

УДК 53.043

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ПЛАСТИНА-ШАТТЛ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН МАЛОГО ДИАМЕТРА И УЛЬТРАТОНКИХ ПЛАСТИН

© 2025 г. Н. А. Дюжев^а, Е. Э. Гусев^{а, *}, М. Ю. Фомичёв^а,
П. С. Иванин^а, И. В. Кушнарев^а, В. А. Беспалов^а

^аНациональный исследовательский университет “МИЭТ”

*E-mail: bubbledouble@mail.ru

Поступила в редакцию 02.09.2024 г.

После доработки 03.10.2024 г.

Принята к публикации 05.10.2024 г.

Впервые в России была проведена обработка пластины диаметром 100 мм с формированием отверстий для TSV структур на автоматизированном оборудовании для пластин диаметром 150 мм без перестройки установок. Для реализации данной технологии была разработана пластина-шаттл. Расчет надежности кремниевой пластины-шаттла был сделан на основе проведенных экспериментальных исследований механической прочности кремния. На основании полученных данных выполнен расчет толщины ультратонкой Si пластины, которая может быть без повреждения обработана в пластине-шаттле на установках с вакуумным столиком.

Ключевые слова: микросборка, трехмерная интеграция, TSV, рельеф поверхности, фотолитография, ПХТ, временный бондинг

DOI: 10.31857/S1026351925020041, **EDN:** ANAPSX

1. Введение. Оборудование большинства предприятий – производителей микроэлектроники представляет собой технологические линейки установок, рассчитанные на обработку полупроводниковых пластин только одного определенного диаметра. В настоящее время создаются технологические комплексы для обработки пластин из нитрида галлия на кремнии диаметром 150 мм [1], из карбида кремния диаметром 200 мм [2], строят заводы для обработки кремниевых пластин диаметром 300 мм [3] и 450 мм [4]. Применение автоматизированного оборудования на производстве позволяет значительно уменьшить влияние человеческого фактора, обеспечить снижение количества привносимых оператором загрязнений, и соответственно, повысить процент выхода годных кристаллов [5, 6]. Как столики для удержания пластин во время процессов их обработки, так и роботизированные руки для перемещения подложек рассчитаны на работу только с образцами определенной формы и размера, поэтому переход на обработку пластин другого диаметра зачастую влечет за собой обновление

всей технологической цепочки. По этой причине оборудование различных заводов, даже находящихся в пределах одного государства, оказывается несовместимым.

Нередко возникают ситуации, когда необходимо объединить функциональные возможности различных предприятий для производства высокотехнологичного изделия. Также в случае выхода из строя одной из установок закупка новой единицы оборудования или комплектующих для ее ремонта (как правило, импортных) может потребовать значительных финансовых и временных затрат. Эта недостающая технологическая операция могла бы быть выполнена на соответствующей установке другого предприятия, специализирующегося на работе с пластинами большего диаметра, если бы была обеспечена возможность ее работы с меньшим диаметром пластин. Таким образом, существует потребность в техническом решении, способном расширить возможности по обработке пластин различного диаметра как для отдельных установок, так и для целых производственных линий без необходимости закупки новых единиц оборудования или модернизации существующих. Актуальность данного исследования подтверждается частотой возникновения поломок оборудования и необходимостью обработки пластин нестандартного диаметра.

Известны методы временного соединения фрагментов пластин или пластин малого диаметра с плоской пластиной-носителем с применением двустороннего скотча [7, 8]. В ряде случаев при таком соединении плоскостность расположения обрабатываемого образца бывает недостаточной, возникают сложности при отделении двустороннего скотча, а также появляются проблемы при загрузке в транспортировочные шлюзы автоматизированного оборудования.

Для решения вышеперечисленных проблем в настоящей работе предложен новый подход – применение многофункциональной пластины-шаттла. С применением шаттла могут быть проведены технологические операции (такие как химическая очистка, осаждение металла или диэлектрика, фотолитография, плазмохимическое травление) обработки подложек, имеющих диаметр меньше, чем тот, на который рассчитано стандартное оборудование, без перестройки как его аппаратной, так и программной части. Выполнение последующих технологических операций может быть продолжено на оборудовании для обработки подложек исходного диаметра. Таким образом обеспечивается значительное расширение технологических возможностей, а также претворяется в жизнь объединение различных технологических линеек производственного оборудования, минуя как закупку новых установок, так и модификацию имеющихся.

