

Гибридно-пленочные интегральные микросхемы: выбор материалов и что необходимо учитывать при конструировании

Ни для кого не секрет, что проблемы по поводу надежности и технологичности любого изделия возникают намного раньше, чем начинается этап разработки технологии для данного изделия. В статье затрагиваются вопросы, касающиеся разработки конструкции гибридно-пленочных интегральных микросхем (ГПИС) и выбора материалов — подложек, проводниковых и резистивных слоев — для тонко- и толстопленочной технологий. А также рассматриваются необходимые размеры, которые должен учитывать каждый конструктор при разработке конструкторской документации (КД) на данный вид изделия и технолог, подписывающий КД в графе «Т. контр».

Максим Шмаков

mxm-shmakov@yandex.ru

**Валерий Паршин,
к. т. н.**

Сразу хочется отметить, что в статье обходятся стороной пленочные конденсаторы и индуктивности, по причине того, что данные элементы в пленочном исполнении занимают большую площадь и очень «капризны» при изготовлении ГПИС и поэтому в микроэлектронных изделиях встречаются довольно редко. Но и у них есть несколько неоспоримых преимуществ по сравнению с их навесными аналогами. Основными из них являются:

- уменьшение монтажных связей (паяных и клеевых соединений);
- создание пленочных элементов за один цикл;
- высокая надежность.

Материалы подложек

Если говорить в общем, то подложки в ГПИС играют очень важную роль. Во-первых, подложка служит диэлектрическим и механическим основанием для пленочных элементов и навесных компонентов, а также теплоотводом. Во-вторых, от материала подложки и его обработки существенно зависят параметры осаждаемых пленочных слоев (особенно в тонкопленочной технологии) и надежность всей микросхемы в целом.

Для обеспечения заданных электрических параметров микросхем материал подложки должен обладать:

- высоким коэффициентом теплопроводности для эффективной передачи тепла от тепловыделяющих элементов (резисторов, диодов, транзисторов) к корпусу;

- высокой механической прочностью, обеспечивающей целостность подложки с нанесенными элементами как в процессе изготовления микросхемы (разделение на платы, термокомпрессия, пайка, установка платы в корпус и т. д.), так и при ее эксплуатации в условиях термоциклирования, термоударов и механических воздействий;
- высокой химической инертностью к осаждаемым материалам, снижением временной нестабильности параметров пленочных элементов, обусловленной физико-химическими процессами на границе раздела пленка/подложка и проникновением ионов из подложки в пленку. Наличие в составе подложек легкоподвижных щелочных элементов может привести к значительному увеличению поверхностной электропроводности и даже к коррозии пленок, поэтому в таких случаях на поверхность подложек наносят слой окисла, не имеющего ионной проводимости в рабочих условиях;
- стойкостью к воздействию высокой температуры в процессе формирования элементов и установки навесных компонентов;
- стойкостью к воздействию химических реактивов в процессе подготовки поверхности подложки перед нанесением пленок, при электрохимических обработках и химическом осаждении пленок;
- минимальной неровностью поверхности, особенно волнистостью, которая влияет на четкость линий при фотолитографии;
- высокой плотностью для исключения интенсивного газовыделения;

- способностью к хорошей механической обработке (полировке, резке).

В настоящее время нет такого материала для подложек, который в одинаковой мере удовлетворял бы этим разнообразным требованиям. Многие органические материалы не могут быть использованы в качестве подложек, поскольку изготовление пленочных элементов ведется в вакууме и при повышенных температурах. Поэтому для подложек используют в основном ситалл и керамику. И очень редко стекло (боросиликатное и алюмосиликатное).

Ниже дается описание основных материалов подложек, а в таблице 1 приведены основные характеристики материалов подложек, применяемых в основном для тонкопленочных ГПИС.

Стекло

Первый материал, из которого изготавливались подложки. Это обусловлено его доступностью, хорошими диэлектрическими свойствами, почти идеальной гладкой поверхностью, не требующей дополнительной обработки. Стекло обладает хорошей адгезией почти ко всем материалам. Микронеровность поверхности выгнутого при большой температуре стекла ниже 0,01 мкм, полировкой же можно достичь только 0,03–0,09 мкм. Вначале применялись покровные и фотостекла, но из-за присутствия в их составе щелочных металлов они имеют неудовлетворительные изоляционные свойства, особенно в условиях повышенной влажности и температуры. Концентрация ионов проводимости в них достигает 10^{21} м^{-3} , а подвижность для покровных — $2,3 \times 10^{-9} \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Затем начали применяться бесщелочные стекла (С48-2, С41-1 и др.).

Существенным недостатком стекол остается малая теплопроводность и хрупкость, вследствие чего они и были почти полностью вытеснены ситаллами и керамикой. И все же там, где не требуется большая механическая прочность и теплопроводность, они применяются из-за их дешевизны и гладкости поверхности.

Ситалл

Представляет собой стеклокерамический материал, получаемый путем термообработки (кристаллизации) стекла. По своим свойствам ситалл превосходит свойства исходного стекла: имеет более высокую механическую прочность, температуру размягчения и теплопроводность, на 20–35 % большую, чем исходные стекла, а также лучшие диэлектрические свойства на высоких частотах. Прочивная прочность у бесщелочных ситаллов меньшая, а у щелочных большая, чем у стекол. В отличие от большинства высокопрочных тугоплавких кристаллических материалов ситалл хорошо обрабатывается. Его можно прессовать, вытягивать, прокатывать и отливать центробежным способом.

