

Получение высокообогащенного изотопа ^{176}Yb в весовых количествах методом лазерного разделения изотопов в атомном паре

О.И.Андреев, В.И.Держиев, В.М.Дякин, А.Г.Егоров, Л.А.Михальцов, В.А.Тарасов, А.И.Толкачев, Ю.Г.Топоров, С.А.Чаушанский, С.И.Яковленко

Сообщается о получении весовых количеств высокообогащенного изотопа ^{176}Yb на основе метода лазерного разделения изотопов в атомном паре. Содержание ^{176}Yb в экспериментальных образцах обогащенного материала достигает 99 %. При производительности наработки около 20 мг/ч его содержание составило 88 % при содержании «вредного» изотопа ^{174}Yb около 5 %. Проведенные экспериментальные исследования могут служить основой технологии получения изотопа ^{177}Lu с целью его применения в современной ядерной медицине в качестве препарата с высокой удельной активностью.

Ключевые слова: лазерное разделение изотопов, иттербий, высокое обогащение.

1. Введение

Лазерное разделение изотопов (ЛАРИЗ) в атомном паре интенсивно развивается в последнее десятилетие (см. напр., обзоры [1–5]) и является особенно перспективным для редких изотопов таких элементов, которые не имеют достаточно устойчивых газофазных химических соединений, что не позволяет использовать метод газового центрифугирования [6]. В настоящее время существенный прогресс достигнут при получении редкого изотопа ^{168}Yb (см. [7–9] и обзоры [1, 3, 5]).

В то же время практический интерес представляет обогащение не только редкого изотопа ^{168}Yb (его содержание в естественной смеси составляет 0.14 %), но и сравнительно распространенного изотопа ^{176}Yb (12.7 %). Этот изотоп используется для получения радионуклида ^{177}Lu (время полураспада 6.734 дня), весьма перспективного для применения в современной ядерной медицине в качестве препарата с высокой удельной активностью. Одним из способов его получения является облучение нейтронами ядерного реактора исходного материала, содержащего ^{176}Yb .

Требования к изотопной чистоте исходного материала, позволяющие реализовать производство ^{177}Lu , сформулированы в [10] и сводятся, в основном, к жесткому ограничению содержания ^{174}Yb (31.8 % в естественной смеси) на уровне 2 % – 5 %. Соответственно содержание в материале целевого изотопа ^{176}Yb , определяющее высокую удельную активность радионуклида ^{177}Lu , должно быть высоким. Таким образом, задача сводится к получению фактически моноизотопа ^{176}Yb – высокообогащенного изотопа, содержание которого в естественной

смеси близко к 100 %. Столь высокое обогащение обычно достигается только с помощью электромагнитных сепараторов, причем стоимость получаемой этим способом изотопной продукции чрезвычайно высока [11].

Методы ЛАРИЗ в принципе позволяют получить высокое обогащение [1–5], однако примеров их успешной реализации для производства весовых количеств высокообогащенных изотопов с указанным содержанием целевого изотопа до недавнего времени не было. Лишь в этом году появилось первое сообщение [12] о получении лазерным методом высокообогащенного изотопа ^{176}Yb с содержанием 95 %.

В настоящей работе сообщается о получении изотопа ^{176}Yb с содержанием до 99 %. При производительности установки около 20 мг/ч его содержание достигает 88 % при содержании ^{174}Yb около 5 %.

2. Предварительные соображения

Изотопическая и сверхтонкая структуры переходов иттербия были экспериментально исследованы в начале 1990-х годов [13]. Полученные в работе [13] данные в целом хорошо совпадали с результатами, достигнутыми при отработке технологии производства весовых количеств высокообогащенного редкого изотопа ^{168}Yb [1, 3, 5, 7–9].

Предварительный анализ структуры линий переходов при трехступенчатой селективной фотоионизации иттербия показал, что высокая селективность фотовозбуждения атомов ^{176}Yb при остаточной доплеровской ширине линии около 1 ГГц возможна в случае использования лишь двух (а не одного, как в [1, 3, 5, 7–9]) узкополосных лазеров с шириной спектра не более 500 МГц. При этом на первой ступени перехода подавляется возбуждение всех изотопов, кроме ^{176}Yb и ^{174}Yb , а на второй – возбуждение изотопа ^{174}Yb .

