

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРОМОТОРАМИ АДГЕЗИИ НА ОСНОВЕ АМИНОСИЛАНА И ЭПОКСИСИЛАНА НА АДГЕЗИЮ ПОЛИИМИДНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ К КРЕМНИЮ И МЕДИ В СЛОЯХ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ

М.Д. Кочергин, К.К. Удодова, И.А. Беляков, Д.В. Вертянов,
А.А. Гаврилова

*Национальный исследовательский университет
«Московский институт электронной техники»
misha.kochergin1999@yandex.ru*

Поступила 20.11.2023

В работе рассмотрены аспекты технологии корпусирования кристаллов на уровне пластины. Для борьбы с деформациями конструкций, вызванных термомеханическими напряжениями в слоях перераспределения из-за несоответствия температурных коэффициентов линейного расширения различных материалов в структуре, предложен подход увеличения адгезии между сопрягающимися материалами. Проведено изучение адгезии различных полиимидных диэлектриков (полиимидные лаки ПИ-ЛК и АД9103) к кремнию и к меди, в том числе после обработки поверхностей промоторами адгезии на основе аminosилана и эпоксисилана. Для испытаний экспериментальных образцов разработан стенд и соответствующая оснастка. По результатам испытаний, адгезия между исследуемыми материалами оказалась выше, чем прочность кремния на разрушение, вследствие чего конкретные значения величины адгезии между исследуемыми материалами не были получены. На основе проведенных испытаний предложено несколько способов усовершенствования методики проведения подобных испытаний.

Ключевые слова: полиимид, адгезия, кремний, медь, корпусирование, слои перераспределения

УДК 621.3.049.7

DOI: 10/31145/2224-8412-2023-23-1-16-30

Введение

С развитием технологий полупроводниковой промышленности процессы изготовления микросхем становятся все более сложными, что требует соответствующих изменений в технологиях корпусирования.

Технология внутреннего монтажа — это монтаж бескорпусных кристаллов в тело основы функционального радиоэлектронного модуля. В соответ-

ствии с данной технологией кристаллы интегральных схем не корпусируются, а встраиваются в тело самой подложки — основы функционального радиоэлектронного блока печатной платы. На сегодняшний день технология внутреннего монтажа находит широкий спектр применений, начиная с потребительских устройств и заканчивая высоконадежной электроникой для космического и военного применения.

По сравнению с другими известными технологиями сборки и монтажа кристаллов, таких, например, как flip-chip или проволочный монтаж, технология внутреннего монтажа повышает соотношение «функциональность/площадь», позволяет разместить несколько кристаллов в одной микросборке, улучшает электрические характеристики изделия за счет более коротких межсоединений, позволяет повысить эффективность теплоотвода за счет встраивания радиаторов или других систем теплоотвода прямо внутри конструкции, исключает операции пайки или сварки выводов, а также позволяет провести монтаж кристалла с гораздо меньшими топологическими нормами. Для технологии внутреннего монтажа жидкостное химическое травление печатных плат заменяется вакуумным напылением проводящего слоя. Одновременно с формированием токоведущих дорожек печатной платы методом вакуумного напыления происходит соединение контактных площадок интегральных схем с токоведущими дорожками [1,2].

За время своего развития технология внутреннего монтажа разделилась на множество видов, предлагающих различные варианты конструкции и изготовления, но сохраняющих общую концепцию «кристалл внутри тела подложки». Среди наиболее распространенных технологий можно выделить FOWLP (Fan out wafer level packaging, рассредоточенный подход к корпусированию кристаллов на уровне пластины) и FIWLP (Fan in wafer level packaging, сосредоточенный подход к корпусированию кристаллов на уровне пластины) [3].

FOWLP — это технология корпусирования, разработанная для потребностей высокой плотности выводов. Принцип технологии заключается в том, чтобы протянуть проводящую дорожку от кристалла к слою перераспределения (redistribution layer, RDL). Эта технология не требует присоединения интерпозера в виде отдельной подложки или проволочных соединений, что позволяет сделать общую микросборку тоньше. На рисунке 1 показан технологический процесс производства FOWLP. На 3-ем, 4-ом, 6-ом, 8-ом и 10-ом этапах конструкция подвергается тепловому воздействию [4].

