

ИЗГОТОВЛЕНИЕ СЛОЕВ ИЗОТОПИЧЕСКИ ЧИСТЫХ АКТИНОИДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАЗЛИЧНЫХ ПОДЛОЖКАХ МЕТОДОМ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

PRODUCTION OF LAYERS OF ISOTOPICALLY PURE ACTINIDE ELEMENTS ON DIFFERENT SUBSTRATES USING A METHOD OF ION IMPLANTATION

*Ю. В. Рычков, В. Н. Вячин, М. Ю. Максимов, С. М. Карпунин,
И. А. Василенко, С. В. Федоренков, Р. Г. Шестаков*

*Yu. V. Rychkov, V. N. Vyachin, M. Yu. Maksimov, S. M. Karpunin,
I. A. Vasilenko, S. V. Fedorenkov, R. G. Shestakov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

Электромагнитный масс-сепаратор С-2 предназначен для получения изотопически чистых элементов актиноидного ряда. Использование сепаратора в качестве ионного имплантера предоставляет уникальную возможность изготовления слоев на подложках с одновременным обогащением по целевому нуклиду. Такие слои используются в качестве мишеней или источников излучений в фундаментальных и прикладных ядерных исследованиях.

Electromagnetic mass-separator S-2 is designed to produce isotopically pure elements of the actinide series. The use of separator as ion implanter gives the unique possibility of producing layers on substrates with simultaneous enrichment by specific nuclide. Such layers are used as target or radiation emitters in fundamental and applied nuclear researches.

Метод ионной имплантации применяется в микроэлектронике для создания полупроводниковых структур, в металлургии для упрочнения поверхности металла, при исследованиях новых материалов с заранее заданными свойствами. При этом имплантируются, как правило, ионы стабильных элементов.

Электромагнитный масс-сепаратор С-2 предназначен для получения изотопически чистых элементов актиноидного ряда, но также может использоваться в качестве ионного имплантера для изготовления слоев. Имплантация является альтернативой другим способам нанесения слоев на подложки, таким как, например, электролизное осаждение и разложение из паровой фазы.

Слои, изготовленные методом ионной имплантации, обладают рядом преимуществ: высокая механическая прочность, возможность использования непроводящих и органических подложек.

В случае необходимости изготовления слоев из веществ с особо высокой изотопной чистотой, возможно дополнительное обогащение в предварительном цикле разделения изотопов.

Такие слои используются для различного рода фундаментальных ядерных исследований.

Источник ионов, использующийся в настоящее время, является трехэлектродным источником плазменного типа с продольным катодом прямого накала, расположенным параллельно вытягивающей щели газоразрядной камеры. Это так называемый источник Фримана [1].

Источник позволяет получать стабильный по времени и величине ток ионов на выходе из источника до 5 мА. Ускоренные ионы, проходя по камере масс-сепаратора, разделяются в магнитном поле пропорционально отношению массы ионов к их заряду и фокусируются в плоскости приемника. Изменяя параметры источника ионов, можно получить на приемнике стабильные ионные токи величиной от долей микроампер до двух миллиампер. Это позволит соответственно имплантировать в подложку от 1 нанограмма до 5 микрограмм вещества за секунду.

При определенной конструкции приемного устройства, возможно одновременное изготовление слоев из разных изотопов, присутствующих в исходной смеси.

Форма и размер пучка ионов, попадающих на приемник, зависит от его фокусировки и обычно представляет собой «диффузный» прямоугольник

размерами примерно $5 \text{ мм} \times 70 \text{ мм}$. Максимальная плотность тока в пучке приходится на центр прямоугольника.

В качестве имплантируемых ионов был выбран $^{239}\text{Pu}^+$. Входной контроль исходного препарата плутония осуществлялся при помощи гамма-спектрометра 92X Spectrum Master, аттестация изготовленных слоев – альфа-спектрометра Alpha Aгia, паспортное энергетическое разрешение которого составляет 12 кэВ.

В конструкцию мишенного устройства заложены:

- возможность изготовления по очереди до 10 слоев в одном цикле разделения за счет применения многопозиционного механизма смены подложек;

- высокая точность измерения ионного тока на подложках благодаря применению антидинаatronного электрода (АДЭ);

- возможность изготовления слоев на органических (диэлектрических) подложках с известной массой вещества в слое за счет использования реперного электрода.

Материал подложек – нержавеющая сталь, титан, тантал, лавсан. Диаметр подложек – 10 мм, активного пятна – 4 мм. Лицевая сторона металлических подложек отполирована. Чистота поверхности подложек соответствовала 11 классу. Шероховатость поверхностей подложек измерялась профилометром. Лавсановые пленки были установлены в специально изготовленные оправки.

Принцип работы механизма смены подложек основан на том, что возвратно-поступательное движение шипа электромагнитного привода преобразуется в шаговое линейное движение кассеты с подложками.

