

Ультратонкие пластины как тенденция развития полупроводниковых технологий

Дмитрий БОДНАРЬ,
к. т. н.
bodnar@syntezmicro.ru

В статье рассмотрены основные тенденции применения ультратонких и экстремально тонких пластин и перехода к ним для изготовления интегральных схем, полупроводниковых приборов и современной 3 D-сборки. Проанализированы основные методы, технологии и оборудование утонения пластин с использованием шлифовки, полировки, плазменного и химического травления, релаксации для снятия механических напряжений, а также инструмента, материалов и сервиса для обработки ультратонких пластин.

Переход к пластинам увеличенного диаметра при изготовлении БИС, полупроводниковых приборов, чип-карт, солнечных батарей сопровождается увеличением толщины исходных пластин. Типовая толщина исходной пластины диаметром 100 мм без эпитаксиального слоя составляет 475 мкм. Значения толщины исходных пластин диаметром от 50 до 300 мм приведены в таблице.

Таблица. Типовая толщина стартовых кремниевых пластин различного диаметра

Диаметр пластины, мм	50	76	100	125	150	200	300
Толщина пластины, мкм	250–300	350–400	475–550	600–650	650–700	700–750	750–800

Поскольку в современных техпроцессах изготовления чипов количество технологических манипуляций с пластинами, включая их перегрузку, достигает тысячи, то увеличение механической прочности и сохранение целостности пластин во время технологического цикла является одной из основных причин увеличения их исходной толщины.

В то же время финишная толщина пластин и чипов постоянно снижается. Этому способствуют требования постоянного улучшения геометрических, электрических, тепловых

параметров интегральных микросхем и полупроводниковых приборов.

Для БИС сейчас главными являются требования современной сборки, а для мощных полупроводниковых приборов (СВЧ, IGBT, MOSFET, диодов, тиристоры и др.) — улуч-

шение электрических и тепловых параметров (выходная и рассеиваемая мощность, напряжение насыщения, прямое падение напряжения, тепловое сопротивление и др.).

Что касается простых, давно известных корпусов ИС, то и здесь можно наблюдать

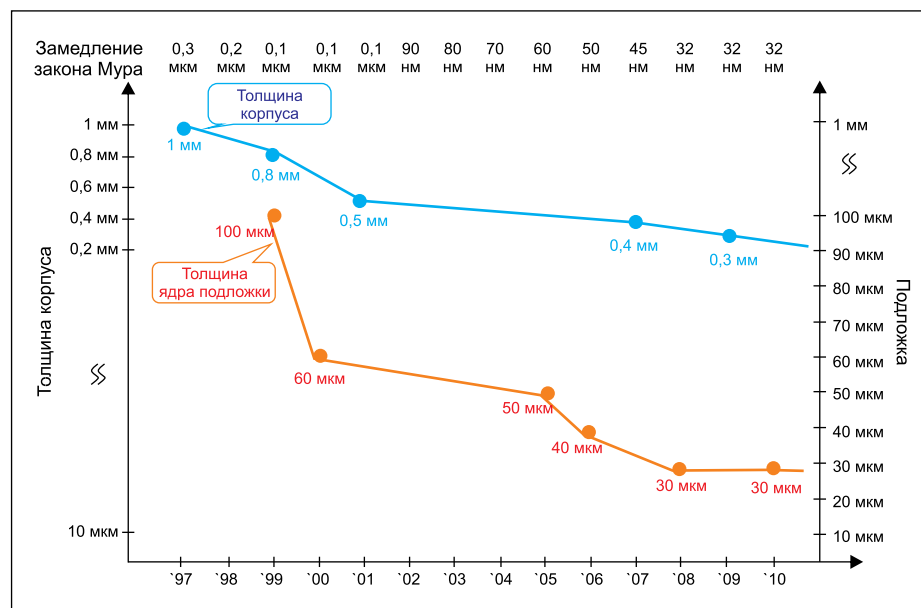


Рис. 2. Тенденции снижения толщины корпусов, пластин и проектных норм топологии чипов для 3D-сборки в 1997–2010 гг.

