

РАФИНИРОВАНИЕ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ И КРЕМНИЯ

Г.А. Колобов¹, Т.В. Критская¹, А.М. Достоева², Н.В. Личконенко¹, В.О. Панова¹

¹Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина;

²Карагандинский государственный технический университет, Республика Казахстан

E-mail: kolobovgerman@rambler.ru; тел. +(38)068-908-68-22

Обзор новых публикаций, касающихся вопросов получения чистых и высокочистых редких металлов и кремния с использованием следующих рафинировочных технологий: электронно-лучевой и зонной плавки; вакуумной дистилляции; электролитического, йодидного, окислительного, шлакового рафинирования; выщелачивания; фракционного плавления; кристаллизационной очистки.

ВВЕДЕНИЕ

На кафедре металлургии цветных металлов Запорожской государственной инженерной академии учебным планом предусмотрена дисциплина «Теоретические основы рафинирования цветных металлов». На основе конспектов лекций по этой дисциплине и дисциплине «Металлургия редких металлов» в 2015 г. была издана монография «Рафинирование редких металлов» [1]. В последующие годы преподаватели кафедры с привлечением аспирантов и студентов опубликовали ряд обзорных статей по этой тематике [2–9]. В настоящей работе обсуждаются вопросы рафинирования не только редких металлов, но и кремния, методы очистки которого от примесей во многом совпадают с таковыми для редких металлов.

РАФИНИРОВАНИЕ РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

Электронно-лучевая плавка тугоплавких редких металлов сопровождается значительным рафинирующим эффектом [10–12]. В работе [10] изучен процесс удаления примесей железа, кремния и титана из вольфрамового расплава при электронно-лучевой плавке на мощностях 110, 130 и 250 кВт. Показано, что в процессе плавки удаляются практически все примеси, кроме молибдена. Скорость удаления железа, кремния и титана связана с давлением их насыщенных паров и контролируется коэффициентами переноса на границе жидкость–газ, которые составляют $(0,21; 0,56; 0,1) \cdot 10^{-4}$ при 100 кВт, $(0,83; 3,04; 1,78) \cdot 10^{-4}$ при 130 кВт и $(0,36; 2,37; 1,48) \cdot 10^{-4}$ при мощности 250 кВт.

Электронно-лучевая плавка порошкообразного ванадия в работе [11] проводилась с целью получения металла с пониженным уровнем фона радиоактивных примесей. Показано, что электронно-лучевая плавка является эффективным методом рафинирования ванадия от примесей внедрения и большинства металлических примесей, в том числе от калия. Были получены образцы ванадия с чистотой 99,99 мас.%. Установлено, что полученный ванадий удовлетворяет всем необходимым условиям, в первую очередь по содержанию примеси калия, для проведения исследований поиска 2β -распадов на ядрах изотопов ванадия, а также для применения в качестве компонента перспективных, малоактивируемых сплавов.

В [12] предложен способ получения чистого ниобия многократным электронно-лучевым переплавлением черновых слитков ниобия, полученных восстановлением Nb_2O_5 алюминием и кальцием. При этом восстановление пентаоксида ниобия ведут с добавлением в шихту возгонов, преимущественно неокисленных, образующихся при электронно-лучевой плавке черновых слитков. Перед добавлением в шихту возгоны, образованные после проведения второго и последующих переплавов, нагревают до температуры 600...800 °С при остаточном давлении не более 0,1 мм рт. ст. в течение не менее 1 ч и гидрируют не менее 12 ч. После гидрирования их измельчают до крупности ~ 1 мм, дегидрируют и добавляют к исходному пентаоксиду ниобия в количестве 5...10% по отношению к массе пентаоксида. Процесс восстановления ведут при соотношении компонентов по массе: $Nb_2O_5:Al:Ca = 1:(0,22...0,24):(0,27...0,29)$.

Рафинирование циркония осуществляют различными методами. Процесс электролитического рафинирования изучен в работе [13]. Исходный материал для рафинирования был представлен скрапом отработанных оболочек для ядерного топлива (сплав Zr-1Nb-1,5Sn-0,1Fe), электролитом служил расплав LiF-KF эвтектического состава, содержащий 6% ZrF_4 . На катоде осаждался высокочистый цирконий, крупность кристаллов которого контролировалась плотностью тока.

