

ВРЕМЕННОЕ СРАЩИВАНИЕ ПЛАСТИН – КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ МЭМС-УСТРОЙСТВ

Дирк Вюнш¹, Лина Пурвин¹, Ронни Мартинка¹, Ина Шуберт¹, Рони Юнганс¹, Марио Баум¹, Маик Вимер¹, Томас Отто^{1,2}

1. Институт электронных наносистем Фраунгофера, Хемниц, Германия
dirk.wuensch@enas.fraunhofer.de
2. Хемницкий технологический университет, Хемниц, Германия

АННОТАЦИЯ

Утонение с задней стороны после временного сращивания полупроводниковых пластин является ключевой технологией в трехмерной (3D) интеграции датчиков и электронных компонентов для получения миниатюрных систем. Обработка ультратонких кремниевых пластин является сложным процессом, поэтому были разработаны различные технологии временного сращивания пластин и носителя для стабилизации и защиты пластин во время последующих производственных шагов. Мы охарактеризовали два таких метода: BrewerBOND® с механическим разделением и ZoneBOND® с химическим/механическим разделением. В данной работе представлено подробное описание шагов подготовки полупроводниковой пластины, временного сращивания и разделения (дебондинга) пластин и носителя. Метод ZoneBOND® включает в себя нанесение адгезионного состава на полупроводниковую пластину с помощью центрифуги и позволяет проводить высокотемпературные процессы до 250°C. Носитель покрывается другим адгезивом по краю пластины. На оставшуюся область в центре носителя наносится слой средства для уменьшения клеящих свойств. Центрифужное нанесение покрытия на пластину со структурами и на носитель выполняется на полуавтоматической системе RCD8 от SUSS MicroTec. Пластина со структурами подготавливается к нанесению слоя адгезива толщиной 15-30 мкм (ZoneBOND® 5150-30). Первый шаг в обработке носителя на RCD8 - формирование зоны на краю пластины с помощью адгезива ZoneBOND® EM 2320-15. Точное центрирование носителя на вакуумном держателе чрезвычайно важно для равномерного нанесения покрытия на краевую зону. Толщина слоя находится в диапазоне от 0,5 до 3 мкм. После задубливания при температуре 220 °С, в центр пластины-носителя спреем наносится средство для уменьшения клеящих свойств (ZoneBOND® ZI 3500-02). Последующее сращивание пластин проводится с помощью бондера SUSS MICROTREC SB8. Процесс проходит под вакуумом (технологическое давление < 5 мбар) при давлении 170 кН/м². Во время сращивания формируются две зоны. В середине полупроводниковой пластины находится область со слабым адгезивом (зона 1), а по краю пластины формируется область с сильным адгезивом (зона 2). После химической, механической и термической обработки (Т < 250°C) происходит снятие высоко адгезивно-

го слоя с краевой зоны с помощью лимонена или мезителена. Затем сборка пластины на носителе, в которой пластина со структурами обращена лицевой стороной вниз, монтируется на рамку с пленкой и помещается в систему дебондинга (DB12T, SUSS MICROTREC). В дебондере DB12T сборка пластины на носителе фиксируется с обеих сторон вакуумом. Механическое разделение пластины со структурами и носителя осуществляется с помощью лезвия по С-образному вырезу на крае пластины. Пластина-носитель фиксируется над лезвием и вертикально перемещается на гибкой пластине над рабочим цилиндром при комнатной температуре. На последнем этапе происходит очистка полупроводниковой пластины на рамке и носителя. Аналогично процессу очистки края, адгезивный слой снимается в модуле SUSS MICROTREC AR12 с помощью мезитилена. Этот процесс позволяет изготавливать пластины 6 дюймов с утонением до 50 мкм.

Помимо метода ZoneBOND был протестирован новый материал, предоставленный компанией Brewer Science. Для разделения используется простое в интеграции механическое устройство. Две кремниевые полупроводниковые пластины были склеены отполированной передней стороной без структур, а также с пластиной со структурами, где была удалена часть кромки передней стороны пластины. Благодаря покрытию по всей поверхности полупроводниковой пластины и носителя этот процесс является простым решением при необходимости утонения пластин до 50 мкм. Подготовка устройств с помощью адгезионного состава BrewerBOND® 305 защищает структуры от повреждения во время склеивания пластин. Данный материал позволяет проводить обработку задней стороны при температуре 250°C – 300°C. На носитель наносится антиадгезионный материал BrewerBOND® 510, который позволяет проводить механический дебондинг при комнатной температуре без использования лазера или химических реагентов.

