

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров Н.И., Нешумова С.П., Антонов И.А. Справочник газосварщика и газорезчика. – 2-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 1999. – 239 с.
2. Adedayo A.V. Elucidation on Reactions Thermodynamics and Kinetics of OFC-A of Steels // Journal of Minerals, Materials Characteristics, Engineering. – 2010. – V. 9. – № 7. – P. 607–619.
3. Горбач В.Д., Никифоров Н.И. Развитие и применение автоматической термической резки на предприятиях судостроения, металлургии и машиностроения Российской Федерации // Автоматическая сварка. – 2008. – № 11. – С. 120–128.
4. Пирумов У.Г. Росляков Г.С. Газовая динамика сопел. – М.: Наука, 1990. – 368 с.
5. Романенко П.Н. Теплообмен и трение при градиентном течении жидкостей. – М.: Энергия, 1971. – 568 с.
6. Никифоров Н.И., Сухинин Г.К., Кректулева Р.А., Бежин О.Н., Губенко Л.В. Результаты компьютерных и натуральных экспериментов по высокоскоростной кислородной резке металла // Автоматическая сварка. – 2000. – № 5. – С. 21–24.
7. Кректулева Р.А., Герасимов А.В. Пространственное распространение ударного импульса в конденсированных градиентных средах // Численные методы решения задач упругости и пластичности / под ред. В.М. Фомина. – Новосибирск: Изд-во ИТПМ, 1995. – С. 104–108.
8. Физические величины. Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
9. Вахгельт А.Ф., Егоров В.М. Внутренние задачи прикладной газовой динамики. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1988. – 118 с.
10. Малов А.Н., Оришич А.М., Фомин В.М., Внучков Д.А., Наливайченко Д.Г., Чиркашенко В.Ф. Исследование структуры сверхзвуковых течений воздуха с подводом энергии от квазистационарного оптического разряда // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. – № 4. – С. 155–160.
11. Никитин А.К. Кислородная резка сталей больших толщин // РИТМ. – 2010. – № 7. – С. 42–44.
12. Никифоров Н.И., Кректулева Р.А. Математическое моделирование технологического процесса кислородной резки // Сварочное производство. – 1998. – № 4. – С. 3–6.

Поступила 07.07.2011 г.

УДК 548.55:669.015.5:539.23

К ВОПРОСУ О ПОЛУЧЕНИИ ОСОБО ЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО УРОВНЯ (СОСТОЯНИЯ)

А.Н. Порядина, А.М. Апасов

Юргинский технологический институт (филиал) ТПУ
E-mail: mchmyti@rambler.ru

Обобщены достигнутые в последнее время основные экспериментальные результаты в области получения ряда металлов в особо чистом состоянии и исследования их свойств. Кратко изложены основные принципы физических методов рафинирования металлов (дистилляция, плавка и зонная перекристаллизация) с применением вакуумной и сверхвысоковакуумной техники. Показана перспектива комплексного применения физических методов рафинирования для глубокой очистки металлов. Процессы дистилляции в вакууме позволяют конструировать особо чистые металлы нанокристаллического уровня путем регулируемой сборки из отдельных атомов и, следовательно, получать металлы с заранее заданными свойствами и структурой.

Ключевые слова:

Металлы в особо чистом состоянии, физические методы рафинирования металлов, дистилляция, плавка и зонная перекристаллизация, вакуум, структура, свойства.

Key words:

Metals in a high-purity state, physical methods of metals purification, distillation, melting and zone recrystallization, vacuum, structure, properties.

Введение

На текущий момент времени достигнут высокий уровень чистоты многих полупроводниковых материалов [1, 2]. Так, суммарное содержание основных примесных элементов в лучших образцах германия, кремния не превышает 10^{11} – 10^{12} ат./см³, в арсениде галлия — 10^{14} – 10^{15} ат./см³. Несмотря на то, что для технологий глубокой очистки веществ характерны высокие научно- и капиталоемкость (причем материальные затраты растут нелинейно с повышением степени очистки [3]), повышение чистоты материалов для микроэлектроники продолжает оставаться актуальным. Высокая степень чистоты материалов предопределяет рост экономической эффективности их использования:

расширяются функциональные возможности, улучшаются эксплуатационные характеристики.

