

Технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ устройствах

Е.А. Гусева, Т.В. Аворник, О.Ф. Аворник, В.А. Тихонов, И.В. Петрова

АО «ОКБ-Планета»

Аннотация: в данной работе исследовалась технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ устройствах. Описаны проблемы, возникающие вследствие наличия зазоров. Проведены исследования по использованию диэлектриков на основе бензоциклобутена, андерфилла и полиимида для заполнения узких глубоких зазоров. По результатам проведенных исследований получена оценка возможности использования каждого из материалов для данного случая.

Ключевые слова: зазоры, СВЧ устройство, бензоциклобутен, андерфилл, полиимид

1. Введение

В последнее время к конструкциям интегральных схем предъявляются все более жесткие требования. Они должны быть не только высокопроизводительными и иметь минимальные габаритные размеры, но и обеспечивать при этом максимально возможную функциональность. Для обеспечения более высокого уровня функциональности при минимальных размерах и максимальном быстродействии все чаще применяется 3D-интеграция [1].

Основополагающим элементом 2,5D- и 3D-технологий является интерпозер – коммутационная кремниевая плата, в которой создаются пассивные и активные элементы схемы. Цепи питания и управления формируются по технологии слоев перераспределения RDL (redistribution layers) [2].

Процесс формирования RDL обычно представляет собой структуру с последовательным использованием слоев металлизации и диэлектрического материала. RDL позволяет менять местоположение контактных площадок на кристалле СВЧ МИС, с целью удобства монтажа. В случае, когда кристаллы СВЧ МИС монтируются внутрь объема кремниевого интерпозера в сформированные заранее полости, возникает зазор между ними.

На рисунке 1 представлена фотография кремниевого интерпозера со смонтированными кристаллами в разрезе, на которой хорошо виден образовавшийся глубокий и узкий зазор. Его глубина составляет 130 ± 5 мкм, ширина зависит от монтажа кристаллов и может варьироваться от 0 мкм до 20 мкм.

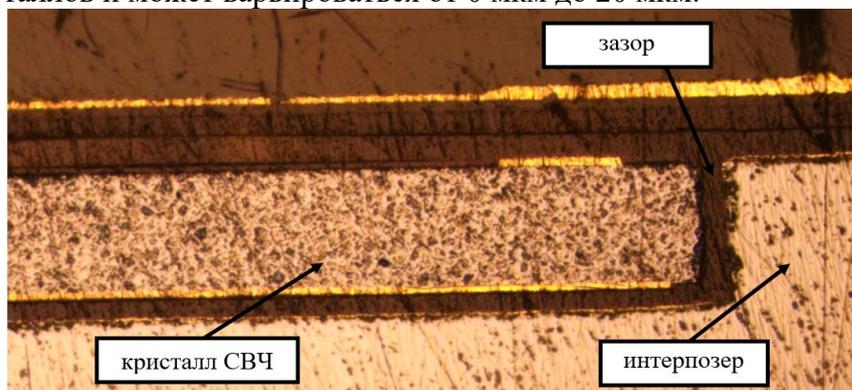


Рисунок 1. Фотография вертикального зазора между кристаллом СВЧ МИС и кремниевым интерпозером.

Следствием возникновения зазоров являются следующие проблемы: большая вероятность непропыления металлизации в этих местах, приводящая к сложности создания качественного первого уровня переходной металлизации; возникновение дефектов в виде пузырей во время проведения фотолитографии; образование трещин в планаризирующем межслойном диэлектрике.

Для устранения всех обозначенных проблем необходимо подобрать материалы и сформировать технологию заполнения зазора между кристаллами СВЧ МИС и интерпозером, учитывая последующие технологические операции изготовления квазимонолитного СВЧ устройства. Материалы, используемые для заполнения узких вертикальных зазоров, должны удовлетворять следующим требованиям: быть не токопроводящими; иметь хорошую смачиваемость, адгезию к металлам и температуру отверждения не выше 250 °С, низкий ТКЛР; обладать высокой степенью планаризации поверхности и химической стойкостью.