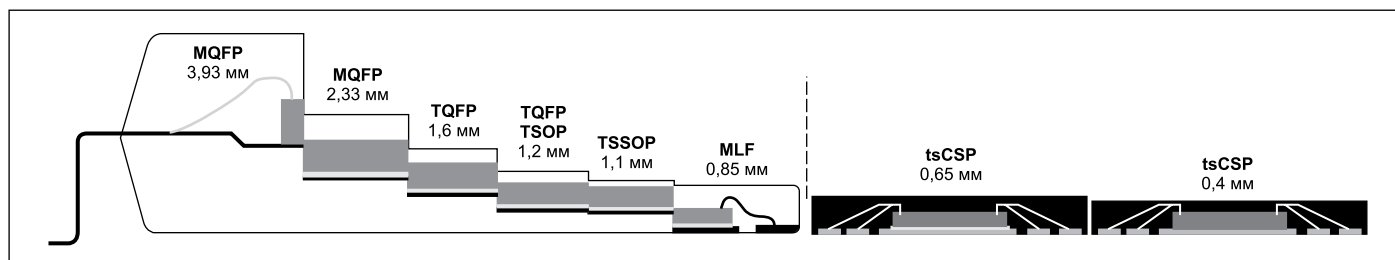


Рис. 1. Сравнение типов корпусов по толщине

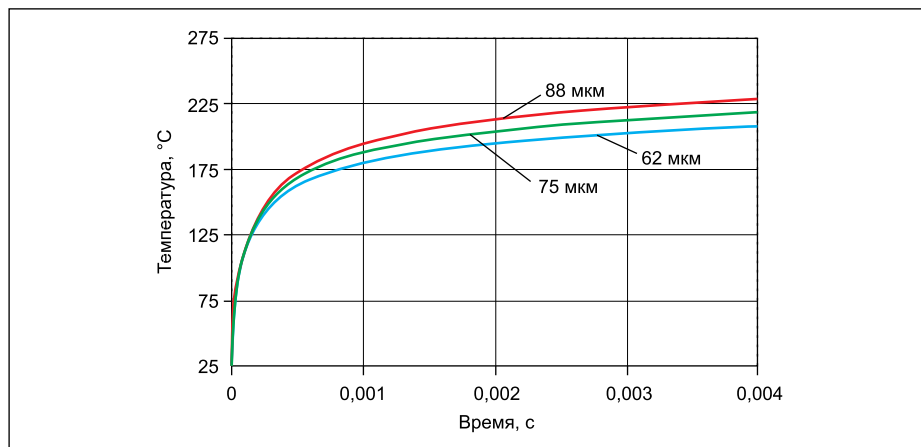


Рис. 3. Влияние длительности рабочего цикла и толщины чипа мощного GaAs FET на температуру чипа

аналогичную тенденцию: их толщина стабильно уменьшается (рис. 1). Очевидно, что при толщине корпусов менее 1 мм невозможно иметь толщину чипа такого же значения. Для тонких корпусов толщина чипа должна быть снижена до 200–300 мкм и менее. А согласно современным методам 3D-сборки необходимо снижать не только проектные нормы топологии чипов, но и финишную толщину пластин и чипов до 15–100 мкм (рис. 2) [1].

Для мощных полупроводниковых приборов более важным является не снижение геометрических размеров корпусов и сборки, а улучшение электрических и тепловых параметров приборов. На рис. 3 приведен график влияния длительности рабочего цикла и толщины чипа мощного GaAs FET транзистора на температуру чипа [2]. Эффект снижения температуры для более тонких чипов особенно четко проявляется при более длительном рабочем цикле.

На рис. 4 приведена структура трех поколений IGBT-транзисторов PT, NPT, SPT IGBT, что отражает переход к безэпитаксиальной технологии для снижения стоимости с одновременным снижением толщины чипа для уменьшения статических и динамических потерь [3]. Современные Trench Field Stop IGBT имеют толщину чипов 50–75 мкм.

Наиболее жесткие условия по толщине пластин предъявляются в современных методах передовой сборки чипов и пластин — 3D-сборке. Здесь можно говорить не об ультратонких, а об экстремально тонких пластинках. И если для простых корпусов и силовых приборов основными диаметрами пластин остаются 100–200 мм, то при современной передовой 3D-сборке применяются пластины диаметром 200–300 мм, а в перспективе будут использоваться пластины диаметром 450 мм.

На рис. 5 представлена «дорожная карта» финишной толщины пластин для различных типов приборов по состоянию на 2011 г. и в перспективе на 2015 г. [4]. К 2015 году ожидается снижение толщины пластин

в 1,5–4 раза. Были проигнорированы показатели снижения по категории RF Devices, поскольку представленное авторитетной компанией YOLE Development значение 300 мкм

(к 2011 году) не соответствует действительности. Компания «Синтез Микроэлектроника» использовала в этой категории пластины диаметром 150 мм и толщиной 150–160 мкм, изготовленные в России. Передовые зарубежные компании работают с пластинами толщиной 100–120 мкм (как кремниевыми, так и GaAs). Хотя специалисты YOLE будут правы, если в категорию RF Devices включат радиочастотные ИС.

На рис. 6 приведен график этой же компании по росту утоненных пластин в общем мировом объеме применяемых пластин в 2010–2016 гг. [4]. Если в 2010 г. доля утоненных пластин составляла 27%, то к 2016 году она увеличится в два раза — до 55%.