Точные значения отстроек частот лазеров на обеих ступенях определялись экспериментально при помощи магнитостатического масс-спектрометра. Длины волн лазерного излучения на первой и второй ступенях воз-

О.И.Андреев, В.И.Держиев, В.М.Дякин, А.Г.Егоров, Л.А.Михальцов, В.А.Тарасов, А.И.Толкачев, Ю.Г.Топоров, С.А.Чаушанский. НПО «ЛАД», Россия, 141400 Химки, Московская обл., Васьютинское ш., 14
С.И.Яковленко. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38;
e-mail: syakov@kapella.gpi.ru

буждения подбирались таким образом, чтобы содержание примеси изотопов ^{174}Yb и ^{173}Yb было минимальным (не более 5%). Интенсивности лазерного излучения на входе масс-спектрометра соответствовали значениям, используемым в экспериментах с весовой наработкой. Это условие является важным, т. к. селективность фотоионизации зависит от интенсивности лазерного излучения. Чрезмерное увеличение интенсивности на селективирующихся переходах приводит к полевому уширению линий и возбуждению нецелевых изотопов [9].

Масс-спектрометрические измерения показали, что суммарное содержание примеси можно устойчиво удерживать на уровне 3%–4% при плотностях мощности излучения 1–3 Вт/см² (первая ступень возбуждения), 2–5 Вт/см² (вторая) и 8–25 Вт/см² (третья). Характерный масс-спектр иттербия в указанных условиях облучения показан на рис.1. Еще более высокая селективность фотоионизации с содержанием ^{176}Yb около 99% достигалась при снижении интенсивностей лазерного излучения в 8–10 раз. При этом фотоионизация атомов существенно уменьшалась. Такой режим, сопровождающийся снижением производительности, по-видимому, и был реализован в [12] для демонстрации принципиальной возможности получения высокообогащенного изотопа ^{176}Yb .

Даже предельно высокая селективность фотоионизации, достигнутая в масс-спектрометре, может оказаться недостаточной для получения высокообогащенного материала с нужным содержанием, т. к. существенную роль в экспериментах с наработкой весового количества обогащенного изотопа играют процессы засорения экстрактора [1, 3, 5, 14–17].

Засорение может осуществляться ионами изотопов, ближайшими по спектру к целевому изотопу из-за доплеровского уширения атомных линий. Для уменьшения доплеровской ширины линий используется коллимация атомного пучка. В этом случае ширина линии уменьшается пропорционально $\sin \beta/2$ (β – угловая расходимость атомного пучка) (подробнее см. в [5, 17]). В разделительном модуле (см. рис.2) в сечении вдоль лазерного пучка коллимация пучка мала ($\beta = 120^\circ$), поэтому остаточная доплеровская ширина линии равна ~ 950 МГц (на поря-

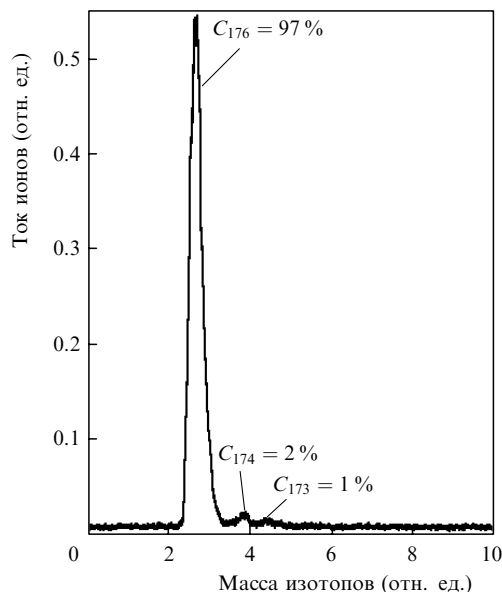


Рис.1. Масс-спектр иттербия при оптимальных длинах волн в обоих узкополосных каналах.

док больше, чем в масс-спектрометре). Однако, как показал анализ структуры линий селективирующих переходов, при оптимальных длинах волн влиянием доплеровского уширения можно пренебречь.

Если исключить прямое попадание атомов внутрь экстрактора из атомного пучка, то к засорению экстрактора приводят резонансная перезарядка ионов на атомах пара, рассеяние при столкновении атомов в пучке, а также рассеяние атомов на элементах конструкции.