Научная проблема подобного уровня стоит и перед металлами: актуальность проводимых комплексных исследований в области особо чистых металлов несомненна [4–6]. Это объясняется тем, что:

- высокочистые металлы — это «особое» фазовое состояние вещества, находящегося в экстремальных условиях, при котором кардинально изменяется поведение известных свойств и выявляются совершенно новые фундаментальные, ранее «скрытые» примесными элементами и соединениями, а также структурными дефектами различного уровня;

- особое качество может быть сформировано только при обязательном условии соблюдения высокой степени физической однородности (полное отсутствие дефектов различного структурного уровня), химической однородности (максимальный уровень диспергирования химических элементов и их соединений по всему объему при их минимальной концентрации или полном отсутствии) и структурной однородности металлов и сплавов. Это, в свою очередь, будет гарантировать реальным изделиям и конструкциям из данных металлов такие механические, физические, химические и другие свойства, информативные параметры которых будут максимально приближены к их теоретическим значениям;
- начавшееся восстановление авиакосмической, оборонной промышленности, специального машиностроения, черной и цветной металлургии, а также решение назревших проблем в микроэлектронике, атомной энергетике, вирусологии, генетике, биомедицине ставит актуальную задачу возрождения внимания к теории и практике разработки новых прецизионных технологий получения сверхчистых металлов, которые являются основой для синтеза новых материалов с заданными свойствами.

Анализ методов очистки металлов

Имеется несколько общих причин, ограничивающих глубокую очистку металлов. К первой группе причин можно отнести факторы, связанные с методами глубокой очистки веществ, с взаимодействием примесей между собой и с очищаемой основой. Вторая группа причин объясняется поступлением примесей из конструкционных материалов в процессах очистки.

Один из радикальных путей повышения эффективности очистки металлов заключается в последовательном использовании ряда методов рафинирования, имеющих различные механизмы разделения примесей. В этом случае можно ожидать более эффективного разделения различных классов примесей, чем при многократном использовании одного метода, даже весьма эффективного.

Следует отметить, что традиционные рафинировочные электротехнологические процессы, осуществляемые в вакуумных дуговых, электронно-лучевых, вакуумных индукционных и плазменных электропечах, предназначены для переплавов металлов и сплавов с удалением из расплава через паровую фазу до 0,01...1,0 % исходной массы материала. Такие электропечи не имеют паропроводов и конденсаторов из-за малого количества веществ, переводимых в пар. Конденсация паров в этих электропечах происходит на внутренних поверхностях рабочих камер и других элементах конструкции. После цикла плавки эти поверхности очищаются от конденсата механическим путем. Поэтому традиционные рафинировочные процессы являются частными случаями более общих дистилля-

ционных процессов, когда в паровое состояние переводится от 1 до 90 % исходной массы расплавленных металлов [6].

На основе исследований поведения отдельных примесей или их групп при очистке металлов разработаны и реализованы высокоэффективные физические методы рафинирования:

- плавка и зонная перекристаллизация в сверхвысоком вакууме и контролируемых (активных) средах с применением электронно-лучевого нагрева;
- зонная плавка в сочетании с электропереносом;
- различные сочетания вышеперечисленных методов;
- вакуумная дистилляция, в том числе с конденсацией пара на колонку с градиентом температуры в замкнутом объеме, занимающая особое место среди методов рафинирования в промышленности.

Физико-химические основы дистилляционных методов основаны на разделении металлов при испарении (конденсации) за счет различия в давлениях насыщенных паров. Это различие определяется величиной относительно летучести β отделяемого компонента (применительно к процессу рафинирования эту величину называют коэффициентом разделения). В равновесных условиях

$$\beta_e = \frac{N'_A / N_A}{N'_B / N_B} = \frac{N'_A / N'_B}{N_A / N_B},$$

где N_A и N'_A – мольные доли компонента А в жидкости и в паре соответственно, N_B и N'_B – то же для компонента В. Чем дальше отстоит значение β_e от единицы, тем эффективнее разделение компонентов.

