

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТРУКТУРЕ СЛОЕВ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИИ МИКРОСИСТЕМЫ СО ВСТРОЕННЫМ КРИСТАЛЛОМ

М.Д. Кочергин

misha.kochergin1999@yandex.ru

И.А. Соловьев

ilya.a.solovyov@gmail.com

Д.В. Вертянов

vdv.vertyanov@yandex.ru

С.П. Тимошенко

spt111@mail.ru

НИУ МИЭТ, Москва, г. Зеленоград, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены проблемы термомеханических напряжений, возникающих в слоях перераспределения при внутреннем монтаже кристаллов в микросборках на основе эпоксидного монолитизирующего компаунда и полиимидной микроструктуры. Описаны конструкторские и технологические ограничения слоев перераспределения в микросборках со встроенными кристаллами. Выполнены расчет и анализ термомеханических напряжений в структуре слоев перераспределения с помощью метода конечных элементов. По результатам расчета определена зависимость термомеханических напряжений в слоях перераспределения от длины проводящих дорожек, угла их сгиба и толщины проводящего и диэлектрического материалов. В моделировании также учтено влияние перехода диэлектрика и проводящих дорожек с кремния на эпоксидный монолитизирующий компаунд. Исследованы термомеханические напряжения в зависимости от расстояния между параллельными дорожками и их длины. Приведен расчет методом конечных элементов двух вариантов конструкции топологии микросистемы со встроенным кристаллом на базе ПЛИС, которые отличаются сглаживанием углов сгиба проводящих дорожек, мест стыка дорожек и контактных площадок, а также толщиной диэлектрического и проводящего слоев. Выполнен сравнительный анализ результатов расчетов напряжений двух вариантов конструкции топологии микросистемы со встроенным кристаллом ПЛИС

Ключевые слова

Внутренний монтаж, слои перераспределения, термомеханические напряжения, температурный коэффициент линейного расширения

Поступила 11.08.2023

Принята 01.09.2023

© Автор(ы), 2023

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 23-29-00964)

Введение. Тенденция миниатюризации полупроводниковых микросхем и электронных устройств при повышении их функциональной сложности приводит к увеличению уровня интеграции, числа контактных площадок на кристалле и уровня плотности их размещения. Такие кристаллы могут содержать несколько сотен контактных площадок, размер которых составляет 50×50 мкм, а расстояние между ними может быть менее 10 мкм. Подобные кристаллы, в число которых входят современные процессоры и ПЛИС, трудно монтировать на коммутационных подложках или рамках методами разварки. Одним из способов решения данной проблемы является применение технологии RDL (Redistribution Layers) формирования слоев перераспределения, при которой наносятся один-два слоя металлизации и два-три слоя полимерного диэлектрического материала такого, как полиимид или бензоциклобутен. Назначение этих слоев — изменить размеры, шаг и расположение исходных контактных площадок кристалла для возможности монтажа бескорпусной микросхемы на коммутационную плату или на подложку микросистемы со встроенным кристаллом [1].

По сравнению с известными технологиями сборки и монтажа кристаллов, например, такими, как flip-chip или проволочный монтаж, технология внутреннего монтажа позволяет увеличить соотношение функциональность/площадь, разместить несколько кристаллов в одной микросборке, улучшить электрические характеристики изделия вследствие более коротких межсоединений, повысить эффективность теплоотвода благодаря встраиванию радиаторов или других систем теплоотвода прямо внутрь конструкции, исключению операции пайки или сварки выводов, а также позволяет выполнить монтаж кристалла с гораздо меньшими топологическими нормами. Для технологии внутреннего монтажа жидкостное химическое травление слоев металлизации заменяется вакуумным распылением структуры металлов. Одновременно с формированием топологии методом вакуумного распыления происходит соединение контактных площадок кристаллов микросхем с токоведущими дорожками подложки микросистемы со встроенным кристаллом [2, 3].

Конструкторские и технологические ограничения слоев перераспределения в микросборках. Несмотря на достижения в области технологий внутреннего монтажа, в настоящее время остается ряд научных, конструкторских и технологических проблем. Так, у технологий FOWLP (Fan Out Wafer Level Packaging) имеются проблемы, связанные с термомеханическими деформациями подложки при изготовлении и эксплуатации. В области герметизирующего компаунда проблема исследована и решается путем применения высоконаполненных монолитизирующих компаундов

с малым температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) порядка $8,5 \cdot 10^{-6}/1 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]. Однако точные данные о термомеханической деформации в слоях перераспределения отсутствуют (хотя и имеются некоторые актуальные исследования по этой теме [5]). Это при том что диэлектрик в RDL-слоях отверждается при температуре $\sim 200\dots 270 \text{ }^\circ\text{C}$. и имеет ТКЛР, равный $(25\text{--}40) \cdot 10^{-6}/1 \text{ }^\circ\text{C}$, что почти в 10 раз больше, чем у кремния [6, 7]. Такая разность ТКЛР может приводить к образованию целого ряда дефектов при корпусировании, что накладывает ограничения на использование материалов с большой разностью ТКЛР. С развитием двух- и трехмерной интеграции число RDL-слоев, необходимых для трассировки и вывода сигнальных цепей к внешним контактам микросистемы со встроенным кристаллом, увеличивается и, следовательно, ужесточаются требования к слоям. Например, для СВЧ-применений, где важна толщина диэлектрика, может потребоваться формирование более толстого диэлектрика для слоев перераспределения. В настоящее время все больше внимания уделяется трехмерной интеграции и корпусированию изделий с высоким тепловыделением, в которых вопросы термомеханической деформации встают еще более остро [8].

