

Исследование термомеханических напряжений в многослойных структурах торцевой коммутации трёхмерных микросборок

М.Д. Кочергин, И.А. Беляков, И.А. Соловьёв, Д.В. Вертянов

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»

Аннотация: Многослойная торцевая коммутация в технологиях трёхмерной интеграции может упростить проектирование микросборок и снизить длину торцевых электрических связей. Однако данная коммутация уязвима к термомеханическим нагрузкам и требует предварительного анализа конструкции изделия. В рамках данной работы представлены результаты моделирования различных вариантов многослойной торцевой коммутации трёхмерных микросборок, отличающиеся как используемым на торцах материалом диэлектрика, так и материалом герметизации объёма микросборки. Установлено, что наименьшие значения термомеханических напряжений в коммутации характерны для материалов, чей температурный коэффициент линейного расширения максимально близок к данному параметру проводников. При этом использование композитных диэлектриков в слоях перераспределения ведёт к более значимому уменьшению нагрузок, чем использование более термостабильных ненаполненных полимеров.

Ключевые слова: трёхмерная интеграция, корпусирование, термомеханические напряжения, полиимид, слои перераспределения

Введение

Торцевые дорожки - перспективный вариант реализации высокоплотных вертикальных межсоединений в трёхмерных микросборках. Однако применение торцевой коммутации ограничивает возможности проектирования трёхмерных систем, поскольку выводы одноимённых цепей должны отводиться к торцам строго друг над другом. Реализация этого требования представляет определённые сложности, поскольку цепи, отходящие от соседних контактов микросхемы в одном уровне, могут на другом уровне идти к площадкам различных компонентов, которые, с точки зрения топологии, удобнее было бы расположить в разных концах подложки. Как результат, для того, чтобы вывести к торцам уровня контакты, требуется усложнять конструкцию платы, вводя дополнительные микропереходы и увеличивая длину цепей — рисунок 1.

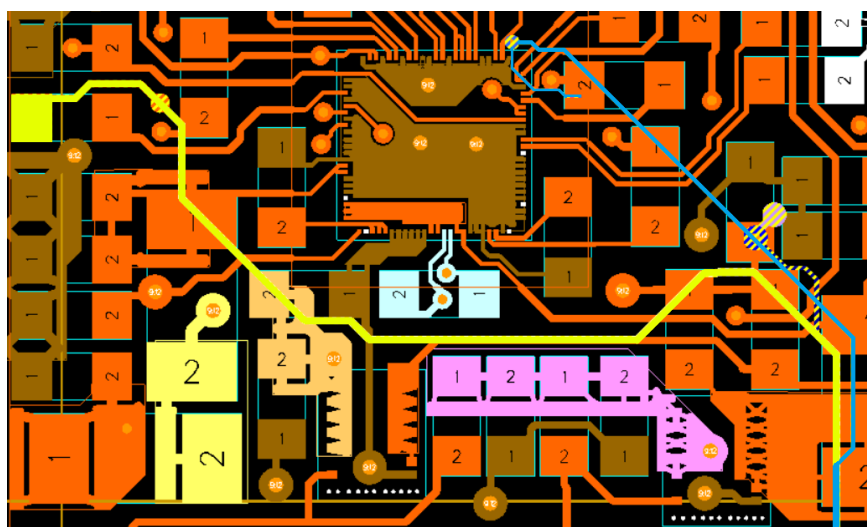


Рисунок 1 – Проводник одной и той же цепи на разных уровнях трёхмерной микросборки с торцевой коммутацией — синим цветом показан проводник на верхнем уровне сборки, отходящий от микросхемы в правую часть уровня, жёлтым цветом отмечен проводник на среднем уровне сборки, отходящий от развязывающего резистора в левой части уровня

По указанным причинам большинство технологий торцевой коммутации ориентировано на создание микросборок, содержащих однотипные компоненты, например, микросхемы памяти, в которых необходимо соединить расположенные друг над другом одноимённые контакты [1,2].