При молекулярном испарении в вакууме, когда испаряемые компоненты не возвращаются в расплав, а молярные концентрации компонентов пропорциональны их молярным скоростям испарения, степень разделения определяется выражением

$$\beta_e = \frac{P_A^0 N_A \gamma_A}{P_B^0 N_B \gamma_B} \sqrt{\frac{M_B}{M_A}},$$

где P_A^0 , P_B^0 , N_A , N_B , γ_A , γ_B , M_A , M_B – упругость пара, мольная доля, коэффициент активности и молярный вес основного вещества (А) и примеси (В) соответственно.

Расчет процесса вакуумной дистилляции обычно сводится к определению закономерностей изменения состава исходного сплава и конденсата со временем, т. е. к определению кинетики изменения содержания примесей в рафинируемом расплаве и конденсате. Так как сведения о коэффициентах активности и их зависимостях от концентрации элементов ограничены, расчеты можно упростить, предполагая, что для дистиллируемого сплава выполняется закон Рауля. Такое предположение вполне допустимо для сильно разбавленных растворов, т. е. в случае металлов, содержащих малое количество примесей.

Согласно основным положениям теории дистилляции металлов и с учетом малого содержания примесей в рафинированном металле получены упрощенные уравнения для оценки изменения содержания металлических примесей в исходном и конденсированном металле после вакуумной дистилляции:

$$\frac{X_1}{X_0} = \left(\frac{G_1}{G_0} \right)^{\beta_i^{-1}}; \quad \frac{X_k}{X_0} = \frac{1 - (1 - G_k / G_0)^{\beta_i}}{G_k / G_0},$$

где X_0 и X_1 – начальное и конечное содержание примеси в исходном металле, а X_k – содержание ее в конденсате; G_0 , G_1 , G_k – массы исходного металла (начальная и конечная) и конденсата соответственно; β_i – коэффициент разделения идеального двойного сплава.

В электропечах *периодического* действия весь технологический процесс происходит в одной камере: после загрузки сырья рабочий объем воздуха откачивается, а после окончания процесса в камеру напускается нейтральных газ для охлаждения тигля, дистилляционного остатка и удаления из печи конденсата – дистиллята [6].

Наиболее распространенная дистилляционная система периодического действия показана на рис. 1. В плавильном тигле исходное сырье нагревается до рабочей температуры, при которой с поверхности расплава испаряются легколетучие компоненты. Парогазовая смесь передается по паропроводу в область расположения охлаждаемого конденсатора, паровая фаза переводится в твердое или жидкое состояние и конденсируется. Технологический процесс можно осуществлять при давлениях, близких к атмосферному, при пониженном давлении в рабочем пространстве электропечей или в глубоком вакууме. В двух последних случаях дистилляционная система, изображенная на рис. 1, помещается в герметичный объем и комплектуется вакуумной системой.

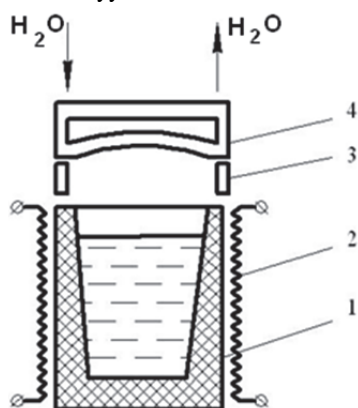


Рис. 1. Схема простой дистилляции: 1) тигель с расплавом; 2) нагреватель; 3) паропровод; 4) водоохлаждаемый конденсатор

Полученный конденсат называется *дистиллятом*, неиспарившийся расплав – *остатком*. В процессе дистилляции содержание низкокипящих компонентов в расплаве непрерывно падает. Поэтому уменьшается их содержание и в парах.

Фракционная дистилляция предполагает отвод в разное время паров различных составов в несколько сборников (рис. 2).