Кажущаяся простота задачи по утонению пластин является обманчивой. Пластина, поступающая на стадию утонения обратной стороны, проходит многочисленные этапы формирования легированных слоев в объеме пластины, а также формирование разнообразных диэлектрических и металлических

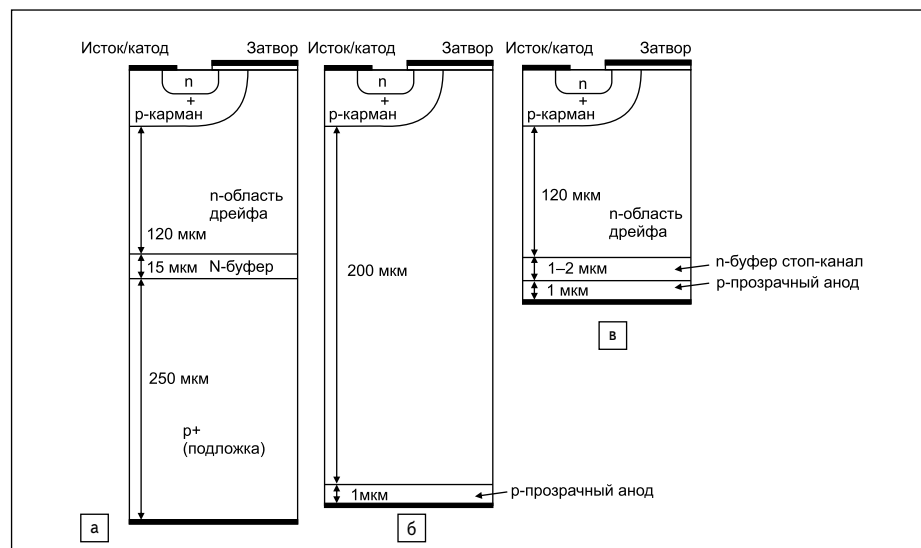


Рис. 4. Структура: а) PT IGBT; б) NPT IGBT; в) SPT IGBT

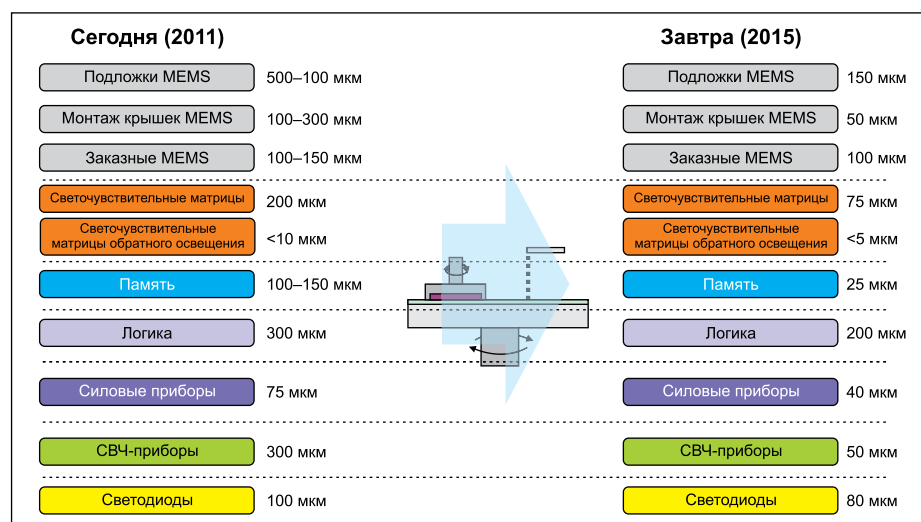


Рис. 5. «Дорожная карта» финишной толщины пластин для различных типов приборов



Рис. 6. Тенденция соотношения утоненных и неутоненных пластин на мировом рынке в 2010–2016 гг.

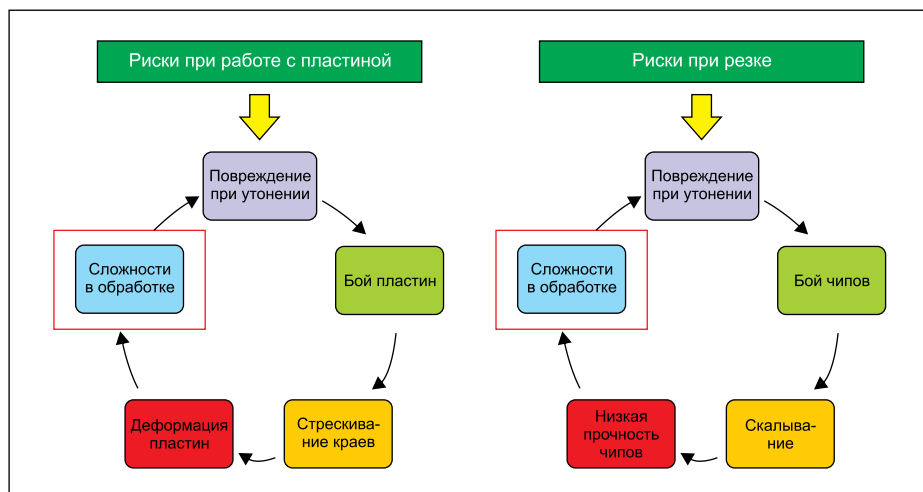


Рис. 7. Основные проблемы и риски ультратонких пластин на стадиях технологической обработки и резки

слоев на ее поверхности. В результате пластина обладает значительными внутренними механическими напряжениями. Эти напряжения являются основной причиной деформации и риска повреждений и боя пластин. На рис. 7 приведены основные проблемы и риски ультратонких (менее 100 мкм) пластин на стадиях технологической обработки и резки [5].