2. Подготовка образцов и экспериментальные результаты

Одним из возможных материалов для заполнения зазора является полимерный диэлектрик на основе бензоциклобутена – Cyclotene 3022-63 (далее Cyclotene) от компании «Dow Chemical Co.», который благодаря своим свойствам может быть использован и в качестве межслойного изоляционного диэлектрика. Материалы на основе бензоциклобутена обладают следующими характеристиками: низкое значение диэлектрической проницаемости ($\epsilon \leq 2,9$); высокая устойчивость к химическим воздействиям; низкая температура отверждения (до 250 °С) и умеренная (менее 5%) усадка в ходе этого процесса; возможность формирования больших толщин; высокая степень выравнивания поверхности [3]. Самым большим недостатком материала является высокая напряженность его толстых слоев (28 МПа) [4].

Для исследования возможности заполнения зазора полимерным диэлектриком Cyclotene на кремниевой пластине в сформированные полости были смонтированы кристаллы СВЧ МИС. После чего на всю поверхность пластины методом центрифугирования нанесен толстый слой Cyclotene толщиной 26 мкм для планаризации структуры. В качестве адгезионного слоя использовался Si_3N_4 толщиной 0,025 мкм.

Предполагалось, что далее Cyclotene полностью стравится методом плазмохимического травления (ПХТ) с поверхности кристаллов и интерпозера, но останется в зазорах, заполнив их. Но так как на самих кристаллах СВЧ МИС ранее был сформирован защитный слой на основе Cyclotene, то существовал высокий риск его подтравливания при удалении диэлектрика Cyclotene. Поэтому для защиты кристаллов применялся стоп-слой из алюминия толщиной 0,8 мкм.

Схематичное изображение предполагаемого варианта сформированной структуры до и после плазмохимического травления представлено на рисунке 2.

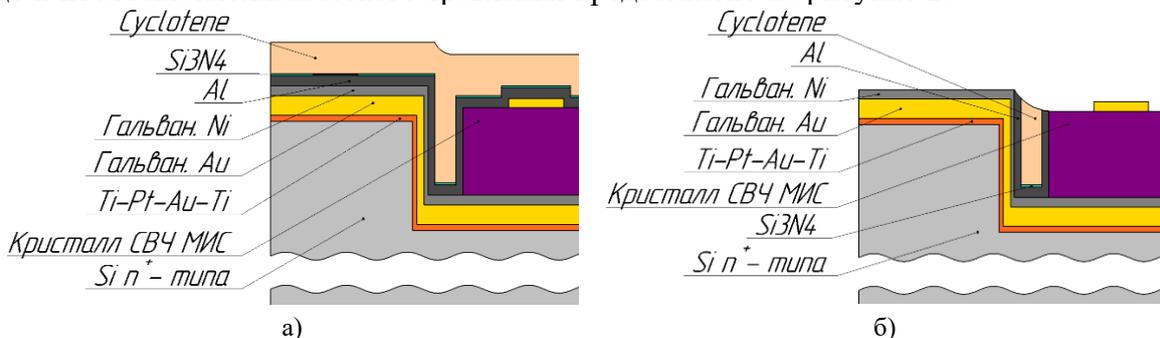


Рисунок 2. Схематичное представление предполагаемого варианта заполнения зазора с помощью Cyclotene: а – до ПХТ Cyclotene; б – после ПХТ Cyclotene.

Несмотря на то, что одним из свойств диэлектриков на основе бензоциклобутена, в частности Cyclotene, является высокая планаризирующая способность, на практике оказалось, что результирующего выравнивания поверхности недостаточно для заполнения зазоров. В результате замеров на оптическом профилометре было выявлено, что разница между слоем Cyclotene в зазоре и поверхностью интерпозера составляет около 35 мкм. Также, опытным путем выявлено, что подтравленный во время ПХТ слой Cyclotene не имеет достаточную адгезию к напыленным на него металлам, что в дальнейшем негативно скажется на формировании качественных слоев металлизации в RDL-структуре. В связи с чем был проведен поиск альтернативных материалов для заполнения глубоких зазоров.

