

Разработка керамики на основе нитрида алюминия для изделий электронной техники

Юрий Непочатов, Анастасия Земницкая,
Павел Муль (г. Новосибирск)

С увеличением мощности электронных компонентов, требующих эффективного рассеяния тепла, возникает необходимость разработки материалов с высокой теплопроводностью. Одним из таких материалов является нитрид алюминия. В настоящей работе представлены результаты разработки составов и технологии изготовления керамики из нитрида алюминия.

ВВЕДЕНИЕ

Современной тенденцией развития изделий электронной техники является увеличение удельной тепловой мощности, что неизменно приводит к возникновению проблемы теплоотвода и необходимости снижения теплового сопротивления цепи. Отвод тепла через подложку, на которой размещаются тепловыделяющие чипы, является простым и удобным средством снижения теплового сопротивления цепи и, соответственно, температуры полупроводниковых элементов. Одним из важнейших вопросов при этом является выбор материалов с высокой теплопроводностью. В последнее время керамика на основе нитрида алюминия (AlN) привлекает всё большее внимание в качестве перспективного теплопроводящего материала для использования в электронной технике при создании конструкций силовых устройств, элементов Пельтье, светоизлучающих диодов и СВЧ-транзисторов. В таблице сравниваются типичные свойства четырёх керамических материалов, ко-

торые в настоящее время используют в электронных приборах в качестве подложки. В связи с уникальным сочетанием физических свойств, например, высокой теплопроводности, высокого электрического сопротивления и коэффициента теплового расширения (КТР), близкого к КТР кремния, нитрид алюминия (AlN) становится ключевым материалом, используемым в качестве подложки для электронных приборов высокой мощности. Хотя теоретическая теплопроводность кристаллического AlN при комнатной температуре, как полагают, достигает 319 Вт/мК, измеренные значения для поликристаллической керамики AlN находятся в диапазоне от самого низкого показателя 17 Вт/мК до самого высокого 285 Вт/мК. Этот диапазон является типичным для многих видов керамики с поликристаллической структурой. Как и у монокристаллов, дефекты кристаллической решетки отдельных кристаллов у поликристаллической керамики играют доминирующую роль в механизме теплопроводности.

В целом теплопроводность поликристаллической керамики ниже, чем теплопроводность входящих в её состав монокристаллов. Это снижение в значительной степени зависит от теплопроводности и чистоты входящих в состав керамики материалов, размеров зёрен исходных компонентов, количества спекающей добавки, а также особенностей процесса спекания, что является очень важным, поскольку указанные факторы влияют на микроструктуру керамики и, следовательно, на механизм тепловой проводимости. Кроме того, снижение теплопроводности у поликристаллической керамики происходит за счёт двух основных факторов: случайной ориентации отдельных зёрен и распределения случайных дискретных вторичных фаз.

В настоящей работе предпринята попытка исследовать причины этого снижения и разработать технологические процессы получения алюмонитридной керамики с максимальным коэффициентом теплопроводности.

Постановка задачи

Теплопроводность кристаллических структур уменьшается с ростом атомного веса элемента. Имеется четыре признака идентификации кристаллов с высокой теплопроводностью: кристалл должен иметь низкий атомный вес, сильную связь между атомами, простую кристаллическую структуру, а также отсутствие дефектов кристаллической решётки и ангармонизма её колебаний. Известно [1], что только несколько кристаллов попадают в эту категорию. Большинство кристаллов, обладающих высокой теплопроводностью, имеют алмазоподобную структуру. К этому числу относятся такие материалы, как алмаз, графит, карбид бора, нитрид бора, кремний, карбид кремния, оксид бериллия, нитрид алюминия, фосфид галлия и другие – всего 12 алмазоподобных структур.