Сечение σ резонансной перезарядки Yb при тепловых скоростях составляет $\sim 2 \times 10^{-14}$ см² [18]. Следовательно, при характерном расстоянии до экстрактора $d \approx 5$ см и плотности пара $N \times 10^{12}$ см⁻³ вероятность перезарядки $p = 1 - \exp(-\sigma d N) \approx 10\%$. Понижая плотность пара N до значения, меньшего 5×10^{11} см⁻³, можно достичь $p < 5\%$.

Засорение экстрактора в результате редких догоняющих столкновений оказалось существенным при разделении редких изотопов, содержание которых по сравнению с содержанием остальных изотопов очень мало [1, 3, 5, 14–17]. Согласно [14], для экстрактора с площадью входной щели 100 см² при средней плотности атомов в пучке 10^{12} см⁻³ в геометрии описываемого эксперимента массовый поток нейтральных атомов составляет ~ 0.1 мг/ч. Такому потоку соответствует «эквивалентный ток» 0.02 мА. Следовательно, при ионном токе экстрактора более 2 мА доля засоряющих изотопов не превысит 1%. Засорение, связанное с рассеянием на элементах конструкции, можно в значительной мере уменьшить, используя соответствующую конструкцию экстрактора и ловушки для потока пара [1, 3, 5].

Перечисленные выше процессы засорения в экспериментах с наработкой весовых количеств ^{176}Yb носят фоновый характер, т. е. состав нецелевых изотопов пропорционален их естественному содержанию. В этом случае, считая, что пленка на поверхности коллектора формируется потоком ионов и атомов естественного состава, можно восстановить реальный изотопный состав в отсутствие фонового засорения, который характеризует реальную селективность процесса фотоионизации в разделительной камере при наработке целевого изотопа. Соответствующее содержание изотопов C_{real} будет определяться следующим выражением:

$$C_{\text{real}} = (1 + \alpha)C_m - \alpha C_{\text{nat}},$$

где C_m – измеренное содержание изотопа; C_{nat} – естественное содержание изотопа; α – коэффициент засорения в единицах атом/ион. Параметр α определяется исходя из того, что для i -го изотопа, далеко отстоящего от целевого, $C_{\text{real},i} = 0$. Таким образом, лазерное излучение не ионизует i -й изотоп, а он вносится только потоком нейтральных атомов естественного состава. В этом случае

$$\alpha = \frac{C_{m,i}}{C_{m,i} - C_{\text{nat},i}}.$$

Практическое использование такой процедуры обработки масс-спектров дает хорошие результаты при высокой точности измерения изотопного состава и умеренных ($\alpha < 10$ атом/ион) засорениях. В этом случае значение C_{real} обычно устойчиво и не зависит от i для нескольких изотопов, удаленных от целевого изотопа. Применяя описанную процедуру, можно количественно оценить уровень засорения по результатам изотопного ана-

лиза в разных местах экстрактора и в смывом обогащенном материале. При этом содержание примеси в образце определяется параметром $C_{imp} = \alpha / (1 + \alpha)$. Для решения поставленной задачи необходимо обеспечить коэффициент засорения $\alpha \leq 0.05 - 0.1$ атом/ион. Столь жесткие требования можно выполнить, работая при умеренной плотности пара и при высокой эффективности сбора ионов экстрактором, такой, чтобы ионный ток более чем на порядок превышал «эквивалентный ток засорения».

3. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки, на которой проводилась наработка изотопа ^{176}Yb , показана на рис.2.

Экспериментальная установка состоит из следующих основных систем: системы лазеров на парах меди (ЛПМ), системы перестраиваемых лазеров на красителе (ЛК), масс-спектрометра, разделительного модуля и системы управления, контроля и обработки (УКО).

Трехканальная система ЛПМ применялась для накачки кювет лазерной системы на красителе. В качестве активного элемента ЗГ и усилителей использовались отпаянные трубки серии «Кристалл ЛТ 40» с просветленными окнами. Накачка осуществлялась лазерным излучением на зеленой линии (510 нм), которое отфильтровывалось зеркалами системы и фильтрами (на рис.2 не показаны). Апертурное согласование диаметра пучков с размерами кювет осуществлялось с помощью телескопов.

