

ОБЗОР МЕТОДОВ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОКОМПРЕССИОННОГО БОНДИНГА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

В.А. Беспалов, П.С. Иванин*, Н.А. Дюжев, М.А. Махиборода,
Е.Э. Гусев

НИУ МИЭТ

E-mail: *ivanin@ckp-miet.ru

Поступила 20.01.2022

Процесс герметизации является финальной операцией по сборке продукта (соединению кристаллов). Для осуществления надежной и качественной герметизации между кристаллами необходимо сформировать низкое значение давления (вакуум), которое будет практически неизменным в течение длительного времени при испытаниях изделия в условиях жесткой эксплуатации.

Термокомпрессионное соединение на уровне пластин является многообещающим методом для упаковки МЭМС с использованием таких металлов, как Au, Cu, Al, In в качестве связующего слоя между двумя кремниевыми пластинами. Некоторые преимущества этого метода соединения по сравнению с другими методами соединения: уменьшение размера кристалла МЭМС, электрические межсоединения между двумя пластинами и улучшенный контроль вакуума внутри герметичной полости. При термокомпрессионном соединении металлические связи образуются между осажденными металлическими подложками путем приведения их в тесный контакт и одновременного приложения температуры и давления. Совместное воздействие температуры и давления способствует диффузии атомов металла между поверхностями из-за атомного контакта между обеими подложками. Приложенное давление должно быть достаточно высоким, чтобы обе пластины соприкасались, несмотря на шероховатость поверхности. В результате получается прочная и герметичная связь.

Инерционные МЭМС-датчики, такие как акселерометры и гироскопы, обычно закрываются в герметичных корпусах для защиты сборки от механических повреждений и воздействия окружающей среды. Некоторые из них собраны в герметичных упаковках, но упаковка на уровне полупроводниковых пластин (WLP) стала более важной в последние годы. При применении WLP к МЭМС, помимо обеспечения герметичной инкапсуляции выпущенной структуры, упаковка должна быть совместима с производством МЭМС и стандартными процессами перераспределения и изменения.

В данной статье сделан обзор по существующим методам герметизации с использованием различных металлов (Al-Al, Au-Au, Cu-Cu, In-In) при помощи технологии термокомпрессионного сращивания (бондинга) полупроводниковых пластин.

Ключевые слова: герметизация, 3D интеграция, термокомпрессионный бондинг, микросборка, соединение металл — металл, оксид металла.

УДК 621.792

DOI: 10.31145/2224-8412-2022-22-1-45-80

Введение

Согласно оценкам компании Yole Development, в 2019 г. ёмкость рынка, использующего технологическое решение по микросборке WLP (Wafer Level Package), составляет 3.3 млрд.\$. Ожидается рост до 5.5 млрд.\$ к 2025 году. Совокупный среднегодовой темп роста (CAGR) с 2019 по 2025 год составит 8.9%. С этим ростом возрастет и потребность в герметизации устройств МЭМС.

Герметичные упаковки устройств МЭМС применяются для защиты устройства от проникновения влаги и других загрязняющих веществ, которые могут вызвать проблемы во время обработки, обращения и эксплуатации и / или поддерживать высокий вакуум или контролируемую атмосферу в течение длительного времени. Склеивание должно быть не только прочным и герметичным, но также должно выполняться при температуре ниже критической температуры устройства, что может быть проблемой для сложных структур.

На рисунке 1 представлен сравнительный график показателей герметизации для различных материалов (газы, силиконы и т.д.). Из данного графика можно сделать вывод, что наиболее подходящим материалом для качественной герметизации служит соединение металл — металл, подобное соединение может держать герметичность более 100 лет.

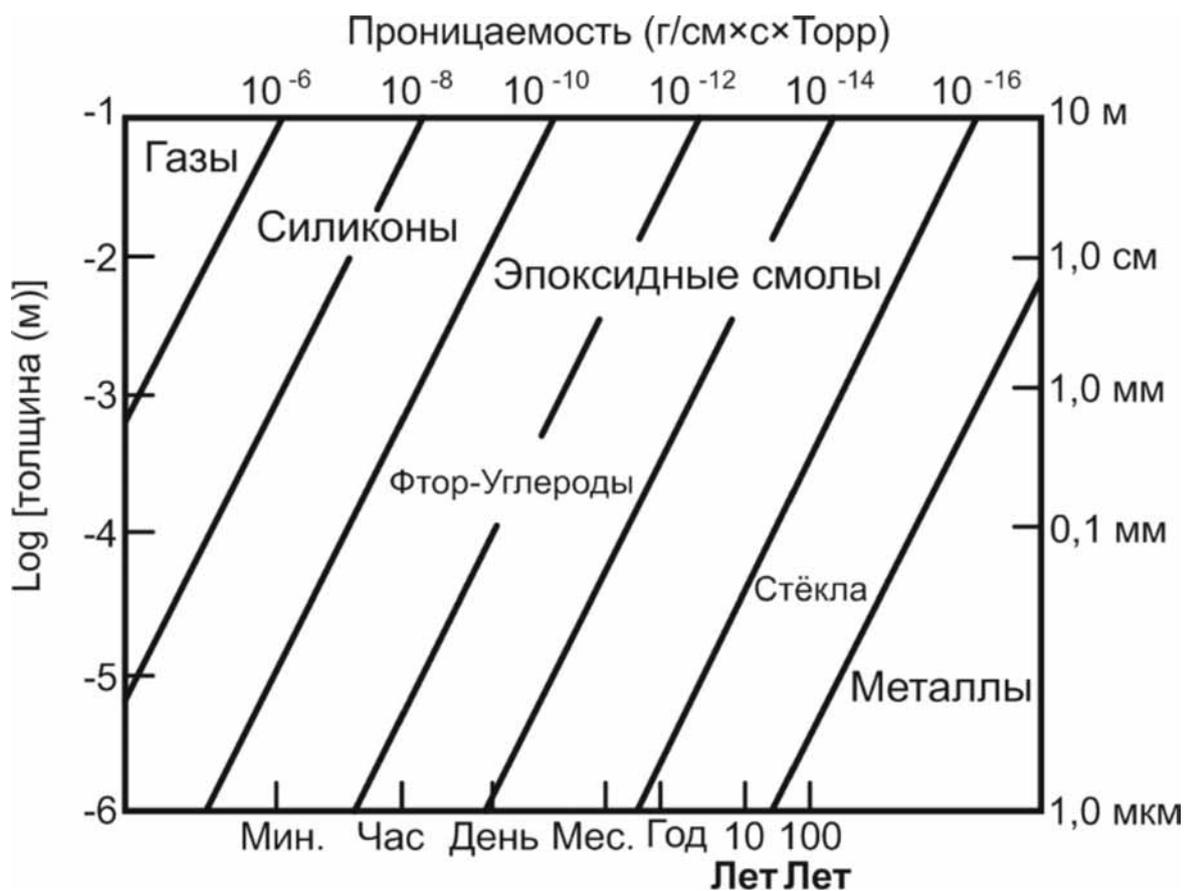


Рис. 1. Показатель герметичности для различных материалов.

1. Выбор метода соединения материала

Для герметизации и сборки различных микрокомпонентов могут быть применены следующие виды бондинга:

1.1. Анодный бондинг.

Анодный (или сопровождаемый электрическим полем) бондинг основан на соединении электропроводящего материала (такого как кремний) и материала с ионной проводимостью (например, щелочное стекло). Две контактирующие подложки нагреваются до 180-500 °С чтобы мобилизовать ионы в то время, пока приложено напряжение в 200-1500 В [1]. Напряжение создает сильное электрическое поле, обеспечивающее тесный контакт поверхностей пластин и скрепляет их друг с другом. Благодаря высоким силам притяжения, созданным электрическим полем, анодное сращивание относительно лояльно к шероховатости поверхностей. Анодный бондинг обычно обеспечивает высокую прочность и герметичность и широко применяется для изготовления микросенсоров и герметизации МЭМС. Такой вид соединения имеет повышенную стойкость к высоким температурам. Однако, значительным его недостатком является тот факт, что применение температуры в совокупности с высоким напряжением в процессе сращивания часто губительно для имеющейся электроники.

1.2. Сращивание пайкой.

При осуществлении бондинга пластин сращиванием пайкой используются слои из металла или припой на основе металлических сплавов, которые, как правило, наносятся на обе пластины. Металлический припой может быть нанесён напылением, ХОГФ, электрохимическим осаждением или иным подходящим способом. Пластины совмещаются для близкого контакта и нагреваются до температуры плавления припоя. Припой растекается и смачивает обе поверхности, что приводит к их плотному контакту и сращиванию. Популярный материал для припоя — Pb-Sn (свинец-олово), который плавится при температуре в 360 °С. Также используются Au-Sn и Sn-Cu. Большинство процессов бондинга с припоем подразумевает использование флюсов для удаления оксидов с металлических поверхностей. Преимущества бондинга пайкой в использовании низких температур и возможности соединить пластины из разных материалов герметично [2]. Однако, любые оксиды, имеющиеся на поверхности металла, могут препятствовать смачиванию поверхностей жидким припоем, что приводит к плохому бондингу.

1.3. Эвтектический бондинг.

Эвтектический бондинг это разновидность сращивания пайкой, в которой используются низкие температуры плавления специальных сплавов. Этот

эффект может быть использован для соединения пластин с разными материалами поверхностей. Когда такие пластины входят в близкий контакт, механизм диффузии между материалами поверхностей служит созданию сплава. Этот сплав имеет более низкую температуру плавления, чем вещества по отдельности. Таким образом, расплавление состава происходит только в очень тонком слое непосредственно на месте сопряжения. Наиболее часто используемая комбинация материалов — это кремний (Si) и золото (Au) с эвтектической температурой плавления 363 °С [3]. Также используются другие комбинации, такие как свинец (Pb) и олово (Sn). В результате применения этого метода можно получить крепкое и герметичное соединение при низких температурах. Он часто используется для герметизации МЭМС — датчиков. Недостатки этого метода в том, что возможны сложности получения полного срачивания на больших площадях из-за наличия собственных оксидов на поверхностях материалов.

1.4. Бондинг с оплавлением стекла

При бондинге оплавлением стекла слой неорганического легкоплавкого стекла используется в качестве промежуточного материала. Слой стекла или стеклянного припоя наносится на одну или обе пластины. Затем пластины сводятся до состояния контакта и нагреваются. Стекло деформируется или растекается и создает достаточно близкий контакт между двумя поверхностями для создания бондинга. Подходят две разновидности стекла: девитрифицированное и стекловидное [4]. Девитрифицированные стёкла — это терморезистивные материалы, которые кристаллизуются после отверждения. Стекловидные — это термопластичные материалы, которые плавятся и растекаются при одной и той же температуре плавления каждый раз, когда подвергаются термической обработке в отличие от девитрифицированных, температура плавления которых неизменно увеличивается после отверждения. Такой вид бондинга часто используется для герметичной сборки микросенсоров. Преимущество метода в возможности соединения различных материалов пластин и в достижении герметичности. А также, в некоторой степени, в лояльности к частицам и структурам на поверхности. Минус данного метода в том, что применяемые температуры оплавления стекла (400 — 1100 °С) не всегда совместимы с электроникой.

1.5. Термокомпрессионный бондинг, прямое срачивание «металл-к-металлу» и ультразвуковой бондинг

Термокомпрессионный бондинг, бондинг металла к металлу и ультразвуковой бондинг — связанные схемы, в которых две поверхности приводятся в близкий контакт приложением давления и нагревом. Обычно хотя бы одна из поверхностей металлическая. Приложенное давление и нагрев

провоцируют пластическую деформацию и слияние поверхностей. Вместо прямого нагрева может применяться ультразвуковая энергия (ультразвуковой бондинг). Есть преимущество в использовании ультразвуковой энергии, состоящее в том, что удаляются собственные оксиды, частицы, а также устраняются неровности поверхностей в местах взаимодействия. Наиболее распространёнными материалами для термокомпрессионного бондинга являются: для прямого сращивания — металл к металлу, а для ультразвукового бондинга — золото к золоту, серебро к серебру, алюминий к золоту и алюминий к стеклу [5]. Как правило, для термокомпрессионного бондинга с присоединением золота к золоту применяется давление порядка 300 Мпа и температура около 500 °С. Недостатки термокомпрессионного и ультразвукового бондингов заключаются в очень больших усилиях, необходимых при бондинге целых пластин, поэтому эти виды сращивания применяются только для малых площадей поверхностей. Также для этого вида бондинга требуется очень высокая ровность поверхности.

1.6. Адгезивный бондинг

Адгезивный бондинг можно рассматривать как ещё одну разновидность термокомпрессионного бондинга. Для обеспечения сращивания двух поверхностей используется промежуточный адгезивный слой, который исполняет роль скрепляющего состава. Полимерный клей наносится на одну или обе соединяемые поверхности. Далее, в некоторых применениях, пластины подвергаются нагреву для задубливания нанесённого состава. После соединения сращиваемыми поверхностями к пластинам прикладывается прижимающее давление для приведения обеих пластин в близкий контакт одновременно с их нагревом либо ультрафиолетовой засветкой, что приводит к окончательному отверждению промежуточных слоёв [6].

На Рисунке 2 схематично изображен контактный интерфейс двух плоских твердых поверхностей, однако, при этом имеющих микроскопические шероховатости. Чтобы привести соединяемые поверхности в достаточно тесный контакт для достижения склеивания, по меньшей мере, одна из них должна будет деформироваться, чтобы соответствовать другой. Это может быть достигнуто пластической или упругой деформацией, диффузией твёрдого материала или смачиванием поверхности жидким материалом. Во всех методах бондинга пластин используется один из этих механизмов для установления связи между поверхностями.

Когда используется полимерный клей для соединения двух твёрдых поверхностей, он деформируется и смачивает поверхности, чтобы обеспечить склеивание, что избавляет от необходимости их дополнительной обработки. Затем он должен быть окончательно отверждён, представляя собой материал, способный обеспечивать силы, удерживающие эти поверхности вместе.

и ограниченная долгосрочная стабильность многих полимерных клеев в сложных условиях.

Термокомпрессионное соединение металлов является перспективной технологией герметизации МЭМС-устройств [7]. Металл не только обеспечивает герметичные уплотнения в течение более длительного времени, по сравнению с другими материалами, но также позволяет значительно уменьшить размер кристалла из-за меньших рамок уплотнения. Исходя из вышеперечисленного, для достижения качественной герметизации МЭМС следует использовать термокомпрессионный бондинг на уровне пластин с использованием различных металлов.