Апробация пластины-шаттла осуществлена на перспективном технологическом процессе изготовления отверстий для межсоединений в виде TSV структур в тонкой пластине [9]. Для обеспечения создания коротких межсоединений по технологии TSV (Through-silicon via) в нынешнее время для большинства производителей 3D-интегральных схем стало необходимым утонять пластины до толщины 50 мкм или менее, чтобы реализовать все преимущества технологии 3D-интеграции. Однако такие тонкие кремниевые пластины являются чрезвычайно хрупкими. Поэтому для их обработки требуется,

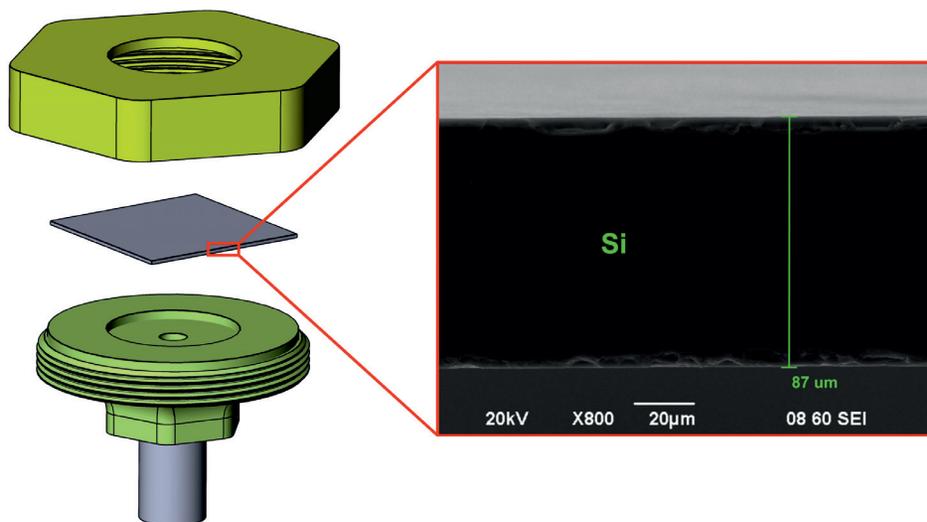


Рис. 1. Устройство оснастки для исследования механических свойств утоненных пластин.

чтобы каждая из них была временно скреплена с другой пластиной, которая позволит обеспечить ее механическую целостность во время выполнения необходимых технологических операций [10].

2. Исследование механической прочности утоненных кремниевых пластин. С целью определения технологических возможностей по обработке ультратонких пластин в Si пластине-шаттле было проведено исследование механической прочности кремния на примере утоненных кремниевых пластин. Утонение проводилось в 2 стадии (грубая и тонкая шлифовка). Пластины с разной остаточной толщиной после утонения поделены на квадратные кристаллы.

Была изготовлена оснастка, удерживающая образец из кремния так, что образуется открытая область воздействия диаметром 38 мм, к которой с обратной прикладывается контролируемое избыточное давление воздуха (рис. 1). Таким образом, анализируется мембрана из кремния круглой формы диаметром 38 мм.

Квадратные кристаллы были поочередно закреплены в новой оснастке. Процесс подачи давления и схема стенда описаны в работах [11–13].

Для расчета механической прочности утоненных пластин была применена формула (2.1) [12]:

$$\sigma = \frac{P \cdot a^2}{h^2} \cdot 0.75 \cdot \sqrt{1 + \mu^2}, \quad (2.1)$$

где σ – механическая прочность, P – избыточное давление, a – радиус мембраны, h – толщина Si, μ – коэффициент Пуассона для Si.

Результаты представлены в таблице, в которой H – толщина кристалла (мкм), P – давление взрыва (атм), σ – механическая прочность (ГПа).