Причиной низкой теплопроводности спечённого поликристаллического нитрида алюминия является, главным

Электрофизические характеристики керамических материалов из оксида алюминия (Al₂O₃), карбида кремния (SiC), нитрида алюминия (AlN) и оксида бериллия (BeO) по данным отечественных и зарубежных источников

Физические свойства	Al ₂ O ₃	SiC	AlN	BeO
Теплопроводность при 25°C, Вт/мК	20...30	150	160...240	220...240
Прочность на изгиб, МПа	300...350	320...350	250...300	170...230
Электрическая прочность при 25°C, кВ/мм	14...18	0,07	14...17	10
Удельное электросопротивление при 25°C, Ом см	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Диэлектрическая постоянная при 25°C на частоте 1 МГц	8,5...10	40...42	8,8...8,9	6,5...6,7
Тангенс угла диэлектрических потерь (×10 ⁻⁴) на частоте 1 МГц	2...3	500	1...5	1...5
Коэффициент температурного линейного расширения (×10 ⁻⁶ /°C) в диапазоне температур 25...400°C (для кремния 3,5...4,0 × 10 ⁻⁶ /°C)	6,7...7,3	3,7	4,3...4,6	7,5...8,0
Плотность, г/см ³	3,97	3,21	3,26	3,01
Модуль Юнга, ГПа	378	460	343	378

образом, наличие в нём большого количества примесей и растворённого в решётке кислорода, что приводит к рассеянию фононов. Способствовать повышению теплопроводности спечённого нитрида алюминия можно за счёт введения в качестве активирующих спекание и раскисляющих добавок фтористых соединений редкоземельных металлов [2], углерода [3] или активных металлов [4]. Однако эти методы решения задачи повышения теплопроводности приводят к ухудшению диэлектрических свойств, снижению удельного электросопротивления и важных эксплуатационных характеристик изделий из нитрида алюминия; они недостаточно технологичны, неэкономичны и не позволяют получать высокую теплопроводность керамики. Кроме того, введение в исходную смесь различных добавок повышает токсичность газообразных выбросов, создаёт сложности в работе печей из-за коррозионного воздействия фторидов, приводит к увеличению стоимости нитрида алюминия.

Таким образом, создание технологичного и экономичного метода полу-

чения керамики на основе нитрида алюминия с высокой теплопроводностью возможно при использовании порошка с минимальным уровнем примесей и минимальным количеством активирующих спекание добавок. Это обеспечит высокую плотность и теплопроводность керамики на основе нитрида алюминия.

Целью данной работы является разработка технологии изготовления теплопроводящих подложек из алюмонитридной керамики с высокими теплофизическими и электротехническими характеристиками.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ литературных данных показал, что проблемы спекания плотных материалов из нитрида алюминия связаны, с одной стороны, с ковалентным характером связи Al–N, что определяет необходимость высоких температур спекания, а с другой – с наличием в исходных порошках примеси кислорода, который при спекании внедряется в решётку нитрида алюминия, создавая вакансии алюминия, на которых и

происходит рассеяние фононов, т.е. снижается теплопроводность материала. Для решения этой проблемы мы использовали спекающую добавку Y_2O_3 от 1 до 5% мас. При взаимодействии Y_2O_3 с находящимся на поверхности частиц нитрида Al_2O_3 происходит образование жидкой фазы (рис. 1), интенсифицирующей спекание при 1760°C, а очистка решётки нитрида алюминия от кислорода (чем и достигается высокая теплопроводность материала) происходит при 1800°C. При этом образуется алюмонитриевый гранат, который высаживается на поверхности зёрен.

