

Научная статья

УДК 620.3

DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-83-94

Повышение эффективности получения наночастиц латуни методом испарения непрерывным пучком электронов высокой энергии

**Эржена Чимитдоржиевна Хартаева¹, Андрей Валерьевич Номоев¹,
Сергей Прокопьевич Бардаханов^{1,2}, Константин Владимирович Зобов^{1,2},
Дмитрий Юрьевич Труфанов², Василий Рудольфович Гапоненко²,
Дамдин Галсанович Цыдыпов¹**

¹Институт физического материаловедения СО РАН
Улан-Удэ, Россия

²Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН
Новосибирск, Россия

erzhena.har@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1109-4260>
nomoevav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6201-6743>
bardnsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0608-3244>
zobov.kv@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2747-4404>
finnwal@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3809-2838>
vasko-nsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7996-8141>
damdinkatsydydpov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5571-5075>

Аннотация

Композитные, медь- и цинксодержащие наночастицы, а также наночастицы латуни получены высокопроизводительным методом испарения веществ релятивистским пучком электронов. Рассмотрены изменения структуры, формы и состава нанопорошков, созданных при последовательных облучениях слитка латуни, помещенного в однозонный графитовый тигель. Выявлено, что получение таких частиц зависит от концентрации насыщенных паров цинка и меди. Разработана двухзонная конфигурация тигля, позволяющая реализовать одномоментное испарение составных компонентов, тем самым обеспечивая условие для формирования однородных наночастиц латуни с равномерным распределением элементов и высокого выхода нанопорошка. Проведены рентгенофазовый анализ, трансмиссионная электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, определена удельная поверхность полученных наночастиц. Обсуждается механизм образования композитных наночастиц.

Ключевые слова

наночастицы оксида меди/цинка, электронный пучок, латунь, ускоритель электронов, просвечивающая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ

Благодарности

Работа выполнена по проекту государственного задания № 0270-2021-0002 «Физические характеристики, особенности строения, фазовые диаграммы и функциональные свойства композитных структур и материалов».

Для цитирования

Хартаева Э. Ч., Номоев А. В., Бардаханов С. П., Зобов К. В., Труфанов Д. Ю., Гапоненко В. Р., Цыдыпов Д. Г. Повышение эффективности получения наночастиц латуни методом испарения непрерывным пучком электронов высокой энергии // Сибирский физический журнал. 2023. Т. 18, № 3. С. 83–94. DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-83-94

© Хартаева Э. Ч., Номоев А. В., Бардаханов С. П., Зобов К. В., Труфанов Д. Ю., Гапоненко В. Р., Цыдыпов Д. Г., 2023

Experiments to Improve the Efficiency of Obtaining Brass Nanoparticles by Evaporation by a Continuous Beam of High-Energy Electrons

Erzhena Ch. Khartaeva¹, Andrey V. Nomoev¹,
Sergey P. Bardakhanov^{1,2}, Konstantin V. Zobov^{1,2},
Dmitriy Yu. Trufanov², Vasiliy R. Gaponenko²,
Damdin G. Tsydypov¹

¹Institute of Physical Materials Science SB RAS
Ulan-Ude, Russian Federation

²Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation

erzhena.har@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1109-4260>

nomoevav@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-6201-6743>

bardnsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0608-3244>

zobov.kv@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0001-2747-4404>

finnwal@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3809-2838>

vasko-nsk@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0004-7996-8141>

damdinkatsydydpov@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-5571-5075>

Annotation

Composite, copper and zinc containing nanoparticles and brass nanoparticles have been obtained by a high-performance method of evaporation of substances by a relativistic electron beam. The change in the stoichiometry of nanopowders produced by stepwise irradiation of a brass ingot placed in a single-zone graphite crucible is considered. It was found that the production of such particles depends on the concentration of saturated vapors of zinc and copper. A two-zone configuration of the crucible has been developed, which makes it possible to realize the simultaneous evaporation of the constituent components, thereby providing the conditions for the formation of uniform brass nanoparticles with a uniform distribution of elements and a high yield of nanopowder. X-ray diffraction analysis (XRD), Transmission electron microscopy (TEM), Energy dispersive X-ray analysis (EDX) were carried out, and the specific surface of the obtained nanoparticles was determined. The mechanism of formation of composite nanoparticles is discussed.

Keywords

copper / zinc oxide nanoparticles, electron beam, brass, electron accelerator, transmission electron microscopy, energy dispersive analysis

Funding

This work was carried out according to the draft state task No. 0270-2021-0002 “Physical characteristics, structural features, phase diagrams and functional properties of composite structures and materials”.

For citation

Khartaeva E. Ch., Nomoev A. V., Bardakhanov S. P., Zobov K. V., Trufanov D. Yu., Gaponenko V. R., Tsydypov D. G. Experiments to improve the efficiency of obtaining brass nanoparticles by evaporation by a continuous beam of high-energy electrons. *Siberian Journal of Physics*, 2023, vol. 18, no. 3, pp. 83–94 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2023-18-3-83-94

Введение

Возрастающий интерес к наночастицам цинка и меди связан с ростом числа областей их применения, среди которых можно перечислить газовые сенсоры, катализаторы, оптические излучатели, пьезоэлектрические преобразователи, люминесцентные материалы, полупроводниковые устройства и т. п. [1]. Структуры на основе наноразмерных частиц оксида цинка являются перспективным материалом для нанoeлектроники. Известно, что частицы латуни обладают повышенными антибактериальными свойствами [2]. Поэтому актуальность исследования обусловлена необходимостью получения композитных нанопорошков меди/цинка для электронных и биомедицинских приложений.

