

Исследование повышения адгезии многослойных металлизационных покрытий к диэлектрическим подложкам гибридных интегральных схем

В настоящее время широкое распространение имеют гибридные интегральные схемы (ГИС) СВЧ-диапазона, представляющие собой сочетание пленочных и навесных элементов.

**Леонид Борыняк,
д. ф.-м. н., профессор
Юрий Непочатов**

nuk@belon.ru

Введение

Для получения пленочных элементов на отполированные керамические подложки осаждают проводящие и резистивные слои, из которых формируют многослойную металлизационную систему ГИС СВЧ.

Одной из важных проблем является обеспечение высокой адгезии к подложке пленочных покрытий.

В данной работе рассматриваются методы увеличения адгезии структуры «хром–медь» к подложкам из керамики с содержанием окиси алюминия 96% (22ХС) и 99,5% (поликор) за счет высокотемпературной прокалки чистых подложек в среде увлажненного водорода при температуре 1350–1600 °С в течение 1 часа и низкотемпературной обработки плат с пленочным покрытием при температуре 200–600 °С в течение 10 минут, а также способ повышения адгезии между слоями хрома и меди путем изменения технологии напыления.

В процессе проведения экспериментов установлено, что для оценки адгезионной прочности пленочного покрытия подложки наиболее пригоден метод прямого отрыва медного стержня, припаянного к исследуемым образцам с использованием низкотемпературного припоя ПОС-61, при этом скорость перемещения рабочего зажима разрывной машины должна составлять 10 мм/мин.

Описываются метод оценки адгезии пленочных покрытий и конструкция оправки для пайки стержней к платам. Приведены результаты измерений величины адгезии многослойной металлизационной системы на керамических подложках:

- отожженных при высокой температуре;
- с нанесенным промежуточным слоем по разработанной новой технологии напыления;
- с топологическим рисунком после проведения низкотемпературной обработки.

Постановка задачи

Технологический процесс изготовления ГИС СВЧ состоит из нескольких основных этапов. Это:

- а) подготовка диэлектрической подложки;

- б) последовательное формирование на подложке слоев резисторов, контактных площадок, проводников, защитных слоев;

- в) подгонка по номиналам тонкопленочных резисторов;

- г) установка навесных компонентов схемы;

- д) сборка и герметизация.

В процессе последовательного напыления тонких пленок, при монтаже навесных элементов на подложку, а также при последующей эксплуатации ГИС СВЧ в условиях циклически изменяющихся температур многослойные металлизационные структуры подвергаются воздействию термических и механических напряжений. Одна из основных проблем при получении пленочных элементов ГИС СВЧ — это обеспечение высокой адгезии, как всей структуры к подложке, так и адгезии между отдельными слоями внутри многослойной металлизационной структуры.

Основной конструкции ГИС СВЧ является диэлектрическая подложка (аморфная, поликристаллическая или монокристаллическая), на которой размещаются пленочные пассивные и навесные активные и пассивные элементы. Подложка обеспечивает не только размещение этих элементов, но и сама является функциональной частью ГИС СВЧ, так как величина емкостных и индуктивных связей, геометрических размеров микрополосковых линий определяются диэлектрической постоянной материала и толщиной подложки. Кроме того, подложка по своим свойствам должна быть совместима с процессами осаждения пленок, а также со всеми последующими процессами и обработками при изготовлении ГИС СВЧ. Материалы пленочных микрополосковых линий, резисторов и контактных площадок должны обладать металлургической совместимостью с материалами, применяемыми для монтажа ГИС СВЧ, высокой адгезией к диэлектрической подложке, а вся совокупность слоев должна обеспечивать минимальные потери СВЧ-энергии в микрополосковых линиях ГИС СВЧ [1]. В связи с тем, что ни один из металлов периодической таблицы элементов Менделеева не удовлетворяет полностью всем требованиям,

предъявляемым к материалам пленок, в ГИС СВЧ применяют многослойные системы из нескольких материалов, как правило, из трех слоев, нижний из которых обеспечивает необходимую адгезию к подложке, средний — высокую проводимость, третий, верхний — хорошую коррозионную стойкость и необходимые режимы пайки и сварки. Поэтому необходимо, чтобы все слои системы по исходной адгезии не только выдержали операции пайки или сварки, но также сохранили неизменным значение адгезии к концу технологического цикла.