Другой метод получения чистого циркония – йодидное рафинирование [14, 15]. Недостатком процесса йодидного рафинирования циркония в промышленных печах СКБ-5025 и аппаратах Ц-40М при переработке отходов и оборотов производства является низкий прямой выход металла в йодидный прутки и большая энергоёмкость процесса. В работе [14] задача получения высокочистого циркония из отходов и оборотов производства была решена оптимизацией процесса йодидного рафинирования путем автоматизированного управления. С этой целью был создан опытный стенд с аппаратной и программной частями и обобщены результаты его работы за время эксплуатации.

ОАО ВНИИХТ и Чепецкий механический завод постоянно работают над усовершенствованием процесса йодидного рафинирования. Предложенный ими в [15] способ позволяет повысить производительность процесса и аппарата йодидного рафинирования циркония (а также титана и гафния) путем

увеличения скорости процесса за счет поддержания оптимального температурного режима в аппарате и синхронного автоматического управления контурами подачи мощности на нить осаждения и воздушного охлаждения аппарата.

Для рафинирования гафния применяются, среди прочих, технологии электролитического рафинирования и зонной плавки. В работе [16] сообщается о получении опытно-промышленной партии порошка металлического гафния ядерной чистоты электролизом фторидно-хлоридного расплава на основе K_2HfF_6 , который эффективно был использован вместо йодидного и электронно-лучевого рафинирования. В работе показаны преимущества фторидно-хлоридного электролита перед чисто хлоридным. В частности, выход по току при электролизе расплава $NaCl-KCl-K_2HfF_6$ на 15% выше, чем при электролизе расплава $NaCl-KCl-HfCl_4$. Наибольший выход по току при использовании фторидно-хлоридного электролита достигается при плотности тока $i_k = 3 \text{ A/cm}^2$. Применение метода зонной перекристаллизации в электрическом поле позволило получить образцы гафния чистотой более 99,85 мас.% [17].

В современной технологии электролиз (и электролитическое рафинирование) теллура осуществляется в щелочных растворах при низкой (порядка 50 A/m^2) плотности тока. Электролиз расплавленных солей позволяет повысить плотность тока в 10–20 раз. Подбором состава солевого расплава, как показано в работе [18], можно снизить упругость паров $TeCl_4$ в 10^7 – 10^8 раз.

Получение эрбия высокой чистоты в работе [19] осуществляли методом вакуумной дистилляции. В качестве оптимального режима указаны следующие параметры: температура $1570 \text{ }^\circ\text{C}$, 10%-й избыток восстанавливающего (для ErF_3) агента, время выдержки 10 мин. Выход металла при этом составил более 95%. При многократной дистилляции под высоким вакуумом чистота эрбия достигла более 99,99%.

РАФИНИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ

Принято различать следующие градации чистоты кремния: технический (или металлургический, MG-Si, чистота 97...99%), очищенный металлургический (UMG-Si, чистота по содержанию примесей – единицы ppm), сорт «солнечный» (SoG-Si, чистота не менее 6N) [20–26]. Новые публикации по рафинированию кремния посвящены в основном технологиям очистки технического (металлургического) кремния, получаемого карботермическим восстановлением природных кварцитов в руднотермических печах.

Химические взаимодействия между компонентами шихты в карботермическом процессе происходят в системе Si–O–C и зависят от температуры в разных зонах печи, а также от присутствия и поведения металлических и неметаллических примесей, поступающих в процесс с сырьевыми материалами. Установлено [27], что часть примесей уходит из печи со шлаками и газами, а часть – попадает в целевой продукт плавки – металлический кремний.

При окислительном рафинировании металлургического кремния в ковше (после руднотермической плавки) методом плазменной спектроскопии определена концентрация 45 элементов–примесей, которые разделены на группы, с точки зрения кинетики рафинирования [28]. Установлено, что наибольшей скоростью окисления и перехода в шлак обладают примеси щелочных и щелочно-земельных металлов. Для 21 элемента определены кинетические параметры удаления их из расплава кремния.

Для очистки от примесей металлургического кремния может быть применена электронно-лучевая рафинировочная плавка. Промежуточная емкость специальной конструкции [29] позволила существенно повысить эффективность очистки расплава кремния. В итоге удельное электросопротивление металлического кремния удалось повысить в шесть раз: с 0,03 до 0,175 Ом·см. В установке электронно-лучевого переплава на второй стадии дуплекс-процесса были получены пластины монокристаллического кремния.

