

УДК 537.521

## Э.Ц.Р.-ИСТОЧНИКИ КАЛЬЦИЕВОЙ ПЛАЗМЫ

© 2011 г. Н. М. Горшунов, Д. А. Долголенко, Ю. А. Муромкин, Е. П. Потанин, А. Л. Устинов

*Институт молекулярной физики, РИЦ “Курчатовский институт”**Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1*

Поступила в редакцию 25.05.2010 г.

После доработки 30.06.2010 г.

Описана конструкция проектируемого источника кальциевой плазмы для установки по разделению изотопов кальция с использованием ионного циклотронного резонанса в плазме (и.ц.р.-метод). Представлены два варианта источника: с отдельным испарителем кальция и с открытой в область разряда поверхностью твердого кальция. В обоих вариантах источника для ионизации атомов кальция можно использовать э.ц.р.-разряд (с.в.ч.-разряд в магнитном поле на электронной циклотронной частоте).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для создания стационарного потока металлической плазмы в магнитном поле преимущественно используется разряд на частоте электронного циклотронного резонанса (э.ц.р.) ( $\omega_{ce} = eB/m_e$ , где  $e$  – заряд электрона,  $m_e$  – его масса,  $B$  – индукция магнитного поля). При использовании гиротронов и других генераторов с.в.ч.-излучения такой разряд можно поддерживать часами, если обеспечена непрерывная подача в разряд паров соответствующего металла. В принципе, можно применять и другие виды разряда, например разряды с накаленным или полым катодом, однако по продолжительности непрерывного горения они не смогут конкурировать с э.ц.р.-разрядом, возбуждаемым фабричными с.в.ч.-приборами.

В настоящее время в ядерной физике для обеспечения исследований по получению сверхтяжелых элементов ( $Z \geq 112$ ), подтверждающих концепцию “острова стабильности” (трансургановая область на карте изотопов, для которой время жизни соответствующих ядер значительно превышает время жизни “соседних” трансургановых изотопов), существует потребность в кальции, обогащенном нейтронно-избыточным изотопом  $^{48}\text{Ca}$ . Сверхтяжелые трансургановые элементы получают в реакциях синтеза ускоренных ионов  $^{48}\text{Ca}^{n+}$  с искусственными трансургановыми элементами [1].

Изотоп  $^{48}\text{Ca}$  крайне редок. Его содержание в природном кальции 0.187%. Кальций не имеет химических соединений, летучих при комнатной температуре, поэтому разделение его изотопов проводится только в электромагнитном (э.м.) сепараторе. Цена кальция, обогащенного изотопом  $^{48}\text{Ca}$  выше 90%, составляет сотни долларов за миллиграмм.

Увеличить производство обогащенного кальция можно, используя метод разделения, основанный на ионном циклотронном резонансе в плазме (и.ц.р.-метод). В силу квазинейтральности плазмы этот метод, в отличие от э.м.-сепаратора, не имеет ограничений на величину ионного тока. Результаты экспериментальных работ по исследованию процесса и.ц.р.-разделения изотопов кальция и лития представлены в работах [2–4]. С другими исследованиями в области и.ц.р.-разделения можно познакомиться в обзоре [5] и указанной в нем литературе, а также в работе [6]. Следующим этапом должно стать практическое применение и.ц.р.-метода.

Установка, предназначенная для разделения изотопов и.ц.р.-методом, имеет протяженный соленоид, создающий однородное магнитное поле, и помещенную в соленоид вакуумную камеру. В вакуумной камере размещены источник плазмы, в.ч.-антенна для нагрева ионов целевого изотопа и коллекторная система для сбора селективно нагретых ионов (продукт) и конденсации обедненного целевыми ионами потока (отвал). Необходимыми элементами установки являются вакуумные шлюзы, позволяющие без нарушения вакуума в рабочем объеме заменять источник и коллекторную систему. Схема процесса и.ц.р.-разделения изотопов представлена на рис. 1.