Таблица 1. Параметры 4 типов кремниевых кристаллов и соответствующие предельные давления взрыва

№	H	P	σ
1	87	0.35	1.3
2	94	0.37	1.2
3	125	0.55	1
4	139	0.48	0.7

Согласно результатам расчетов, проведенных на основании экспериментальных данных, механическая прочность материала кремния изменяется в диапазоне от 0.7 до 1.3 ГПа. Наименьшую прочность (0.7 ГПа) имеет фрагмент пластины наибольшей толщины (139 мкм). Данное значение совпадает с результатами исследований механической прочности тонких Si пластин [14]. Для объемного кремния значение механической прочности составляет 7 ГПа [15, 16]. Различие в значениях прочности материала вызвано механическими дефектами, вносимыми в течение операции шлифовки [14]. В настоящее время применяют химико-механическую полировку, дополняя алмазную полировку и шлифовку, для снижения остаточных дефектов [14]. В данной работе исследовался слой Si сразу после операции шлифовки, а в работе [16] авторы исследовали механическую прочность Si из КНИ структуры, сформированной в результате применения термических процессов спекания. При обработке материала выше температуры рекристаллизации начинают зарождаться новые зерна взамен деформированных, что приводит к увеличению прочности [17]. Для дальнейшего определения надежности конструкции Si пластины-шаттла было выбрано значение механической прочности кремния 0.7 ГПа.

Ранее было экспериментально определено, что для протекания жидкостного травителя через отверстия в пластине и вымывания через них остатков растворенного материала необходим диаметр отверстий не менее 3 мм при стандартной толщине Si пластин, имеющих диаметр 150 мм, не более 680 мкм. Часто в микроэлектронике оборудование имеет вакуумный столик, что приводит к перепаду давления до 1 атмосферы. Далее из формулы (2.1) выражена величина h и рассчитана критическая (минимальная) толщина утоненной пластины, которая может быть обработана с сохранением механической целостности в пластине-шаттле с отверстиями диаметром 3 мм на вакуумном столике с перепадом давления в 1 атмосферу (рис. 2). Таким образом, осуществляется возможность обработки тонких Si пластин толщиной не менее 15.78 мкм на оборудовании с вакуумным фиксированием.

3. Расчет надежности конструкции кремниевой пластины-шаттла.

К конструкции пластины-шаттла предъявляют следующие требования. Она должна позволять автоматизированному оборудованию захватывать пластину-шаттл вместе с подложкой или фрагментами пластины и переносить в рабочую камеру установки без корректировки ее стандартных операционных параметров или изменения конструкции. При этом должна сохраняться механическая целостность как обрабатываемого образца, так и пластины-шаттла. Должна обеспечиваться возможность воздействия жидкостных химических реактивов

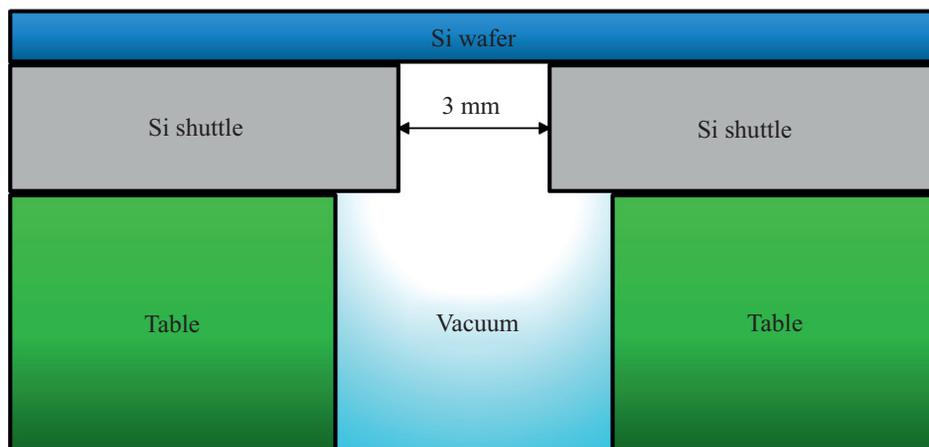


Рис. 2. Схематичное изображение области тонкой кремниевой пластины, размещенной в шаттле с отверстиями диаметром 3 мм на вакуумном столике.