Для удовлетворения всей совокупности перечисленных требований по обеспечению адгезионной прочности многослойной металлизационной структуры ГИС СВЧ подложка должна обладать гладкой поверхностью, высокой плоскостностью, физической стойкостью при нагревании до высоких (>500 °C) температур, химической инертностью, температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), по возможности, близким к ТКЛР формируемых слоев. Целью настоящей работы является разработка методов повышения адгезии многослойной металлизационной системы «хром–медь–золото» к керамической подложке на основе Al_2O_3 .

Экспериментальные исследования по повышению адгезии

В настоящее время создано несколько моделей, объясняющих механизм сцепления пленок с подложкой, хотя всем им присущ ряд недостатков [2].

В соответствии с одной из созданных моделей адгезия осуществляется за счет химических и водородных связей [3], поэтому при напылении металлических пленок используют более активно окисляющиеся металлы (Ti, Cr), образующие прочную химическую связь с кислородосодержащей подложкой из керамики.

Существует несколько методов улучшения адгезионной прочности пленок, таких как высокая скорость напыления и различные обработки подложек [4, 5, 6, 7].

Авторы статьи исследовали способы повышения адгезии многослойной металлизационной структуры ГИС СВЧ за счет:

- 1) высокотемпературного обжига подложек перед напылением;
- 2) низкотемпературной термообработки плат с уже сформированной многослойной металлизационной структурой;
- 3) разработки новых технологических режимов напыления пленочных покрытий.

Исследование влияния высокотемпературного отжига на свойства керамических подложек и адгезию

Предполагалось, что высокотемпературный отжиг подложек при температуре, соответствующей размягчению стеклофазы (>1100 °C), будет способствовать восстановлению поверхностных окислов, удаленных на предыдущих стадиях изготовления подложек (механичес-

кая шлифовка, полировка, химическая обработка) и, благодаря этому, в дальнейшем в процессе напыления будет происходить образование тонкого окисного слоя в наносимой пленке, за счет чего можно обеспечить прочную химическую связь покрытия с подложкой.

Для экспериментальных исследований были использованы подложки двух видов: из поликора с содержанием окиси алюминия 99,5% и керамики с содержанием окиси алюминия 96% (марка 22ХС). Подложки отжигались в конвейерной печи СКБ-7032 в среде увлажненного водорода с точкой росы 25 °C.

Были выбраны 3 температуры отжига: $T_1 = 1350$ °C; $T_2 = 1500$ °C; $T_3 = 1600$ °C, длительность обработки во всех случаях составляла 1 час. Высокая температура отжига, близкая к температуре размягчения стеклофазы, входящей в состав керамической подложки, может привести к потере плоскостности поверхности, которая важна для качественной работы установок совмещения и получения четких линий в фотолитографическом процессе. Для подложек с большим радиусом кривизны допустимы отклонения от плоскостности примерно 50 мкм/см, в этом случае либо фотошаблон, либо подложка изгибаются таким образом, что достигается совершенный контакт при экспонировании. Для проверки влияния отжига на плоскостность подложки и определения степени ее изменения нами была измерена величина прогиба подложек (рис. 1а). Как видно из рисунка, существование градиента температур по толщине подложек при остывании и наличие большого процентного состава стеклофазы приводит к весьма существенному прогибу подложек

из керамики 22ХС (265 мкм) по сравнению с поликором (40 мкм) при температуре отжига 1700 °C.

Учитывая, что значение диэлектрической постоянной материала подложки весьма важно для функционирования ГИС СВЧ, существенное изменение ее величины может привести к изменению параметров устройства. Поэтому мы после отжига с помощью кольцевых микрополосковых резонаторов провели измерения диэлектрической проницаемости подложек (рис. 1б).

Как видно из рис. 1б, полученные значения не соответствуют паспортным данным (для поликора — $9,6 \pm 0,2$, для керамики 22ХС — $10,3 \pm 0,2$). Согласно литературным данным [8], анизотропия диэлектрической проницаемости стандартных подложек из поликора достигает 12,5%, а подложки из керамики 22ХС — 3%. Таким образом, измеренные значения диэлектрической проницаемости отожженных подложек не выходят за рамки допустимых норм диэлектрической проницаемости исходных подложек и не могут привести к изменению параметров и нарушению функционирования ГИС СВЧ.