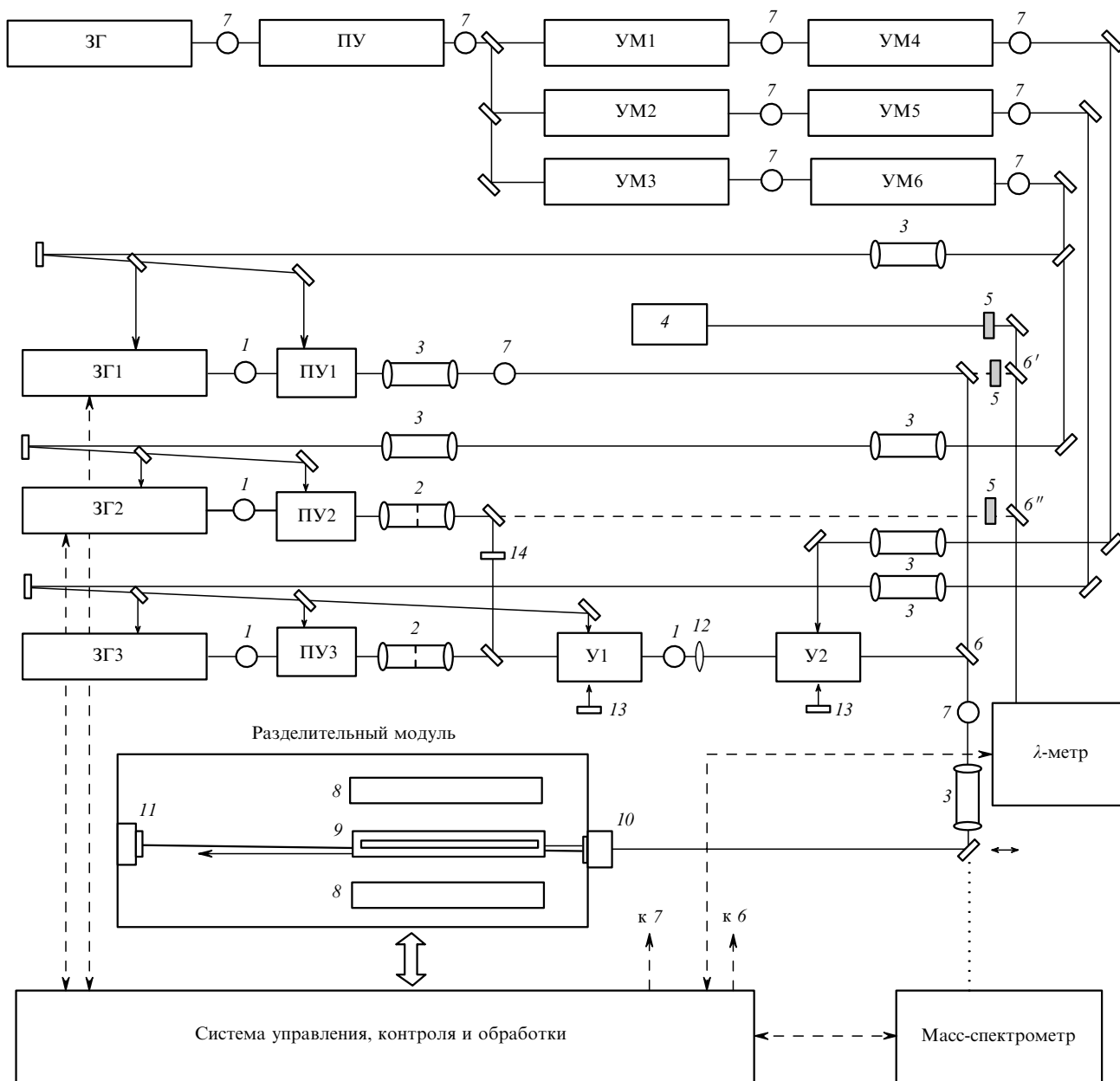


Рис.2. Схема экспериментальной установки для лазерного разделения изотопов иттербия: ЗГ – задающий генератор системы ЛПМ; ПУ – предусилитель системы ЛПМ; УМ1 – УМ6 – усилители системы ЛПМ; ЗГ1 – ЗГ3 – задающие генераторы системы ЛК; ПУ1 – ПУ3 – предусилители системы ЛК; У1, У2 – усилители системы ЛК; 1 – поляризатор; 2 – пространственный фильтр; 3 – линзовый телескоп; 4 – стабилизированный He – Ne-лазер; 5 – электромагнитный затвор; 6, 6', 6'' – дихроичные зеркала; 7 – проходной измеритель мощности; 8 – экстрактор; 9 – испаритель; 10 – узел ввода составного пучка; 11 – узел отражателя; 12 – линза; 13 – цилиндрическое зеркало; 14 – ступенчатый ослабитель.