Температура деформации ситалла выше, чем температура деформации начала размягчения исходного стекла. Ситалл выдерживает в воздушной среде резкие перепады темпера-

Таблица 1. Характеристики материалов подложек, применяемых для тонкопленочных ГПИС

Параметр	Стекло		Ситалл	Керамика		Полиимид	
	С41-1	С48-3	СТ50-1	Поликор	Глазурованная	Каптон-Н	ПМ-1
Класс шероховатости поверхности	14	14	13–14	12–14	14	—	—
Температурный коэффициент линейного расширения При температуре $T = 20\text{--}300 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\alpha \cdot 10^{-7}$), $^\circ\text{C}^{-1}$	41±2	48±2	50±2	70–75	73–78	2,0	2,4
Коэффициент теплопроводности, λ , Вт/(м·К)	1	1,5	1,5	30–45	1,2–1,7	—	—
Температура размягчения, $^\circ\text{C}$	—	750	620	—	1900	400	400
Диэлектрическая проницаемость при $f = 10^6 \text{ Гц}$ и $T = +20 \text{ }^\circ\text{C}$	7,5	3,2–8	5–8,5	10,5	13–16	3,5	3,5
Тангенс угла диэлектрических потерь при $f = 10^6 \text{ Гц}$ и $T = +20 \text{ }^\circ\text{C}$ $\text{tg} \delta \cdot 10^{-4}$	20	15	20	18	18	0,003	0,003
Объемное электрическое сопротивление при $T = +25 \text{ }^\circ\text{C}$, Ом·см	10^{17}	10^{17}	—	—	—	—	—
Электрическая прочность, В/м· 10^6	40	—	40	—	50	276	160–200

Таблица 2. Свойства материалов подложек, применяемых для толстопленочных ГПИС

Материал	90% Al_2O_3	96% Al_2O_3	99,6% Al_2O_3	AlN	ВеО	Кварц	Сапфир
Модуль упругости, МПа	324,07	324,07	344,75	291,66	319,93	72,40	344,75
Коэффициент термического расширения, $10^{-6}/^\circ\text{C}$	6,70	7,11	6,30	4,30	8,00	0,72	7,74
Прочность на разрыв, МПа	317,7	317,7	448,18	367,50	—	—	0,00
Коэффициент теплопроводности, Вт/м· $^\circ\text{C}$	16,74	25,10	37,40	170,0	250,0	0,75	25,00
Диэлектрическая постоянная (при частоте 1 МГц)	9,40	9,90	10,00	8,80	7,00	3,80	0,00
Тангенс угла диэлектрических потерь	—	0,0001–0,0002	0,0001–0,0002	—	0,0001	0,0002	0,002

туры от –60 до 700 $^\circ\text{C}$. Он обладает высоким электрическим сопротивлением, которое несколько уменьшается с повышением температуры. По электрической прочности ситалл не уступает лучшим видам вакуумной керамики, а по механической прочности в 2–3 раза прочнее стекла. Он обладает высокой химической стойкостью к кислотам, не порист, дает незначительную объемную усадку, газонепроницаем и имеет малую газоотдачу при высоких температурах.

Фотоситалл

Фотоситалл — это стеклокристаллический материал, получаемый путем кристаллизации светочувствительного стекла. Он состоит из окиси кремния (75%), окиси лития (11,5%), окиси алюминия (10%) и окиси калия (3,5%), плюс небольшие добавки азотнокислого серебра и двуокиси церия. Фотоситалл устойчив к кислотам, обладает высокой механической и термической стойкостью. Его теплопроводность в несколько раз превышает теплопроводность ситалла, температурный коэффициент линейного расширения составляет $9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне температур 20–120 $^\circ\text{C}$, удельное объемное сопротивление при 150 $^\circ\text{C}$ равно $1 \times 10^9\text{--}1 \times 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Керамика

Материалы, полученные спеканием порошков из одного или смеси окислов при температурах, близких к температуре плавления, но не ниже, называют керамикой. Керамика в основном применяется для толстопленочных ГПИС. Для подложек наибольшее распространение получила керамика, основным компонентом которой является окись алюминия. Изготовленная при оптимальных условиях, она обладает высокими механическими, термическими и диэлектрическими свойствами. Некоторое отличие разного типа керамик определяется процентным содержанием окиси алюминия и структурой (табл. 2).

Еще большим преимуществом в этом отношении обладает бериллиевая керамика, теплопроводность которой выше, чем у алюминия, сплавов меди и некоторых других металлов. Это относится к образцам чистой окиси (ВеО). Пористость и примеси значительно снижают ее теплопроводность. Например, наличие в ней 5% пор, окиси алюминия или окиси кремния снижают теплопроводность соответственно на 10, 34 и 50%. Бериллиевая керамика обладает высокими механическими, термическими и электрическими свойствами и химической стойкостью

Таблица 3. Степень шероховатости и ее влияние на сопротивление резисторов

Материал	Средняя высота шероховатости, мкм	Отношение $r_{\text{ш}}$ шероховатой к $r_{\text{г}}$ гладкой поверхности	Отношение $r_{\text{ш}}$ к $r_{\text{г}}$ после выдержки 5 ч при 250 $^\circ\text{C}$
Алюмосиликатное стекло	0,025	1,0	1,3
Глазурованная окись алюминия	0,025	1,0	1,0
Полированный сапфир	0,025	1,0	1,1
Полированная 99% окись алюминия	0,05	1,07	1,6
Полированная 99% окись алюминия	0,25	123	6,0
Обожженная 96% окись алюминия	1	1,59	6,3
Обожженная 99% окись алюминия	1,25	1,91	11

(табл. 2). Существенным недостатком является токсичность ее паров и пыли.

В последнее время «популярностью» стал пользоваться нитрид алюминия (AlN), также применяются подложки из кварца и сапфира. Их свойства тоже приведены в таблице 2.

