

Разработка технологии изготовления металлических подложек

для мощных микросхем и силовых сборок

В последнее время интенсивно развивается новое направление электроники — силовая электроника, включающая интеллектуальные, или «разумные» схемы, а также модульные сборки на основе мощных биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT), мощных МОП полевых и СИТ-транзисторов [1, 2, 3]. Для пользователей и разработчиков силовой электроники транзисторный модуль IGBT представляет собой, прежде всего, силовой ключ в изолированном или неизолированном корпусе, обладающий набором определенных параметров.

Леонид Борыняк,
д. ф. – м. н.

Юрий Непочатов

nuk@belon.ru

Жесткая конкуренция в сфере производства компонентов силовой электроники требует от фирм-производителей улучшения параметров компонентов и совершенствования технологии изготовления.

Постоянное совершенствование кристаллов, применение новых технологических решений приводит к непрерывным эволюционным изменениям характеристик силовых ключей, способных работать в условиях жестких климатических и механических воздействий [4]. Эволюция модульныхборок для силовой электроники вызывает необходимость разработки конструкций и технологии изготовления силовыхборок с изолированным (беспотенциальным) металлическим основанием с одновременным решением вопроса отвода тепла и повышения устойчивости к воздействиям термоциклов.

При изготовлении мощных силовыхборок, микросхем и мощных гибридных интегральных схем (ГИС) в тех случаях, когда требуется обеспечить повышенный уровень отвода тепла, высокую механическую прочность и жесткость конструкции, используются схемные платы на металлических основаниях. Иногда в конструкциях силовыхборок для получения беспотенциальных металлических оснований необходимо, чтобы мощные транзисторы IGBT, МОП или СИТ были изолированы от металлического теплоотводящего основания, то есть установлены на него через слой диэлектрика, прикрепленный или нанесенный на металлическое основание или подложку.

Постановка задачи

Известно, что основная часть прикладываемых к транзисторам напряжений в силовых схемах падает на *p-n*-переходе, где в результате выделяется подавляющая часть электрической мощности, рассеиваемой

прибором. При этом прямо пропорционально потребляемой в нем мощности выделяется тепло и возникает проблема отвода тепла и охлаждения прибора. Улучшить охлаждение транзисторов в схемах возможно за счет применения в конструкции материалов с высокой теплопроводностью, к числу которых относятся медь и алюминий. Однако коэффициенты термического расширения (КТР) этих материалов в 2–3 раза отличаются от КТР кремния, что приводит к возникновению термомеханических напряжений в кристалле транзистора и к его разрушению. С целью уменьшения термомеханических напряжений необходимо провести выбор материалов и оптимального варианта конструкции схемы с точки зрения отвода тепла и технологии крепления кристалла в ней.

Выпускаемые в настоящее время силовые ключи можно условно разделить на 2 варианта по принципиальному конструктивному признаку — наличию или отсутствию базовой платы [5].

Медное основание стандартных модулей — это несущий элемент конструкции, с помощью которого производится его крепление к радиатору. В так называемых «базовых» вариантах конструкций силовых модулей керамическая изолирующая подложка устанавливается непосредственно на теплоотвод, а крепежные отверстия находятся в корпусе.

Массивная базовая плата (как правило, это медная пластинка толщиной 3 мм) позволяет увеличить теплоемкость модуля и способствует лучшему распределению тепла, выделяемого кристаллами.

К медному основанию припаивается одна или несколько керамических подложек с чипами. Кристаллы и силовые терминалы соединяются с керамикой методом пайки — это простейший способ отвода тепла и обеспечения низкого контактного сопротивления. Однако именно паяные соединения — основ-

ной источник отказов силовых ключей в случае, когда нагрузка циклически меняется в широких пределах. Причиной этого является разность КТР соприкасающихся слоев: медного основания, керамической подложки, кремниевых кристаллов, алюминиевых выводов чипов. Периодические колебания температуры и соответствующие изменения линейных размеров элементов конструкции приводят к возникновению термомеханических напряжений, разрушающих структуру паяных контактных областей.