На сегодняшний день существуют различные технологии склеивания (бондинга) материалов для достижения межсоединений и герметизации устройств МЭМС. Одна из таких технологий — анодный бондинг, который имеет ряд недостатков: технология требует применения высокого напряжения при средней температуре, обычно несколько сотен вольт при 400 °С, что может повредить элементы. Кроме того, ионы щелочных металлов в боросиликатном стекле загрязняют производственную линию КМОП.

В качестве альтернативы предлагается технология склеивания стеклянной фритты, которая является процессом без напряжения и доступна для пластин с шероховатой структурой. Однако и данная технология имеет недостатки: слишком большие габариты уплотнительной рамы (около 100 мкм), узкий выбор подложки из-за особенностей процесса склеивания при помощи лазера.

Отличной заменой двум данным технологиям сращивания, является соединение на уровне пластин с использованием тонких металлических пленок, позволяющее одновременно достичь как вакуумной герметизации, так и электрического соединения, является перспективным для упаковки МЭМС устройств на уровне пластин.

2. Термокомпрессионное герметичное соединение

Ниже представлена сводная таблица по параметрам и материалам технологического процесса термокомпрессионного герметичного соединения.

Таблица 1 — Различные параметры процесса бондинга

	Авторы	Материал	Температура, °С	Давление соединения, МПа	Время активной фазы	Толщина слоя металла, мкм
[8]	C.H. Yun, J.R. Martin	Al-Al	450	-	1 час	2
[7]	N. Malik; K. Schjølberg-Henriksen	Al-Al	400, 450, 500	34,28 68,57	1 час	1

[9]	M.M.Visser, Taklo K.	Al-Al	400	114	1 час	1
[10]	J. Froemel, M. Baum	Al-Al	450	4,5	1 час	1
[11]	Shiro Satoh, Hideyuki Fukushi	Al-Al + Sn	360 ~ 395	40 ~ 82	2-4 часа	-
[12]	M.M.V. Taklo, K. Schjøberg- Henriksen	Al-Al	350	102	1 час	-
[13]	B. Rebhan, A. Hinterreiter	Al-Al	100-550	1,9-114	1,5 часа	0,3-1
[14]	Jack Martin	Al-Al	445	117	-	1-2
[15]	Eiji Higurashi, Michitaka Yamamoto	Au-Au	150	208-417	-	0,3
[16]	Henri Ailas, Jaakko Saarilahti	Cu-Cu	300	19,8	-	0,3
[17]	R Straessle, Y P'etremand	In-In	140	0,8	от 10 до 90 мин	4

2.1. Герметичное соединение золото — золото (Au-Au)

Золото (Au) является перспективным кандидатом для термокомпрессионного бондинга, так как, в отличие от Al и Cu, не образует на своей поверхности естественного оксидного слоя при воздействии воздуха [18]. Кроме того, Au является металлом, для которого связывание происходит при таких низких температурах (около 100 °С). Низкотемпературное соединение обычно полезно для снижения термомеханического напряжения в соединенных устройствах. Au является биосовместимым материалом и может применяться в суровых условиях эксплуатации.

Испытания на герметичность обычно проводятся в соответствии с методами испытаний MIL-STD-883. Тем не менее, нормы браковочной утечки, указанные в стандарте MIL-STD-883, недействительны для объемов упаковки менее 0,05 см³ [19]. Более строгие нормы отбраковки для объемов менее 0,01 см³ приведены в стандарте MIL-STD-750E. Традиционно скорость утечки определялась с помощью теста на крупные пузырьки вместе с тестом на тонкую утечку гелия. Теперь, в зависимости от области применения, доступны более чувствительные и точные методы определения скорости утечки. Оптическое измерение изменений прогиба мембраны, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR), тестирование добротности и анализ остаточного газа — вот некоторые из методов проверки скорости утечки [20]. По данным Park et al., скорость утечки гелия из термокомпрессионных соединений Au-Au составляет $2,74 \times 10^{-10}$ мбар·л·с⁻¹. (12) и $3,9 \times 10^{-9}$ мбар·л·с⁻¹. [21]

Верхняя кремниевая пластина (диаметром 150 мм) имеет полость с чувствительными к давлению мембранами. Полости закрывались нижней кремниевой пластиной, состоящей из связующих рамок разной ширины. Пластины имели 481 мембранную структуру с номинальной толщиной 41 мкм и номинальным размером боковых кромок $2,5 \times 2,5$ мм. Мембраны, чувствительные к давлению, изгибаются в зависимости от давления внутри герметичной полости.

Нижняя пластина имела каркасные структуры из Au шириной 20, 40, 80 и 200 мкм, которые определяли площадь склеивания. Все конструкции рамы имели закругленные углы, но была добавлена версия с квадратными углами с рамкой шириной 40 мкм для сравнения конструкции с квадратными углами и конструкции со скругленными углами, см. рисунок 3. Также, одна конструкция с каждой шириной рамы имеет зазор длиной 200 мкм. Все каркасные конструкции имели внутренние размеры $3,34 \times 3,34$ мм. Различные шаблоны были равномерно распределены по пластине. Суммарная площадь склеивания всех склеивающих рамок на пластине диаметром 150 мм составила 504 мм^2 . Каркас Au-бонда был непреднамеренно протравлен на всех нижних пластинах. Это привело к тому, что соединительные рамки были на 10 мкм уже.

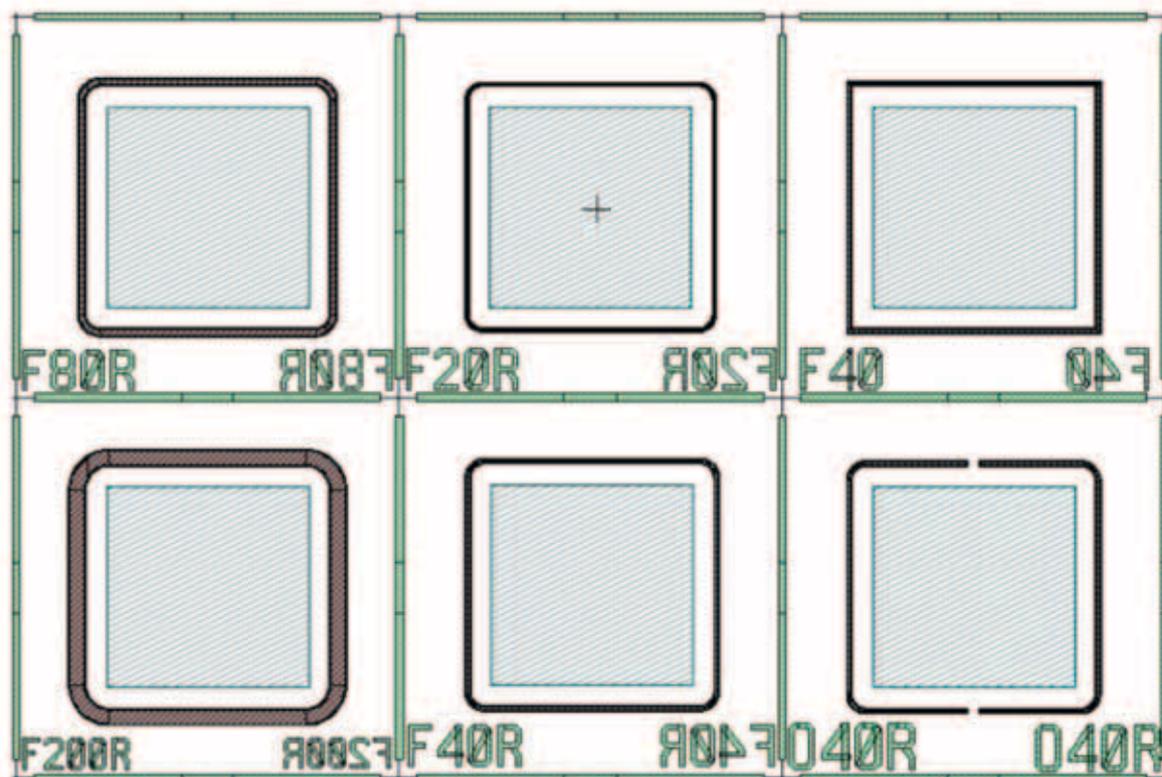


Рис. 3. Макет маски для шести дизайнов кадра. В левом нижнем углу каждого штампа есть ключ, описывающий конструкцию: «F» — рамка, «80» — номинальная ширина рамки 80 мкм, а «R» — закругленный угол [25]

После склеивания наблюдался прогиб мембраны герметичных полостей внутрь. Измеренная фактическая толщина мембраны, прогиб мембраны внутрь и рассчитанные значения ΔP приведены в таблице 3. Измерения прогиба показали, что рамка Au200 имеет наименьшее давление и рамка Au300 имеет самое высокое давление внутри герметичной полости. После хранения в течение 3-5 месяцев среднее изменение прогиба мембраны изменилось на $\sim 0,16$ мкм, это наблюдалось для всех рамок со стандартным отклонением 0,05 мкм. Расчетная максимальная скорость утечки находилась в диапазоне 10^{-11} мбар·л·с⁻¹ для всех типов рамок. Не было различий в оценках скорости утечки для рамок, склеенных при разных температурах склеивания. Также не было никаких различий в степени утечки между различной шириной рамы. Среднее отклонение вверх на 0,4 мкм наблюдалось для преднамеренно незапечатанных кристаллов.

Таблица 3 — Измеренный прогиб мембраны и давление в полости, рассчитанное по прогибу мембраны внутрь

Идентификатор ламината	Толщина мембраны, мкм	Прогиб мембраны, мкм	ΔP , мбар	Максимальный показатель утечки, мбар·л·с ⁻¹
Au150	42	-	-	-
Au200	41.4	5.2	1118	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Au250	43	4.5	1087	$1.4 \cdot 10^{-11}$
Au300	41	5.1	1057	$1.4 \cdot 10^{-11}$

Результат герметичности всех склеенных ламинатов показан на графике (рисунок 5). Рамка Au250, склеенная при температуре 250 °С в течение 15 минут, имела самый высокий коэффициент герметичности, составляющий в среднем 68%. Для индивидуальной конструкции рамы F80R был получен коэффициент герметичности 77,5%. Рамка Au300 показала средний низкий коэффициент герметичности 9,6%. Исследования кристаллов поперечного сечения, нарезанных кубиками, показали, что причиной низкого выхода была погрешность пластин. Самая широкая конструкция рамки (200 мкм) на рамке Au300 имела выход 56%, тогда как рамки шириной 20 и 40 мкм имели выход 0%. Это указывает на то, что температура склеивания 150 °С недостаточна для получения герметичных рам. Результаты показывают, что термокомпрессионное соединение Au-Au при температуре 200 °С и давлении соединения 8,5 МПа в течение 15 минут (т. е. Au200–Au300) дает хороший выход герметичных сборок.

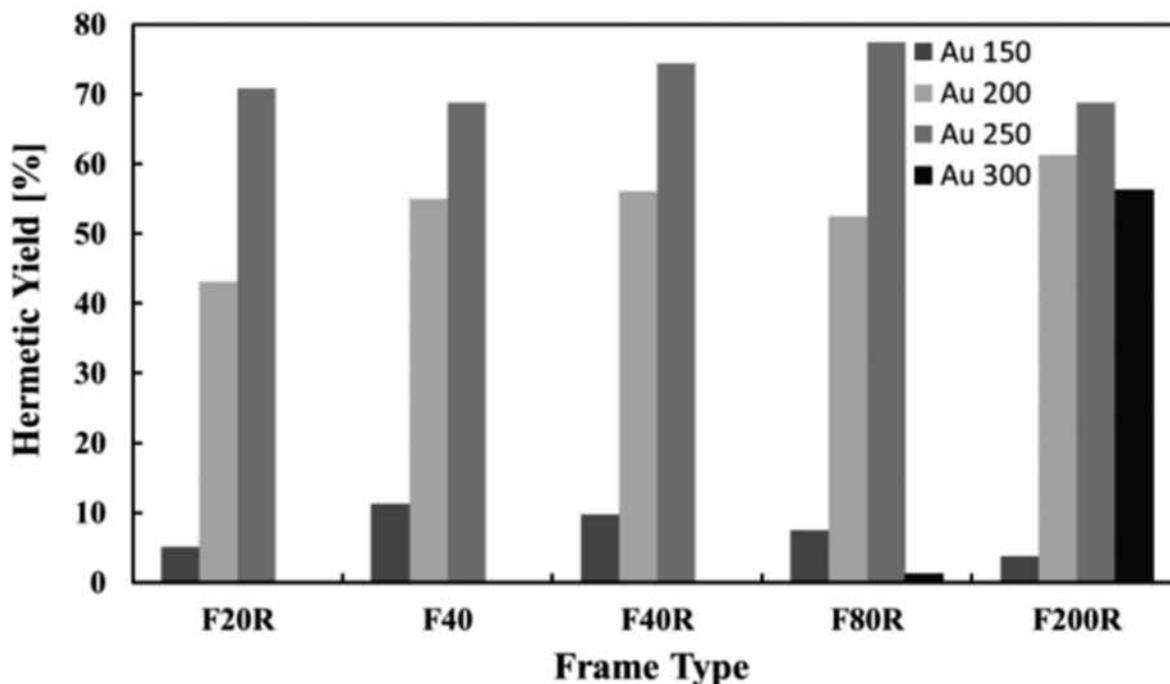


Рис. 5. Герметичность 401 штампа из всех склеенных ламинатов до испытаний на воздействие окружающей среды. Ламинаты склеивались в течение 15 минут при давлении инструмента 2266 мбар при различных температурах в диапазоне 150–300 °С [22].

Ни в одной из сборок не наблюдалось ухудшения герметичности после воздействия окружающей среды, состоящего из испытаний на долговечность в установившемся режиме, испытаний на термический удар и испытаний на влагостойкость. Никакой разницы в производительности между кристаллами шириной 20–200 мкм не наблюдалось, если пластины были хорошо выровнены. Расчетная максимальная скорость утечки для всех склеенных ламинатов была ниже 10^{-11} мбар·л·с⁻¹.