Представляет интерес исследование характеристик прочности отожженных подложек, так как керамика — хрупкий материал, и его стойкость к механическим воздействиям зависит от модуля упругости (модуля Юнга), а также от наличия трещин. Модуль упругости и коэффициент термического расширения керамики определяют напряжения, возникающие в подложке при резком изменении температуры.

Как показали измерения, значения прочности подложек на изгиб составили: у подложек из поликора — 127 МПа до отжига; 130 МПа — после отжига; у подложек из керамики марки 22ХС — 138 МПа до отжига, 141 МПа — после отжига. Из полученных данных можно сделать вывод, что отжиг способствует незначительному увеличению прочности подложек.

Применяемые в ГИС СВЧ пленки имеют обычно толщину от 50 до 50 000 Å, поэтому шероховатость поверхности подложек может оказать непосредственное влияние на многие свойства этих пленок. Например, в резисторах эффективная длина пробега электронов может меняться от точки к точке, если шероховатость неравномерна, а резкие ступени на поверхности подложки могут реплицироваться в металлической пленке микрополосковой линии, вызывая локальное изменение напряженности электрического поля.

Для оценки влияния отжига на класс чистоты обработки поверхности и некоторого представления о поверхностной шероховатости подложек после отжига нами с помощью профилографа, игла которого выписывала профиль поверхности, были получены профилограммы поверхностей подложек. Расшифровка полученных профилограмм показала, что на подложках из поликора класс чистоты обработки не изменился, а на подложках из керамики 22ХС чистота обработки ухудшилась на 1–2 класса с полированной стороны. Класс

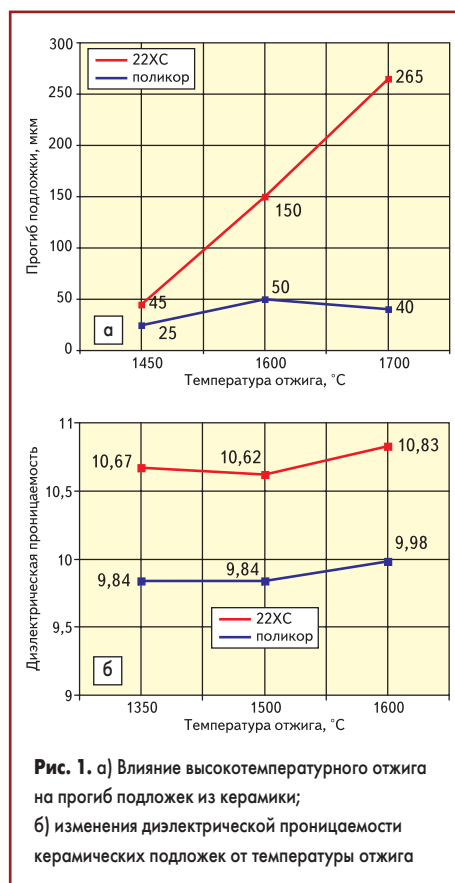


Рис. 1. а) Влияние высокотемпературного отжига на прогиб подложек из керамики; б) изменения диэлектрической проницаемости керамических подложек от температуры отжига

Таблица 1. Адгезионная прочность структуры Cr-Cu, напыленной на отожженные и неотоженные подложки

Особенность технологии	Средняя адгезионная прочность, МПа	Характер отрыва	Примечание
Неотоженные подложки	39,2	Когезионный отрыв по керамике	Средняя величина адгезионной прочности определена по 10 образцам
Подложки, отожженные при T = 1350 °C	48,5	Когезионный отрыв по керамике	

ряющий всем требованиям: температура — 1350 °C, длительность — 1 час.

Результаты измерения адгезии пленок к подложкам без отжига и отожженным подложкам приведены в таблице 1.

По данным таблицы 1 высокотемпературный отжиг керамических подложек перед напылением повышает адгезию двухслойной структуры Cr-Cu на ~12%.

Исследование влияния термообработки на адгезионную прочность многослойной металлизационной структуры, напыленной на керамическую подложку

Для оценки влияния низкотемпературной обработки (<600 °C) нами были проведены эксперименты по термообработке плат с напыленными многослойными металлизационными структурами Cr-Cu и Cr-Cu-Cr. Процесс осуществлялся при различных температурах в среде водорода.