Существенным недостатком керамических подложек является значительная шероховатость поверхности. Степень шероховатости и ее влияние на сопротивление резисторов приведено в таблице 3. Микронеровности необработанной керамики могут составлять несколько тысяч ангстрем и сильно уменьшаются после полировки, однако полировка загрязняет поверхность керамики и существенно изменяет ее свойства. Снижение шероховатости достигается путем глазурования поверхности керамики тонким слоем бесцелочного стекла. При этом «страдает» теплопроводность.

Подложки, применяемые для ГПИС, имеют прямоугольную форму. Конструкции подложек приведены на рис. 1, размеры — в таблице 4.



Рис. 1. Конструкция стандартных подложек для ГПИС

Таблица 4. Стандартные размеры подложек для ГПИС [РД 107.460084.200]

L	B	h
7,5	16,5	0,5; 0,6
12,5		
15,0		
22,5		
20,0	34,0	0,5; 0,6; 1,0
30,0	48,0	
30,0	24,0	
36,0	24,0	
60,0	48,0	0,5; 0,6; 1,0
60,0	24,0	

Материалы пленочных резисторов

- В ГПИС широкое применение нашли резисторы. Материал, применяемый для получения резистивных пленок, должен обладать:
- возможностью получения широкого диапазона стабильных во времени сопротивлений,
 - низким температурным коэффициентом,
 - низким уровнем шумов,
 - малыми значениями паразитных параметров,
 - требуемой мощностью рассеивания,
 - высокой коррозионной стойкостью,
 - минимальной занимаемой площадью.

При выборе материала в процессе проектирования ГПИС необходимо учитывать, что структура, а следовательно, и параметры

пленки и объемного тела (в виде монокристалла или поликристаллического образца) различаются. Структура пленки сказывается на величине электрического сопротивления образца. Поэтому основной параметр — электросопротивление — характеризуют не удельной величиной ρ в Омах на метр (Ом·м), как это принято для объемного тела, а сопротивлением пленки ρ_s в Омах на квадрат (Ом/кв). Значение сопротивления пленочного полоскового резистора определяется по формуле:

$$R = \rho_v \cdot \left(\frac{l}{b \cdot \delta} \right) + 2 \cdot R_K,$$

где ρ_v — удельное объемное сопротивление; R_K — переходное сопротивление областей контактов резистивной и проводящей пленок; δ — толщина резистивной пленки.

У высокоомных резисторов сопротивление областей контакта обычно значительно меньше сопротивления резистивной пленки, поэтому:

$$R = \left(\frac{\rho_v}{\delta} \right) \cdot \left(\frac{l}{b} \right) = \rho_s \cdot K_\phi,$$

где $\rho_s = \rho_v / \delta$ — удельное поверхностное сопротивление (сопротивление квадрата пленки толщиной δ); $K_\phi = l/b$ — коэффициент формы резистора (число квадратов пленки).

Забегая вперед, необходимо отметить, что подгонка резистора осуществляется только в сторону увеличения его номинала.

Удельное поверхностное сопротивление тонких пленок для наиболее широко применяемых материалов лежит в пределах от 100 до 10 000 Ом/кв, а толстых пленок — в пределах 10 Ом/кв...1 МОм/кв.

Основные характеристики материалов, применяемых для резистивных пленок, приведены в таблице 5. Значения поверхностных сопротивлений и температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) являются ориентировочными, так как они сильно зависят от метода нанесения пленки и режима ее обработки. Удельное сопротивление пленки за-

висит как от ее состава, так и от структуры, которая изменяется в процессе термообработки.

На рис. 2 показана зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины. При малых толщинах пленки ее свойства сильно зависят от характера микронеровностей поверхности подложки; здесь могут наблюдаться нарушения непрерывности структуры пленки, электропроводность же осуществляется за счет туннельного эффекта и термоэмиссии между отдельными кристаллитами. Наиболее целесообразно использовать пленки такой толщины, при которой существенно сказываются их объемные свойства. Поэтому легче регулировать толщину пленки, так как нарушения поверхности уже не имеют существенного значения.



Рис. 2. Зависимость удельного сопротивления пленки от ее толщины

Металлическая пленка толщиной порядка 10 Å независимо от природы металла обладает очень большим удельным электрическим сопротивлением, которое экспоненциально уменьшается с увеличением толщины. Пленки такой малой толщины имеют весьма нестабильные характеристики и практически не применяются. Для того чтобы получать заведомо сплошную пленку при имеющихся в производстве отклонениях от выбранного технологического режима, считают, что толщина пленки, наносимая вакуумным испарением, должна быть порядка 1000 Å. Следует отметить, что пленки тугоплавких металлов могут быть тоньше, так как они обладают более стабильными характеристиками.

Таблица 5. Основные характеристики резистивных пленок для тонкопленочных ГПИС

Материал	Удельное поверхностное сопротивление пленки, ρ_s , Ом/кв	Температурный коэффициент сопротивления, ТКС·10 ³ , 1/°С	Допустимая удельная мощность, рассеиваемая на пленке, Вт/см ²	$\delta R_{др}$, %	$\delta R_{хр}$, %	Коэффициент термического расширения, КТР·10 ³ , 1/°С
Тантал	25–2000	(+20÷–40)	10	0,5–1,0	–	5
Нитрид тантала	10–300	–(50÷100)	–	0,05–0,1	–	–
Рений	250–10 000	(0÷–10)	–	–	1	–
Хром	25–500	±20	2–4	±0,3	±0,2	–
Нихром	3–600	±20	0,5–0,8	<0,1	–	–
Силициды хрома	200–500	±20	5	–	–	–
Керметы	100–20 000	(+25÷–50)	3–4	±(0,5÷2)	0,3	13,5
Титан	100–2000	(–110÷+300)	2–4	0,5–1,2	–	100
Оксиды олова	80–5000	(+30÷–70)	2–4	1	–	4,6

Примечание. Символами $\delta R_{др}$ и $\delta R_{хр}$ обозначены изменения сопротивления резисторов соответственно при нагрузке и хранении.