2.2. Герметичное соединение медь — медь (Cu-Cu)

В частности, Cu представляет интерес благодаря своей превосходной электро— и теплопроводности, механической прочности, совместимости с КМОП-процессом на задней части линии (BEOL) и устойчивости к электромиграции при приемлемой цене материала [23]. Механизмы, обеспечивающие термокомпрессионное соединение, включают атомный контакт, диффузию и рост зерен между различными металлическими поверхностями из-за приложения тепла и давления [11]. Поэтому качество склеиваемых поверхностей играет важную роль в достижении герметичности.

Структура и размеры испытательного устройства для соединения, используемого в этом исследовании, показаны на рисунке 6. Устройство для испытания соединения состоит из кремниевого чипа устройства с гальва-

нически выровненной медной уплотнительной рамкой на нем и мембраны, изготовленного методом глубокого реактивного ионного травления (DRIE) пластины.

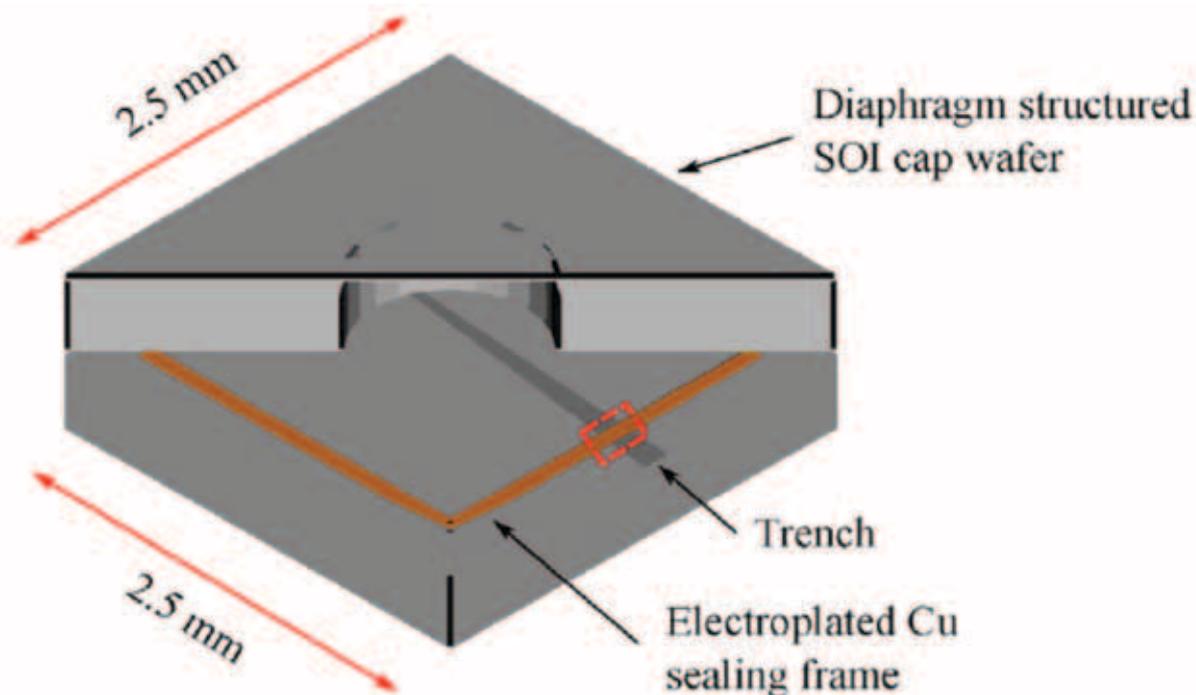


Рис. 6. Схематичное изображение устройства [19].

На рисунке 7 показан процесс изготовления герметичного устройства. Во-первых, путем плазменного травления кремниевой пластины намеренно изготавливается траншея глубиной 2 мкм чтобы продемонстрировать возможность вакуумной герметизации. Затем слои Ti/TiN/Ti/Cu толщиной 5/20/5/800 нм последовательно осаждаются с помощью высокочастотного магнетронного распыления в качестве затравочного слоя для гальванического покрытия Cu, как показано на рисунке 7(a). Слои Ti, TiN и Cu действуют как адгезионный слой, слой диффузионного барьера и электрод для гальванического покрытия соответственно. Затем на затравочный слой наносится форма из фоторезиста толщиной 12 мкм, определяющая кольцеобразные медные уплотнительные рамки. Медь высотой 10 мкм подвергается гальванопокрытию как показано на рисунке 7(b). Используется процесс импульсного электроосаждения с пиковой плотностью тока 20 mA/cm^2 , временем включения 8 мс и временем выключения 6 мс при комнатной температуре. После планаризации поверхности пластина нарезается на чипы размером $20 \times 20 \text{ мм}$ и фоторезист удаляется. Уплотнительное кольцо из меди с гальваническим покрытием представляет собой квадрат со стороной 2 мм и шириной рамы 50 мкм или 30 мкм. Для склеивания используется подложка

меньшего размера, поскольку физика и принцип склеивания для подложки размером 20 мм × 20 мм практически такие же, как и для более крупных пластин, а разработанная технология может масштабироваться для более крупных пластин [24].

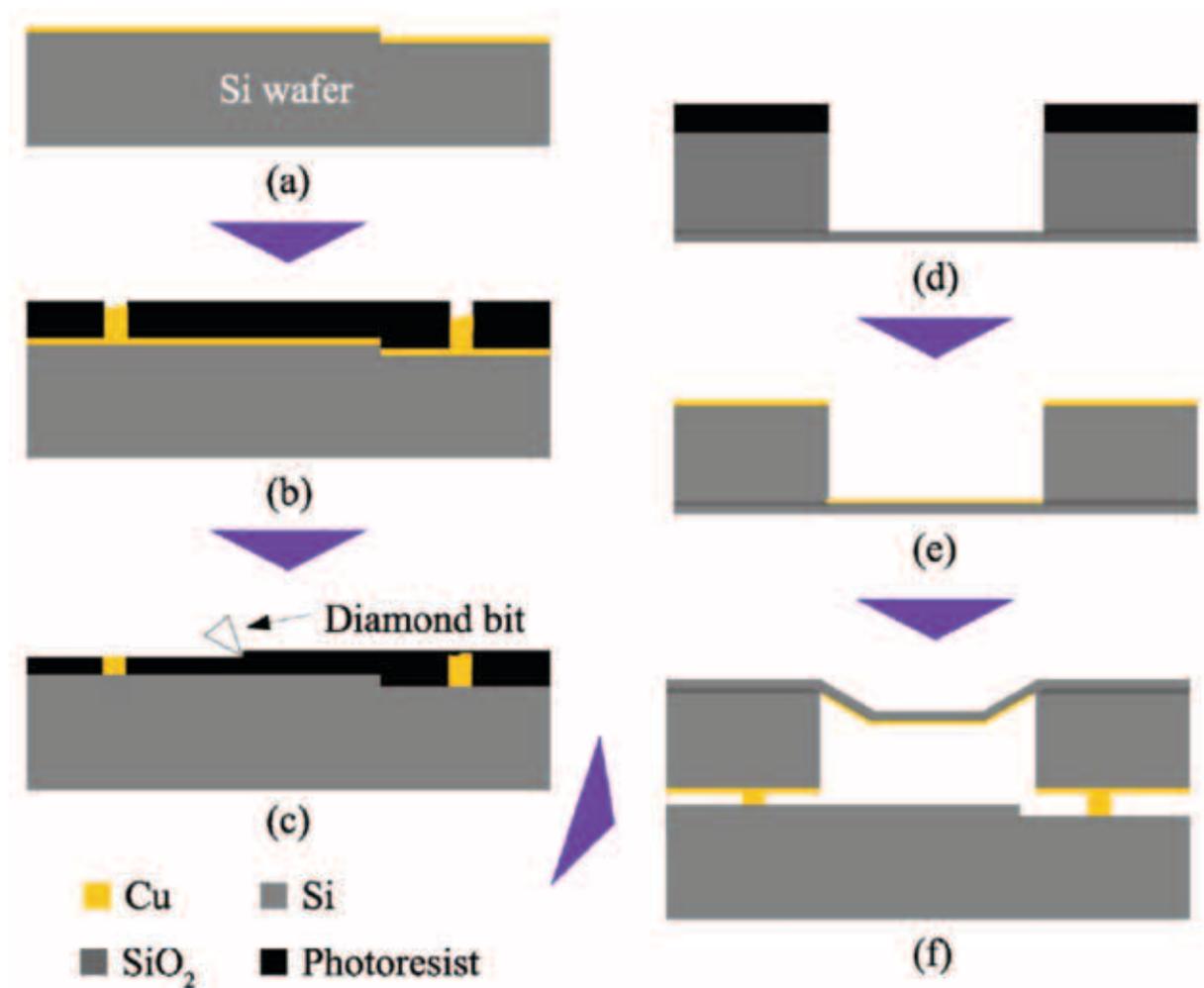


Рис. 7. Процесс изготовления испытательного устройства для склеивания.

- (a) Осаждение затравочного слоя на кремниевой пластине с канавками.
- (b) Электроосаждение меди по шаблону
- (c) ланаризация медной уплотнительной рамы с помощью процесса резки.
- (d) Травление Si и SiO₂ для формирования полости и диафрагмы пластины КНИ.
- (e) Напыление медной контактной площадки.
- (f) Термокомпрессионное соединение Cu-Cu в вакууме [24]

Успешная герметизация достигается с шириной рамки 30 мкм при температуре склеивания до 250 °С и 350 °С, без предварительной обработки лимонной кислотой и с ней соответственно, что делает ее более предпочтительной для термочувствительных устройств и с точки зрения простоты предварительной обработки (рисунок 8).

Кроме того, вакуумная герметизация достигается при продолжительности склеивания всего 10 минут, что делает предложенную технологию

выгодной с точки зрения производственных затрат. В результате такой низкотемпературной склейки, давление в герметичной полости составляет менее 100 Па. Достигнутое давление в закрытой полости сравнимо с давлением многих известных технологий, таких как анодное склеивание или другие технологии склеивания на основе металлов. Скорость утечки упакованных устройств также показала значение менее $1,67 \times 10^{-15}$ Па \times м³ \times с⁻¹, что достаточно для большинства приложений МЭМС. Прочность соединения на сдвиг составляет выше 100 МПа. Полученные значения представлены в таблице 4. РЭМ изображение структуры представлено на рисунке 9.

Таблица 4 — Сравнение методов и результатов термокомпрессионного соединения герметичных Cu-Cu пластин

Материал для бондинга	Обработка поверхности	Температура, °C	Скорость утечки, Па \times м ³ \times с ⁻¹	Сила срачивания, МПа
ECD fly-cut Cu	-	350	$1,67 \times 10^{-15}$	205
ECD fly-cut Cu	Citric Acid (aq)	250	$1,67 \times 10^{-15}$	208

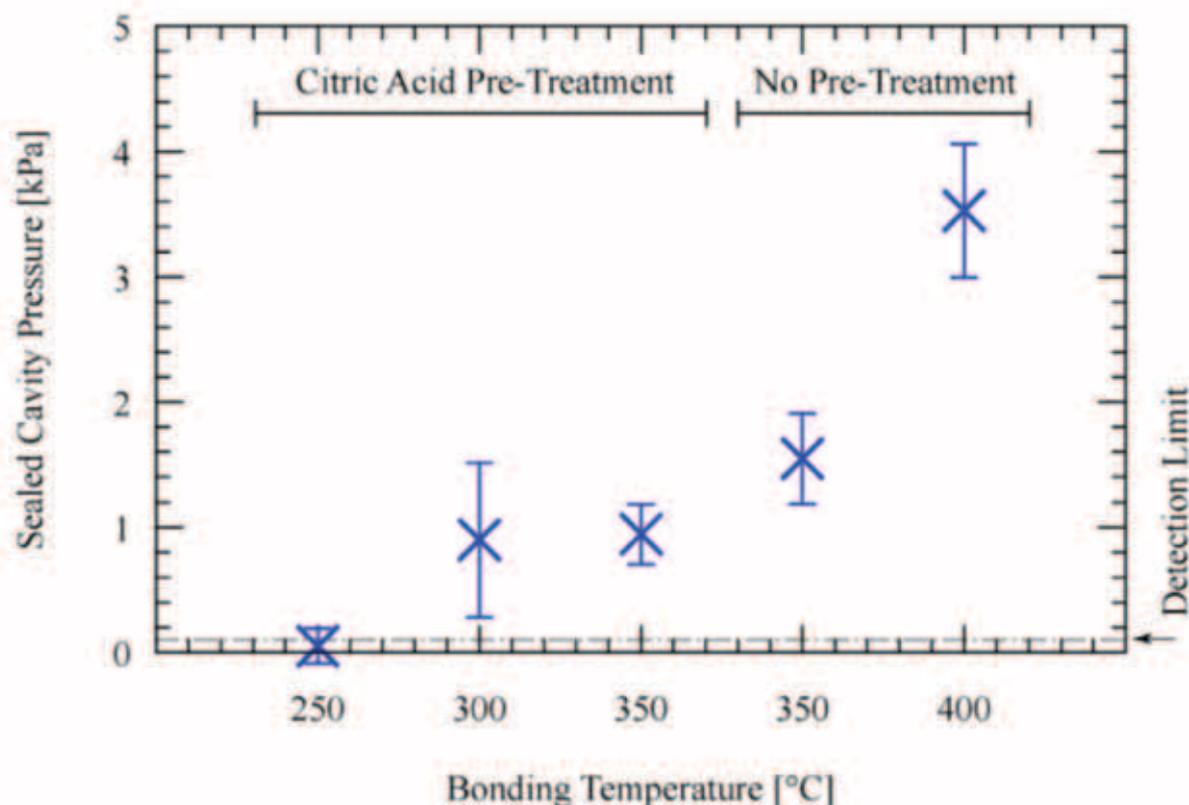


Рис. 8. Измерение давления в герметичной полости образцов, склеенных при различных температурах с предварительной обработкой поверхности и без нее [19]