Экспериментальные образцы плат отжигались в водородной печи периодического действия, атмосфера в которой характеризуется следующими параметрами:

- влажность — 10–30%;
- содержание кислорода — 0,001% от объема печи.

Термическая обработка керамической подложки с металлизированным покрытием Cr-Cu путем нагревания в указанных условиях окружающей среды оказывает благоприятное влияние на адгезию всей структуры к керамике.

При этом, во-первых, ослабевают напряжения в контакте с керамикой; во-вторых, металлизационное покрытие становится более устойчивым к воздействию хлоридов в процессе фотолитографии.

После термообработки с экспериментальных образцов снимались реплики, по которым с помощью электронного микроскопа УЭМВ-100К исследовалась поверхностная структура отожженных пленок, а также были измерены удельное сопротивление металлизационной структуры и скорость травли слоев.

Результаты исследования пленок меди с подслоем хрома на подложках из поликора после термообработки в интервале температур 200–600 °C приведены на рис. 3. Поверхностная структура пленок меди до термообработки — мелкозернистая, с величиной зерна до 0,5 мкм. После проведения термообработки наблюдался рост зерен:

- при T = 200 °C — до 1 мкм;
- при T = 400 °C — от 0,4 до 5 мкм;
- при T = 600 °C — от 2 до 3 мкм.

Таким образом, в процессе отжига происходит уменьшение степени кристалличности металлизационной структуры, что характеризует уплотнение пленки.

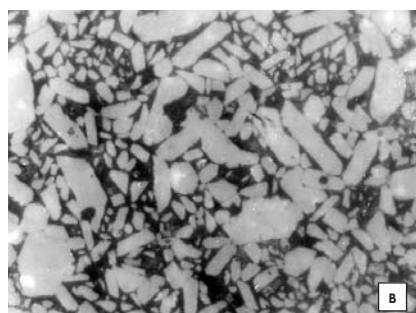
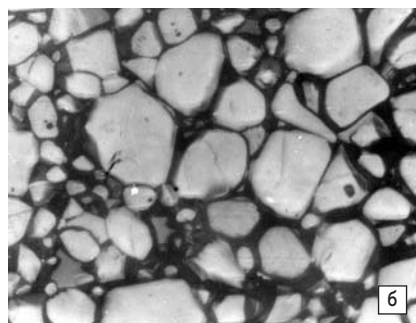
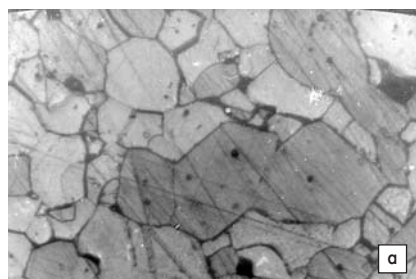


Рис. 2. Поверхностная структура подложек:
а) из поликора, обработанного при температуре 1350 °C в течение часа;
б) из поликора, обработанного при температуре 1500 °C в течение 30 мин;
в) из керамики типа 22ХС, не подвергшейся термообработке;
г) из керамики типа 22ХС, обработанной при температуре 1500 °C в течение 30 мин

чистоты обработки со шлифованной стороны остается неизменным: $\sqrt[2.5]{}$ — у поликора; $\sqrt[1.25]{}$ — у керамики 22ХС).

Кроме того, проводились исследования поверхности структуры подложек с использованием электронного микроскопа УЭМВ-100К (рис. 2). На представленных фотографиях видно, что с повышением температуры отжига происходит укрупнение кристаллов Al_2O_3 . Наличие увеличивающейся межкристаллической прослойки объясняется большей подвижностью стеклофазы с возрастанием температуры обработки.

