

Подложки из нитрида кремния как будущее силовой электроники

Большинство конструкций современных силовых модулей базируется на применении керамики, изготовленной на основе оксида (Al_2O_3) или нитрида (AlN) алюминия. Однако тенденции роста требований к повышению производительности заставляют разработчиков обратить внимание на прогрессивные альтернативы таким подложкам. Преимущества одного из примеров применения новых материалов наглядно показаны в приложениях компании xEV: здесь увеличение температуры кристалла с +150 до +200 °C привело к снижению коммутационных потерь на 10%. Кроме того, новые технологии корпусирования, в частности модули под пайку и с проволочными терминалами, делают имеющиеся в настоящее время подложки слабым звеном.

Манфред Гец
(Manfred Goetz)*

Перевод:
Владимир Рентюк

Для современной электроники важным и значимым фактором становится необходимость увеличения срока службы полупроводниковых приборов, особенно тех, что предназначены для использования в крайне жестких условиях, например таких как модули инверторов ветровых генераторов. Без сбоев и при любых условиях окружающей среды они должны иметь ожидаемый срок службы не менее 15 лет, поэтому разработчики подобных приложений ищут улучшенные по своим характеристикам подложки. Еще одним стимулирующим фактором развития новых технологий подложек является использование нового семейства полупроводниковых компонентов, выполненных на основе нитрида кремния (SiC). Уже первые модули, реализованные по SiC -технологии и оптимизированные в части корпусирования, показали снижение потерь на 40–70% по сравнению с традиционными решениями. Но достижение высоких показателей эффективности и потребность в новых методах корпусирования предусматривают и применение подложек из такого материала, как нитрид кремния (Si_3N_4). Таким образом, можно с большой уверенностью сказать, что вскоре эти тенденции ограничат роль традиционных подложек из оксида (Al_2O_3) и нитрида (AlN) алюминия, и уже в самом ближайшем будущем подложки, основанные на нитриде кремния, станут приоритетным выбором для разработчиков новых силовых модулей высокой мощности.

Высокая прочность на изгиб и сопротивление развитию трещин (трещиностойкость, или вязкость разрушения) в сочетании с хорошей теплопроводностью делают подложки на базе Si_3N_4 достойным и весьма эффективным вариантом при проектировании силовых электронных модулей высокой мощности. К перечисленным характеристикам керамики мож-

но добавить ее устойчивость к частичным разрядам и отсутствие растрескивания, которое, как известно, оказывает сильное влияние на поведение подложки в конечном приложении — здесь имеется в виду теплопроводность и способность выдерживать крайне резкие перепады температур.

Сравнение Si_3N_4 -керамики с конкурирующими технологиями

Основными характеристиками, которые играют главную роль при выборе изоляционных материалов для силовых модулей, являются их теплопроводность, прочность на изгиб и трещиностойкость¹.

Высокая теплопроводность имеет решающее значение для быстрого отвода тепла от полупроводниковых компонентов в силовом модуле. Прочность на изгиб важна для облегчения обработки и удобства использования керамической подложки в процессе ее обработки и корпусирования, в то время как сопротивление развитию трещины — трещиностойкость, или вязкости разрушения, — становится ключом к прогнозированию надежности.

Как видно из таблицы 1, керамика на основе 96%-ного оксида алюминия отличается высокой теплопроводностью, но слабыми механическими характеристиками. Однако для многих современных стандартных промышленных приложений теплопроводность в 24 Вт/мК вполне достаточна. Большим преимуществом керамики из нитрида алюминия, несмотря на ее довольно средние показатели надежности, является очень высокая теплопроводность на уровне 180 Вт/мК. Причина же ее невысокой надежности кроется в прочности на изгиб и малом сопротивлении развитию трещин, что практически аналогично характеристикам керамики, выполненной на основе Al_2O_3 .