Кассета с подложками электрически изолирована от корпуса устройства, а также закрыта крышкой – заземленным электродом – со стороны ионного пучка, в которой имеются отверстия напротив центральной подложки и реперного электрода.

Антидинаatronный электрод располагается между заземленным электродом и подложкой.

Затвор во время смены подложек перекрывает отверстие напротив текущей подложки, отверстие репера остается открытым для контроля величины тока и положения ионного пучка.

В качестве рабочего вещества источника ионов применяются хлориды разделяемых элементов. Смесь хлорида плутония (III) и хлорида церия (III) была получена в результате гетерофазной

реакции смеси оксидов плутония и церия с парами соляной кислоты и тетрахлорида углерода.

Хлорид церия (III) использовался в качестве носителя в соотношении 15:1, чтобы обеспечить загрузку тигля рабочим веществом в количестве, достаточном для получения продолжительного по времени требуемого значения ионного тока.

Основные характеристики процесса имплантации:

- давление в вакуумной камере: $1,3 \times 10^{-3}$ Па;
- энергия ионов: 40 кэВ;
- кратность заряда ионов: 1;
- ионный ток на подложках: от 1,7 до 2,5 мкА;
- ионная доза: 10^{15} см⁻²;
- напряжение на АДЭ: минус 100 В;
- подложки располагались перпендикулярно направлению движения ионов.

Контроль количества имплантированного вещества в процессе изготовления осуществлялся измерением ионных токов путем оцифровки напряжения на токовых шунтах с помощью аналогоцифровых преобразователей.

Полученные слои на подложках были извлечены из мишенного устройства. Лицевая сторона подложек была очищена от снимаемого радиоактивного загрязнения марлевыми тампонами, пропитанными изопропиловым спиртом.

Проверка прочности слоев проводилась путем взятия мазка фильтровальной бумагой и измерением ее активности дозиметрическим прибором ДКС-96. Радиоактивное загрязнение бумаги отсутствовало.

Процедура взятия мазка была повторена спустя 9 месяцев. Радиоактивное загрязнение бумаги также отсутствовало, что свидетельствует о высокой механической прочности слоев.

Для измерения изотопного состава, массы вещества в слое и спектрометрических характеристик слоев, а также для оценки глубины имплантации использовался альфа-спектрометр Alpha Aгia.

Приведены результаты для одного из слоев с подложкой из нержавеющей стали.

В альфа-спектре были идентифицированы характеристические пики плутония-238 и плутония-239. Энергетическое разрешение спектра для всех слоев было одинаково и составило 12,6 кэВ.

Отношение масс $^{239}\text{Pu}/^{238}\text{Pu}$ в исходной смеси составляло 6×10^2 , а в имплантированном слое – $2,5 \times 10^4$. Масса плутония-239 в слое составила 470 нг.

Проведена оценка глубины внедрения ионов в материал подложки методом измерения альфа-спектра слоя под разными углами к поверхности

детектора с использованием реперного пика америция-243 с энергией 5275 кэВ [2]. При проведении оценки принято, что смещение положения пика плутония-239 с энергией 5156 кэВ при измерении под углом к поверхности детектора соответствует ослаблению энергии альфа-частиц в материале подложки. Измерения спектров проводились в двух положениях слоя относительно плоскости детектора – параллельно и под углом 45°. Положение образца америция оставалось неизменным. Глубина имплантации составила 150 Å.

Также проведен расчет профиля распределения внедренных атомов по глубине подложек при помощи программы Stopping and Ranges of Ions in Matter (SRIM-2013).

Итак, для стальной подложки по результатам расчета максимальная концентрация внедренных атомов наблюдается на глубине 100 Å, а по результатам экспериментальной оценки – 150 Å.

По результатам расчета в программе SRIM максимальная концентрация внедренных атомов в подложки из титана – на глубине 163 Å, тантала – 68 Å, лавсана – 390 Å.

Таким образом, разработан и опробован способ изготовления слоев из актиноидов, с одновре-

менным обогащением, при использовании масс-сепаратора С-2 в качестве ионного имплантера с использованием специализированного мишенного устройства с электростатическим подавлением динаatronного эффекта.

Изготовлены слои из плутония с массовой долей плутония-239 вплоть до 99,996 % и активностью порядка 10^3 Бк на подложках из нержавеющей стали, титана, тантала и лавсана. Альфа-спектры изготовленных слоев имеют высокое энергетическое разрешение – не более 12,6 кэВ. Проведена оценка глубины внедрения ионов в материал подложки методом измерения альфа-спектра слоя под разными углами к поверхности детектора с использованием реперного пика америция-243. Глубина имплантации в подложки из стали по оценке составила 150 Å.

Список литературы

1. Браун Я. Г. Физика и технология источников ионов. Москва: Мир. С. 202–222
2. Handbook of nuclear data for safeguards database extensions, August 2008, IAEA