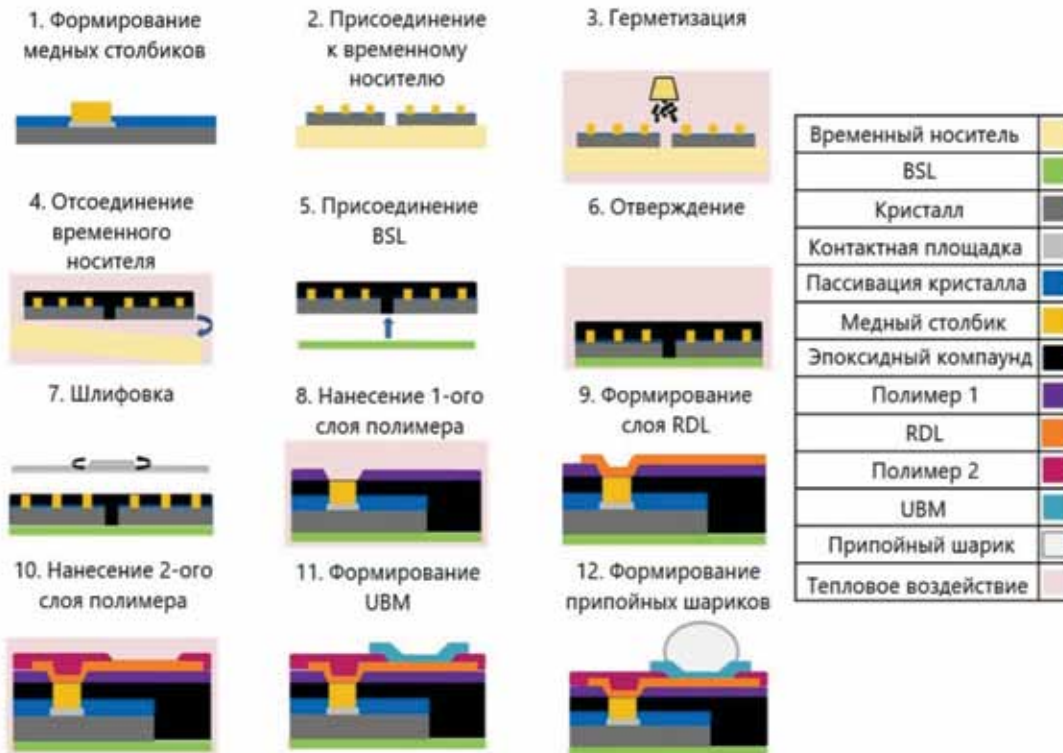


Рисунок 1 — Технологический процесс корпусирования по технологии FOWLP с медными столбиками по методу chip-first

Самой большой проблемой, с которой в настоящее время сталкивается рассматриваемая технология, является возникновение термомеханических напряжений в процессе нагрева. Это вызвано несоответствием температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) между различными материалами в структуре. В процессе производства, особенно при термической обработке с экстремальными колебаниями температуры сопряжения данных материалов, это вызывает существенную деформацию конструкции. Такие явления могут привести к неправильной работе устройства, сокращению времени безотказной работы и даже к отслоению материалов друг от друга или их растрескиванию.

Многие исследования сосредоточены на оценке того, могут ли изменения в конструкции или выбор альтернативных материалов уменьшить величину деформации пластин, вызванной термическим воздействием в процессе корпусирования по технологии FOWLP. Анализ влияния свойств материала на деформацию пластин является одним из важных способов понимания факторов эффективного снижения деформации. Существует множество научных публикаций, где данная проблема рассматривается и предлагается ряд подходов для ее решения. Например, изучалось уменьшение разности между величинами ТКЛР временного носителя или полимера, наносяще-

гося на обратную сторону микросборки (backside laminate, BSL) и эпоксидного компаунда [5-6], уменьшение модуля Юнга материала временного носителя [7-8], уменьшение модуля Юнга и ТКЛР материалов тонких пленок, использующихся в качестве диэлектрика между слоями RDL [9], понижение температуры стеклования эпоксидного компаунда [10], придание материалу компаунда более однородной структуры [11]. Во многих этих исследованиях в качестве доказательства уменьшения деформации конструкции приводятся результаты моделирования рассматриваемой конструкции методом конечных элементов.

Но существуют также альтернативные способы решения проблемы термомеханических напряжений в слоях перераспределения. Чтобы термомеханическая деформация оказывала менее разрушительное воздействие на слои перераспределения можно увеличить адгезию между сопрягающимися материалами конструкции. Наиболее проблемными являются контакты диэлектрика слоев перераспределения с кремнием и с медью. Полиимид является наиболее широко применяемым в качестве диэлектрика слоев перераспределения материалом. Сам по себе он имеет невысокую адгезию к меди и кремнию, поэтому для получения требуемой адгезии используют модификацию поверхности полиимидного лака после нанесения центрифугированием и отверждения с помощью плазмы, производя нанесение металла методом вакуумного напыления. Но известно и о способах, позволяющих повысить адгезию полиимидных покрытий к меди и кремнию без модификации поверхности. Они основаны на образовании активных связей по поверхности полиимида путём применения промоторов (усилителей) адгезии на базе органотитанатов или органоцирконатов, а также аminosиланов (N-(2-аминоэтил)-3-аминопропилтриметоксисилана, 3-аминоэтилтриэтоксисилана, N-[2(винилбензиламино)-этил-3-аминопропилтриметокси-силана) [12-14].