Среди производителей оборудования для утонения пластин наиболее известны Disco, Strasbaugh, G8N и Okamoto. У Disco стандартный процесс утонения выполняется на оборудовании с двумя рабочими столами (рис. 8) [6]. На первом рабочем столе проводится утонение с высокой скоростью. Результат этой обработки — грубый остаточный рельеф поверхности пластины. Финишная шлифовка с низкой скоростью на втором рабочем столе позволяет удалить большую часть нарушенного слоя, созданного грубой шлифовкой, добиться уровня шероховатости поверхности Ra 0,01 мкм и сни-

зить уровень механических напряжений пластины. Тем не менее, на поверхности остается тонкий нарушенный слой, который необходимо удалить как для создания стабильного электрического контакта к обратной стороне, так и для снятия напряжений.

Существуют три метода выполнения этого этапа утонения обратной стороны пластин:

- механическая полировка;
- плазменное травление;
- химическое травление (spin etch).

Disco предлагает комплексное решение и оборудование для 3-стадийной шлифовки и полировки или плазменного травления. Примером может быть трехшпиндельная установка DGP 8761 (рис. 9). Грубая, тонкая шлифовка и полировка выполняются на пластинах диаметром до 300 мм на століках 1, 2 и 3. Возможна комбинация процессов шлифовки и плазменного травления. Выполняющие эти процессы установки серии 8000 могут быть встроены в производственную линию. В них, как и во всем обо-



Рис. 8. Двухшпиндельная установка утонения DFG8540 компании Disco [6]

рудовании Disco, предусмотрена кассетная загрузка-выгрузка пластин.

Как наиболее опытная компания в процессах шлифовки, полировки и резки пластин, Disco имеет в своем арсенале еще несколько процессов для получения ультратонких пластин. Одним из них является процесс DBG (dicing before grinding) — резка перед шлифовкой. Схема процесса приведена на рис. 10. DBG-процесс позволяет совместить процесс утонения обратной стороны пластины с разделением ее на чипы. Частичная резка пластины с лицевой стороны на половину ее толщины позволяет снизить уровень механических напряжений. На лицевую сторону наносится защитная лента, и пластина поступает на шлифовку обратной стороны, а затем клеится на адгезионную пленку в металлической рамке. После снятия защитной пленки чипы можно разделить растяжкой адгезионной пленки.

Разновидностью этого процесса также является DBG с плазменным травлением (рис. 11). Процесс идентичен DBG и включает дополнительную операцию плазменного травления для разделения чипов на защитной пленке. В настоящее время производство оборудования плазменного травления Disco прекращено. Процессы и оборудование плазменного травления все-таки не являются сильной стороной компании Disco.

Для экстремально тонких пластин Disco предлагает процесс ТАИКО (рис. 12). В этом процессе шлифовке подвергается вся пластина за исключением внешнего края (около 3 мм) по внешнему диаметру. Это снижает деформацию и коробление пластины и риск ее боя на последующих технологических операциях. Пластины толщиной 50 мкм и менее могут подвергаться после ТАИКО-утонения заключительным операциям: ионной имплантации, металлизации обратной стороны, тестированию и т. д. Удаление кромки по периметру пластины — завершающая стадия перед резкой и разделением пластины на чипы.

Задачи снятия внутренних напряжений пластины и повышения ее устойчивости — одни из основных в процессе утонения. Для пластин толщиной 50 мкм и менее форма

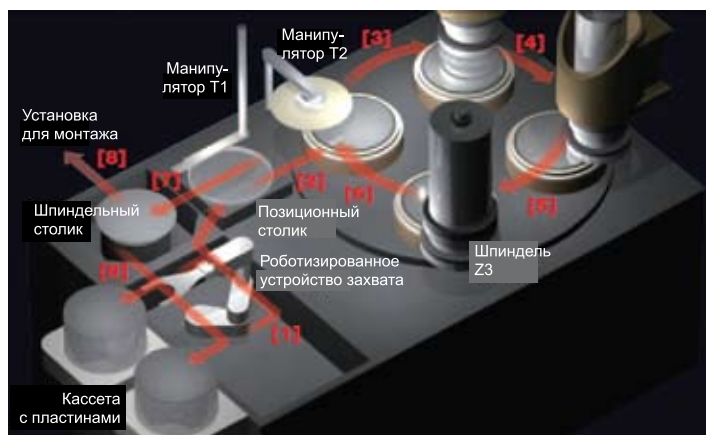


Рис. 9. Трехшпиндельная установка утонения компании Disco:

- 1 — роботизированное устройство захвата вынимает пластину из кассеты и помещает на позиционный столик с последующей центровкой;
- 2 — манипулятор T1 помещает пластину на шпиндельный столик;
- 3 — пластина перемещается в точку Z1 для грубой шлифовки;
- 4 — пластина перемещается в точку Z2 для прецизионной шлифовки;
- 5 — пластина перемещается в точку Z3 для шлифовки всухую;
- 6, 7 — манипулятор T2 вынимает пластину из шпиндельного столика и помещает ее на поворотный столик для последующей промывки и сушки;
- 8 — переход к установке для монтажа (DFM2700, DFM2800), либо роботизированное устройство захвата возвращает изделие назад в кассету