Форма и размер наночастиц, их фазовый и химический состав определяют свойства конечного материала, а именно возможность его дальнейшего применения. Поэтому управление

этим параметрами путем подбора условий синтеза наноразмерных частиц является важнейшей задачей исследований.

На сегодняшний день известно несколько способов получения наночастиц латуни. Одним из них является электрический взрыв проводников, связанный с разрушением металлического проводника при прохождении по нему импульса тока большой плотности (более 10^{10} А/м²) [1]. Другой метод описан в [3], где наночастицы латуни создавались под действием лазерного излучения в этаноле. Это малопроизводительные методы (не более 102 мкг/мин), кроме того, фазовый состав частиц и зависимость размера и структуры от мощности облучения в работе [3] не установлены.

Наиболее перспективные методы сочетают в себе экологическую безопасность и высокий выход продукта с наноразмерными частицами. Такой метод представляет собой газофазный синтез с мощным источником электронного излучения [4; 5].

В настоящей работе основной целью эксперимента является выявление возможности получения композитных, медь- и цинксодержащих наночастиц и повышение эффективности получения наночастиц латуни испарением веществ непрерывным пучком электронов высокой энергии.

Материалы и методики

В качестве источника нагрева материала для получения композитных наночастиц использована установка электронно-лучевого испарения открытого типа на основе релятивистского ускорителя электронов типа ЭЛВ-6 с энергией 1,4 МэВ и током в диапазоне 5–25 мА [5; 6]. На рис. 1 представлена схема эксперимента [4–6]. Проходящий через камеру устройства выпуска в атмосферу 1 и диафрагму 2 электронный пучок 3 ускорителя мощностью $1,4 \text{ МэВ} \cdot 10 \text{ мА} = 14 \text{ кВт}$ облучает металл 6, находящийся в центральной зоне графитового тигля 8 в течение 3 минут. Несущий инертный газ – аргон 4 подается в установку со скоростью 20 л/мин и уносит пары металлов по газовому тракту 5, проходя через отделитель крупных фракций 9. Пары осаждаются в виде наночастиц в бокс-фильтре 10. Аргон удаляется через вытяжку 11. Тигли, в которых облучали металлы, изготавливались из графита высокой чистоты. Использовались два типа тиглей из графита, устойчивого к высокотемпературным воздействиям, с инертностью ко многим химическим элементам и соединениям, способностью выдерживать перепады температур, несмачиваемостью металлами, повышенной механической прочностью при нагреве до 2400 °С.

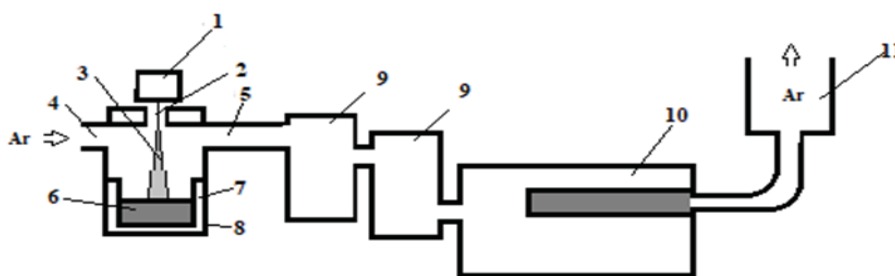


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – камера устройства выпуска электронного пучка в атмосферу; 2 – диафрагма; 3 – электронный пучок; 4 – вход транспортного газа аргона; 5 – выход аргона с наночастицами; 6 – медь; 7 – латунь; 8 – графитовый двухзонный тигель; 9 – отделитель крупных фракций; 10 – бокс-фильтр; 11 – вытяжка

Fig. 1. Scheme: 1 – chamber of the device for emitting an electron beam into the atmosphere; 2 – diaphragm; 3 – electron beam; 4 – argon transport gas inlet; 5 – argon outlet with nanoparticles; 6 – copper; 7 – brass; 8 – two-zone graphite crucible; 9 – sublimator body with water-cooled walls; 10 – box filter; 11 – hood

Первый, однозонный тигель изготовлен в виде цилиндра с дном, с одной внутренней полостью. Электронный пучок, проходя через диафрагму 2, облучает латунь промышленной марки Л63, которая плавится и испаряется (рис. 2, а). Пары сплава уносятся аргоном из испарительной камеры через сублиматор 9 и оседают на фильтре. Второй, двухзонный тигель имеет две концентрические полости (рис. 2, б). Твердые образцы промышленной меди марки М0 и латуни марки Л63 помещаются в тигли 8, изготовленные из графита высокой степени чистоты и плотности. В центральной зоне двухзонного тигля помещается медь, в периферийной зоне – латунь. Тигель помещался в водоохлаждаемый сублиматор, изготовленный из нержавеющей стали. Пространство между стенками сублиматора и графитового тигля заполнялось измельченным графитом для равномерного теплообмена. Толщина внешней стенки тиглей составляла 2 см. Аргон удаляется через вытяжку 11. Интенсивный нагрев электронным пучком центральной зоны тигля и разработанная двухзонная конструкция тигля с предложенным размещением материалов позволяют обеспечить одновременное испарение меди из центральной зоны и цинка из периферии. Электронный пучок, попадая в центральную зону, облучает медь, которая плавится и испаряется, отдавая часть тепла через стенку графитового тигля латунному слитку, расположенному в периферийной зоне.