Описанное в данной статье исследование направлено на изучение адгезии различных полиимидных диэлектриков к кремнию и меди, в том числе после обработки поверхностей промоторами адгезии на основе аminosилана и эпоксисилана.

Описание изготовления экспериментальных образцов

Для определения величины адгезии различных полиимидов к меди и кремнию было изготовлено 4 экспериментальных образца. Каждый из образцов представляет собой кремниевую пластину диаметром 100 мм, покрытую полиимидом, на поверхность которого с помощью магнетронного распыления наносилась металлизация в виде подслоя хрома и слоя меди. Использовались кремниевые пластины ориентации 100.

При обработке поверхности пластин силанами каждая пластина мысленно разделялась на 4 равные части (области, четверти), согласно рисунку

ку 2. В первой четверти обработка поверхности силанами не проводилась, во второй четверти силаном была обработана только поверхность кремния перед нанесением полиимида, в третьей четверти силаном была обработана только поверхность полиимида перед распылением слоя металлизации и в последней части силаном были обработаны и поверхность кремния, и поверхность полиимида. Таким образом, каждая пластина имела 4 различных с точки зрения технологического процесса области.

Помимо этого, пластины отличались между собой по типу используемых материалов. На первой пластине использовался полиимидный лак ПИ-ЛК и обработка в аminosилане, на второй — ПИ-ЛК и обработка в эпoxисилане, на третьей — полиимидный лак АД9103 и обработка в аminosилане, на четвертой — АД9103 и обработка в эпoxисилане.

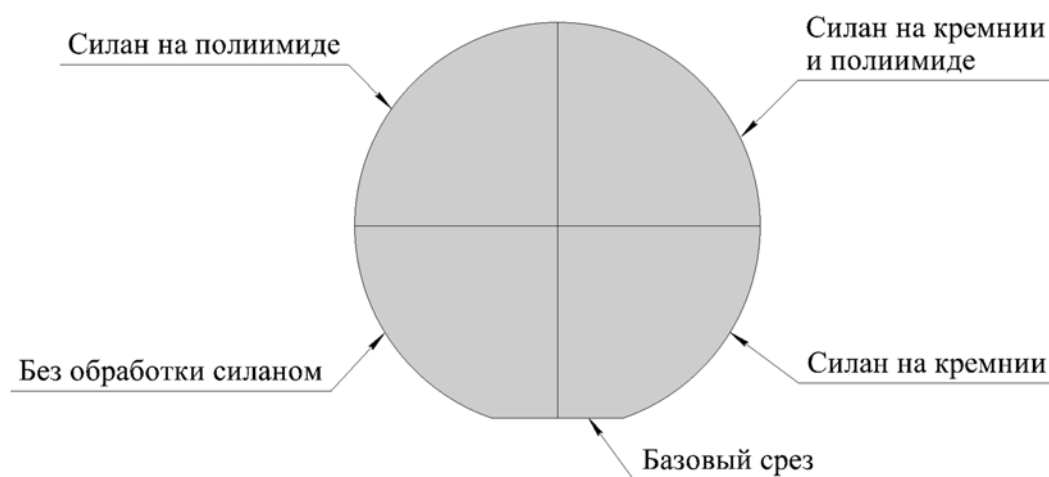


Рисунок 2 — Схематичное разделение пластин на четыре части в соответствии с их разделением на экспериментальных образцах

Технологический процесс изготовления описанных экспериментальных образцов представлен на рисунке 3.

На первом этапе на правую относительно базового среза часть кремниевой пластины с помощью кисти наносили силан (рисунок 3а). Затем слой силана смывался проточной дистиллированной водой, и пластина сушилась в термошкафу в течение 30 минут при температуре 100°C. На втором этапе (рисунок 3б) на пластину методом центрифугирования в течение 1 минуты и при частоте 50 Гц наносился слой жидкого полиимидного лака, после чего происходил процесс его имидизации (процесс отверждения путём циклизации амидокислоты в полиимид) при температуре 150°C в течение 4 часов. На третьем этапе (рисунок 3в) на поверхность имидизированного полиимида наносился еще слой силана на верхнюю относи-

тельно базового среза половину, после чего силан смывался проточной дистиллированной водой, и пластина сушилась при температуре 100°C в течение 30 минут. На четвертом этапе (рисунок 3г) производилось нанесение металлизации методом магнетронного распыления. Толщина подслоя хрома составила 50 нм и толщина слоя меди 1 мкм. После нанесения слоя металлизации, для чистоты эксперимента, слой меди и хрома стравливался с части пластины, где силаном обрабатывался только кремний. Это было сделано для предотвращения случая отрыва слоя металлизации от немодифицированной силаном поверхности полиимида вместо отрыва слоя полиимида от модифицированной силаном поверхности кремния. На рисунке 4 показаны фотографии образцов после окончания процесса их изготовления.

