

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОГО СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛИЗАЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ С КЕРАМИКОЙ В УСЛОВИЯХ МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА МКК ДЛЯ ИС

Е.Ермолаев, П.Козлов, В.Егошин info@zpp12.ru

АО "Завод полупроводниковых приборов" – ведущее предприятие в области производства металлокерамических плат (МКП) и корпусов (МКК) для микросхем высокой степени интеграции. Для поддержания высокого уровня конкурентоспособности на предприятии непрерывно ведутся работы по повышению качества и надежности выпускаемой продукции. Особое внимание при производстве МКК уделяется этапу получения проводящего слоя МКП с требуемыми параметрами (электрическое сопротивление, топология, прочность сцепления металлизационного слоя с керамикой и т.д.). На этом этапе закладывается качество металлокерамического спая, где особо важную роль играет операция приготовления металлизационной пасты. Как показано авторами данной работы, дисперсность порошкообразного наполнителя металлизационной пасты является одним из основных факторов, влияющих на прочность металлокерамического спая, которая, в свою очередь, определяется качеством сцепления металлизационного покрытия с керамикой

Одним из основных контролируемых параметров металлизационных паст при производстве металлокерамических плат и корпусов микросхем является дисперсность порошкового наполнителя (вольфрамовый порошок). Как показывают проведенные исследования, данный параметр оказывает значимое влияние на прочность сцепления металлизационного покрытия с керамической подложкой, что влияет на процент выхода годной продукции и является одним из основных факторов, обеспечивающих ее целостность. Необходимо также отметить, что в процессе сборки микросхем при герметизации шовной контактной

сваркой элементы корпуса испытывают огромные термомеханические нагрузки и при недостаточной прочности сцепления металлизационного покрытия с керамикой может произойти их расслоение. Особенно опасно, когда данный дефект может проявиться при эксплуатации микросхем в составе прибора или аппаратуры в экстремальных условиях.

Металлизационное покрытие до вжигания представляет собой совокупность мелкодисперсных частиц вольфрамового порошка и добавок, плотность упаковок которых зависит от состава и способа нанесения покрытия, размера и формы частиц. Например, если частицы сферической формы одинаковых размеров, возможна

наиболее плотная упаковка, при которой они занимают 75% пространства, а 25% приходится на пустоты [1]. В металлизационном покрытии такие пустоты образуют сообщающиеся поры – капилляры, по которым происходит миграция стеклообразного компонента керамики (стеклофазы) в металлизационное покрытие. В результате повышается согласованность коэффициентов температурного расширения (КТР) системы разнородных материалов (металлизации и керамики), снимаются остаточные напряжения, предотвращаются коробление и деформация металлокерамических плат, повышается прочность сцепления металлизационного покрытия с керамикой.

Установлено, что стеклофаза перемещается в капиллярах металлизационного покрытия под действием давлений, вызываемых менисками в капиллярах металлизационного слоя и керамики (рис.1) [1–3]. Следовательно, качественная пропитка металлизационного слоя обеспечивается при определенном соотношении диаметров рассматриваемой системы капилляров, а именно тогда, когда размеры участков стеклофазы керамики больше, чем поры металлизационного покрытия. В противном случае такое покрытие не будет пропитываться стеклофазой.

Специалистами ОАО "Завод полупроводниковых приборов" проведены теоретические и экспериментальные исследования по выявлению степени согласованности температурных усадок металлизационных паст с содержанием вольфрамовых порошков разной

дисперсности и керамики ВК-91-2. В качестве интегрального параметра, связанного с дисперсностью порошков, измерялся средний размер частиц вольфрамовых порошков, который для порошка А принимал значение 1 мкм, для порошка Б – 1,6 мкм, для порошка С – 2,3 мкм. Порошок фракции Б получали путем смешения порошков фракций А и С.