На основе проведенных экспериментов был выбран следующий режим отжига, удовлетво-

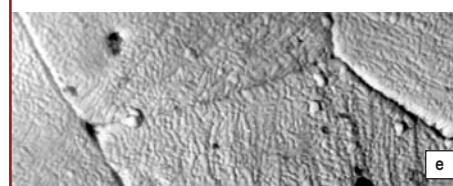
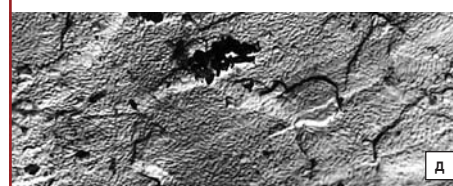
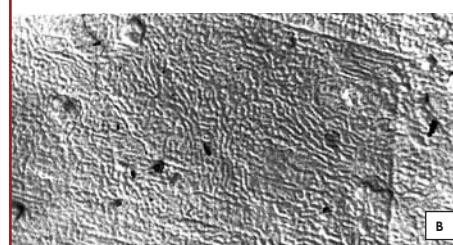
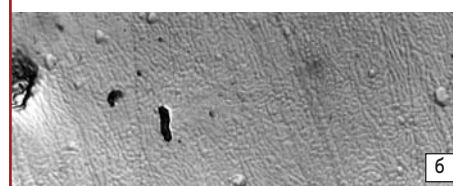


Рис. 3. Поверхностная структура подложек с напыленной металлизационной структурой «хром-медь» после термообработки в разных режимах:

- а) без термообработки;
- б) после термообработки при температуре 200 °C;
- в) после термообработки при температуре 300 °C;
- г) после термообработки при температуре 400 °C;
- д) после термообработки при температуре 500 °C;
- е) после термообработки при температуре 600 °C

Измерения внутренних напряжений в пленке, проведенные с помощью установки «Дрон-2», показали, что с ростом температуры отжига с 200 до 600 °C величина внутренних напряжений уменьшается с 380 до 310 МПа (рис. 4).

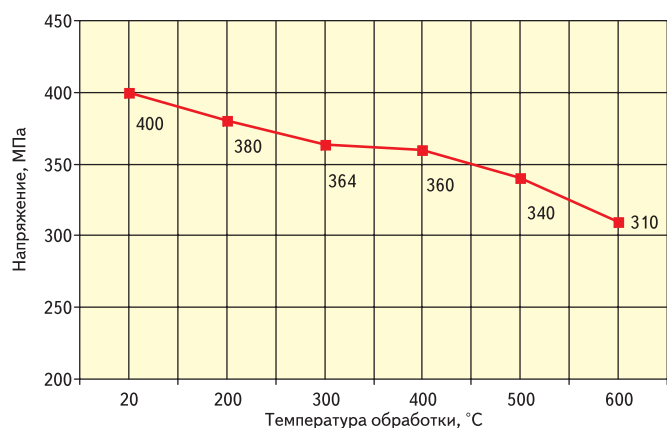


Рис. 4. График зависимости напряжений в металлизационной структуре Cr–Cu от режима термообработки

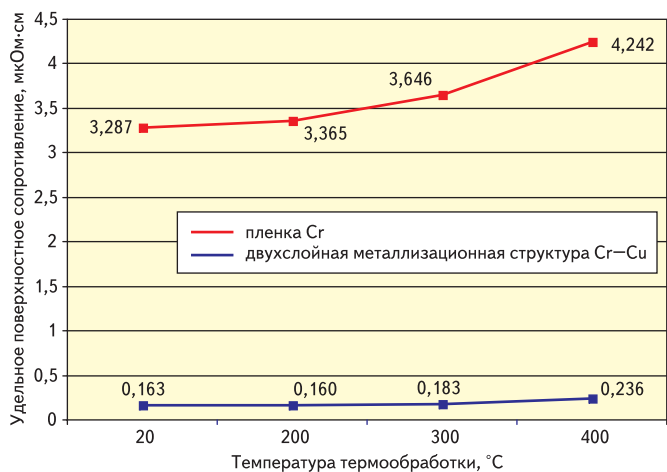


Рис. 5. График зависимости удельного поверхностного сопротивления пленки Cr и двухслойной металлизационной структуры Cr–Cu от температуры обработки

Для определения удельного сопротивления слоев использовались тест-платы с рисунком типа «змейка», полученным фотолитографическим методом на подложках с напыленной пленкой Cr толщиной 300–500 Å и на подложках с металлизационной структурой Cr–Cu, в которой толщина меди составляла 4–5 мкм. Измерения проводились с помощью моста постоянного тока. Результаты приведены на рис. 5.