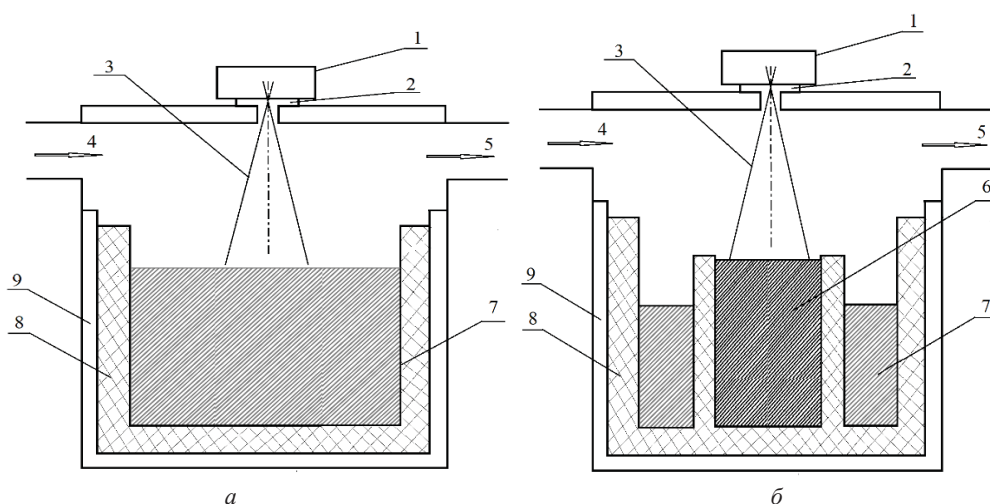


Рис. 2. Схематическое изображение установки с графитовыми тиглями: а – однозонный тигель: 1 – выпуск электронного пучка; 2 – диафрагма; 3 – электронный пучок; 4 – вход транспортного газа аргона; 5 – выход аргона с наночастицами; 7 – латунь; 8 – тигель; б – двухзонный тигель: 1 – выпуск электронного пучка; 2 – диафрагма; 3 – электронный пучок; 4 – вход транспортного газа аргона; 5 – выход аргона с наночастицами; 6 – медь; 7 – латунь; 8 – тигель; 9 – корпус сублиматора с водоохлаждаемыми стенками

Fig. 2. Schematic representation of the installation with graphite crucibles: а – single-zone crucible: 1 – electron beam outlet; 2 – diaphragm; 3 – electron beam; 4 – argon transport gas inlet; 5 – argon outlet with nanoparticles; 7 – brass; 8 – crucible; б – two-zone crucible: 1 – electron beam outlet; 2 – diaphragm; 3 – electron beam; 4 – argon transport gas inlet; 5 – argon outlet with nanoparticles; 6 – copper; 7 – brass; 8 – crucible; 9 – sublimator housing with water-cooled walls

На периферии двухзонного тигля латунь достигает температуры плавления сплава, достаточной для интенсивного испарения цинка из расплавленной латуни. У разных металлов критическая температура различается, поэтому плавление кристаллической решетки у латуни осуществляется неравномерно и плавящийся металл будет представлять собой амальгаму жидких и твердых элементов. У латуни, согласно фазовой диаграмме, при 63 % меди точка солидуса составляет +900 °С (начинает плавиться цинк), ликвидус находится на уровне +910 °С, а температура кипения цинка составляет 907 °С. Поэтому как только слиток латуни расплавляется,

из него начинает активно испаряться цинк. В испарительной камере создается необходимое соотношение атомов меди и цинка для образования наночастиц латуни.

Проведена серия запусков установки, в которой один образец латунной мишени неоднократно расплавлялся и испарялся в однозонном тигле, при этом происходило постепенное испарение цинка из мишени. Всего было проведено восемь пусков ускорителя электронов для облучения латунной мишени в однозонном тигле и один запуск с двухзонным тиглем. На первом запуске из серии с однозонным тиглем образовался порошок серо-голубого цвета, соответствующий оксиду цинка. На дне бокс-фильтра собрался несипучий материал и сохранял форму в виде ватного комка. Фотографии полученных нанопорошков после поэтапного облучения латунной мишени в однозонном тигле с номерами запусков ускорителя (1–8) и с применением двухзонного тигля представлены на рис. 3. На каждом следующем запуске наблюдалось изменение цвета порошка на тон теплее, визуальное свидетельство об увеличении концентрации меди в порошке. Последние образцы в этой линии – достаточно сыпучие и имеют бордовый цвет (рис. 3, а, номера пусков 5–8), соответствующий полученным частицам меди в [6]. С двухзонного тигля получен порошок (рис. 3, б) аналогичный по цвету номерам пуска 7–8 с однозонного тигля. Выход наночастиц латуни – не менее 280 г/ч.