Большое влияние на теплофизические свойства алюмонитридной керамики оказывает метод формообразования образцов. В данной работе рассматривали два метода формообразования: прессование и литьё. Метод прессования показал неравномерную плотность, низкие электро- и теплофизические характеристики образцов, а также низкую производительность и большие затраты при изготовлении подложек размером до 200 × 200 мм, поэтому для дальнейше-

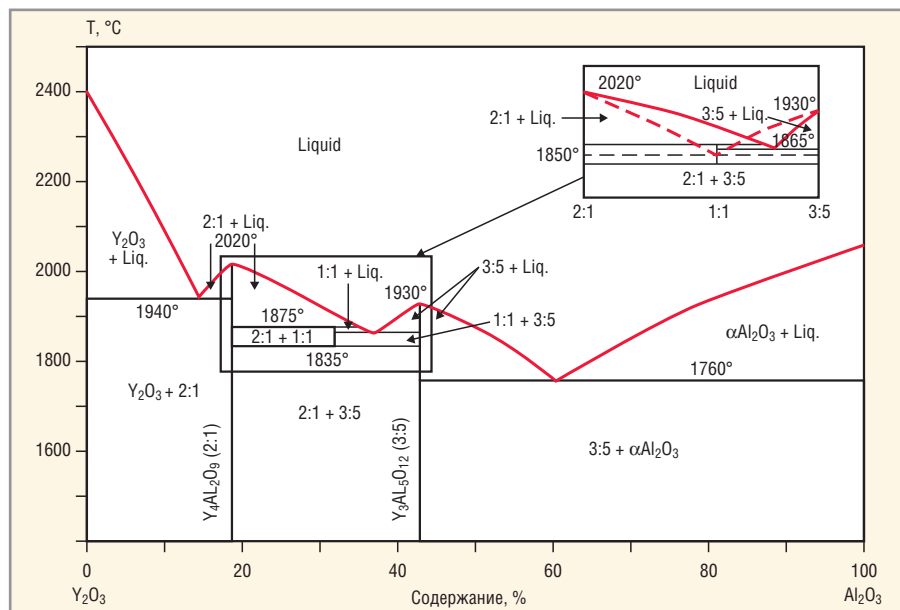


Рис. 1. Диаграмма состояния двухфазной системы $Y_2O_3-Al_2O_3$

го проведения экспериментальных работ мы использовали метод литья на плёнку.



Рис. 2. Установка литья подложек на плёнку фирмы КЕКО (Словения)

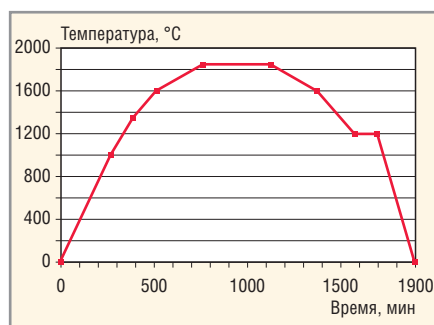


Рис. 3. Режим обжига алюминитридной керамики

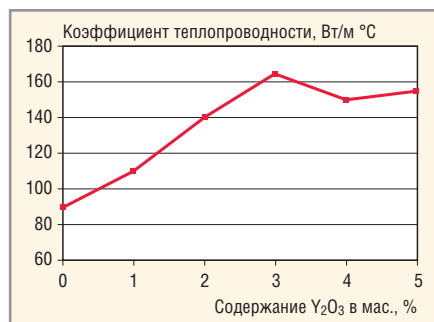


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности от количества Y_2O_3 спекающей добавки.

С этой целью были исследованы порошки AlN и Y_2O_3 фирм Starck (Германия), Tokuyama Soda (Япония), EnoMaterial (Китай) и Российского института структурной макрокине-тики и проблем материаловедения ИСМиПМ (г. Черноголовка, Московская обл.). Порошки исследовались методами элементного (EDS), рентгенофазового (XRD) и термического анализа, измерялась удельная поверхность методом БЭТ. Лучшими характеристиками и кристаллической структурой обладают порошки производства Starck и Tokuyama Soda, близким к ним по составу и свойствам является порошок, изготавливаемый в ИСМиПМ.

Для проведения экспериментальных работ выбраны порошки нитрида алюминия, изготовленные в ИСМиПМ, и в качестве спекающей добавки – оксид иттрия фирмы Starck.