Все возрастающие требования к повышению надежности стимулировали разработку циркониевой керамики — ZTA (Zirconia toughened alumina — оксид

*компания Rogers Corporation

Таблица 1. Сравнение характеристик керамических материалов

	Al_2O_3 (96%)	AlN	HPS9% (ZTA)	Si_3N_4
Теплопроводность, Вт/мК	24	180	28	90
Прочность на изгиб, МПа	450	450	700	650
Трещиностойкость, МПа·м ^{1/2}	3,8–4,2	3–3,4	4,5–5	6,5–7

¹ Терминология и единицы измерения приведены по ГОСТ 25.506-85 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении».

алюминия, легированный оксидом циркония, $Al_2O_3 + ZrO_2$). Данный тип керамики отличается значительно более высокой прочностью на изгиб и устойчив к образованию трещин. К сожалению, теплопроводность керамики ZTA находится в том же диапазоне, что и у обычной, более дешевой керамики на основе Al_2O_3 , по этой причине она имеет ограниченное применение в высокомоощных приложениях, для которых важен ценовой показатель, и ограничивается приложениями, требующими достижения более высокой надежности при умеренно большой удельной плотности мощности.

Сравнение (табл. 1) показывает, что керамика, выполненная на основе нитрида кремния (Si_3N_4), сочетает высокую теплопроводность с высокими механическими характеристиками. Типовая теплопроводность здесь находится на уровне 90 Вт/мК, при этом керамика имеет самую высокую из всех устойчивость к развитию трещин, поскольку ее коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} составляет 6,5–7 МПа·м^{1/2}. Эти свойства позволяют сделать вывод, что керамика на основе Si_3N_4 будет иметь высокую надежность при использовании в качестве подложек силового модуля с нанесением на нее соответствующей требованиям металлизации.

Сравнительная оценка надежности

Для проверки на надежность методом пассивного термоциклирования было подготовлено и впоследствии испытано несколько вариантов подложек с нанесенной металлизацией. Все комбинации подложек, подвергнутых сравнительным испытаниям, приведены в таблице 2. С целью получения достоверной информации без влияния конструктивных факторов, для каждой комбинации применялась одна и та же топология металлизации, включая нанесение слоя меди одинаковой толщины, который составлял $d(Cu) = 0,3$ мм. При этом для повышения надежности не было использовано никаких дополнительных конструктивных особенностей, таких как углубления или ступенчатое травление. Условия испытания были определены следующим образом:

- система из двух испытательных температурных камер;
- разность температур $\Delta T = 205$ К (перепад $-55...+150$ °С);
- время выдержки образца при каждой из температур: 15 мин;
- время нарастания температуры: не более 10 с.

Для проверки на наличие расслаивания и раковистого (конхоидального) излома все образцы были проверены с помощью ультразвукового микроскопа. Контроль проводился по следующему плану испытаний:

- для подложек из керамики на основе Al_2O_3 , HPS9% (ZTA) и AlN, все с металлизацией по технологии DBC (Direct Bonded Copper — прямо присоединенная медь), — после каждых 5 термоциклов;
- для подложек из керамики на основе Si_3N_4 с металлизацией по технологии AMB (Active Metal Brazing — метод активной пайки металлом) — после каждых 50 термоциклов.

Таблица 2. Варианты исполнения подложек, подвергнутых сравнительным испытаниям на устойчивость к термоциклированию

Вариант исполнения	Медь, лицевая сторона, мм	Керамика, мм	Медь, обратная сторона, мм	Количество термоциклов
Al_2O_3 DBC	0,3	0,38	0,3	55
HPS9% (ZTA) DBC		0,32		110
AlN DBC		0,63		35
Si_3N_4 AMB		0,32		5000