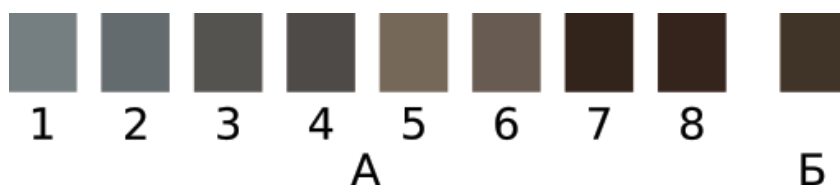


Рис. 3. Цвет порошков: А – полученных в однозонном тигле с порядковым номером пуска;

Б – полученного в двухзонном тигле

Fig. 3. The color of the powders: А – obtained in a single-zone crucible with a start serial number;

В – obtained in a two-zone crucible

Образцы нанопорошков исследовались методом рентгенофазового анализа (РФА), для проведения РФА использовался рентгеновский дифрактометр HZG-4 (Фрайберг, Германия) с недублетным $\text{CuK}\beta$ -излучением, морфология полученных частиц изучалась с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Элементный анализ получен методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС). Удельную поверхность порошков поверхности определяли методом БЭТ.

Результаты и обсуждение

В экспериментах в первых пусках ускорителя в схеме с однозонным тиглем образуются наночастицы различной формы: пластинчатой, игольчатой, шарообразной и ограненной, как показала ПЭМ (рис. 4).

При этом пластинчатые и стержневые по форме частицы характерны цинковым наноструктурам (рис. 4, а–в), медные наночастицы принимают шарообразную форму (рис. 4, г, д). Как правило, шарообразные наночастицы не обладают монокристаллической структурой. Предполагается, что пластинчатая наночастица цинка обладает монокристаллической структурой. На рис. 5 даны ПЭМ пластинчатой наночастицы цинка и ЭДС порошка с первого запуска ускорителя в схеме с однозонным тиглем, показывающим высокое содержание цинка в наночастице.

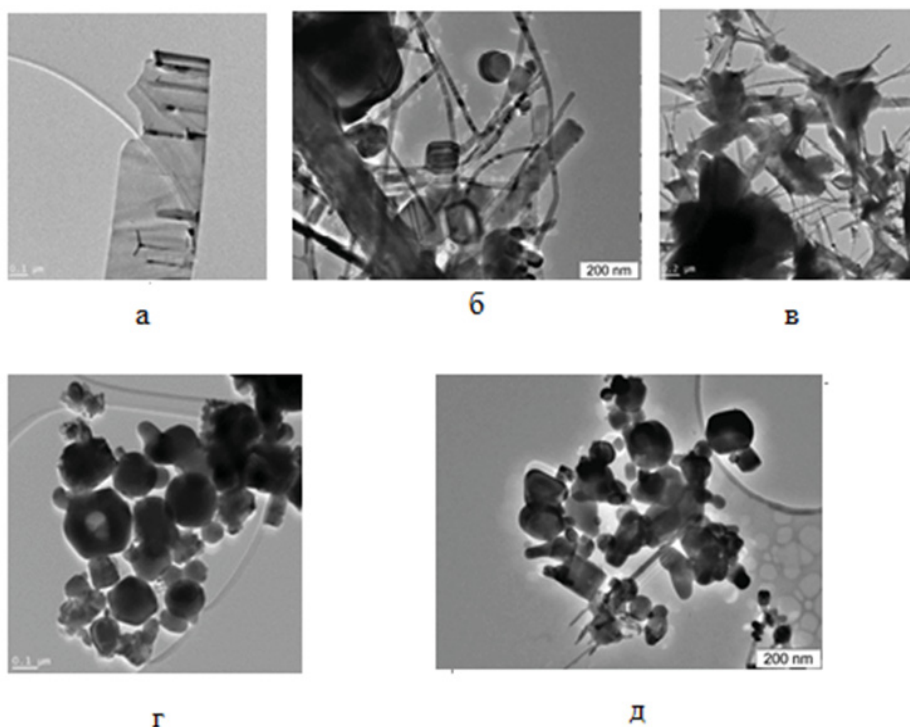


Рис. 4. ПЭМ полученных нанопорошков, созданных в однозонном тигле: а – пуск 1; б – 2; в – 3; г – 6; д – пуск 8

Fig. 4. TEM of obtained nanopowders created in a single-zone crucible: а – run 1; б – second run 2; в – run 3; г – run 6; д – run 8

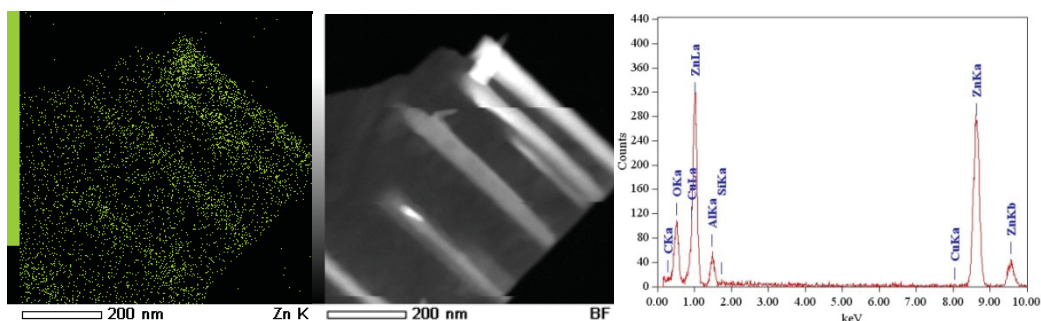


Рис. 5. ПЭМ и ЭДС порошка с первого запуска ускорителя с однозонным тиглем

Fig. 5. TEM and EDX dispersive analysis of powder from first run of the accelerator with a single-zone crucible