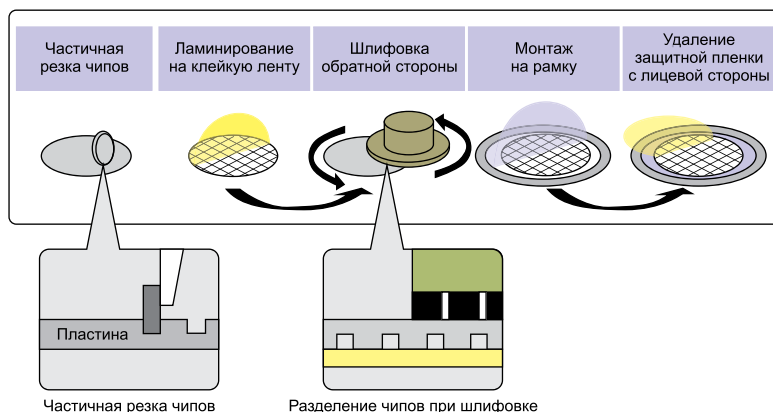


Рис. 10. Схема процесса DBG (резка перед шлифовкой) компании Disco

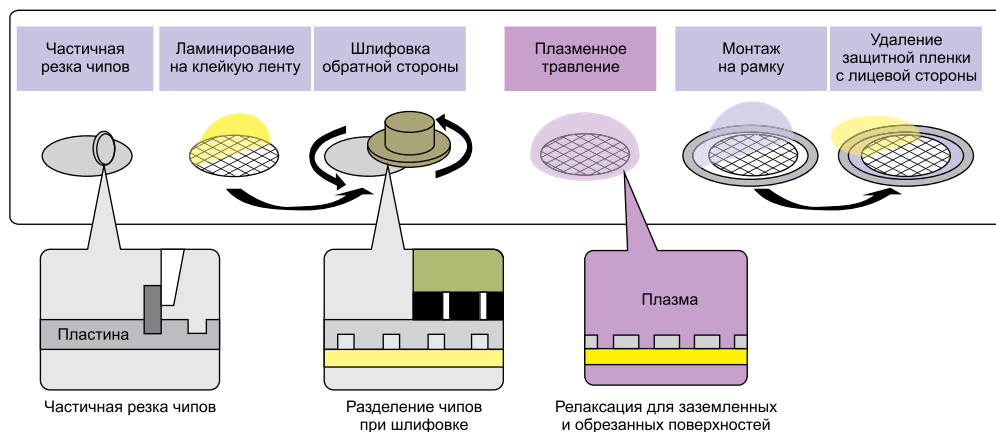


Рис. 11. Схема процесса утонения DBG с плазменным травлением компании Disco

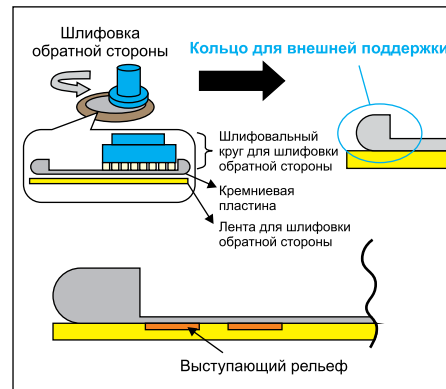


Рис. 12. Схема процесса TAIKO компании Disco

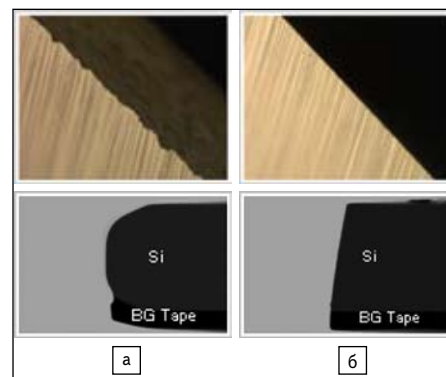


Рис. 13. Край пластины толщиной 50 мкм, утоненной по процессу компании Okamoto: а) до обрезки края пластины; б) после обрезки края пластины

кромки края утоненной пластины является источником напряжений и риска ее повреждения. Японская компания Okamoto использует в своем процессе утонения автоматическую обрезку края пластины и формирование оптимальной формы края (рис. 13).

Утонение пластин, включающее шлифовку и полировку наряду с плазменным травлением и формированием межсоединений, составляет основу процессов TSV (Through Silicon Via), WLP (Wafer Level Packaging) 3D-сборки.