Одним из них стал андерфилл (англ.: underfill, under – под, fill – заполнять) – текучий изоляционный материал, используемый в технологиях корпусирования ИС методом flip-chip для заполнения объема под кристаллом за счет капиллярного эффекта [5]. Он наносится по краям установленного кристалла с применением специальных дозаторов.

Опытные работы проводились на тестовой пластине с полостями, в которые были смонтированы кристаллы СВЧ МИС, и выполнена их подзаливка андерфиллом от «Namics Technologies Inc» и экспериментальным компаундом от АО «РКС». Нанесение андерфилла проводилось на нестандартном для материала и оборудования режиме, вследствие этого в местах подзаливки образовывались крупные капли материала. Фотографии пластины после подзаливки андерфиллом представлены на рисунке 3.

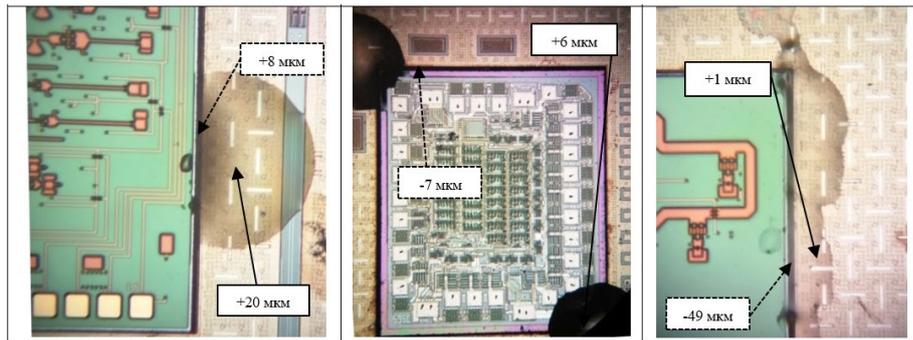


Рисунок 3. Фотографии пластины после подзаливки андерфиллом, где сплошной линией обозначена максимальная высота капли, а пунктирной линией обозначен уровень андерфилла относительно интерпозера.

В результате подзаливки материала обнаружено, что по периметру кристаллов встречаются места, где андерфилл не полностью заполнил зазор. На рисунке 4 представлена фотография с растрового электронного микроскопа (РЭМ).

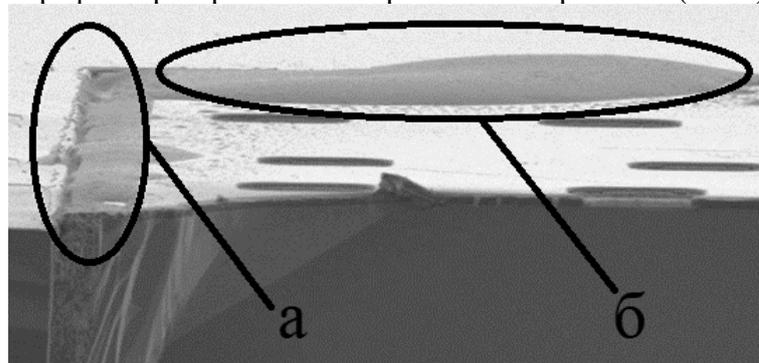


Рисунок 4. Фотография с РЭМ с обозначением мест подзаливки андерфиллом зазора между интерпозером и кристаллом СВЧ: а – место неполного заполнения зазора; б – место полного заполнения зазора.

После нанесения андерфилла на пластине с тестовой структурой была сформирована переходная металлизация методом гальванического осаждения. Во время процесса фотолитографии по напыленному слою из-за неполного заполнения зазоров андерфиллом происходило образование пузырей в фоторезисте. При анализе результатов подзаливки андерфиллом выявлено, что его достаточно, чтобы обеспечить металлический контакт для осаждения переходной металлизации, но оказалось недостаточно, чтобы получить качественную фотолитографию без образования пузырей, которые негативно сказываются на дальнейших операциях.