1. ВВЕДЕНИЕ

В ближайшем будущем потребуются новые решения для миниатюрных электронных систем для увеличения производительности, снижения стоимости и уменьшения толщины примерно до 10 мкм (1). Утонение полупроводниковых пластин является одним из перспективных решений, которое облегчает процесс 3D-инте-

грации сенсоров или электронных систем. Эти системы состоят из отдельных компонентов, вертикально установленных друг на друга и подключенных к сети. Для проведения 3D-интеграции требуется утонение МЭМС и КМОП-прибора. Эффективная терморегуляция и высокая плотность переходных отверстий в кремнии благодаря меньшему отношению сторон - это лишь некоторые из преимуществ утонённых пластин. Однако, обработка утоненных пластин существенно сложнее, чем в случае с толстыми пластинами. Ультратонкие кремниевые пластины толщиной до 50 мкм имеют низкую устойчивость, низкую жесткость при изгибе; кроме того, их нельзя перемещать с помощью стандартного технологического оборудования. Для изготовления тонких кремниевых пластин или их стабилизации во время механической обработки/перемещения, необходимо временно зафиксировать эти пластины со структурой на пластине-носителе (1). Для утонения используются процессы шлифования, травления и полировки. Двухэтапная шлифовка (грубая и тонкая) удаляет большую часть кремниевого слоя и приводит к образованию дефектов на поверхности. Их можно удалить с помощью последующего жидкостного травления при этом восстанавливается кристаллическая решетка.

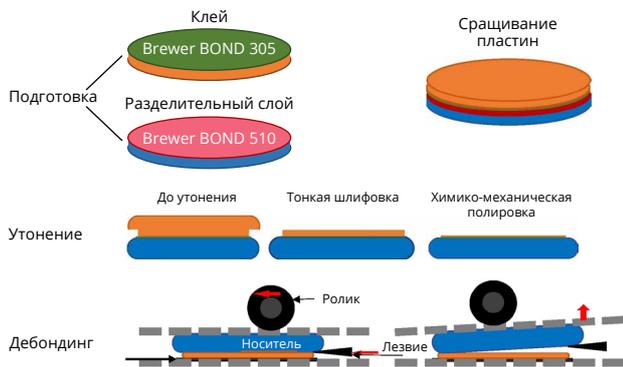


Рис. 1. Схема процесса временного срачивания по технологии компании Brewer Science

И наконец, химико-механическая полировка (CMP) позволяет создать идеальную поверхность с $R_a < 1$ нм. Один из способов обработки тонких пластин был предложен компанией Brewer Science. Данный способ включает в себя центрифужное нанесение адгезива на полупроводниковую пластину. На носитель наносится антиадгезионный материал для извлечения утонённой пластины с носителя во время процесса дебондинга. На Рис.1 изображена схема процесса обработки тонких пластин, который рассмотрен в данной работе. Сначала происходит подготовка полупроводниковой пластины и носителя. Затем проводится временное срачивание и утонение, за которым следует химико-механическое разделение.

В целом, все технологии срачивания пластин делятся на жидкостные и сухие и (2). Для каждой из этих групп доступны специальные технологии. Технология адгезивного срачивания относится к группе жидкостных методов с широким выбором методов для оконча-

тельного дебондинга. К ним относятся: термическое, химическое, лазерное и механическое разделение. На Рис. 2 представлено краткое описание различных методов временного срачивания с разделением на методы жидкостной и сухой обработки.

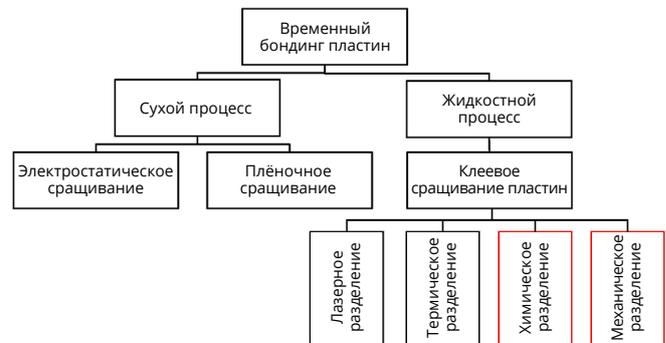


Рис 2. Обзор различных технологий временного срачивания

Во временном срачивании полупроводниковых пластин существуют традиционные методы, такие как, например, разделение под воздействием температуры. Современные же новые технологии направлены на разработку методов дебондинга при комнатной температуре. Одним из таких методов является ZoneBOND®, предложенный компанией Brewer Science, который является комбинацией химического и механического разделения.