Наибольшую площадь имеет соединение базовой платы и керамической подложки, поэтому его повреждение чаще всего приводит к выходу из строя силовых ключей. Вероятность разрушения конструкции модуля при воздействии термоциклов растет экспоненциально с увеличением рабочей температуры. Очевидно, что модули стандартной конструкции не предназначены для эксплуатации в жестких условиях, особенно при воздействии большого количества термоциклов в течение длительного периода эксплуатации.

Некоторые производители (например, EUPEC Infineon) в силовых ключах, ориентированных для эксплуатации в условиях воздействия термоциклов и вибрации, используют в качестве базовой платы композитные материалы (AlSiC или CuMo), которые гораздо лучше меди согласованы с керамикой по КТР.

Однако к недостаткам композитов относятся худшая теплопроводность и гораздо более высокая стоимость, что ограничивает их массовое применение.

Предполагается, что в будущем базовые платы будут из более дешевых композитных материалов на основе графита.

Одним из интересных конструкторских решений, применяемых в силовых модулях и позволяющих решить проблему, связанную с рассогласованием КТР медного основания и керамической подложки, является технология прижимного контакта SKiIP, разработанная компанией SEMIKRON в начале 1990-х годов и применяемая в производстве модулей SKiIP, SKiM, MiniSKiIP и SEMITOP [6] с использованием пружинных контактов. Эти контакты предназначены для коммутации широкого диапазона токов: от единиц миллиампер в сигнальных соединениях до десятков ампер в силовых цепях. Специальная прижимная рамка создает давление в местах наибольшего локального тепловыделения, обеспечивая равномерный отвод тепла на радиатор. При таком способе соединения воздействие термоциклов приводит к тому, что керамическое основание модуля «плавает» по слою теплопроводящей пасты относительно теплоотвода, не испытывая термомеханических напряжений. Надежность прижимного соединения определяется способностью сохранять контактные свойства в условиях внешних воздействий, таких как вибрации, перепады температуры, предельные рабочие температуры и коррозионно-активная атмосфера.

У модулей прижимного типа имеются преимущества, в первую очередь это:

- исключение паяных соединений при подключении плат управления и монтаже самих модулей;
- меньшие требования к позиционированию модуля относительно печатной платы;
- стойкость к термоциклированию;
- стойкость к вибрационным воздействиям, обусловленная гибкой структурой электрического соединения, отсутствие усталостных эффектов;
- стойкость к воздействию агрессивных коррозионно-активных сред.

Несмотря на широкое промышленное использование модулей прижимной конструкции, многие специалисты продолжают сомневаться в надежности такого способа подключения, особенно в условиях жестких внешних воздействий. Связано это с рядом недостатков, присущих данному методу. Базовым материалом для изготовления контактов служит пружинная медь, а для обеспечения надежного и стабильного соединения с печатной платой на контакты наносится олово, серебро или сплав никель-золото. Медные шины керамической платы модуля покрываются тонким слоем никеля. Выбор материала покрытия пружинного контакта, определяющего его контактные свойства, в первую очередь зависит от усилия сопряжения. Пружинные контакты используются, как правило, для слаботочных и низковольтных соединений.

Одной из главных проблем соединения, осуществляемого за счет прижима, является так называемая фреттинг-коррозия, вызываемая трением. Каждый цикл микроперемещения приводит к истиранию и абразивному удалению частиц окисного покрытия из зоны сопряжения контактов. В результате образуется новая контактная поверхность, имеющая высокую склонность к окислению. Вследствие многократного повторения этого процесса возникает естественный слой толщиной в несколько нанометров, состоящий из окисных частиц. Проникновение этих вкраплений в зону сопряжения раздвигает контактные поверхности и увеличивает контактное сопротивление. В этом случае любые изменения поверхностных свойств сопрягаемых материалов могут повлиять на их контактные характеристики. Колебания переходного сопротивления более выражены у сопрягающихся поверхностей с тонкослойным покрытием. Кроме того, у прижимных соединений под действием электрического тока высокой плотности возникает процесс диффузионного переноса массы, или так называемая электромиграция, одна из основных причин разрушения металлических токопроводящих пленок, что может являться причиной образования паразитных электрических связей.

