

# Технологии и оборудование для процессов временного и постоянного бондинга полупроводниковых пластин

И. Мандрик, к. т. н.<sup>1</sup>, И. Новожилов<sup>2</sup>

УДК 621.3.049.774 | ВАК 2.2.2

С развитием технологий 5G, искусственного интеллекта, Интернета вещей, беспилотного управления техникой и больших данных (Big Data) всё более заметным становится тренд на миниатюризацию и многофункциональность электронных устройств. Одной из перспективных технологий, позволяющих решить эту актуальную задачу, является бондинг полупроводниковых пластин (БПП), который все шире применяется в таких областях, как трехмерная (3D) интеграция, корпусирование, сверхтонкие электронные устройства и микро-электромеханические системы (МЭМС). В статье представлен обзор технологий бондинга полупроводниковых пластин, рассматриваются ключевые требования и параметры технологического процесса, а также применяемое оборудование.

## ВВЕДЕНИЕ

С появлением новых сфер применения технологий БПП возникают новые задачи для развития этого направления. В интегральных схемах элементы расположены плотнее, чем в МЭМС-устройствах, что потребовало усовершенствования технологий бондинга для применения в последних поколениях ИС и систем-на-кристалле. Например, технологию вертикальной 3D-интеграции, в рамках которой в пластинах формируются сквозные отверстия в кремнии (TSV), можно реализовать с применением металлического бондинга и создания электрических соединений между пластинами. В связи с этим, специалисты сегодня уделяют повышенное внимание металлам (таким как медь), используемым при производстве ИС.

Технология БПП подразумевает соединение двух пластин (целых или ее частей) между собой, что достигается либо непосредственным соединением пластин (постоянный бондинг), либо соединением с использованием промежуточного материала. Постоянный бондинг основан на когезионной связи, которая образуется при сближении поверхностей двух пластин при определенных температуре и давлении. Технология постоянного бондинга зависит от таких параметров, как поверхностная энергия,

шероховатость и морфология пластин. Промежуточный слой может быть адгезивом, полимером, припоем или металлом. Требования к шероховатости и морфологии поверхности для технологий бондинга с промежуточным слоем менее значительны в сравнении с постоянным бондингом. В любом случае пластины могут быть из одного и того же материала или из разных. БПП может быть необратимым (permanent) или временным (temporary) в зависимости от цели его применения.

Требования к процессу БПП весьма разнообразны, а возможности его реализации не всегда высоки. В некоторых случаях требуется обеспечить герметичность, как, например, при герметизации или изготовлении устройств, где требуется создать области с вакуумом (датчиков давления, емкостных микрообработанных ультразвуковых преобразователей), микрорезонаторов или устройств, которые должны быть герметичными в определенной среде. В других применениях требуется сформировать электрический контакт на границе соединения пластин или достичь устойчивости к воздействию жидких травителей для последующих этапов изготовления. Чистота пластин может ограничивать использование некоторых материалов, необходимых для БПП, а также достижения требуемой прочности соединения для надежной работы устройства и устойчивости к влажности, тепловому расширению и другим воздействиям.

Полупроводниковые пластины и другие материалы характеризуются температурным пределом, то есть максимальной температурой, которую они способны

<sup>1</sup> ГК «Диполь», руководитель проектов, MandriklV@dipaul.ru.

<sup>2</sup> ГК «Диполь», руководитель направления «Микроэлектроника», NovozhilovIA@dipaul.ru.

выдержать. Хороший пример – температурный предел КМОП-подложки (порядка 400...450 °С), что является актуальным для ряда применений, например в случае расположения МЭМС-устройств поверх пластины ИС (что обеспечивает такие преимущества, как низкую паразитную емкость, низкое энергопотребление и др.). Такое температурное ограничение может использоваться для выполнения БПП или повышения прочности соединения для последующего этапа отжига пластины.

Еще одним аспектом температурного предела является эффект теплового расширения материалов. Эффект теплового расширения не значителен при склеивании схожих материалов, как, например, при постоянном бондинге пластин кремния. Температурный предел и свойства материалов важно учитывать при БПП разных материалов или схожих, но с промежуточным слоем. Например, как в случае анодного бондинга кремния с боросиликатным стеклом. Кремний и кварцевое стекло имеют разные коэффициенты теплового расширения (КТР) при комнатной температуре, однако их КТР совпадает при температурах 316 и 528 °С. Таким образом, обладая информацией о температуре БПП и КТР материала, специалист может определить оптимальную температуру, чтобы минимизировать напряжение на границе соединения или свести к минимуму деформацию кристаллов на пластине.