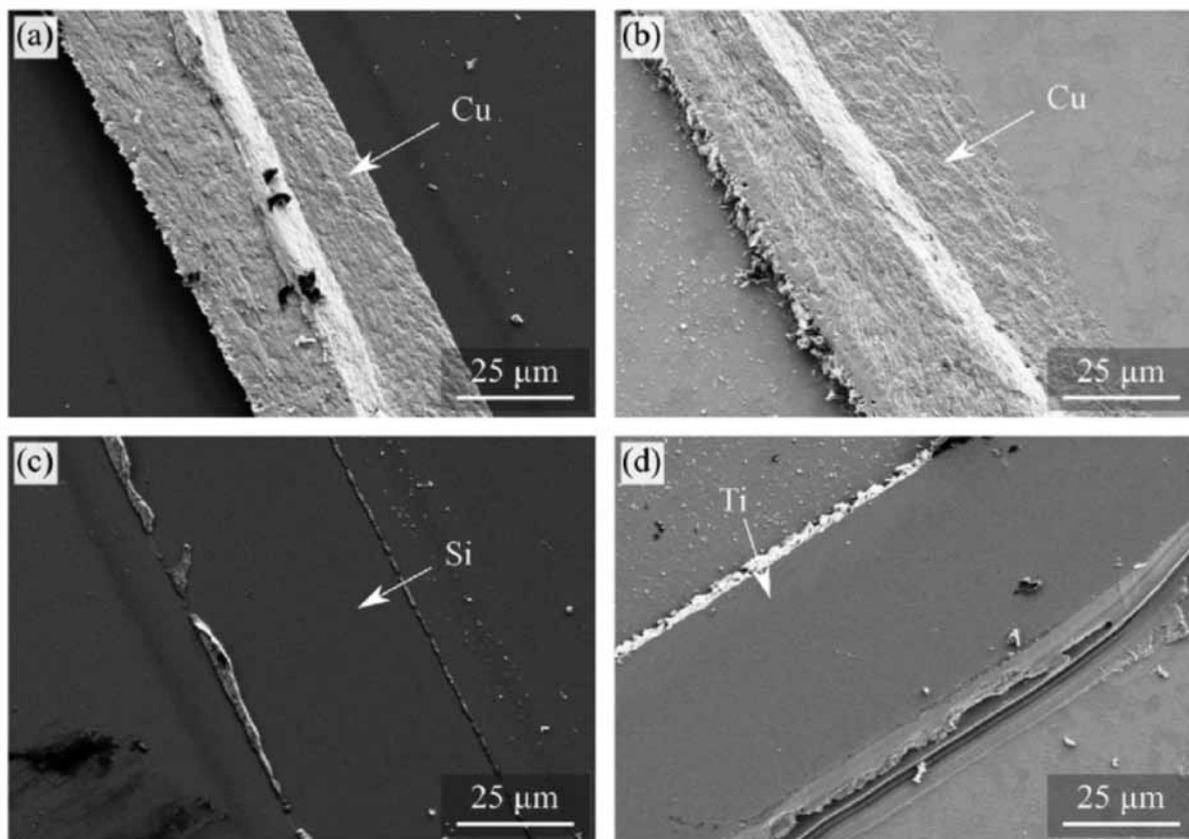


Рис. 9. РЭМ-изображения зачищенного интерфейса со стороны чипа устройства (а), со стороны чипа крышки диафрагмы (б) для склеивания при 350 °С без какой-либо предварительной обработки, (в) со стороны чипа устройства, (г) сторона чипа крышки диафрагмы для склеивания при 350 °С с предварительной обработкой лимонной кислотой [19]

2.3. Герметичное соединение алюминий — алюминий (Al-Al)

Термокомпрессионное соединение пластин — это ключевая технология производства герметичных полостей на уровне пластин, которые необходимы для функционирования многих микроэлектромеханических систем (МЭМС). Термокомпрессионное соединение на уровне пластины с использованием алюминия (Al) представлено как метод герметичного уплотнения для МЭМС. Этот процесс является недорогим и КМОП-совместимой альтернативой термокомпрессионного соединения с использованием металлов, таких как золото (Au) и медь (Cu), которые проблематичны с точки зрения перекрестного загрязнения в лабораториях [12].

На рисунке 10 показана технологическая схема изготовления образца для испытания на связывание металла Al с Al. Уплотнительные кольца из алюминия толщиной 2 мкм и 3 или 23 мкм шириной были нанесены на заднюю сторону пластины крышки с TiW толщиной 0,1 мкм в качестве адгезии и диффузии барьерного слоя. Затем на обратной стороне пластины крышки были протравлены полости глубиной ~ 75 мкм и захватные дорожки, окру-

жающие алюминиевое уплотнительное кольцо. На пластине испытательного устройства металлическая упаковка TiW / Al была нанесена на высоколегированный поликристаллический кремний (поли-Si) на оксиде (SiO₂) толщиной ~ 4 мкм, имитируя потенциальный пучок поли-Si и жертвенный оксид под ним (рисунок 11). Затем рабочая пластина была покрыта тонким органическим слоем, который обычно используется для минимизации любых прилипания между структурами МЭМС. Затем пластины крышки и рабочие пластины были скреплены при температуре ~ 450 °С с различными усилиями соединения 9, 14 и 18 кН [8]. После термокомпрессионного соединения пластина крышки была разделена на отдельные кристаллы.

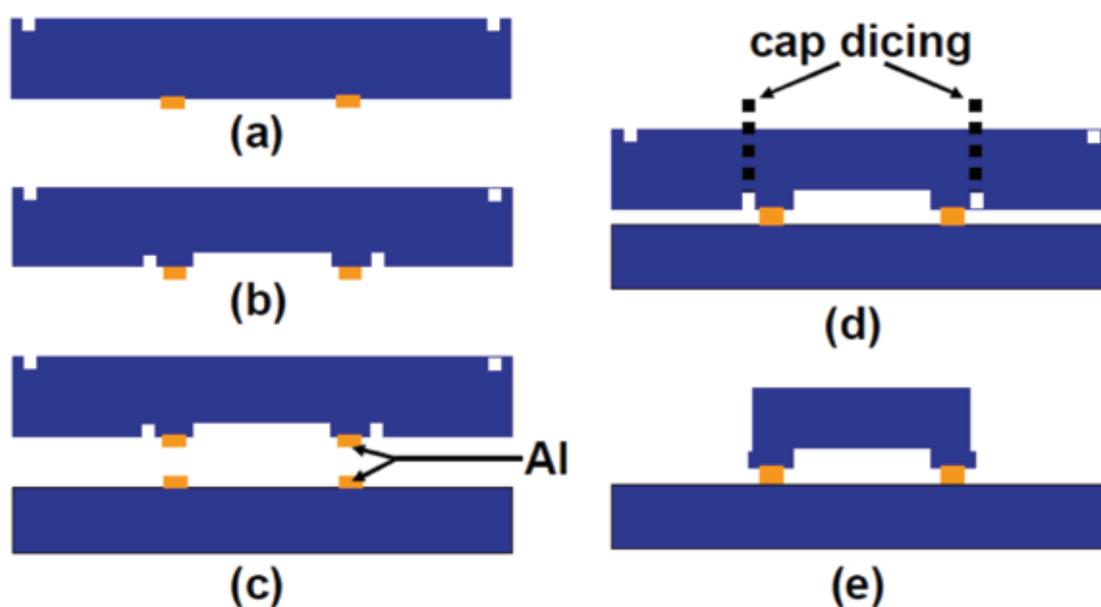


Рис. 10. Процесс изготовления крышек со связкой Al-Al для испытания на прочность сцепления и герметичность [8]

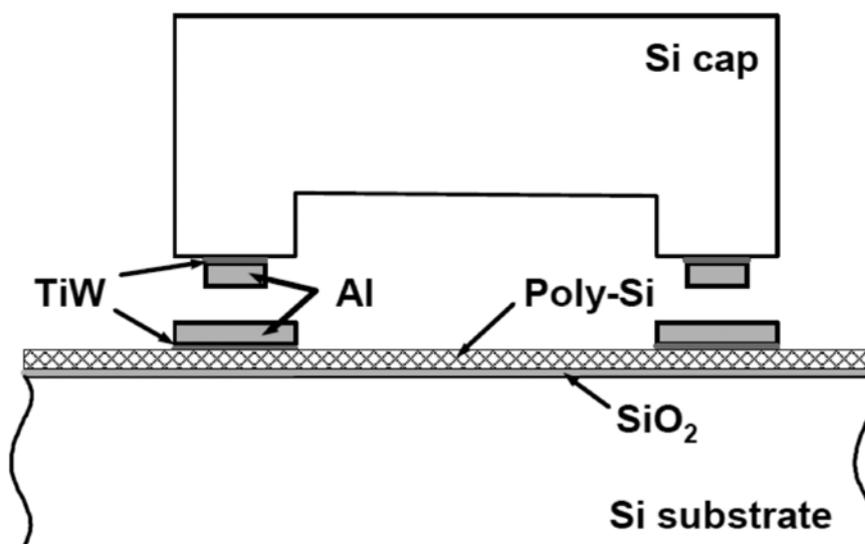


Рис. 11. Подробное изображение образца для испытания на склеивание.

Наконец, на пластину тестового устройства был нанесен тонкий (1-2 нм) органический слой в качестве антистрикционного покрытия, имитируя обычную практику МЭМС [8]

Слой природного оксида с высокой химической стабильностью на поверхности Al нельзя удалить обычными методами. Тонкий оксид действует как слой диффузионного барьера между двумя слоями металлизации алюминия и, следовательно, препятствует успешному склеиванию пластин Al-Al при низких температурах. До сих пор для эффективного склеивания пластин Al-Al требуется температура обработки более 300 °C и высокое контактное давление для разрушения оксида на поверхности.

На рисунке 13(a) показано измерение прочности сцепления с помощью испытания на сдвиг [25]. Во время испытания обычным видом отказа был обрыв крышки, как показано на рисунке 13(b). Для крышек, склеенных алюминием, шириной 23 мкм требовалось в среднем 1,2 кг усилия до разрыва крышки. Это вполне сравнимо с аналогичными крышками, закрытыми стеклянной фриттой шириной 150 мкм (в среднем ~ 1,2 кг). Структура после операции бондинга показана на рисунке 12.

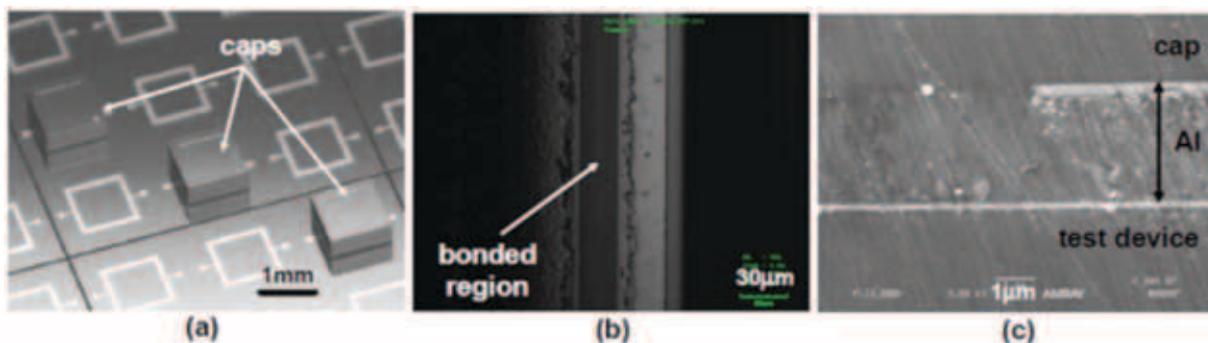


Рис. 12. (a) Крышки, соединенные Al-Al (b) ИК-микрофотография прикрепленного уплотнительного кольца. Из-за высокого усилия (18 кН) соединения излишки алюминия были выдавлены из области соединения. (c) Поперечное сечение соединения Al на сканирующем электронном микроскопе, не показывающее заметной границы раздела соединений [8].

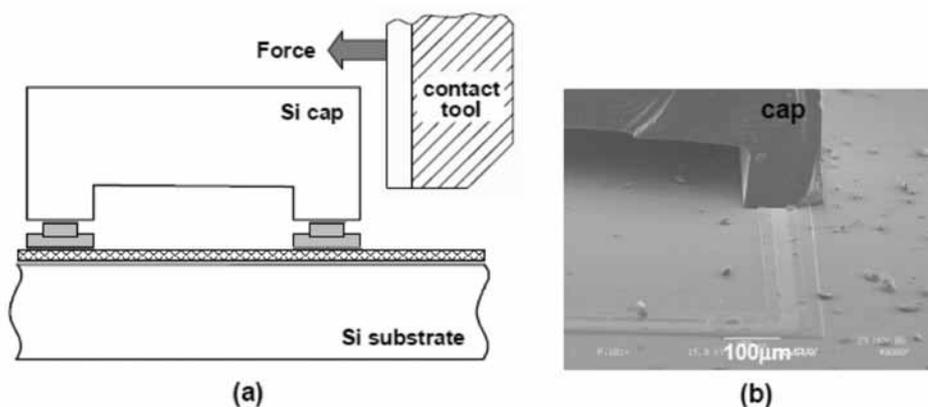


Рис. 13. (a) Измерение прочности связи на сдвиг кристалла. (b) Трещина крышки Si после испытания на сдвиг [8].

Еще один вариант проверки сборки на герметичность — измерение скорости утечки гелия (He). Крышки, связанные при помощи слоёв из алюминия были исследованы на герметичность. Таблица 5 суммирует средние скорости утечки He из 8-10 герметичных Al полостей каждая после воздействия высокого давления окружающей среды He около 60 фунтов на квадратный дюйм (~ 0,4 МПа) при комнатной температуре в течение 3-10 часов [12]. Большая часть скорости утечки составляла порядка 10^{-12} см³ атм / сек, что не показало мелкой утечки даже с уплотнительным кольцом шириной 3 мкм.

Таблица 5 — Параметры процесса бондинга и ширины уплотнения, показывающие показатель утечки до 10^{-12} см³·атм/с

		Ширина уплотнения, мкм	
		3	23
Сила бондинга, кН	9	0.89	7.8
	14	1.2	7.7
	18	-	5.8
Эталонные образцы (без крышки)		8.1	

2.4. Герметичное соединение индий — индий (In-In)

Представленная технология термокомпрессионного бондинга для герметизации упаковок МЭМС, основанная на использовании индия (In) в качестве основного промежуточного связующего слоя, является многообещающей из-за малой температуры процесса (около 140 °С). Решающим параметром является не только выбор подходящего материала для соединения, но также, ширина и высота связывающих колец из индия. Это является важным параметром, так как высокое соотношение сторон индиевых связывающих колец способствует разрушению оксидного слоя. Это также подтверждается тем фактом, что коэффициент теплового расширения (КТР) индия более чем в пять раз выше, чем у оксида индия, и, следовательно, индий находится под давлением при повышенных температурах [26]. Основная идея заключается в том, что индий выбирается для нанесения шаблона таким образом, чтобы он легко выдавливался из оксидной оболочки, а чистый металл мог соприкоснуться с поверхностью второй пластины. Шаблон индия может быть различным и состоять либо из кольца шириной 200 мкм и высотой от 2 до 4 мкм, либо из семи колец шириной 12 мкм, расположенных с интервалом 19 мкм и высотой индия около 8 мкм. Данные конструкции представлены на рисунке 14.