Эксперимент проводился по следующей технологической схеме:

- подготовка сырья;
- приготовление шликера;
- изготовление сырых образцов;
- термическое удаление пластификатора;
- спекание образцов;
- мехобработка полученных подложек.

Для изготовления экспериментальных образцов исходные сухие компоненты измельчались и перемешивались на планетарной мельнице АПФ-3. Далее сухая масса AlN и Y_2O_3 перемешивалась с растворителем, диспергатором, пластификатором, связкой и пеногасителем в шаровой мельнице и

вакуумировалась, полученный шликер отливали на лабораторной установке литья КЕКО (рис. 2) лентами толщиной от 0,3 до 1,0 мм и шириной 215 мм, сушили при 30°C в течение 2 ч и резали на заготовки. Предварительный обжиг для удаления связки проводился в среде водорода при 500°C, а окончательный обжиг – в среде азота по специальному графику с выдержкой образцов в течение 5 ч при температуре 1850°C (рис. 3).

У полученных образцов измерялись электрофизические параметры и теплопроводность. Результаты измерений коэффициента теплопроводности представлены на графике (рис. 4).

Выводы

На основании проведённых исследований спечённых образцов и анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

- при изготовлении подложек методом литья на плёнку и окончательном обжиге в среде азота с выдержкой образцов в течение 5 ч при температуре 1850°C наибольшую плотность 3,26 г/см³, высокие электрофизические характеристики и теплопроводность 164 Вт/м К имели образцы со спекающей добавкой Y_2O_3 в количестве 3% мас.;
- наиболее эффективное удаление кислорода из кристаллической решётки нитрида алюминия достигается при эквивалентном соотношении оксида иттрия в количестве 5% мол. к 1% мол. оксида алюминия.

Для дальнейшего повышения коэффициента теплопроводности и улучшения теплофизических характеристик образцов требуется проведение дополнительных исследований в этом направлении.

Благодарим за помощь в проведении экспериментальных работ и исследованиях полученных образцов сотрудников кафедры силикатов и наноматериалов, а также Наноцентра ТПУ (г. Томск).

ЛИТЕРАТУРА

1. Slack G.A. J. Phys.Chem. Solids 34 (1973). P. 321–335.
2. Патент США № 4952535, кл. С 04 В 35/00, 1990.
3. Патент РФ № 2032642, кл. С 04 В 35/58, 1995.
4. Патент США № 5459113, кл. С 04 В 35/581, 1995.



Новости мира News of the World Новости мира

IDC-разъём для печатных плат с монтажной высотой 2,9 мм

IDC-соединители для печатных плат с монтажной высотой 2,9 мм, выполненные по технологии ножевых контактов, не требуют ручного монтажа проводов перед соединением. За счёт сдвоенного ножевого контакта обеспечивается герметичное и безопасное соединение. Таким образом можно избежать мест ручной пайки. Раз-



меры составляют $2,4 \times 2,2 \times 2,9$ мм. Колпачок вводит провод в клемму, одновременно уменьшая растягивающее усилие. Имеются варианты заглушек и приложений с последовательно-приоритетными цепочками (Daisy-Chain). Максимальная токовая нагрузка 5,5 А при 20°C. IDC-разъём рассчитан на нормы AWG 24, с диаметром провода 0,5 мм и максимальным диаметром кабеля 0,725 мм.

www.erni.com

DC/DC-преобразователи 30 Вт в формате 1/16-Brick

Фирма Murata Power Solutions представляет серию ULS изолированных DC/DC-преобразователей мощностью 30 Вт для монтажа на печатных платах. При диапазоне входного напряжения от 36 до 75 В (номинал 48 В) преобразователи в формате 1/16-Brick, отвечающие требованиям DOSA, имеют размеры $33,27 \times 23,11 \times 8,13$ мм. Серия ULS включает в себя две модели с выходным напряжением 12 или 15 В. Модель ULS-12/2.5-D48 с выходным напряжением 12 В выдаёт на выходе ток до 2,5 А и пригодна для регулируемых приложений с промежуточной шиной.

