

## СОЗДАНИЕ КОМПОЗИТОВ МОЛИБДЕН-МЕДЬ МЕТОДОМ ИСКРОВОГО ПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2019

*А.А. Сивков*, доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
профессор Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики

*А.С. Ивашутенко*, кандидат технических наук,

доцент Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики

*Ю.Л. Шаненкова*, ассистент Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики

*Ю.Н. Вымпина*, аспирант Отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск (Россия)*

*Ключевые слова:* медь; молибден; искровое плазменное спекание; композит; микроструктура.

*Аннотация:* В настоящий момент вопросы обеспечения высокоэффективного терморегулирования в электронных системах остаются актуальными. Более половины случаев отказов электронных систем связано именно с повышенной температурой в местах контакта их элементов.

Полупроводниковые компоненты устанавливаются на различные пластины или подложки, которые выполняют функцию элементов отвода тепла и обеспечивают эффективное терморегулирование. Однако подбор материалов для таких пластин является сложной задачей.

Получены объемные образцы на основе порошков молибдена и меди искровым плазменным методом. Высокий уровень теплопроводности меди и низкий температурный коэффициент расширения молибдена позволяют использовать эти металлы в качестве элементов отвода тепла для полупроводниковых компонентов.

По результатам рентгенофазового анализа установлено, что композиты, помимо основных кристаллических фаз молибдена и меди, содержат карбид димолибдена и оксид молибдена. Присутствие данных химических соединений обусловлено характером процесса спекания в графитовых пресс-формах и качеством исходных материалов. Установлено, что зависимость плотности пор композитов от температуры спекания имеет неоднозначный характер изменения, связанный с чередованием твердофазного и жидкофазного спекания. Исследование образцов методом сканирующей электронной микроскопии показало, что в образцах медь заполняет межзеренное пространство частиц молибдена, тем самым обеспечивая высокую плотность конечных объемных продуктов. При этом спекание при температуре свыше 1060 °С сопровождается вытеканием расплавленной меди из объема пресс-формы, что способствует образованию больших пор с последующим снижением плотности образцов.

Выявлено, что при температуре спекания 1060 °С в образце возникает минимальное количество пор, и частицы наиболее тесно прилегают друг к другу.

### ВВЕДЕНИЕ

В сборках силовых полупроводниковых приборов терморегулирование является важной составляющей, так как высокий уровень отвода тепла гарантирует длительную эксплуатацию полупроводниковых компонентов [1–3]. По статистике более половины случаев всех отказов электронных приборов связано с низким уровнем терморегулирования [4]. К тому же в процессе эксплуатации ввиду перегрева возможны изменения геометрии полупроводников, что может привести к разрушению теплового контакта элементов. Это вопрос стоит наиболее остро в космической промышленности, где применение термораст не допустимо. Для устранения такого рода проблем полупроводниковые компоненты устанавливаются на специальные пластины, которые служат в качестве элементов отвода тепла. Однако у таких пластин характеристики теплопроводности и теплового расширения полупроводника и подложки должны быть согласованы друг с другом оптимальным образом.

Новое направление в данной области – создание объемных композиционных материалов на основе молибдена и меди [5]. Интерес к упомянутым материалам обусловлен сочетанием таких их свойств, как высокая тепло- и электропроводность, малый вес, низкий коэффициент расширения и высокая прочность [6–8]. Однако получение композитов Mo-Cu с достаточно высокой

плотностью является трудной задачей ввиду взаимной нерастворимости молибдена и меди, что приводит к плохой спекаемости.

В настоящий момент существует множество методов получения композиционных материалов на основе молибдена и меди, которые не являются достаточно эффективными [9]. Например, метод горячего прессования позволяет получать керамические изделия с малым перепадом плотности по объему и высокими прочностными характеристиками [10–12]. Однако данный метод обладает рядом недостатков, таких как малая производительность процесса, быстрый износ пресс-форм и их высокая стоимость. Метод инфильтрации является одним из самых распространенных методов получения композитов Mo-Cu [13], поскольку позволяет значительно улучшить их свойства за счет регулировки плотности и пористости посредством изменения размера частичек исходного порошка (Mo) и температуры спекания. Процесс инфильтрации занимает много времени [14], кроме того, не создает однородную микроструктуру ввиду взаимной нерастворимости Mo и Cu и их большого угла смачивания.