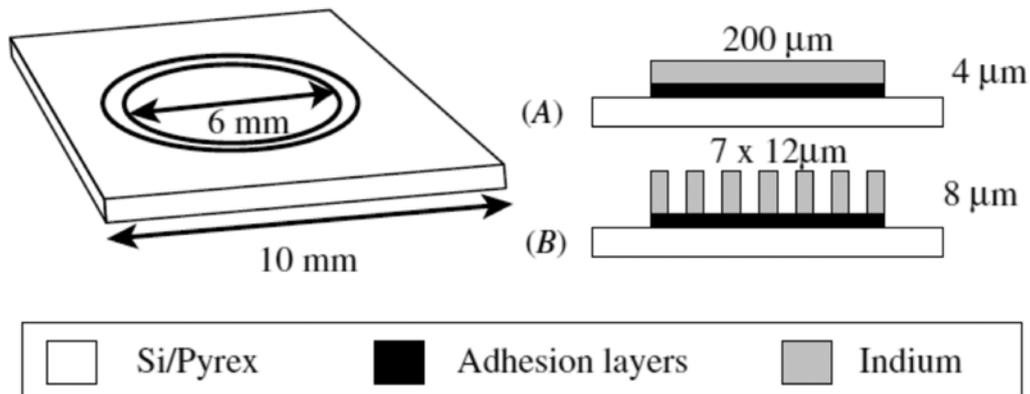


Рис. 14. На левом рисунке показан образец для испытания на растяжение с металлическим кольцом шириной 200 мкм. На схемах справа описаны различные стандартные варианты металлизации, используемые для испытаний на растяжение и скорость утечки. (А) Плоская пластина. (В) Пластина с адгезионным слоем шириной 200 мкм [26].

Адгезионные слои формируются методом электронно-лучевого испарения, а сам шаблон сформирован путём отрыва. Далее, при помощи термического испарения, проводится испарение индия, и также формируется шаблон путём отрыва. Стоит отметить, что после всех вышеперечисленных операций, на поверхности металла образуется небольшой оксид, толщиной примерно 3-4 нм. Чтобы избежать дальнейшего бурного роста оксида, пластины перед операцией соединения (бондинга) необходимо хранить в чистом помещении с соблюдением мер предосторожности. Схематичный пример процесса бондинга показан на рисунке 15.

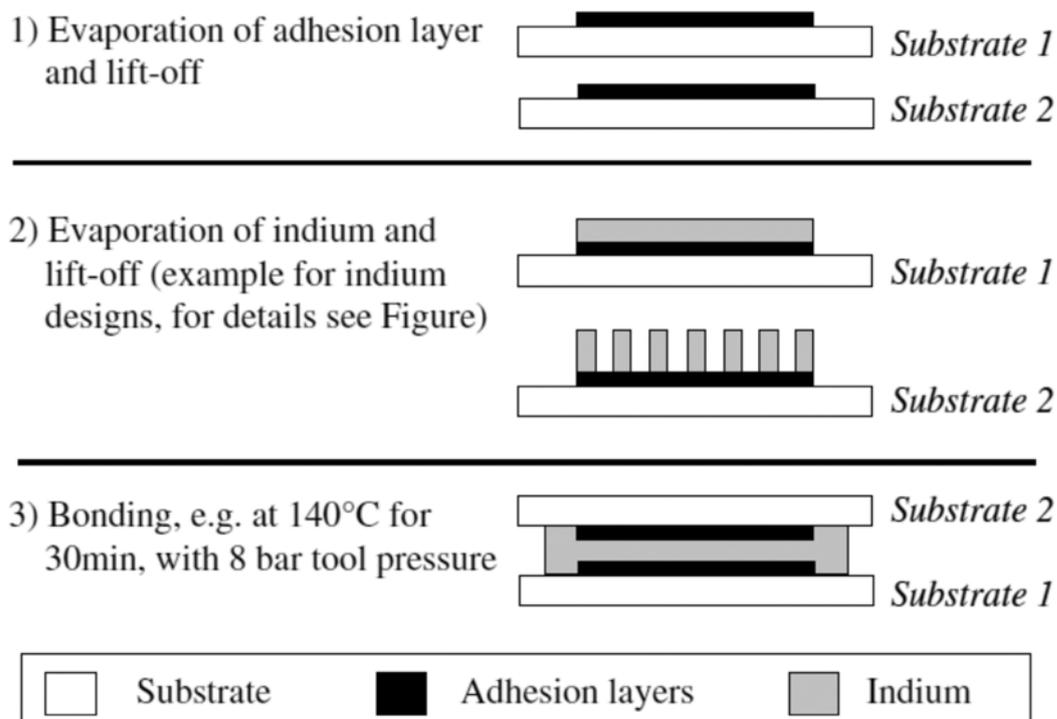


Рис. 15. Базовый процесс бондинга In-In [26].

Разрушение оксида происходит исключительно под действием приложенного давления и повышенных температурах во время процесса термокомпрессионного бондинга. Пара пластин после выравнивания и скрепления отправляется в устройство для бондинга, процесс проходит под вакуумом. После достижения температуры соединения, прикладывается давление инструмента, которое составляет около 0,8 МПа (60 Н) на связывающее кольцо. Так как температуры плавления индия составляет 156,6 °С, то максимальная температура процесса составляет 140 °С и ниже. Поддерживая фиксированную температуру 140 °С, склеивание проводилось с различным временем (10, 30, 90 минут), различной формой индия и различными подложками и адгезионными слоями [27].

Диапазон оптимальных параметров склеивания и необходимая высота или объем индия для успешного склеивания были выбраны в соответствии с некоторыми тестами с пластиной из металлизированного кремния, прикрепленной к чистому Ругех (опыт 1 на рисунке 15).

Индиевое кольцо шириной 200 мкм и высотой 2 мкм недостаточно деформируется при 140 °С, давлении инструмента 0,8 МПа, приклеивается в течение 30 минут и не приводит к достаточно прочному сцеплению с Ругех: отслоилось более 60% образцов во время нарезки кубиками. С другой стороны, если кольца имеют ширину 200 мкм, но высоту 4 мкм, выход годных образцов после нарезки кубиками возрастает до 96%. В случае только одного одиночного кольца шириной 12 мкм и высотой 4 мкм предел прочности при растяжении находился в ожидаемом диапазоне, но ограниченная площадь склеивания приводит к хрупким связям, что снова приводит к 50% разрушению во время нарезания кубиками. Из этого следует, что необходимо минимальное содержание индия в качестве связующего материала для обеспечения прочного сцепления по всей пластине [28]. Это зависит от плоскостности зажимных патронов для пластин, а также от изгиба используемых пластин. Минимальная высота индия в этом исследовании составляла 4 мкм для всех последующих тестов со стандартной шириной 200 мкм.

Также представляют интерес эксперименты по герметичному соединению индия на различных подложках. Индиевые кольца шириной 200 мкм прикрепляются непосредственно к пластине из Ругех со следующими параметрами процесса термокомпрессионного бондинга 140 °С / 0,8 МПа / 30 мин [29]. Были испытаны различные адгезионные слои, такие как Cr, Cr — Au или Cr — Pt. В случае использования только хрома, индий наносился на хром в том же вакуумном цикле, чтобы избежать окисления хрома. При использовании упомянутых адгезионных слоев, как показано на рисунке 16(a), не наблюдалось бы существенной разницы в прочности сцепления. Если вместо Ругех использовать кремниевую пластину в качестве второй пластины, прочность связи резко упадет, и большинство кристаллов даже

не выдержат резки. Чтобы можно было связать кремний с кремнием, вторая кремниевая пластина также должна была иметь шаблон с адгезионным слоем. В случае адгезионного слоя Cr — Au под индием и на кремниевой пластине прочность связи достигала 18,0 МПа со стандартным отклонением $\sigma = 2,4$ МПа.

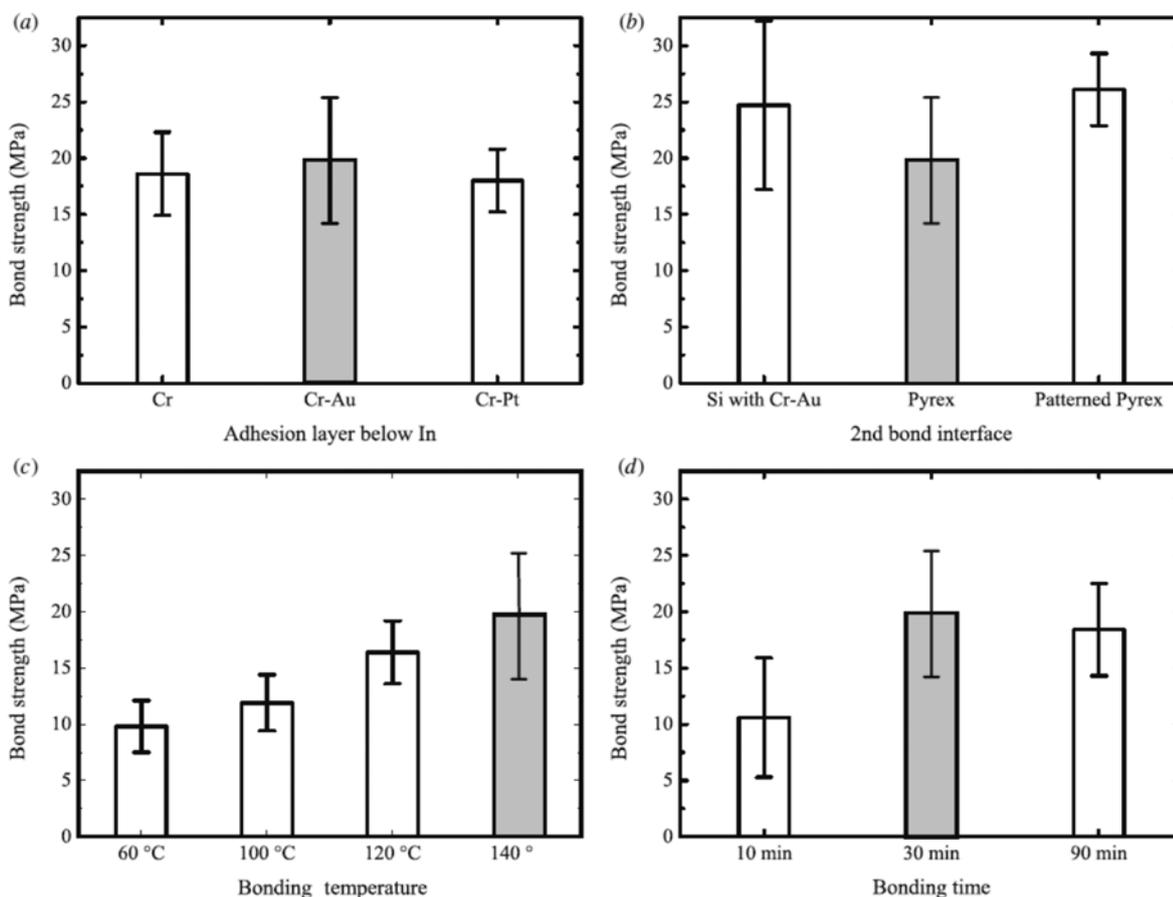


Рис. 16. Сравнение прочности на растяжение для разных параметров.

(а) Различный адгезионный слой под индием.

(б) Различные субстраты.

(с) Температура склеивания варьировалась от 60 до 140 °С.

(д) Образцы, склеенные при 10, 30 или 90 мин [28].

Ниже описано влияние параметров процесса на прочность связи In — (Cr — Au). Используя кольцо из индия шириной 200 мкм и высотой 4 мкм на адгезионном слое Cr — Au, температуру соединения всегда можно поддерживать ниже температуры плавления индия (156,6 °С). Стандартная температура процесса 140 °С, что немного ниже температуры плавления индия. Это дало для индиевого кольца шириной 200 мкм прочность связи 19,9 МПа ($\sigma = 4,6$ МПа). Снижение ее до 120 °С сопровождалось снижением прочности связи до 16,5 МПа ($\sigma = 2,8$ МПа), при 100 °С до 11,9 МПа ($\sigma = 2,5$ МПа) и при 60 °С все еще разумной прочности связи 9,8. МПа ($\sigma = 2,3$ МПа) можно было измерить. Сравнение прочности сцепления для

различных температур сцепления показано на рисунке 16 (с). Если время склеивания было уменьшено до 10 минут при 140 °С, прочность скрепления упала до всего 10,6 МПа ($\sigma = 5,3$ МПа), но примерно оставалась на уровне около 20 МПа, если пластины выдерживали при температуре склеивания в течение 90 минут. Описанные результаты показаны на рисунке 16 (d).

Таким образом, процесс термокомпрессионного бондинга с индием, приводит к прочному и герметичному соединению без дополнительной обработки перед процессом бондинга. Склеивание выполняется при температурах, равных или ниже 140 °С, и оксид индия разрушается исключительно под действием приложенного давления. Многочисленные испытания соединения с различными параметрами соединения, адгезионными слоями и формами индия показали, что низкотемпературное термокомпрессионное соединение индия является герметичным и надежным.

3. Подходы к улучшению герметизации на примере соединения Al-Al

3.1. Стандартное соединение чистых пластин Al-Al

Попытки скрепить две пластины чистыми пленками алюминия привели к низкому качеству склеенной поверхности при температурах склеивания от 400 °С до 550 °С. На рисунке 17 показан результат C-SAM для пары пластин (стандартное осаждение алюминия), скрепленных при 550 °С. Различные оттенки серого на изображении C-SAM представляют области со слабыми связями или даже без них. Было обнаружено, что качество склеивания очень чувствительно к локальным изменениям давления.