Поэтому продолжается поиск новых технических решений, которые позволили бы исключить из состава конструкции силового модуля самое ненадежное в условиях воздействия термоциклов соединение — паяное соединение базовой платы и керамической подложки.

Одним из вариантов такой конструкции силового модуля без применения пайки керамической подложки к базовой плате мо-

жет быть конструкция, использующая металлические подложки с нанесенным слоем керамического материала, предлагаемая авторами.

Известна технология изготовления схемных плат на эмалированных металлических подложках, включающая изготовление металлического основания, нанесение и прилипание эмали и последующее формирование рисунка схемы [7].

К числу достоинств схемных плат на металлических эмалированных основаниях относятся:

- возможность создания схемных плат больших размеров;
- снижение стоимости подложек более чем в 5 раз, по сравнению с керамическими подложками;
- улучшение отвода тепла от теплонагруженных элементов схемы.

К недостаткам схемных плат на эмалированных подложках следует отнести наличие пор, в которые попадают электролиты в процессе изготовления металлизационного рисунка, из-за чего возникают утечки и ухудшаются изоляционные свойства диэлектрического покрытия при работе ГИС. Кроме того, при воздействии термоциклов, из-за различия коэффициентов термического расширения (КТР), возникает растрескивание и откалывание эмали от металла.

Металлические подложки с более плотным диэлектрическим слоем получают из анодированных алюминиевых оснований. Процесс включает вырубку металлического основания, его анодирование с целью создания слоя окисла и последующее формирование рисунка на этом слое [8].

К числу недостатков схемных плат на анодированных алюминиевых подложках относятся:

- высокая трудоемкость изготовления, связанная с необходимостью шлифовки и полировки алюминиевых подложек перед анодированием;
- особые требования к составу алюминия;
- различие в КТР алюминиевой подложки и окиси алюминия, полученной в результате анодирования, что является причиной растрескивания слоя диэлектрика при термообработке.

Известен способ изготовления мощных микросхем на металлокерамическом основании, включающий формирование на металлической подложке слоя керамики толщиной 0,076–0,254 мм путем термического напыления сплавленного порошкообразного керамического материала и его шлифования, дальнейшее формирование рисунка схемы на керамическом слое с помощью осаждения металлической пасты и последующий отжиг при высокой температуре для сплавления металла в пасте [9].

Упомянутый способ обеспечивает получение покрытий на металлических подложках из стали, чугуна и цветных металлов, хорошую адгезию покрытия к подложке и возможность проведения в процессе изготовления микросхем термообработок при температурах ~600–800 °С.

Однако для мощных микросхем, полученных по этому способу, характерна низкая стойкость к тепловому удару, так как металлическая основа и керамическое покрытие имеют резкую границу раздела и значительно отличаются по величине КТР. При проведении термообработок в процессе изготовления микросхем при температурах 600–800 °С из-за различия КТР возникает растрескивание и откалывание керамического слоя от металла. Кроме того, структура получаемого керамического слоя после его напыления — пористая, что приводит к проникновению в поры в процессе выполнения технологических операций применяемых растворов электролитов, а в процессе эксплуатации — паров влаги, которые способствуют образованию утечек тока и деградации параметров микросхем. Высокая шероховатость поверхности керамического слоя не позволяет получать микросхемы по тонкопленочной технологии с размерами элементов 10–100 мкм.

Цель данной работы — разработка технологии изготовления металлических подложек, исключающей растрескивание и откалывание керамического слоя от металлической подложки, уменьшающей пористость слоя керамики, обеспечивающей возможность изготовления металлизационных рисунков по тонкопленочной технологии, повышающей качество и технологичность изготовления мощных микросхем и силовых сборок.

Экспериментальные исследования по разработке технологии изготовления металлических подложек

Для достижения технического результата по получению металлических подложек для силовыхборок и мощных микросхем вначале на металлическую подложку наносили металлический подслои с помощью плазменного напыления из порошкообразного материала, на который напыляли диэлектрический слой из смеси окиси алюминия с алюмосиликатным стеклом, а после шлифования полученного диэлектрического слоя на него наносили слой боросиликатного стекла и затем подвергали структуру диэлектрического слоя пропитке стеклом и глазурированию. Причем пропитку стеклом и глазурирование проводили одновременно в течение одного технологического процесса термообработки. Мощная мик-

росхема со сформированной металлизационной структурой и смонтированным мощным транзистором, изготовленная на разработанной металлической подложке, схематически изображена на рис. 1.