Методика определения влияния дисперсности вольфрамовых порошков на степень согласованности термических усадок металлизационного покрытия и керамической подложки. Металлизационная паста с содержанием порошков А, В, С наносилась на сырую керамическую подложку методом трафаретной печати. Затем на твердосплавных штампах вырубались металлизационные диски диаметром 3 см (50 штук на каждый тип пасты). Вырубленные диски обжигались в высокотемпературной печи спекания при одинаковых условиях с максимальной температурой спекания 1530°C. Значения степени согласованности усадок рассматриваемых материалов снимались по характеру деформации металлизационного диска.

Условились обозначать усадку (h) со знаком "-", если диск деформировался в сторону металлизационного слоя, то есть керамика оказывалась на выпуклой стороне диска, и со знаком "+", если диск деформировался в сторону керамики, то есть с выпуклой стороны диска оказывалась металлизация. Прогиб в сторону металлизации/керамики означает, что скорость термической усадки металлизации/керамики превышает скорость термической

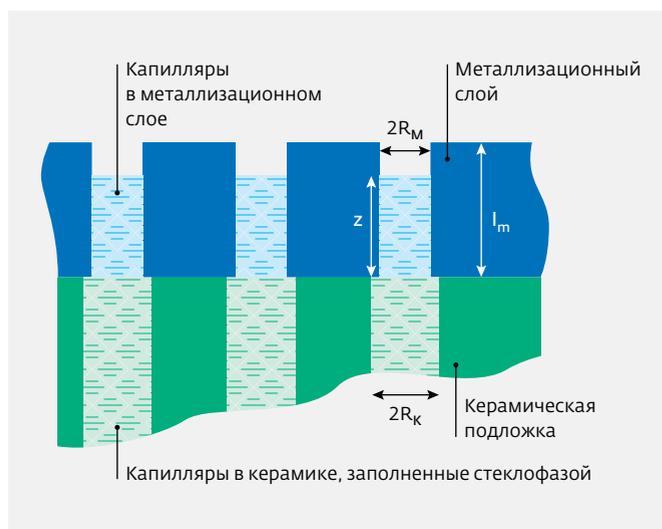


Рис.1. Схематическое изображение структурной модели, поясняющей процесс миграции стеклофазы в металлизационный слой: R_K , R_M – радиусы капилляров в керамике и в металлизационном слое; Z – глубина проникновения стеклофазы в капилляры металлизационного слоя; l_m – толщина металлизационного слоя

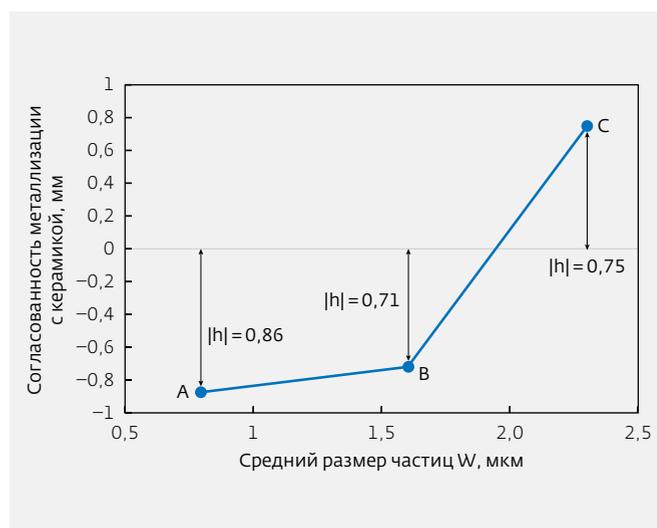


Рис.2. Зависимость уровня согласованности КТР металлизации и керамики от степени дисперсности вольфрамовых порошков. $|h|$ – абсолютная величина деформации диска

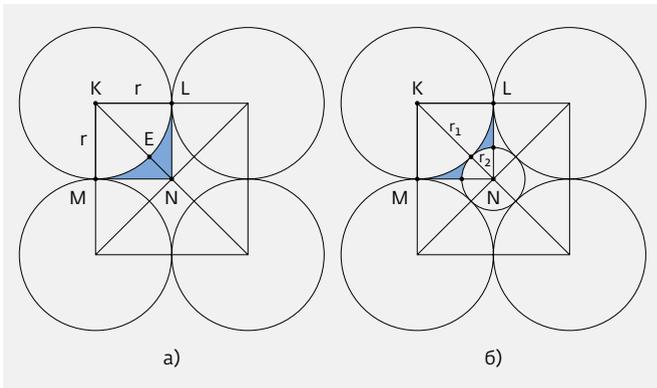


Рис.3. Фрагменты упаковки в металлизированном слое вольфрамовых частиц: а – фракции А (фракции С); б – фракции В