Источник плазмы – часть установки, в которой получают и ионизируются пары разделяемого элемента. Целью настоящей работы является разработка проекта источника кальциевой плазмы для разделительной и.ц.р.-установки средней производительности (0.5 г/сут кальция, обогащенного изотопом  $^{48}\text{Ca}$  до 20%). Кроме указанной выше потребности в обогащенном кальции, связанной с синтезом сверхтяжелых элементов и выражаемой в граммах, существует потребность в килограммах обогащенного изотопом

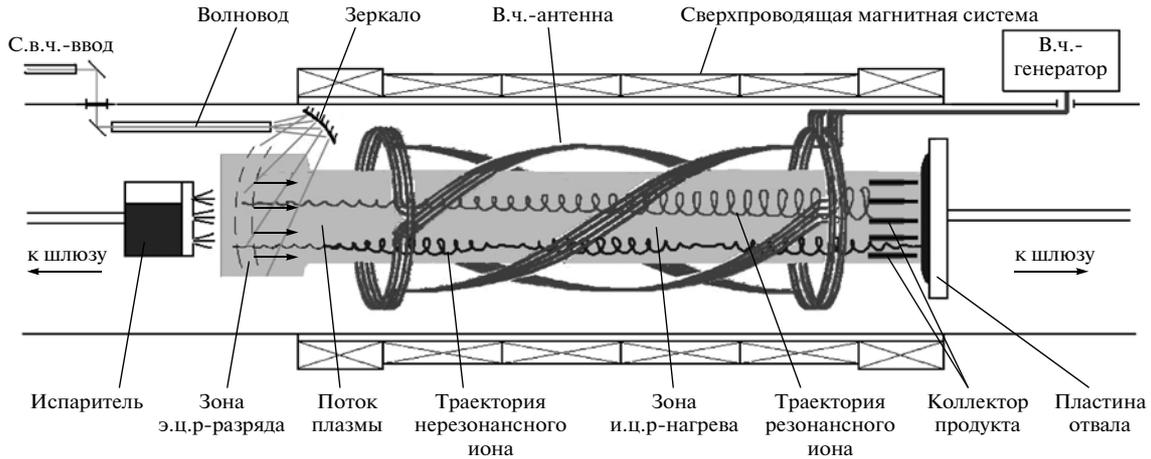


Рис. 1. Принципиальная схема устройства для и.ц.р.-разделения.

$^{48}\text{Ca}$  кальция, связанная с поисками безнейтринного двойного  $\beta$ -распада ( $\beta\beta 0\nu$ ). Проектируемая установка не рассчитана на получение килограммов обогащенного кальция. Источник плазмы, как и вся разделительная установка, должен работать в периодическом режиме, при котором рабочие циклы продолжительностью несколько суток чередуются с загрузкой кальция и отбором продукта.

Обычно э.ц.р.-разряд возбуждают в магнитной пробочной ловушке [7, 8], с тем чтобы увеличить время жизни электронов в разряде и обеспечить им непрерывный набор энергии в зонах э.ц.р. В прикладных целях используют поток плазмы за пробкой. Этот поток образуют выходящие через пробку (в конус потерь) электроны и ионы.

В том случае, когда нейтральные атомы получают распылением (труднолетучие элементы Pd, Nd, Gd и др.), э.ц.р.-разряд возбуждают в комбинированной ловушке – между магнитной пробкой и отрицательно заряженной распыляемой пластиной [9]. Если требуется направить поток такой плазмы вдоль магнитного поля соленоида, то разряд возбуждают на его краю в спадающем магнитном поле. При этом, если необходимо разместить ввод с.в.ч.-излучения и мишень на одной стороне вакуумной камеры, с.в.ч.-излучение заводят по волноводу с торца, а затем разворачивают его с помощью зеркала в сторону распыляемой пластины [10]. Необходимость возвратной передачи с.в.ч.-излучения связана с тем, что необыкновенная электромагнитная волна ( $\omega > \omega_{pe}$ , где

$\omega_{pe} = \sqrt{4\pi n e^2 / m_e}$  – электронная плазменная частота,  $n$  – плотность электронов) не распространяется в возрастающем магнитном поле. В конструкциях, предлагаемых в данной работе, предполагается применить более сложную возвратную передачу с.в.ч.-излучения и в случае, когда ней-

тральные атомы в источнике можно получить термическим испарением (элементы с высокой упругостью насыщенных паров).