Цель работы – получение объемных композиционных материалов на основе порошков молибдена и меди искровым плазменным методом. Принцип действия плазменного метода заключается в совместном воздействии на спекаемый образец двух факторов: механического

давления и мощного, обычно кратковременного, электрического разряда между двумя электродами (энергия разряда составляет 1÷100 кДж). Достоинствами данного метода являются высокая экономичность, экологическая чистота, возможность проведения технологического процесса без создания вакуума или инертной атмосферы [15]. Стоит добавить, что компактирование и спекание материала производится за очень короткий промежуток времени, что позволяет сохранить мелкозернистую структуру компактируемого материала.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследовании использовались порошок молибдена, полученный методом электровзрыва проводников, и порошок меди Cu, синтезированный плазмой динамическим методом с помощью коаксиального магнито-плазменного ускорителя с медными электродами [16]. Этот метод является уникальным и позволяет получать дисперсные неорганические материалы за короткий промежуток времени (менее 1 мс) без предварительной подготовки прекурсоров.

Предварительно подготавливалась смесь из порошков Mo и Cu в соотношении 70:30 путем их перемешивания в шаровой мельнице Mixer/Mill 8000M в течение 30 минут в форме из нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Далее полученные смеси консолидировались в установке искрового плазменного спекания SPS 10-4 Thermal Technology при параметрах, приведенных в таблице 1. Стоит отметить, что главным изменяющимся параметром является температура спекания [17].

Для рентгенофазового анализа полученных образцов использовался рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD7000 (Cu-K<sub>α</sub>), оснащенный счетным монохроматором. Полнопрофильный анализ дифрактограмм проводился в программной среде “PowderCell2.4” с использованием базы структурных данных PDF4+.

Анализ микроструктуры проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi TM-3000 с ускоряющим напряжением до 15 кВ в режиме глубокого вакуума.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 1 представлены рентгеновские дифрактограммы полученных образцов, а также карточки предполагаемых (найденных) фаз. Для порошка меди были найдены 2 фазы – это медь Cu (кубическая сингония, пространственная группа Fm-3m {225}) и интерметаллид медь-алюминий Cu<sub>9</sub>Al<sub>4</sub> (кубическая сингония, пространственная группа F-43m {215}). Образование интерметаллида обуславливается взаимодействием медной плазменной струи с алюминиевой подложкой [18].

Для порошка молибдена также найдены 2 фазы – молибден Mo (кубическая сингония, пространственная группа Im3m {229}) и вольфрам W (кубическая сингония, пространственная группа Im3m {229}). Так как электроды были выполнены из вольфрама, во время синтеза порошка произошло загрязнение – как говорилось ранее, указанный материал был получен методом электровзрыва проводников.

На рис. 2 представлены снимки сканирующей электронной микроскопии исходных порошков. Диапазон размеров частиц Cu широк: имеется немало частиц, размеры которых составляют около 3 мкм, в то же время имеются и крупные частицы с размером 30–35 мкм. Самые крупные частицы порошка Mo имеют размеры в пределах 5 мкм, мелкие – 1,5 мкм и меньше, средний размер составляет 2 мкм. Частицы порошков Cu и Mo имеют сферическую форму.

На рис. 3 представлены рентгеновские дифрактограммы уже готовых композитов, полученных в установке искрового плазменного спекания. Рассматривались кристаллические фазы, которые могут быть

Таблица 1. Параметры спекания порошковых смесей

Состав смеси	Рабочая атмосфера	Время выдержки, мин	Температура спекания, °С	Давление, МПа
70Mo+30Cu	Вакуум	10	1000÷1100, Δt=20	60

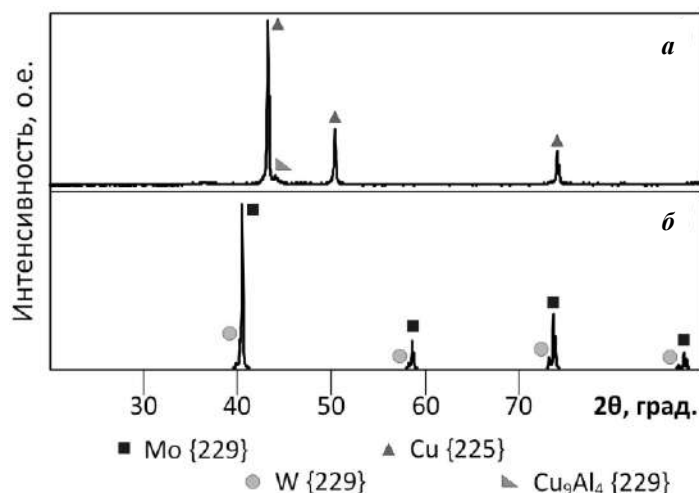


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы исходных порошков меди (а) и молибдена (б)