Основная идея данной технологии заключается в том, что носитель делится на две зоны, которые формируются во время срачивания.

В центре пластины формируется область слабого адгезива (зона 1), а по краю пластины формируется область сильного адгезива (зона 2).

Помимо ZoneBOND компания Brewer Science предлагает новые материалы под различные требования процессов срачивания и разделения. В методе BrewerBOND® используется лазерное или механическое разделение.

Лазерное разделение оказывает очень слабое воздействие на утоненную пластину, но может проводиться только со стеклянным носителем, прозрачным для лазерного излучения в диапазоне 270 нм и 360 нм. Адгезивные материалы, которые используются в методах ZoneBOND® и BrewerBOND®, перечислены в Таблице 1.

Технология	Материал
BrewerBOND®	Антиадгезионные материалы для носителя: BrewerBOND® 701, BrewerBOND® 510 Адгезионные материалы для срачивания пластин: BrewerBOND® 305
ZoneBOND®	Антиадгезионный материал для носителя: Зона 1: ZI 3500- 02 Зона 2: EM 2320- 15 Адгезионный материал для срачивания пластин: ZoneBOND® 5150- 30

При механическом разделении пластин требуется приложить дополнительную силу. Преимуществами механического разделения являются низкие расходы, а также возможность использовать различные типы адгезионного материала. Технологический процесс при механическом разделении гораздо проще, чем в случае с методом ZoneBOND®, в котором антиадгезионный слой наносится на всю поверхность носителя.

В результате отсутствует необходимость в жидкостном химическом травлении или лазерном разделении перед дебондингом. По сравнению с методом ZoneBOND® технология BrewerBOND® имеет более простые подготовительные шаги. Сравнительный обзор данных технологий представлен на Рис. 3.

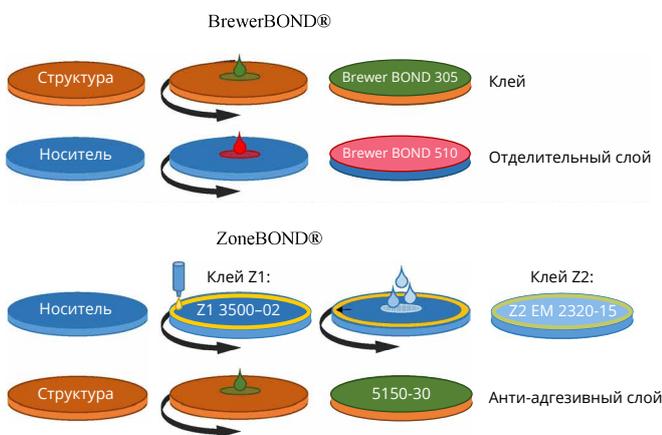


Рис. 3. Сравнение технологий BrewerBOND® и ZoneBOND®

2. ИСПЫТАНИЯ

Перед нанесением покрытия на полупроводниковую пластину необходимо удалить часть кромки пластины со структурой. Предыдущие результаты показывали, что край пластины менее подвержен повреждениям.

Удаление кромки производится на ширину 2 мм и глубину 260 мкм. На Рис. 4 изображен край 8-дюймовой пластины после обработки. После шага утонения диаметр полупроводниковой пластины уменьшится на 4 мм.

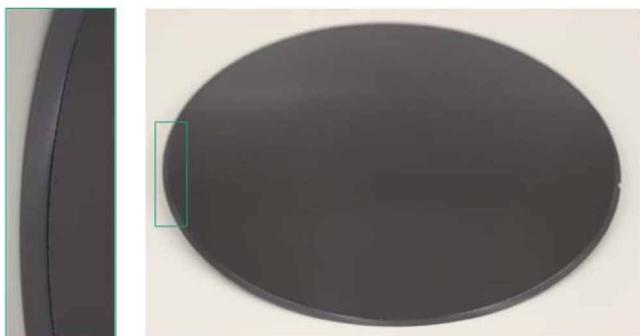


Рис. 4 8-дюймовая пластина после обработки края

Результаты опыта с использованием материала ZoneBond®. Центрифужное нанесение покрытия на пластину со структурой и на носитель выполняется на полуавтоматической системе RCD8 от SUSS MicroTec. Полупроводниковая пластина подготавливается с