В настоящее время продолжается движение от более термостойких материалов диэлектрика к менее термостойким, но имеющим меньшее температурное отверждение. Полиимиды — наиболее распространенные материалы для производства дорогостоящих и сложных кристаллов таких, как микропроцессоры. Для кристаллов указанных типов нет прямой необходимости в низкотемпературном процессе отверждения. В зависимости от температуры стеклования некоторые полиимидные пленки могут быть отверждены при температурах менее $300 \text{ }^\circ\text{C}$. Полиимидные материалы обеспечивают наиболее надежную защиту кристалла при наименьшей чувствительности к условиям проведения процесса отверждения [9].

Полибензоксазолы сохраняют большую часть преимуществ полиимида в области механических параметров. Однако температура отверждения полибензоксазола остается более $300 \text{ }^\circ\text{C}$. В пленках полибензоксазола относительное удлинение часто больше, чем в пленках полиимида, кроме того, данный материал имеет более низкий модуль упругости. Большинство марок полибензоксазола имеют меньшее влагопоглощение, чем полиимид. По сравнению с полиимидами материалы на основе полибензоксазола имеют меньшие химическую и механическую стойкости, также не так хороши их адгезионные свойства [10]. Кроме того, у полибензоксазола меньший срок хранения перед нанесением и более узкий диапазон технологических параметров, чем у полиимида. В настоящее

время преимущества некоторых параметров полибензоксазола над полиимидом сделали его очень привлекательным материалом для слоев перераспределения [11].

Существует также несколько областей, где используется бензоциклобутен. Низкая диэлектрическая проницаемость бензоциклобутена делает его отличным материалом для диэлектрика RDL-слоев, он также имеет низкое влагопоглощение и высокую термостойкость. Бензоциклобутен может быть светочувствительным, что сильно упрощает процесс изготовления топологии. В случае, если бензоциклобутен не является светочувствительным, он травится методами сухого травления [12]. Кроме него имеется еще несколько композиций на основе фоторезистов. Эти фоторезистивные эпоксидные материалы имеют более высокий модуль упругости и более низкую температуру полимеризации, а светочувствительность некоторых из них сильно упрощает процесс формирования топологии.

Основные параметры материалов, чаще всего применяемых в качестве диэлектрика для RDL-слоев, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры различных типов материалов диэлектриков для RDL-слоев [12–15]

Параметр	Полиимид	Бензоциклобутен	Эпоксид	Полибензоксазол
Температура стеклования, °С	350*	350*	380*	310*
Температура полимеризации, °С	250–300	200–250	200*	220–260
Теплопроводность (при комнатной температуре), Вт/(м · К)	0,13*	0,29*	0,2*	0,18*
Светочувствительность	Зависит от производителя	–	+	+
Модуль Юнга (при комнатной температуре), ГПа	2–4	3–4	5*	2–3
Коэффициент Пуассона (при комнатной температуре)	0,3*	0,3*	0,22*	0,3*

Параметр	Полиимид	Бензоциклобутен	Эпоксид	Полибензоксазол
ТКЛР (при комнатной температуре), $10^{-6}/1^{\circ}\text{C}$	30–60	40–50	52*	18–30
Диэлектрическая проницаемость, 1 кГц	3,5*	2,7*	3–4	2,9*
* Усредненные значения параметра приведенного типа материала.				

Профили отверждения всех приведенных в табл. 1 диэлектрических материалов указываются по времени для максимальной температуры выдержки, которое обычно составляет порядка часа, но общий цикл отверждения включает в себя также время медленной кривой нагрева до требуемой температуры и время последующей кривой охлаждения. В результате полный цикл отверждения составляет 4–7 ч и более. Это отчасти связано с необходимостью равномерного нагрева воздуха и камеры, так как отверждаемый материал поглощает теплоту индуктивным способом. Причиной медленных циклов нагрева и охлаждения также является наличие профиля механического напряжения, так как пленка нагревается сверху вниз до поверхности пластины [16].

Многие современные исследования направлены на разработку диэлектрических материалов с ТКЛР, близким к ТКЛР кремния, что, очевидно, снизит уровень напряжений. Кроме того, некоторые производители предлагают полимерные материалы для RDL-слоев и других применений в микроэлектронике с ТКЛР до $4 \cdot 10^{-6}/1^{\circ}\text{C}$, что очень близко к значению ТКЛР кремния [17]. Однако, как утверждают производители, это все еще экспериментальные разработки, к тому же при использовании материала с таким экстремально низким ТКЛР по сравнению с широко используемыми в производстве аналогами встает вопрос о других, не менее важных его свойствах (см. табл. 1), также оказывающих решающее действие на работоспособность устройства.

В большинстве научных публикаций по теме термомеханических напряжений в RDL-слоях исследуются напряжения в зависимости от типа материала, его свойств, режимов отверждения и условий технологического процесса. Практически отсутствуют научные работы, в которых исследуются термомеханические напряжения в зависимости от геометрической формы дорожек и толщины слоев металла и диэлектрика [18–21].