Решением проблемы может быть формирование многослойной коммутации на торцевых поверхностях микросборок. Такой подход позволит вывести проводники к торцам изделия оптимальным способом с точки зрения длины связей, при этом упростив изготовление уровней сборки и улучшив электрические параметры изделия. Однако для реализации подобного решения требуется найти ответы на ряд технологических и конструкторских вопросов.

Первым таким вопросом служит определение оптимального материала и конструкции многослойной торцевой коммутации.

В качестве материала проводящих элементов в сборках с торцевыми дорожками, как правило, используются медь или никель. Никель характеризуется более высокой адгезией к герметизирующему сборку компаунду. Однако с точки зрения проводимости оптимальным материалом всё же является медь [3].

Несколько слоёв коммутации на торцах микросборки должны разделяться слоем диэлектрика. Но нанесение традиционных соединительных материалов (препрегов и адгезионных плёнок) на торцевые поверхности микросборки прессованием или ламинированием затруднено из-за значительных габаритов изделия по высоте, а также возможных неравномерностей при нанесении клеящего слоя по краям сборки.

Решением в этом случае могут служить жидкие диэлектрические композиции, наносимые на торцы, например, с помощью окунания или по аналогии с паяльной маской и проводящими пастами – с помощью ракеля. В роли таких материалов могут выступать, например, композиции на основе полиимидных лаков, которые за счёт своей пластичности способны гасить часть термомеханических нагрузок. Кроме того, современные полиимидные материалы даже в ненаполненном виде характеризуются малыми значениями температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), а также высокой термостойкостью и температурой стеклования. По этой причине полиимиды нашли применение в технологиях корпусирования на уровне пластины как диэлектрики слоёв перераспределения [4,5].

В рамках же данной работы предлагается исследовать возможность формирования подобных слоёв перераспределения не на плоских корпусах, а на трёхмерных структурах, тем более что герметизация этих структур обычно осуществляется материалами, близкими к тем, то используются в технологиях корпусирования.

Описание модели

В работе рассматривается вопрос поиска оптимальной конструкции и оптимального набора материалов для реализации технологии изготовления трёхмерных микросборок с многослойной торцевой коммутацией. Для этого была подготовлена условная модель многослойной коммутации на торцевой поверхности микросборки.

Эта модель включает две вертикальные дорожки в первом слое вертикальной коммутации и одну соединяющую их горизонтальную дорожку во втором слое вертикальных проводников. Толщина дорожек при этом равняется 15 мкм (толщина слоя наращиваемой гальванической металлизации). Ширина дорожек равна 0,5мм. Толщина межслойного диэлектрика на торцевой поверхности также равняется 15 мкм.

В качестве материала диэлектрического разделительного слоя на торце сборки в работе исследованы три варианта полиимидов. Первый вариант – отверждённый полиимидный лак ПИ-ЛК производства АО «Институт пластмасс» [6]. Два других варианта основываются на полиимидах Kapton с малым ТКЛР 150EN-C и 140EN-Z [7].

Последний вариант — композитный материал с наполнителем в виде микро или наночастиц оксида кремния, основанный на полиимиде ПИЛК и характеризующийся более низким значением ТКЛР, чем ненаполненный имидизированный лак. Подобные композиты могут быть получены либо прямым смешиванием с полимерной матрицей обработанного промотором наполнителя, либо посредством золь-гель процессов, либо путём формирования частиц непосредственно из вносимого в полимерную матрицу соединения (при разложении данного соединения) [8].

Параметры полиимидного композита, использованные в работе, основываются на экспериментальных данных из источника [9]. Определение параметров композиционного материала возможно и путём моделирования

[10], однако это крайне затратно (требуется разработка полноценной математической модели), и в рамках данной работы нецелесообразно.

Дорожки с разделительным композитным диэлектриком располагаются на одной из граней микросборки. При этом диэлектрик занимает только часть грани – это сделано с целью уменьшения затрат ресурсов на расчёт модели.