помощью осаждения термопластичного адгезива (ZoneBOND® 5150-30). После этого выполняется задубливание материала при температуре 230°C в течение 2 минут. Вязкость адгезива составляет 10000 сП. Толщина слоя адгезива зависит от скорости вращения держателя. Для создания слоя толщиной 20 мкм требуется скорость вращения 1600 об/мин. и примерно 5-10 мл материала (см. Рис.5)

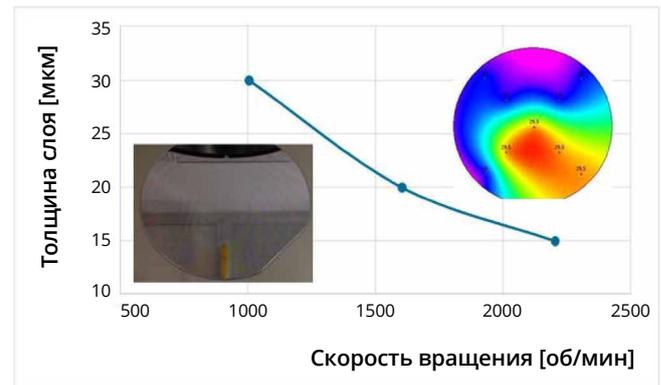


Рис. 5. Зависимость толщины слоя от скорости вращения, определенная на p/n пластине с однородным покрытием и толщиной слоя 30 мкм.

Первым шагом в подготовке пластины-носителя на системе RCD8 является формирование зоны на краю полупроводниковой пластины с помощью адгезива ZoneBOND® EM 2320-15. Чрезвычайно важно обеспечить точное центрирование носителя на вакуумном держателе для получения однородного покрытия по краю пластины. Толщина слоя находится в диапазоне 0,5 – 3 мкм. После сушки при температуре 220° в центр носителя наносится слой антиадгезионного материала (ZoneBOND® ZI 3500-02). Вязкость слоя антиадгезионного материала составляет всего 50 сП в сравнении с 400 сП ZoneBOND® EM 2320-15. Как и в случае подготовки полупроводниковой пластины, толщина слоя на носителе зависит от скорости вращения держателя. Для того чтобы получить слой толщиной 2 мкм, требуется скорость вращения 300 об/мин с дозой нанесения 1,5 мл. Ширина адгезива составляет примерно 1,5 мм (см. Рис. 6).

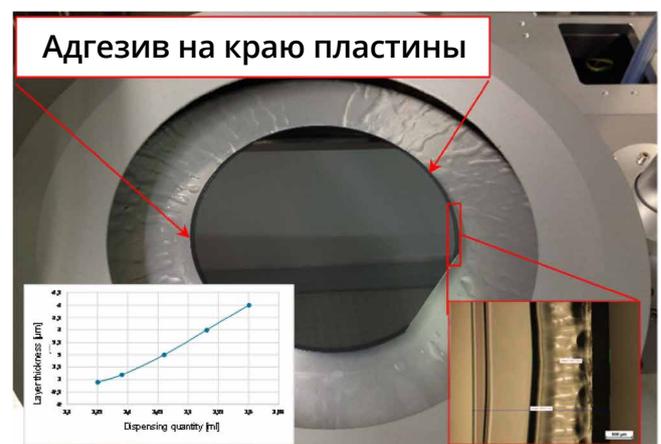


Рис. 6. Пластина-носитель после нанесения адгезива на край, а также зависимость толщины слоя от наносимого количества материала при постоянной скорости вращения 300 об/мин

Последующее адгезивное сращивание проводится с помощью системы SUSS MicroTec SB8. Процесс протекает при невысоком вакууме (<5 бар) с давлением сращивания 170 кН/м² при температуре 200°C. На Рис. 7 изображена сборка пластины на носителе на 6-дюймовом держателе с нанесенным промежуточным слоем толщиной примерно 30 мкм после сращивания в SB8e.

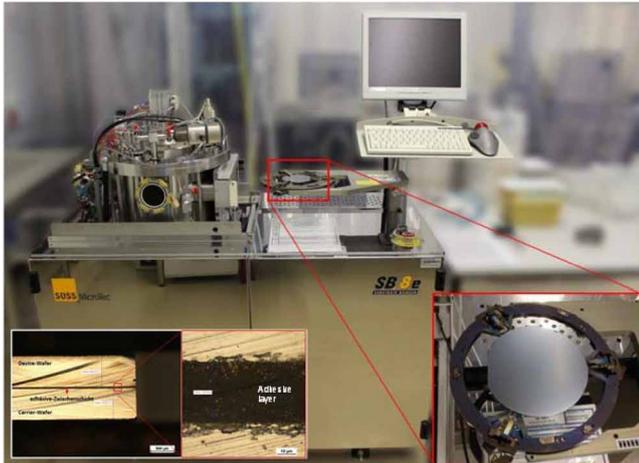


Рис. 7. Адгезионное сращивание пластин установкой SUSS SB8e со сформированным промежуточным слоем

Одним из способов оценки качества поверхности сращивания является микроскопия в инфракрасном свете. На Рис.8 Для изображены два примера после сращивания.