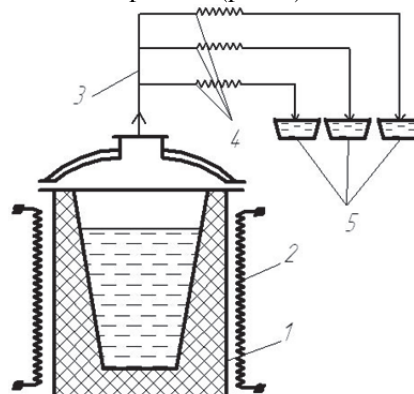


Рис. 2. Схема фракционной дистилляции: 1) тигель с расплавом; 2) нагреватель; 3) паропровод; 4) конденсаторы; 5) сборники конденсата

В первый конденсатор поступает первая по времени порция дистиллята, наиболее богатая низкокипящими компонентами, во второй конденсатор – менее богатый дистиллят и т. д. Конструкция электропечей имеет несколько конденсаторов и позволяет менять их в процессе работы. В каждом из полученных дистиллятов преобладает содержание одного или нескольких компонентов исходного расплава.

Дистилляционные методы использовались для рафинирования многих металлов: Be, Cr, Zn, Fe, Ni, Mg, Mn, Ga, Cd, Te, V, Sc и др. Очень широко методы дистилляции использовались для получения высокочистого бериллия.

В работе [4] представлены результаты очистки бериллия методом дистилляции: однократной – 1Д, трехкратной – 3Д, двукратной в закрытом объеме – 2Д гет, комплексными методами (двойная дистилляция + зонная плавка (2Д + 3П), а также 2Д + 3П + электроперенос). Таким образом, если исходный металл содержал бериллия ~98...99 %, то после первой дистилляции – 99,99 %, а после очистки комплексным методом – 99,999 %.

Наиболее часто в печах периодического действия конденсирующиеся пары металлов переходят в *твердое* состояние поэтапно через три стадии: нанокластеры, наноструктуры, нанокристаллическое состояние с образованием в итоге сверхчистых металлов.

Методы получения нанокластеров

В основу классификации нанокластеров и наноструктур целесообразно положить способы их получения. Это определяет также разграничения на изолированные наноструктуры и нанокластеры, объединенные в наноструктуру со слабыми или сильными межкластерными взаимодействиями или взаимодействием кластера с матрицей [7].

В группу изолированных и слабо взаимодействующих нанокластеров включены: молекулярные кластеры, газовые безлигандные кластеры

(кластеры щелочных металлов, алюминия и ртути, кластеры переходных металлов, углеродные кластеры и фуллерены, вандерваальсовы кластеры), коллоидные кластеры.

Группа нанокластеров и наноструктур состоит из твердотельных нанокластеров и наноструктур, матричных нанокластеров и супрамолекулярных наноструктур, кластерных кристаллов и фуллеритов, компактированных наносистем и нанокмпозитов, нанопленок и нанотрубок.

Безлигандные металлические кластеры получают с помощью сверхзвукового сопла, газовой агрегации и испарением с поверхности твердого тела или жидкости. Они формируются из атомных и молекулярных пучков, когда металл испаряется в вакуум на поверхность конденсатора или какой-нибудь инертный газ. Размер кластеров может варьироваться от нескольких атомов металла до сотен и тысяч, однако линейный размер составляет, как и для молекулярных кластеров, 1...2 нм, и в расчет берется только металлическое ядро. Условия образования таких кластеров определяются газовой фазой и уже не зависят от лигандов, а стабильность и свойства определяются магическими числами образующих кластер атомов.

Тепловой поток паров металла, поступающий на охлаждаемую поверхность конденсатора в печах периодического действия, как правило, изменяется во времени.

Эта техническая особенность системы конденсации паров связана с еще одним требованием: конденсаторы с переводом пара в твердое состояние должны обеспечивать утилизацию продукта за весь технологический цикл и, следовательно, не допускать роста температуры поверхности конденсации выше температуры плавления конденсата к концу плавки, когда образуется большой слой конденсата.

Скорость конденсации в твердое состояние и структура получаемого твердого конденсата в наибольшей степени зависят от соотношения температуры конденсации T_k и температуры плавления осаждаемого вещества $T_{пл}$.

При $T_k < T_{пл}$ конденсаты формируются как неравновесные системы, состоящие из беспорядочно ориентированных сверхмелких зерен размером ≤ 10 нм с рассеянной микропористостью. При температуре поверхности конденсации в диапазоне $< 0,3 T_{пл} < T_k < 0,5 T_{пл}$ для конденсатов характерна столбчатая структура с кристаллографической ориентацией [8]. При высокотемпературной конденсации в твердую фазу, когда $T_k > 0,5 T_{пл}$, формируется равновесная структура, подобная структуре рекристаллизованных металлов и сплавов.