Обычно для поддержания и манипулирования образцами в ПЭМ используются медные сетки. Если в исследуемых образцах также присутствует медь, фон медного сигнала может привести к неоднозначным результатам. Данная проблема может быть устранена с помощью использования сетки, изготовленной из другого элемента (например, молибдена, алюминия или никеля) [7; 8]. Для исследования полученных образцов использовали сетки-подложки из алюминия, которые дают фоновые алюминиевые пики, наблюдаемые на результатах ЭДС.

Кристаллы растут с новыми слоями на своей поверхности; рост в виде сферы в этом случае энергетически невыгоден. Наиболее типична для оксида цинка структура вюрцита, которую можно представить в виде гексагональной плотной упаковки анионов, где катионы равно-

мерно занимают половину всех тетраэдрических пустот [5; 9]. Для наночастиц оксида цинка энергетически более выгодно выращивать кристалл вдоль предпочтительного направления роста, чем образовывать сферические наночастицы, которые часто создаются в экспериментах за счет увеличения доли поверхностной энергии при уменьшении размера. Другими словами, полная энергия наночастицы при росте кристалла вдоль выбранного направления роста меньше, чем при формировании сферической наночастицы [10; 11].

В запуске 7 на изображениях ПЭМ наблюдаются ограненные и сферические наночастицы меди, игольчатые частицы ZnO отсутствуют. Однако РФА показывает наличие в составе образовавшихся частиц Cu, CuO и небольшое (5,77 ат. %) количество ZnO (см. таблицу).

Из количественного ЭДС следует, что в каждом последующем пуске содержание меди увеличивается, а содержание цинка уменьшается. Композитные наночастицы Cu/Zn обнаружены методом ЭДС на снимках картирования на последних пусках после завершения интенсивного испарения цинка из расплава латуни. Предполагаем, что композитные наночастицы Cu/Zn создаются в результате конденсации частиц меди на отдельных частицах цинка, которые вследствие низкой концентрации паров цинка не образовали тонких волокон или игольчатой структуры. Наиболее вероятно, что в испарительной камере находится недостаточное количество цинка для роста монокристалла в виде стержня. ЭДС этих частиц показал, что цинк концентрируется в центре, а медь – по периферии частиц. Кислород равномерно распределен по всей поверхности частицы, т. е. оксид меди находится на поверхности частицы. Поэтому ядро частиц состоит из атомов оксида цинка, а оболочка – из оксида меди. Окисление наночастиц происходит после их извлечения из бокс-фильтра. После испарения цинка из латунной мишени под электронным облучением образуются в основном наночастицы меди в однозонном тигле в 8-м запуске, как показывает ПЭМ. По данным ЭДС, содержание меди такого порошка – около 98 ат. %, цинка – около 2 ат. %.

На рис. 6 представлен график изменения концентрации цинка в мишени при поэтапном облучении латуни в однозонном тигле. По оси абсцисс введенная в слиток суммарная энергия с учетом предыдущих пусков. Суммируется интеграл мощности пучка с вычетом теплотерь через охлаждение.

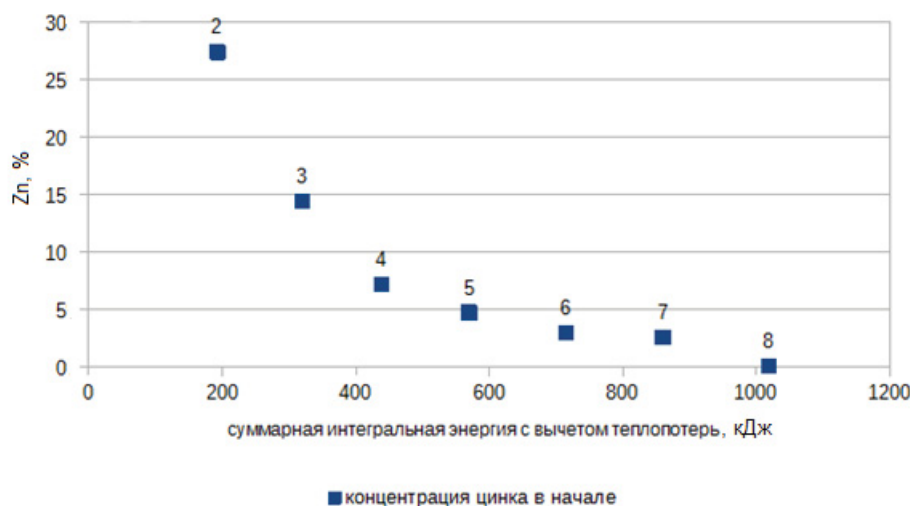


Рис. 6. График изменения концентрации цинка в мишени при поэтапном облучении латуни в однозонном тигле

Fig. 6. Graph of the change in the composition of the target during the gradual irradiation of brass in a single-zone crucible

Средняя производительность нанопорошка с использованием однозонного тигля составила 10,3 гр/мин. Объединенные данные качественного РФА созданных нанопорошков по однозонной и двухзонной схемам тиглей представлены в таблице. Показан состав и содержание веществ в нанопорошках, содержащих оксиды цинка, меди и гамма-латуни Cu_5Zn_8 , полученных по схемам однозонного и двухзонного тиглей.