Тонкопленочные резисторы могут быть изготовлены из металлов, сплавов (в том числе многокомпонентных), полупроводников и керметов (смесей металлов с керамикой).

Широкое применение находит хромоникелевый сплав (20% хрома и 80% никеля). Поверхностное сопротивление пленки из этого сплава достигает 300 Ом/кв при малом ТКС. Температура испарения у этого сплава значительная (1600 °С). Из сплава железа с хромом (79% железа, 21% хрома) и железоникелевого сплава (71,5% железа, 21% хрома, 7,5% никеля) получают пленки, обладающие поверхностным сопротивлением 150 Ом/кв с ТКС не более $1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Значительно большим удельным сопротивлением (до 400 Ом/кв) обладает многокомпонентный сплав, состоящий из 74% никеля, 20% хрома, 3% железа и 3% алюминия.

Стабильность металлических пленок зависит от некоторой степени от температуры плавления металла, его плотности и возможности образования стойкого окисного поверхностного слоя. Как правило, чем выше температура плавления, тем выше стабильность характеристик пленки. Вольфрам дает очень стабильные характеристики пленок в вакууме, но эти пленки имеют весьма нестабильные характеристики на воздухе.

Рений — тугоплавкий металл, обладающий такими свойствами, которые обеспечивают образование пленок с очень высокими характеристиками. Поэтому он находит все большее применение при изготовлении пленочных резисторов. Резисторы из рения обладают высоким удельным поверхностным сопротивлением (обычно порядка нескольких тысяч Ом/кв) и стабильны в вакууме при температурах до 500 °С. Стабильность вне вакуума зависит от типа защиты поверхности и метода ее термообработки. Защитным поверхностным слоем для резисторов из рения обычно служит окись кремния.

В том случае, когда необходимо получить высокостабильные пленки с большим поверхностным сопротивлением (несколько тысяч Ом/кв) и малым ТКС, используют тантал. Применение тантала для пленочных резисторов объясняется также следующими причинами:

- поверхность тантала легко покрывается пленкой окиси и становится малоактивной, хотя тантал и относится к активным металлам;
- тонкий прозрачный поверхностный слой окиси хорошо связан с танталом, обладает высоким сопротивлением коррозии в различных атмосферных условиях и не поддается воздействию многих кислот;
- реакция окисления тантала легко управляема и может быть использована для регулирования толщины пленки и ее сопротивления;
- пятиокись тантала является хорошим диэлектриком, что позволяет использовать тантал для изготовления не только пленочных резисторов, но и пленочных конденсаторов.

Большим поверхностным сопротивлением (до 10 000 Ом/кв) обладает пленка из сплава 24% хрома и 76% кремния. Напыление такой пленки производят по методу «взрыва» (данный метод будет рассмотрен в одном из следующих номеров). Полученные таким путем пленки отличаются малым ТКС ($5 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) и высокой стабильностью (после 2000 ч работы изменение сопротивления не превышает 0,2%, а после 5000 ч — не более 3%).

Большим поверхностным сопротивлением (до 50 000 Ом/кв) обладают также пленки из керметов, представляющих собой смеси металлов с диэлектриками; например, пленки палладиево-серебряной глазури из танталово-хромового стекла. Резисторы на основе этих пленок используют в микросхемах, где допустимо высокое значение ТКС.

Наиболее удачной пленкой из кермета является тонкая пленка из смеси монооксида кремния и хрома. Эти пленки обладают хорошими адгезионными свойствами, однородностью, стабильностью, высокой температурной устойчивостью и хорошими механическими свойствами. Сопротивление пленки можно изменять в широких пределах в зависимости от состава смеси. Наилучшие характеристики пленок получают при 70% хрома и 30% монооксида кремния.

Большое распространение при химических методах осаждения пленок (данный метод будет рассмотрен в одном из следующих номеров) получили станатные резистивные пленки, состоящие в основном из двуокиси олова. В этих пленках имеется избыток олова по отношению к стехиометрическому составу, благодаря чему в этом окисле, который в чистом виде относится к классу полупроводников, преобладает электронная электропроводность, обеспечивающая значительную собственную электропроводность. Удельное сопротивление станатной пленки без добавок невысокое, до 20 Ом/кв.

Основным положительным качеством станатных пленок является высокая теплостойкость (до 250 °С), высокий уровень химической и механической стойкости, влагуустойчивость, что при хорошей технологичности способствуют их широкому применению.

Однако чистая пленка двуокиси олова неустойчива при протекании тока, поэтому в ее состав всегда вводят добавки. Например, введение окиси сурьмы (до 50%) позволяет повысить устойчивость пленки при протекании тока и управлять температурным коэффициентом сопротивления в весьма широких пределах, вплоть до изменения его знака. Добавление в пленку двуокиси титана повышает ее удельное сопротивление.

Для изготовления толстопленочных резисторов применяют пасты, состоящие из основного функционального материала (наполнителя), порошка стекла (фритта), для хорошей адгезии частиц основного материала между собой и с подложкой, и органической связки. В качестве наполнителя резистивных паст применяют серебро, палладий и их сплавы, окислы таллия и рутения, индия, олова, а также нитридтанталовые пасты. В качестве

связующего вещества обычно применяют свинцово-боросиликатные стекла или производные боросиликатов цинка. Электрические свойства паст зависят в большой степени от их состава и температуры отжига. Паста должна обеспечивать возможность нанесения ее через трафарет, возможность вжигания, совместимость с материалом подложки и материалом проводящей пленки, а также воспроизводимость свойств.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_s и температурный коэффициент резистивной стекломали, образующийся после термообработки пасты, зависят от процентного содержания наполнителя и стекла в исходной пасте. Повышенными температурной и временной стабильностью характеризуются стекломали, в состав которых входит сплав палладий–серебро.