В начале процесса металлическая водоохлаждаемая поверхность конденсатора без промежуточных слоев взаимодействует с паровым потоком. За счет разности температур в соответствии с диаграммой состояния на этой поверхности начинает образовываться конденсат.

Формирование наноструктур из атомов и молекул чистых металлов, адсорбированных на поверхности конденсаторов при дистилляции

Твердая поверхность конденсаторов представляет собой особый вид структуры, где проявляются не только особенности конденсированного состояния вещества, но также и газовой фазы. Ее свойства также определяют многие характеристики нанокластеров и наноструктур. Здесь исследуются различные свойства поверхности на микроскопическом уровне. Это атомная, электронная, магнитная структура, как в статическом плане, так и в динамическом по сравнению с характеристическими временами поверхности, измеряемые теми или иными методами [5].

Прежде всего необходимо остановиться на основных подходах, которые используются для описания структурных и электронных свойств атомов и молекул, входящих в состав поверхности или *адсорбированных* на ней. Речь идет о методе молекулярных орбиталей, позволяющем конструировать химические связи и образовывать из атомов молекулы, нанокластеры и наночастицы и тело правильной геометрической формы макроскопических размеров, находящегося в конденсированном состоянии.

Орбитали получаются при решении уравнений квантовой механики типа $H\varphi = E\varphi$, где H – оператор Гамильтона; E – энергия орбиталей; φ – атомные или молекулярные орбитали. Поиск атомных орбиталей в одноэлектронном приближении осуществляют в виде $\varphi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi) = R_{n,l}(r) Y_{l,m}(\theta, \varphi)$, где r – расстояние электрона от ядра; θ и φ – углы сферической системы координат; $R_{n,l}(r)$ и $Y_{l,m}(\theta, \varphi)$ – радиальная и сферическая функции.

Поэтому при сближении атомов металлов, первыми перекрываются их внешние s-орбитали. Вначале перекрываются «хвосты» s-орбиталей, и энергия межатомной связи по мере сближения и повышения концентрации электронов между ядрами постепенно увеличивается. Сближение атомов происходит до совмещения (суперпозиции) максимумов электронной плотности Ψ s-орбиталей, что отвечает удвоению электронной плотности в зоне перекрытия.

Такая высокая концентрация электронов между ядрами соседних атомов стягивает эти атомы и представляет металлическую связь. Суперпозиции максимумов плотности s-оболочек отвечает наибольшая энергия связи между ближайшими соседями. Дальнейшего сближения атомов не происходит вследствие понижения энергии связи из-за уменьшения перекрытия s-оболочек, а также вследствие сильного возрастания отталкивания друг от друга остовных электронных оболочек и взаимного отталкивания ядер.

Число, протяженность и симметрия орбиталей атомов данного конкретного элемента полностью определяют число, длину, ориентировку и энергию межатомных связей, образующихся в результате

перекрытия этих орбиталей, а следовательно, размещение атомов в пространстве, т. е. кристаллическую структуру, а также основные физико-химические свойства элемента. Геометрия кристаллической решетки любого элемента является прежде всего следствием симметрии перекрывающихся электронных орбиталей его атомов [5, 9].

Молекулярные орбитали (МО) формируются из атомных (АО) с помощью линейных комбинаций (ЛК) и, таким образом, составляется метод ЛКАО-МО, позволяющий с помощью тех или иных приближений и с учетом симметрии рассчитывать электронную плотность молекулы или нанокластера.

В качестве примера применения метода ЛКАО-МО проследим изменение МО для молекулы, включающей два фрагмента, и модельной молекулы с одним занятым уровнем при ее адсорбции на поверхность металла.