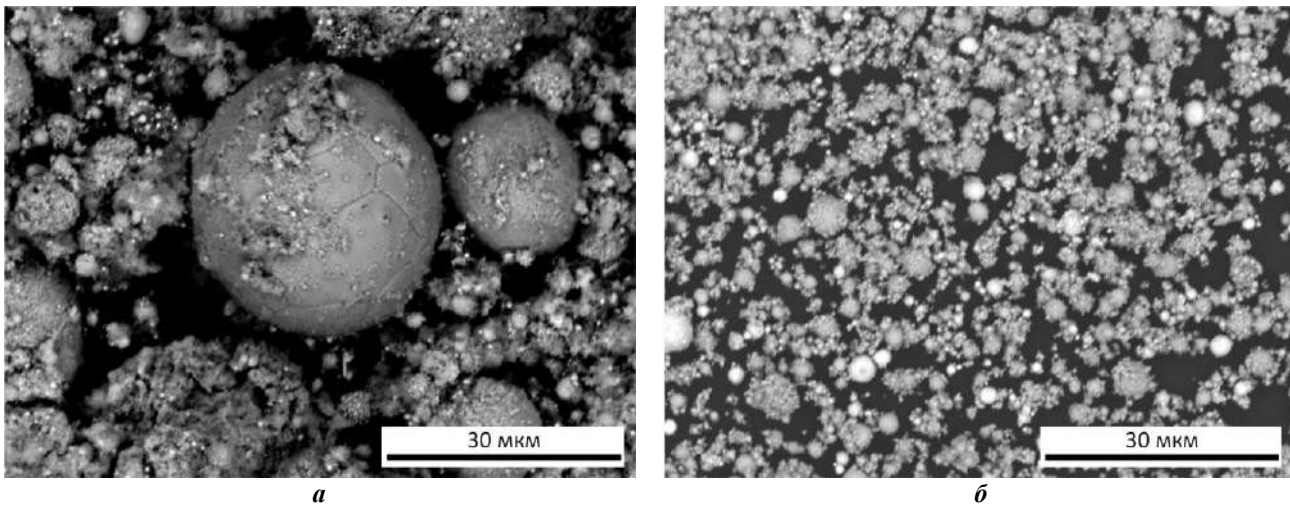


Рис. 2. Снимки сканирующей электронной микроскопии исходных порошков меди (а) и молибдена (б)

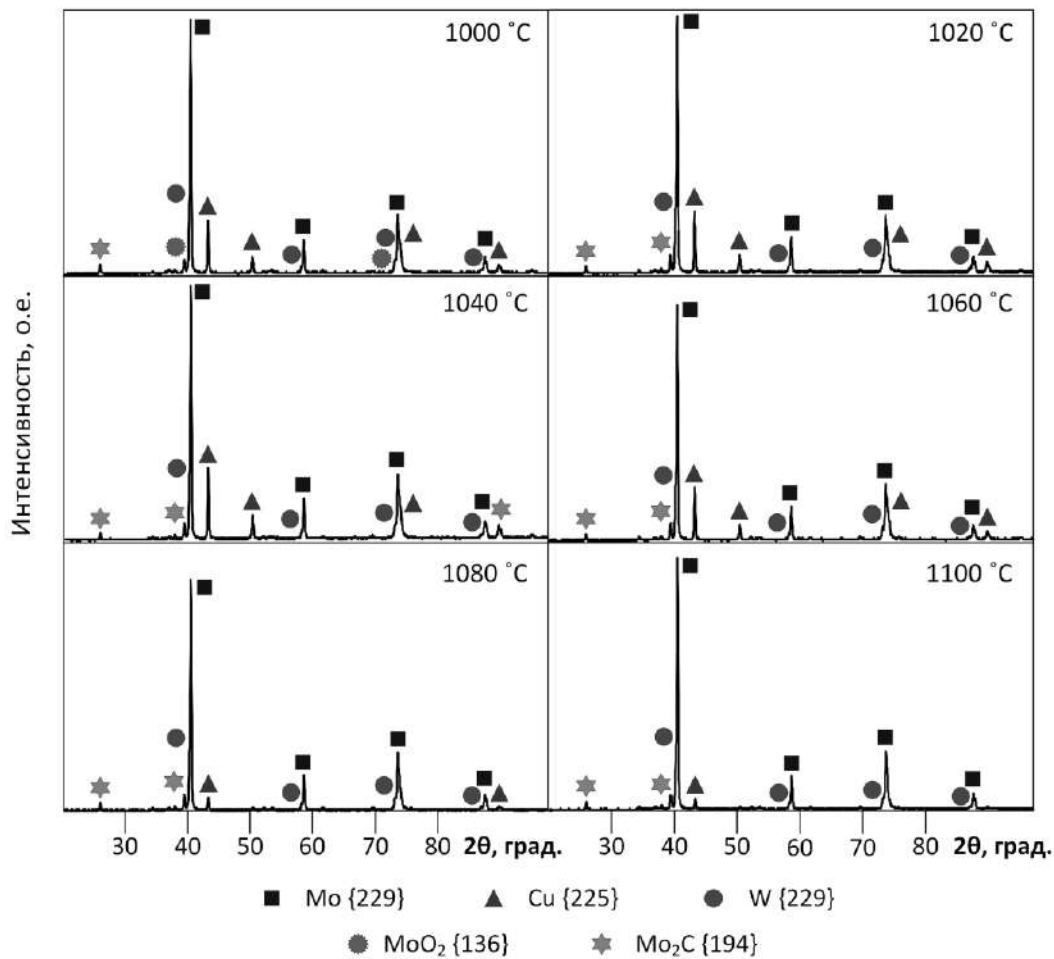
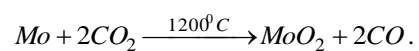