Пленочные элементы коммутации

К пленочным элементам коммутации относятся контактные площадки (КП) и коммутационные дорожки (КД).

Контактные площадки — это небольшие участки пленки проводника, с помощью которых в микросхему включаются навесные элементы или монтажные проводники, соединяющие входы и выходы микросхемы с внешними выводами (штырями).

Коммутационные дорожки — это узкие полоски пленочного проводника, с помощью которых производится межэлементная связь в микросхеме.

Навесные элементы и монтажные проводники присоединяются к КП клейкой, пайкой или сваркой. Этим и определяются требования, предъявляемые к КП, которые сводятся к следующему. Так как электрическая связь между элементами микросхемы осуществляется через КП, то они должны иметь высокую проводимость и образовывать с присоединяемыми к ним проводниками невыпрямляющий контакт. Проводимость пленки не должна меняться со временем. Желательно, чтобы материал КП обладал способностью к бесфлюсовой пайке и сварке. Тогда микросхема не будет загрязняться флюсами и ее не надо будет от них очищать. Материал должен быть устойчив к коррозии. Так как во время эксплуатации и особенно в процессе пайки или сварки КП подвергаются большой термической и механической нагрузкам, то они должны иметь прочное сцепление (адгезию) с подложкой. Считается, что сила сцепления контактной площадки с керамической подложкой должна составлять около $7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$. Во всяком случае, минимальное значение усилия отрыва КП от подложки должно превосходить максимальное усилие разрыва присоединяемого проводника.

Требования, предъявляемые к КП, исключая те из них, которые связаны с пайкой или сваркой, в равной степени относятся и к коммутационным дорожкам.

Лучшими проводниками, получившими распространение в микросхемах, являются: медь, серебро, золото и алюминий. Однако ни один из них не удовлетворяет полностью

всем требованиям. Медь окисляется при повышенных температурах и образует выпрямляющий контакт. Алюминий, имея на своей поверхности окисную пленку, трудно поддается пайке. Серебро хотя и не окисляется и хорошо сплавляется, почти не применяется из-за повышенной его миграции по подложке, которая приводит к увеличению утечек тока и даже короткому замыканию. Наибольшему числу требований удовлетворяет золото. Однако, кроме того, что это драгоценный материал, оно обладает низкой адгезией с подложкой. Из-за этого, как правило, перечисленные металлы не применяются самостоятельно, а в сочетании с другими, восполняющими их недостатки. Так, для улучшения адгезии они наносятся не непосредственно на подложку, а на предварительно нанесенный подслои из хорошо сцепляющихся с подложкой металлов. К ним относятся: хром и нихром, марганец и титан. В случаях, когда процесс присоединения к КП протекает при высоких температурах и сравнительно длительное время, тогда хром заменяют молибденом или вольфрамом, так как в этих условиях хром хорошо диффундирует в золото, увеличивая сопротивление пленки.

При использовании дешевой и хорошо проводящей меди для того, чтобы избежать ее коррозии, ее покрывают золотом, серебром или никелем. При хорошей герметизации приборов и ведении технологического процесса в неокисляющей среде медную пленку можно применять и без дополнительного покрытия.

Для коммутационных элементов подходят следующие сочетания металлов, расположенных на подложке в порядке подслои — проводящий слой — защитный слой: хром–золото, хром–золото–никель, хром–серебро–никель, хром–медь–золото, хром–алюминий–золото, хром–марганец–золото, нихром–золото, нихром–медь–серебро, нихром–медь–никель, титан–золото, титан–медь–серебро, титан–медь–никель, титан–алюминий–никель, тантал–хром–алюминий, марганец–медь–золото, марганец–медь–палладий.

Сочетание никель–золото–серебро применяется в тех случаях, когда требуется КП толщиной 25–20 мкм, присоединение к которым производится при высоких температурах. Создается подслои толщиной от 0,01 до 0,2 мкм, но не выше, так как более толстые пленки отслаиваются. Усилия отрыва пленок от стеклянной подложки достигают значений в Н/м²:

для хрома — 11,5×10⁶; для состава хром–золото — 11,8×10⁶; для состава тантал–хром–алюминий — 10,8×10⁶; для алюминия — 9×10⁶; для никеля — 1,7×10⁶; для меди — 1×10⁶. Лучшую адгезию с ситалловой подложкой показали пленки состава хром–марганец–золото и хром–алюминий–золото.

Учитывая прочность смешанных переходов, рекомендуется наносить коммутационные пленки сложного состава не порознь из чистых металлов, а сразу из их сплава. Предложены сплавы следующих составов:

- 1) меди — 94,5%, палладия — 5% и марганца — 0,5%;
- 2) меди — 94,5%, никеля — 5%, марганца — 0,5%.

Для проводников оказалось выгодным применять сплавы меди с присадками марганца, никеля, палладия и титана.

Из-за фракционирования перегонки сплава нижняя часть пленки обогащена марганцем, что улучшает адгезию, а верхняя, в зависимости от сплава, обогащена палладием или никелем, которые улучшают термостабильность и коррозионную стойкость. Промежуточный слой состоит из обедненной примесями меди, что повышает проводимость пленки. Величина адгезии составляет около 8,6·10⁶ Н/м².

Толщина КП, к которым припаиваются и привариваются выводы навесных элементов и переключателей толщиной до 50 мкм, находится в пределах 0,3–1 мкм, иногда доходя до 5 мкм. В последнем случае тонкие пленки наращаются гальваническим осаждением меди или никеля.