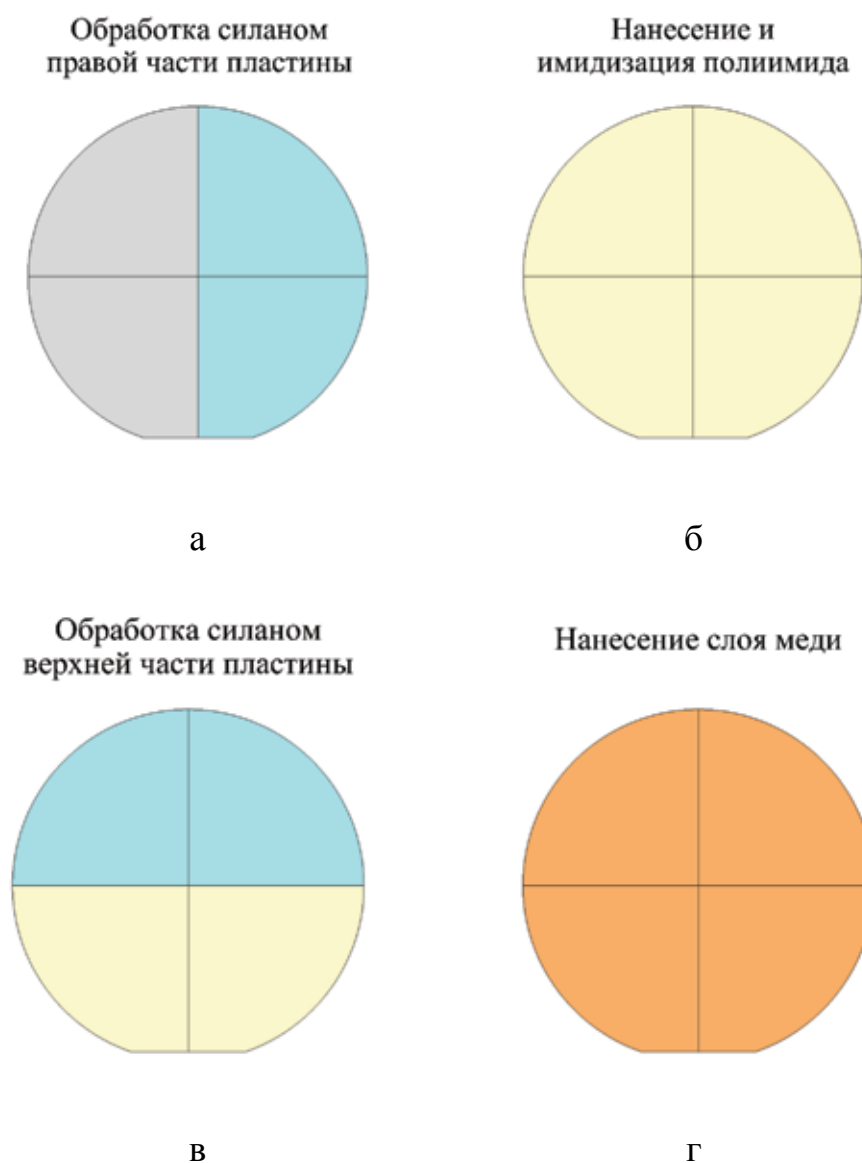


Рисунок 3 — Технологический процесс изготовления экспериментальных образцов пластин