Сущность разработанной технологии, приведенной в [10], состоит из нескольких стадий изготовления и заключается в следующем: на металлическую подложку 1 (рис. 1) наносят металлический подслои 2 толщиной 50–100 мкм путем напыления порошкообразного металлического материала в аргоно-азотной плазме. На подслои 2 также плазменным методом наносится слой диэлектрического материала 3 толщиной 200–250 мкм, который шлифуют до толщины 190–240 мкм для получения плоской поверхности, а затем на отшлифованную поверхность диэлектрического слоя наносят слой стеклянного порошка 4 со связующим веществом толщиной 35–40 мкм. Далее проводят двухступенчатую термообработку: сначала осуществляют предварительный отжиг при температуре 300–600 °С, а затем производят расплавление при температуре 900 °С. В процессе проведения предварительного отжига связующее вещество выгорает, а во время проведения второй стадии термообработки стеклянный порошок расплавляется, превращается в жидкость и пропитывает керамический слой. После остывания избыточная масса стекла застывает на поверхности диэлектрического слоя, формируя слой глазури 4. Далее на полученную многослойную структуру в вакууме напыляются резистивный и металлизационный слои, по которым методом фотолитографии формируют металлизационный рисунок, включающий резисторы 5 и проводники 6.

В качестве материала металлической подложки была выбрана сталь марки 08КП, широко используемая для производства эмалированной посуды. После предварительной обработки подложки размером 30×48×1 мм струей песка, последующей очистки в моющих растворах и сушки, на установке плазменного напыления с помощью аргоно-азотной плазмы на подложку наносили металлический подслои толщиной 50–100 мкм. В процессе напыления наносимый металл плавился низкотемпературной аргоно-азотной плазмой, расплывался на мельчайшие капли и струей смеси газов из аргона и азота переносился на подложку.

Далее на металлический подслои из порошка ПН70Ю30 с помощью аргоно-азотной плазмы с температурой 1200–15 000 °С со скоростью 330–400 м/с напыляли слой керамики толщиной 200–250 мкм. При этом для обеспечения равномерности напыления металлическую подложку располагали на расстоянии 100–120 мм от среза сопла горелки плазменной установки до напыляемой поверхности.

В качестве диэлектрического материала для напыления использовали смесь кристаллического порошка глинозема марки Г-ОО (ГОСТ 6912-74) и алюмосиликатного стекла. Глинозем марки Г-ОО имеет величину кристаллов 40–60 мкм, химический состав такого глинозема таков: Al_2O_3 — 98,57%, Fe_2O_3 —

0,03%, щелочи — 0,4% и посторонних примесей до 1%. Размер зерен алюмосиликатного стекла находился в пределах 60–70 мкм, в химический состав стекла входили следующие окислы: SiO_2 — 61,5%, Al_2O_3 — 18,7%, CaO — 11,4%, MgO — 8,2%, Na_2O — 0,1%. Соотношение компонентов в смеси составляло: глинозема Г-ОО — 90–96%; алюмосиликатного стекла — 10–4%.

Затем для обеспечения плоскостности поверхности диэлектрического слоя полученную структуру шлифовали с помощью алмазных кругов. Режим обработки алмазными кругами выбирали в зависимости от величины припуска, который должен быть удален с поверхности керамики, и требуемого качества обработки. Экспериментальным путем было определено, что достаточной величиной припуска для удаления неровностей, исправления геометрической формы пластин и получения необходимой плоскостности является припуск, равный 10 мкм.

После шлифовки с помощью профилометра модели 201 и микроинтерферометра Линника МИИ-4 измеряли шероховатость поверхности диэлектрического слоя. Оценка шероховатости непосредственным измерением высоты микронеровностей показала, что высота неровностей R_z находится в пределах 2,0–3,2 мкм, что соответствует 8-му классу чистоты поверхности.