Состав и содержание веществ в нанопорошках, полученных по схемам однозонного и двухзонного тиглей в разных пусках ускорителя, определенные по дифракционной картине смеси фаз РФА

The composition and content of substances in nanopowders obtained according to the schemes of single-zone and two-zone crucibles in different starts of the accelerator, determined from the diffraction pattern of the mixture of XRD phases

Характеристика нанопорошка	Вид тигля			
	Однозонный			Двухзонный
	1-й запуск	6-й запуск	8-й запуск	
Состав нанопорошка	ZnO Cu	ZnO Cu CuO	Cu_2O Cu CuO	ZnO Cu Cu_5Zn_8

В запуске 1 с однозонным тиглем РФА показало содержание ZnO в полученном порошке не менее 95 %, что свидетельствует об интенсивном испарении цинка из расплава, а наличие в порошке Cu менее 5 % показывает незначительное испарение меди с поверхности расплава. В запуске 6 наблюдается пропорциональное количество ZnO и Cu. Содержание CuO не более 5 %, возможно, образовано частичным окислением Cu при разгерметизации установки в момент изъятия порошка. В запуске 8 получили порошок, состоящий на 95 % из Cu_2O и Cu и, как в запуске 6, присутствует не более 5 % CuO [12].

Эксперимент с двухзонным тиглем показал, что под облучением меди в центральной части тигля и находящейся на периферии латуни образуются нанопорошки, содержащие, по данным РФА, наночастицы латуни Cu_5Zn_8 (γ -фаза) – не более 25 мол. %, меди – не менее 50 мол. % и оксида цинка – не более 25 мол. %. ПЭМ и ЭДС приведены на рис. 7.

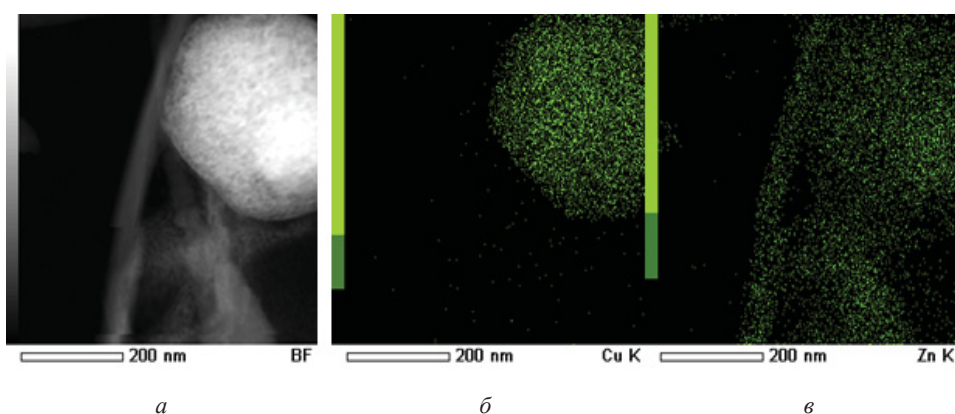


Рис. 7. ПЭМ-изображение (а) и ЭДС композитного нанопорошка (б, в), содержащего латунные наночастицы Cu_5Zn_8 , полученного при облучении меди и латуни в двухзонном тигле
Fig. 7. TEM image (a) and EDX of a composite nanopowder (b, v) containing brass Cu_5Zn_8 nanoparticles obtained by irradiating copper and brass in a two-zone crucible

Производительность нанопорошка с использованием двухзонного тигля составила 19,4 гр/мин. Средний размерный параметр наночастиц этого порошка рассчитан из измерений удельной поверхности. В приближении одинакового размера и сферической формы всех частиц известна связь между удельной поверхностью $S_{уд}$ и средним размером частиц d , где ρ – плотность латуни, равная $8,5 \cdot 10^3$ кг/м³, $S_{уд} = 5,6$ м²/г, $d = 126$ нм. Это позволяет отнести полученные порошки к наноразмерным. В соответствии с диаграммой состояния системы медь-цинк (Cu-Zn) γ -фаза латуни – электронное соединение Cu_5Zn_8 [13–15].