Существуют лишь рекомендации по их проектированию, где указано, что металл и диэлектрик должны быть равными по толщине [22]. Снижение термомеханических напряжений с помощью изменения геометрии дорожек, возможно, является не таким эффективным, но куда более простым способом, чем разработка новых материалов.

Описание конструкции микросистемы со встроенным кристаллом. Рассмотрим модель микросистемы со встроенным кристаллом, подготовленную для моделирования термомеханических напряжений в слоях перераспределения. Площадь кристалла ПЛИС составляет $5,09 \times 5,49 \text{ мм}^2$, а его контактных площадок — $50 \times 50 \text{ мкм}^2$. С помощью слоев перераспределения контактные площадки кристалла выводятся на посадочное место типа BGA (Ball Grid Array) диаметром 200 мкм, шагом 425 мкм и площадью $9,8 \times 9,4 \text{ мм}^2$. Проводящим материалом слоев перераспределения выступает медь, в качестве адгезионного и барьерного слоев — титан, а диэлектриком выбран полиимид. Ширина проводящих дорожек 20 мкм, минимальный зазор между ними 12 мкм. Схема конструкции приведена на рис. 1.

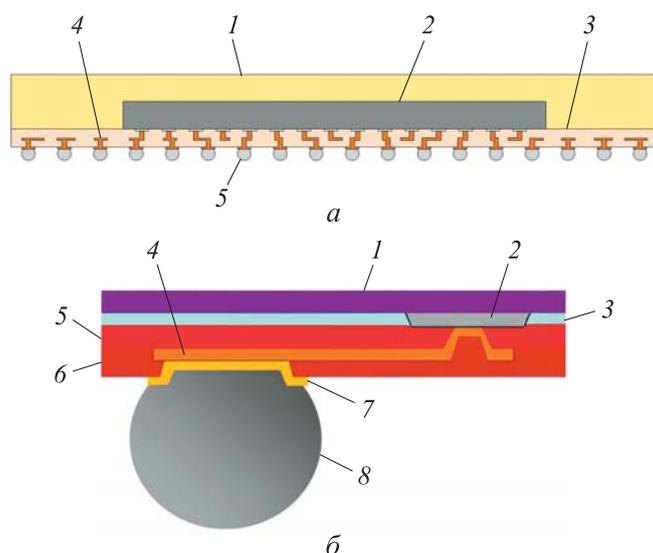


Рис. 1. Структуры:

- a* — микросистемы со встроенным кристаллом (1 — герметизирующий компаунд; 2 — кристалл; 3 — полиимид; 4 — коммутация слоев перераспределения; 5 — припойный бамп);
- б* — слоев перераспределения (1 — кристалл; 2 — контактная площадка; 3 — слой пассивации на кристалле; 4 — слой перераспределения; 5, 6 — первый и второй слои полиимиды; 7 — подбамповая металлизация (Under Bump Metallurgy, UBM); 8 — припойный бамп)

В качестве объекта для моделирования взята упрощенная до размеров $1,4 \times 1,2$ мм модель топологии с сохранением всех наиболее критических, с точки зрения термомеханических напряжений, мест — областей перехода полиимида с кремния на компаунд и наименьшим зазором проводников. Упрощение конструкции необходимо из-за ограничений производительности. Спроектированная топология микросистемы со встроенным кристаллом приведена на рис. 2, *а*, где красным цветом обозначен фрагмент, который используется в упрощенной модели (см. рис. 2, *б*).

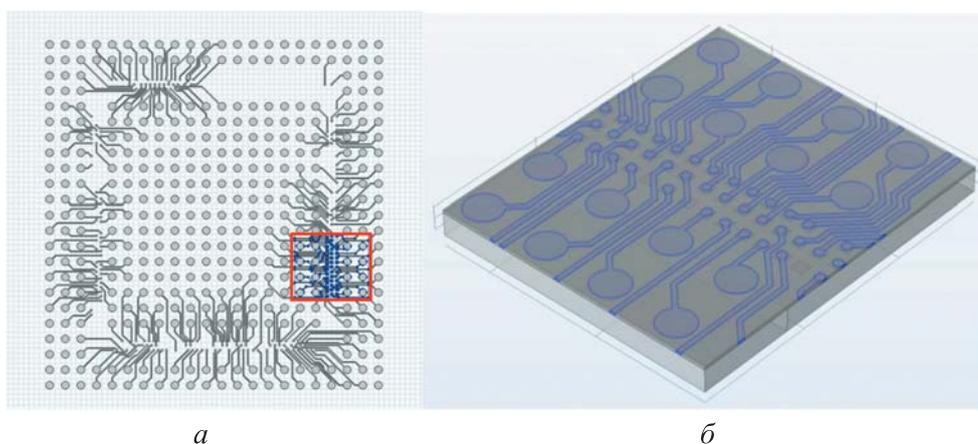


Рис. 2. Проект топологии микросистемы со встроенным кристаллом, импортированным в COMSOL Multiphysics (*а*), и трехмерная модель фрагмента упрощенной конструкции микросистемы со встроенным кристаллом (*б*)

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Для анализа термомеханических напряжений в слоях перераспределения проведено моделирование разработанной топологии микросистемы со встроенным кристаллом методом конечных элементов для выявления значений термомеханических напряжений и их зависимости от геометрии модели и физических параметров материалов. В качестве САПР CFD-анализа (Computer Fluid Design) использовался программный пакет COMSOL Multiphysics.