Для молекулы с двумя фрагментами и четырьмя электронами возникает связывающая МО (нижняя) и разрыхляющая орбиталь (верхняя), которая суммарно повышает энергию и обеспечивает отталкивание фрагментов. Однако в случае взаимодействия такой молекулы с поверхностью твердого тела разрыхляющая орбиталь может оказаться выше по энергии, чем уровень Ферми. Тогда электроны переходят с нее на уровень Ферми, и заполненной остается только связывающая орбиталь, что и обеспечивает связь молекулы с поверхностью. На больших расстояниях существует только отталкивание, которое растет при приближении молекулы к поверхности. Однако когда энергия разрыхляющей орбитали достигает уровня Ферми, электроны переходят на вакансии в зонах металла. В результате отталкивание сменяется *притяжением*.

С учетом вышеизложенного при достижении поверхности конденсатора происходит понижение температуры паров чистых металлов, сближение их атомов и перекрытие их внешних s-орбиталей, образование межатомных связей и, следовательно, размещение атомов в пространстве, т. е. образование упорядоченной кристаллической структуры из чистых элементов или нанокластеров, из которых впоследствии формируются сверхчистые металлы в нанокристаллическом состоянии.

Синтез новых материалов на основе дистилляционных процессов

Процессы испарения и конденсации паровой фазы в вакууме позволяют конструировать сверхчистые металлы путем регулируемой сборки из отдельных атомов и, следовательно, при выполнении программы этой сборки синтезировать материалы с заранее заданными свойствами и структурой.

Электропечи, обеспечивающие проведение таких электротехнологий, имеют много общего с дистилляционными установками для разделения и рафинирования металлов. Основные отличия новых электропечей состоят в том, что в рабочем пространстве необходимо обеспечивать не только

получение чистых паров, но и их дозирование, смешение и управление конденсацией [8, 10].

Созданные вакуумные плазмотроны специальной конструкции для нагрева исходных материалов в виде порошков, в том числе ультрадисперсных [11, 12], индивидуально нагревают каждую такую отдельную частицу путем электронно-ионного взаимодействия с плазмой. Испарительные процессы переводят материал в пар, формируются интенсивные парогазовые направленные потоки ионизированных частиц. Струйные течения ионизированной парогазовой смеси позволяют управлять температурными полями на подложке, кинетической энергией направленного движения пара и легирующих твердых частиц, их температурой. Это существенно изменяет характер конденсационных процессов на подложке-конденсаторе. Вакуумные плазменные устройства позволяют совместить сам процесс синтеза сверхчистых металлов при осаждении на конденсатор-подложку с выполнением некоторых других технологических операций:

- плазменные потоки на поверхность конденсации могут удалять поверхностный слой подложки (конденсатора) и активизировать эту поверхность за счет направленной обработки ионным потоком (например, аргона). Последующая конденсация паров позволяет достичь монокристаллического уровня переходного слоя, т. е. физического контакта (адгезии) на их границе или, наоборот, создать условия для отделения полученного конденсата от подложки.
- можно синтезировать материалы, нанесенные в виде тонких (10...15 мкм) металлических покрытий на готовых изделиях или толстых слоев (до 1...3 мм) на массивные конструкции, а также в виде полуфабрикатов – фольги, ленты, листа.
- возможно получать заготовки и изделия сложной формы, например, тел вращения.

Принципиально иной механизм конденсации наблюдается при реализации объемно-поверхностных процессов перевода паров в твердое состояние. В этом случае свободная пространственная конденсация зависит от температурных условий на первичной поверхности конденсации, от условий теплообмена в прилегающих объемах пространства, от температуры и давления пара.

В работах Б.А. Мовчана [8, 9] показано, что практическая и, следовательно, экономическая целесообразность применения металлов, конденсированных из паровой фазы, определяется конечным результатом: неизвестными до настоящего времени особыми свойствами синтезированных сверхчистых металлов, надежностью, долговечностью, новыми эксплуатационными параметрами деталей машин, аппаратов, иных устройств. Накопленные к настоящему времени результаты лабораторных исследований и промышленного применения сверхчистых металлов и неорганических материалов, осаждаемых из паровой фазы в вакууме, позволяют выделить несколько наиболее перспективных направлений.

