

КОНЦЕПЦИОННЫЙ ПРОЕКТ ПЛАЗМЕННОГО РЕЗОНАНСНОГО СЕПАРАТОРА

А.Н. Довбня, А.М. Егоров, О.М. Швеиц, В.Б. Юферов, С.В. Невструев
Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт"
г. Харьков, 61108, ул. Академическая 1, Украина, e-mail: v.yuferov@kipt.kharkov.ua

Рассмотрена конструкция плазменного сепаратора изотопов, использующая ионно-циклотронный резонанс для их разделения. Рассчитаны параметры макетирующего устройства и определены основные задачи макетирующего эксперимента.

ВВЕДЕНИЕ

Метод разделения изотопов, использующий ионно-циклотронный резонанс (ИЦР), является универсальным и в силу своей высокой эффективности одноступенчатым. По энергоэффективности и производительности он уступает методам, использующим центрифуги и газовую диффузию, однако, позволяет работать с малыми количествами веществ и широкой номенклатурой. Этого вполне достаточно для ряда медицинских задач. Суть метода заключается в селективном ИЦР-нагреве резонансных ионов в многоизотопной плазме, получаемой в плазменном источнике и транспортируемой в однородном магнитном поле с последующим разделением горячих и холодных ионов. Диапазон разделяемых масс – практически вся таблица Менделеева, переход с одних масс на другие может происходить как при изменении частот ВЧ-генератора, так и изменении величины магнитного поля. Для реализации метода последовательно осуществляются операции: ионизация паров элемента, изотопы которого необходимо разделить; создание потока спокойной плазмы с замагниченными ионами в достаточно протяженном однородном магнитном поле; селективное ускорение ионов выделяемого изотопа; разделение и сбор ускоренных ионов. Для реализации метода необходимо создание соленоидов с однородным стационарным магнитным полем в диапазоне 1...3 Тл, и рабочим объемом около 1 м³.

В настоящее время имеется достаточно обширная литература, что свидетельствует о привлекательности и не тривиальности метода [1-5].

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Вид установки для селективного разделения изотопов методом ИЦР-нагрева показан на рис. 1.

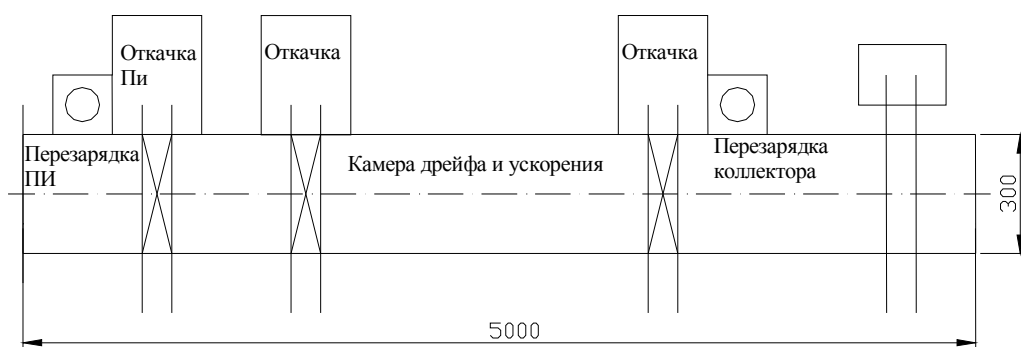


Рис. 1. Схематический вид сепаратора

Установка состоит из пяти секций, две центральные - основные, включают камеру плазменного источника (ПИ), систему дифференциальной откачки, область транспортировки плазмы, селективного ускорения ионов, область разделения "горячих" и "холодных" ионов, т.е. область селективного разделения изотопов. Крайние слева и справа камеры, отделенные клапанами с собственными вакуумными системами, необходимы для длительного функционирования сепаратора, перезарядки ПИ и извлечения изотопов без нарушения цикла производства. На Рис. 2, а изображен профиль магнитного поля вдоль оси установки Z. Область ПИ находится слева между двумя магнитными пробками.