Технологический процесс изготовления рассматриваемой конструкции предполагает нанесение на временный носитель слоя жидкого полиимида (лак ПИ-ЛК) и его имидизацию, затем на полиимид помещается кристалл и герметизируется компаундом PNA-1. После этого временный носитель удаляется, а полиимид над контактной площадкой кристалла протравливается. Формирование коммутации в RDL-слоях происходит

с помощью магнетронного распыления меди на слой полиимида. Второй слой полиимида наносится аналогично первому после формирования топологии RDL.

Ключевыми параметрами материалов конструкции микросистемы со встроенным кристаллом, оказывающими наибольшее влияние на результат моделирования, являются модуль Юнга, коэффициент Пуассона и ТКЛР. Данные параметры используемых в моделировании материалов сведены в табл. 2 (значения параметров указаны при комнатной температуре).

Таблица 2

Параметры материалов конструкции микросистемы со встроенным кристаллом для моделирования термомеханических напряжений с помощью МКЭ

Материал	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	ТКЛР, $10^{-6} / 1^{\circ}\text{C}$
Медь	115	0,32	16,7
Монокристаллический кремний	110	0,18	5
Полиимид (лак ПИ-ЛК)	3,1	0,3	40
Эпоксидный монолитизирующий компаунд PNA-1	8,5	0,25	22

Результаты моделирования конструкции микросистемы со встроенным кристаллом. Результат первичного моделирования термомеханических напряжений при толщине проводящего слоя и слоев диэлектрика 5 мкм приведен на рис. 3. Наибольшие значения термомеханических напряжений получились в медных дорожках при их соединении с контактной площадкой коммутационной подложки и на стыке кристалла и компаунда (рис. 4). На стыке кремния и компаунда напряжения в медных дорожках составляли более 700 МПа. В углах проводящих дорожек на расстоянии ~ 1 мм от границы кремния и компаунда отмечены напряжения ~ 900 МПа и на расстоянии 100 мкм — ~ 1200 МПа.

После проведения первичного моделирования необходимо выявить зависимость термомеханических напряжений от различных геометрических параметров топологии. Для этого сформированы обособленные от общей топологии модели, содержащие медную дорожку в теле полиимида и область перехода полиимида с кристалла на компаунд. Размер

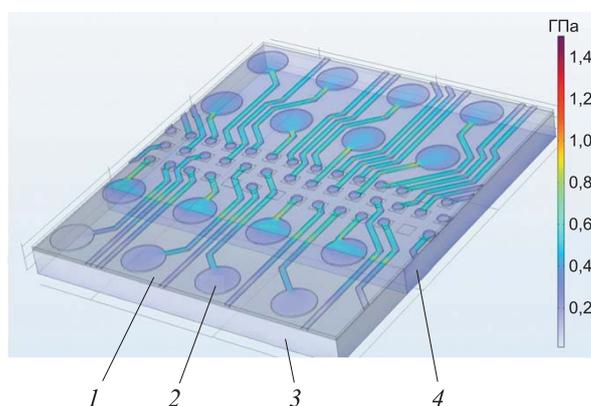


Рис. 3. Результат первичного моделирования термомеханических напряжений при толщине проводящего слоя и слоев диэлектрика 5 мкм:

1 — слой полиимида; 2 — медные проводящие дорожки; 3 — эпоксидный компаунд;
4 — кремниевый кристалл

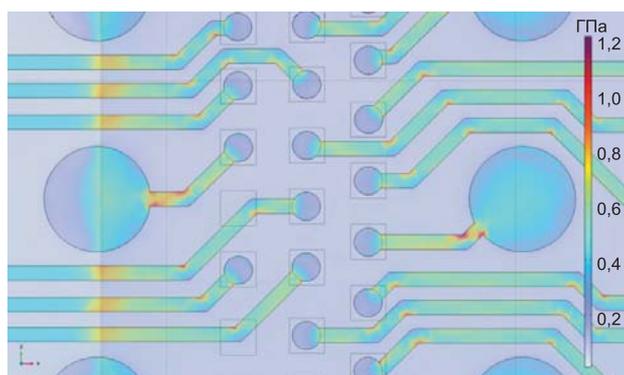


Рис. 4. Область топологии модели микросистемы с зонами наибольших термомеханических напряжений (увеличено)

обособленной модели составил $1 \times 0,5$ мм. Распределение напряжений в обособленной модели при сгибе медной дорожки приведено на рис. 5. При отсутствии сгиба дорожки напряжение равно 740 МПа, а в случае сгиба — 430 МПа. Выполнен расчет напряжений в медных дорожках над компаундом и кремнием в зависимости от радиуса дуги сгиба проводящей дорожки. Результаты расчета приведены в табл. 3.

Согласно данным табл. 3, увеличение радиуса дуги сгиба дорожки ведет к уменьшению до 15 % возникающих термомеханических напряжений, причем по параболической зависимости. Различные значения напряжений над компаундом и кремнием объясняются тем, что разность ТКЛР полиимида и кремния более чем в 2 раза больше, чем для полиимида и компаунда.