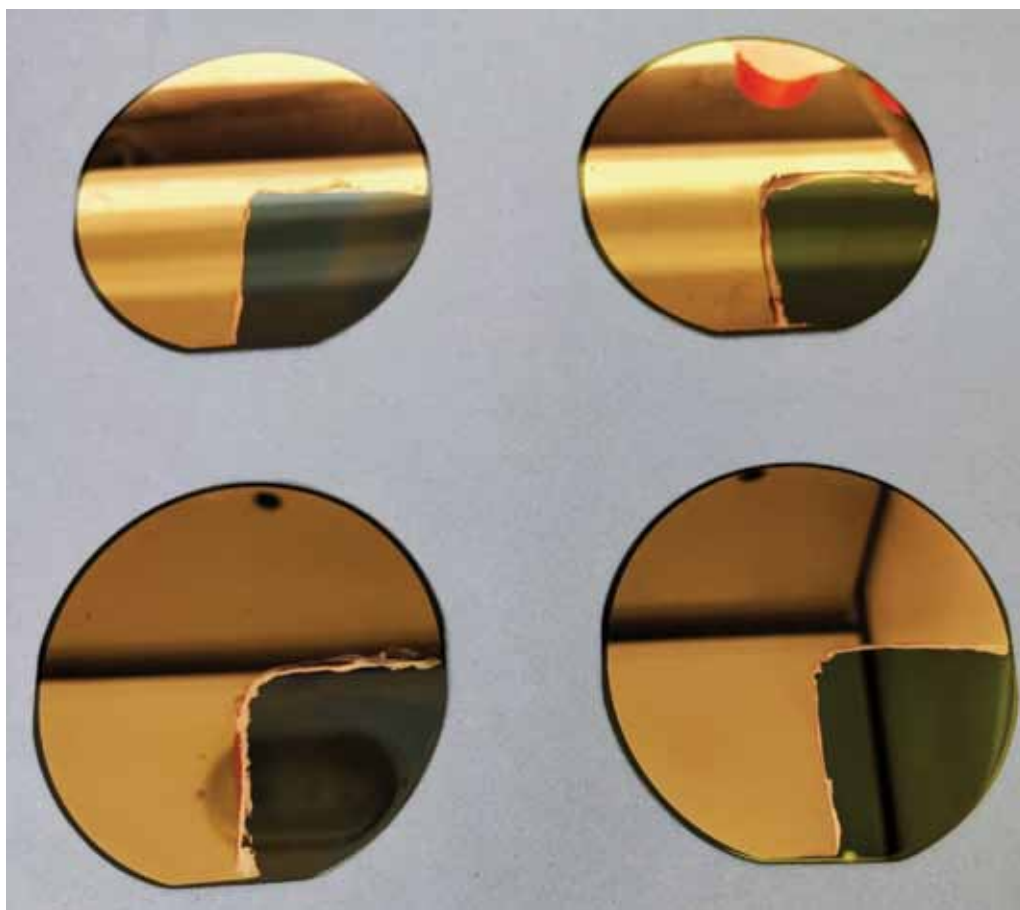


Рисунок 4 — Общий вид четырех экспериментальных образцов пластин перед проведением испытаний на отрыв

Проведение измерений

Для проведения экспериментальных измерений адгезии на описанных образцах была изготовлена оснастка. Оснастка представляет собой коваровую пластину, в которой были вырезаны 4 отверстия. Отверстия располагались симметрично, в соответствии с каждой из четырех частей экспериментальных образцов (рисунок 5). Для придания пластине оснастки жесткости и сопротивлению на изгиб и скручивание она была обрaмлена кольцом из стали. Эта пластина размещалась поверх экспериментальных образцов и прижималась к ним. Такая конструкция была сделана с целью предотвращения разрушения всего образца при воздействии на него перпендикулярного растягивающего силового воздействия, направленного вверх на малом участке площади. Помимо этого, между экспериментальным образцом и описанной пластиной оснастки, а также между экспериментальным образцом и зажимами испытательного стенда размещались силиконовые пластины для уменьшения воздействия механического напряжения на изучаемый образец. На рисунке 5 показаны изображения испытательного стенда с динамометром и оснастка для эксперимента.



а



б

Рисунок 5 — Оснастка для проведения испытаний (а);
стенд для проведения измерений усилия на отрыв (б)

Усилие отрыва представляет собой отношение приложенной силы к площади поверхности, при которой структура разрушается. На каждую из четырех областей на всех образцах были приклеены стальные гайки М8 с помощью клея ВК-9 (рисунок 6). Гайки клеились на боковую грань, площадь которой составляла порядка 55 мм². Образцы с приклеенными гайками размещались на стенде и закреплялись зажимами. Конструкция испытательного стенда включала в себя подвижный блок, подвешенный на крюке динамометра. Это означает, что фактическое силовое воздействие на испытуемый объект в два раза выше, чем показание динамометра, поэтому все результаты измерений были умножены на два. Максимальное значение усилия, которое может зафиксировать данный стенд с учетом подвижного блока — 100 Н. Закрепленный на стенде вместе с оснасткой и готовый к проведению испытания на отрыв экспериментальный образец показан на рисунке 7.