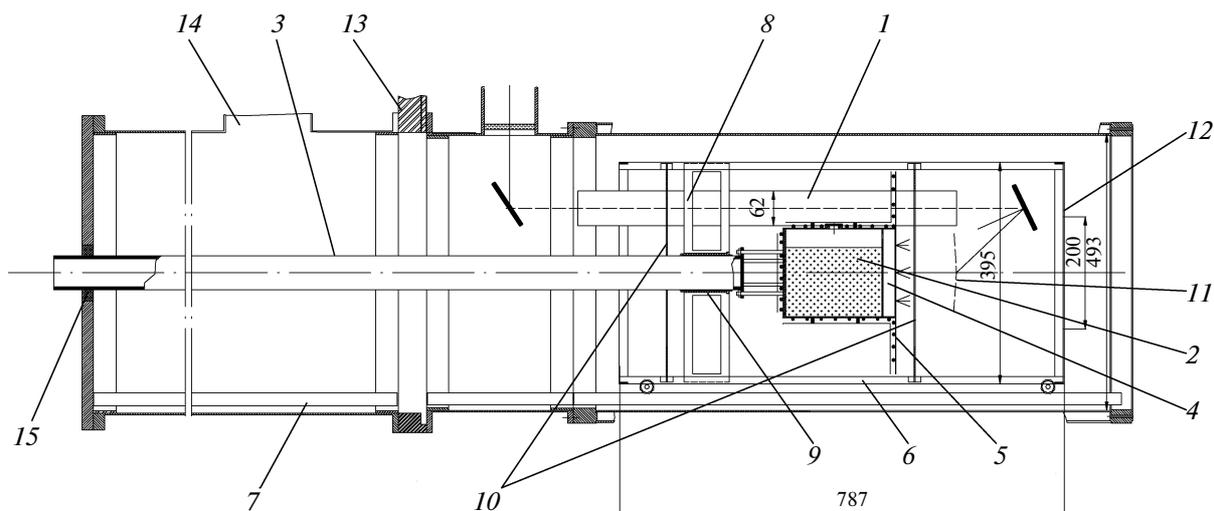
Нетрадиционный способ ввода с.в.ч.-излучения в источник (в среднем сечении пробкотрона) применен в плазменном сепараторе ПС-1 [11].

Выбор генератора определяется поставленной целью. Прежде всего, следует выполнить упомянутое выше условие –  $\omega > \omega_{pe}$ , т.е. исходить из необходимой плотности плазмы в ловушке, затем подобрать генератор, исходя из необходимой мощности излучения и максимального ресурса работы.

При разработке данного проекта учтен имеющийся опыт создания металлической плазмы для и.ц.р.-установок [12, 13].

## 2. Э.Ц.Р.-ИСТОЧНИК С ИСПАРИТЕЛЕМ

В предлагаемом варианте источника ионизация нейтральных атомов будет осуществляться в э.ц.р.-разряде, поддерживаемом излучением гиротрона. Э.ц.р.-разряд является разновидностью с.в.ч.-разряда в магнитном поле. В данной конструкции предполагается использование гиротронов в качестве генераторов с.в.ч.-излучения. Излучение в виде гауссова пучка передается в вакуумную камеру, где оно направляется в область разряда с помощью зеркал и волновода 1 (рис. 2). Такой источник плазмы требует установки гиротрона на удалении от сверхпроводящей магнитной системы и.ц.р.-установки – в области достаточно слабого рассеянного магнитного поля, т.е. необходимо создание протяженной линии передачи микроволнового излучения от гиротрона в разрядную камеру. С.в.ч.-тракт описан в разделе 2.2.



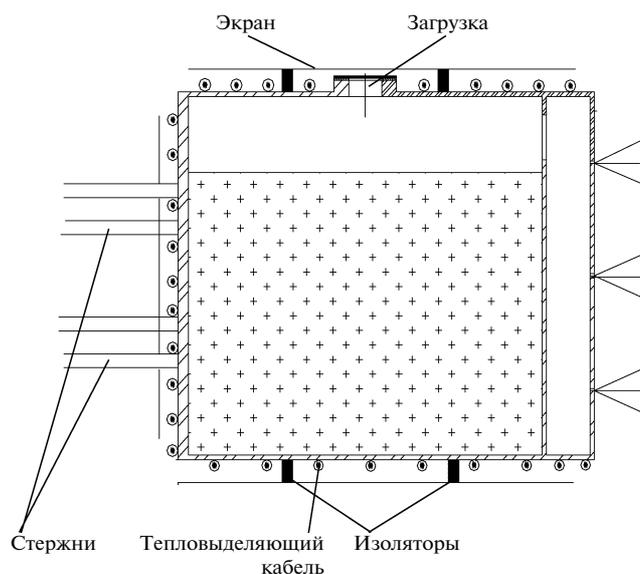
**Рис. 2.** Схема источника кальциевой плазмы, введенного в рабочую камеру через вакуумный шлюз. 1 – волновод, 2 – цилиндрический резервуар, 3 – несущая труба, 4 – выпускная камера, 5 – кольцевая пластина, 6 – стакан, 7 – рельсы, 8 – плоские опоры, 9 – цилиндрическая втулка, 10 – кольцевые диски, 11 – зона э.ц.р., 12 – диафрагма, 13 – вакуумный затвор, 14 – откачной патрубков, 15 – фторопластовая трубка.

