28$  мм;  $a_{cp}=6,9$  см;  $2b=20$  см;  $I=11,1$  А;  $t_u=10$  с,  $H_{max}=800,2$  Э;  $U=27,53$  В;  $\Delta H_{max}=0,13\%$ ; водяное охлаждение.

**Внутренняя пробка соленоида источника и концевой соленоид №3 и 5:**  $N=676$ ,  $d_{np}=2,28$  мм;  $a_{min}=9,7$  см;  $2b=6$  см;  $I=9$  А;  $t_u=10$  с.  $H_{max}=386$  Э;  $U=19,5$  В;  $\Delta H_{max}=0,13\%$ ; воздушное охлаждение.

Длинный магнитный диполь, которым является магнитная система, создает значительные "рассеянные" поля, поэтому следующим этапом является их

снижение путем использования компенсирующих соленоидов и ферромагнитного магнитопровода.

### ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА

Обеспечивает работу плазменного источника и системы селективного ускорения ионов. Условия в обеих этих системах противоположны. Для получения потока плазмы с плотностью  $10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $T_i=10$  эВ, плотность нейтрального газа в плазменном источнике должна быть около  $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , в области селективного ускорения, для снижения частот соударений,  $v_{ст} = v_{ii} + v_{i0}$ , плотность нейтрального газа должна быть около  $10^{10} \text{ см}^{-3}$ , т.е.  $1 \dots 3 \cdot 10^{-6}$  Торр, что требует как высоких скоростей откачки в камере ускорения, так и системы дифференциальной откачки газа в области дрейфа плазмы. Поэтому при работе с газовыми соединениями в плазменном источнике, скорости откачки должны лежать на уровне  $10^2 \dots 10^3$  л/с, что может быть получено с помощью диффузионных насосов. В камере селективного ускорения производительности должны лежать на уровне не ниже  $10^4$  л/с, что может быть получено с помощью криогенных либо сорбционно-распылительных титановых насосов. Для откачки инертных распыляющих газов Ar, Kr, Xe необходимо применение криогенных насосов в области плазменного дрейфа (см. рис.4).

Описанная вакуумная система пригодна в исследованиях физики плазмы. При работе с конденсатами, т.е. при сборе продукта – изотопов, необходимы дополнительные манипуляционные камеры с контролируемыми вакуумными условиями со стороны ионного источника и коллекторов сбора продукта (см. [8]).

### ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК

Для предложенных выше пар элементов необходимы, по-видимому, два типа плазменных источников. Для газов – это источник с разрядом в пробочном магнитном поле, имеющий накаленный катод. В этой же системе возможна и работа с газообразными соединениями углерода и бора. Для твердотельных систем бор-углерод и алюминий-магний возможно применение вакуумных дуг, а также применение источника распылительного типа с ВЧ-разрядом. В этом последнем случае, на начальной стадии разряда используются для поджига газы – аргон, криптон или ксенон, затем желательнее поддержание разряда за счет самораспыления. Коэффициенты распыления углерода, Ar, Kr, Xe имеют величины около 2 при энергиях ионов 7, 3 и 8 кэВ, соответственно. По-видимому, системы плазменных источников с СВЧ-разрядами менее предпочтительны из-за их зависимости от резонансного магнитного поля. Проблемой для плазменных источников дугового типа является возможность работы в условиях большого магнитного поля. Поэтому, на первой стадии работ наиболее простой представляется работа с газовыми компонентами. Параметры разряда: напряжение до 200 В, ток до 10 А. Для системы алюминий-магний, по-видимому, целесообразен ВЧ-источник (см. рис.3).