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы полученных композиционных образцов

в продуктах наиболее вероятно: фазы молибдена, меди, вольфрама, а также оксиды и карбиды основной фазы молибдена.

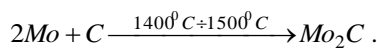
Видно, что преобладающими фазами являются Mo (кубическая сингония, пространственная группа Im3m {229}) и Cu (кубическая сингония, пространственная группа Fm-3m {225}), так как эти материалы изначально закладывались в пресс-формы. Был обнаружен

вольфрам W (кубическая сингония, пространственная группа Im3m {229}) на уровне следов. Помимо основных фаз, имеется оксид молибдена MoO<sub>2</sub> (тетрагональная сингония, пространственная группа P42/mnm {136}), образование которого происходит следующим образом:



Наличие углекислого газа объясняется тем, что  $\text{CO}_2$  хорошо абсорбируется с поверхности частиц исходных продуктов. В процессе спекания вначале происходит прессование (давление выводится на нужный уровень в течение 70 с), затем выстраивание температурного режима. При повышении температуры газ, сосредоточенный внутри пресс-формы, начинает выделяться на поверхности – в таком случае уже нельзя говорить о вакуумной среде внутри установки. Часть газа все же не успевает выделиться, и происходит протекание вышеописанной реакции.

Был обнаружен карбид димолибдена  $\text{Mo}_2\text{C}$  (гексагональная сингония, пространственная группа  $R\bar{6}3/mmc$  {194}). Появление его в продуктах может быть объяснено тем, что в процессе спекания при высокой температуре молибден вступает в реакцию с углеродом, так как пресс-форма выполнена из графита:



Протекание вышеописанных реакций во время спекания при температурах более низких, чем указано в литературе, можно объяснить 3 причинами. Во-первых, размер частиц исходного продукта. Все химические реакции указаны для чистых объемных металлов, неметаллов. Исходные порошки мелкодисперсны, для их реакции с другими элементами необходима меньшая температура. Во-вторых, наличие вольфрама. Как указано в [19], при достижении температуры  $400^\circ\text{C}$  вольфрам начинает разогреваться, что сопровождается впоследствии выделением большого количества тепла. В-третьих, особенность процесса спекания образцов посредством искрового плазменного метода. Как говорилось ранее, в процессе спекания образуется искровая плазма при высоких локальных температурах между частицами – до  $10000^\circ\text{C}$ . При этом стоит отметить, что с установки SPS на компьютер выводятся лишь интегральные характеристики температуры, давления и так далее, то есть остается неизвестным, какова реальная температура в точках между частицами.

Сведения об изменении процентного содержания каждой из фаз, а также плотности пор композитов в зависимости от температуры спекания наиболее наглядно представлены на рис. 4. На рис. 4 а видно, что после точки  $t=1060^\circ\text{C}$  содержание молибдена в продуктах растет. Это объясняется уменьшением количества меди, так как она вытекает из объема пресс-формы при достижении температуры плавления. Стоит отметить, что с повышением температуры плавления незначительно увеличивается содержание  $\text{Mo}_2\text{C}$  ввиду увеличения диффузии между частицами молибдена и графитовой пресс-формой.