Необходимо учитывать совместимость материалов коммутации и элементов, с которыми они будут находиться в контакте. Под действием температуры, атмосферы и электротока в месте контакта могут образоваться такие соединения, которые увеличат сопротивление, изменят объем и механическое напряжение в пленках. Это в свою очередь увеличит шумовые свойства схемы, уменьшит добротность контуров, изменит температурные коэффициенты элементов или нарушит контакт между ними. Примером этому могут служить непрочные образования, возникающие при сварке алюминия с золотом, получившие название «пурпурной чумы». Название произошло от пурпурного цвета химического соединения AuAl₂, присутствующего в сварном контакте. Причиной ослабленного контакта, приводящего к отрыву проводника, является не пурпурное

Таблица 6. Характеристики некоторых материалов, применяемых для КД и КП ГПИС

Материал	Толщина слоя, Å	ρ _с , Ом/кв
Подслои — нихром Слой — золото	100–300 6000–8000	0,03–0,04
Подслои — нихром Слой — медь Покрытие — никель	100–300 6000–8000 500–600	0,02–0,04
Подслои — нихром Слой — медь Покрытие — серебро	100–300 4000–10000 800–1000	0,02–0,04
Подслои — нихром Слой — медь Покрытие — золото	100–300 6000–8000 500–600	0,02–0,04
Подслои — нихром Слой — алюминий Покрытие — никель	400–500 2500–3500 500	0,1–0,2

соединение, а пористый слой, расположенный вблизи золота и связанный с явлением преимущественной диффузии одного из металлов. Образование этого слоя можно предотвратить введением третьего металла, образующего диффузионный барьер между алюминием и золотом. Наблюдалось также, что незащищенный контакт металлов нихром–алюминий при длительном испытании (1000 ч) под нагрузкой и относительной влажности 95% из-за электролиза подвергался коррозии, в то время как контакт металлов нихром–хром–золото не изменял своих свойств.

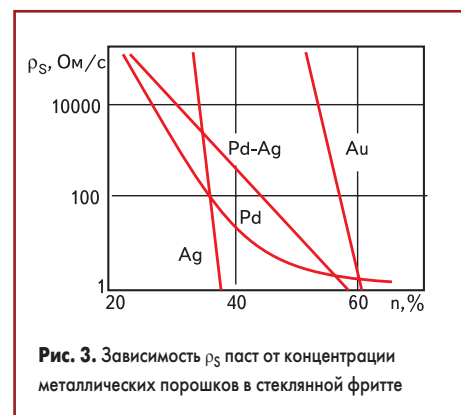


Рис. 3. Зависимость ρ_с паст от концентрации металлических порошков в стеклянной фritte

Применяемая ширина коммутационных дорожек находится в пределах 0,2–0,75 мм; площадь КП для подсоединения внешних выводов — в пределах 0,7–1,5 мм², а для внутрисхемных соединений — порядка 0,25 мм². Минимальные размеры КП должны быть больше размера сварного или припаянного контакта на величину точности совмещения инструмента и присоединяемой детали.

Учитывая, что сопротивление КД включается последовательно с элементами схемы,

Таблица 7. Свойства проводников, влияющие на качество монтажа в процессе сборки толстопленочной ГПИС

Материал пленки	Электропроводность	Адгезия	Контакт с резисторами	Метод монтажа кристалла			Разварка		Смачивание припоем	Стойкость к выщелачиванию	Стойкость к коррозии
				Эткетика	Припой	Органика	Золото	Алюминий			
Au	Удовл.	Плохо	Плохо	Хорошо	Плохо	Превосходно	Превосходно	Хорошо	Превосходно	Плохо	Превосходно
PtAu	Плохо–Удовл.	Удовл.	Превосходно	Бесполезно	Хорошо	Превосходно	Плохо–Удовл.	Удовл.	Превосходно	Хорошо	Превосходно
PdAu	Удовл.–Хорошо	Удовл.	Удовл.	Бесполезно	Удовл.	Превосходно	Плохо–Удовл.	Удовл.	Хорошо	Хорошо	Превосходно
Ag	Превосходно	Превосходно	Удовл.–Плохо	Бесполезно	Плохо	Превосходно	Хорошо	Бесполезно	Превосходно	Плохо	Плохо
PtAg	Удовл.–Хорошо	Удовл.	–	–	Хорошо	Превосходно	Хорошо	Бесполезно	Превосходно	Удовл.–Хорошо	Хорошо
PdAg	Хорошо	Хорошо	Хорошо	–	Хорошо	Превосходно	Хорошо	Хорошо	Хорошо–Превосходно	Удовл.–Хорошо	Хорошо
PdPtAg	–	–	–	–	Хорошо	Превосходно	Хорошо	Хорошо	Хорошо	Хорошо	Хорошо

Таблица 8. Минимально допустимые размеры тонкопленочных элементов и расстояния между ними