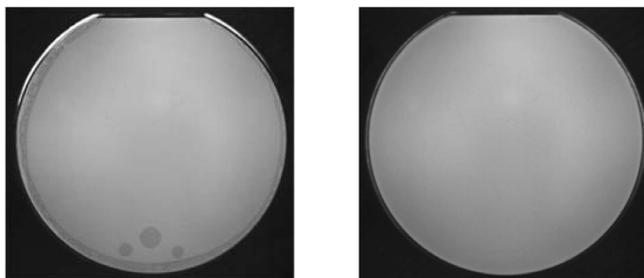


Рис. 8. ИК-изображение после адгезионного сращивания с (слева) дефектами и без (справа) дефектов

Изображение слева четко показывает пустоты между склеенными пластинами, в то время как справа такие пустоты отсутствуют. В предыдущей работе для оценки прочности склеивания использовались структуры 5 на 5 мм, к которым была приложена поперечная сдвигающая сила до появления трещин на поверхности склеивания. В зоне высокой адгезии при приложении поперечной сдвигающей сил был получен результат около 8 Мпа с выходом годных кристаллов более 90% (см. рис. 9). По сравнению с зоной 2 прочность склеивания и выход годных кристаллов в зоне 1 очень низкие.

После химической, механической и термической обработки ($T < 250^{\circ}\text{C}$) с краевой зоны с помощью мезитилена снимается адгезионный слой. Затем сборка носителя с п/п пластиной, обращенной лицевой стороной вниз, монтируется на рамку с пленкой и помещается в бондер DB 12T.

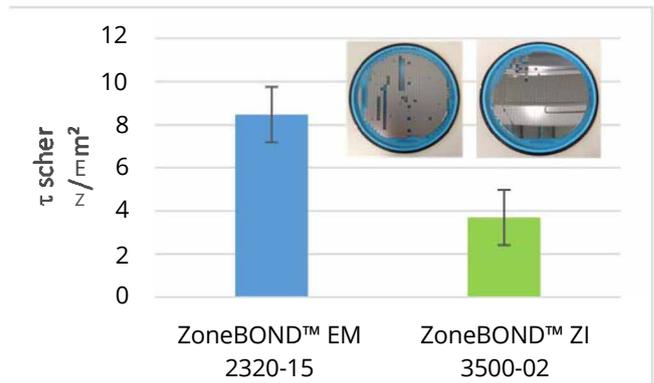


Рис. 9. Прочность на сдвиг зоны 2 и зоны 1

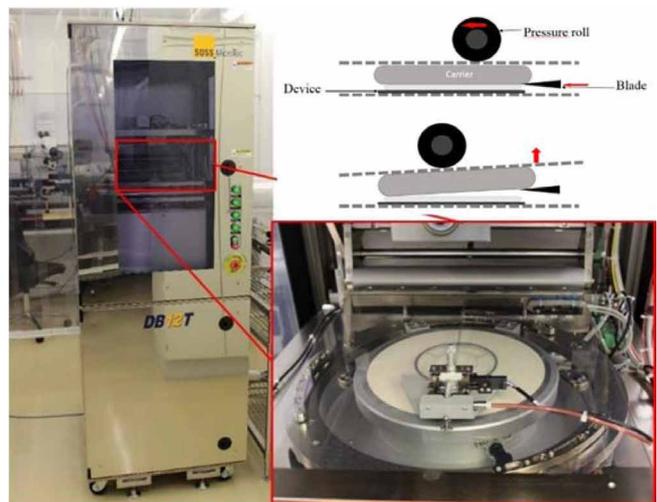


Рис 10. Процесс дебондинга в SUSS DB 12T

В системе DB 12T сборка пластины с носителем с обеих сторон фиксируется вакуумом. Механическое разделение полупроводниковой пластины и носителя проводится по С-образному вырезу на краю пластины. Носитель фиксируется над лезвием и поднимается на гибкой пластине над рабочим цилиндром при комнатной температуре. Прижимной ролик перемещается назад и контролирует скорость процесса дебондинга. Схематический чертеж с изображением системы DB 12T представлен на Рис. 10 и Рис. 17.