Окислительное хлорирование и дистилляционная очистка от бора (возгонка) расплавленного кремния металлургического сорта были использованы в работе [30] для получения кремния сорта «солнечный». Процесс рафинирования вели при температуре $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ под шлаком $CaO-SiO_2-CaCl_2$ (по сравнению со шлаком бинарного состава тройная система показала более высокую рафинирующую способность). Бор был удален в газовую фазу с эффективностью 86%, предположительно, в форме $BO_{1,5}-CaCl_2$.

Рафинирование металлургического кремния соляно-кислым выщелачиванием примесных элементов при интенсификации процесса ультразвуковым воздействием позволило получить порошок кремния чистотой 99,90% [31, 32]. Оптимальные параметры процесса очистки кремния от Fe, Cu, Pb, Zn, Mn, Co (продолжительность выщелачивания 120 мин, концентрация HCl 10...15%, интенсивность перемешивания пульпы 100 об./мин) обеспечивают снижение содержания примесей в исходном материале с эффективностью 88,3...89,5%.

В нескольких работах обсуждаются вопросы кристаллизационной очистки металлургического кремния. Чистота исходного кремния в работе [33] составляла 99,98%. В результате рафинирования методом вакуумной направленной кристаллизации содержание алюминия в кремнии было снижено с $1,54 \cdot 10^{-6}$ до $2,8 \cdot 10^{-8}\%$ (эффективность очистки 98,2%). Очистка от алюминия происходила в результате его испарения в вакууме.

Кристаллизационную очистку металлургического кремния в работе [34] проводили посредством его растворения в расплавах Sn–Si и Al–Si. При этом содержание примесей, кроме растворителей – свинца и алюминия, снизилось до менее 1 млн^{-1} . Эффективность удаления примесей была следующей: бора – 97,7%, фосфора – 99,8%, других примесей – более чем 99,9%. Механизм очистки кремния заключается в различной растворимости кремния и содержащихся в нем примесей в «третьем» компоненте, в данном случае олове и алюминии, вводимом в систему

«кремний–примесь» (так называемый метод избирательной растворимости).

Процесс очистки кремния металлургического сорта посредством его кристаллизации в составе заэвтектического сплава Al–Si при различных температурных градиентах изучен в работе [35]. Показано, что наиболее чистые зерна первичного кремния кристаллизуются в верхней части слитка. Нижнюю часть слитка состава Al-22% Si подвергали электролитическому рафинированию с получением чистых алюминия и кремния.

Выделение первичного кремния направленной кристаллизацией в условиях электромагнитного перемешивания заэвтектического Al–Si-расплава рассматривалось и в работе [36]. При этом изучали поведение пузырьков водорода и их роль в очистке кремния за счет образования впадин в нижней части слитка при вытягивании его вверх. Показано, что большинство примесей адсорбируется на поверхности пузырьков впадин. С уменьшением скорости вытягивания слитка размер впадин увеличивается и увеличивается чистота кремния (в проведенном эксперименте с 777,57 до 10,8 млн⁻¹ по содержанию примесей).

При рафинировании кремния сорта MG-Si в Al–Si-расплаве в работе [37] изучали распределение примесей между затвердевшим кремнием и Al–Si-расплавом. Показано, что в интервале температур 1023...1473 К эффективно отделяются примеси бора, титана, железа и марганца, причем с повышением температуры степень сегрегации снижается. В результате использования метода фракционного плавления кремния металлургического сорта с добавкой 2% алюминия примеси были удалены с эффективностью 99,8% (бора – 99%) [38].

При изучении возможности использования перекристаллизации для очистки технического кремния в работе [39] было получено выражение для расчета распределения примесей в случае выращивания слитка по методу Чохральского при наличии взаимодействия примеси на поверхности расплава с парами реагирующего вещества.

В то же время все перечисленные методы не обеспечивают получения кремния с уровнем концентрации примесей, удовлетворяющим требованиям изготовителей фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и изделий электроники. Если ранее бытовало мнение, что для получения качественных ФЭП наземного использования достаточно иметь кремний с чистотой 5N...6N (99,999...99,9999% Si), то теперь ужесточение экономических и экологических требований обязывает повысить уровень чистоты исходного поликристаллического кремния до 9N...11N [40]. При избытке кремния на рынке фотоэлектрики укрепятся позиции только тех компаний, которые владеют технологией производства высокочистого кремния.