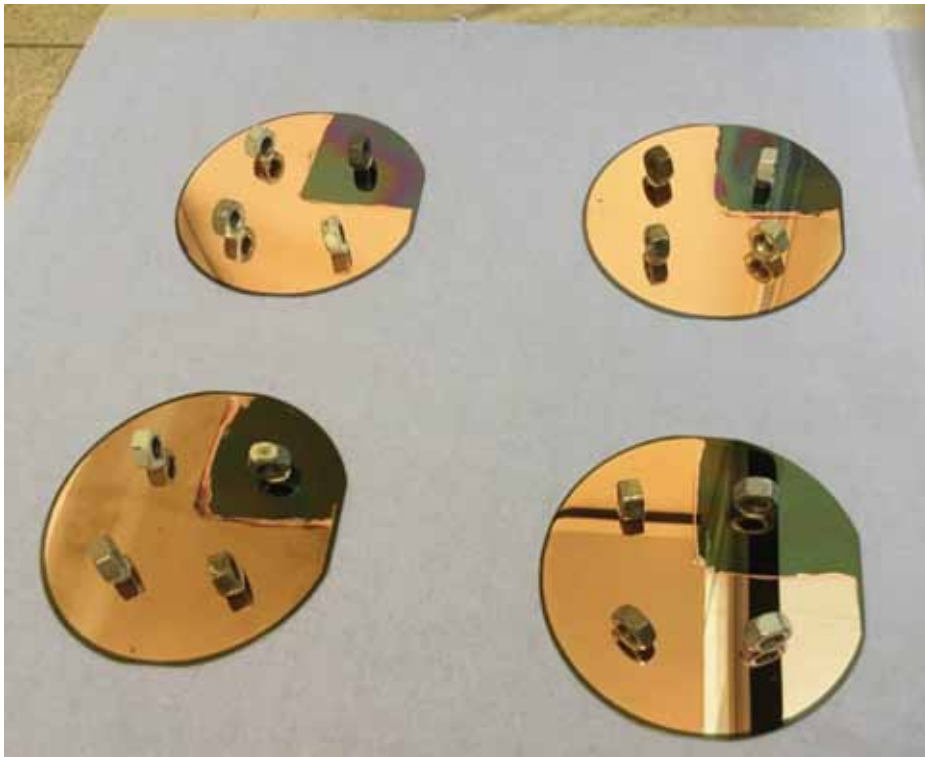


Рисунок 6 — Экспериментальные образцы с посаженными на клей ВК-9 гайками М8



Рисунок 7 — Экспериментальный образец, закрепленный на стенде для испытаний

Согласно количеству изготовленных образцов было проведено 16 испытаний на отрыв — по одному испытанию на каждую комбинацию материала полиимидного диэлектрика и модификации поверхности кремния и полиимида.

Важнейшим результатом испытаний является то, что ни в одном из 16-ти испытаний не удалось выявить конкретные значения адгезии между полиимидом и кремнием и полиимидом и медью. Это произошло из-за того, что адгезия между исследуемыми материалами оказалась выше, чем прочность кремния на разрушение. В большинстве испытаний гайки оторвались вместе с фрагментом кремния, без разрушения связи между исследуемыми слоями кремния, полиимида и меди (рисунок 8). Помимо этого, было выявлено, что в случаях, когда гайка отрывалась от поверхности пластины, не разрушая ее, усилие на отрыв не выдерживал клей ВК-9. Все комбинации материалов и результаты их испытаний приведены в таблицах 1-4.

Таблица 1 — Результаты испытаний на отрыв пластины с полиимидом АД9103, обработанной в аминсилане

Порядок отрыва	Модификация силаном	Результат испытания	Усилие отрыва (Н)
1	Без модификации	Разрушение кремния	99,06
2	Силан на полиимиде*	Разрушение клеевого соединения	>100
3	Силан на кремнии	Разрушение кремния	80,78
4	Силан на кремнии и полиимиде	Разрушение кремния	39,34

Таблица 2 — Результаты испытаний на отрыв пластины с полиимидом АД9103, обработанной в эпоксисилане

Порядок отрыва	Модификация силаном	Результат испытания	Усилие отрыва (Н)
1	Без модификации	Разрушение кремния	27,90
2	Силан на кремнии	Разрушение кремния	94,26
3	Силан на кремнии и полиимиде*	Разрушение клеевого соединения	80,48
4	Силан на полиимиде	Разрушение кремния	26,76

Таблица 3 — Результаты испытаний на отрыв пластины с полиимидом ПИ-ЛК, обработанной в аминсилане

Порядок отрыва	Модификация силаном	Результат испытания	Усилие отрыва (Н)
1	Без модификации	Разрушение кремния	85,78
2	Силан на полиимиде	Разрушение кремния	31,90
3	Силан на кремнии и полиимиде	Разрушение кремния	99,28
4	Силан на кремнии	Разрушение кремния	9,60

Таблица 4 — Результаты испытаний на отрыв пластины с полиимидом ПИ-ЛК, обработанной в эпоксисилане

Порядок отрыва	Модификация силаном	Результат испытания	Усилие отрыва (Н)
1	Без модификации	Разрушение кремния	>100
2	Силан на кремнии	Разрушение кремния	26,36
3	Силан на кремнии и полиимиде	Разрушение кремния	56,70
4	Силан на полиимиде	Разрушение кремния	33,34

Стоит принять во внимание тот факт, что к моменту последнего испытания каждая из пластин уже была достаточно сильно разрушена воздействием на нее силовых нагрузок от первых трех испытаний. Это приводило к тому, что усилие на отрыв получалось значительно ниже, чем максимальное значение на отрыв в предыдущих трех испытаниях на этой пластине.