Таким образом, с возрастанием температуры обработки наблюдается увеличение удельного сопротивления пленок, что, вероятно, происходит из-за диффузии хрома в слой меди. В этой связи нами исследовано влияние этой диффузии на скорость травления металлизационных слоев (рис. 6). Эксперименты проводились на платах из поликора. Измерения длительности травления слоев пленок показали, что с возрастанием температуры обработки время травления увеличивается, а при температуре выше 400 °C процесс взаимной диффузии становится настолько значительным, что послойное травление уже невозможно.

На основании измерений скорости травления были выбраны следующие режимы термообработки:

1. T = 200 °C. Время выдержки τ = 10 мин.
2. T = 300 °C. Время выдержки τ = 10 мин.
3. T = 400 °C. Время выдержки τ = 10 мин.

Адгезионную прочность пленок на платах, подвергшихся термообработке в указанных режимах, измеряли методом прямого отрыва медного стержня диаметром 2,85 мм, припаянного перпендикулярно к пленкам. Средняя величина адгезионной прочности определялась по шести отожженным при каждой температуре образцам. Результаты представлены на рис. 7, из графика на котором видно, что с ростом температуры обработки возрастает адгезия структуры Cr–Cu к керамической подложке из поликора. Во всех случаях при испытаниях на разрыв происходил когезионный отрыв по керамике, что свидетельствует о высокой адгезионной прочности, как между слоями, так и к самой керамической подложке.

Исследование по повышению адгезии напыленной многослойной металлизационной структуры путем изменения режимов напыления

Адгезионную прочность пленочной структуры к керамической подложке можно повысить за счет напыления адгезионного (промежуточного) слоя в вакууме со скоростью не менее 1500 Å/c [11]. Но данный способ не обеспечивает необходимой адгезии между слоями металлизационной структуры. Кроме того, напыление пленки со скоростью выше 1500 Å/c

требует чрезвычайно напряженного режима работы электронного испарителя, что приводит к его перегреву и выходу из строя.

Известен также метод повышения адгезии пленочной структуры к подложке путем напыления адгезионного слоя в атмосфере кислорода [12]. В этом решении при осаждении на подложку образуется окисный слой, чем объясняется хорошая адгезия его к подложке. Для ее обеспечения достаточно наличия слоя окисла между пленкой и подложкой. Однако при напылении адгезионного (промежуточного) слоя в атмосфере кислорода практически вся полученная пленка, в том числе верхняя поверхность нанесенного слоя, оказывается окисленной, поэтому при изготовлении многослойной тонкопленочной структуры не удается получить необходимой адгезионной прочности между поверхностями адгезионного (промежуточного) и проводящего слоев металлизационной структуры.

Цель данного исследования — повышение адгезии между промежуточным (адгезионным) и проводящим слоями. Для этого напыление материала промежуточного (адгезионного) слоя в начальный период авторы проводили в среде кислорода при давлении $(1,3–13) \times 10^{-1}$ Па, а окончание напыления осуществляли в вакууме [13].

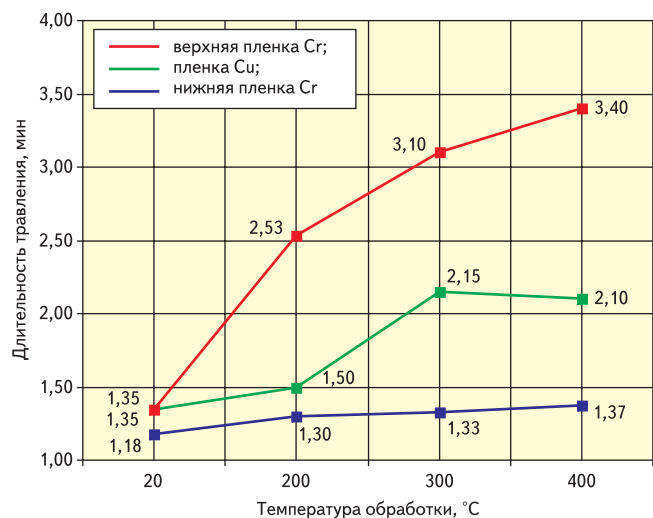


Рис. 6. Влияние температуры обработки металлизационной структуры Cr–Cu–Cr на длительность травления слоев