На отшлифованную поверхность диэлектрического слоя из окиси алюминия и алюмосиликатного стекла методом теплового переноса осаждали пленку толщиной 65–70 мкм боросиликатного стекла следующего состава: SiO_2 — 80,5%, Al_2O_3 — 2,5%, Na_2O — 4,1%, B_2O_3 — 12,8%, K_2O — 0,5%. Пленку стекла изготавливали из порошка боросиликатного стекла, доведенного до жидкой консистенции добавлением связующего. В качестве связующего для приготовления стеклянной пасты использовался биндер, представляющий собой раствор коллоксилина в изоамилацетате вязкостью 17–23 с (при измерении на приборе ВЗ-4), сухой остаток составлял 2–3%. Отвешенный стеклянный порошок загружали в стальной барабан, куда добавляли необходимое количество биндера и амилацетата, после чего смесь для улучшения гомогенизации перемешивали на валках в течение 4 часов. Полученную жидкую смесь выливали на полиэтиленовую пленку в виде ленты и с помощью специального скребка равномерно распределяли по ее поверхности. Затем подсушивали ленту на воздухе в течение 15 мин, в результате чего происходило испарение растворителя из нанесенной стеклянной пасты. Перенос порошкового покрытия на металлокерамическое основание производили следующим образом: подогретую поверхность керамического слоя смачивали растворителем (ксилолом) и керамический слой соединяли с полиэтиленовой лентой с нанесенным слоем стеклянного порошка, потом выдерживали под некоторым давлением под ручным прессом. В результате достигалось сцепление стеклянного слоя с металлокерамическим основанием и осуществлялся перенос пленки стеклянного порошка на металлокерамическую подложку.

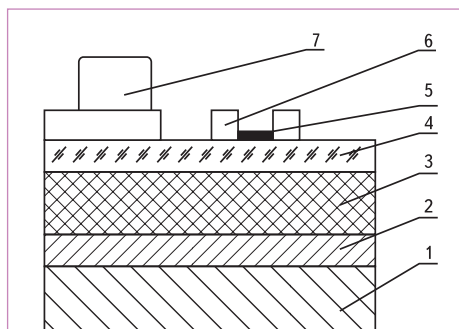


Рис. 1. Мощная микросхема на металлической подложке

Далее проводили двухступенчатую термообработку: сначала осуществляли предварительный отжиг при температуре 300–600 °С в течение 30 минут, а затем — расплавление при температуре 900 °С в течение 30 минут в атмосфере азота. В процессе проведения предварительного отжига связующее вещество удалялось из смеси стеклянного порошка и связующего, а во время проведения второй стадии термообработки оставшийся стеклянный порошок без связующего вещества расплавлялся, превращаясь в жидкость, которая проникала в поры керамического слоя, пропитывая его. Избыточная масса расплавленного стеклянного порошка, растекаясь по поверхности подложки, обеспечивала после охлаждения и отверждения формирование слоя глазури толщиной 35–40 мкм, шероховатость поверхности которой составляла 12–13-й класс чистоты обработки, что достаточно для получения металлизационного рисунка по тонкопленочной технологии.

В результате проведенной пропитки путем обжига открытая пористость диэлектрического покрытия из керамики на основе окиси алюминия и алюмосиликатного стекла снизилась с 20,3% до 0,1–0,3%.

Далее полученную структуру очищали путем кипячения в перекисно-аммиачном растворе (H₂O₂ — 500 мл, H₂O — 500 мл, NH₄OH — 8 мл) с последующей промывкой в деионизованной и дистиллированной воде и затем термическим вакуумным напылением осаждали на нее сначала через маску резистивный сплав РС-3710, сплошные слои хрома (0,3–0,5 мкм) и меди (7–8 мкм). По напыленным слоям проводили фотолитографию, в результате чего получили рисунок схемы, который гальваническим способом покрывали слоем золота толщиной 2–3 мкм. На изготовленную таким образом схемную плату устанавливали навесные элементы (транзисторы, диоды, конденсаторы) методами пайки и сварки.

При определении материала металлического подслоя была проведена проверка нескольких порошкообразных материалов. В качестве подслоя использовались порошки алюминия, молибдена, стали марки Ст3, пружинной стали марки 65Г, нержавеющей стали марки Х18Н9Т, вольфрама, нихрома, сплава ПН70Ю30 (рис. 2).