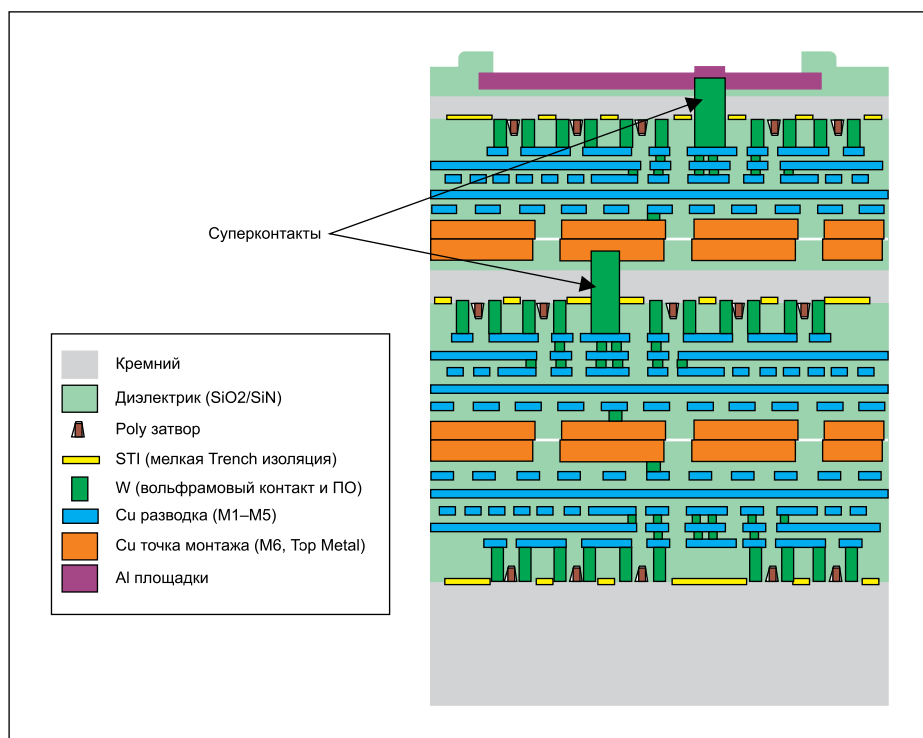


Рис. 14. Структура из трех пластин, изготовленных по процессу FaStack компании Tezzaron

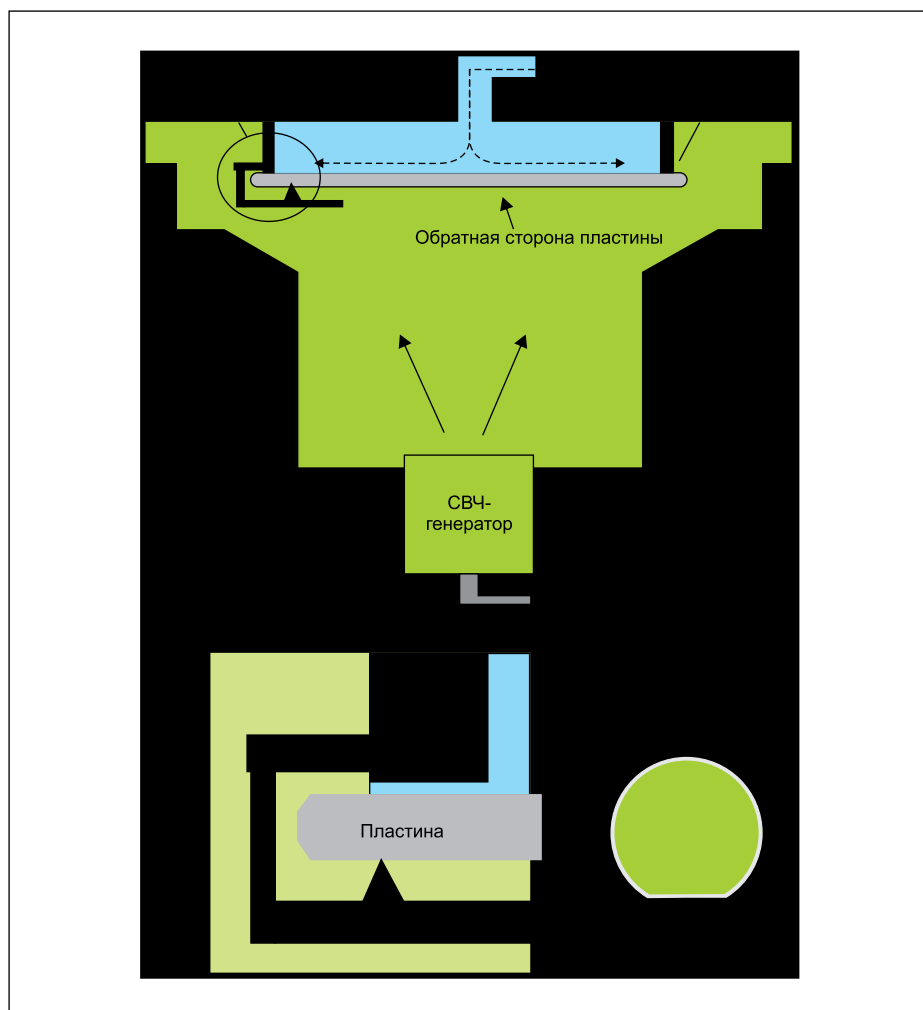


Рис. 15. Реакторная камера установки для скоростного травления кремния компании Secon Semiconductor

На рис. 14 показан поперечный разрез «сэндвича» из трех пластин, включающий пластину с рабочими чипами микросхемы и двумя пластинами с TSV-межсоединениями. «Сэндвич» изготовлен по процессу FaStack компании Tezzaron Semiconductor [7]. Полупроводниковая пластина обычно имеет толщину 750 мкм, но электрически активная часть микросхемы сосредоточена, как правило, в поверхностном слое толщиной 4–10 мкм. Остальная часть пластины обеспечивает ее структурную прочность. Процесс FaStack использует большую часть толщины первой пластины с микросхемами, а все остальные пластины в «сэндвиче» утоняются до толщины менее 15 мкм.