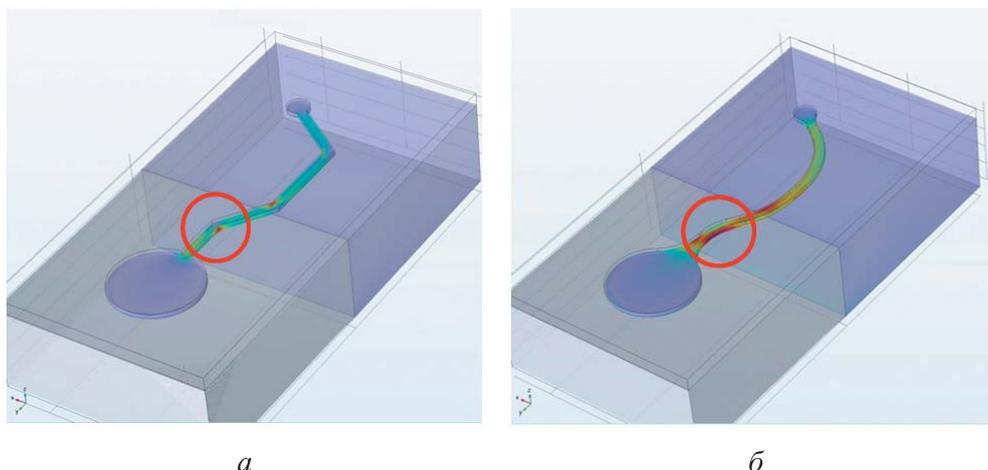


Рис. 5. Распределение напряжений в обособленной модели при сгибе медной дорожки:
a — угловой сгиб; *б* — сгиб по дуге

Таблица 3

Значения напряжений в дорожках в зависимости от радиуса дуги сгиба дорожек

Радиус дуги сгиба дорожки, мкм	Напряжение, МПа	
	Над компаундом	Над кремнием
50	142	281
100	130	255
200	125	248
300	119	245
500	118	244

Проведено исследование термомеханических напряжений в зависимости от расстояния между параллельными дорожками и их длины. Расстояние между параллельными дорожками практически не влияет на термомеханические напряжения (табл. 4). Разность максимального и минимального значений составляет менее 3 %, что можно объяснить погрешностью метода моделирования.

Результаты моделирования напряжений в дорожках в зависимости от их длины сведены в табл. 5. Разность напряжений в коротких и длинных дорожках существенная — максимальные и минимальные значения напряжений над компаундом различаются более чем в 3 раза, а над кремнием — примерно в 1,5 раза.

Таблица 4

**Значения напряжений в дорожках в зависимости
от расстояния между ними**

Расстояние между дорожками, мкм	Напряжение, МПа	
	Над компаундом	Над кремнием
20	243	498
40	243	498
60	239	497
80	241	498
100	245	496

Таблица 5

Значения напряжений в дорожках в зависимости от их длины

Длина дорожек, мм	Напряжение, МПа	
	Над компаундом	Над кремнием
0,2	30	330
0,4	30	440
0,6	42	460
0,8	81	490
1,0	103	496

Для исследования характера зависимости напряжений от толщин полиимида и меди проведен параметрический расчет. Толщина меди и полиимида менялась в диапазоне от 4 до 24 мкм. Зависимость напряжений в указанном диапазоне толщин полиимида и меди приведена на рис. 6. Цветовые области характеризуют значения напряжений согласно приведенной шкале. По оси абсцисс отложена толщина полиимида, по оси ординат — толщина меди. Минимальные напряжения наблюдаются при толщинах полиимида 10...20 мкм и меди 4...6 мкм.

После исследования влияния описанных параметров топологии на значение термомеханических напряжений в спроектированную топологию RDL-слоев были внесены изменения, соответствующие уменьшению значений напряжений согласно полученным зависимостям. Толщина полиимида 12 мкм, толщина меди 4 мкм. Скорректированный фрагмент топологии приведен на рис. 7, сравнение напряжений до коррекции топологии и после — в табл. 6.

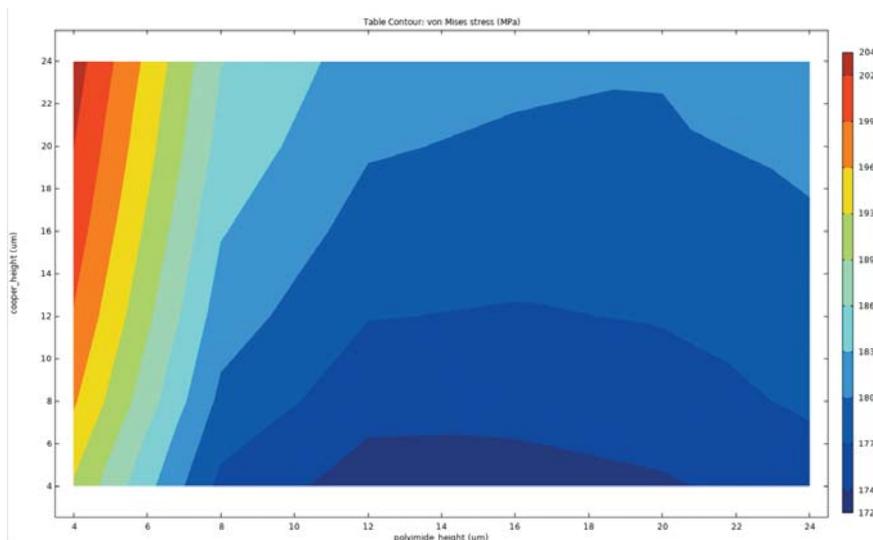


Рис. 6. Зависимость напряжений от толщин полиимида и меди в диапазоне от 4 до 24 мкм