- Осаждение металлических и керамических материалов на поверхности готовых изделий в виде покрытий толщиной 10...200 мкм с заданными физико-химическими свойствами. Например, жаростойких и теплозащитных покрытий на лопатки газовых турбин различного назначения [8].
- Осаждение толстых слоев (более 0,5 мм) в качестве:
 - конструкционных покрытий, например оболочек, выполняющих функцию несущего элемента изделия;
 - второго слоя биметаллических заготовок, предназначенных для дальнейшей обработки;
 - рабочего слоя мишеней для магнетронного распыления.
- Получение фольги, листа, труб и изделий более сложной формы из труднообрабатываемых материалов (например, бериллия).
- Осаждение массивных заготовок (более 100 кг) известных высокопрочных материалов для последующей термомеханической обработки с целью получения полуфабрикатов и изделий с оптимальной структурой и высокими значениями физико-механических свойств (например, высокопрочных сплавов алюминия [8]).
- Производство новых дисперсно-упрочненных, микрослойных и микропористых материалов в виде покрытий, полуфабрикатов и изделий из них с широкой гаммой физико-химических свойств (например, Cu-Mo, Pt-ZrO₂, Cr-Al₂O₃).
- Получение путем управляемого синтеза при осаждении интерметаллидов тугоплавких соединений, тонкой керамики, алмазоподобных структур с заданными свойствами и техническими решениями (покрытие, пленка, лист, трубка и др.). Например, магнитомягких материалов SmCo₁₇, Nd₂Fe₄V или высокотемпературной сверхпроводящей керамики типа YBa₂Cu₃O_{7-x} [7].
Успешная реализация этих технологий определяется режимами работы специальных электропечей, позволяющих получать высокоскоростные потоки различных веществ.

Выводы

Установлено, что для получения особо чистых металлов нанокристаллического уровня необходимо:

- рафинируемый металл из расплавленного состояния полностью перевести в паровую фазу;
- последовательно и избирательно в зависимости от температуры кристаллизации конденсировать остатки компонентов вредных примесей, лигатур из паровой фазы с окончательным выделением рафинируемого металла на поверхности тарелей конденсатора;
- на основе направленной кристаллизации сгруппировать из моноатомных слоев чистых элементов металлов упорядоченные кристаллические структуры уровня нанокластеров с последующим формированием сверхчистых металлов в нанокристаллическом состоянии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ажажа В.М., Ковтун Г.П., Неклюдов И.М. Комплексный подход к получению высокочистых материалов для микроэлектроники // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 6. – С. 3–6.
- Девятых Г.Г. Разработка высокочистых материалов // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя: сб. / ред. І.К. Походня [та ін]. – Київ: Наукова думка, 1998. – 658 с.
- Нисельсон Л.А., Копецкий Ч.В. Проблема чистоты материалов в электронике // Высокочистые вещества. – 1993. – № 2. – С. 20–30.
- Ажажа В.М., Ковтун Г.П., Тихинский Г.Ф. Получение и металлофизика особо чистых металлов // Металлофизика и новейшие технологии. – 2000. – Т. 22. – № 2. – С. 21–35.
- Апасов А.М. Нанокристаллическое состояние металлов и сплавов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 840 с.
- Cherednichenko V.S. Distilling electric furnaces. – Novosibirsk: NSTU Publisher, 2009. – 369 p.
- Мовчан Б.А. Получение новых неорганических материалов путем конденсации паров фазы в вакууме // Вестник АН СССР. – 1985. – № 7. – С. 21–29.
- Мовчан Б.А., Демчишин А.В. Исследование структуры и свойств толстых вакуумных конденсатов никеля, титана, вольфрама, окиси алюминия и двуокиси циркония // Физика металлов и металловедение. – 1969. – Вып. 28. – № 4. – С. 23–30.
- Чередниченко В.С., Еременко Г.П., Зырянов С.А. и др. Нагрев порошковых материалов в сильноточных вакуумных дугах // Сибирский физ.-техн. журнал. – 1991. – Вып. 6. – С. 99–105.
- Чередниченко В.С., Чередниченко М.В. Вакуумные плазменные электропечи с полными катодами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. – 138 с.
- Суздаев И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
- Тригорович В.К. Металлическая связь и структура металлов. – М.: Наука, 1988. – 296 с.

Поступила 31.03.2010 г.