На рис. 4 б показано неоднозначное изменение плотности пор композитов в зависимости от температуры спекания. Начальное снижение уровня плотности пор обусловлено процессом твердофазного спекания, происходящего в данном диапазоне температур. При твердофазном спекании уплотнение композиционных порошков определяется только способностью к внутренней диффузии атомов. Для второго участка, в диапазоне  $1040 \div 1060^\circ\text{C}$ , характерно жидкофазное спекание, которое считается доминирующим механизмом в процессе спекания композитов. Медь начинает плавиться; за счет капиллярной силы обеспечивается движение жидкой  $\text{Cu}$ , вызывающее перегруппировку частиц  $\text{Mo}$  и индуцирующее перенос массы. Описанный процесс обеспечивает более плотное смыкание частиц композита. После достижения температуры  $1060^\circ\text{C}$  медь стремительно расплавляется, не успевает «зафиксироваться» в объеме пресс-формы, вытесняется и впоследствии образуется на поверхности, тем самым способствуя снижению относительной плотности материала и, как следствие, повышению пористости.

На рис. 5 приведены снимки синтезированных образцов, полученные со сканирующего электронного микроскопа. Видно, что все полученные образцы имеют достаточно плотную микроструктуру. Матрица, создаваемая молибденом, заполняется частицами меди в межзеренном пространстве и обеспечивает получение высокоплотного объемного продукта. При повышении температуры вольфрам также рассредоточивается по всему пространству материала, обеспечивая более

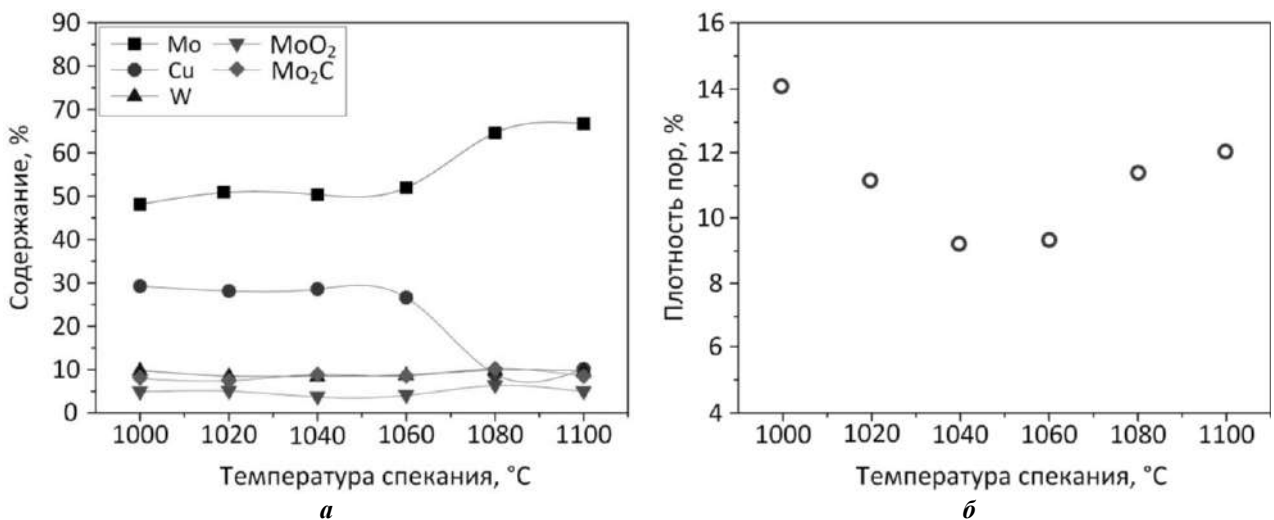


Рис. 4. Графики зависимостей процентного содержания фаз (а) и плотности пор (б) от температуры спекания