### 2.1. Испарение кальция

В предлагаемой конструкции (рис. 2) кальций загружается (при норме ~4 кг одновременно) в резервуар в форме цилиндра 2, размещенный в центральной части источника. С несущей трубой 3 резервуар соединен с помощью металлических стержней для уменьшения теплового потока от его горячих стенок. Предполагается, что нагрев резервуара осуществляется с помощью специального тепловыделяющего кабеля с оболочкой из немагнитной нержавеющей стали. Резервуар устроен таким образом, чтобы объем, в который загружается кальций, был отделен от выпускной камеры 4 перегородкой с отверстием диаметром 20 мм сверху. Выпускная камера имеет пять отверстий диаметром 3–4 мм, четыре из которых расположены симметрично по окружности с радиусом  $R = 50$  мм и одно – по центру. Из этих отверстий пар поступает в область э.ц.р.-разряда. Слева зона разряда ограничена торцом испарителя и кольцевой пластиной 5. Используются отдельные нагреватели для прогрева торцевой и боковой поверхностей цилиндра испарителя, а также кольцевой пластины, если нагрев ее потоком частиц из разряда окажется недостаточным. Для уменьшения потерь на излучение использованы защитные тепловые экраны. Такой экран в форме диска следует установить и с тыльной стороны резервуара. На рис. 3 дано более крупное изображение испарителя, показаны цилиндрический и плоский экраны, предназначенные для уменьшения теплового излучения с поверхности испарителя, а также отверстие для выхода пара в выпускную камеру.

Необходимая температура кальция внутри испарителя  $T(\text{Ca}) = 1050\text{--}1150$  К, что соответствует диапазону вблизи точки плавления. Возможны два режима испарения: а) кальций возгоняется из твердого состояния; б) парит расплавленный кальций.

Вследствие малого содержания изотопа  $^{48}\text{Ca}$  в исходной смеси для получения даже нескольких граммов обогащенного целевым изотопом продукта необходима переработка килограммов природного кальция. Достаточно большое количество кальция будет осаждаться на стенках камеры



**Рис. 3.** Испаритель.

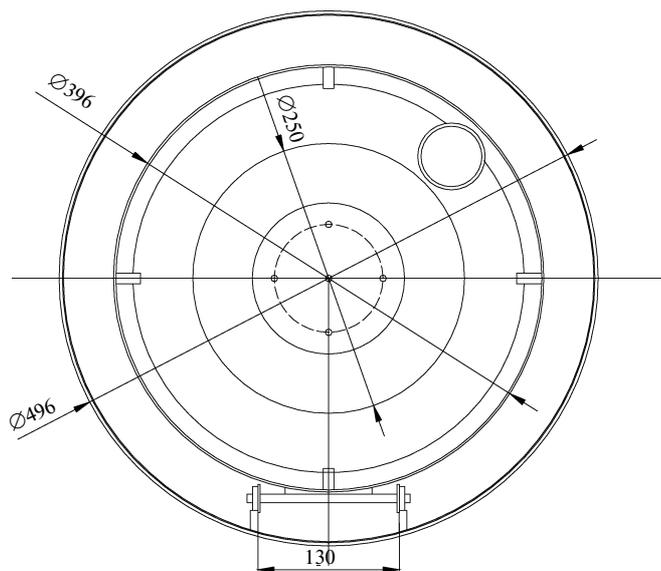


Рис. 4. Вид источника без диафрагмы и зеркала (отверстия в выпускной камере показаны в увеличенном масштабе).

источника. Чтобы обеспечить возврат этого вещества в цикл переработки, в конструкции источника предусмотрен специальный стакан 6 (см. рис. 2), который через тележку (на рис. 4 показан вид источника с торца) опирается на рельсы 7 (см. рис. 2), проложенные вдоль охлаждаемой водой вакуумной камеры. Рельсы лежат на кольцевых вставках, которые являются элементами конструкции вакуумной камеры. На рис. 2 внешняя стенка вакуумной камеры не показана. Стакан имеет форму цилиндра, изготовленного из немагнитного стального листа. Вдоль образующих цилиндра располагаются четыре стержня прямоугольного сечения (полосы), к которым крепятся различные детали: элементы крепления волновода в форме колец и четыре плоские опоры 8, соединяющие полосы с несущей трубой с помощью цилиндрической втулки. В конструкции предусмотрена возможность подачи на испаритель отрицательного потенциала  $-(50-100)$  В для создания электростатического барьера для электронов вблизи испарителя. Поскольку испаритель и несущая труба соединены между собой, последняя должна быть электрически изолирована от цилиндрической втулки 9, связанной со стаканом.