усадки керамики/металлизации. Следовательно, чем меньше величина деформации заматаллизованного керамического диска, тем выше степень согласованности КТР металлизационного слоя и керамической подложки.

Результаты исследований. Согласно испытаниям (рис.2) наилучший результат в плане согласованности рассматриваемой системы материалов (керамика ВК-91-2, металлизационное покрытие) обеспечивает металлизационная паста на основе вольфрамового порошка со средним размером частиц 1,6 мкм (фракция В).

Очевидно, что смешение крупной и мелкой фракций обеспечивает наиболее плотную упаковку металлизационных частиц, в результате чего стеклофаза под действием капиллярного давления лучше проникает в металлизационный слой, чем и объясняется наилучшая согласованность коэффициентов температурного расширения керамики и металлизационного покрытия.

Действительно, если представить частицы вольфрамового порошка в форме шара и смоделировать три ситуации, получим следующие результаты. В соответствии с рис.3а смоделирована ситуация для частиц размером 1 мкм (фракция А) и 2,3 мкм (фракция С). При такой упаковке частиц площадь свободного пространства S , которая фактически представляет собой площадь поперечного сечения капилляров в металлизационном покрытии, из геометрических соображений будет определяться следующим выражением:

$$S = 4(S_1 - S_2), \tag{1}$$

где S_1 – площадь квадрата KLMN, S_2 – площадь 1/4 частицы (KLEM).

Если записать данные площади через радиус рассматриваемых частиц, выражение (1) приобретает следующий вид:

$$S_{AC} = 4 \left(r^2 - \frac{1}{4} \pi r^2 \right) = 4r^2 \left(1 - \frac{1}{4} \pi \right) = 0,86r^2, \tag{2}$$

где r – радиус частицы вольфрамового порошка.

Таким образом, при самой плотной упаковке вольфрамовых частиц фракции А площадь поперечного сечения капилляра в металлизационном слое составляет $S_A \approx 0,215$ мкм², а для фракции С площадь поперечного сечения капилляров $S_C \approx 0,86$ мкм².

Смоделируем ситуацию при смешении фракций А и С (фракция В) и сравним площадь поперечного сечения капилляров металлизационного слоя S_B с предыдущими результатами.

В металлизационном слое керамики, состоящем из мелкой и крупной фракций, возможно внедрение частицы мелкой фракции между четырьмя частицами крупной фракции (рис.3б). Определим, можно ли внедрить частицу фракции А между четырьмя частицами фракции С в случае их самой плотной упаковки (когда четыре частицы касаются друг друга). Для этого необходимо определить максимальный размер частицы мелкой фракции, которую можно "внедрить" между четырьмя частицами крупной фракции. Исходя из геометрии (рис.3б) радиус частицы мелкой фракции можно определить из следующего выражения:

$$(2(r_1 + r_2))^2 = 8r_1^2 \rightarrow 2r_1 + 2r_2 = 2\sqrt{2}r_1 \rightarrow r_2 = r_1(\sqrt{2} - 1) \rightarrow r_2 \approx 0,41r_1. \tag{3}$$

Таким образом, максимальный размер частицы мелкой фракции, которая может поместиться между четырьмя частицами крупной фракции при их самой плотной упаковке, будет составлять 0,41 от размера частицы крупной фракции. Для нашего случая имеем $r_1 = 2,3$ мкм, тогда максимальное значение $r_2 = 2,3 \cdot 0,41 \approx 0,943$ мкм. Учитывая физико-химические процессы (припекание сферических частиц), протекающие при спекании металлических частиц, предложенную модель можно использовать для нашего случая, когда $r_2 = 1$ мкм.