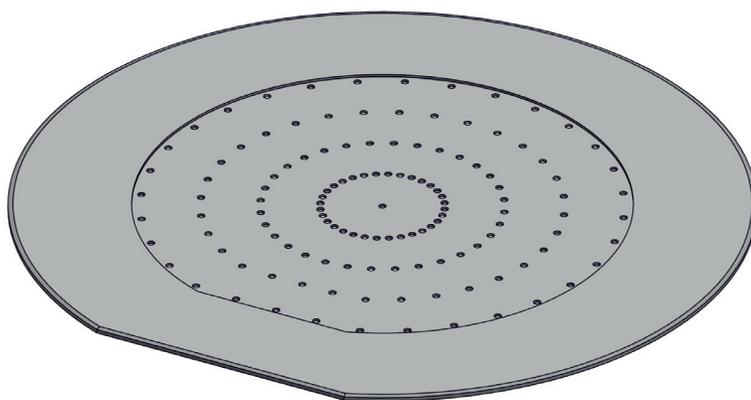


Рис. 3. Шаттл для обработки пластины диаметром 100 мм.

на границу образец/пластина-шаттл. Также необходимо предусмотреть возможность крепления образца к пластине-шаттлу за счет вакуумного столика. Для выполнения вышеперечисленных требований шаттл имеет форму, повторяющую форму стандартной пластины, на обработку которой рассчитано исходное технологическое оборудование. Он включает в себя посадочное место – паз по внутреннему диаметру для размещения в нем обрабатываемой пластины, имеющей диаметр меньше, чем у пластины-шаттла. В области посадочного места выполнено множество сквозных отверстий (рис. 3).

Наличие отверстий позволяет более безопасно проводить технологические операции на установках, в которых при выполнении процесса предусмотрено вакуумное удерживание образца. Дополнительно обеспечивается возможность временной фиксации пластин или их фрагментов в предназначенных для этого пазах с применением адгезива, который после проведения всех

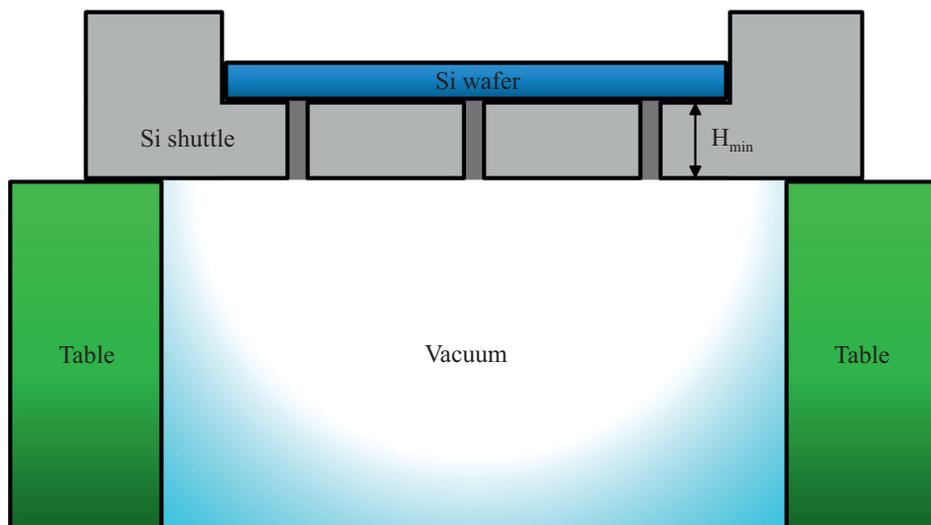


Рис. 4. Схематичное изображение шаттла с обрабатываемой пластиной, размещенного на вакуумном столике с большой площадью присасывания.

необходимых операций обработки может быть растворен жидким травителем, поступающим через отверстия [18].

Рассмотрим критическую ситуацию, когда площадь воздействия вакуума с перепадом давления в 1 атмосферу не меньше площади посадочного места пластины-шаттла (рис. 4). Если пренебречь относительно малым влиянием наличия тонкой пластины и отверстий в посадочном месте, расчет минимальной толщины круглого посадочного места может быть произведен по формуле:

$$H_{\min} = \sqrt{\frac{P_1 \cdot a^2 \cdot 0.75 \cdot \sqrt{1 + \mu^2}}{\sigma}},$$

где P_1 – перепад давления в 1 атм, a – радиус мембраны, μ – коэффициент Пуассона Si, σ – механическая прочность.