Особенностью предлагаемой конструкции (см. рис. 2) является жесткое крепление волновода 1 к стакану 6 с помощью двух дисков 10 кольцевой формы. Зеркала, обеспечивающие транспортировку с.в.ч.-излучения, крепятся на волноводе. На рис. 2 показан ввод излучения в вакуумную камеру. Волновод лежит в плоскости, составляющей угол  $45^\circ$  с плоскостью чертежа (рис. 4). Электронный циклотронный резонанс имеет место в

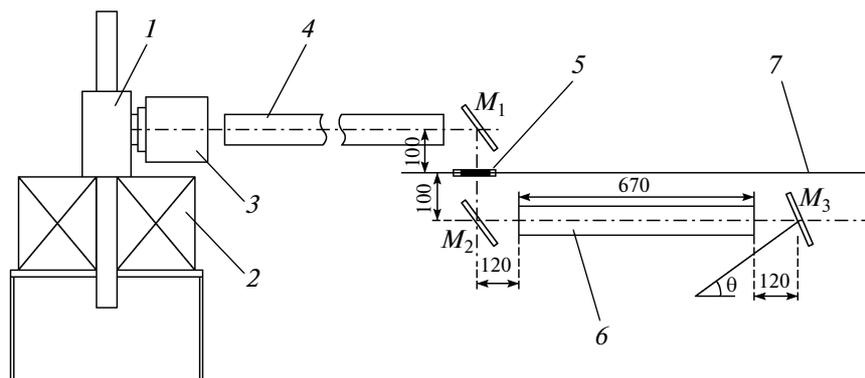
зоне 11. Все перечисленные металлические элементы конструкции могут быть выполнены из немагнитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Из источника плазма выходит через диафрагму 12 диаметром 200 мм. При необходимости можно использовать вольфрамовую сетку, размещенную внутри диафрагмы и электрически связанную с ней, а следовательно, и со стаканом (на рис. 2 сетка не показана). Поскольку вакуумная камера установки должна быть заземлена, то сетка, диафрагма и стакан находятся под нулевым потенциалом.

В рабочем состоянии вакуумный затвор 13 (см. рис. 2) открыт, и в камерах поддерживается вакуум. Откачка осуществляется через патрубок 14. Несущая труба на левом конце шлюза уплотнена с помощью фторопластовой втулки 15.

После того как весь кальций будет израсходован, режим разделения заканчивается и выключаются все нагреватели. С помощью несущей трубы вся конструкция испарителя вместе со стаканом, на котором осел неиспользованный кальций, выдвигается в шлюз. При этом стакан вместе с испарителем, волноводом и зеркалами перемещается на тележке по металлическим рельсам, проложенным как в вакуумной камере, так и в шлюзе. После чего затвор закрывается. Тем самым сохраняется вакуум в рабочей камере при снятии левого фланца и замене источника на новый. Положение нового источника юстируется в соответствии с необходимым расположением зеркал. Несмотря на то, что полностью избежать запыления вакуумной камеры установки нельзя, такая система в максимальной степени препятствует этому процессу.

Поток плазмы предполагается контролировать по показаниям электрического зонда, калиброванного по величине осадка на экранах коллектора продукта. Температурный режим испарителя должен выбираться по результатам испытаний на специальном вакуумном стенде. Оценки показывают возможность получения потоков рабочего вещества до  $10^{-2}$  г/с. Для уменьшения потерь тепла на излучение желательна, чтобы внешняя поверхность экранов имела минимальную степень черноты. Основная часть потока теплового излучения воспринимается стаканом, от которого она передается охлаждаемой водой стенке вакуумной камеры. Предполагается, что температура стакана составит 600–700 К. Расход энергии, связанный с нагревом системы подачи пара, составит  $\sim 4-6$  кВт. Как показывают оценки, испарительная система после включения нагревателей должна нагреться за  $\sim 20-30$  мин. На этой первоначальной стадии следует ограничить распространение паров в рабочую камеру установки в целях недопущения запыления других элементов и.ц.р.-установки. Для этого предлагается использовать поворотную заслонку дискового типа. Поворотом



**Рис. 5.** Схема передачи с.в.ч.-излучения в область разряда. 1 – гиротрон; 2 – магнит гиротрона; 3 – набор зеркал, фокусирующих излучение; 4 – волновод с внутренним диаметром 70 мм; 5 – керамическое окно для ввода излучения в рабочую камеру; 6 – волновод с внутренним диаметром 56 мм; 7 – стенка вакуумной камеры;  $M_1$ – $M_3$  – поворотные зеркала.