Для получения максимального значения отрыва, выраженного в МПа необходимо максимальное значения отрыва, полученное в результате испытаний (100 Н) поделить на площадь клеевого соединения (55 мм²). Получится значение, равное 1,82 МПа и тогда можно с уверенностью сказать, что реальная адгезия между исследуемыми материалами выше этого значения. Чтобы сказать, достаточно ли этого значения для того, чтобы выдерживать термомеханические напряжения, возникающие в пластине вследствие ее деформации необходимо проводить дополнительные исследования, направленные на возникновение деформации в подобных экспериментальных образцах при воздействии на них тепловой нагрузки. На рисунке 8 показаны изображения пластин после испытаний на отрыв.

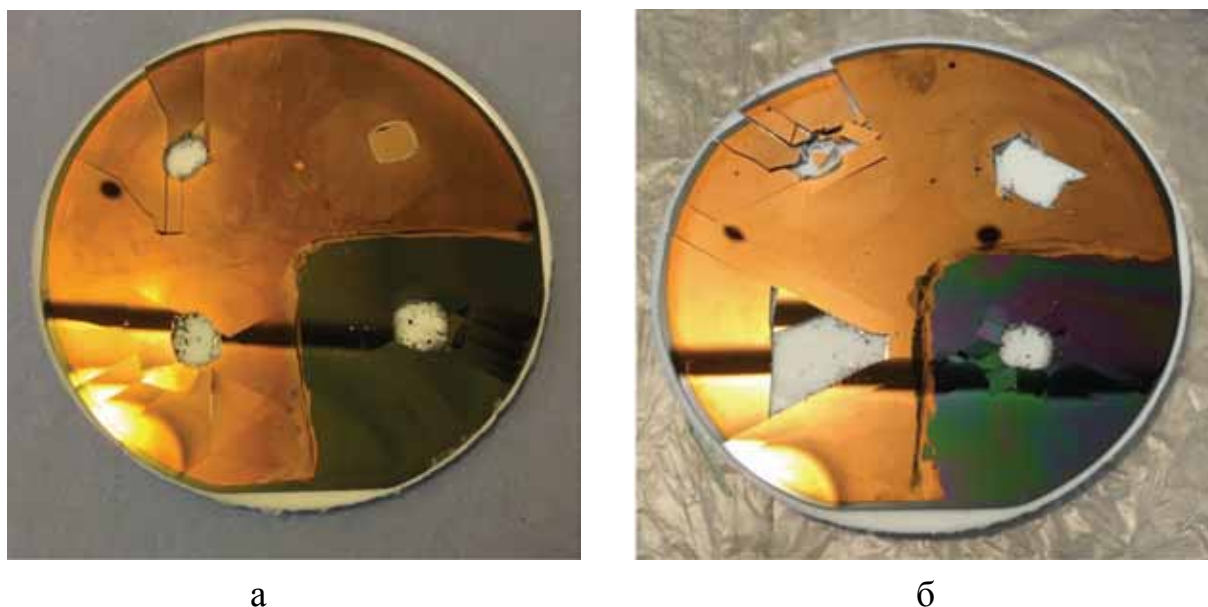


Рисунок 8 — Экспериментальные образцы после проведения испытаний на отрыв: пластина с полиимидом АД9103, обработанная в эпoxисилане (а); пластина с полиимидом ПИ-ЛК, обработанная в эпoxисилане (б)

На основе полученных результатов можно предложить несколько вариантов для совершенствования методики проведения подобных экспериментов. Наиболее простым вариантом представляется осуществлять приклеивание испытуемой пластины задней стороной к пластине оснастки, чтобы сопротивление кремния разрушению было значительно больше. Помимо этого, целесообразно уменьшить площадь соприкосновения отрываемого тела с поверхностью пластины с целью соответствующего уменьшения величины усилия исследуемых пленок на отрыв. Еще одним вариантом является использование для испытаний более толстых пластин кремния.

Заключение

В ходе проведенного исследования установлено, что адгезия полиимидных лаков АД9103 и ПИ-ЛК к кремнию и меди выше 1,82 МПа. Выявить влияние на величину адгезии обработки поверхностей кремния и полиимидна не удалось вследствие недостаточной прочности кремниевых пластин, используемых для изготовления экспериментальных образцов.

На основе проведенных испытаний предложено несколько способов совершенствования методики проведения подобных испытаний: уменьшение площади контакта экспериментального образца с отрываемым телом, посадка экспериментального образца обратной стороной на пластину оснастки при помощи клея, использование для испытаний более прочных кремние-

вых пластин. В будущем данное исследование будет продолжено с использованием усовершенствованной методики эксперимента.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-29-00964).