Сама же микросборка показана в виде соединения двух уровней. Каждый уровень представляет собой подложку и слой герметизирующего материала на ней. Материал подложки стеклотекстолит FR4 с габаритами 20x20мм и толщиной 1,5 мм. Габариты области герметизирующего компаунда такие же, как у подложки — 20x20 мм. Толщина области герметизации 2 мм.

Изображение исследуемой модели микросборки представлено на рисунке 2.

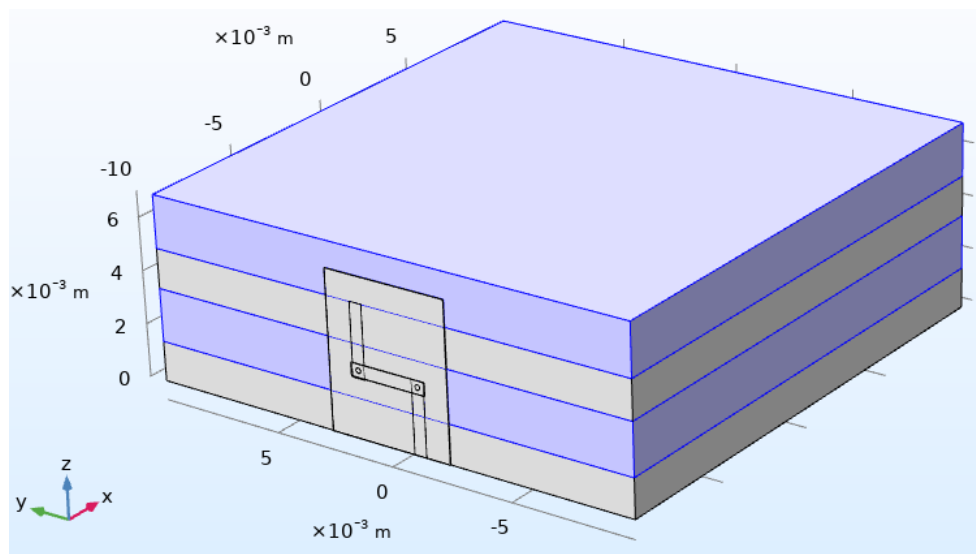


Рисунок 2 — Исследуемая трёхмерная модель микросборки с имитацией многоуровневой торцевой коммутации на одной из граней

В качестве материалов герметизации в работе исследовались два варианта композитов. Первый вариант — промышленный высоконаполненный (больше 85% наполнителя по массе) композит,

параметры которого основываются на параметрах материалов для корпусирования EMG-700 и Kyocera KE-G1270. Второй вариант — композитный материал на основе термостойкой эпоксифосфозеновой смолы и порядка 75% наполнителя в виде микрочастиц оксида кремния [11].

Параметры материалов, используемых в ходе моделирования, представлены в таблице 1.

Таблица № 1

Параметры материалов, используемых при моделировании термомеханических напряжений в многослойной торцевой коммутации

Параметр	ТКЛР, $10^{-6} 1/^\circ\text{C}$	Коэффициент Пуассона	Модуль упругости, ГПа
Полиимид ПИЛК	25	0,34	2,76
Полиимид 150 EN-C	16	0,34	5,3
Полиимид 140 EN-Z	7	0,34	6,9
Композит на основе полиимида ПИЛК	18,2	0,3	2,54
Герметизирующий компаунд на основе несферического наполнителя	15	0,238	16,5
Промышленный герметизирующий компаунд EMC	8,7	0,3	28
Стеклотекстолит FR4	X-15	0,15	25,5
	Y-18		
	Z-50		
Медь	17	0,35	110

Описание процесса моделирования и полученных результатов

В рамках работы представлена ранее модель микросборки с торцевой коммутацией в виде многослойной структуры слоёв перераспределения изучалась в различных вариантах исполнения.