В результате экспериментальной проверки было установлено, что наилучшим является порошкообразный материал ПН70Ю30 толщиной 50–100 мкм, который относится к интерметаллическим соединениям системы «никель – алюминий». Каждая частица этого порошка представляет собой интерметаллид заданного стехиометрического состава. Покрытие ПН70Ю30 имело высокую термостойкость после напыления, что позволило впоследствии без каких-либо специальных мер по охлаждению подложки напылять слой керамики.

Температура плавления ПН70Ю30 составляет 1600 °С, микротвердость — порядка 400 кг/мм². В гранулометрический состав порошка входят частицы с размером в пределах 20–70 мкм. Форма частиц полиэдрическая, благодаря чему относительно высоко-

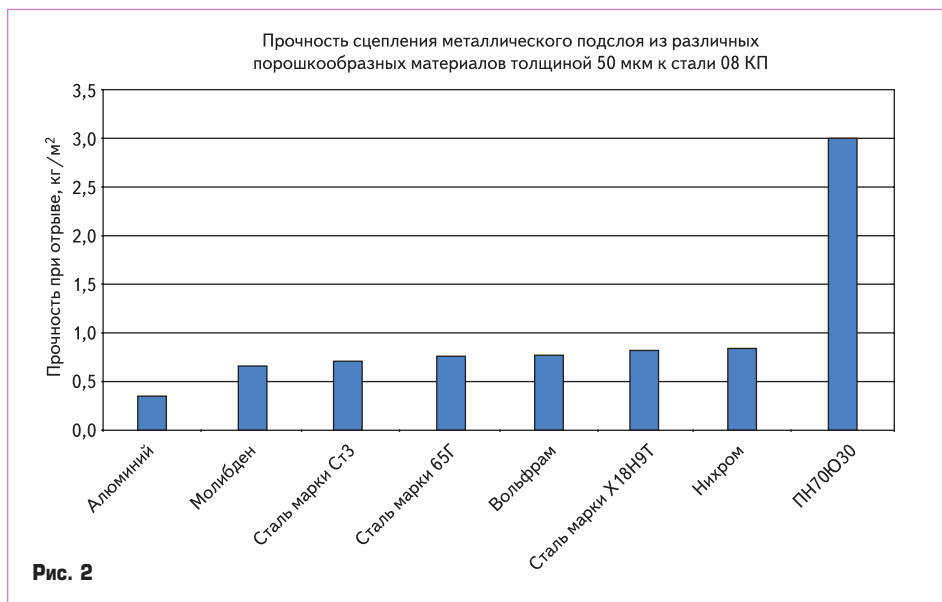


Рис. 2

дисперсный порошок имеет хорошую сыпучесть и не вызывает никаких технологических затруднений при напылении. Прочность сцепления со сталью 08КП на отрыв составила 3–3,5 кг/мм² (рис. 2).

В отличие от плазменных покрытий из нихрома и нержавеющей стали, которые имеют крайне неоднородную структуру и, как следствие, ограниченный уровень рабочих температур (800–900 °С), покрытие из порошкообразного материала ПН70Ю30 представляет собой однородную структуру, не окисляется в условиях обдува смесью газов из аргона и азота при температуре до 1530 °С, что позволяет сразу же напылять диэлектрический слой из керамики.

В процессе плазменного напыления керамики из смеси глинозема со стеклом частицы стекла и окиси алюминия сближаются настолько, что между ними начинают действовать силы электростатического взаимодействия, при этом катионы металла стремятся притянуть анионы стекла. При благоприятном соотношении радиусов анионов и катионов и их зарядов силы притяжения оказываются достаточными, чтобы сблизить структурные элементы стекла и окисла алюминия настолько, что при наличии акцепторных и донорных окислов становится возможным образование