В результате такого расположения вольфрамовых частиц в металлизационном слое образуются четыре одинаковых капилляра, площадь поперечного сечения которых определяется следующим выражением:

$$S = S_1 - (S_2 + S_3), \tag{4}$$

где S_1 – площадь квадрата KLMN, S_2 – площадь 1/4 частицы фракции С, S_3 – площадь 1/4 частицы фракции А.

Если выразить данные площади через радиус рассматриваемых частиц, то выражение (4) приобретает следующий вид:

$$S = r_1^2 - \frac{1}{4}\pi(r_1^2 + r_2^2) = r_1^2 - 0,785(r_1^2 + r_2^2), \quad (5)$$

где r_1 – радиус частицы фракции С, r_2 – радиус частицы фракции А.

Таким образом, подставляя численные значения в выражение (5), получим, что для фракции В площадь поперечного сечения капилляров составляет $S_B \approx 0,019$ мкм². В итоге имеем $S_B < S_A$ в 11,3 раза, $S_B < S_C$ в 45,3 раза.

Исходя из рассмотренных выше соображений и расчетов можно сделать вывод, что металлизационное покрытие с упаковкой частиц фракции В будет лучше пропитываться стеклофазой вследствие большей величины капиллярного давления, которая, в свою очередь, возрастает по мере увеличения разности диаметров капилляров в керамике и металлизации. Другими словами, при фиксированной ширине капилляров (площади поперечного сечения) керамики наилучшая степень пропитки металлизационного покрытия стеклофазой будет наблюдаться в случае самой плотной упаковки вольфрамовых частиц. При этом формируются наиболее узкие капилляры в металлизационном слое. Как показывают результаты экспериментальных исследований (см. рис.2), данное обстоятельство способствует наилучшей степени согласованности коэффициентов температурного расширения керамики и металлизационного покрытия, что в условиях массового производства обеспечивает уменьшение количества бракованной продукции.

На основе полученных данных также легко объяснить смещение деформации металлизационного диска на рис.2 в сторону керамики (фракция С, деформация со знаком "+"). Это обусловлено тем, что металлизационный слой не пропитывается стеклофазой, и керамика, изначально имеющая большой КТР

в сравнении с металлизационным слоем [4], сжимается быстрее металлизационного покрытия. Поэтому для формирования металлизационного покрытия использовать порошковый наполнитель со средним размером частиц $\geq 2,3$ мкм не рекомендуется.

В заключение необходимо отметить ряд важных моментов.

- Приведенные расчеты справедливы для производства микросистемных изделий на основе тонкой радиокерамики, где связь металлизационного покрытия с керамической основой осуществляется благодаря миграции стеклообразующего компонента керамики в область металлизационного слоя.
- Смешение мелкой и крупной фракций порошкового наполнителя позволяет достичь наиболее плотной упаковки частиц в металлизационном слое, что обеспечивает наилучшую степень согласованности КТР металлизации и керамики.
- В реальных покрытиях, частицы порошкового наполнителя которых обычно не имеют сферической формы (в результате подготовительных операций смешения и диспергации порошков) и одинаковых размеров, плотность упаковки частиц значительно меньше. Рассмотренные модели в данной работе идеализированы для лучшего представления анализируемых процессов и простоты расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Батыгин В.Н., Метелкин И.И., Решетников А.М.** Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами: Производственное издание. – М.: Энергия, 1973. С. 264–267.
2. The mechanism of migration a glass ceramics in the metal // J. Amer. Ceram. Soc. 44. № 6. 1961. P. 265–271.
3. **Решетников А.М., Поветкина Э.Н.** Смачивание молибдена и керамики А-995 стеклами, близкими по составу к стеклофазе керамики 22 ХС // Электронная техника. 1971. Вып. 4. С. 101–106. (Сер. 14 "Материалы").
4. **Преснов В.А., Любимов М.П.** Керамика и ее спаи с металлом в технике / Под ред. В.А.Преснова и П.А.Иофиса. – М.: Атомиздат, 1969. 232 с.