Исполнения отличались материалом герметизации и диэлектрика слоёв перераспределения. Как было упомянуто ранее, изучалось два варианта герметика — промышленный и лабораторный (на основе термостойкой фосфазен-модифицированной смолы), а также четыре варианта диэлектрика слоёв перераспределения — лак ПИ-ЛК, характеризующийся максимальным параметром ТКЛР из числа исследуемых, полиимид 150 EN-C, обладающий чуть меньшим по сравнению с ПИ-ЛК ТКЛР, материал 140 EN-Z с минимальным из числа исследуемых значением ТКЛР и композит на основе лака ПИ-ЛК, характеризующийся меньшим, чем у исходного полимера, значением ТКЛР, а также меньшим значением коэффициента Пуассона и модуля упругости.

Моделирование термомеханической деформации осуществлялось для температуры в 100 °С. Параметр максимального термомеханического напряжения по Мизесу при этом измерялся на трёх различных участках многослойной торцевой коммутации.

Первым измеряемым участком было поперечное сечение многослойной структуры слоёв перераспределения — рисунок 3. Данное сечение позволило понять распределение термомеханических напряжений в первом и втором слое торцевой коммутации, а также узнать уровень термомеханических напряжений в микропереходе. Анализ участка позволил проанализировать, в какой области многоуровневой торцевой коммутации наблюдаются наибольшие термомеханические напряжения при нагреве микросборки до 100 °С.

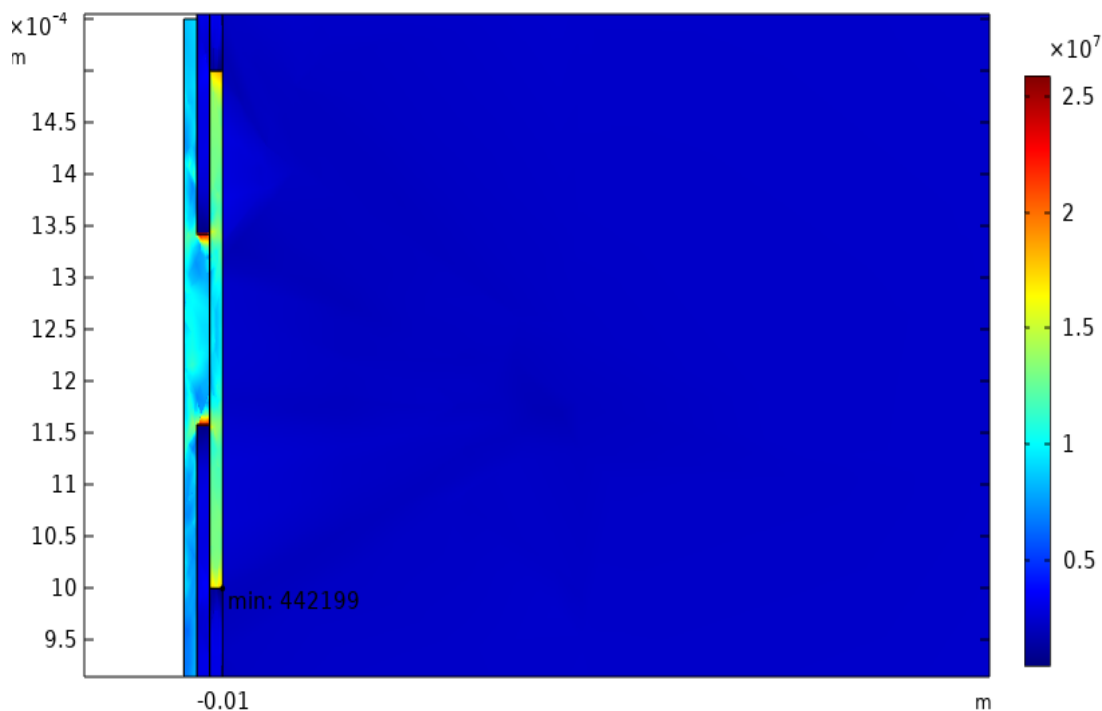


Рисунок 3 — Распределение термомеханических напряжений по Мизесу в поперечном сечении многоуровневой структуры торцевой коммутации (приведено изображение для варианта с герметизацией сборки промышленным компаундом и диэлектриком слоя перераспределения в виде лака ПИ-ЛК)