Синхронизация усилителей, контроль мощности и формы импульсов обеспечивались с помощью проходных измерителей мощности (ПИМ), связанных волоконно-оптическими линиями связи с системой УКО. Выходная мощность в каналах системы ЛПМ в описываемых экспериментах составляла 20, 30 и ~ 45 Вт. Длительность импульсов по полувысоте была около 20 нс при частоте их следования 11 кГц.

Система ЛК с поперечной геометрией накачки состояла из трех независимых по частоте излучения каналов (соответствующих трехступенчатой схеме фотоионизации иттербия), каждый из которых включал в себя ЗГ1 – ЗГ3 и ПУ1 – ПУ3. Пучки излучения второго и третьего каналов (с близкими длинами волн) на выходах ПУ2, ПУ3 пространственно объединялись с помощью зеркал и телескопических пространственных фильтров для последующего синхронного усиления лазерных импульсов в каскадах У1 и У2. В усилителях использовалась двухсторонняя накачка кювет, реализуемая с помощью цилиндрических зеркал 13.

Мощность излучения на выходах усилителей контролировалась с помощью ПИМ совместно с соответствующими измерителями системы ЛПМ. Отношение мощностей излучения второго и третьего каналов на выходе объединенного канала регулировалось ступенчатым ослабителем 14. С помощью телескопов и дихроичного зеркала 6 выходной пучок лазерного излучения объединялся с пучком излучения первого канала, образуя составной пучок, вводимый в разделительную камеру.

Длина волны и спектр излучения (500 МГц в узкополосных каналах) каждой ступени формировались независимыми задающими генераторами, в конструкции которых предусмотрены возможность плавной перестройки частоты и ее автоматическое поддержание с точностью не хуже ± 50 МГц на канал [9]. В режиме удержания частоты стабилизация частот лазерных каналов осуществлялась поочередно с помощью электромагнитных затворов 5, пропускающих излучение соответствующего канала к λ -метру. В стабилизации частоты излучения третьего канала не было необходимости, т. к. линия перехода в автоионизационное состояние иттербия была значительно шире как спектральной линии лазерного излучения так и возможного сдвига, обусловленного дрейфом частоты. Абсолютная калибровка длин волн обеспечивалась стабилизированным He–Ne-лазером с точностью по частоте не хуже ± 20 МГц. Средние значения мощности лазерного излучения в экспериментах не превышали 1 Вт (первая ступень возбуждения), 2 Вт (вторая) и 8 Вт (третья) при длительности лазерных импульсов 10, 10 и 18 нс соответственно.

Основным элементом разделительного модуля является вакуумная камера с установленными внутри нее на загрузочной тележке двумя электростатическими экстракторами и испарителем. Для получения большого числа проходов импульсов лазерного излучения составного пучка через атомный пучок, формируемый испарителем, вакуумная камера снабжена узлами 10 и 11. Остаточное давление в экспериментах поддерживалось на уровне 10^{-5} Тор. Пучок пара формировался с помощью графитового резистивного испарителя и диафрагмы со щелью шириной 10 мм и длиной 90 см. Массовый поток пара на выходе диафрагмы в экспериментах удерживался в пределах 12–18 г/ч, средняя плотность пара в зоне фотоионизации не превышала 10^{12} см $^{-3}$.