Раковистый (или конхоидальный) излом является типичной причиной отказа при испытаниях на устойчивость к циклическому воздействию температуры. Этот тип отказа был обнаружен на всех подложках, выполненных из Al_2O_3 -, HPS9%- и AlN-керамики с нанесением металлизации по технологии DBC. В общем случае данный отказ возникает из-за различных значений коэффициента теплового расширения меди и керамики, что и проявляется при термоциклировании. Наименьшая надежность при термических циклах наблюдалась для подложек из AlN-керамики с металлизацией по технологии DBC — 35 термоциклов. Подобный результат можно объяснить самым низким сопротивлением керамики этого типа к развитию трещин, поскольку ее коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} составляет лишь 3–3,4 МПа·м^{1/2}. Близкий результат и у керамики на основе Al_2O_3 с металлизацией по технологии DBC — 55 термоциклов. Наилучший показатель среди традиционных керамических материалов был у циркониевой керамики с HPS9% (ZTA) также с металлизацией по технологии DBC: по сравнению со стандартной керамикой из оксида алюминия она продемонстрировала двукратную устойчивость к циклическому воздействию температуры — 110 циклов.

Что касается подложек из Si_3N_4 -керамики с нанесением металлизации по технологии AMB, то у них за 5000 термоциклов не наблюдалось отказов. Надежность таких подложек по сравнению с подложками, выполненными из циркониевой керамики типа HPS9%, превышена в 45 раз. Столь впечатляющий результат в 5000 термоциклов достигнут за счет высокой стойкости нитрид-кремниевой кера-

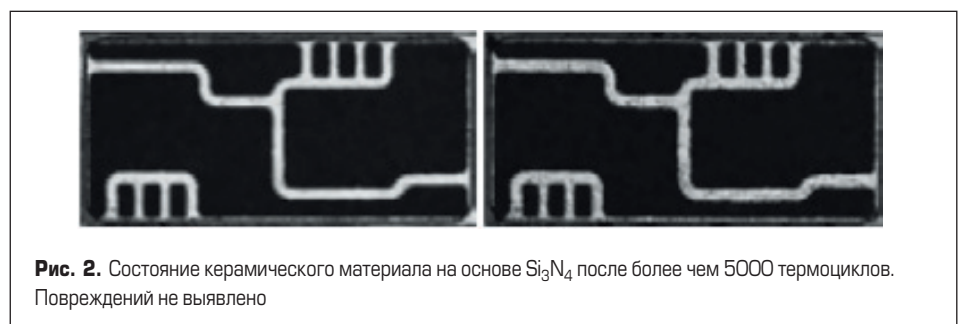
мики к развитию трещин, ее коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} лежит в пределах 6,5–7 МПа·м^{1/2}, хотя справедливости ради следует отметить, что ее прочность на изгиб несколько ниже, чем у циркониевой керамики HPS9%, — 650 против 700 МПа.

Полученные результаты подчеркивают, что прочность на изгиб керамики, используемой для сборки металлизированных подложек, не является основным фактором, определяющим срок ее службы. По всей видимости, можно утверждать, что наиболее важным для прогнозирования надежности фактором, становится такое физическое свойство керамики, как стойкость к формированию трещин — вязкость разрушения.

На рис. 1 и 2 приведены ультразвуковые снимки, показывающие состояние и механизмы разрушения после серии термических циклов подложек из материалов на основе HPS9% (ZTA) с металлизацией по технологии DBC и нитрида кремния с металлизацией по технологии AMB. На хрупком керамическом материале HPS9% (ZTA) мы видим образовавшийся дефект в форме пустотелой раковины, в то время как подложка из керамики на основе нитрида кремния даже после более чем 5000 термоциклов повреждений не имеет.

Сравнительная оценка тепловых характеристик

Для оценки теплового сопротивления (R_{th}) как фактора, влияющего на теплопередачу от кристалла полупроводникового прибора в систему охлаждения и через нее в окружающую среду, в ходе исследований были про-



