

Министерство образования и науки  
Российской Федерации  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,  
НАНОСТРУКТУР  
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

*МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ*

**выпуск 7**

ТВЕРЬ 2015

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики  
Тверского государственного технического университета

*А.Н. Болотов*

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики конденсированного  
состояния Тверского государственного университета

*Н.Н. Большакова*

**Рецензирование осуществляется на основании Положения об рецензировании статей и материалов для опубликования в Межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».**

**Официальный сайт издания в сети Интернет:**

**[www.physchemaspects.ru](http://www.physchemaspects.ru)**

**Ф50** Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2015. – Вып. 7. – 588 с.

ISBN 978-5-7609-1071-4

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011

Сборник составлен из оригинальных статей теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Сборник предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-1071-4

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2015

© Тверской государственной  
университет, 2015

УДК 538.931, 538.951, 538.953

## СОЗДАНИЕ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ТЕПЛОТВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА

В.В. Батин, Н.А. Панькин

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет имени Н.П.Огарева»  
430005, Саранск, ул. Большевикская, 68  
batinv.v@yandex.ru

**Аннотация:** Приведены результаты работы по созданию композиционного материала для теплоотводящей подложки полупроводниковых кристаллов в изделиях силовой электроники, обладающего заданным набором физико-механических свойств.

**Ключевые слова:** *металломатричный композиционный материал, температура плавления, термический коэффициент линейного расширения.*

Силовая электроника в настоящее время переживает период интенсивного развития. Значительная часть оборудования средней мощности разрабатывается с использованием силовых модулей на биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT). Одной из насущных проблем таких устройств является отвод тепла, выделяющегося в процессе работы модуля. Наиболее эффективный теплоотвод обеспечивается при непосредственном креплении электронного устройства к теплоотводящему корпусу или основанию. Традиционные теплоотводящие материалы имеют либо сильно различающиеся значения коэффициента теплового расширения (КТР) с материалом электронного устройства, приводящие к механическому разрушению прибора, либо недостаточную теплопроводность [1].

В качестве теплоотводящего основания для полупроводников используют либо молибден, либо ММКМ. Одним из наиболее распространенных металлов для создания ММКМ является алюминий. Это в первую очередь обусловлено его высокой пластичностью материала. Благодаря данному свойству, алюминий выполняет роль «клея» для наполнителя, прочно соединяя его отдельные частицы. К сожалению, из-за низкой температуры плавления ( $\approx 660$  °С), данный материал не может быть использован для создания ММКМ с необходимым набором свойств. Так, при создании конечного изделия теплоотводящее основание соединяется с полупроводниковым кристаллом пайкой при температуре 750 °С. Это приводит к потере формы, изменению распределения концентраций материалов матрицы и наполнителя ММКМ и, как следствие, к ухудшению эксплуатационных свойств изделий электротехнического назначения и браку.

Эффективным решением этой проблемы может быть использование теплоотводящих элементов, изготовленных из ММКМ на основе металла

или сплава с температурой плавления выше 750 °С.

Цель настоящей работы – создание ММКМ со следующим набором свойств: температура плавления превышает 750 °С; термический коэффициент линейного расширения - не более  $5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; удельное электрическое сопротивление при 20 °С – не более  $5,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ; удельная теплоемкость при 20–100 °С – не менее 0,272 кДж/(кг·К); теплопроводность при 20 °С – не менее 147 Вт/(м·К); твердость по Бреннелю – 150÷160 кгс/мм<sup>2</sup>. В наибольшей степени материал, отвечающий вышесказанному, соответствует титанат алюминия. Он характеризуется высокой температурой плавления (1860 °С) и подходящим значением термического коэффициента линейного расширения, высокой химической устойчивостью к кислым средам и силикатным расплавам. Однако на его основе не удалось получить конечного изделия с требуемым набором эксплуатационных характеристик. Это обусловлено с его нестабильностью в процессе использования при температурах выше 700 °С из-за образования новых фаз системы *Ti–Al* с высоким значением термического коэффициента линейного расширения.

В качестве материала наполнителя нами использован порошок карбида кремния. Данный материал обладает малой (по отношению к молибдену) плотностью (что актуально в транспортной, авиационной промышленности), высокой твердостью, теплоемкостью, достаточной теплопроводностью, но электрические свойства не соответствуют заявленным требованиям.

Для улучшения электрических свойств композита необходимо использовать материал с высокой электропроводностью. К твердым веществам с высокой электропроводностью и теплопроводностью, несомненно, можно отнести металлы. Выбранный металл, который должен стать матрицей создаваемого композита, должен обладать высокой температурой плавления высокой теплопроводностью и электропроводностью. Из доступных металлов с такими свойствами можно назвать медь.