Пленочные элементы и расстояния между ними	Минимальные размеры, мм
Резистор в форме квадрата	0,30×0,30
Ширина резистора (рис. 4 а–в)	0,05
Длина резистора (рис. 4д)	0,05
Расстояние между резисторами (рис. 4д)	0,05
Расстояние между резистором и проводником (рис. 4г)	0,10
Расстояние между резистором и контактной площадкой для присоединения выводов компонентов	0,20
Взаимное перекрытие резистора с проводником (рис. 4в)	0,10
Ширина проводника	0,05
Предпочтительная ширина проводника	0,20
Ширина проводников питания и корпуса	0,40
Расстояние между проводниками длиной до 20 мм	0,05
Расстояние между проводниками длиной более 20 мм	0,10
Участок соединения проводников разных уровней через отверстия в межуровневой изоляции (рис. 5)	0,10×0,10
Перекрытие проводника межуровневой изоляции в месте пересечения	0,10
Расстояние между краями первого и второго слоев участка межуровневой изоляции	0,05
Расстояние от края межуровневой изоляции до конца соединительного проводника, выполненного в виде отдельной полоски	0,50
Расстояние от края межуровневой изоляции до периферийных контактных площадок	0,20
Расстояние от края межуровневой изоляции до проводника или контактных площадок	0,10
Расстояние от края межуровневой изоляции до резистора	0,20
Расстояние от резистора до проводника верхнего уровня, повторяющего конфигурацию нижнего (рис. 6)	0,05
Расстояние между проводниками двух различных уровней	0,10
Расстояние между краями проводников в месте соединения различных уровней через отверстия в межуровневой изоляции	0,05
Отверстие в сплошном слое межуровневой изоляции до ближайшего проводника нижнего уровня	0,30×0,30
Расстояние от края отверстия в сплошном слое межуровневой изоляции до ближайшего проводника нижнего уровня	0,05
Перекрытие проводника участком защитной изоляции	0,05
Расстояние от проволочного вывода компонента, проходящего над пленочным проводником, до краев слоя изоляции, защищающей этот проводник	0,40
Разрыв электрической цепи замкнутого контура	0,20
Расстояние между резистором и краем платы	1,00
Допустимое в технически обоснованных случаях расстояние между резистором и краем платы	0,50
Расстояние между проводником и краем платы	0,50
Допустимое в технически обоснованных случаях расстояние между проводником и краем платы	0,30
Расстояние между краем межуровневой или защитной изоляции и краем платы	0,50
Допустимое в технически обоснованных случаях расстояние между краем межуровневой или защитной изоляции и краем платы	0,15
Допустимые размеры отверстия в слое защитной изоляции	0,40×0,40

основное требование к ним — иметь как можно меньшее сопротивление. Поэтому их ρ_s должно быть меньше 0,05 Ом/кв.

Снижение сопротивления за счет увеличения ширины нежелательно из-за увеличения габаритов микросхемы. Значение ρ_s пленок КП находится в пределах 0,05–1 Ом/кв.

Характеристики некоторых материалов, применяемых для КД и КП ГПИС, приведены в таблице 6.

В качестве основных материалов в проводящие пасты для создания толстопленочных ГПИС вводят металл: золото (Au), серебро (Ag), платину (Pt), палладий (Pd) и их сплавы.

Зависимость удельного поверхностного сопротивления от концентрации металлических порошков представлена на рис. 3.

В таблице 7 приведена сравнительная оценка проводниковых паст на основе различных наполнителей.

Самыми недорогими, высокопроводящими и имеющими хорошую адгезию с подложками являются пасты на основе серебра, но они подвержены коррозии и миграции. Проводящие пасты на основе Pt–Au обеспечивают минимальное растворение в припое и поэтому гарантируют высокую надежность микросхем с большим количеством паяных соединений, но они являются самыми дорогими. Пасты на основе Au–Pd менее дороги. Чистое золото не может использоваться для КП, так как при пайке внешних выводов оно очень быстро растворяется в припое. Удельное сопротивление проводниковых пленок на основе благородных металлов составляет 0,3–0,01 Ом/кв.

Конструктивно технологические требования и нормы

Минимально допустимые размеры тонкопленочных элементов и расстояния между элементами должны быть выполнены в соответствии с таблицей 8.

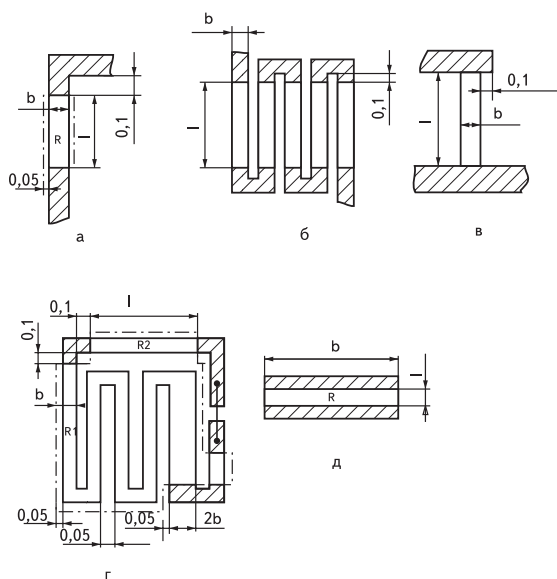


Рис. 4. а–в) Ширина резистора; д) длина резистора; г) расстояние между резисторами

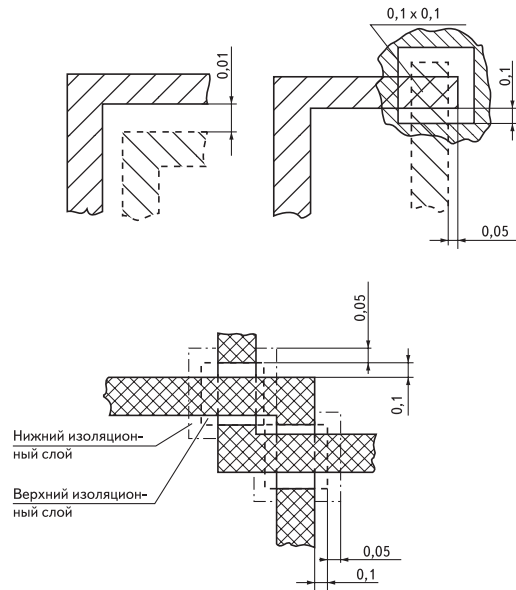


Рис. 5. Участок соединения проводников разных уровней через отверстия в межуровневой изоляции