Как упоминалось выше, БПП может осуществляться напрямую или с использованием промежуточного материала между ними. Классификация технологий БПП представлена на рис. 1.

### ПРЯМОЕ СРАЩИВАНИЕ ПЛАСТИН

Известно, что если два материала с чистыми и плоскими поверхностями плотно прижать друг к другу, то они склеятся и образуют связь на границе соединения без промежуточного материала. При прямом сращивании пластин преобладают поверхностные силы малой дальности, основанные на слабых межатомных связях, таких как силы Ван-дер-Ваальса и водородные связи, за счет которых происходит адгезия между двумя соприкасающимися поверхностями. Сила такой адгезии намного слабее ковалентной связи, поэтому для повышения прочности соединения применяют отжиг при высокой температуре. При прямом соединении кремния с кремнием высокая прочность соединения достигается при температуре выше 800 °С. Такие высокие температуры нежелательны для многих применений, особенно

для металлизации и составных полупроводников. Однако, температура отжига может быть значительно снижена при использовании плазменной или химической активации поверхности пластины.

Помимо отжига и модификации поверхности к технологическому процессу предъявляются требования по таким параметрам, как энергия связи, чистота поверхности, шероховатость и плоскостность пластин. Для влажной химической очистки полупроводниковых пластин в растворах разработан способ, созданный американской компанией RCA (автор разработки В. Керн), заключающийся в двух последовательных операциях обработки пластин двумя водными растворами травления. Также для очистки пластин перед БПП применяют обработку в озоне, ультрафиолетовом излучении или плазме. Шероховатость поверхности пластин также может быть уменьшена с помощью технологии, которая называется химико-механическая полировка (ХМП). ХМП полирует поверхность пластины для достижения требуемого уровня шероховатости. Плоскостность поверхности пластины – еще один важный параметр при прямом сращивании. Для оценки плоскостности используют параметр общего изменения толщины (TTV), определяющий разность максимального и минимального значений измеренной толщины пластины. Если TTV низкий, БПП будет проведен даже если просто привести две отполированные пластины в тесный контакт при комнатной температуре. Если TTV большой, зазор между пластинами препятствует их сращиванию, в результате чего образуются несвязанные области, препятствующие бондингу.

При активации поверхности пластин плазмой, сращивание происходит под действием когезионной



Рис. 1. Классификация технологий бондинга пластин в микроэлектронике

и адгезионной энергий твердых тел. Вначале поверхности пластин очищаются ионным распылением и активируются пучком быстрых атомов аргона. Затем пластины прижимаются и помещаются в камеру со сверхвысоким вакуумом (порядка  $10^{-5}$ ... $10^{-6}$  Па). Далее к соприкасающимся пластинам прикладывается давление величиной несколько десятков мегапаскалей. Полученная прочность соединения пластин, достигаемая при комнатной температуре, близка к объемной энергии разрушения соединяемых материалов. Таким образом, дальнейшая термическая обработка не требуется. БПП с активацией поверхности применяют для сращивания полупроводников, металлов и изоляторов, а также электронных и оптических устройств на основе полупроводников группы АЗВ5.

### АНОДНОЕ СРАЩИВАНИЕ ПЛАСТИН

Анодное сращивание применяют для соединения стекла с высоким содержанием щелочных оксидов (например, боросиликатного стекла) к металлу или кремнию с помощью сильного электрического поля. Данная технология, используется в микроэлектронике для изготовления сенсоров и корпусирования МЭМС-устройств. Соединение кремния с кремнием также возможно с помощью анодного сращивания при осаждении тонкого слоя боросиликатного стекла на поверхность пластин. Общая схема процесса сращивания без промежуточного слоя показана на рис. 2.

Температура поддерживается в диапазоне 200...400 °С, а электрическое напряжение – в диапазоне 200...1000 В. Технология анодного сращивания в сравнении с другими технологиями имеет такие преимущества, как низкая температура процесса и высокая прочность соединения (10...25 МПа). К пластинам предъявляются требования

низкой дефектности, согласования КТР, а также химического состава. Однако анодное сращивание из-за риска загрязнения оборудования щелочными металлами несовместимо с КМОП-производством и ограничено только соединением стекла с металлами и полупроводниками.