Литература:

1. Тимошенко С.П., Тихонов К.С., Титов А.Ю., Петров В.С. Разработка технологий внутреннего монтажа бескорпусных кристаллов на гибкие коммутационные платы // ИВД, 2012, 3, 351-357.
2. Вертянов Д.В., Евстафьев С.С., Виклунд П., Сидоренко В. Технологии внутреннего монтажа бескорпусных элементов и особенности проектирования микросистем со встроенными кристаллами. Часть 1. ЭЛЕКТРОНИКА НТБ, 2020, 197, 96-102, doi: 10.22184/1992-4178.2020.197.6.96.102.
3. Fan X.J., Varia B., Han Q. Design and optimization of thermo-mechanical reliability in wafer level packaging // Microelectronics Reliability, 2010, doi: 10.1016/j.microrel.2009.11.010.
4. Chuang W.-Ch., Huang Y., Chen P.-E. Exploring the influence of material properties of epoxy molding compound on wafer warpage in Fan-out wafer-level packaging // Materials, 2023, 16 (9), 3482, doi: 10.3390/ma16093482.
5. Hou F.Z., Lin T.Y., Cao L.Q., Liu F.M., Li J., Fan X.J., Zhang G.Q. Experimental Verification and Optimization Analysis of Warpage for Panel-Level Fan-Out Package // IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2017, 7, 1721-1728.
6. Lau J.H., Li M., Yang L., Li M., Xu I., Chen T., Chen S., Yong Q.X., Madhukumar J.P., Kai W. et al. Warpage measurements and characterizations of Fan-out wafer-level packaging with large chips and multiple redistributed layers // IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2018, 8, 1729-1737.
7. Che F.X., Ho D., Chai T.C. Study on warpage and reliability of Fan-out interposer technology // IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2019, 9, 786-796.
8. Cheng H.C., Wu Z.D., Liu Y.C. Viscoelastic warpage modeling of Fan-out wafer-level packaging during wafer-level mold cure process // IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2020, 10, 1240-1250.
9. Chen C., Yu D.Q., Wang T., Xiao Z.Y., Wan L.X. Warpage prediction and optimization for embedded silicon Fan-out wafer-level packaging based on an extended theoretical model // IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 2019, 9, 845-853.
10. Hamaguchi K., Noma H., Takahashi H., Suzuki N., Nonaka T. Warpage study of FO-WLP build up by material properties and process // Proceedings of

the 2016 6th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), Grenoble, France, 13–15 September 2016, 1-4.

11. *Chen H.L., Chiang K.N.* The Effect of geometric and material uncertainty on debonding warpage in Fan-out panel level packaging // Proceedings of the 2023 24th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), Graz, Austria, 16–19 April 2023, 1-6.

12. *Nimbalkar P.* Effect of titanium-polymer interactions on adhesion of polymer-copper redistribution layers in advanced packaging/ P. Nimbalkar, C. Blancher, M. Kathaperumal, M. Swaminathan, R. Tummala // IEEE transactions on device and materials reliability, 2022, 22 (1), 59-63.

13. *Liu J.-N., Sil M.Ch., Cheng R., Feng S.-P., Chen C.-M.* Surface silanization of polyimide for autocatalytic metallization // The Minerals, Metals & Materials Society, 2022, 72 (10), 3529-3537.

14. Adhesion Promoters: Adhesion Basics & Material Selection Tips for Adhesives [электронный ресурс]/ SpecialChem. — URL: <https://adhesives.specialchem.com/selection-guide/adhesion-promoters-adhesives-sealants>

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURFACE MODIFICATION WITH ADHESION PROMOTERS BASED ON AMINOSILANE AND EPOXYSILANE ON ADHESION OF POLYIMIDE DIELECTRICS TO SILICON AND COPPER IN REDISTRIBUTION LAYERS

M.D. Kochergin, K.K. Udodova, I.A. Belyakov, D.V. Vertyanov,
A.A. Gavrilova

National Research University of Electronic Technology, Moscow

Received 20.11.2023

The paper considers aspects of die encapsulation technology at the wafer level packaging. To combat deformations of structures caused by thermomechanical stresses in the redistribution layers due to the mismatch of coefficients of thermal expansion of different materials in the structure, an approach of increasing adhesion between mating materials is proposed. The adhesion of various polyimide dielectrics (polyimide varnishes PI-LK and AD9103) to silicon and to copper, including after surface treatment with adhesion promoters based on aminosilane and epoxysilane, has been studied. For testing of experimental samples, a bench and appropriate tooling were developed. According to the test results, the adhesion between the materials under study turned out to be higher than the fracture strength of silicon wafers, so the specific values of the adhesion between the materials under study were not obtained. Based on the tests performed, several ways to improve the methodology of such tests have been proposed.

Keywords: polyimide, adhesion, silicon, copper, packaging, redistribution layers, RDL