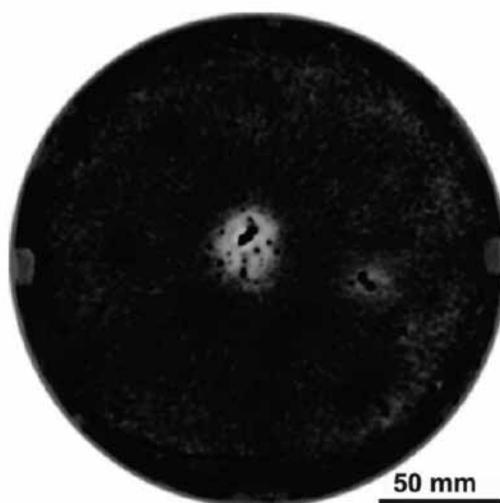


Рис. 17. Результат C-SAM для алюминиевых пластин диаметром 200 мм (стандартное напыление), склеенных при 550 °С в течение 3 часов и напряжением 60 кН [13].

Свойства оксида алюминия (например, толщина, химический состав) кажутся решающими для процесса склеивания. Между двумя слоями алюминия неповрежденный оксид алюминия был виден на изображениях поперечного сечения СЭМ, а оксид алюминия также обнаруживался с помощью электронной оже-спектроскопии (AES). На рисунке 18 показан профиль по глубине склеиваемой границы для пластин с пленками, осажденными в положении с относительно хорошим качеством скрепления; это соответствует одной из темных областей на рисунке 6. Вблизи границы раздела фаз концентрация металлического Al падает. В то же время сигнал для оксида Al увеличивается. Предполагалось, что оксидный слой препятствует диффузии атомов Al между двумя металлическими слоями Al, тем самым предотвращая значительный рост зерен через исходную границу раздела пластины.

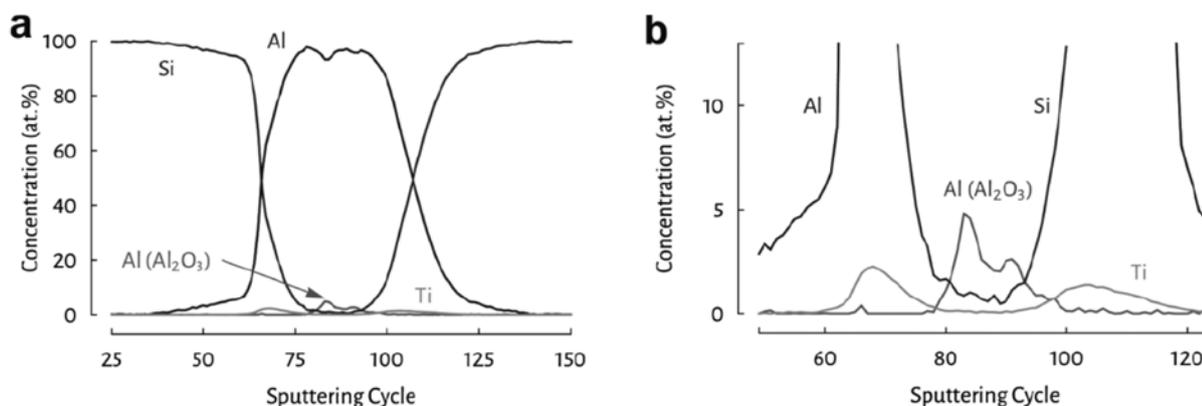


Рис. 18. Профиль AES по глубине связанной пары пластин Al ALPS толщиной 300 нм, показывающий структуру поверхности пластины (Si-Ti-Al), а также присутствие оксида алюминия на границе раздела. На (b) представлен более подробный вид циклов распыления вокруг поверхности соединения [13].

3.2. Соединение чистых пластин Al-Al с предварительной обработкой

На рисунке 19 показано сравнение типичного результата C-SAM для пар склеенных пластин с пленками ALPS Al, скрепленных при 550 °C (слева) и при 150 °C в EVG®580 ComBond® с предварительной обработкой поверхности пластины (справа). Обе пластины были скреплены в течение 1,5 ч с использованием усилия прижимных плит 60 кН. Благодаря предварительной обработке поверхности, которая удаляет природный оксид алюминия перед процессом связывания, пластины можно соединять при температурах более низких. Несмотря на то, что давление склеивания было относительно низким (1,9 МПа), изображение C-SAM демонстрирует высококачественную границу раздела практически в любом месте пары пластин.

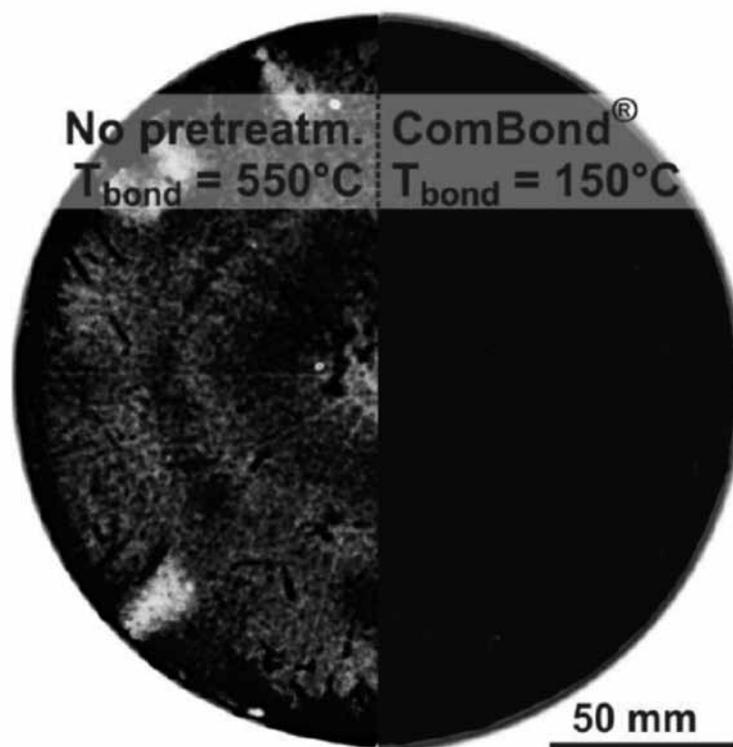


Рис. 19. C-SAM изображения пар склеенных пластин Al ALPS (слева) без предварительной обработки и (справа) с обработкой поверхности ComBond® перед склеиванием пластин. Обе пары пластин склеивали при 60 кН (1,9 МПа) в течение 1,5 часов [13].

По сравнению со связанными парами пластин ALPS, образцы, полученные из стандартных пленок из алюминия, имели более слабые связи или большие несвязанные области при проверке C-SAM. Для качественного сравнения энергии связи лезвие бритвы было вставлено в поверхность соединения и приблизительная длина образовавшейся трещины была измерена с помощью C-SAM. Длины трещин в образцах со стандартными пленками, напыленными алюминием, были на 5–10% больше, чем в образцах с пленками ALPS Al. Результаты измерения C-SAM и длины трещины показывают, что пленки ALPS Al дают более высокую энергию связи, чем стандартные пленки Al, нанесенные методом напыления (рисунок 20). Более мелкие зерна, наблюдаемые в пленках ALPS Al, могут быть вероятным объяснением наблюдаемой разницы, поскольку более мелкие зерна приводят к более высокой плотности границ зерен, что, в свою очередь, способствует диффузии атомов Al, так как концентрация диффузионных путей увеличивается [30].

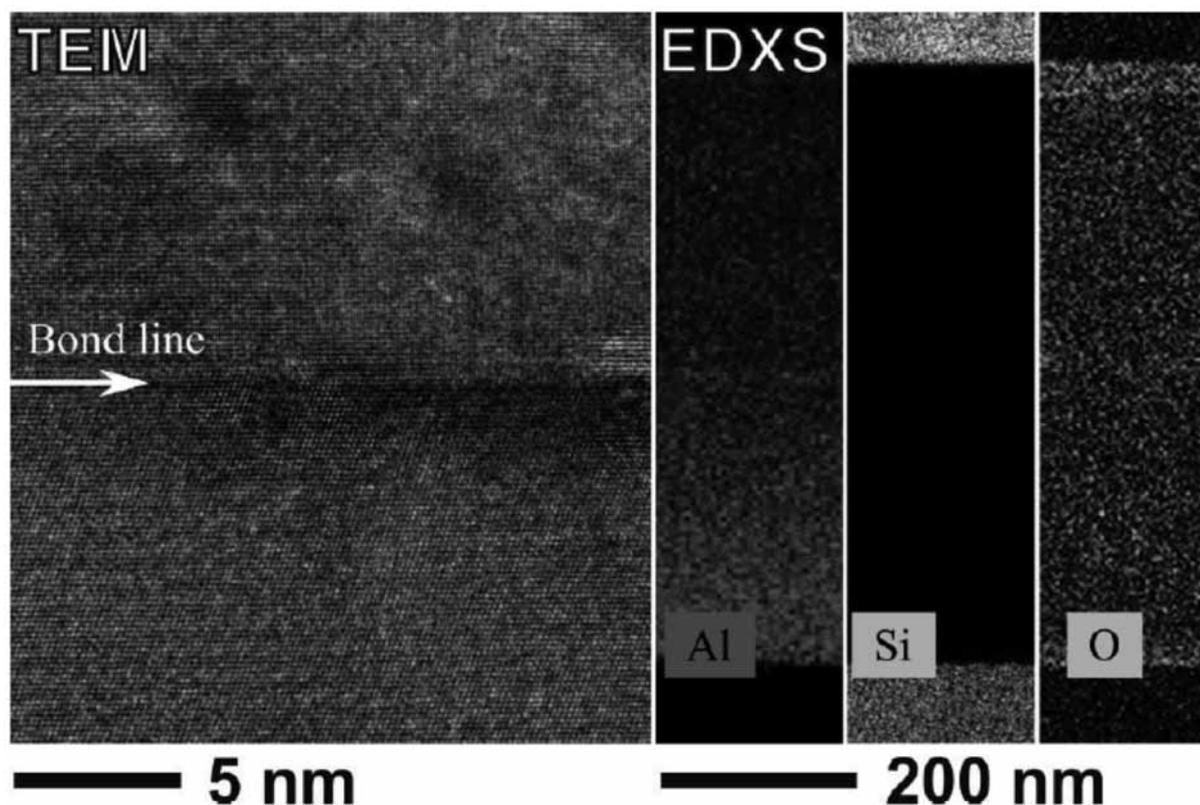


Рис. 20. ПЭМ-изображение с высоким разрешением и карта EDXS границы раздела пары пластин из Al с предварительно обработанной поверхностью и низкотемпературной связкой, демонстрирующие атомный контакт без оксидов. Пара пластин склеивалась при 60 кН (1,9 МПа) и температуре 150 °С в течение 1 часа [30].

3.3. Соединение пластин Al-Al с предварительной обработкой и увеличенной площадью контакта

На рисунке 21 показан результат C-SAM для пары рамных пластин, склеенных после предварительной обработки поверхности при 100 °С. Об успешном соединении пластин свидетельствует отсутствие захваченного газа, который мог бы привести к значительным отражениям акустических волн. Поскольку пластины были помещены в воду во время проверки C-SAM и край не был запечатан, вода проникала с края в несвязанные области пластины, что объясняет неправильный черный рисунок вблизи кромки пластины. Пара пластин рамки, скрепленная при 150 °С с тем же временем склеивания (1 час) и усилием, не показала никаких различий с результатом C-SAM для пары скрепленных пластин при 100 °С.

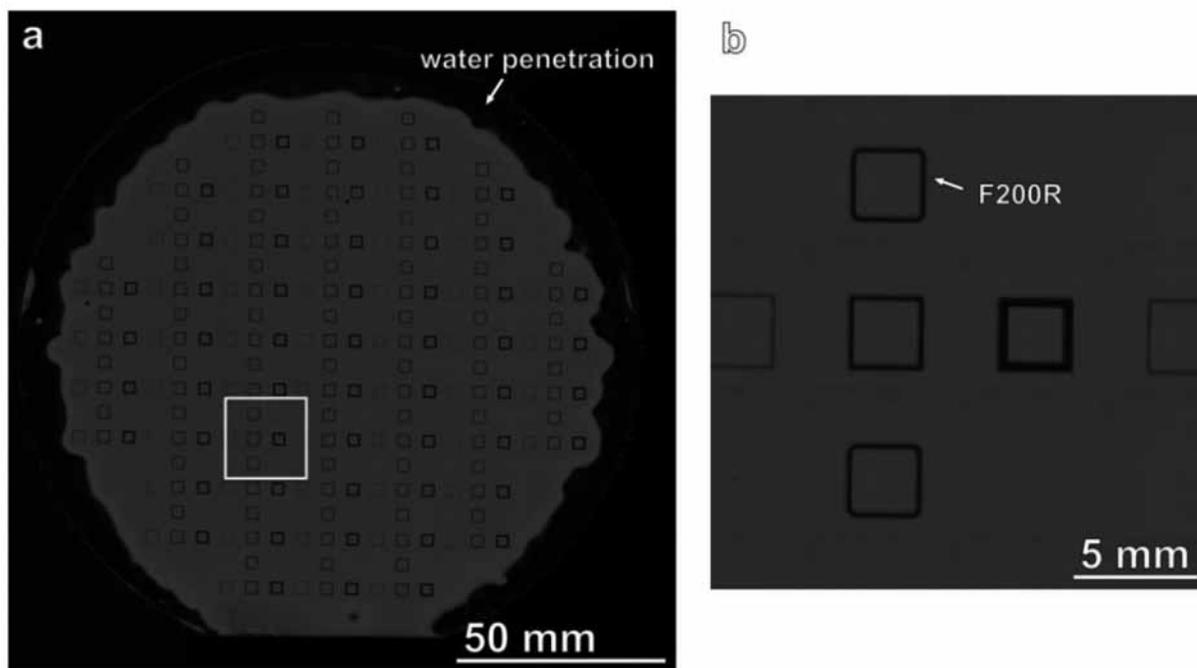


Рис. 21. Измерение C-SAM каркасных пластин после обработки поверхности и последующего склеивания при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа с усилием 60 кН (114 МПа).

На (b) показано подробное сканирование скрепляющих рамок.

Темный неправильный узор на краю пластины на (a) создается водой, которая проникла в несвязанные области пластины во время измерения C-SAM [13].