В финальном шаге полупроводниковая пластина, размещенная на рамке с пленкой, и носитель очищаются в процессе комбинированной чистки наливом и спреем. Как и в случае со снятием слоя с краев, чистка проводится в модуле SUSS MicroTec AR12 с использованием лимонена или мезитилена с последующей промывкой изопропиловым спиртом. С помощью данного процесса возможно изготовление утоненных пластин размером до 50 мкм (см. Рис. 11).

На финальном этапе полупроводниковая пластина промывается мезитиленом. В процессе чистки наливом дозирующая рука ходит справа налево в течение двух секунд в сочетании с ультразвуковой обработкой. Растворитель удаляет адгезив с полупроводниковой пластины. Процесс очистки должен быть максимально коротким, поскольку чувствительная к УФ-из-

лучению пленка распадается под воздействием мезитилена. Нанесение наливом удалит весь слой адгезива за 15 минут. Пленка теряет свои клеящие свойства после 30 минут в мезитиленовой ванне, однако утоненной пластине требуется натяжение пленки (Рис. 12).

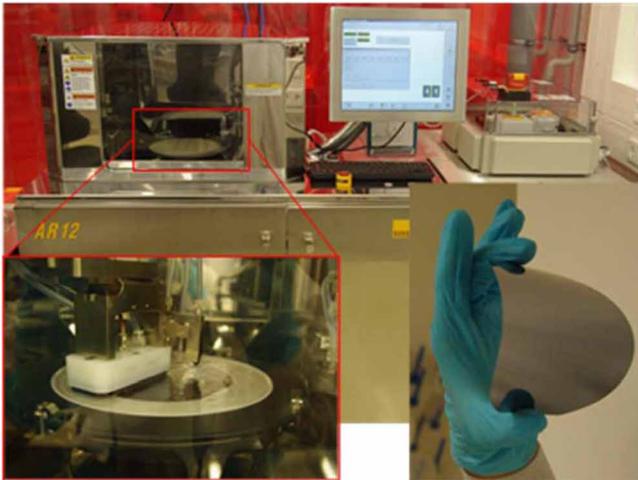


Рис. 11. Очистка в модуле SUSS MicroTec AR12 и полупроводниковая пластина 50 мкм после финальной подготовки

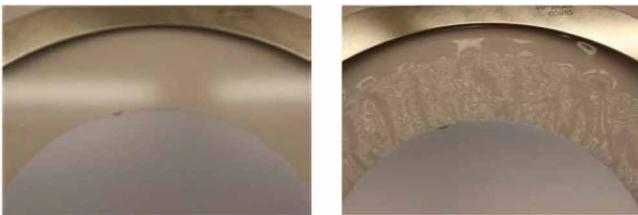


Рис. 12. Рама с пленкой после 10 минут (слева) и 40 минут (справа) в ванне с мезитиленом

Опытные результаты с материалами BrewerBond

Первым шагом в обработке полупроводниковых пластин с использованием системы RCDS является нанесение адгезивного материала BrewerBOND 305. BrewerBOND 305 является полимерным материалом с вязкостью 6700 сП. Сложность представляет нанесение материала без включения пузырей воздуха. Толщина слоя составляет 35-50 мкм (система измерения HEIDENHAIN). После задубливания при температуре 220°C в течение 2 минут без зазора между пластиной и нагревательной плитой, пластина готова к дальнейшей обработке. Следующим этапом является нанесение слоя BrewerBond 510 на пластину-носитель. Этот антиадгезионный материал позволяет проводить механический дебондинг при комнатной температуре без риска растрескивания пластины. Ожидаемая толщина слоя составляет 5-6 нм при скорости 1250 об/мин. Толщина слоя материала, определенная с помощью эллипсометрического измерения, составила около 3,5 нм. Числовая модель и карта полупроводниковой пластины после измерения толщины слоя BrewerBond 510 представлены на Рис. 13.