### АДГЕЗИОННЫЙ БОНДИНГ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

В процессе адгезионного БПП тонкий слой полимерного адгезива наносится на одну из двух сопрягаемых пластин с последующими этапами отверждения бондинга нагревом или УФ-излучением с небольшим усилием и низкотемпературным отжигом (рис. 3). Полимерный адгезив в процессе бондинга первоначально находится в жидкой, полужидкой или вязкоупругой фазе, затем переходит в низковязкую фазу в процессе отверждения и, наконец, в твердую фазу для достижения прочного и стабильного соединения. Одним из преимуществ использования адгезионного БПП является низкая температура процесса (не превышающая 250 °С), что делает его применимым для изготовления 3D-МЭМС, фотонных ИС и КМОП ИС. Еще одним преимуществом является мягкость и деформируемость полимерного адгезива. Промежуточный слой адгезива способен легко растекаться, что позволяет избежать образования пустот, заполняя внешние частицы на поверхности пластины и, устраняя дефекты, полученные в процессе ХМП. Толщина полимерного адгезива может варьироваться в широком диапазоне от нескольких нм до единиц мкм.

Промежуточный слой адгезива может быть использован для планаризации поверхности пластины и инкапсуляции топологических структур. Кроме того, адгезионный бондинг может применяться для совмещения и выравнивания пластин между собой. Однако

точность выравнивания значительно снижается из-за прикладываемого давления при БПП. При плотном контакте и укладке пластин друг на друга промежуточный слой оказывается недостаточно жестким, чтобы уравновесить силы трения, что приводит к смещению выравнивания. Для устранения смещения на краю пластины формируются поверхностные структуры. Использование попеременно-сшитых полимеров в качестве адгезива улучшает точность совмещения, так как они не расплавляются в процессе бондинга.

При 3D-сборке ИС адгезивы на основе полимеров скрепляют полупроводниковую пластину

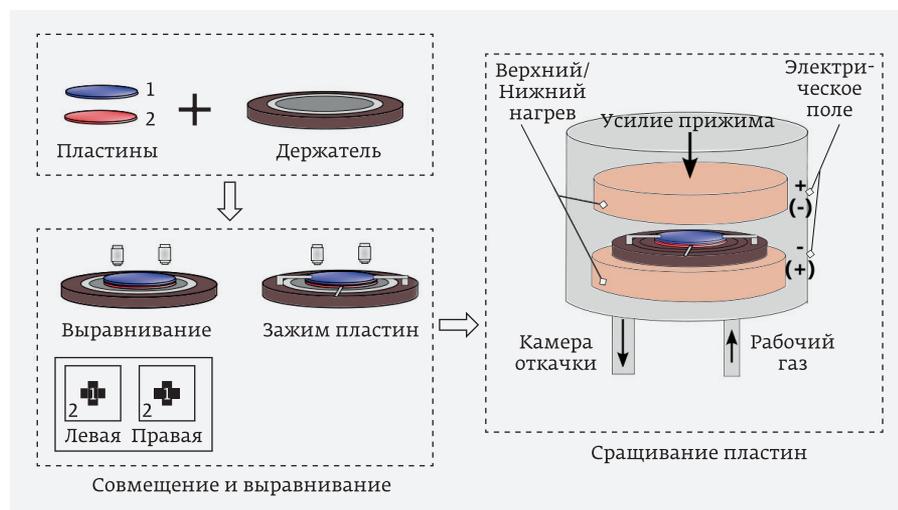
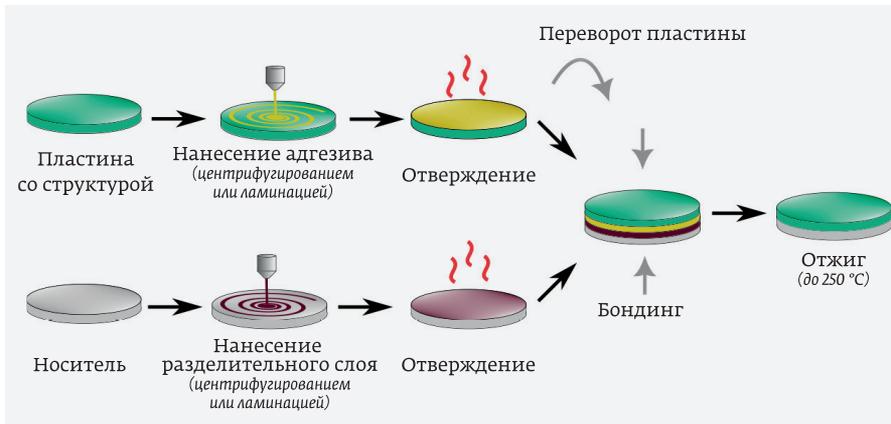


Рис. 2. Процесс сращивания пластин без промежуточного слоя



**Рис. 3.** Процесс бондинга полупроводниковых пластин с промежуточным слоем

с пластиной-носителем, которая не чувствительна к плоскостности и чистоте поверхности полупроводниковой пластины. Благодаря своей простоте, прочности и низкой стоимости такие адгезивы широко используются в процессе производства микроэлектроники и микроэлектромеханических систем. Эти адгезивы включают в себя эпоксидные смолы, сухие пленки, бензоциклобутен (BCB), полиимид и УФ-отверждаемые составы.

**МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ БОНДИНГ ПЛАСТИН**

Металлический БПП – это технологический процесс, в котором в качестве связующего промежуточного слоя применяют металлы. Данный процесс используется в задачах, требующих высокой теплопроводности в сочетании с электрической проводимостью (например, для технологий FOWLP (fan-out wafer level package – корпусирования кристаллов на уровне пластины с использованием внутреннего монтажа) и TSV).

Металлический БПП реализуется с помощью двух механизмов – с применением эвтектического сплава или диффузией атомов металла при одновременном воздействии нагрева и давления (термокомпрессионный бондинг – ТБ).

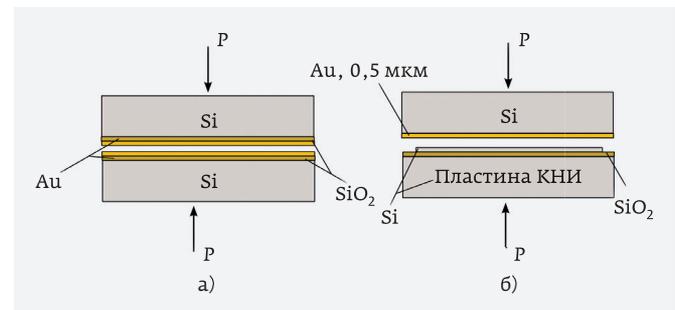
ТБ включает в себя три основных этапа: подготовку поверхности пластины для удаления органики и оксидов, осаждение металлической пленки и бондинг при нагреве и давлении. Наиболее распространенные металлами, применяемыми в ТБ, являются золото (Au), алюминий (Al) и медь (Cu) (рис. 4а). Для улучшения адгезии осаждают тонкий адгезионный слой, который также способен снизить температуру и давление. Например, для ТБ Au–Au перед осаждением золота на поверхности формируется диффузионный барьерный слой и пленка титана для улучшения адгезии. Температура и давление процесса составляет 300 °C и 7 МПа, соответственно. Для ТБ Al–Al

диапазон температур составляет 400...500 °C, а для Cu–Cu – 250...400 °C. Процесс ТБ применяется для герметизации МЭМС-устройств на уровне пластины. Процесс также привлекателен для 3D-интеграции из-за способности формировать электрический контакт. Однако основными недостатками данного процесса является высокая температура и прикладываемое давление. При увеличении размера пластины это может привести к ее повреждению в процессе бондинга.

Процесс эвтектического бондинга (ЭБ), в отличие от ТБ, основан на применении эвтектических сплавов, используемых в качестве промежу-

точного слоя для соединения двух пластин друг с другом посредством диффузионного механизма. Эвтектический сплав обладает низкой температурой ликвидус и может плавиться и застывать при низкой температуре в сравнении с температурой плавления отдельных компонентов. В настоящий момент существует широкий спектр комбинаций материалов для ЭБ, таких как Au–In, Au–Ge, Au–Sn, Au–Si, Al–Ge и Cu–Sn. Среди указанных комбинаций, сплав Au–Si наиболее распространен для ЭБ. Процесс ЭБ с данным сплавом изображен на рис. 4б. Процесс ЭБ начинается при температурах, превышающих эвтектическую для сплава (> 363 °C). Стандартный диапазон температур и давления в процессе ЭБ составляет 410...450 °C и 0,2...0,5 МПа, соответственно.