стержня жесткой связи на угол  $\sim 40^\circ$  достигается перекрытие продольного потока пара.

Для прокладки проводов электропитания и диагностики используется внутренняя полость охлаждаемой водой несущей трубы, находящейся в вакууме в условиях функционирования установки. Электрические разъемы на конце несущей трубы вакуумно-плотные.

## 2.2. С.в.ч.-тракт для источника кальциевой плазмы

С.в.ч.-излучение в рабочую камеру необходимо ввести таким образом, чтобы обеспечить существенное его поглощение в зоне э.ц.р., причем область разряда должна быть диаметром не менее 200 мм. Основное магнитное поле при работе с кальцием выбираем на уровне  $B = 1.5$  Тл. Если использовать стационарный гиротрон БЫЛИНА (37.5 ГГц), зона э.ц.р. должна приходиться на область спадающего поля с индукцией  $B = 1.3$  Тл.

На рис. 5 показан гиротрон 1 со сверхпроводящей катушкой 2, генерирующий гауссов пучок с.в.ч.-излучения. Транспортировка излучения от гиротрона к рабочей камере установки осуществляется по сверхразмерным волноводам 4 ( $D \gg \lambda$ ) диаметром 70 мм. Расстояние между гиротроном и рабочей камерой должно составлять несколько метров во избежание влияния магнитного поля сверхпроводящего соленоида установки на гиротрон (для стабильной работы гиротрона БЫЛИНА величина внешнего магнитного поля в зоне расположения гиротрона не должна превышать 5 Э). Чтобы сформировать гауссов пучок с плоским волновым фронтом и требуемого диаметра, на входе в волновод устанавливают систему из трех зеркал (3 на рис. 5). В гладком цилиндрическом сверхразмерном волноводе электромагнитное излучение распространяется в виде двух мод  $TE_{11}$  и  $TM_{11}$ . Чтобы на выходе волновода сформирова-

лась перетяжка, длина волновода должна быть выбрана кратной периоду биений этих двух мод:

$$L = n \frac{2\pi}{|h_{E_{11}} - h_{H_{11}}|},$$

где  $h$  – продольные волновые числа указанных мод.

При длине волны излучения 8 мм (37.5 ГГц) и внутреннем диаметре волновода 70 мм пространственный период биений составляет 1064 мм.

Особым является вопрос о том, как вводить с.в.ч.-излучение в замагниченную плазму. В работе [9] рассматривается ввод излучения в торцевую область соленоида (спадающее магнитное поле) со стороны сильного магнитного поля. Как следует из дисперсионных свойств электромагнитных волн в замагниченной плазме [14], в этом случае зона э.ц.р. не будет экранирована областью непрозрачности. В [7, 15] предложена конструкция с магнитной пробкой и осевым вводом, в которой не требуется разворачивать с.в.ч.-волну. В настоящей работе мы остановились на первом варианте, поскольку создание эффективной магнитной пробки на краю соленоида раздельной установки связано с существенными трудностями.

Из волновода 4 с помощью поворотного зеркала  $M_1$  излучение направляется в рабочую камеру через водоохлаждаемое керамическое окно 5 (рис. 5). Поворотное зеркало  $M_2$  фокусирует излучение на вход цилиндрического волновода 6 меньшего диаметра (56 мм), служащего для передачи излучения в область сильного магнитного поля. Длина этого волновода также выбирается кратной периоду биений двух основных мод  $TE_{11}$  и  $TM_{11}$ . Последнее зеркало  $M_3$  служит для передачи излучения в область э.ц.р. В процессе передачи излучения элементы тракта нагреваются. Однако этот нагрев может оказаться недостаточным для того, чтобы исключить возможность запыления их кальцием.