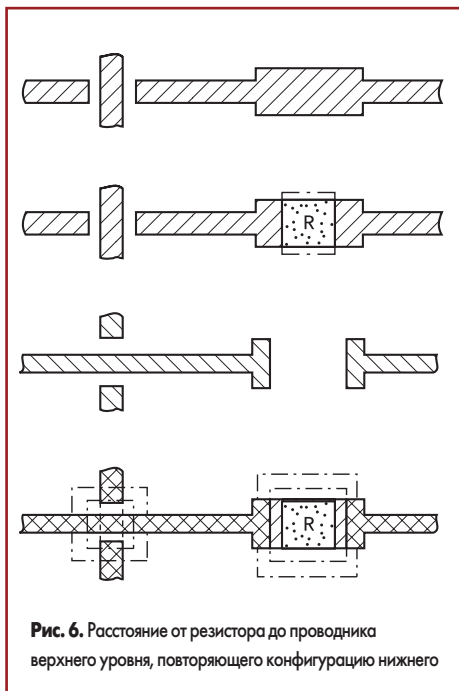


Рис. 6. Расстояние от резистора до проводника верхнего уровня, повторяющего конфигурацию нижнего

Минимально допустимые размеры толстопленочных элементов и расстояния между ними должны быть выполнены в соответствии с таблицей 9.

Литература

1. РД 107.460084.200 Микросборки. Общие требования и нормы конструирования.
2. Борисенко А. С. Технология и оборудование для производства микроэлектронных устройств.
3. Ефимов И. Е., Корбун Ю. И., Корзырь И. Я. Микроэлектроника. М.: Высшая школа. 1977.
4. Жиров Г. А. Технология гибридных интегральных микросхем. Киев: Высшая школа. 1976.
5. Коледов Л. А. Технология и конструирование микросхем, микропроцессоров и микросборок. М.: Радио и связь. 1989.
6. Малышева Н. А. Технология производства микроэлектронных устройств. М.: Высшая школа. 1991.
7. IPC-D-859 Design Standard for Thick Film Multilayer Hybrid Circuits.

Таблица 9. Минимально допустимые размеры толстопленочных элементов и расстояния между ними

Пленочные элементы и расстояния между ними	Минимальные размеры, мм
Резистор в форме квадрата	0,80×0,80
Ширина резистора (рис 7б, в)	0,60
Длина резистора (рис. 7б, в)	0,60
Расстояние между резисторами	0,30
Расстояние между резистором и проводником	0,20
Расстояние между резистором и контактной площадкой для присоединения выводов компонентов	0,30
Взаимное перекрытие резистора с проводником (рис. 7а)	0,10
Ширина проводника (см. ТУ на пасту)	0,13–0,20
Предпочтительная ширина проводника	0,30
Ширина проводников питания и «корпуса»	0,80
Участок соединения проводников разных уровней через отверстия в межуровневой изоляции	0,30×0,30
Расстояния между проводниками двух различных уровней	0,30
Расстояние между краями проводников в месте соединения проводников разных уровней	0,20
Отверстие в сплошном слое межуровневой изоляции в месте соединения проводников разных уровней	0,40×0,40
Расстояние от края отверстия в межуровневой изоляции до ближайшего проводника любого уровня	0,30
Переходной контактный элемент	0,40×0,40
Допустимые размеры отверстия в слое защитной изоляции	0,50×0,50
Перекрытие проводника участком защитной изоляции	0,20
Расстояние от проволочного вывода компонента, проходящего над пленочным проводником, до краев слоя изоляции, защищающей этот проводник	0,40
Расстояние от края межуровневой изоляции до конца соединительного проводника, выполненного в виде отдельной полоски	0,50
Расстояние от края межуровневой изоляции до периферийных контактных площадок	0,30
Расстояние от края межуровневой изоляции до соседнего проводника или контактных площадок	0,20
Расстояние от края участка межуровневой изоляции до резистора	0,30
Расстояние между резистором и краем платы	1,00
Допустимое в технически обоснованных случаях расстояние между резистором и краем платы	0,50
Расстояние между проводником и краем платы	0,50
Допустимое в технически обоснованных случаях расстояние между проводником и краем платы	0,30
Расстояние между краем межуровневой или защитной изоляции и краем платы	0,20
Допустимое в технически обоснованных случаях расстояние между краем межуровневой или защитной изоляции и краем платы	0,15
Расстояние между краем диэлектрического покрытия металлических подложек и краем подложки	0,30
Расстояние между краем отверстия в плате и краем диэлектрического покрытия	0,15
Расстояние между краем диэлектрического покрытия резистором	0,70

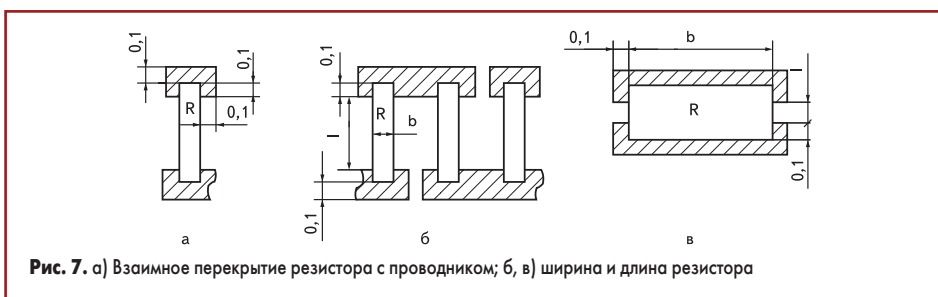


Рис. 7. а) Взаимное перекрытие резистора с проводником; б, в) ширина и длина резистора