Результаты нарезки пластин, склеенных при температурах $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, показаны на рисунке 22(a). 100% -ный выход пластин, склеенных при обеих температурах, для всех типов рамок. Результаты нарезки кубиками показали, что полости, образованные с помощью обоих типов рамок, были достаточно прочными, чтобы выдержать силу, оказываемую на них пилой для разки кубиками. Результаты испытания на растяжение показаны на рисунке 22(b). Средняя прочность на разрыв чипов из пары пластин, соединенных при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, составляла 23 МПа, тогда как для пары пластин, скрепленных при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, она составляла 37 МПа. Это показывает, что средняя прочность соединения увеличивалась с увеличением температуры соединения от $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако стандартное отклонение совпадало.

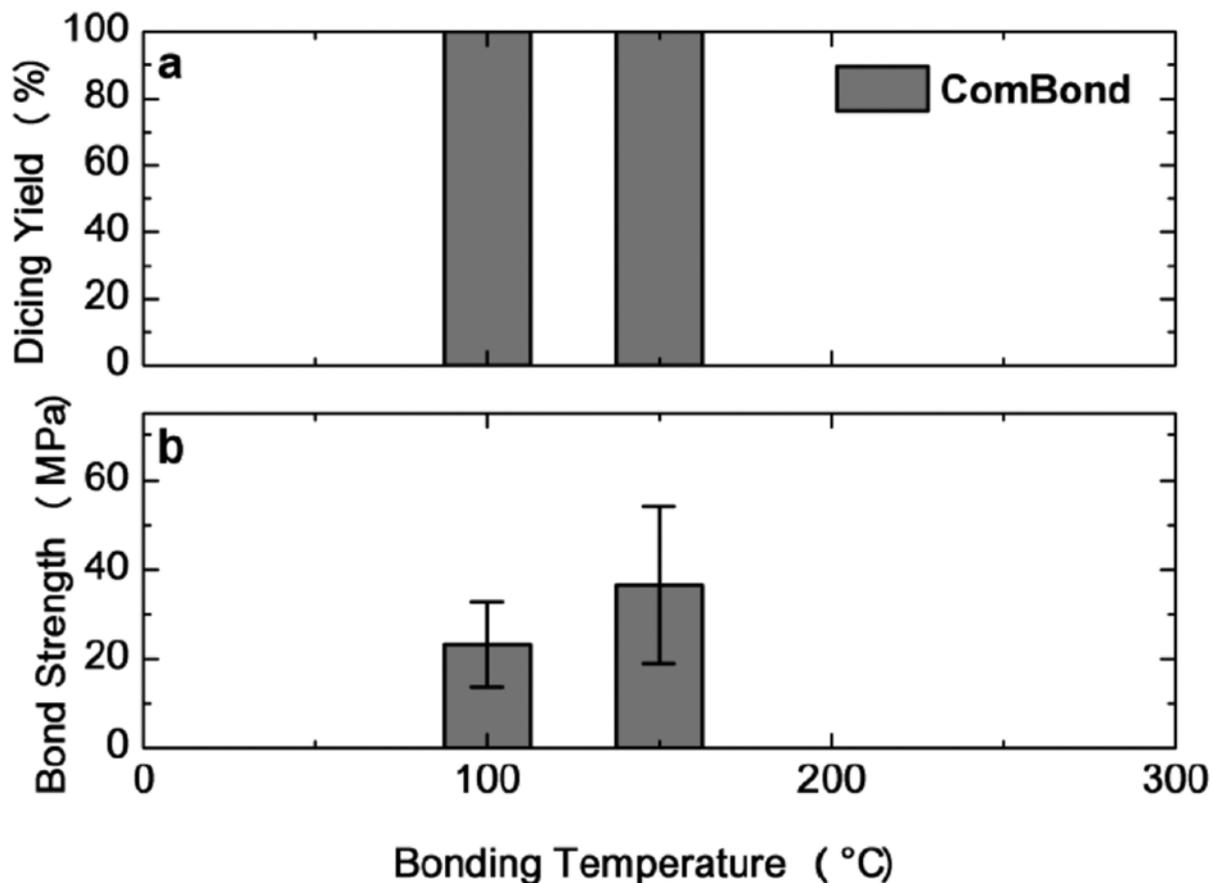


Рис. 22. Сравнение результатов (а) текучести нарезания кубиками и (б) прочности сцепления при растяжении.

Пластины из алюминия связывали с помощью поверхностной активации ComBond® при 100 °С и 150 °С в течение 1 часа при 60 кН (114 МПа) [31].

На рисунке 22 показано, что прочность соединения, достаточная для большинства применений МЭМС, была получена при температуре соединения всего 100 °С. Значения прочности сцепления, полученные при 100 °С и 150 °С, сопоставимы со значениями прочности сцепления, полученными при температурах от 300 до 400 °С с использованием стандартного связующего материала [31]. Высокая прочность на разрыв и выход нарезки, полученные при температуре склеивания всего 100 °С, указывают на то, что процедура удаления оксида, выполняемая с использованием подготовки поверхности, оказывает большое влияние на связывающую способность пленок Al. Разумно, что удаление Al₂O₃ обеспечивает прямой контакт между двумя металлическими поверхностями Al и последующее связывание за счет диффузии металла.

3.4. Соединение пластин Al-Al с добавлением примесного материала

Алюминий с промежуточным слоем из олова (Sn) показывает очень большую деформацию даже ниже 400 °С. Используя эту структуру слоев в

качестве герметизирующего металла, можно достичь высокопрочную герметичную упаковку МЭМС при температуре всего 370 °С без какой-либо обработки для удаления поверхностных оксидов.

Для достижения стабильной герметичности требуется высокая степень обжата. При сжатии большая часть зерен Al отрывается и становится мельче. На рисунке 23 показаны зависимости производительности герметичного уплотнения от давления склеивания. Результаты для Al с промежуточным слоем Sn совпадают с результатами для покрывающего слоя Sn [18], показанными как Sn / Al / Sub.

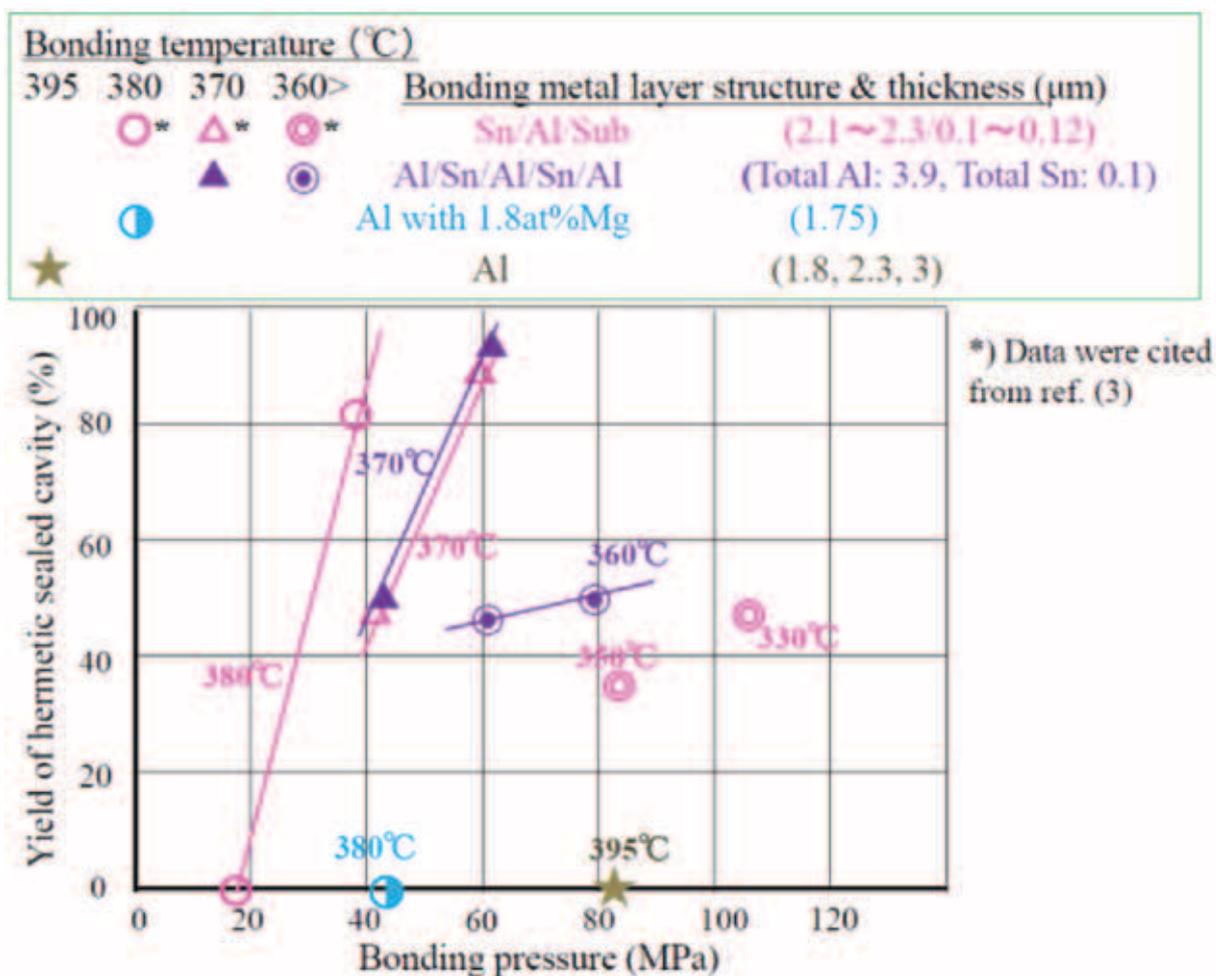


Рис. 23.Выход герметичной полости в зависимости от давления склеивания [18].

Sn должен находиться среди зерен Al в виде жидкой эвтектики Sn-Al при температуре соединения. На рисунке 24 показана переходная модель связующего интерфейса [32]. При температуре соединения связывающий металл состоит из твердого алюминия и жидкости с составом, близким к линии ликвидуса (линия полного плавления твёрдых фаз). При понижении температуры состав жидкости изменяется вместе с линией ликвидуса до точки эвтектики, и жидкость одновременно диффундирует в зерна Al. Это говорит

о проскальзывании зерен Al, а затем под воздействием давления легко происходит значительное утонение межфазного металла.

Из этого следует, что добавление Sn создает эффект смягчения связующего слоя Al. Из-за большой деформации поверхностный оксид Al разрушается и появляется прямой контакт и взаимная диффузия Al обеих пластин. Следовательно, стабильная Al-Al и герметизация с высокой текучестью достигается с помощью оксидированной алюминиевой связующей поверхности перед склеиванием.

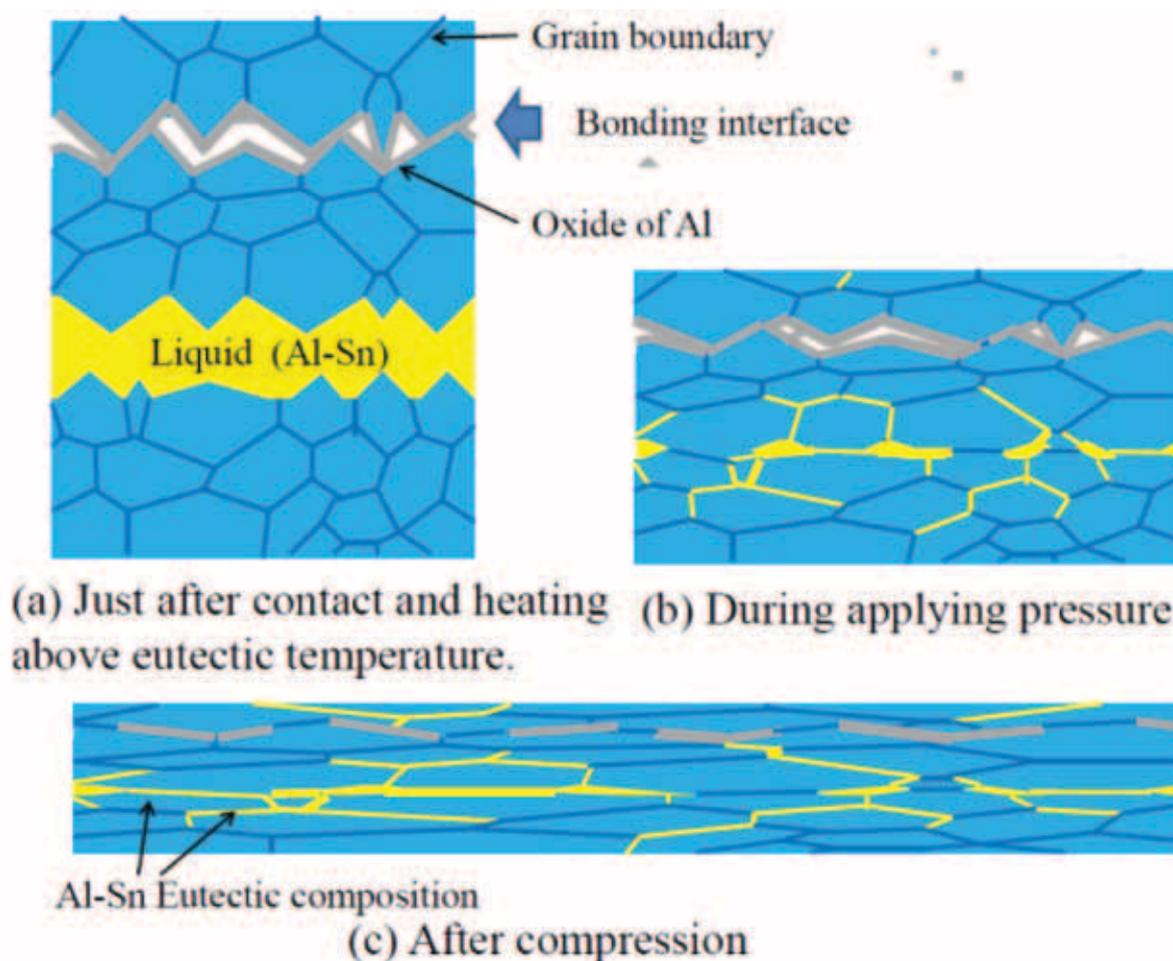


Рис. 24. Переходная модель интерфейса связывания [32].

4. Вывод соединяющих шин из рабочей области герметизации

4.1. Вывод через периферийную область

Известен способ формирования герметичного МЭМС устройства с выводом соединяющих шин из рабочей области герметизации осуществляются через периферийную область [33]. Схематичное изображение устройства представлено на рисунке 25.