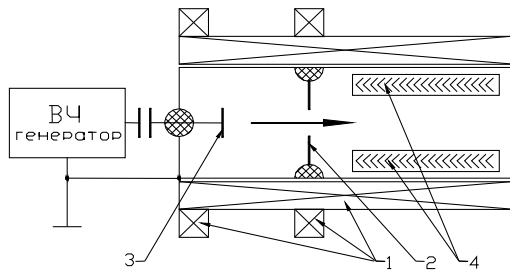


Рис. 3. Схематический вид ВЧ-источника плазмы: 1 – магнитные обмотки, 2 – отражатель-коллиматор, 3 – высоковольтный распыляемый электрод, 4 – крионасос

Коэффициенты распыления и энергии ионов ожидаются, соответственно следующими. Al-Al: 1-2.5,  $10^3 \dots 10^4$  эВ; Ar-Al: 2-4,  $2 \cdot 10^3 \dots 10^4$  эВ; Kr-Al: 1-5,  $0.6 \cdot 10^4$  эВ; Xe-Al: 1-5,  $0.6 \cdot 10^4$  эВ. Для Mg и коэффициенты распыления, и интервал рабочих напряжений будут приблизительно такими же, что и для Al. Таким образом, для работы источника в режиме самораспыления необходим первоначальный поджиг с помощью благородных газов и работа при напряжениях около 3.5 кВ, величина разрядного тока 1...3 А.

#### СИСТЕМА ВЧ- НАГРЕВА

Имеются две составляющие, собственно генератор и антенна. Для представленного набора элементов частотный спектр генератора должен лежать в пределах 50...150 кГц, с шириной рабочей зоны:  $\Delta\omega_{ci}/\omega_{ci} \leq \Delta B/B = 5\%$ .

Для селективного нагрева предполагается использовать два типа антенных устройств: соленоидальное и спиральное. Для соленоидальных антенн величина азимутального поля на оси системы равна 0, она не создает радиальных полей, имеющих у спиральной. Величина  $E\vartheta$  обычно  $\approx 0.5$  В/см, т.е. для ускорения частицы требуется несколько десятков оборотов. Для соленоидального типа антенны длиной  $L$ , радиусом витков  $R_a$  в камере с радиусом  $R_k$  и числом витков  $W$ , величина  $E\vartheta \approx U/2\pi R_a W$ , где  $U$  – приложенное напряжение. С другой стороны  $E\vartheta = 2\pi \omega W I_a / c^2 L [1 - R_a^2 / R_k^2]$ , что дает ток в антенне на уровне 100 А.

#### СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЫ

Диагностика плазмы возможна только с торцов, в области плазменного источника и в области собирающих пластин-зондов. Рабочие параметры плазмы:  $10^{10} \dots 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, а температура – 1...10 эВ, поэтому целесообразно применить зондовые методики. Кроме того, диагностика ионной компоненты может проводиться по металлическим осадкам с торцовых собирающих пластин-зондов.

#### СИСТЕМА СБОРА ИЗОТОПОВ (ЭЛЕМЕНТОВ)

Сепарация заключается в пространственном разделении быстрых и медленных ионов, осаждающихся на пластины различной конфигурации: торцевые, куда приходят медленные ионы, и цилиндрические коаксиальные, на которые приходят ускоренные

ионы. Чтобы избежать осаждения на коаксиальные пластины медленных ионов, перед ними, со стороны области нагрева, располагаются кольца, имеющие ширину двух ларморовских радиусов медленных ионов. Эти дополнительные пластины снижают производительность сепаратора, что учитывается в формуле (1) коэффициентом  $\beta \approx r_m/r_0$ , приблизительно равным соотношению ларморовских радиусов медленных и быстрых ионов, что дает величину около 0.65. Системы магнитного разделения, представленные в [7] на рис.2,б,в, по-видимому, имеющие коэффициенты сбора  $\beta \approx 1$ , будут исследоваться на втором этапе экспериментов.

#### ПРИНЦИПЫ И СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СЕПАРАТОРУ НА ОСНОВЕ РАЗРЯДА ПЕННИНГА

Как указывалось выше, экспериментально разделение изотопов щелочных металлов с успехом было осуществлено при воздействии на плазму  $Q$  – машины внешним ВЧ-полем на гирочастотах компонентов плазмы, что приводило к селективному нагреву той или другой компоненты [1].