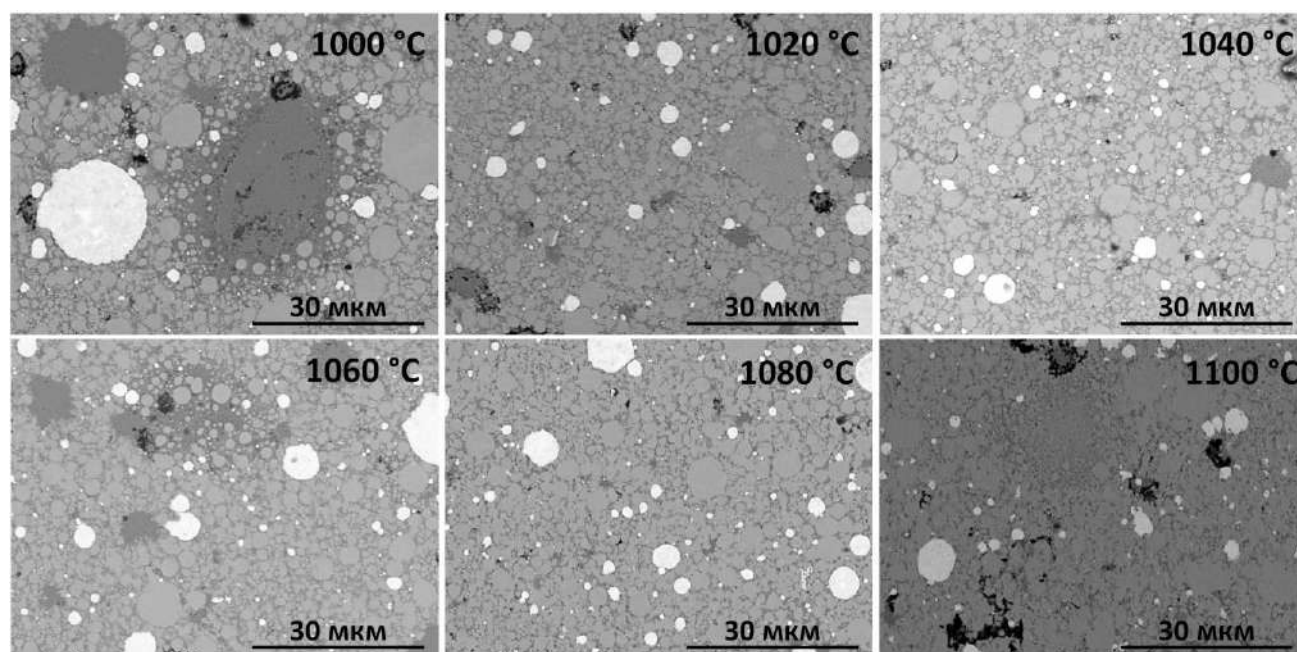


Рис. 5. Микроструктура объемных образцов, полученных при разных температурах спекания

плотное и равномерное распределение частиц. Наиболее оптимальная температура спекания – 1060 °С, так как у данного образца наибольшее значение плотности и минимальное количество пор, что видно по снимкам. Микрочастицы имеют минимальный размер, что обеспечивает более плотное прилегание частичек друг к другу. Плотность образцов, спеченных при температурах свыше 1060 °С, уменьшается ввиду плавления меди и уменьшения ее процентного содержания в конечном образце [20]. Частицы Cu весьма крупные по сравнению с Mo (в малых температурах) – это обуславливается размером частиц исходного порошка. Стоит заметить, что имеются частицы вольфрама, средний размер которых составляет 5 мкм и более. Это говорит о высокой степени агломерирования частиц вольфрама.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты получения композиционных материалов на основе порошков молибдена и меди искровым плазменным методом. По результатам рентгенофазового анализа выявлено, что, помимо кристаллических фаз молибдена и меди, в образцах имеются такие соединения, как карбид димолибдена  $\text{Mo}_2\text{C}$  и оксид молибдена  $\text{MoO}_2$ . Присутствие названных неорганических соединений обусловлено характером процесса спекания в графитовых пресс-формах и качеством исходных материалов. Также обнаружен вольфрам, присутствие которого в композиционном материале обусловлено особенностью его получения с помощью электровзрыва проводников. Сканирующая электронная микроскопия показала, что образцы имеют достаточно плотную структуру с тесным прилеганием частиц друг к другу. Выявлено, что наиболее оптимальная температура спекания – 1060 °С. Для образца, полученного при данной температуре, характерно минимальное количество пор.

*Статья подготовлена по материалам докладов участников IX Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2019) с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 9–13 сентября 2019 года.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shamma N.Y.A. Present problems of power module packaging technology // *Microelectronics Reliability*. 2003. Vol. 43. № 4. P. 519–527.
2. Lostetter A.B., Barlow F., Elshabini A. An overview to integrated power module design for high power electronics packaging // *Microelectronics Reliability*. 2000. Vol. 40. № 3. P. 365–379.
3. Hocine R., Boudghene Stambouli A., Saidane A. A three-dimensional TLM simulation method for thermal effect in high power insulated gate bipolar transistors // *Microelectron Engineering*. 2003. Vol. 65. № 3. P. 293–306.
4. Renso N., Buffolo M., De Santi C., Ronzani M., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Failure limits and electro-optical characteristics of GaN-based LEDs under electrical overstress // *Microelectronics Reliability*. 2018. Vol. 88-90. P. 887–890.
5. Aydinyan S.V., Kirakosyan H.V., Kharatyan S.L. Cu–Mo composite powders obtained by combustion–coreduction process // *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. 2016. Vol. 54. P. 455–463.
6. Li Z., Zhai Y. Preparation of  $\text{Mo}_6\text{Cu}_4\text{O}$  Composite Nano-Powder by Hydrogen Reaction // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2010. Vol. 39. № 1. P. 6–9.
7. Dong L., Chen W., Hou L., Deng N., Zheng C. W–Cu system: synthesis, modification, and applications // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. Vol. 56. № 3-4. P. 171–184.
8. Rosalie J.M., Guo J., Pippin R., Zhang Z. On nano-structured molybdenum–copper composites produced