Сбор ионов осуществлялся с помощью электростатических двухэлектродных (коллектор–сетка) экстракторов, конструкция которых применялась нами ранее для наработки ^{168}Yb [1,3,5]. В экспериментах использовались два экстрактора при сеточном напряжении 2.5 кВ и коллекторном напряжении до 18 кВ. Для контроля изотопного состава внутри экстрактора устанавливались «свидетели» из молибденовой фольги, а для точечного контроля засорения нейтральными атомами внутри экстрактора и на его входной щели – кварцевые датчики прибора для измерения толщины пленок типа Inficon. Ток ионов экстрактора в коллекторной цепи измерялся миллиамперметром и шунтом, подключенным ко входу цифрового осциллографа Tektronix TDS 3034.

При отработке технологического процесса и в ходе эксперимента селективность фотоионизации контролировалась с помощью магнитостатического масс-спектрометра со встроенным испарителем, формирующим атомный пучок с остаточной доплеровской шириной линии не более 100 МГц. Оперативный контроль изотопного состава после проведения эксперимента осуществлялся с помощью динамического масс-спектрометра путем испарения кусочка «свидетеля», вырезанного из фольги. Смыв и химическая очистка накопленного материала, а также точный изотопный анализ выполнялись специалистами НИИ атомных реакторов.

Контроль мощности лазерного излучения, плотности пара, ионного тока и других основных параметров экспериментальной установки, а также измерение и стабилизация длин волн осуществлялись с помощью системы управления контроля и обработки данных, включенной в локальную сеть из трех компьютеров.

4. Экспериментальные результаты

Пробные наработки изотопа ^{176}Yb проводились в серии из четырех экспериментов продолжительностью около 5 ч каждый. Основные различия в экспериментах были связаны с некоторыми изменениями конструкции экстракторов с целью повышения электрической прочности и получения максимально большого устойчивого тока, с изменением расположения экстракторов и плотности атомного пучка в зоне фотоионизации, а также с введением в атомный пучок дополнительных диафрагм.

Интенсивности лазерного излучения в каждой серии варьировались незначительно (в пределах 20 %). Ток экстрактора (коллекторный ток) в экспериментах изменялся от 2 до 14 мА при сеточном напряжении –2.5 ... –3 кВ и коллекторном напряжении –8 ... –14 кВ. Осциллографические измерения импульсов тока ионов показали, что экстрактором собирается только небольшая часть ионов плазмы (примерно 10 % на экстрактор). Заметим, что в разреженной плазме [1, 3, 5, 9] эффективность сбора ионов одним экстрактором достигала 50 %. В процессе наработки наблюдалось ухудшение электрической прочности экстракторов, сопровождавшееся пробоями.

Внутри экстракторов обогащенный материал в виде атомов, перераспыляемых с поверхностей высоковольтного коллектора из меди, накапливался на медной фольге (ионоприемнике), образуя прочную пленку, толщина которой увеличивалась с временем наработки. Там же осаждалась медь, распыляемая ионами с поверхностей коллектора. Пленка обогащенного материала формировалась на фольге в виде двух полос, размеры и положение

которых определялись конфигурацией электрического поля внутри экстрактора.

После наработки материала фольга снималась, взвешивалась, разрезалась на несколько частей и поступала на смыв, очистку и точный изотопный анализ. Взвешивание фольги позволяло определить избыточную массу (иттербия и меди) и после получения данных по массе смывного иттербия провести точный баланс масс. Снятые с фольги «свидетели» позволяли выявить реальный изотопный состав в разных участках фольги экстрактора. Точный изотопный анализ смыва с разрезанных частей фольги уточнял эти данные и позволял получить информацию о распределении изотопного материала по массовому числу.

В первых экспериментах было обнаружено, что существует сравнительно узкая зона вверху экстрактора (10 % площади фольги), где содержание примесных изотопов больше. Появление этой зоны было связано с рассеянием на входных экранах экстрактора атомов, вылетающих из пучка под большими углами к его поверхности. На остальной площади фольги изотопный состав был практически постоянен (содержание ^{176}Yb составило около 80 %). В последующих экспериментах в конструкцию экстрактора были внесены изменения, что позволило выровнять распределение изотопного состава по всей поверхности фольги. Перечислим основные экспериментальные результаты, полученные в ходе наработки.

1. Изотопный состав в смывом материале почти не зависел от тока экстрактора (в диапазоне 2–10 мА).

2. Распределение изотопного состава практически не зависело от координаты вдоль фольги, направленной перпендикулярно образующей цилиндрического корпуса экстрактора, в то время как масса смывного иттербия была распределена по координате существенно неравномерно (рис.3).