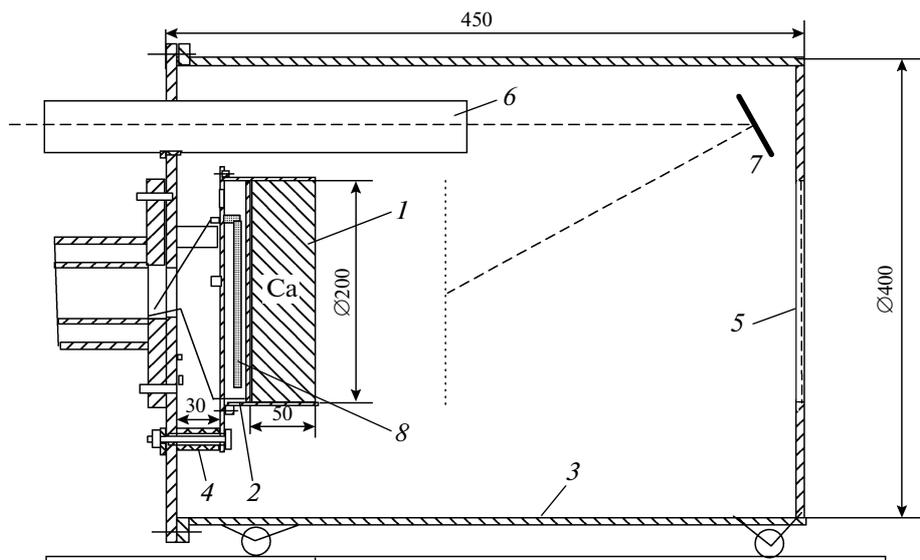


Рис. 6. Конструкция источника с открытой поверхностью твердого металлического кальция. 1 – металлический кальций, 2 – гильза, 3 – стенка камеры источника, 4 – втулка, 5 – заземленная сетка, 6 – волновод, 7 – зеркало, 8 – ТЭН.

Поэтому, по крайней мере, зеркало  $M_3$  должно иметь дополнительный подогрев.

Зеркально-волноводная линия рассчитывается в квазиоптическом приближении исходя из требования обеспечения засветки с.в.ч.-излучением области э.ц.р. по всему сечению. Радиус кривизны зеркал рассчитывается так, чтобы сшить пучки, условно распространяющиеся с двух концов линии. Размеры зеркал выбираются таким образом, чтобы перехватить пучок, даже при смещении его оси и центра зеркала на расстояние порядка длины волны излучения.

В предлагаемой конструкции источника плазмы довольно трудно обеспечить квазипродольный ввод излучения, гарантирующий практически полное его поглощение в зоне э.ц.р. Вследствие этого для получения плазмы с плотностью  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ , возможно, потребуется до 5 кВт с.в.ч.-мощности. Такой уровень мощности могли бы обеспечить изготавливавшиеся ранее в Н. Новгороде (НПО “Салют”) гиротроны “Былина”. При небольших изменениях тракта можно использовать гиротроны, изготавливаемые в настоящее время в НПП ГИКОМ.

### 3. Э.Ц.Р.-ИСТОЧНИК С ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТВЕРДОГО КАЛЬЦИЯ

Для работы разделительной и.ц.р.-установки требуется источник паров кальция, обеспечивающий поток  $G = 10^{-2} \text{ г/с}$ . Оценим температуру диска, изготовленного из металлического кальция, при которой с его торцевой поверхности будет испаряться такой поток атомов. Поток атомов, ис-

паряемых с поверхности металла, имеющей температуру  $T$ , равен

$$G = \frac{n_V V}{4} MS = P_V S \left( \frac{M}{2\pi k T} \right)^{1/2},$$

где  $n_V$  – концентрация насыщенного пара кальция;  $V$  – средняя скорость атомов кальция;  $S$  – площадь поверхности диска, с которой идет испарение;  $M$  – масса атома кальция;  $P_V$  – давление насыщенного пара при температуре  $T$ . Зависимость  $P_V$  от  $T$  для кальция приведена в [16, 17]. Согласно этой зависимости,  $P_V = (6-8) \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$  при  $T \approx 850 \text{ К}$ . При такой температуре поток паров кальция с торцевой поверхности диска диаметром 200 мм составит  $(2-3) \cdot 10^{-2} \text{ г/с}$ , т.е. в конструкции источника с открытой поверхностью имеется возможность использовать твердый кальций (температура плавления  $T_{\text{пл}} = 1123 \text{ К}$ ). Затраты непосредственно на испарение составят  $\sim 50 \text{ Вт}$ .