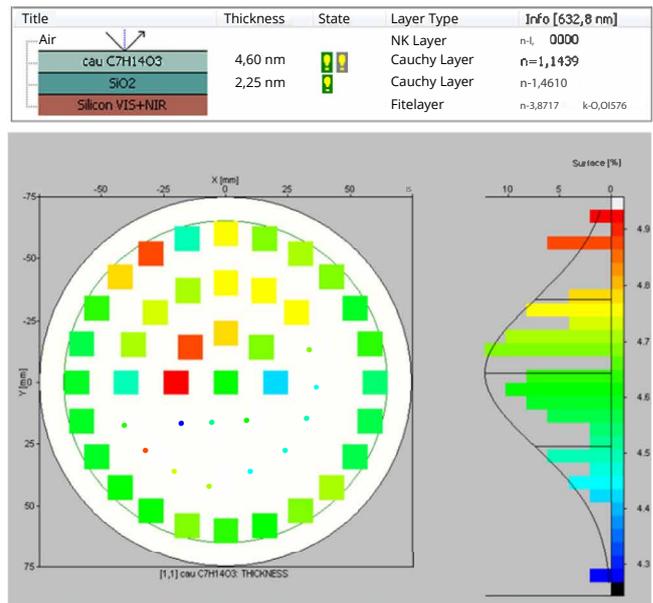


Рис. 13. Числовая модель и карта полупроводниковой пластины после эллипсометрического измерения материала BrewerBond 510

Последующее сращивание пластин проводится под вакуумом (вакуум < 5 мбар) при давлении сращивания 180 кН/м². Во время ИК-инспекции был обнаружен выход газа (см. Рис. 14)

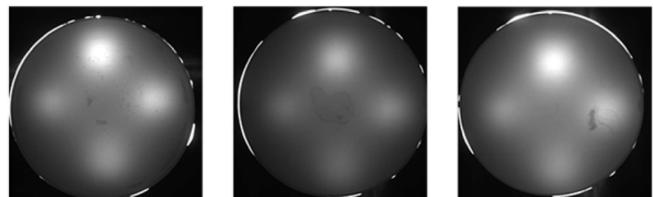


Рис. 14. Выход газа, определенный с помощью ИК-контроля поверхностей сращивания

Сращивание одной пластины проводится при температуре 200°C с шагом нагрева и охлаждения 10 К/мин. Следующая пластина имеет продолжительную выдержку при 100°C и 150°C в течение 20 минут. На последнем этапе мы видим стопку пластины и носителя после нагрева (200°C, 10 мин) перед нанесением покрытия. Последующее утонение полупроводниковой пластины 200 мм выполняется в три этапа (шлифование, травление и химико-механическая полировка). С помощью традиционного процесса шлифовки обратной стороны можно добиться утонения до толщины 50 мкм. Шероховатость кремния после шлифовки составляет примерно 14 нм при толщине полупроводниковой пластины 115 мкм (см. Рис. 15).

В целях контроля отклонения толщины предпочтительной является последующая тонкая шлифовка. С помощью центробежного травления сглаживаются дефекты или микротрещины на поверхности. Кроме того, дополнительно улучшается качество поверхности (около 4 нм). На финальном этапе химико-механической полировки можно получить идеальную поверхность с шероховатостью меньше 0,5 нм (см. Рис. 16).

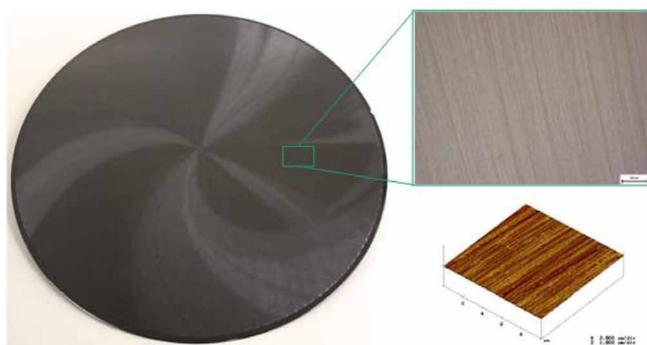


Рис. 15. Оптическое изображение с дефектами кремния и измеренной шероховатостью $Ra = 14$ нм после тонкой шлифовки

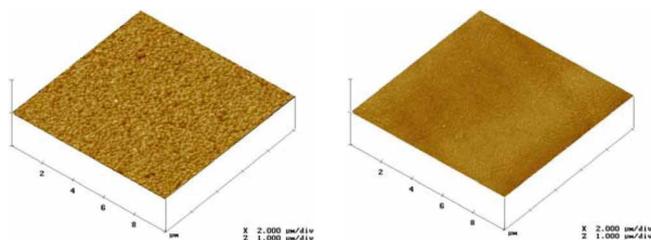


Рис. 16. АСМ-изображение после центробежного травления ($Ra = 4$ нм, слева) и Si-ХМП ($Ra 0,5$ нм, справа)

Помимо механического утонения существует целый ряд других химических и физических процессов, которые были частично протестированы и могут использоваться при работе со стопкой полупроводниковых пластин. К таким процессам относятся:

- Сухое кремниевое травление
- Металлизация методом физического осаждения из газовой фазы
- Фотолитография
- Жидкостное травление и чистка с использованием различных кислот и щелочей, таких как разбавленная фторводородная кислота.