Другим возможным диэлектрическим материалом для заполнения зазоров является полиимид. Полиимиды – синтетические термостойкие полимеры. Они одни из наиболее широко используемых полимерных диэлектриков в электронике [6].

Исследование по заполнению зазоров проводилось с использованием полиимида АД-9103 ИС от компании МИПП-НПО «Пластик» на тестовой пластине с полостями, в которые были смонтированы кремниевые имитаторы кристаллов СВЧ МИС. При нанесении полиимида центрифугированием (1000 об/мин) происходило образование пузырей в зазорах. Для устранения этого дефекта пластина была помещена в ванну ультразвуковой очистки (УЗО) на полчаса при максимальной мощности. В результате процесса дегазации на поверхности и в объеме полиимида пузырей не обнаружено.

Полное отверждение полиимида проводится при температуре 350 °С, что является недопустимо высокой температурой для кристаллов СВЧ МИС. Поэтому в данном случае осуществляется частичное отверждение в три этапа: первый этап – предварительная подсушка на нагревательной плите для улучшения адгезии; второй этап – постепенное отверждение (увеличение температуры до 100 °С в течение 6 часов) в вакуумном нагревательном шкафу «XD-50» для предотвращения образования пузырей из-за резкого повышения температуры; третий этап – отверждение в сухо-тепловом шкафу «Витязь» при температуре 210 °С в течение 4 часов и 150 °С в течение 12 часов. На рисунке 5 представлен результат после частичного отверждения полиимида.

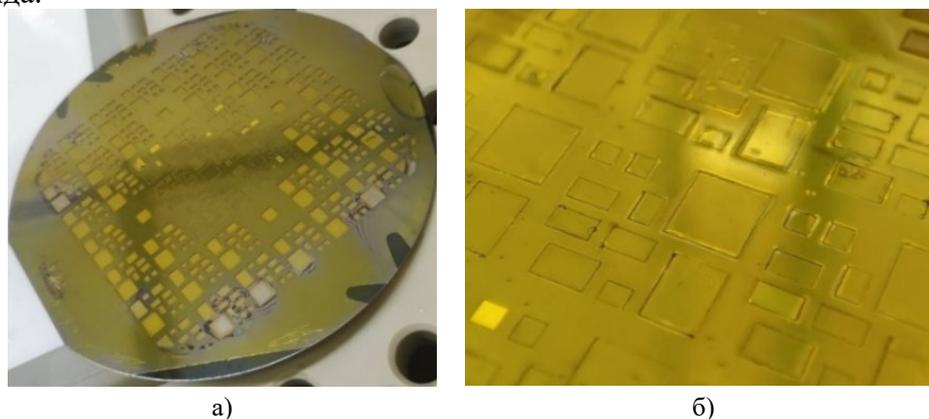


Рисунок 5. Фотография пластины с полиимидом АД-9103 ИС после проведения всех этапов частичного отверждения.

Из-за высокой степени усадки полиимида зазоры остались практически не заполненными. Поэтому на частично отвержденный диэлектрик был нанесен еще один толстый слой полиимида без применения центрифугирования. Процесс дегазации в УЗО увеличен до четырех часов. Далее были выполнены три этапа частичного отверждения, после которых толщина полиимида, в среднем, составила около 60 мкм, включая места зазоров.

На данном образце было проведено ПХТ полиимида в течение 75 минут через маску алюминия в режиме ICP=700 Вт, RF=100 Вт, P=1 Па, sccm SF₆/O₂=15/60 для удаления диэлектрика вне зазоров. Шаблон для процесса фотолитографии под

формирование маски представляет собой прямоугольные «рамки» шириной 55...100 мкм, которые с запасом перекрывают образовавшиеся зазоры между кристаллом СВЧ МИС и интерпозером. Жесткая маска была удалена, и проведено ПХТ полиимида в течение еще 35 минут в том же режиме. Результат ПХТ полиимида представлен на рисунке 6. Окончательная высота полиимида в зазорах варьируется от 5 до 55 мкм, что критично для дальнейшего формирования структуры.