Конструкция источника с открытой поверхностью твердого кальция приведена на рис. 6. Диск из металлического кальция 1 диаметром 200 мм закреплен в гильзе 2 из нержавеющей стали. Гильза крепится к задней стенке камеры источника плазмы 3 болтами с использованием алундовых втулок и шайб 4, обеспечивающих электроизоляцию. В рассматриваемом варианте источника испарение кальция идет за счет тепла, поступающего от э.ц.р.-разряда. Первоначально разряд поджигается в инертном газе. На диск и обойму предполагается подавать небольшой электрический потенциал (50–100 В) относительно заземленной сетки 5 для создания комбинированной ловушки для электронов (магнитная пробка имеется на

выходе из источника). В разряд будет вводиться по волноводу 6 с помощью зеркала 7 до 5 кВт с.в.ч.-мощности. Ионный ток на диск составит  $\geq 10$  А, а выделяющаяся мощность  $\geq 1$  кВт. Следует также учесть энергию, вносимую непоглощенным в плазме с.в.ч.-излучением, быстрыми электронами и излучением атомов и ионов в оптическом диапазоне. Потери на тепловое излучение с поверхности диска и гильзы при  $T \approx 850$  К составят  $\sim 1.5$  кВт. Температура кальциевого диска устанавливается в результате баланса потоков энергии на диск и с него. Она может быть измерена термопарой и отрегулирована изменением напряжения между испаряемым диском и сеткой либо включением дополнительного подогрева с помощью трубчатого электронагревателя (ТЭН) 8, находящегося в задней части гильзы. В случае перегрева диска из кальция можно усилить радиационное охлаждение, увеличив площадь излучающей поверхности гильзы (с помощью кольцевой радиаторной манжеты). Таким образом, при использовании в качестве источника пара твердого кальция можно упростить конструкцию и снизить потребление энергии за счет уменьшения потерь на излучение с поверхности источника.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен проект источника кальциевой плазмы для разделительной и.ц.р.-установки. Реализация проекта позволит обеспечить получение граммов кальция с 20%-ным обогащением изотопом  $^{48}\text{Ca}$ , т.е. со стократным превышением над природным содержанием. Такой продукт может быть использован либо непосредственно, либо после дообогащения на э.м.-сепараторе. В последнем случае работа э.м.-сепаратора окажется на два порядка эффективнее, чем с природным кальцием.

Авторы благодарны В.Е. Кейлину за обсуждение работы.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект 09-02-12159-офи\_м).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Oganessian Yu. Ts., Abdullin F. Sh., Bailey P. D. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 104. P. 142502.
2. *La Fontaine A. C., Gil Ch., Louvet P.* // C.R. Acad. Sci. Paris. 1989. V. 308. Serie II. P. 821.
3. *Карчевский А.И., Лазыко В.С., Муромкин Ю.А. и др.* Препринт ИАЭ-5239/7. М., 1990; // Физика плазмы. 1993. Т. 19. Вып. 3. С. 411.
4. *Горшунов Н.М., Долголенко Д.А., Зотин Г.Е. и др.* // Прикл. физика. 2001. № 3. С. 34.
5. *Карчевский А.И., Муромкин Ю.А.* // В кн. Изотопы /Под ред. В.Ю. Баранова. М.: Физматлит, 2005. Т. I. С. 307.
6. *Потанин Е.П.* // Физика плазмы. 2008. Т. 34. Вып. 2. С. 140.
7. *Yoshida M., Kajinishi K.* // IEEE Trans. on Plasma Sci. 2003. V. 31. № 1. P. 40.
8. *Leherissir P., Barue C., Canet C. et al.* // Nucl. Instrum. and Methods. in Phys. Res. 2003. V. B211. P. 274.
9. *Kidd P.* // J. Vac. Technol. 1991. V. A 9. № 3. P. 466.
10. *Romessor T. E., Vanek V., Tang J. et al.* // IEEE Int. Conf. on Plasma Science. Calif., San Diego, 1983. P. 71.
11. *Жильцов В.А., Кулыгин В.М., Семашко Н.Н. и др.* // Атом. энергия. 2006. Т. 101. Вып. 4. С. 302.
12. *Louvet P., Compant La Fontaine A., Larousse B., Patris M.* // Proc. of fourth Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases (SPLG). Beijing, P.R. China: Tsinghua University, 1994. P. 83.
13. *Бабичев А.П., Горшунов Н.М., Долголенко Д.А. и др.* // Прикладная физика. 2001. № 3. С. 41.
14. *Тимофеев А.В.* Резонансные явления в колебаниях плазмы. М.: Физматлит, 2009. С. 30.
15. *Суворов Е.В., Токман М.Д.* // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 8. С. 934.
16. *Родякин В.В.* Кальций, его соединения и сплавы. М.: Металлургиздат, 1967. С. 8.
17. Таблицы физических величин / Под ред. И.К. Кирикова. М.: Атомиздат, 1976. С. 201.