- by high-pressure torsion // *Journal of Materials Science*. 2017. Vol. 52. № 16. P. 9872–9883.
9. Sun A., Dong X., Wang X., Duan B., Wang D. Synthesis of novel core-shell Cu@Mo nanoparticles with good sinterability // *Journal of Alloys and Compounds*. 2013. Vol. 555. P. 6–9.
  10. Кочешков И.В. Анализ силовых условий процесса горячего прессования заготовок, предназначенных для получения волокнистых композиционных материалов // *Кузнечно-штамповое производство. Обработка материалов давлением*. 2011. № 4. С. 10–15.
  11. Алымов М.И. Консолидированные порошковые наноматериалы (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. № S4. С. 34–39.
  12. Алымов М.И. Конструкционные порошковые наноматериалы // *Композиты и наноструктуры*. 2010. № 2. С. 5–11.
  13. Johnson J.L., German R.M. Role of Solid-State Skeletal Sintering during Processing of Mo-Cu Composites // *Metallurgical and Material Transactions A*. 2001. Vol. 32. № 3. P. 605–613.
  14. Dong L., Chen W., Hou L., Deng N., Zheng C. W-Cu system: synthesis, modification, and application // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 2017. Vol. 56. № 3-4. P. 171–184.
  15. Shkodich N.F., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Moskovskikh D.O., Kuskov K.V., Schukin A.S., Khomenko N.Yu. Preparation of Copper-Molybdenum Nanocrystalline Pseudoalloys Using a Combination of Mechanical Activation and Spark Plasma Sintering Techniques // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2017. Vol. 11. № 1. P. 173–179.
  16. Сивков А.А., Сайгаш А.С., Колганова Ю.Л. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель: патент РФ № 137443 от 24.09.2013.
  17. Половинкина Ю.Н., Шаненкова Ю.Л. Получение пластин из молибдена и меди с помощью искрового плазменного спекания // *Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. 2017. Т. 2. С. 214–216.
  18. Sivkov A., Shanenkova Y., Saigash A., Shanenkov I. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity // *Surface and Coating Technology*. 2016. Vol. 292. P. 63–71.
  19. Рипан Р., Четяну И. Неорганическая химия. Т. 2: Химия металлов. Москва: Мир, 1972. 871 с.
  20. Wang D., Yin B., Sun A., Li X., Qi C., Duan B. Fabrication of Mo-Cu composite powders by heterogeneous precipitation and the sintering properties of the composite compacts // *Journal of Alloys and Compounds*. 2016. Vol. 674. P. 347–352.
  21. Hocine R., Boudghene Stambouli A., Saidane A. A three-dimensional TLM simulation method for thermal effect in high power insulated gate bipolar transistors. *Microelectronic Engineering*, 2003, vol. 65, no. 3, pp. 293–306.
  22. Renso N., Buffolo M., De Santi C., Ronzani M., Meneghesso G., Zanoni E., Meneghini M. Failure limits and electro-optical characteristics of GaN-based LEDs under electrical overstress. *Microelectronics Reliability*, 2018, vol. 88-90, pp. 887–890.
  23. Aydinyan S.V., Kirakosyan H.V., Kharatyan S.L. Cu-Mo composite powders obtained by combustion-coreduction process. *Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2016, vol. 54, pp. 455–463.
  24. Li Z., Zhai Y. Preparation of Mo<sub>60</sub>Cu<sub>40</sub> Composite Nano-Powder by Hydrogen Reaction. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, vol. 39, no. 1, pp. 6–9.
  25. Dong L., Chen W., Hou L., Deng N., Zheng C. W-Cu system: synthesis, modification, and applications. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2017, vol. 56, no. 3-4, pp. 171–184.
  26. Rosalie J.M., Guo J., Pippan R., Zhang Z. On nanostructured molybdenum-copper composites produced by high-pressure torsion. *Journal of Materials Science*, 2017, vol. 52, no. 16, pp. 9872–9883.
  27. Sun A., Dong X., Wang X., Duan B., Wang D. Synthesis of novel core-shell Cu@Mo nanoparticles with good sinterability. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 555, pp. 6–9.
  28. Kocheshkov I.V. Analysis of power conditions of hot extrusion of billets for production of fibrous composite materials. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2011, no. 4, pp. 10–15.
  29. Alymov M.I. Consolidated powder nanomaterials. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2014, no. S4, pp. 34–39.
  30. Alymov M.I. Structural powder nanomaterials. *Kompozity i nanostruktury*, 2010, no. 2, pp. 5–11.
  31. Johnson J.L., German R.M. Role of Solid-State Skeletal Sintering during Processing of Mo-Cu Composites. *Metallurgical and Material Transactions A*, 2001, vol. 32, no. 3, pp. 605–613.
  32. Dong L., Chen W., Hou L., Deng N., Zheng C. W-Cu system: synthesis, modification, and application. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 2017, vol. 56, no. 3-4, pp. 171–184.
  33. Shkodich N.F., Rogachev A.S., Mukasyan A.S., Moskovskikh D.O., Kuskov K.V., Schukin A.S., Khomenko N.Yu. Preparation of Copper-Molybdenum Nanocrystalline Pseudoalloys Using a Combination of Mechanical Activation and Spark Plasma Sintering Techniques. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 173–179.
  34. Sivkov A.A., Saigash A.S., Kolganova Yu.L. *Koaksialnyi magnitoplazmenniy uskoritel* [Coaxial magneto plasma accelerator]. Patent RF, no. 137443, 2013.
  35. Polovinkina Yu.N., Shanenkova Yu.L. Production of molybdenum and copper plates using spark plasma sintering. *Sbornik nauchnykh trudov XIV Mezhdunarodnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Perspektivy razvitiya fundamentalnykh nauk"*. 2017, vol. 2, pp. 214–216.