Вторым анализируемым участком было продольное сечение проводников первого слоя торцевой коммутации. Данный участок максимально наглядно позволил понять, как на уровень термомеханических напряжений в торцевой коммутации влияет материал герметизации (поскольку проводники первого слоя торцевой коммутации проходят через две области на торце микросборки — область стеклотекстолита и область герметика). Участок показан на рисунке 4.

Третий анализируемый участок представлял собой продольное сечение второго слоя торцевой коммутации. Этот участок в большей мере позволял проанализировать влияние диэлектрика слоёв перераспределения на уровень

термомеханического напряжения в коммутации. Уасток представлен на рисунке 5.

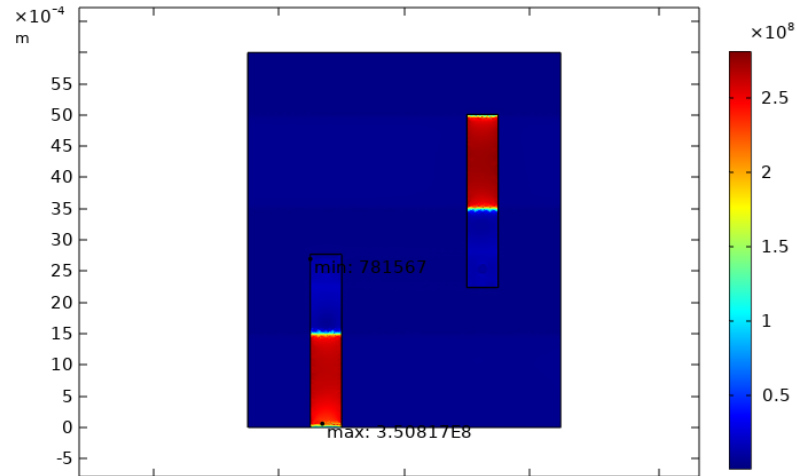


Рисунок 4 — Распределение термомеханических напряжений по Мизесу в продольном сечении первого слоя многоуровневой торцевой коммутации (приведено изображение для варианта с герметизацией сборки промышленным компаундом и диэлектриком слоя перераспределения в виде лака ПИ-ЛК)

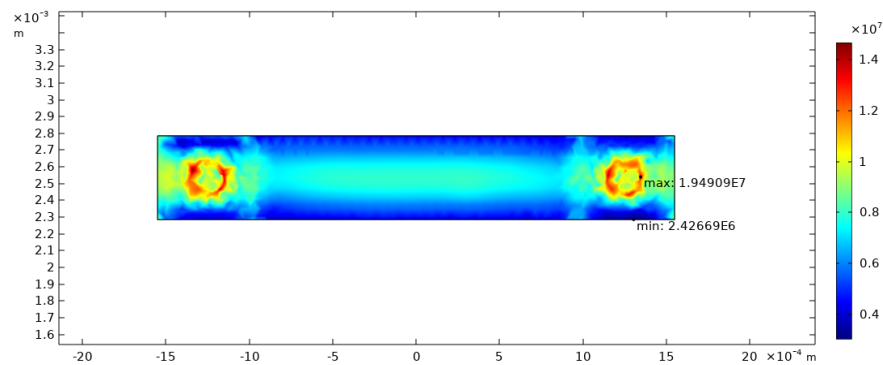


Рисунок 5 — Распределение термомеханических напряжений по Мизесу в продольном сечении второго слоя многоуровневой торцевой коммутации (приведено изображение для варианта с герметизацией сборки промышленным компаундом и диэлектриком слоя перераспределения в виде лака ПИ-ЛК)

Максимальный уровень термомеханических напряжений по Мизесу исследовался на всех трёх участках для каждого исполнения микросборки.