При рассмотрении плазменных делящих устройств необходимо учитывать, что существенную роль в ограничении их работы могут играть неустойчивости с характерными частотами  $\omega \leq \omega_{ci}$ . В комбинированных полях  $E$  и  $H$ , используемых в плазме, скорость вращения компонентов можно определить из уравнения движения:

$$-\frac{V_{\varphi\alpha}^2}{r} = \frac{e_\alpha}{m_\alpha} E + V_{\varphi\alpha} \omega_{E\alpha} - \frac{1}{\omega_\alpha} \frac{\partial P_\alpha}{\partial r}, \quad (12)$$

где  $V_{\varphi\alpha}$  – скорость частиц сорта  $\alpha = e, i$ ;  $P_\alpha = n_\alpha T_\alpha$ .

Таким образом  $V_{\varphi(e)} = -cE/H$  (без учета центробежной силы), с учетом центробежной силы

$$V_e^i = \frac{r\omega_{ci}}{2} \left( 1 + \sqrt{4e_i E_r / \omega_{ci}^2 r} \right). \quad (13)$$

Стационарное движение ионов возможно и при больших значениях электрического поля, если  $E < 0$ .

На возможность возбуждения ионных циклотронных колебаний в плазме указывалось в экспериментальных работах [11, 12].

Если характерная частота вращения частиц плазмы  $\omega_{вр} \sim cE/rH$  близка к частоте ионов  $\omega_{ci}$ , происходит резонансное возбуждение ионной циклотронной неустойчивости. Величины внешних полей, соответствующих резонансу, связаны соотношением:

$$H_{кр} \approx \left( \frac{2 \cdot E_r \cdot m_i \cdot c^2}{e_i \cdot r} \right)^{1/2}. \quad (14)$$

В условиях развитой неустойчивости регистрировались ионы, уходящие из плазмы вдоль магнитного поля с энергией  $W=100 \dots 200$  эВ. Описанные эффекты наблюдались в разряде с осциллирующими электронами (Пеннинговском разряде).

Все это подтолкнуло эксперименты по исследованию возможных механизмов сепарации веществ по массам в плазменной фазе с использованием соб-

ственных, самовозбуждающихся ионных циклотронных колебаний в разряде.

Принципиальная схема установки приведена на рис.4.

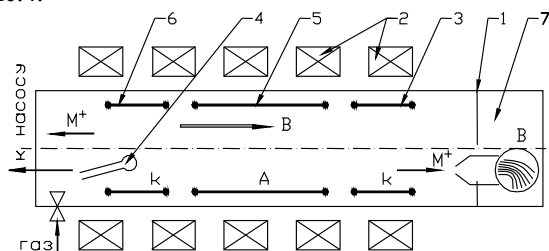


Рис. 4. Принципиальная схема установки

Анод 5 и отражательные электроды 3, 6 составляют ячейку Пеннинга. Диаметры анодного цилиндра и отражательных электродов 80 мм. Длина анода ( $l_a$ ) и отражательных электродов ( $l_0$ ) 125 и 60 мм, соответственно. Зазор  $\delta$  между анодным и отражательным электродом 40 мм.  $E_r$  создается в зазоре  $\delta$  и может быть оценено как  $E_r \approx 0,3 U_a / \delta$ , где  $U_a$  – потенциал на аноде, который в экспериментах мог изменяться в пределах 0...2 кВ. Продольное магнитное поле создавалось короткими катушками 2 и изменялось от 0 до 3 кЭ.

Для повышения эффективности ионизации рабочего вещества при низком начальном давлении применялся накаливаемый катод 4, который помещался в плоскости одного из отражательных электродов. Начальное давление газа:  $2 \dots 3 \cdot 10^{-6} \dots 7 \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст. При этом плотность плазмы достигала  $4 \cdot 10^9 \dots 5 \cdot 10^{10}$  см $^{-3}$ .