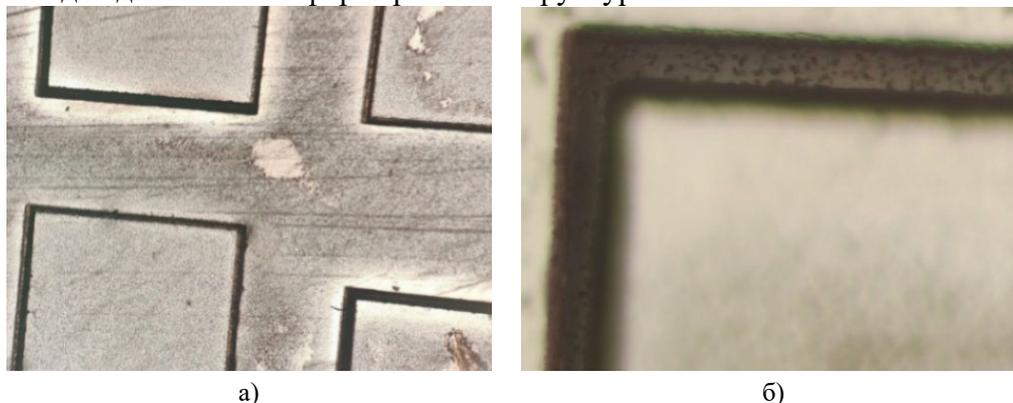


Рисунок 6. Фотография заполненных зазоров после ПХТ полиимида АД-9103 ИС.

После ПХТ полиимида на пластине с тестовой структурой был напылен затравочный слой для формирования металлизации. В процессе проведения фотолитографии по напыленному слою дефектов в виде пузырей не возникло. В результате электрохимического осаждения металлизация была сформирована равномерно на поверхности пластины. Вследствие этого можно сделать вывод, что полиимид полностью заполнил вертикальные зазоры, и в отличие от Cyclotene, отслоение напыленного металла с подтравленных участков полиимида не произошло.

3. Заключение

В результате проведения экспериментальной работы из трех исследованных материалов наиболее перспективным является полиимид. Несмотря на это, технология заполнения вертикальных зазоров в квазимонолитных СВЧ устройствах полиимидом требует дальнейшей доработки, а именно решение проблемы формирования однородного толстого слоя полиимида с учетом его усадки во время отверждения.

Список литературы

1. Васильев А. Современные технологии 3D-интеграции // Компоненты и Технологии. – 2010. – №.102. – С. 156-158.
2. Brian Bailey. Architecting Interposers // Semiconductor Engineering. – 2021. – №.23.
3. Балаченкова С.Е., Адамов Г.Е., Левченко К.С., Калашников А.Ю., Шмелин П.С., Гребенников Е.П. Изучение диэлектрических свойств полимерных материалов на основе производных бензоциклобутена // Российский химический журнал. – 2020. – №3.
4. Mayer, J. M., Larsen, A. S., Bryant, J. R., Wang, K., Lockwood, M., Rice, G., & Won, T.-J. (2004). Non-Organometallic Mechanisms for C—H Bond Oxidation: Hydrogen Atom versus Electron versus Hydride Transfer. Activation and Functionalization of C—H Bonds, 356–369 pp.
5. Materials for Advanced Packaging, edited by D. Lu, C.P. Wong. Springer Science and Business Media. –2009. – 719 p.
6. Beth Keser, Steffen Kroehnert. Advanced Dielectric Materials (Polyimides and Polybenzoxazoles) for Fan-Out Wafer-Level Packaging (FO-WLP) in Advances in Embedded and Fan-Out Wafer Level Packaging Technologies // IEEE. – 2019. 271-315 pp.