Модель с выходным напряжением 15 В выдаёт ток до 2 А. Выходное напряжение



может выставляться в пределах $-20...+10\%$ от номинального значения, с тем чтобы компенсировать падение напряжения. Серия имеет сетевую и нагрузочную стабилизацию с точностью $\pm 0,125\%$. Управление по входу обеспечивает выбор конфигурации с отрицательной или положительной полярностью.

Минимальная нагрузка не требуется. Модули обеспечивают изоляцию между входом и выходом 2250 В и обеспечивают тем самым защиту конечной нагрузки от пиков по току и напряжению, переходных процессов и влияния прочих помех на входе. Преобразователи сертифицированы по нормам UL/EN/IEC 60950-1 (2-я версия по допуску безопасности) для IT- и стандартных устройств. Рабочий температурный диапазон $-40...+85^\circ\text{C}$.

www.murata-ps.com

Датчики угла поворота поверхностного монтажа

Фирма Murata выпускает плоские датчики угла поворота поверхностного монтажа серии SV03. При размерах $11 \times 12 \times 2,1$ мм и весе 0,4 г эти датчики отвечают условиям применения в потребительской электронике, а также в автомобильных приложениях.

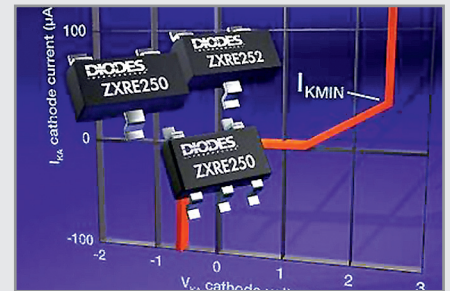


Примером применения является регулирование воздушного потока в домашнем кондиционере. Серия рассчитана на 300 000 рабочих циклов, удовлетворяя тем самым требованиям для приложений с длительным сроком службы. Углы поворота выдаются во всем диапазоне $333,3^\circ$ с точностью $\pm 2\%$. Датчики угла поворота рассчитаны на работу в температурном диапазоне $-40...+125^\circ\text{C}$. Рабочее напряжение составляет +5 В.

www.murata.eu

Программируемые шунт-регуляторы

При типичном значении катодного тока 40 мкА в диапазоне регулирования, программируемые шунт-регуляторы ZXRE250 и ZXRE252 фирмы Diodes обеспечивают повышение КПД. Это относится вообще к



стабилизации напряжения в системах энергоснабжения, но также и условиям использования режима нагрузки (PoL) в приложениях потребительской электроники.

С теми же электрическими характеристиками, что и элемент промышленного стандарта TL431, но с катодным током, в 10 раз меньшим, эти регуляторы с тремя выводами имеют температурную стабилизацию и могут работать с выходными токами до 100 мА. Регулируемый выход элементов может быть выставлен на любое напряжение от 2,5 до 36 В с помощью внешних резистивных делителей. Регуляторы могут служить непосредственной заменой стабилитронов.

ZXRE250 имеется в корпусах типа in SOT23 или SOT25, ZXRE252 поставляется с альтернативным расположением выводов в корпусе SOT23. Эти элементы имеют допуски 1 или 0,5% опорного напряжения в рабочем температурном диапазоне $-40...+125^\circ\text{C}$.

www.diodes.com

Плоские выпрямительные диоды для солнечных панелей

Размещённые в плоском корпусе типа PowerDI-5SP диоды SBR12U45LH фирмы Diodes рассчитаны на номинальный ток 12 А. Они предназначены для производителей солнечных панелей. Диод SBR (Super Barrier Rectifier) имеет максимальную высоту корпуса 0,75 мм. Это обеспечивает возможность его интеграции в солнечную панель.



Выпрямительные диоды работают во всём температурном диапазоне $-65...+200^\circ\text{C}$. Они выполняют требования тепловых испытаний стандарта Solar Safety IEC61730-2.

www.diodes.com