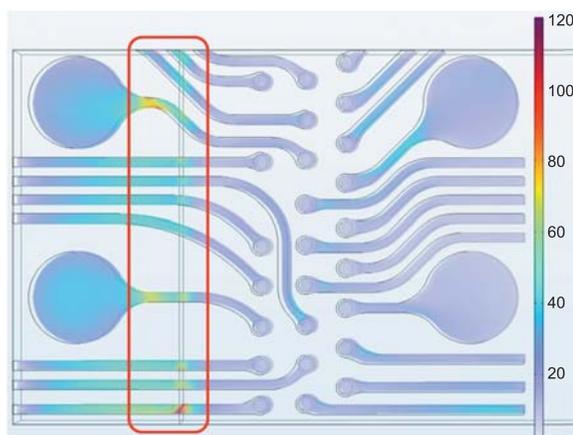


Рис. 7. Скорректированный фрагмент топологии (красным цветом выделена область границы кремний–компаунд)

Таблица 6

Сравнение значений термомеханических напряжений до коррекции топологии и после

Напряжение	Напряжение, МПа	
	До коррекции	После коррекции
Максимальные:		
на границе кремний–компаунд	700	120
на сгибе проводников	1200	90
Среднее на границе медь–полиимид	190	28

В соответствии с данными табл. 6 после коррекции топологии значения термомеханических напряжений уменьшились практически на порядок, что является приемлемым результатом.

Заключение. Описан процесс моделирования термомеханических напряжений методом конечных элементов. Проведено первичное моделирование для определения наиболее критичных с точки зрения напряжений участков. Выполнено исследование зависимостей термомеханических напряжений от угла сгиба дорожек, их длины и расстояния между ними. Установлено, что зависимости напряжений от угла сгиба дорожек и их длины носят параболический характер, а расстояние между проводниками не влияет на значение напряжений. Кроме того, проведено параметрическое моделирование, по результатам которого получены зависимости термомеханических напряжений от толщин полиимида и меди. По данной зависимости определен диапазон значений толщин материалов для минимизации термомеханических напряжений. Толщина меди составляет 4...6 мкм, толщина полиимида — 10...20 мкм. При применении совокупности всех полученных зависимостей к исследуемой модели топологии удалось добиться снижения значений термомеханических напряжений практически на порядок.

Наиболее критичными участками определены области сгиба проводящих дорожек и перехода полиимида с кристалла на компаунд. Для дальнейшего уменьшения напряжений необходимо вносить изменения в состав полиимида или компаунда для уменьшения разности ТКЛР. Добавление в их состав наполнителя, например, частиц оксида кремния, может уменьшить ТКЛР на 20...30 %, однако это также повлияет и на другие их механические свойства, поэтому без проведения моделирования или экспериментальных исследований нельзя точно утверждать, насколько уменьшатся термомеханические напряжения. Исследования в этом направлении будут продолжены с использованием компаунда с наполнителем, а также с проведением отверждения микроволнами переменной частоты VFM (Variable Frequency Microwaves), которое значительно снижает температуру полимеризации.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Cao L., Lee T.C., Chen R., et al. Advanced fanout packaging technology for hybrid substrate integration. *IEEE ECTC*, 2022, pp. 1362–1370.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC51906.2022.00219>

[2] Тимошенко С.П., Тихонов К.С., Титов А.Ю. и др. Разработка технологий внутреннего монтажа бескорпусных кристаллов на гибкие коммутационные платы. *Инженерный вестник Дона*, 2012, № 3.

URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/982>

[3] Вертянов Д.В., Евстафьев С.С., Виклунд П. и др. Технологии внутреннего монтажа бескорпусных элементов и особенности проектирования микросистем со встроенными кристаллами. Часть 1. *Электроника НТБ*, 2020, № 6, с. 96–102.

DOI: <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.197.6.96.102>

[4] Carias V., Thompson J., Myers P.D., et al. Development of mold compounds with ultralow coefficient of thermal expansion and high glass transition temperature for fan-out wafer-level packaging. *IEEE Trans. Compon. Packaging Manuf. Technol.*, 2015, vol. 5, no. 9, pp. 921–929. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2443072>

[5] Nimbalkar P., Kathaperumal M., Liu F., et al. Reliability modeling of micro-vias in high-density redistribution layers. *IEEE ECTC*, 2021, pp. 983–988.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC32696.2021.00161>

[6] Liu J.N., Sil M.C., Cheng R., et al. Surface silanization of polyimide for autocatalytic metallization. *JOM*, 2020, vol. 72, no. 10, pp. 3529–3537.

DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04286-2>

[7] Ghosh S. Electroless copper deposition: a critical review. *Thin Solid Films*, 2019, vol. 669, pp. 641–658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.016>

[8] Nimbalkar P., Kathaperumal M., Liu F., et al. Reliability modeling of micro-vias in high-density redistribution layers. *IEEE ECTC*, 2021, pp. 983–988.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC32696.2021.00161>

[9] Appelt B.K. Advanced substrates: a materials and processing perspective. In: *Materials for advanced packaging*. Boston, Springer Science + Business Media, 2017, pp. 287–329. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45098-8_7

[10] Liu C.H., Chiu C.H., Huang H.C., et al. Wafer warpage characterization of multi-layer structure composed of diverse passivation layers and re-distribution layers for cost-effective 2.5D IC packaging alternatives. *IEEE ECTC*, 2016, pp. 524–530.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.61>

[11] Katoh K. New positive tone polyimides. *The Eleventh Meeting of the Symposium on Polymers for Microelectronics*. Winterthur, 2004.