При уровне чистоты 5N...6N затрудняется процесс получения слитков мультикристаллического кремния методом нормальной направленной кристаллизации вследствие возникновения центров спонтанной кристаллизации. Достаточно высокое содержание углерода ($\geq 5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$) и кислорода

($\geq 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в расплаве приводит к образованию шлака карбида кремния в виде объемных включений в слитке, росту внутренних упругих напряжений и возможному разрушению слитка [41].

Следует также учитывать, что руднотермическое восстановление SiO₂, даже если использовать следующие вакуумное рафинирование расплава, обработку активными силикатными шлаками (расплавами оксидов кальция, магния, алюминия), активными газами (парами воды, кислородом, оксидами углерода, хлором в смеси с аргоном, воздухом и др.), направленную кристаллизацию, не может обеспечить содержание примесей в кремнии менее 10⁻⁴...10⁻⁵%. Несмотря на успешную реализацию процессов металлургической очистки в лабораторных условиях, при промышленных способах получения, когда используются большие массы расплава, графитовые тигли, различные виды восстановителей, высокотемпературные выдержки расплава, происходит неконтролируемое загрязнение кристаллизуемого кремния фоновыми примесями. Решение стратегических задач развития кремниевых технологий требует получения материала существенно более чистого в существенно более производительных производственных процессах. А это означает, прежде всего, необходимость включения в технологический цикл получение силанов и хлорсиланов кремния, дальнейшую их ректификационную очистку (до уровня ~ 10⁻¹⁰%) и получение поликристаллического кремния полупроводниковой чистоты. Современные технологии и оборудование могут обеспечить рецикл и рациональное использование промежуточных продуктов реакций и устранить выбросы экологически вредных веществ [24].

ВЫВОДЫ

1. Рафинирование редких металлов может осуществляться различными методами. Для получения вольфрама, ванадия и ниобия высокой чистоты эффективной является электронно-лучевая плавка. Использование усовершенствованных процессов электролитического рафинирования в расплавленных солях, а также йодидного рафинирования и зонной плавки позволяет получить высокочистые цирконий и гафний. Для очистки от примесей теллура и эрбия используют электролитическое рафинирование в водных растворах и вакуумную дистилляцию.

2. Очистка кремния технической чистоты осуществляется методами окислительного рафинирования, вакуумной дистилляции, соляно-кислого выщелачивания, электронно-лучевой плавки и направленной кристаллизации. Для получения поликристаллического кремния полупроводниковой чистоты необходимо включение в технологический цикл получение силанов и хлорсиланов с дальнейшей их ректификационной очисткой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Г.А. Колобов. *Рафинирование редких металлов*. Запорожье: ЗГИА, 2015, 162 с.
2. Г.А. Колобов, К.А. Печерица, А.В. Карпенко и др. Рафинирование вольфрама и молибдена // *Ме-*