Равномерность формируемого соединения продолжает расти с увеличением давления. Однако при слишком высоком контактом давлении прочность и выход годных в процессе операции может снизиться. Это связано с выдавливанием металла за границу соприкосновения пластин. Применение процесса литографии для формирования областей для ЭБ позволяет увеличить



**Рис. 4.** Металлический бондинг пластин: а – термокомпрессионный; б – эвтектический

Таблица 1. Оборудование для временного бондинга

Параметры	Модель установки			
	SBN-08	ABT-08	SBN-12	ABT-12
Автоматизация	Полуавтоматическая	Автоматическая	Полуавтоматическая	Автоматическая
Количество камер	3	3	1	По запросу
Диаметр пластин, мм	50...200	50...200	200...300	200...300
Способ выравнивания	Механический	Pre-aligner	Механический	Механический
Точность совмещения (макс.), мкм	500	100	50	50
Сила срачивания (макс.), кН	1	1	60	60
Вакуум, мбар	0,1	0,1	0,1	$7,6 \cdot 10^{-2}$
Температура процесса (макс.), °C	250	250	350	350
Применение	Si, GaN, SiC, GaAs	Si, GaN, SiC, GaAs	FOWLP, TSV	FOWLP, TSV

Таблица 2. Оборудование для дебондинга

Параметры	Модель установки			
	SDN-08	ADC-08	SLN-12	ALC-12
Тип дебондинга	Термический	Термический	Лазерный	Лазерный
Автоматизация	Полуавтоматическая	Автоматическая	Полуавтоматическая	Автоматическая
Количество камер	2	2	1	По запросу
Диаметр пластин, мм	50...200	50...200	50...300	50...300
Способ выравнивания	Механический	Оптический	Механический	Оптический
Температура процесса (макс.), °C	350	350	-	-
Применение	Si, GaN, SiC, GaAs	Si, GaN, SiC, GaAs	FOWLP, TSV, 2.5D/3D	FOWLP, TSV, 2.5D/3D

Таблица 3. Оборудование для прямого срачивания

Параметры	Модель установки
	SPB-08
Автоматизация	Полуавтоматический
Количество камер	1
Диаметр пластин, мм	100...300
Способ выравнивания	Цифровой
Точность совмещения (макс.), мкм	$\pm 2$
Сила срачивания (макс.), кН	100
Вакуум, мбар	$7,6 \cdot 10^{-5}$
Температура процесса (макс.), °C	550 (опция 650)
Применение	МЭМС, память, КНИ, датчики

разрешение технологического процесса. Процесс ЭБ, аналогично ТБ, формирует электропроводящее соединение, подходящее для интеграции электронных компонентов. Недостатками ЭБ является неравномерность формируемого соединения, сложный процесс бондинга, связанный с высокими требованиями равномерности температуры по всей пластине, а также необходимости в точном контроле температуры. Высокая температура в процессе ЭБ вводит ограничение для его применения.

Компания «Диполь» предлагает полноценные решения как для временного, так и постоянного бондинга/дебондинга. Решение для временного бондинга включает необходимые адгезионные материалы (жидкий воск, клей и др.) и линейку оборудования для бондинга/дебондинга полупроводниковых пластин для широкого спектра применений, включая МЭМС, 3D-интеграция, корпусирование на уровне пластины (FOWLP), а также для электронных устройств на монокристаллах Si, SiC, GaN и GaAs. Оборудование обеспечивает бондинг в условиях низкого и высокого вакуума, высокой температуры и высокого давления. Благодаря модульному исполнению, оборудование может быть адаптировано для научно-исследовательской лаборатории, мелкого или крупносерийного производства. В табл. 1 и 2 представлены доступные модели установок для временного и постоянного бондинга и дебондинга. Установка для временного сращивания полупроводниковых пластин SBN-12 показана на рис. 5, а установка для дебондинга SDN-08 – на рис. 6.

Отдельно стоит выделить линейку установок для предварительного совмещения и прямого сращивания полупроводниковых пластин диаметром 100...300 мм (рис. 7, табл. 3). Данное оборудование поддерживает процессы анодного, термокомпрессионного, fusion (Si-Si) и плазменно-стимулированного сращивания.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях санкционного давления группа компаний «Диполь» продолжает поддерживать отечественных производителей ЭКБ современными технологическими решениями в критичных областях кристального и сборочного производства. Компания «Диполь» обладает наибольшим количеством доступных технологических решений на российском рынке, качество которых сравнимо или даже превосходит западное оборудование для микроэлектроники. В условиях ограничений и технологических вызовов специалисты компании готовы подобрать наиболее подходящее решение с технической и экономической точки зрения. При этом используются собственные ресурсы для оказания своевременной сервисной поддержки и поставки расходных материалов. Будем рады новым совместным проектам! ●



**Рис. 5.**  
Установка  
для временного  
сращивания  
SBN-12



**Рис. 6.**  
Установка  
для дебондинга  
SDN-08



**Рис. 7.**  
Установка  
для прямого  
сращивания SPB-08