Необходимо учитывать, что распределение  $E_r$  в плазме может существенно отличаться от  $E_r$ , когда плазма отсутствует. То есть  $E_r$  и его радиальное распределение определяются разрядными условиями ( $N_z$ , объемные заряды и т.д.).

Для диагностики разрядов применялись зонды различных конструкций, а для ионов, покидающих разряд – масс-спектрометр (магнитный анализатор с однородным магнитным полем). Транспортировка ионов из интересующей области разряда к масс-спектрометру осуществлялась через постоянно открытый заборник и фокусирующую систему.

Анализатор масс-спектрометра, детектирующее устройство, фокусирующая линза и заборник жестко соединялись друг с другом на подвижной платформе. Заборник ионов вводился через вакуумное соединение в разрядное устройство и мог помещаться в любую точку плазменного образования без нарушения вакуума и соосности с анализатором масс-спектрометра. Камера спектрометра и коллекторы ионов автономно откачивались насосом НОРД-100, который обеспечивал вакуум  $P \sim 10^{-6}$  мм.рт.ст.

Масс-спектрометр не выполнял функцию разделения частиц по массам, а использовался как диагностическое устройство для анализа энергии и массы ионов, покидающих разряд вдоль магнитного поля в различных его радиальных точках.

Фокусировка осуществлялась с углом  $\Psi=60^\circ$ , радиус камеры  $r_0=10$  см.  $H=2$  кЭ.  $\Delta H/H \sim 0.002$ , размеры

щелей 0.1 и 0.2 см, что определяло разрешающую способность  $R > 30$ . При этих параметрах диапазон измеряемых масс 5...80 ат. ед., с энергией частиц до 1 кЭВ. Энергия ионов, поступающих из разряда в масс-спектрометр определялась методом задерживающего потенциала путем подачи положительного напряжения на сетки, расположенные в канале заборника и перед детектором частиц.

Как указывалось ранее, в разряде при выполнении условия  $2\omega_{пр} \approx \omega_{ci}$  наблюдалась генерация ионных циклотронных колебаний на гирочастоте частиц, для которых выполняются резонансные условия. Путем изменения магнитного поля и анодного напряжения на разряде можно было осуществлять серию последовательных резонансов практически для всех сортов ионов по массе в плазме. Было установлено, что неустойчивость генерируется в тонких аксиальных слоях на конкретном радиусе плазмы  $r$ , где выполняется условие генерации по величинам  $H, U_a, m_i$ .

Это позволило утверждать, что в циклотронном резонансе принимают участие частицы с  $\rho_{i\perp} \leq R$  и траекторией движения, охватывающей центр системы. В таком движении могут участвовать не все ионы, а только их часть из функции распределения по скоростям для которых  $v_\theta \leq \omega_{ci} R$ . При этом условие замагниченности для всех частиц функции распределения данного сорта не обязательно.

В режиме генерации неустойчивости экспериментально наблюдался нагрев того сорта ионов плазмы, для которого осуществлялся резонанс.

Вопросы сепарации в таком устройстве изучались на смесях различных газов и при заполненной камере парами химических соединений, такими как: LiF, LiCl, LiBr, K $_2$ MnO $_4$ .

Это позволило испытать устройство в режимах разделения с  $\Delta M/M \leq 1$ .

Типичные кривые по результатам экспериментов представлены на рис.5-8.

Коэффициент обогащения определяется из выражения  $\epsilon = (S_{ш}/S) \cdot 100\%$ , где  $S$  площадь, ограниченная профилем линии массового спектра,  $S_{ш}$  – площадь массового пика на уровне разрешения. В зависимости от соотношения масс разделяемых веществ и  $\Delta M/M$ ,  $\epsilon$  удавалось получить от 5...15% до 95%.