большее, правая промежуточная – меньше. Такой характер магнитного поля должен уменьшить потери плазмы наружу из плазменного источника и обеспечить поток плазмы в область нагрева. Спад поля на правой стороне сепаратора характерен для случая извлечения изотопов с помощью механических коллекторов, располагающихся в торце магнитной системы, на которые осаждаются ионы, имеющие различные ларморовские радиусы. Возможны два других варианта разделения изотопов, использующих не однородные магнитные поля: криволинейной и антипробочной геометрии, они приведены на рис. 2, б и в.

Варианты магнитных систем для сбора изотопов

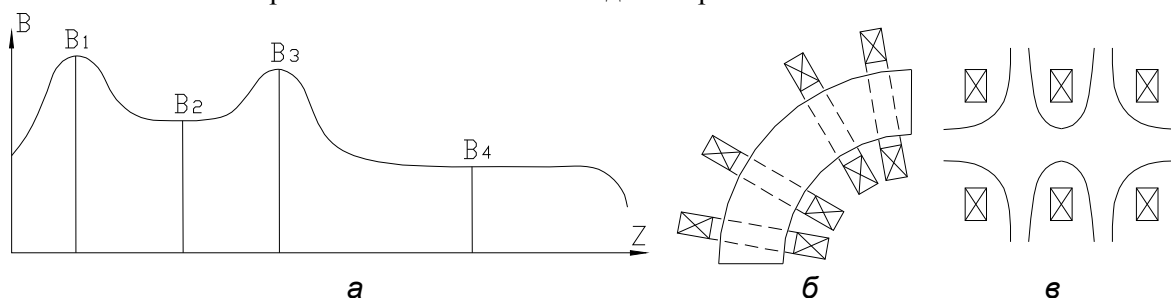


Рис. 2. Характер изменения продольного магнитного поля (а), варианты магнитных сепарационных систем (б и в)

Магнитная система, формирующая аксиально магнитное поле требуемой конфигурации, с возможностью подстройки в каждой из областей, как показали расчеты, должна быть сверхпроводящей, для снижения энергозатрат и стоимости изотопной продукции.

Вакуумная система с системой дифференциальной откачки и управляемого напуска газа в области ПИ, транспортировки и ускорения ионов плазмы должна откачиваться безмасляными насосами.

ПИ возможно когда-нибудь и будут универсальными, однако в настоящее время разрабатывается ряд вариантов, начиная от вакуумно-дуговых распылителей с СВЧ-выжиганием капельной фазы, ВЧ дуговых распылителей и магнетронных разрядов.

В настоящее время нельзя ориентироваться также и на один тип ВЧ антенного устройства, емкостной или индуктивный, имеющий ряд модификаций (винтовой или соленоидальный), поскольку к нему

предъявляются достаточно широкие требования, основным из которых является ускорение ионов во всей толщине плазмы. Ряд из этих требований не нашел еще однозначного решения, в то же время ряд критериев является уже общепринятым.

ОСНОВЫ ИЦР-МЕТОДА РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ

В настоящее время имеется значительный опыт получения стабильной холодной плазмы практически всех элементов таблицы Менделеева, для определенности речь будет идти о плазме из паров металлов. Есть также опыт (Франция, США) циклотронного нагрева ионов, К и Ni и соответствующего разделения изотопов. 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_θ , с частотой f , равной ларморовской частоте ионов f_{ci} , в магнитном поле В.

$$f_{ci} = 1.52 \cdot 10^3 Z \mu^{-1} B(\text{Гц}), \text{ В(Э)},$$

где Z – заряд ядра; μ – атомный вес; Z – заряд иона, обычно равен 1.

В результате б и в за время t , когда ион находится в резонансе, он набирает энергию:

$$W_{\perp} = E^2 \cdot t^2 / 2\mu.$$

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 $W_{\perp 0}$ или $v_{\perp 0} \neq 0$. Поэтому возникает разброс поперечных энергий ионов и $\Delta W_{\perp} = \pm E \cdot v_{\perp 0} \cdot t$. Причина разброса связана с тем, что в начальный момент не все ионы находятся в фазе с ускоряющим полем. При циклотронном резонансе ларморовский радиус растет линейно со временем:

$$r_i = 1,02 \cdot 10^2 \mu^{0,5} Z^{0,5} T_i^{0,5} B^{-1}(\text{см}) = E \cdot t / B,$$

в то же время $t = L / v_{\parallel}$.