парно-электронной координационной связи. В результате происходит смачивание частиц окиси алюминия стеклом и образование прочного соединения, обусловленного проявлением координационно-ковалентных связей. Кристаллы окиси алюминия оказываются окруженными оболочкой из стекла. Взаимодействие полученных «коконов» друг с другом при высокой температуре процесса способствует более прочному соединению кристаллов окиси алюминия, как между собой, так и с металлическим подслоем. Из-за высокой температуры процесса металлический подслой спекался с керамикой, при этом происходила диффузия и взаимодействие окислов металла с соответствующими компонентами керамики с образованием физико-химического соединения. Прочность такого соединения выше по сравнению с прочностью сцепления керамики с металлическим основанием в методе, описанном в [9], где обеспечивается лишь механическое сцепление за счет кинетической энергии частиц, летящих с большой скоростью из сопла плазменной установки, и за счет тепловой энергии, получаемой от плазмы, способствующей расплавлению частиц и их сцеплению при остывании.

Полученное двухслойное покрытие из слоя металла из порошкообразного материала



Рис. 3

ПН70Ю30 и диэлектрического слоя из керамики на основе порошка глинозема марки Г-00 с алюмосиликатным стеклом выдерживает многократное термоциклирование в широком диапазоне температур (рис. 3).

Как видно из полученных данных, при воздействии жестких термоциклов в режиме +600...+20 °С образцы, изготовленные в соответствии с разработанной технологией, выдерживают до 132 циклов, что существенно улучшает термостойкость созданной многослойной структуры на металлической подложке.

Слой керамики, напыленный без добавления алюмосиликатного стекла, имел высокую пористость, поликристаллическую структуру, состоящую из множества беспорядочно ориентированных кристаллов и пор между ними. Поэтому путь прохождения теплового потока в такой структуре удлиняется, так как он распространяется не прямо перпендикулярно от источников тепла в виде теплонагруженного кристалла или мощного резистора к теплоотводу (металлическая подложка), а из-за наличия пор — по некоторому извилистому пути от одного кристалла окиси алюминия к другому, контактирующему с ним, но находящемуся не на прямой линии, соединяющей источник тепла и теплоотвод. В результате этого возрастает тепловое сопротивление слоя керамики.

Использование в разработанном авторами техническом решении в качестве диэлектрического слоя напыленного керамического материала из смеси кристаллического порошка глинозема и алюмосиликатного стекла, а также последующая пропитка полученной структуры боросиликатным стеклом позволили заполнить поры между кристаллами окиси алюминия, повысить теплопроводность слоя керамики, сделать путь распространения тепла прямым и кратчайшим между источником и теплоотводом и тем самым снизить тепловое сопротивление диэлектрического слоя.

Кроме того, наличие в предложенном авторами техническом решении металлического подслоя позволило улучшить условия отвода тепла от тепловыделяемых элементов мощных микросхем и силовых сборок, так как он является дополнительным растекателем тепла. Поскольку тепловой поток от источника тепла к теплоотводу распространяется по конусу, то при прохождении тепла сквозь толщину подслоя площадь сечения теплового потока на выходе из слоя превышает площадь сечения на входе, что расширяет площадь растекания тепла при входе в металлическую подложку.

Экспериментальным путем с помощью тепловизора была измерена температура поверхности резистора, находящегося на металлокерамическом основании, изготовленном в соответствии с разработанной технологией. Резисторы, сформированные из резистивного сплава РС-3710 толщиной 0,05 мкм размером 5×10 мм с контактными площадками из металлизационной структуры Cr-Cu суммарной толщиной 3–5 мкм, покрытой пленкой золота толщиной 1–3 мкм, включа-

лись в рабочий режим. Температура измерялась через 15 мин после включения резистора при подводимой мощности 1 Вт и достижения стационарного режима работы. При использовании металлокерамического основания, изготовленного в соответствии с разработанной технологией, температура в средней точке резистора на 80–120 °С ниже, чем у резистора, размещенного на металлокерамическом основании, изготовленном по методу, изложенному в [9]. Благодаря снижению температуры у резистора, находящегося на поверхности металлокерамического основания, изготовленного в соответствии с предлагаемым авторами способом, возможно в 2–4 раза увеличить допустимую мощностную нагрузку при тех же физических размерах резистора или уменьшить его размеры.

Заключение

Металлические подложки, полученные по разработанной технологии, были использованы при изготовлении экспериментальных образцов силовых ключей с применением мощных СИТ-транзисторов и образцов мощных ГИС. Получены положительные результаты работоспособности перечисленных устройств до и после проведенных механо-климатических испытаний.