Продукты разделения литиевых соединений (Li $^6$ , Li $^7$ ) напылялись на подложку, находившуюся в плазменном объеме, в торце отражательного электрода и анализировались методом вторичной ион-ионной эмиссии.

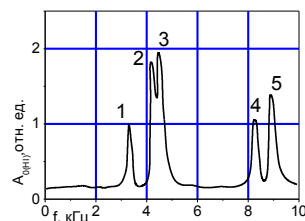


Рис 5. Спектр ионных циклотронных колебаний по частотам

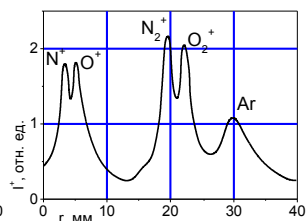


Рис 6. Распределение токов ионов многокомпонентной плазмы

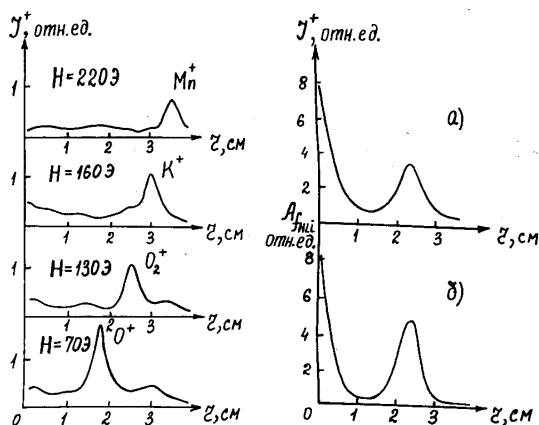


Рис.7. Радиальное распределение тока разделенных ионов  
Рис.8. Радиальное распределение тока ионов лития (а) и амплитуды ионно-циклотронных колебаний (б)

Для создания опытно-промышленного сепаратора необходимо решение вопросов: увеличение производительности, совершенствование методов сбора, стабилизация неустойчивости, фон нейтральных и неразделенных частиц и т.д.

### ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ систем сепараторов с внешним ВЧ-полем (1) и собственным самовозбуждаемым (2) показывает:

1. Работоспособность системы (1) подтверждена экспериментально на значительном количестве элементов и не вызывает сомнений. Проблемы и задачи были сформулированы выше.
2. Рабочие плотности плазмы для систем (1) и (2) различаются на полтора порядка величины, примем для определенности 30. Сечения плазмы различаются, приблизительно, в 2 раза. Таким образом производительности различаются в 60 раз.
3. Размеры систем по объему занимаемого магнитного поля различаются, приблизительно, в 50 раз.
4. Исходя из этого, представляется, что удельные энергозатраты на производство единицы продукции могут оказаться, приблизительно, равными, поскольку основные энергозатраты связаны с получением магнитного поля.
5. К достоинствам системы (2) относится ее простота, однако, малая степень ионизации создает проблемы с эффективностью использования первичного материала, что удорожит конечный продукт. Возможным решением может оказаться внешняя инжекция плазмы в систему (2), что потребует дополнительных исследований.

### COMPARATIVE ANALYSIS OF PROJECTS OF PLASMA SEPARATORS OF ISOTOPES WITH OSCILLATIONS ON CYCLOTRON FREQUENCIES

A.N.Dovbnya, O.S.Druy, A.M.Egorov, V.O.Ilyicheva, V.I.Lapshin, M.V.Sosipatrov, O.M.Shvets, V.B.Yuferov,