[12] Benzocyclobutene. *sciencedirect.com: веб-сайт*.

URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/benzocyclobutene>

(дата обращения: 05.06.2023).

[13] Pei X., Han W., Ding G., et al. Temperature effects on structural integrity of fiber-reinforced polymer matrix composites: a review. *J. Appl. Polym. Sc.*, 2019, vol. 136, no. 45, art. 48206. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.48206>

- [14] Jeong H., Jung K.H., Lee C.J., et al. Effect of epoxy mold compound and package dimensions on the thermomechanical properties of a fan-out package. *J. Mater. Sc.: Mater. Electron.*, 2020, vol. 31, no. 3, pp. 6835–6842.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03243-8>
- [15] Ubando A., Gonzaga J. Global-to-local finite element model of shear stress analysis on fan-out wafer-level package. *IEEE HNICEM*, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.1109/HNICEM57413.2022.10109588>
- [16] Yang C.M., Chiu T.C., Yin W.J., et al. Development and application of the moisture-dependent viscoelastic model of polyimide in hygro-thermo-mechanical analysis of fan-out interconnect. *IEEE ECTC*, 2022, pp. 746–753.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC51906.2022.00124>
- [17] Lau J.H., Li M., Tian D., et al. Warpage and thermal characterization of fan-out wafer-level packaging. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 7, no. 10, pp. 1729–1738. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2715185>
- [18] Overview of materials for Polyimide. *matweb.com: веб-сайт*.
URL: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab35b368ab9c40848f545c35bdf1a672&ckck=1> (дата обращения: 05.06.2023).
- [19] Polyimide. In: *Organic lasers*. ScienceDirect, 2017.
URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyimide> (дата обращения: 05.06.2023).
- [20] Costanzo S., Venneri I., Di Massa G., et al. Benzocyclobutene as substrate material for planar millimeter-wave structures: dielectric characterization and application. *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 66–77.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10762-009-9552-0>
- [21] Low & zero CTE polyimides. *nexolve.com: веб-сайт*.
URL: <https://nexolve.com/advanced-materials/low-zero-cte-polyimides> (дата обращения: 05.06.2023).
- [22] Pok Y.W., Sujan D., Rahman M.E., et al. Effect of bond layer properties to thermo-mechanical stresses in flip chip packaging. *MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 95, art. 01003.
DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179501003>

Кочергин Михаил Дмитриевич — инженер-конструктор научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D-микросистем» Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Соловьев Илья Андреевич — лаборант по обработке измерений научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D-микросистем» Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Вертянов Денис Васильевич — начальник научно-исследовательской лаборатории «Передовые технологии корпусирования и производства 3D-микросистем» Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Тимошенко Сергей Петрович — директор Института нано- и микросистемной техники НИУ МИЭТ (Российская Федерация, 124498, Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кочергин М.Д., Соловьев И.А., Вертянов Д.В. и др. Моделирование термомеханических напряжений в структуре слоев перераспределения конструкции микросистемы со встроенным кристаллом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 4 (145), с. 24–42.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-24-42>

**THERMOMECHANICAL STRESSES SIMULATION
IN THE STRUCTURE REDISTRIBUTION LAYERS
OF A MICROSYSTEM DESIGN WITH THE EMBEDDED CRYSTALS**

M.D. Kochergin

I.A. Solovyov

D.V. Vertyanov

S.P. Timoshenkov

misha.kochergin1999@yandex.ru

ilya.a.solovyov@gmail.com

vdv.vertyanov@yandex.ru

spt111@mail.ru

MIET, Moscow, Zelenograd, Russian Federation

Abstract

The paper considers problems of the thermomechanical stresses arising in the redistribution layers during internal installation of crystals into the micro-assembly base with the epoxy monolithizing compound and polyimide microstructure. It describes design and technological limitations of the redistribution layers in the micro assemblies with the embedded crystals. Using the finite element method, thermomechanical stresses in the redistribution layers structure were calculated and analyzed. Based on the calculation results, dependence of thermomechanical stresses in the redistribution layers was determined on the length of conductive tracks, their bend angle and thickness of the conductive and dielectric materials. Simulation also took into account the effect of dielectric and conductive path transition from silicon to the epoxy monolithic compound. Thermomechanical

Keywords

Internal assembly, redistribution layers, thermomechanical stresses, linear expansion temperature coefficient

stresses dependence on the distance between parallel tracks and their length was analyzed. The finite element method was used to calculate two design options for constructing the microsystem topology with the integrated FPLD differing in smoothness of the conductive tracks corners, track junctions and contact pads, as well as in thickness of the dielectric and conductive layers. Results of voltage calculations of the two design options for topology of a microsystem with the built-in FPLD chip were comparatively analyzed

Received 11.08.2023

Accepted 01.09.2023

© Author(s), 2023

This work was performed with the financial support by the RSF grant (project no. 23-29-00964)