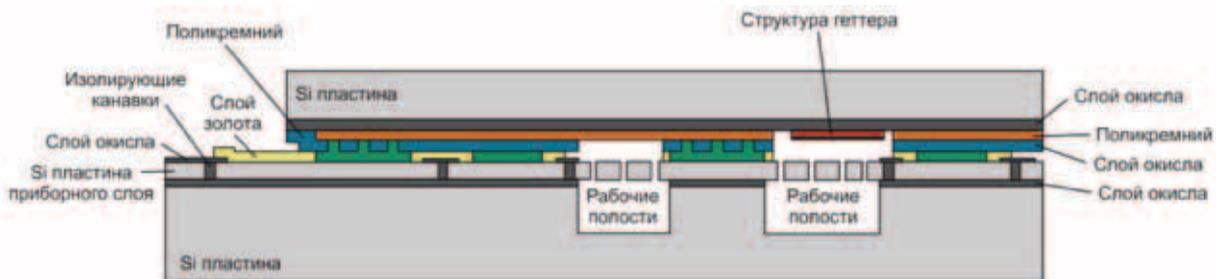


Рис. 25. Устройство с выводом соединяющих шин через периферийную область.

4.2. Вывод через обратную сторону основания

Известен способ формирования герметичного МЭМС устройства с использованием уплотнительных колец и вывод соединяющих шин из рабочей области герметизации осуществляют через обратную сторону основания [34]. Ограничением данного метода является миниатюризация конструкции. Авторы не применяют процесс утонения пластины-основания. Поэтому диаметр канавки, содержащей соединяющие шины из рабочей области герметизации, ограничен аспектным соотношением (высоты канавки к ширине канавки) плазмохимического травления. В результате диаметр канавок может быть выбран не менее 20 мкм, что не позволяет уменьшить габаритные размеры устройства. Схематичное изображение устройства представлено на рисунке 26.

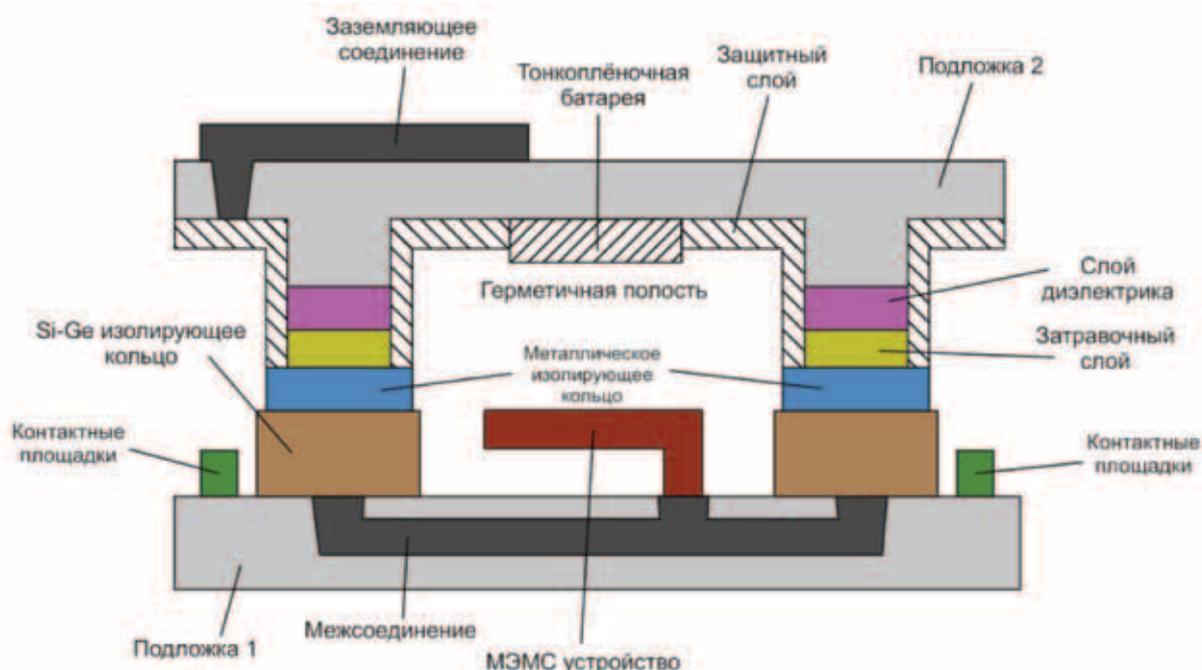


Рис. 26. Устройство с выводом соединяющих шин через обратную сторону основания.

Для минимизации размеров соединяющих шин (TSV структур) используют технологию временного бондинга. Это позволяет утонить пла-

стину, сформировать сквозные канавки значительно меньшего размера и осуществить металлизацию.

Заключение. Термокомпрессионное соединение металлических пластин — важная технология для приложений МЭМС и 3D-межсоединений. На первый взгляд, это простой процесс соединения пластин, но он предъявляет очень строгие требования в отношении подготовки подложки (включая металлические связывающие слои), обработки в технологическом процессе, а также правильного выбора условий процесса.

Склеиваемые поверхности требуют особого внимания, так как наиболее часто используемые металлы образуют на своей поверхности оксид, который наиболее часто удаляется при приложении должного давления и температуры в процессе бондинга. Диффузия внутри подложки может быть ещё одним нежелательным эффектом, которого можно избежать, используя слои диффузионного барьера.

Соединение металлических пластин совместимо с приложениями для упаковки в высоком вакууме, что позволяет герметизировать устройства МЭМС достигая уровень вакуума выше 10^{-3} мбар, необходимый для новых приложений микроэлектроники, таких как высокочастотные резонаторы, оптические переключатели, ИК-датчики и т.д.

В данной статье рассмотрены различные металлы для герметичного соединения. Каждый металл обладает своими особенностями и параметрами процесса термокомпрессионного бондинга, но из всех перечисленных в статье металлов, стоит отметить алюминий (Al). Герметизация Al-Al посредством термокомпрессионного бондинга является недорогой и КМОП-совместимой альтернативой термокомпрессионного соединения с использованием металлов, таких как золото (Au) и медь (Cu), которые проблематичны с точки зрения перекрестного загрязнения в лабораториях.

Поддержка. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Микросистемная техника и электронная компонентная база» (МИЭТ) при финансовой поддержке Минобрнауки России (№ 075-03-2020-216, 0719-2020-0017, мнемокод FSMR-2020-0017).

Литература

1. Du, C., Liu, C., Yin, X., Zhao, H., Study on anode bonding properties of PEG-based composite solid electrolyte and Al // Cailiao Kexue yu Gongyi/ Material Science and Technology, 29(4), с. 67-73, 2021.

2. Liu, W., Qian, X., Lin, Q., Study on solder bonding technology and its failure mechanism // 2019 20th International Conference on Electronic Packaging Technology, ICEPT 2019.
3. Li, D., Shang, Z., She, Y., Wen, Z., Investigation of Au/Si eutectic wafer bonding for MEMS accelerometers // *Micromachines*, 8(5),158, 2017.
4. Chen, G., Zhong, P., Cheng, S., Coupling Behavior Between Glass Frit and Plate During Laser-Assisted Glass Frit Bonding // *Zhongguo Jiguang/Chinese Journal of Lasers*, 48(18),1802005, 2021.
5. Liang, T. et.al., All-SiC Fiber-Optic Sensor Based on Direct Wafer Bonding for High Temperature Pressure Sensing, *Photonic Sensors*, 12(2), c. 130-139, 2022.
6. Admassu, D., Durowade, T., Gao, W., Velicu, S., Sivananthan, S., Adhesive wafer bonding of micro-actuators with SU-8 photoresist // *Microsystem Technologies*, 27(9), c. 3293-3297, 2021.
7. N. Malik, K. Schjølberg-Henriksen, E. Poppe, Al-Al thermocompression bonding for wafer-level MEMS packaging, 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII).
8. C.H. Yun, J.R. Martin, E.B. Tarvin, and J.T. Winbigler, AL TO AL WAFER BONDING FOR MEMS ENCAPSULATION AND 3-D INTERCONNECT, 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems.
9. M.M. Visser, Taklo K., Schjolberg-Henriksen N., Malik E., Poppe S.T., Moe T.G. Finstad, Al-Al Wafer-Level Thermocompression Bonding applied for MEMS, 2017 5th International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D).
10. J. Froemel, M. Baum, M. Wiemer, F. Roscher, M. Haubold, C. Jia, T. Gessner, INVESTIGATIONS OF THERMOCOMPRESSION BONDING WITH THIN METAL LAYERS, 2011 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference.
11. Shiro Satoh, Hideyuki Fukushi, Masayoshi Esashi, Shuji Tanaka, Low temperature hermetic sealing by aluminum thermocompression bonding using tin intermediate layer, 2017 IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (EDTM).
12. M.M.V. Taklo, K. Schjølberg-Henriksen, N. Malik, H.R. Tofteberg, E. Poppe, Low-temperature bonding technologies for MEMS and 3D-IC,

- 2014 4th IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration (LTB-3D).
13. B. Rebhan, A. Hinterreiter, N. Malik, K. Schjølberg-Henriksen, V. Dragoi and K. Hingerl, Low-Temperature Aluminum-Aluminum Wafer Bonding, 2016.
 14. Jack Martin, Wafer Capping of MEMS with Fab-friendly Metals, MOEMS-MEMS 2007 Micro and Nanofabrication.
 15. Eiji Higurashi, Michitaka Yamamoto, Hiromu Kawai, Yuta Sasaki, Tadatomo Suga, InP/Si heterogeneous integration by low-temperature bonding using metallic interlayer, 2012 3rd IEEE International Workshop on Low Temperature Bonding for 3D Integration.
 16. Henri Ailas, Jaakko Saarilahti, Tuomas Pensala, Jyrki Kiihamäki, Low-temperature Cu-Cu thermocompression bonding for encapsulation of a MEMS mirror, 2019 IMAPS Nordic Conference on Microelectronics Packaging (NordPac).
 17. R. Straessle, Y. P'etremand, D. Briand, M Dadras and N. F. de Rooij, Low-temperature thin-film indium bonding for reliable wafer-level hermetic MEMS packaging.
 18. C. S. Tan, J. Fan, D. F. Lim, G. Y. Chong and K. H. Li, J. Microelectromech Systems 21 075006 (2011).
 19. Muhammad Salman Al Farisia, Hideki Hiranob, Shuji Tanaka, Low-temperature hermetic thermo-compression bonding using electroplated copper sealing frame planarized by fly-cutting for wafer-level MEMS packaging, 2018.
 20. MIL-STD-883E Method 2019.7, «Die shear strength,» 2003.
 21. MIL-STD-750E Method 1071.8, «Hermetic seal,» 2007.
 22. Y. Tao and A. P. Malshe, Microelectronics Reliability, 45, 559 (2005).
 23. S. Millar, M. P. Y. Desmulliez, Sensor Review., 29(4), 339 (2009).
 24. D. Xu, E. Jing, B. Xiong, Y. Wang, IEEE Trans Adv Pack, 33(4) 904-11 (2010).
 25. N. Malik, H. R. Tofteberg, E. Poppe, Hermeticity and Reliability of Au-Au Thermocompression Wafer Bonding, The Electrochemical Society Meeting, 2014
 26. B. Rebhan, G. Hesser, J. Duchoslav, V. Dragoi, M. Wimplinger, K. Hingerl, Low-temperature Cu-Cu wafer bonding, ECS Trans. 50 (7) (2012) 139-149.
 27. B. Rebhan, M. Wimplinger, K. Hingerl, ECS Trans., 64, 369 (2014).

28. B. Rebhan, K. Hingerl, J. Appl. Phys., 118, 135301 (2015).
29. N. Malik, K. Schjølberg-Henriksen, E. Poppe, M.M.V. Taklo, T.G. Finstad, J. Micromech. Microen., 25, 035025 (2015).
30. S. Satoh et al., Proc. IEEE MEMS 2016, Shanghai, China (2016) pp.581-584.
31. Schoeller H and Cho J 2009 Oxidation and reduction behavior of pure indium J. Mater. Res. 24 386–93.
32. Straessle R, Pellaton M, P'etremand Y, Affolderbach C, Briand D, Low-temperature indium-bonded alkali vapor cell for chip-scale atomic clocks J. Appl. Phys. 113 064501, 2012.
33. Патент РФ №2662061.
34. Патент США №8349635B1.

REVIEW OF SEALING METHODS USING THERMAL COMPRESSION BONDING TECHNOLOGY OF SEMICONDUCTOR WAFERS

V.A. Bespalov, P. S. Ivanin*, N. A. Djuzhev, M. A. Makhaboroda,
E. E. Gusev

*National Research University of Electronic Technology (MIET),
Moscow, Zelenograd, 124498, Russian Federation
E-mail: *ivanin@ckp-miet.ru*

Received 20.01.2022

Abstract. The sealing process is the final operation for product assembly (crystal bonding). To perform reliable and qualitative sealing between crystals it is necessary to form a low pressure value (vacuum) that will be practically unchanged for a long time when testing the product under conditions of severe operation.

Wafer-level thermal compression bonding is a promising method for MEMS packaging using metals such as Au, Cu, Al, In as a bonding layer between two silicon wafers. Some advantages of this bonding method over other bonding methods are: reduced MEMS crystal size, electrical interconnections between the two wafers, and improved vacuum control inside the sealed cavity. In thermal compression bonding, metal bonds are formed between the deposited metal substrates by bringing them into close contact and simultaneously applying temperature and pressure. The combined effect of temperature and pressure promotes diffusion of metal atoms between the surfaces due to atomic contact between the two substrates. The applied pressure must be high enough for both plates to contact despite the roughness of the surface. The result is a strong and hermetic bond.

Inertial MEMS sensors, such as accelerometers and gyroscopes, are typically sealed in sealed housings to protect the assembly from mechanical damage and environmental exposure. Some are assembled in sealed packages, but wafer-level packaging (WLP) has become more important in recent years. When applying WLPs to MEMS, in addition to providing a sealed encapsulation of the released structure, the packaging must be compatible with MEMS fabrication and standard redistribution and modification processes.

This paper gives an overview of existing encapsulation methods using different metals (Al-Al, Au-Au, Cu-Cu, In-In) using thermal compression splicing (bonding) technology of semiconductor wafers.

Keywords: sealing, 3D integration, thermocompression bonding, microassembly, metal-metal connection, metal oxide.