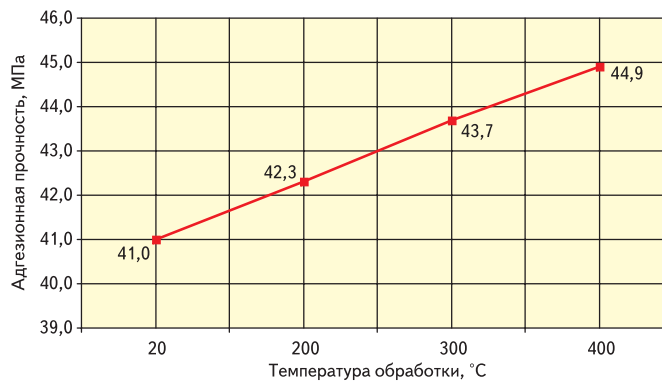


Рис. 7. Зависимость адгезионной прочности металлизационной структуры Cr–Cu от температуры обработки

Таблица 2. Результаты измерения усилий отрыва медного стержня от керамических подложек с напыленной металлизационной структурой «хром–медь–золото»

Способ напыления металлизационной структуры Cr–Cu	Количество образцов, шт.	Среднее значение усилия отрыва, кг/см ²	Среднее значение усилия отрыва по всем образцам, кг/см ²	Характер отрыва
Предложенный	10	680	671	Отрыв по керамике
	10	533		- // -
	10	800		- // -
Известный метод напыления в атмосфере кислорода	10	301	333	Отрыв по хрому
	10	334		- // -
	10	365		- // -
Напыление в вакууме (существующий способ в текущем производстве ГИС СВЧ)	10	200	275	Отрыв по хрому
	10	285		- // -
	10	342		- // -

Сущность разработанного метода заключается в следующем:

- на химически очищенную подложку из керамики (поликора) размером 30×48×1 мм термическим способом напыляли слой хрома толщиной 150–200 Å с одного испарителя установки УРМ 3279017 при давлении (1,3–13)×10⁻¹ Па;
- затем снизили давление в камере до (1–5)×10⁻¹ Па и напылили слой хрома толщиной 150–200 Å с другого испарителя;
- поверх слоя хрома напыляли слой меди толщиной 3–4 мкм из электронного испарителя.

Испытания полученной металлизационной структуры на адгезионную прочность были проведены на универсальной машине РМУ-0,5 методом прямого отрыва медного стержня диаметром 2,85 мм, припаянного с помощью низкотемпературного припоя ПОС-61 к напыленным пленкам на подложке. Результаты испытаний приведены в таблице 2. Среднее значение прочности на отрыв металлизационной структуры, полученной по предложенному способу, составляет 671 кг/см², и отрыв происходит по керамике; по известному способу — 333 кг/см², при этом отрыв происходит по хрому. Таким образом, прочность сцепления слоев хрома и меди увеличена в 2 раза.

В качестве сравнительного способа взята существующая в серийном производстве ГИС СВЧ технология изготовления металлизационной многослойной структуры, согласно которой на подложку из поликора напыляют из одного испарителя в вакууме слой хрома толщиной 300–500 Å, а затем из второго испарителя — слой меди толщиной 4–5 мкм.

По сравнению с существующим способом получения металлизационной многослойной структуры межслойная адгезия увеличена более чем в 2 раза.

Трудоемкость предложенного способа по сравнению с существующим не увеличивается и составляет 50 н/ч на 1000 штук плат при напылении на установке типа УВН 74-173.

Откачивание кислорода при напылении со снижением давления позволило обеспечить постепенное изменение состава пленки промежуточного слоя от окисла хрома до чистого хрома. Напыление металлизационной структуры предложенным методом исключило присутствие окисла хрома на поверхности промежуточного слоя хрома в месте контакта со слоем проводящего материала, что привело к повышению адгезионной прочности между

ними. Кроме того, при последующей пайке навесных элементов на такой структуре не происходило полной диффузии хрома в медь, что повысило качество пайки навесных элементов.

Исследование по выбору метода оценки адгезии

В ходе выполнения данной работы была разработана методика измерения адгезии. За основу был взят способ определения адгезии путем измерения усилия отрыва стержня, припаянного к многослойному покрытию из тонких пленок. В качестве материала стержня была выбрана медь из-за ее способности смачиваться большинством мягких припоев. Из всего многообразия припоев был выбран ПОС-61, обладающий хорошими характеристиками прочности на разрыв — 43 МПа [10]. Как показали исследования, оптимальный диаметр стержня равен 2,85 мм. Выбор диаметра стержня определил конструкцию образца для измерения адгезии методом прямого отрыва.