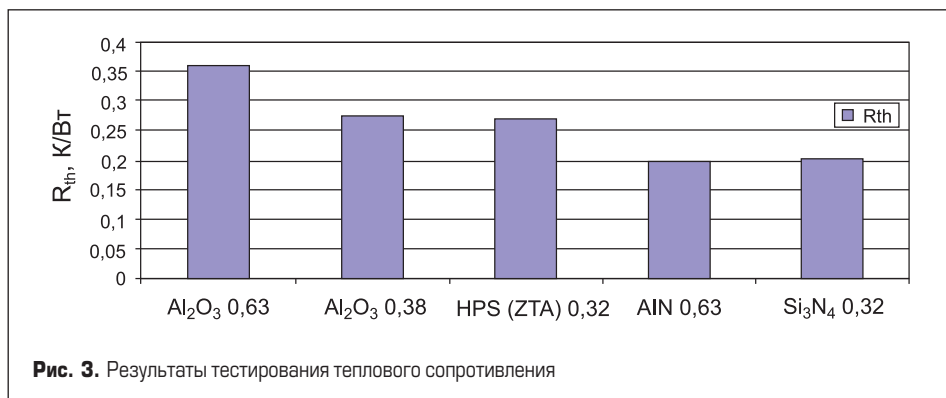


Рис. 3. Результаты тестирования теплового сопротивления

ведены измерения и получены экспериментальные данные от пяти групп нескольких вариантов исполнения образцов подложек с нанесенной на них металлизацией.

Результаты тестирования теплового сопротивления приведены на рис. 3. Все образцы, используемые для оценки теплового сопротивления R_{th} , металлизированы медью толщиной 0,3 мм с обеих сторон подложки. Как и ожидалось, подложка, выполненная из керамики на основе оксида алюминия толщиной 0,63 мм, показала наивысшее значение R_{th} , что обусловлено низкой теплопроводностью такой керамики — всего 24 Вт/мК.

В результате измерений установлено, что на образцах подложек из материала HPS9% (ZTA) толщиной 0,32 мм с металлизацией по технологии DBC и подложек из Al_2O_3 толщиной 0,32 мм, также с металлизацией по технологии DBC, значения теплового сопротивления R_{th} находятся в одном и том же диапазоне.

Керамика на основе AlN с металлизацией DBC, как обладающая наивысшей теплопроводностью 180 Вт/мК, несмотря на использование керамического слоя толщиной 0,63 мм, показала самое низкое значение теплового сопротивления R_{th} .

Теплопроводность керамики на основе Si_3N_4 имеет теплопроводностью 90 Вт/мК (табл. 1), что вдвое меньше, чем у AlN, и этот факт объясняет, почему подложка из нитрид-кремниевой керамики с металлизацией по технологии AMB показывает аналогичное керамике AlN с технологией DBC тепловое сопротивление R_{th} , только с толщиной в два раза меньше, чем у подложки, выполненной из нитрида алюминия, а именно 0,32 мм для Si_3N_4 -керамики по сравнению с 0,63 мм для керамики на основе AlN.

Выводы

На основании проведенных испытаний можно с уверенностью заявить, что возрастающий

спрос на силовые модули с более длительным сроком службы и требования по их более высоким тепловым характеристикам вполне могут быть реализованы с использованием такого высокопрочного и надежного изоляционного материала, как нитрид кремния Si_3N_4 .

Исследования показали, что надежность подложек из Si_3N_4 -керамики с металлизацией по технологии AMB (метод активной пайки металлом), которая оценивалась по устойчивости к воздействию температурных перепадов в широком диапазоне изменения температур ($-55...+150\text{ }^\circ\text{C}$), в 50 раз превышает показатели, доступные с применением такого традиционного на сегодня керамического материала, как циркониевая керамика HPS9% с металлизацией по технологии DBC. Надежность подложек, выполненных из Si_3N_4 -керамики, обеспечивают более высокие механические свойства этого материала, особенно присущая ему высокая вязкость разрушения (имеется в виду высокий коэффициент интенсивности напряжений K_{IC} , составляющий 6,5–7 МПа·м^{1/2}). Кроме того, более высокая прочность нитрида кремния позволяет изготавливать из этого материала подложки с более тонким поперечным сечением, что в результате дает тепловые характеристики, а именно уровень теплового сопротивления, сопоставимые с традиционными подложками из нитрида алюминия.

Оригинал статьи был опубликован на сайте www.bodospower.com.

Дистрибьютор Rogers Corporation в России — компания ООО «ЭлекТрейд-М».