6. Одним из путей увеличения производительности системы (2) является применение модульного принципа. Модули, работающие параллельно или последовательно. В последнем случае, ситуация может оказаться непредсказуемой.
7. Представляется, что на настоящем уровне знаний эти системы эквивалентны и целесообразно их исследование.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Dawson J.M. et.al. Isotop Separation in plasma by use of ion cyclotron resonance // *Phys. Rev. Lett.*, 1976, 37, 23, p.1547-1550.
2. О.М. Швец, В.Б. Юферов, Е.И. Скибенко и др. Научно-технические проблемы создания резонансного плазменного сепаратора изотопов // *Труды Украинского вакуумного общества*. Киев. 1995, т.1, с.195-198.
3. Годовые отчеты ННЦ ХФТИ, 1994-1999 гг. Плазменный резонансный сепаратор изотопов. Руководители: О.М. Швец, В.Б. Юферов.
4. И.А. Котельников, С.Г. Кузьмин, Разделение тяжелых изотопов при помощи ИЦР-нагрева на второй гармонике // *Физика плазмы*. 1999, т. 25, №12, с. 1095-1104.
5. В.И. Волосов, И.А. Котельников, И.Н. Чуркин, С.Г. Кузьмин, и др. Установка для разделения изотопов // *Атомная энергия*. 2000, т.88, вып.5, с. 370-378.
6. В.И. Волосов, В.В. Деменев, А.Н. Драничников, и др. *Проект установки для разделения изотопов методом ИЦР-нагрева*: Препринт ИЯФ-2001-48, Новосибирск, 2001.
7. Ю.А. Муромкин. Разделение изотопов в плазме с помощью ионно-циклотронного нагрева // *Итоги науки и техники. Физика плазмы*. Москва, 1991, т.12, с. 83.
8. А.Н. Довбня, А.М. Егоров, О.М. Швец, В.Б. Юферов, С.В. Невструев. Концепционный проект плазменного резонансного сепаратора // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения»* (3), №4, 2003, с.323.
9. А.Б. Михайловский. *Теория плазменных неустойчивостей*. М.: «Атомиздат». 1977, т. 2.
10. В.В. Долгополов, В.В. Сизоненко, К.Н. Степанов. Об устойчивости вращающейся плазмы, находящейся в скрещенных электрическом и магнитном полях // *УФЖ*. 1973, 18, 1, с.18-28.
11. А.М. Rozkov, K.N. Stepanov et. al. Cyclotron resonance instability in rotating plasma // *Plasma Phys.* 1970, 12, p.512.
12. А.М. Рожков, К.Н. Степанов и др. Резонансное возбуждение ионно-циклотронных колебаний во вращающейся плазме // *Письма в ЖЭТФ*. 1969, т.10, №2, с.71-75.

*D.V.Vinnikov, Ju.V. Kovtun, A.V.Moiseenko, E.A.Shevchenko*

The process physics of isotope separation of elements in sets of using external HF fields and the spontaneously excited by electric fields on frequencies of equal to the cyclotron frequencies of some ions of plasma has been considered. The constructions of working model of plasma separator of isotopes of light elements, using the ion cyclotron resonance and separator, using the penning discharge for their fission are described. System parameters are linked with, the main tasks of breadboarding experiment are determined.

**ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЕКТІВ ПЛАЗМОВИХ СЕПАРАТОРІВ ІЗОТОПІВ  
З КОЛИВАННЯМИ НА ЦИКЛОТРОННИХ ЧАСТОТАХ**

*А.М. Довбня, О.С. Друй, О.М. Єгоров, В.О. Ілічова, В.І. Лапшин, М.В. Сосінатров, О.М. Швець, В.Б. Юферов,  
Д.В.Вінніков, Ю.В.Ковтун, А.В. Моїсєєнко, Є.А. Шевченко*

Розглянуто фізика процесів поділу ізоотопів елементів у системах, які використовують зовнішні ВЧ-поля та спонтанно порушувані електричні поля, на частотах, рівних циклотронним частотам деяких іонів плазми. Описано конструкції діючого макета плазмового сепаратора ізоотопів легких елементів, що використовує іонно-циклотронний резонанс, і сепаратора, що використовує пеннінговський розряд для їхнього поділу. Розраховано параметри систем, визначені основні задачі макетуєного експерименту.