Наиболее критичным параметром является температура. Система позволяет работать с температурами до 300°C при обработке полупроводниковых пластин.

После необходимой обработки стопка полупроводниковых пластин и носителя, в которой пластина со структурой обращена лицевой стороной вниз, монтируется на рамку с пленкой и помещается в систему дебондинга DB12T (см. Рис. 17). В процессе дебондинг отделяют полупроводниковую пластину от носителя. Для дебондинга пластины размером 200 мм при комнатной температуре используется процесс отделения, идентичный механическому разделению с материалом ZoneBOND®.

Во время этого шага полупроводниковая пластина фиксируется на месте, а носитель перемещается вертикально на гибкой пластине над двумя рабочими цилиндрами. Сила разделения составляет менее 500 Н и действует менее 5 минут. Чистка выполняется в модуле AR12 с помощью мезитилена и завершается промывкой изопропиловым спиртом, как и в процессе с ZoneBOND®. Во время очистки полупроводниковая

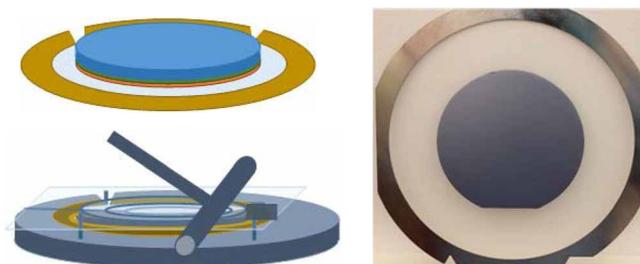


Рис. 17. Схематический чертеж полупроводниковой пластины толщиной 50 мкм на раме с пленкой перед дебондингом

пластина промывается мезитиленом. В процессе налива струей держатель вращается справа налево в течение 2 секунд, меняя направление. С помощью растворителя адгезив удаляется с поверхности кремния. Для удаления чувствительной пленки, которая разлагается под воздействием мезитилена, процесс чистки должен быть максимально коротким.

Для ручного удаления рамки с пленкой полупроводниковая пластина помещается на вакуумный держатель после УФ-экспонирования. Благодаря минимальному воздействию азота полупроводниковую пластину размером 50 мкм можно снять с держателя вручную (см. Рис. 18).



Рис. 18. Удаление пленки и полупроводниковая пластина

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что для 3D МЭМС-интеграции требуется увеличение функциональности в одной системе параллельно с уменьшением размера компонентов. Одной из ключевых технологий является применение технологии временного срачивания/дебондинга в 3D-ИС.

По сравнению с 3D-ИС в MEMS-интеграции существуют различные сложности:

1. Различная функциональность (например, оптические, механические, пневматические+электронные)
2. Разнообразные технологии и материалы (кремний, керамика, стекло, металл или полимеры)
3. Чувствительные компоненты с необходимостью герметичной упаковки.
4. Сквозные отверстия в кремнии с большим аспектным отношением.

В целом можно резюмировать, что стандартного решения не существует, и всё зависит от области применения. В 3D-МЭМС интеграции используется комплексный подход ZoneBOND® с использованием двух зон. Однако компания Brewer Science представила новый адгезионный материал под названием BrewerBOND®, который позволяет получить после временного срачивания полупроводниковые пластины

механическим разделением. Технологический процесс значительно упрощен. В отличие от работы с ZoneBOND®, в данном случае антиадгезионный слой наносится на всю поверхность носителя. В результате отсутствует необходимость жидкостной химической обработки края перед проведением дебондинга. Кроме того, данный материал позволяет использовать температуру до 300°C для обработки обратной стороны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ:

1. Munck, K.D. Generic building blocks for 3D integration and their application on hybrid CMOS image sensors. Katholieke Universiteit Leuven : s.n. Dissertation, ISBN: 978-90-5682-940-7.
2. Developpement, Yole. Thin Wafer, Temporary Bonding Equipment and Materials Market. 07/2012.
3. Tematys. Thin Wafers, Temporary Bonding Equipment & Materials Market. 2012
4. BrewerScience Datasheets: BrewerBOND®305 and ZoneBOND®5150-30