## REFERENCES

1. Shamas N.Y.A. Present problems of power module packaging technology. *Microelectronics Reliability*, 2003, vol. 43, no. 4, pp. 519–527.
2. Lostetter A.B., Barlow F., Elshabini A. An overview to integrated power module design for high power electronics packaging. *Microelectronics Reliability*, 2000, vol. 40, no. 3, pp. 365–379.

18. Sivkov A., Shanenkova Y., Saigash A., Shanenkov I. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity. *Surface and Coating Technology*, 2016, vol. 292, pp. 63–71.
19. Ripan R., Chetyanu I. *Neorganicheskaya khimiya. T. 2. Khimiya metallov* [Inorganic chemistry. Vol. 2. Metal chemistry]. Moscow, Mir Publ., 1972. 871 p.
20. Wang D., Yin B., Sun A., Li X., Qi C., Duan B. Fabrication of Mo-Cu composite powders by heterogeneous precipitation and the sintering properties of the composite compacts. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, vol. 674, pp. 347–352.

#### CREATION OF MOLYBDENUM-COPPER COMPOSITES USING THE SPARK PLASMA SINTERING METHOD AND THE STUDY OF THEIR CHARACTERISTICS

© 2019

**A.A. Sivkov**, Doctor of Sciences (Engineering), senior researcher, professor of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy and Power Engineering  
**A.S. Ivashutenko**, PhD (Engineering), assistant professor of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy and Power Engineering  
**Yu.L. Shanenkova**, research assistant of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy and Power Engineering  
**Yu.N. Vympina**, postgraduate student of the Division for Power and Electrical Engineering, School of Energy and Power Engineering  
*National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk (Russia)*

**Keywords:** copper; molybdenum; spark plasma sintering; composite; microstructure.

**Abstract:** At the moment, the issues related to the assurance of highly efficient thermal control in electronic systems continue to be relevant. More than half of the failure cases in the operation of electronic systems are caused precisely by the elevated temperature in the contact areas of their elements.

Semiconductor components are installed on various plates or substrates that serve as elements of heat removal and provide effective thermal control. However, the selection of materials for such plates is a difficult task.

Using the spark plasma method, the authors produced bulk samples based on molybdenum and copper powders. The combination of copper with high thermal conductivity and molybdenum with a low-temperature coefficient of expansion makes it possible to use these metals as elements of heat removal for semiconductor components.

According to the results of X-ray phase analysis, the authors identified that the composites, in addition to the main crystalline phases of molybdenum and copper, contain dimolybdenum carbide and molybdenum oxide. The presence of these chemical compounds is caused by the nature of the sintering process in graphite molds and the quality of raw materials. The authors identified that the dependence of the composites void density on the sintering temperature has a complex behavior related to the interchange of solid-phase and liquid-phase sintering. Scanning electron microscopy of samples showed that copper in samples fills in the intergranular space of molybdenum particles, and thus assure high density of end bulk products. In this case, sintering at a temperature of more than 1060 °C causes the runout of molten copper out of molds space that facilitates the formation of large pores with further sample density reduction.

The study identified that, at sintering temperature of 1060 °C, the minimal number of pores appear in a sample, and the particles fit most closely to each other.