- металургия (научные работы ЗДИА). Запоріжжя: ЗДИА, 2015, №1 (33), с. 46-52.
3. Г.А. Колобов, В.С. Панов, Т.В. Критская и др. Получение редкоземельных металлов и их соединенный высокой степени чистоты // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2015, №2 (34), с. 27-32.
 4. Г.О. Колобов, Т.М. Нестеренко, В.В. Павлов. Технологія рафінування тугоплавких рідкісних металів V групи періодичної системи елементів // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2015, №2 (34), с. 33-38.
 5. Г.А. Колобов, В.В. Павлов, А.В. Карпенко, А.Г. Колобова. Рафинирование тугоплавких редких металлов IV группы периодической системы элементов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2015, №1, с. 89-95.
 6. Г.А. Колобов. Вторичные редкие металлы (тугоплавкие, редкоземельные, радиоактивные). Запоріжжя: ЗГИА, 2016, 244 с.
 7. Г.А. Колобов, А.В. Карпенко. Рафинирование легких редких, редкоземельных и радиоактивных металлов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2016, №1 (101), с. 3-10.
 8. G.A. Kolobov, T.V. Kritskaya, V.I. Ivanov, et al. Features of production of high purity rare earth metals for electronics // *Central Asian Material Science Journal*. 2016, №5, p. 31-38.
 9. Г.А. Колобов, А.В. Карпенко. Рафинирующие переплавы и другие методы получения титана повышенной чистоты // *Титан-2016: виробництво та використання в авіабудуванні*. Збірка тез IV Міжнарод. наук.-практ. конф., Запоріжжя, 2016, с. 23-24.
 10. L. Wensheng, L. Luping, M. Yunzhu, et al. Static kinetics of removal of impurities from tungsten melt during electron beam melting // *Rare Metal Mater. and Eng.* 2015, v. 44, N 1, p. 113-117.
 11. Ю.П. Бобров, В.Д. Вирич, А.Е. Дмитренко и др. Электронно-лучевая плавка ванадия // *Высокочистые материалы: получение, применения, свойства*: Материалы докладов 2-й Междунар. конф., посвященной памяти академика В.М. Ажажи. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2013, с. 16.
 12. Пат. 2490347 Рос. Федерация: МПК С 22 В 34/24 (2006.01), С 22 В 5/04 (2006.01). Способ получения чистого ниобия / ЧМЗ, А.Л. Беляев, М.М. Веселков, Е.В. Ильенко и др. № 2012122833/02; заявл. 01.06.2012; опубл. 20.08.2013.
 13. P. Kyoung Tae, L. Tae Hyuk, J. Nam Chan, et al. Purification of nuclear grade Zr scrap as the high purity dense Zr deposits from Zirconium scrap by electrorefining in LiF-KF-ZrF₄ molten fluorides // *J. Nucl. Mater.* 2013, v. 436, N 1-3, p. 130-138.
 14. С.А. Лавриков, М.Л. Коцарь, А.О. Лapidус и др. Автоматизация процесса получения высокочистого циркония из отходов и оборотов производства в промышленных печах СКБ-5025 и аппаратах Ц-40М // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2014, №2, с. 89-96.
 15. Пат. 2532208 Рос. Федерация: МПК С 22 В 34/14 (2006.01). Способ йодидного рафинирования циркония и устройство для его осуществления / ВНИИХТ, ЧМЗ, М.Л. Коцарь, С.А. Лавриков, А.О. Лapidус и др. №2012140922/02; заявл. 25.09.2012; опубл. 27.10.2014.
 16. В.Н. Безумов, А.И. Дунаев, А.А. Кабанов и др. Разработка процесса получения металлического гафния электролизом фторидно-хлоридных расплавов // *Титан*. 2014, №4, с. 4-11.
 17. О.Е. Кожевников, П.Н. Вьюгов, Н.Н. Пилипенко. Рафинирование гафния методом зонной плавки в электрическом поле // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2015, №2, с. 89-94.
 18. В.А. Лебедев, А.Ю. Николаев, А.В. Лукинских, А.В. Бабин. Предпосылки электролиза и рафинирования теллура в солевых расплавах // *Инновации в материаловедении и металлургии*: Материалы 4-й Междунар. интерактив. науч.-практ. конф., Екатеринбург. 2015, с. 159-161.
 19. C. Wei, H. Meisong, S. Zhengfu, et al. Preparation of high purity erbium // *Rare Metal Mater. and Eng.* 2015, v. 44, N 6, p. 1509-1512.
 20. С.Л. Нагорный, Т.В. Критская, Л.Я. Шварцман. Основные требования к технологическим схемам получения кремния солнечного качества // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2009, №19, с. 72-81.
 21. Г.А. Колобов, Т.В. Критская. Рафинирование кремния (сообщение 1) // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2009, №20, с. 77-83.
 22. Т.В. Критская, Г.А. Колобов. Рафинирование кремния (сообщение 2) // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2010, №21, с. 99-104.
 23. Т.В. Критская, Г.А. Колобов. Рафинирование кремния (сообщение 3) // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2011, №23, с. 119-127.
 24. Т.В. Критская. *Современные тенденции получения кремния для устройств электроники*. Запоріжжя: ЗГИА, 2013, 256 с.
 25. Г.А. Колобов, Т.В. Критская, Ю.В. Мосейко и др. Рафинирование металлургического кремния до чистоты сорта «солнечный» // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2014, №2 (32), с. 118-126.
 26. Н.В. Немчинова, Т.В. Критская, Г.А. Колобов. Изучение примесного состава кремния металлургических марок // *Металургия (научные работы ЗДИА)*. Запоріжжя: ЗДИА, 2015, №1 (33), с. 71-75.
 27. Н.В. Немчинова, А.А. Яковлева, М.С. Леонова. Распределение примесей при руднотермической выплавке кремния // *Вестник ИрГТУ*. 2013, №12, с. 230-236.
 28. I. Kero, M.K. Ncess, V. Andersen, G.M. Trannell. Refining Kinetics of Selected Elements in the Industrial Silicon Process // *Met. and Mater. Trans. B*. 2015, v. 46, N 3, p. 1186-1194.
 29. Создание технологии рафинирования металлургического кремния способом ЭЛП // *Современная электрометаллургия*. 2014, №1, с. 70-71.
 30. W. Ye, M. Xiaodong, M. Kazuki. Evaporation Removal of Boron from Metallurgical-Grade Silicon