Судя по форме и характеристикам оксидных частиц, полученных в более ранних работах нашей научной группы (диоксид кремния, оксид алюминия), формирование частиц происходит очень быстро. При этом, по сути, минует жидкая фаза, т. е. переход идет газ – твердое тело. Но для металлов это уже не так очевидно. По нашему предположению, ограненные и сферические частицы формируются описанными далее механизмами. Во-первых, из-за размеров частиц и активного кипения можно предположить выход частиц по механизму абляции, т. е. отрыву участков кипящей поверхности. Во-вторых, мы видим изменение стехиометрии частиц, сопутствующее изменению стехиометрии слитка, что говорит об изначальном формировании жидких частиц расплава. В-третьих, теплопроводность меди, являющейся базовым веществом в данной ситуации, крайне высока и препятствует получению градиента температур даже в расплаве, что свидетельствует о равномерном нагреве образующихся наночастиц. В-четвертых, темпы охлаждения в данной конфигурации ниже из-за ограничений на использование инертного газа (массовый расход газа носителя мал по сравнению с расходом атмосферного воздуха при получении частиц оксидов). Наличием жидкой фазы при формировании частиц также объясняется их форма – при остывании жидкой фазы успевает устанавливаться ближний и дальний порядок кристаллической решетки и частицы подстраивают свою форму под параметры этой решетки (кубические частицы). Однако при испарении в двухзонном тигле мы также получаем частицы латуни, что говорит о том, что частицы меди, испаренные из центральной зоны, впитывают пары или частицы цинка, испаряемые с периферийной зоны. Таким образом, можно сказать, что данная конфигурация изменяет характер формирования частиц и, возможно, варьированием конфигурации зон можно получить информацию о фазовых переходах в процессе формирования наночастицы.

Заключение

При получении наночастиц использовались сходные по интегральной внесенной мощности (порядка 7 МДж энергии) производственные запуски. В первом способе, т. е. в серии запусков с однозонным тиглем, последовательно использовался один и тот же испаряемый слиток, в котором постепенно менялась стехиометрия от латуни до почти чистой меди. Во втором способе энергия вносилась в двухзонный тигель. В результате удалось сравнить производительность и качество получаемого наноматериала для двух способов получения наночастиц латуни. Производительность первого способа в среднем 10,3 гр/мин, при этом получают частицы латуни с неравномерным распределением меди и цинка. Производительность второго – 19,4 гр/мин, при этом стехиометрия частиц более однородная. Кроме этого, для реализации первого метода исходно проводилось обеднение слитка цинком, на что была затрачена энергия, и тем самым производительность способа реально ниже. Реализация второго способа привела к разрушению тигля при остывании, что также говорит о необходимости его модификации.

Работа выполнена в ИЯФ СО РАН с использованием установки УНУ Стенд ЭЛВ-6.

Список литературы

1. **Lozhkomoev A. S., Bakina O. V., Pervikov A. V., Kazantsev S. O., Glazkova E. A.** Synthesis of CuO–ZnO composite nanoparticles by electrical explosion of wires and their antibacterial activities // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30, iss. 14. P. 13209–13216.
2. **Sabbouh M., Nikitina A., Rogacheva E., Kraeva L., Ulasevich S., Skorb E., Nosonovsky M.** Separation of motions and vibrational separation of fractions for biocide brass // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 80, iss. 2073. P. 105817-1-105817-8.
3. **Казакевич П. В., Воронов В. В., Симакин А. В., Шафеев Г. А.** Образование наночастиц меди и латуни при лазерной абляции в жидкости // *Квантовая электроника*. 2004. Т. 34, № 10. С. 951–956.
4. **Бардаханов С. П., Корчагин А. И., Куксанов Н. К., Лаврухин А. В., Салимов Р. А., Фадеев С. Н., Черепков В. В.** Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении // *Доклады Академии наук*. 2006. Т. 409, №3. С. 320–323.
5. **Yumozhapova N. V., Nomoev A. V., Syzrantsev V. V., Khartaeva E. Ch.** Formation of metal/semiconductor Cu-Si composite nanostructures // *Beilstein Journal of Nanotechnology*. 2019. Vol. 10, iss. 1. P. 2497–2504.
6. **Nomoev A. V., Khartaeva E. Ch., Yumozhapova N. V., Darmaev T. G., Bardakhanov S. P., Syzrantsev V. V., Zobov K. V., Gafner Y. Y.** Receiving copper nanoparticles: experiment and modelling // *Solid State Phenomena*. 2019. Vol. 288. P. 140–147.
7. **Ross J.** *Microelectronics Failure Analysis Desc Reference*. Sixth Edition. USA, ASM International, 2011. 660 p.
8. **Синдо Д., Ойкава Т.** Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия. М.: Техносфера, 2006. 256 с.
9. **Nomoev A. V., Bardakhanov S. P., Schreiber M., Bazarova D. Z., Baldanov B. B., Romanov N. A.** Synthesis, Characterization, and Mechanism of Formation of Janus-Like Nanoparticles of Tantalum Silicide-Silicon (TaSi₂/Si) // *Nanomaterials*. 2014. Vol. 5, iss. 1. P. 26–35.
10. **Ellmer K.** Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives // *Handbook of Transparent Conductors*; ed. by D. S. Ginley, H. Hosono, D. C. Paine. New York: Springer, 2010. P. 193–263.
11. **Yamashita T., Hansson R., Hayes P. C.** The relationships between microstructure and crystal structure in zincite solid solutions // *Journal of Materials Science*. 2006. Vol. 41, iss. 17. P. 5559–5568.
12. **Khartaeva E. Ch., Bardakhanov S. P., Nomoev A. V., Zobov K. V., Trufanov D. Yu.** Nanopowders created by irradiating brass with relativistic electrons. *Materials Science Forum*, 2023. Vol. 1083. P. 61–69.
13. **Баннх О. А., Будберг П. Б., Алисова С. П. и др.** Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
14. **Шухардина С. В.** Двойные и многокомпонентные системы на основе меди. М.: Наука, 1979. 248 с.
15. **Лякишев Н. П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем. М.: Машиностроение, 1996. 1238 с.