Патентованный процесс многоярусного монтажа пластин компании Tezzaron начинается с формирования сотен тысяч вертикальных структур межсоединений (так называемая система Super-Contacts). После этого на пластине формируется металлизация с использованием 1 мкм слоя меди и 0,5 мкм изолирующего SiO_2 . Затем две металлизированные пластины совмещаются лицевыми сторонами и соединяются в единое целое. Обратная сторона верхней пластины утоняется до менее чем 10 мкм комбинацией методов шлифовки и химико-механической полировки. При утонении вскрываются окна Super-Contacts. Обратная сторона утоненной пластины со вскрытыми Super-Contacts может быть металлизирована и наклеена на лицевую сторону третьей металлизированной пластины. Утонение, металлизация и монтаж повторяются необходимое количество раз. Ультратонение может уменьшить толщину пластины до 8 мкм, при этом неоднородность составляет всего 0,5 мкм.

Процессы шлифовки, полировки, монтажа тонких пластин для всех типов применений, включая 3D-сборку, требуют большого количества материалов (защитные пленки, клеи, рамки и т. д.). Но их рассмотрение не является темой данной статьи.

На рынке полупроводникового оборудования работают компании, специализирующиеся на продаже оборудования для плазменного травления обратной стороны пластин. Реакторная камера установки XPL-300 австрийской компании Secon Semiconductor позволяет выполнять процесс утонения пластин без защиты их лицевой стороны (рис. 15) [8]. Повышенная концентрация радикалов фтора создается у поверхности пластины с помощью СВЧ-генератора частотой 2,45 ГГц, расположенного в нижней части камеры. Скорость травления может достигать 25 мкм/мин. Защита лицевой стороны обеспечивается газовым потоком нейтрального газа, предотвращающего доступ активных радикалов к этой стороне пластины. Конструкция держателя пластин по периметру позволяет управлять профилем кромки, а управление потоком инертного газа дает возможность травить пластины не только с обратной, но и с лицевой



Рис. 16. Многокамерная установка XPL-900 компании Secon Semiconductor

стороны. Повышение производительности обеспечивается многомодульной конструкцией, состоящей из нескольких реакторных камер (рис. 16). Такое оборудование можно использовать как для автономного утонения обратной стороны пластин, так и для ее травления после шлифовки.

Специализированные установки снятия механических напряжений путем плазменного травления после шлифовки обратной стороны выпускает немецкая компания Muegge [9]. Травление в среде SF₆ со скоростью 2,5–3 мкм/мин позволяет решить задачу путем удаления поверхностного слоя толщиной несколько микрон.

Компании Lam Research и SSEC выпускают оборудование для жидкостного химического травления обратной стороны пластин после шлифовки [10, 11]. В 2008 году американская компания Lam Research приобрела австрийскую компанию SEZ Group, специализирующуюся на разработке и изготовлении оборудования жидкостного травления и обработки пластин с вращением (Spin Technology). Индивидуальная обработка пластин с дозированной подачей реагента в зону вращения пластины позволяет значительно повысить качество, однородность травления и обработки при 100%-ном использовании химических реактивов. Lam Research, известный производитель оборудования для плазменного травления, значительно укрепила позиции, объединив свои активы с другим крупным игроком на рынке полупроводникового оборудования — компанией Novellus [12].

Американская компания SSEC также использует идеологию индивидуальной жидкостной химической обработки пластин и уже предложила на рынок установки серии 3450 для пластин диаметром 450 мм, переход на которые еще только в проекте.