Анализ результатов

В ходе анализа результатов моделирования установлено, что для варианта микросборки с герметизацией промышленным высоконаполненным компаундом максимальный уровень термомеханических напряжений по Мизесу в поперечном сечении торцевой коммутации практически на порядок больше, чем для герметизации компаундом с ТКЛР, близким к ТКЛР меди.

В то же время максимальный уровень термомеханических напряжений в продольном сечении проводников первого уровня коммутации для обоих вариантов герметизации практически идентичен.

В продольном сечении проводников второго уровня торцевой коммутации вновь видно значительное различие максимального уровня термомеханических напряжений между сборками, герметизированными разным компаундом. Так для сборки, герметизированной промышленным высоконаполненным материалом, вновь имеет место более высокое значение термомеханического напряжения.

Все указанные факты говорят о том, что при герметизации трёхмерных микросборок с торцевой коммутацией и платами из стеклотекстолита оптимальным выбором для герметизации служит композит с температурным коэффициентом линейного расширения максимально близким к ТКЛР торцевых проводников.

Аналогичная ситуация характерна и для диэлектрика слоёв перераспределения. Чем ближе ТКЛР данного диэлектрика к ТКЛР меди, тем меньше максимальный уровень термомеханических напряжений в коммутации.

При этом снижение модуля упругости в случае с композитным диэлектриком также оказывает позитивный эффект на термомеханическую стабильность сборки.

Максимальный уровень термомеханического напряжения по Мизесу для всех вариантов моделируемых микросборок во всех трёх анализируемых участках представлен в таблице №2.

Таблица № 2

Параметры термомеханической деформации для различных вариантов моделируемых систем на различных участках многослойной торцевой коммутации

	Максимальное напряжение по Мизесу в поперечном сечении RDL, 10^8 Н/м ²	Максимальное напряжение по Мизесу в проводниках первого слоя коммутации, Н/м ²	Максимальное напряжение по Мизесу в проводниках второго слоя коммутации, 10^8 Н/м ²
Промышленный компаунд для корпусирования с малым ТКЛР для герметизации сборки			
Лак ПИЛК	1,189	3,480	0,694
Полиимид 150 EN-C	1,125	3,485	0,749
Полиимид 140 EN-Z	1,085	3,511	0,923
Композит на основе ПИЛК	1,180	3,491	0,633
Компаунд с ТКЛР, близким к меди, на основе несферического наполнителя			
Лак ПИЛК	0,269	3,508	0,195
Полиимид 150 EN-C	0,141	3,514	0,120
Полиимид 140 EN-Z	0,42	3,542	0,284
Композит на основе ПИЛК	0,154	3,519	0,087

Заключение

Термомеханические напряжения в микросборках с многоуровневой торцевой коммутацией могут быть уменьшены посредством использования материалов герметизирующего компаунда и диэлектрика слоёв перераспределения, характеризующихся ТКЛР, максимально близким к ТКЛР металлизации.

При этом перспективным вариантом служит использование композитного диэлектрика слоёв перераспределения. Такой диэлектрик, основанный на полиимидной матрице, при включении в него наполнителя не только уменьшает значение ТКЛР, но и становится более предпочтительным с точки зрения механических характеристик. Кроме того, наполненные диэлектрики, как правило, характеризуются более высокой адгезией к подложке, а также более высокой адгезией к ним металлизации.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ, проект 23-29-00964.