Изготовление силовых сборок и мощных ГИС на разработанных металлических подложках позволило улучшить распределение тепла от резисторов и кристаллов транзисторов, снизить тепловое сопротивление и повысить надежность работы.

Определение шероховатости поверхности глазури непосредственным измерением высоты микронеровностей показали, что высота неровностей R_z находится в пределах 0,1–0,2 мкм, это соответствует 12–13-му классу чистоты поверхности. Повышение класса чистоты обработки поверхности с 8-го до 13-го позволило выполнять процессы очистки в растворах, процессы вакуумного напыления тонких пленок из резистивных сплавов и проводящих слоев из хрома и меди, фотолитографию и гальваническое наращивание золота, что в результате обеспечило получение топологических рисунков перечисленных устройств с минимальным размером элементов 10 мкм. В процессе изготовления металлизационных рисунков не происходило проникновения травящих растворов и солей электролитов в диэлектрический слой, отсутствовали утечки, короткие замыкания и деградация параметров элементов при длительной работе в эксплуатационных режимах.

Испытания на теплоустойчивость показали, что образцы микросхем с использованием металлических подложек, изготовленных по предлагаемому способу, выдержали более 400 термоциклов в режиме +175 °С (воздух, 30 минут) — +20 °С (вода, 10 минут).

Выводы

Таким образом, разработанная технология металлических подложек для силовых сборок и мощных микросхем на металлических ос-

нованиях из дешевой стали марки 08КП с последовательно напыленными с помощью аргоно-азотной плазмы слоями из порошкообразного металлического материала ПН70Ю30 и диэлектрического материала из смеси кристаллического порошка глинозема марки Г-00 и алюмосиликатного стекла с последующим покрытием слоем глазури на основе боросиликатного стекла и формированием рисунка схемы позволяет улучшить термостойкость полученной многослойной структуры, исключить растрескивание и отслоение слоя керамики от металлической подложки при воздействии термоциклов, снизить пористость покрытия из окиси алюминия, устранить проникновение растворов в поры, утечки тока и короткие замыкания, повысить класс чистоты обработки поверхности и обеспечить формирование металлизационного рисунка по тонкопленочной технологии, а также улучшить распределение тепла от кристаллов транзисторов, снизить тепловые сопротивления и повысить надежность работы мощных микросхем и силовых сборок.

1. Металлические подложки со сформированным на диэлектрическом слое металлизационным рисунком позволяют устанавливать методом пайки силовые чипы и токоведущие шины и обеспечить минимальное тепловое сопротивление и высокую термостойкость.
2. Металлические подложки можно применять в конструкциях силовых модулей, мощных микросхем и ГИС.

Литература

1. Шукина И., Некрасов М. Новая технология РТ IGBT против мощных полевых транзисторов // Силовая электроника. 2004. № 1.
2. Пастухов В. Современные российские силовые модули // Современная электроника. 2006. № 8.
3. Бормотов А., Мартыненко В., Мускатиньев В. Некоторые вопросы эксплуатации IGBT-модулей // Компоненты и Технологии. 2005. №5.
4. Колпаков А. NPT, Trench SPT... Что дальше? // Силовая электроника. 2006. № 3.
5. Колпаков А. SKJM 63/93 — специализированные силовые модули для электроаппарата // Силовая электроника. 2007. № 4.
6. Колпаков А. Надежность прижимных соединений силовых модулей в условиях агрессивных промышленных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.
7. Спектор. Платы, позволяющие разместить свыше тысячи ИС // Электроника (США, русский перевод). 1979. № 6.
8. Блинов Г. А., Бутузов С. С., Воженин И. Н. Изготовление анодированных алюминиевых подложек // Электронная промышленность. 1976. Вып. 5/53.
9. Толстоупленочные схемы. Патент Великобритании № 1461031, Кл. H1R М.к. НО5К 3/12, заявлен 7 января 1975 г., опубликован 13 января 1977 г.
10. Боршняк Л. А., Непочатов Ю. К. Способ изготовления микросхем. Заявка № 2008106682. Приоритет от 20.02.2008.