REFERENCES

- [1] Cao L., Lee T.C., Chen R., et al. Advanced fanout packaging technology for hybrid substrate integration. *IEEE ECTC*, 2022, pp. 1362–1370. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC51906.2022.00219>
- [2] Timoshenkov S.P., Tikhonov K.S., Titov A.Yu., et al. Development of technologies for internal mounting of coreless dies on flexible commutation boards. *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2012, no. 3 (in Russ.). Available at: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/982>
- [3] Vertyanov D.V., Evstafyev S.S., Viklund P., et al. Unpackaged element's internal mounting technologies and design aspects for microsystems with embedded chips. Part 1. *Elektronika NTB* [Electronics: Science, Technology, Business], 2020, no. 6, pp. 96–102 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2020.197.6.96.102>
- [4] Carias V., Thompson J., Myers P.D., et al. Development of mold compounds with ultralow coefficient of thermal expansion and high glass transition temperature for fan-out wafer-level packaging. *IEEE Trans. Compon. Packaging Manuf. Technol.*, 2015, vol. 5, no. 9, pp. 921–929. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2015.2443072>
- [5] Nimbalkar P., Kathaperumal M., Liu F., et al. Reliability modeling of micro-vias in high-density redistribution layers. *IEEE ECTC*, 2021, pp. 983–988. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC32696.2021.00161>
- [6] Liu J.N., Sil M.C., Cheng R., et al. Surface silanization of polyimide for autocatalytic metallization. *JOM*, 2020, vol. 72, no. 10, pp. 3529–3537. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04286-2>
- [7] Ghosh S. Electroless copper deposition: a critical review. *Thin Solid Films*, 2019, vol. 669, pp. 641–658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.11.016>
- [8] Nimbalkar P., Kathaperumal M., Liu F., et al. Reliability modeling of micro-vias in high-density redistribution layers. *IEEE ECTC*, 2021, pp. 983–988. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC32696.2021.00161>

- [9] Appelt B.K. Advanced substrates: a materials and processing perspective. In: *Materials for advanced packaging*. Boston, Springer Science + Business Media, 2017, pp. 287–329. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45098-8_7
- [10] Liu C.H., Chiu C.H., Huang H.C., et al. Wafer warpage characterization of multi-layer structure composed of diverse passivation layers and re-distribution layers for cost-effective 2.5D IC packaging alternatives. *IEEE ECTC*, 2016, pp. 524–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC.2016.61>
- [11] Katoh K. New positive tone polyimides. *The Eleventh Meeting of the Symposium on Polymers for Microelectronics*. Winterthur, 2004.
- [12] Benzocyclobutene. *sciencedirect.com: website*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/benzocyclobutene> (accessed: 05.06.2023).
- [13] Pei X., Han W., Ding G., et al. Temperature effects on structural integrity of fiber-reinforced polymer matrix composites: a review. *J. Appl. Polym. Sc.*, 2019, vol. 136, no. 45, art. 48206. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.48206>
- [14] Jeong H., Jung K.H., Lee C.J., et al. Effect of epoxy mold compound and package dimensions on the thermomechanical properties of a fan-out package. *J. Mater. Sc.: Mater. Electron.*, 2020, vol. 31, no. 3, pp. 6835–6842. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03243-8>
- [15] Ubando A., Gonzaga J. Global-to-local finite element model of shear stress analysis on fan-out wafer-level package. *IEEE HNICEM*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/HNICEM57413.2022.10109588>
- [16] Yang C.M., Chiu T.C., Yin W.J., et al. Development and application of the moisture-dependent viscoelastic model of polyimide in hygro-thermo-mechanical analysis of fan-out interconnect. *IEEE ECTC*, 2022, pp. 746–753. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECTC51906.2022.00124>
- [17] Lau J.H., Li M., Tian D., et al. Warpage and thermal characterization of fan-out wafer-level packaging. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 7, no. 10, pp. 1729–1738. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2017.2715185>
- [18] Overview of materials for Polyimide. *matweb.com: website*. Available at: <https://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab35b368ab9c40848f545c35bdf1a672&ckck=1> (accessed: 05.06.2023).
- [19] Polyimide. In: *Organic lasers*. ScienceDirect, 2017. Available at: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polyimide> (accessed: 05.06.2023).
- [20] Costanzo S., Venneri I., Di Massa G., et al. Benzocyclobutene as substrate material for planar millimeter-wave structures: dielectric characterization and application. *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 66–77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10762-009-9552-0>
- [21] Low & zero CTE polyimides. *nexolve.com: website*. Available at: <https://nexolve.com/advanced-materials/low-zero-cte-polyimides> (accessed: 05.06.2023).

[22] Pok Y.W., Sujan D., Rahman M.E., et al. Effect of bond layer properties to thermo-mechanical stresses in flip chip packaging. *MATEC Web Conf.*, 2017, vol. 95, art. 01003. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20179501003>

Kochergin M.D. — Design Engineer, Scientific Research Laboratory of Advanced Technologies in Encapsulating and Production of the 3D Microcircuits, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Solovyov I.A. — Laboratory Assistant in Measurement Processing, Scientific Research Laboratory of Advanced Technologies in Encapsulating and Production of the 3D Microcircuits, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Vertyanov D.V. — Head of Scientific Research Laboratory of Advanced Technologies in Encapsulating and Production of the 3D Microcircuits, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Timoshenkov S.P. — Director, NMST Institute, MIET (Shokina ploshchad 1, Moscow, Zelenograd, 124498 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kochergin M.D., Solovyov I.A., Vertyanov D.V., et al. Thermomechanical stresses simulation in the structure redistribution layers of a microsystem design with the embedded crystals. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 4 (145), pp. 24–42 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-4-24-42>