Расчет концентрационных значений матрицы и наполнителя (упрочнителя) оценивают исходя правила смесей [2], которое также называют правилом аддитивности [3]. Методами математического анализа показано, что для достижения указанных свойств необходимо использовать 40–60% *SiC*, соответственно 40–60% металла.

В качестве исходных порошков для получения композиционных материалов *Ti–SiC* использовали порошки титана (ПТМ-1) и «зеленого» карбида кремния (М63) с фракцией менее 100 мкм. В качестве армирующих элементов выступали проволоки, выполненные из

технически чистой меди марки М1. Процесс формования проводили при комнатной температуре на гидравлическом прессе ДЕ2432.01. Максимальное давление прессования составляло 1,2 ГПа, которое превышает пределы прочности для титана (0,4–0,7 ГПа) и меди (0,3–0,5 ГПа).

После извлечения из пресс-формы образцы подвергались твердофазному спеканию при температуре 800 °С в вакуумной печи ЭСКВЭ-3/20 ГМ5. Использование вакуума связано с тем, что используемые компоненты композиционного материала (титан и медь) имеют большое химическое сродство к кислороду – они интенсивно окисляются на воздухе. Вакуум снижает присутствие реакционных газов (в нашем случае кислорода) в вакуумной печи, что предотвращает образования оксидов используемых металлов. Выдержка при конечной температуре проводилась в течении 2 часов с последующим остыванием (под вакуумом порядка  $10^{-5}$  мм.рт.ст.) до комнатной температуры (порядка 12 часов). При этом, нагревание в вакууме осуществлялось в несколько ступеней (300 °С, 500 °С, 700 °С и 800 °С, определенных из предварительных испытаний на аналогичных образцах). Выдержка на каждой ступени – 20 минут. Первоначальный нагрев до 300–400 °С сопровождается активной десорбцией газов, а также испарением и разложением загрязнений на поверхности металла. При дальнейшем нагреве до 600–800 °С практически полностью выделяется водород и частично кислород (частичное восстановление окислов используемых материалов – меди и титана). Кроме того, постепенный нагрев необходим для избежания тепловых ударов на композит. Уменьшение термических градиентов снижает склонность конечного изделия к растрескиванию. Быстрый нагрев приводит к более быстрой потере вакуума (особенно для крупногабаритных изделий) вследствие интенсивной дегазации, что может негативно сказаться на работе турбомолекулярного насоса вакуумной печи – не допускается его эксплуатация при давлениях выше  $10^{-3}$  мм.рт.ст.

Вследствие большого значения КТР меди необходимо использовать медь в небольших количествах, при этом максимально рационально использовать высокие значения теплопроводности и электропроводности. Для улучшения теплопроводности изделие армирование медной проволокой проводили в направлении теплопереноса. Необходимость данного армирования объясняется невысоким значением теплопроводности и электропроводности титана и относительно высокой пористостью основного объема изделия. Пористость значительно сказывается на тепловых и электрических свойствах изделий и не может быть заметно уменьшена при данном методе создания композита

(холодное формование с последующим спеканием) и данном подборе материалов (все материалы недостаточно пластичны).

Охлаждаемый кристалл, для которого создается теплоотводящий элемент, используется для преобразования переменного тока. Вследствие скин-эффекта, электрический ток в основном распространяется по поверхности изделий. Исходя из этого, для достижения необходимого значения электросопротивления, достаточно нанести на полученное изделие тонкий слой металла с хорошей электропроводностью. В качестве материала покрытия наиболее подходящим веществом является медь. Покрытие наносится методом магнетронного ионно-плазменного нанесения на модернизированной установке ННВ 6.6И4. Выбор магнетронного напыления обусловлен меньшими термическими воздействиями на конечное изделие. Толщина наносимой пленки составляла 1–2 мкм.

Исследования показали, материалу с набором параметров, заявленных в работе, удовлетворяет армированный медной проволокой образец с составом (50 мас. %Ti + 50 мас. %SiC) и ионно-плазменным покрытием из меди толщиной несколько микрометров.

### **Библиографический список:**

1. **Нищев, К.Н.** Исследование структуры и фазового состава  $Al-SiC$  методами рентгеноструктурного анализа / К.Н. Нищев, В.М. Кяшкин, М.И. Новопольцев // Физика и химия новых материалов: электронное научное периодическое издание. – 2011. – № 2 (10), 2011. – С. 1-7.
2. **Кулак, М.И.** Фрактальная механика материалов / М.И. Кулак – Киев: Вышэйшая школа, 2002. – 305 с.
3. **Юскаев, В.Б.** Композиційні матеріали: Навчальний посібник / В.Б. Юскаев – Суми: Видавництво СумДУ, 2006. – 199 с.