- Using CaO-CaCl₂-SiO₂ Slag // *Met. and Mater. Trans. B.* 2014, v. 45, N 2, p. 334-337.
31. А.А. Тютрин. *Разработка кислотно-ультразвукового рафинирования кремния при карботермической технологии*: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иркутск: Иркутский гос. техн. ун-т, 2013, 17 с.
32. А.А. Тютрин. Кислотно-ультразвуковое рафинирование кремния при карботермической технологии // *Металлург.* 2015, №3, с. 76-80.
33. Z. Damin, W. Kuixian, M. Wenhui, D. Yongnian. Removal of aluminum impurities from silicon by vacuum directional solidification // *Spec. Cast. and Nonferrous Alloys.* 2015, v. 35, N 4, p. 345-347.
34. H. Lei, W. Zhi, G. Xuzhong, et al. Impurities Removal from Metallurgical-Grade Silicon by Combined Sn-Si and Al-Si Refining Processes // *Met. and Mater. Trans. B.* 2013, v. 44, N 4, p. 828-836.
35. W. Panpan, L. Huimin, L. Yuanshi. Control of silicon solidification and the impurities from an Al-Si melt // *J. Cryst. Growth.* 2014, v. 390, p. 96-100.
36. Y. Wenzhou, M. Wenhui, L. Guoqiang, et al. Low-Cost Process for Silicon Purification with Bubble Adsorption in Al-Si Melt // *Met. and Mater. Trans. B.* 2014, v. 45, N 4, p. 1573-1578.
37. L. Jingwei, G. Zhancheng. Thermodynamic evaluation of segregation behaviors of metallic impurities in metallurgical grade silicon during Al-Si solvent refining process // *J. Cryst. Growth.* 2014, v. 394, p. 18-23.
38. L. Changbum, C. Juho, L. Jaewoo, Y. Wooyoung. Refining behavior of aluminum alloyed metallurgical-grade silicon during fractional melting process // *J. Nanosci. and Nanotechnol.* 2013, v. 13, N 10, p. 7161-7164.
39. И.Г. Атабаев, С.Л. Лутпуллаев, М.У. Хажиев, А.Н. Абдуллаев. О возможности использования перекристаллизации для очистки технического кремния // *Доклады АН Республики Узбекистан.* 2014, №3, с. 24-27.
40. PVMC U.S. Photovoltaic Manufacturing Consortium [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.uspvmc.org>.
41. Н.М. Потолоков, И.С. Решетников, А.В. Куртовой и др. Промышленное производство мультикристаллического кремния в России: состояние, проблемы, перспективы // *Актуальные проблемы физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе*: Тезисы докладов VII Международной конференции «Кремний-2010». Нижний Новгород, 2010, с. 42.

Статья поступила в редакцию 05.01.2017 г.

РАФІНУВАННЯ РІДКІСНИХ МЕТАЛІВ І КРЕМНІЮ

Г.О. Колобов, Т.В. Критська, А.М. Достасва, Н.В. Лічконенко, В.О. Панова

Огляд нових публікацій, що стосуються питань отримання чистих і високочистих рідкісних металів та кремнію з використанням наступних рафінувальних технологій: електронно-променевої та зонної плавок; вакуумної дистиляції; електролітичного, йодидного, окислювального, шлакового рафінування; вилуговування; фракційного плавлення; кристалізаційного очищення.

REFINING OF RARE METALS AND SILICON

G.A. Kolobov, T.V. Kritskaya, A.M. Dostaeva, N.V. Lichkonenko, V.O. Panova

Review of new publications relating to the issues of production of pure and high-purity rare metals and silicon using the following refining technologies: electron-beam and zone melting, vacuum distillation, electrolytic, iodide, oxidative, slag refining, lixiviating, fractional melting, crystallizing purification.