Требование к однородности продольного магнитного поля запишется:

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

где ΔM_i – минимальная разница масс между выделяемыми соседними изотопами. Для определенности выберем $\Delta M_i = 2$ и $M_i = 100$.

Следующим фактором, влияющим на селективный нагрев в плазме, являются столкновения между ионами и нейтралами, $v_{ст} = v_{ii} + v_{i0}$.

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

величина кулоновского логарифма равна 10.

Условие нагрева $v_{ст} / \omega_{ci} \ll \Delta M_i / M_i \approx 2 \cdot 10^{-2}$

$$V_{\parallel} = V_{iz} \leq L \omega_{ci} / (\Delta E_{оп} / E_{max})^{0,5} = L \omega_{ci} / 2\pi N$$

где L – длина сепаратора; N – число оборотов ионов на длине ускорения.

Эффект Доплера влияет на селективность нагрева при наличии продольного разброса скоростей ионов:

$$\Delta \omega_D / \omega = k \Delta v_z / \omega < \Delta M_i / M_i,$$

производительность сепаратора может быть определена:

$$m = \mu \Delta \mu V_{\parallel} n_i \alpha \cdot \beta \cdot S \cdot t,$$

где μ – атомный вес изотопа ($\mu = 100$); $\Delta \mu$ – содержание $\%(\Delta \mu = 0,1)$; V_{\parallel} – продольная скорость плазмы

$V_{\parallel} = 10^5$ см/с; n_i – концентрация ионов плазмы ($n_i = 10^{12}$ см⁻³); S – сечение плазмы ($S = 3 \cdot 10^1$ см²); α – КПД ускорения ионов ($\alpha = 0,8$); β – КПД сбора ионов ($\beta = 0,8$); t – время наработки ионов ($t = 10^5$ с).

Как следует из сказанного выше, реальность селективного нагрева-ускорения изотопов не вызывает сомнений, однако в настоящее время имеется ряд вопросов научно-технического плана, способных повлиять на сроки и стоимость работы.

НЕКОТОРЫЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ, ПОДЛЕЖАЩИЕ РЕШЕНИЮ

Создание полномасштабной системы в настоящее время маловероятно из-за больших финансовых затрат и длительного времени постройки, без моделирования всех принципиальных узлов установки. Имеется возможность проведения работ при меньших величинах магнитного поля, около 1...2 кЭ, соответственно в диапазоне атомных масс до и около 20. Это: бор, углерод, азот, кислород, магний, алюминий. Атомные веса элементов различаются на величину $\Delta M_i = 1$, поэтому эти вещества могут сыграть роль изотопов, обогатив при этом анализ полученных результатов. Плотность плазмы $[1] - 10^{11}$ см⁻³, диапазон частот ВЧ-генератора $5 \cdot 10^4 \dots 10^6$ Гц. Такие эксперименты позволили бы однозначно выбрать параметры системы и промакетировать ряд узлов, не имеющих пока однозначного решения:

1. Выбрать систему плазменного источника, транспортировки и стабилизации плазмы.
2. Получить опыт по селективному ускорению ионов на разных типах антенн.
3. Исследовать различные системы сбора ускоренных ионов-изотопов, что в существенной мере может повлиять на выбор конструкции магнитной системы и соответственно на ее стоимость.
4. Опробовать методы диагностики.
5. Исследовать действующие макеты различных систем сепаратора для последующего составления Технического задания на "Плазменный сепаратор с селективным ускорением ионов".

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Годовые отчеты ННЦ ХФТИ, 1994-1999 гг. Плазменный резонансный сепаратор изотопов.
3. 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.
4. 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.
5. В.И. Волосов, В.В. Деменев, А.Н. Драничников, и др. *Проект установки для разделения изото-*

нов методом ИЦР-нагрева: Препринт ИЯФ-
2001-48, Новосибирск, 2001.