3. Содержание целевого изотопа увеличивалось, а примесных изотопов – снижалось с уменьшением плотности атомного пара при примерно одинаковых значениях тока экстрактора.

4. Отношение между «токовой» массой (определяется ионным током и продолжительностью наработки) и набранной массой иттербия (получена в результате смыва) находилось в пределах 3–5.

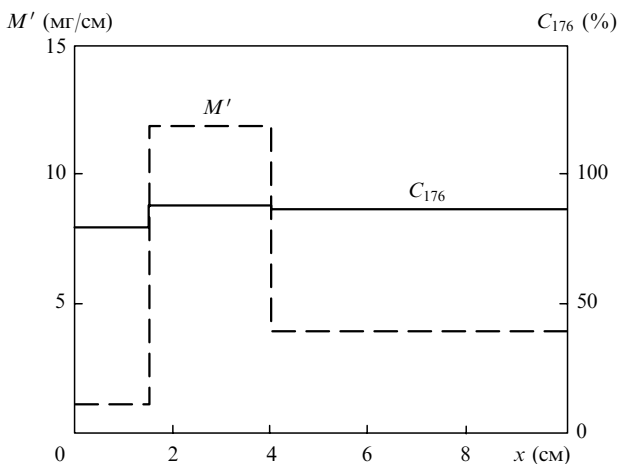


Рис.3. Зависимости распределения массы обогащенного иттербия M' и содержания C_{176} изотопа ^{176}Yb в одном из экстракторов от координаты x в направлении, перпендикулярном образующей цилиндрического корпуса экстрактора.

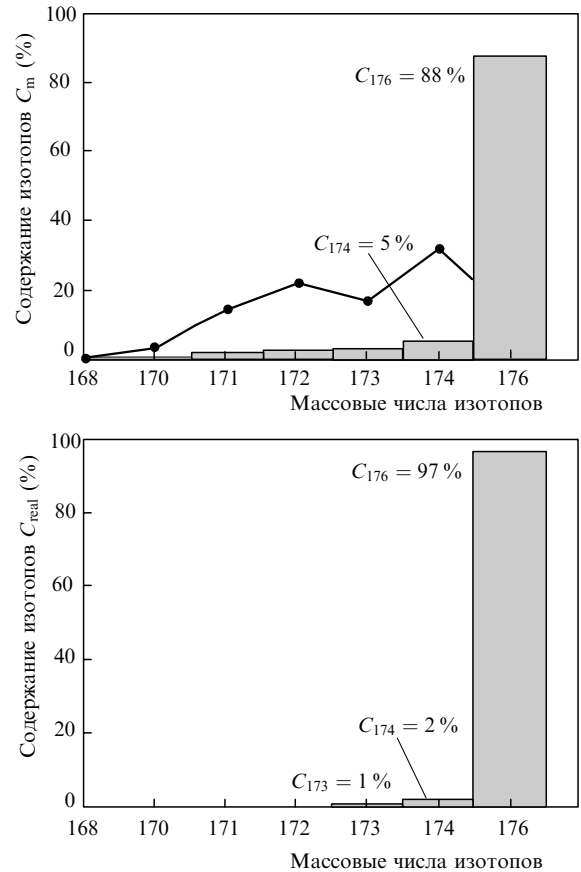


Рис.4. Характерные данные изотопного анализа образца обогащенного иттербия, извлеченного из одного экстрактора (C_m) (а), и соответствующий ему изотопный состав, очищенный от засорения нейтральными атомами (C_{real}) (б). Точки соответствуют естественному содержанию изотопов иттербия.

Анализ экспериментальных данных указывает на определяющую роль в засорении экстрактора резонансной перезарядки. Рассеяние атомов вносит лишь небольшие (несколько процентов) изменения в изотопный состав в тех участках фольг, где толщина пленки обогащенного иттербия очень мала.

На рис.4,а приведены данные точного изотопного анализа для одного из образцов исходного материала с массой обогащенного иттербия 54.2 мг. Содержание ^{176}Yb в этом образце составляет 87.9 % при содержании ^{174}Yb 5.3 %. Коэффициент засорения равен 0.1, суммарная масса изотопов примеси – 4.9 мг.