References

1. **Lozhkomoev A. S., Bakina O. V., Pervikov A. V., Kazantsev S. O., Glazkova E. A.** Synthesis of CuOZnO composite nanoparticles by electrical explosion of wires and their antibacterial activities. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2019, vol. 30, issue 14, pp. 13209–13216.

2. **Sabbouh M., Nikitina A., Rogacheva E., Kraeva L., Ulasevich S., Skorb E., Nosonovsky M.** Separation of motions and vibrational separation of fractions for biocide brass. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, vol. 80, issue 2073, pp. 105817-1-105817-8.
3. **Kazakevich P. V., Voronov V. V., Simakin A. V., Shafeev G. A.** Production of copper and brass nanoparticles upon laser ablation in liquids. *Quantum Electronics*, vol. 34, issue 10, pp. 951–956.
4. **Bardakhanov S. P., Korchagin A. I., Kuksanov N. K., Lavrukhin A. V., Salimov R. A., Fadeev S. N., Cherepkov V. V.** Nanopowders obtained by evaporating initial substances in an electron accelerator at atmospheric pressure. *Doklady Physics*, 2006, vol. 51, issue 7, pp. 353–356.
5. **Yumozhapova N. V., Nomoev A. V., Syzrantsev V. V., Khartaeva E. Ch.** Formation of metal/semiconductor Cu-Si composite nanostructures. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 2019, vol. 10, issue 1, pp. 2497–2504.
6. **Nomoev A. V., Khartaeva E. Ch., Yumozhapova N. V., Darmaev T. G., Bardakhanov S. P., Syzrantsev V. V., Zobov K. V., Gafner Y. Y.** Receiving copper nanoparticles: experiment and modelling. *Solid State Phenomena*, 2019, vol. 288, pp. 140–147.
7. **Ross J.** Microelectronics Failure Analysis Desc Reference. Sixth Edition. USA, ASM International, 2011, 660 p.
8. **Shindo D., Oikawa T.** Analytical transmission electron microscopy. Moscow, Technosfera, 2006, 256 p.
9. **Nomoev A. V., Bardakhanov S. P., Schreiber M., Bazarova D. Z., Baldanov B. B., Romanov N. A.** Synthesis, Characterization, and Mechanism of Formation of Janus-Like Nanoparticles of Tantalum Silicide-Silicon (TaSi_2/Si). *Nanomaterials*, 2014, vol. 5, issue 1, pp. 26–35.
10. **Ellmer K.** Transparent Conductive Zinc Oxide and Its Derivatives. *Handbook of Transparent Conductors*; ed. by D.S. Ginley, H. Hosono, D.C. Paine. New York, Springer, 2010, pp. 193–263.
11. **Yamashita T., Hansson R., Hayes P. C.** The relationships between microstructure and crystal structure in zincite solid solutions. *Journal of Materials Science*, 2006, vol. 41, issue 17, pp. 5559–5568.
12. **Khartaeva E. Ch., Bardakhanov S. P., Nomoev A. V., Zobov K. V., Trufanov D. Yu.** Nanopowders created by irradiating brass with relativistic electrons. *Materials Science Forum*, 2023, vol. 1083, pp. 61–69.
13. **Bannykh O. A., Budberg P. B., Alisova S. P. et al.** State diagrams of binary and multicomponent systems based on iron. Moscow, Metallurgy Publ., 1986, 224 p. (in Russ.)
14. **Shukhardina S. V.** Dual and multi-component systems based on copper. Moscow, Science Publ., 1979, 248 p. (in Russ.)
15. **Lyakishev N. P.** State Diagrams of Binary Metal Systems. Moscow, Mechanical engineering Publ., 1996, 1238 p. (in Russ.)

Информация об авторах

Эржена Чимитдоржиевна Хартаева, научный сотрудник

Андрей Валерьевич Номоев, доктор физико-математических наук

Сергей Прокопьевич Бардаханов, доктор физико-математических наук, профессор

Константин Владимирович Зобов, кандидат физико-математических наук

Дмитрий Юрьевич Труфанов, кандидат физико-математических наук

Василий Рудольфович Гапоненко, кандидат физико-математических наук

Дамдин Галсанович Цыдыпов, инженер

Information about the Authors

Erzhena Ch. Khartaeva, Researcher

Andrey Valer'evich Nomoev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Sergey P. Bardakhanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

Konstantin V. Zobov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Dmitriy Yu. Trufanov, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Vasiliy R. Gaponenko, Candidate of Physical and Mathematical Sciences

Damdin G. Tsydypov, Engineer

*Статья поступила в редакцию 28.09.2023; одобрена после рецензирования 28.09.2023;
принята к публикации 28.09.2023*

*The article was submitted 28.09.2023; approved after reviewing 28.09.2023;
accepted for publication on 28.09.2023*