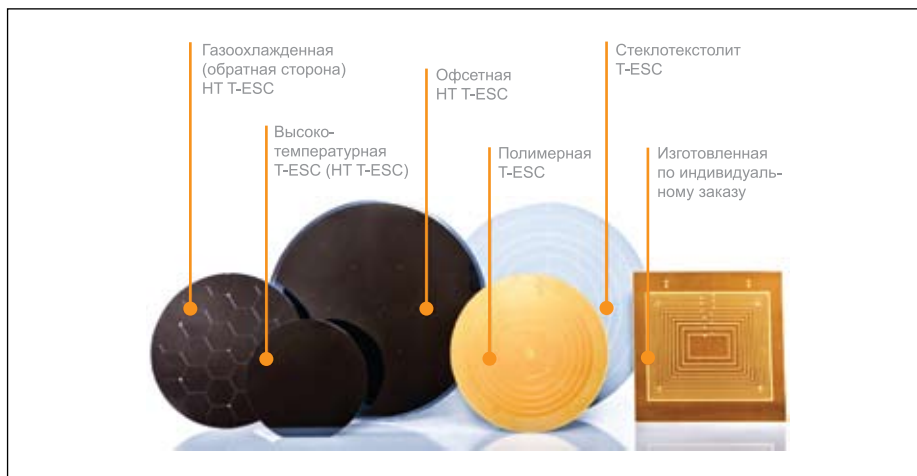


Рис. 17. Носители ультратонких пластин компании ProTec Carrier Systems

Однако утонение пластин является только частью комплекса задач, которые необходимо решать при переходе к ультратонким пластинам. Поскольку для некоторых приборов технологический маршрут изготовления чипов на пластине на этом не заканчивается, то пластина, в зависимости от типа изделия, проходит дополнительные операции: тестирование, напыление металлизации на обратную сторону (Au или TiNiAg), термообработку и даже литографию с обратной стороны и ионную имплантацию (для IGBT). А значит, технологии транспортировки, манипулирования, перегрузки ультратонких пластин приобретают не меньшее значение, чем сам процесс формирования ультратонких пластин.

Ручная обработка и так называемый «человеческий фактор» должны быть исключены или сведены к минимуму. Последние обстоятельства особенно важны для пластин большого диаметра (200–300 мм), потеря которых на завершающих стадиях обработки наносит чувствительный удар по экономике предприятия и себестоимости продукции. И это требует от производителей чипов высочайшей культуры производства, несмотря на все технические решения, заложенные в самом оборудовании обработки ультратонких пластин.

Немецкая компания ProTec Carrier Systems GmbH предлагает комплексные решения, включающие носители TT-ESC для ультратонких (менее 50 мкм) пластин для использования в технологических процессах шлифовки, напыления, плазменного и химического травления, тестирования и др. (рис. 17) [13].

Носители категории HT T-ESC можно использовать в процессах CVD, ионной имплантации, литографии и пр. при температуре до +450 °С. Технология основана на применении электростатической силы Кулона, возникающей при приложении электрического поля к слабопроводящим материалам. Тонкие пластины могут удерживаться на носителе в течение длительного времени (до 50 ч). После быстрого разделения пластины и носителя на поверхности пластины не остается никаких загрязнений и остатков, характерных для применения липких лент и носителей. То есть не нужны дополнительные процессы очистки пластин от этих органических остатков. Исключается деформация и разрушение пластин во время технологических операций. Особенно важным для производителей чипов является то, что они могут использовать собственное типовое оборудование, не адаптированное к ультратонким пластинам.



Рис. 18. Автомат Unit ACU 3000 для монтажа-демонтажа ультратонких пластин на носитель компании ProTec Carrier Systems

ProTec поставляет на рынок также ручное и автоматизированное оборудование для монтажа-демонтажа ультратонких пластин на носители (рис. 18), а также инструмент типа «вакуумный пинцет», работающий в составе оборудования или автономно (рис. 19).

Для производителей, не обладающих оборудованием и техническими решениями для утонения и последующей обработки ультратонких пластин, зарубежные компании предлагают комплексные сервис-решения, включающие не только сервис по шлифов-



Рис. 19. Инструмент типа «вакуумный пинцет» компании ProTec для работы с ультратонкими пластинами

ке, но и нанесение металлизации, тестирование и т. д.

Немецкая компания Doublecheck Semiconductor специализируется на разработке процессов и оказании фаундри-услуг по утонению, релаксации пластин для снятия напряжений, ионной имплантации и металлизации обратной стороны, тестированию и пр. [14]. Doublecheck может обрабатывать пластины диаметром 150, 200 и 300 мм. Производственные или исследовательские

компании, не обладающие технологией и оборудованием обработки ультратонких пластин, могут выполнять финальную стадию технологического маршрута изготовления чипов в компаниях с подобным сервисом.

Заключение

Современные и будущие технологии обработки полупроводниковых пластин предусматривают переход на финишных стадиях производства чипов к ультратонким, а для некоторых технологий и изделий — к экстремально тонким пластинам большого диаметра толщиной 15–100 мкм.

Современные методы утонения пластин объединяют интегрированные возможности процессов шлифовки, полировки, резки, плазменной и жидкостной химической обработки полупроводниковых пластин.

Услуги специализированных компаний по утонению пластин, материалам, оборудованию, технологическим услугам расширяют производственные возможности изготовителей чипов интегральных микросхем и полупроводниковых приборов. ■

Литература

1. 3D Packaging Overview. Amkor Group. Sept. 2009.
2. Hanreich G., Nicolics J., Mayer M. Thermal Performance of GaAs Heterojunction Power Transistors, Institute of Sensor and Actuator Systems Vienna University of Technology / 25th International Spring Seminar on Electronics Technology. Prague, Czech Republic. Proceedings ISSE 2002.
3. A New Generation of Power Semiconductor Devices. SAEI 2009.
4. Thin Wafer Market & Applications. YOLE Development Report, 2011.
5. Thin Wafer Manufacturing Equipment & Materials Markets. YOLE Development Report, 2011.
6. www.disco.co.jp
7. www.tezzaron.com
8. www.seconsemi.com
9. www.r3t.de
10. www.lamrc.com
11. www.ssecusa.com
12. Lam Research to acquire Novellus Systems for \$3.3 billion // I-Micronews. 15 Dec. 2011.
13. www.protec-carrier.com
14. www.doublecheck-semiconductor.com