Данные изотопного анализа позволили оценить коэффициент распыления меди K_p , который, как известно [19, 20], зависит от энергии иона и угла его падения. Экспериментально измеренный коэффициент распыления изменяется в пределах 12–14 атом/ион при энергии 12 кВ и примерно совпадает со значениями коэффициента распыления ионов свинца в диапазоне углов падения 0–60°.

5. Выводы

Итак, проведенные исследования демонстрируют возможность получения исходного материала для производства ^{177}Lu методом ЛАРИЗ в атомном паре. В пробных образцах достигнуто обогащение ^{176}Yb до 88 % с содержанием ^{174}Yb около 5 % при производительности ~20 мг/ч.

Экспериментально показано, что из возможных процессов засорения экстрактора основным является резонансная перезарядка ионов в атомном пучке. Наши оценки ее влияния говорят о том, что уменьшить долю примеси ^{174}Yb до 2.5% – 3.0% можно путем снижения плотности пара до $\sim 10^{11} \text{ см}^{-3}$ при использовании схемы трехступенчатой фотоионизации либо снижения содержания ^{174}Yb за счет увеличения содержания ^{173}Yb (изотопа, не мешающего процессу производства ^{177}Lu).

1. Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **25** (11), 971 (1998).
2. Мишин В.А. В кн. *Изотопы: свойства, получение, применение*. Под ред. В.Ю.Баранова (М.: ИздАт, 2000, с. 308).
3. Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **33** (7), 581 (2003).
4. Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Калугин М.М., Прохоров А.М., Фатеев Н.В. *Лазерное разделение изотопов в атомных парах* (М.: Физматлит, 2004).
5. Ткачев А.Н., Яковленко С.И. В кн. *Газовые и плазменные лазеры*. Под ред. С.И.Яковленко (М.: Физматлит, 2005, с. 764–811).
6. *Изотопы: свойства, получение, применение*. Под ред. В.Ю.Баранова (М.: ИздАт, 2000).
7. Держиев В.И., Кузнецов В.А., Михальцов Л.А., Мушта В.М., Сапожков А.Ю., Ткачев А.Н., Чаушанский С.А., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **23** (9), 771 (1996).
8. Derzhiev V.I., Kuznetsov V.A., Mikhal'tsov L.A., Mushta V.M., Sapozhkov A.Yu., Tkachev A.N., Chaushanskii S.A., Yakovlenko S.I. *Proc. Int. Conf. on Lasers'96* (McLean, VA: STS Press, 1997, p. 441–448).
9. Чаушанский С.А. Канд. дисс. (М., ИОФРАН, 2005).
10. Toporov Y.G., Tarasov V.A., Andreev O.I., Zotov E.A., Kupriyanov V.N., Gavrilov V.D., Semenov A.O. *Abstract Book, 5th Int. Conf. on Isotopes* (Brussels, Belgium, 2005, p. 10).
11. Дергачев В.А., Кашеев Н.А. *Масс-спектрометрия и электромагнитное разделение изотопов* (М.: Энергоатомиздат, 1988).
12. Park H., Kwon D.H., Cha Y.H., Nam S.M., Kim S.K., Han J.M., Rhee Y., Jeong D.Y., Kim C.J. *Abstract Book, 5th Int. Conf. on Isotopes* (Brussels, Belgium, 2005, p. 6).
13. Крынецкий Б.Б., Мишин В.А., Прохоров А.М. *Препринт ИОФАН № 70* (М., 1990); *ЖПС*, **54** (4), 558 (1991).
14. Прохоров А.М., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *ДАН РФ*, **329** (6), 729 (1993).
15. Майоров С.А., Ткачев А.Н., Яковленко С.И. *Математическое моделирование*, **6** (9), 13 (1994).
16. Maiorov S.A., Tkachev A.N., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **4** (3), 624 (1994).
17. Golyatina R.I., Tkachev A.N., Yakovlenko S.I. *Laser Phys.*, **12** (9), 1234 (2002).
18. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др. *Физические величины*. Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова (М.: Энергоатомиздат, 1991).
19. Габович М.Д., Плешивцев Н.Н., Семашко Н.Н. *Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей* (М.: Энергоатомиздат, 1986).
20. *Технология тонких пленок*. Под ред. Л.Массела, Р.Глэнга (М.: Сов. радио, 1977, т. 1).