Рис. 8. Оправка для припаявания медных стержней к платам

С целью исключения перекосов при измерении адгезии пайка стержней проводилась в специальной оправке (рис. 8), которая обеспечивала строгую перпендикулярность стержней к подложке и предотвращала возникновение изгибающих моментов при измерении.

Для измерения адгезии были использованы электрические разрывные машины РМУ-0,05-1 и Р-0,5. Применение таких машин позволило плавно регулировать скорость рабочего хода захвата при испытаниях от 1 до 100 мм/мин. Были опробованы три скорости нагрузки: 5, 10 и 20 мм/мин. Наиболее приемлемой величиной скорости перемещения рабочего захвата машины была выбрана скорость, равная 10 мм/мин.

Выводы и рекомендации

1. Адгезия пленочной структуры «хром–медь» в текущем производстве ГИС СВЧ технологии напыления и получения рисунков плат путем последовательного селективного травления слоев составляет 25,0–35,0 МПа.

2. При низких значениях адгезии металлизационной структуры Cr–Cu для ее увеличения на 20–25% необходимо проводить термообработку этого двухслойного тонкопленочного покрытия при температуре 200–400 °С в течение 10 минут.
3. Для улучшения условий сцепления пленочной структуры Cr–Cu с подложкой и увеличения адгезии на 10% необходимо перед операцией напыления осуществлять высокотемпературную прокатку подложек в среде увлажненного водорода при температуре 1350 °С в течение 1 часа.
4. Откачивание кислорода со снижением давления при окончании напыления пленки Cr позволяет обеспечить постепенное изменение состава пленки промежуточного слоя от окисла хрома до чистого хрома, исключить присутствие окисла хрома на поверхности промежуточного слоя хрома в месте его контакта с проводящим слоем из Cu и тем самым повысить в 2 раза адгезионную прочность между ними.
5. Для оценки величины адгезии можно использовать метод прямого отрыва стержня, припаянного к пленочному покрытию. При этом для пайки необходимо использовать стержень диаметром 2,85 мм, припой ПОС-61, скорость перемещения рабочего зажима разрывной машины должна составлять 10 мм/мин.

Литература

1. Климачев И. И., Иовдальский В. А. СВЧ ГИС. Основы технологии и конструирования. М.: Техносфера. 2006.
2. Westphal K. Uber die Haftfestigkeit vor Metallschichten auf Streifenleitungs // Substraten Nachrichtentechnik Elektronik. 1976.
3. Бушминский И. П., Морозов Г. В. Конструирование и технология пленочных микросхем. М.: Советское радио. 1978.
4. Авторское свидетельство № 362356, кл. НО1С 14/00 С23с 13/02, заявл. 16.04.1970, опубл. 18.12.1972.
5. Заявка ФРГ № 1521153, кл. 486 13/08, С23с 13/02, заявл. 07.08.1969., опубл. 07.02.1974.
6. Патент США № 3731861, кл. НО5к 3/18, заявл. 16.04.1971, опубл. 25.08.1974.
7. Патент Австралии № 451925, кл. С08, В29с, заявл. 27.07.1971, опубл. 05.08.1974.
8. Батура В. Б. и др. Измерение диэлектрической проницаемости подложек СВЧ ИС в дисковом микрополосковом резонаторе // Электронная техника. Серия 1. Вып. 9. 1975
9. Hoffman H. S. Post vaporation annealing of Cr–Cu–Cr metallized ceramics. Proc. 26th Electronic Comp. Conf, 1976.
10. Припой оловянно-свинцовые. ГОСТ 21930-76.
11. Авторское свидетельство СССР № 362356, кл. НО1С 17/60, С23с 13/02, заявл. 16.04.1970, опубл. 18.12.1972.
12. Заявка ФРГ № 1521153, кл. С23с 13/02, заявл. 07.08.1969, опубл. 07.02.1974.
13. Борыняк Л. А., Непочатов Ю. К. Способ изготовления многослойной тонкопленочной структуры. Заявка на изобретение № 2007100654, приоритет от 09.01.2007.