Литература

1. Ramm P., Klumpp A., Weber J., Lietaer N., Taklo M., De Raedt W., Fritsch Th., Couderc P. 3D Integration Technology: Status and Application Development // Conference: Proceedings of the ESSCIRC. Seville, Spain: ESSCIRC, 2010. pp. 9-16.
 2. Johnson R.W., Strickland M., Gerke D. 3-D Packaging: A Technology Review. Auburn: Auburn University, 2005. 70 p.
 3. Al Attar S. Conception et mise au point d'un procédé 3D 'assemblage de puces silicium amincies, empilées et interconnectées par des via électriques traversant latéralement les résines polyméeres d'enrobage: spécialité ED GEET Micro et Nanosystèmes: dis. École doctorale. Toulouse: Institute National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2012. 180 p.
-

4. Lu D., Wong C. P. Materials for advanced packaging: second edition. Switzerland: Springer, 2017. 974 p.
5. Lau J.H. Semiconductor Advanced Packaging. Switzerland: Springer, 2021. 513 p.
6. Полиимидные лаки ПИ-ЛК-1 и ПИ-ЛК-2. АО «Институт пластмасс» имени Г.С. Петрова. URL: instplast.ru/ru/poliimidnye-laki-pi-lk-1-i-pi-lk-2/
7. Kapton® EN-A, EN-C & EN-Z, where surface quality and CTE control are important. DuPont. URL: dupont.com/electronics-industrial/kapton-en-a-c-y-z.html
8. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инженерный вестник Дона, 2024, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476.
9. Овчинников М.А., Сокол В.А., Соловьёва О.Ю., Тарасов Т.А., Грецова Н.В., Клячина Н.В., Лагунов Е.Н. Математическое моделирование изделий из композитных материалов с заданными свойствами // Инженерный вестник Дона, 2023, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_4__1_Soloveva.pdf_6ff72ea3f9.pdf.
10. Yeob J., Hong S.W., Koh W.-G., Park I. Enhanced Mechanical and Thermal Properties of Polyimide Films Using Hydrophobic Fumed Silica Fillers // Polymers (Basel), 2024, v.16, №2, 17 p.

References

1. Ramm P., Klumpp A., Weber J., Lietaer N., Taklo M., De Raedt W., Fritsch Th., Couderc P. Conference: Proceedings of the ESSCIRC. Seville, Spain: ESSCIRC, 2010. pp. 9-16.
 2. Johnson R.W., Strickland M., Gerke D. 3-D Packaging: A Technology Review. Auburn: Auburn University, 2005. 70 p.
-

3. Al Attar S. Conception et mise au point d'un procédé 3D 'assemblage de puces silicium amincies, empilées et interconnectées par des via électriques traversant latéralement les résines polyméeres d'enrobage : spécialité ED GEET Micro et Nanosystèmes: dis. École doctorale. Toulouse: Institute National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse), 2012. 180 p.
4. Lu D., Wong C. P. Materials for advanced packaging: second edition. Switzerland: Springer, 2017. 974 p.
5. Lau J.H. Semiconductor Advanced Packaging. Switzerland: Springer, 2021. 513 p.
6. Poliimidny`e laki PI-LK-1 i PI-LK-2 [Polyimide varnish PI-LK-1 and PI-LK-2]. AO «Institut plastmass» imeni G.S. Petrova. URL: instplast.ru/ru/poliimidnye-laki-pi-lk-1-i-pi-lk-2/
7. Kapton® EN-A, EN-C & EN-Z, where surface quality and CTE control are important. DuPont. URL: dupont.com/electronics-industrial/kapton-en-a-c-y-z.html
8. Kudryavcev P.G., Figovskij O.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №12. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2476.
9. Ovchinnikov M.A., Sokol V.A., Solov`yova O.Yu., Tarasov T.A., Greczova N.V., Klyachina N.V., Lagunov E.N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, №1. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_4__1_Soloveva.pdf_6ff72ea3f9.pdf.
10. Yeob J., Hong S.W., Koh W.-G., Park I. Enhanced Mechanical and Thermal Properties of Polyimide Films Using Hydrophobic Fumed Silica Fillers // Polymers (Basel), 2024, v.16, №2, 17 p.

Дата поступления: 16.11.2024

Дата публикации: 28.12.2024