Таким образом, рассчитанная минимальная толщина посадочного места с диаметром 100 мм H_{\min} составляет 524 мкм.

Применение шаттла позволяет увеличить жесткость подложки во время выполнения технологических операций ее обработки, что бывает необходимо при работе с тонкими пластинами. Во время транспортировки подложки шаттл обеспечивает ее защиту от механических воздействий.

В случаях, когда подложка трескается или разбивается в процессе работы, ее, как правило, выбрасывают, даже несмотря на то, что на образовавшихся фрагментах может быть достаточно много места для формирования кристаллов с приборами. Применяя шаттл, можно продолжить выполнение технологических операций для фрагментов подложки на собственной технологической линейке.

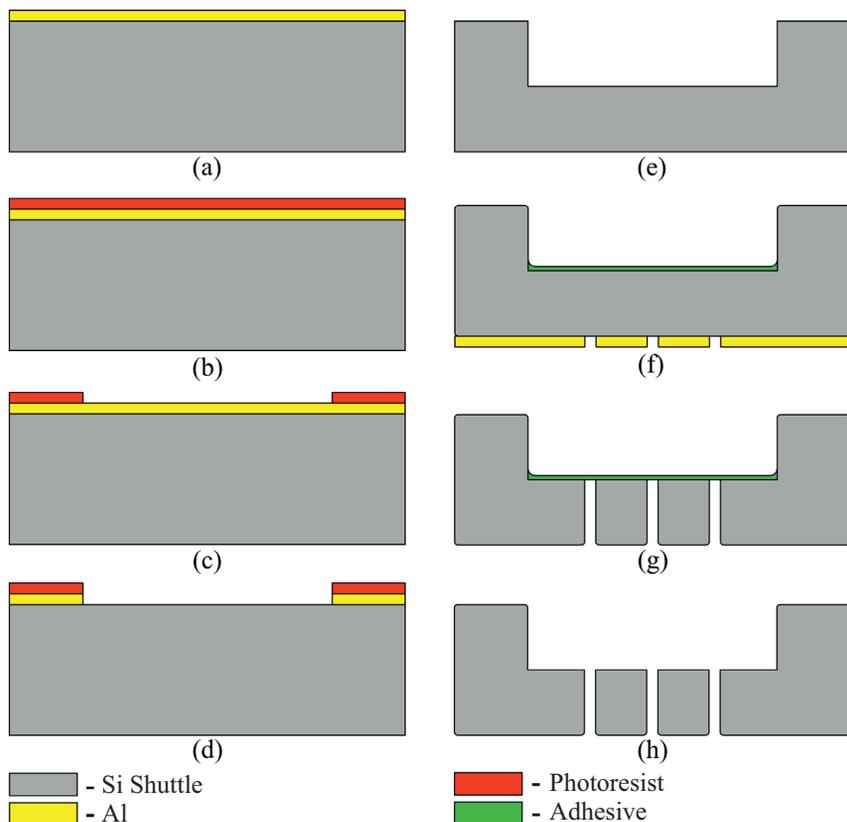


Рис. 5. Технологический маршрут изготовления многоразовой пластины-шаттла.

4. Технология изготовления пластины-шаттла. Технологический маршрут изготовления пластины-шаттла представлен ниже.

Шаттл изготавливается из кремниевой пластины с кристаллографической ориентацией (100). Пластина имеет диаметр 150 мм и толщину 675 ± 15 мкм.

На пластину методом магнетронного напыления наносят слой алюминия толщиной 1100 ± 50 нм (рис. 5a). Затем на пластину наносят слой фоторезиста на центрифуге. Толщина фоторезиста составляет 2.0 ± 0.2 мкм (рис. 5b). Далее проводят операции экспонирования фоторезиста через фотошаблон и проявления. В результате засвеченная область фоторезиста удаляется (рис. 5c). Следующим шагом удаляют слой алюминия в области, не закрытой фоторезистом (рис. 5d).

Перед помещением пластины в камеру для плазмохимического травления удаляют жидкостным методом фоторезист. Наконеч сухим плазмохимическим травлением создают углубление – посадочное место под пластину. Глубина посадочного места выбирается в соответствии с толщиной пластину или их фрагментов, которые будут обрабатываться в шаттле. Маска из алюминия удаляется жидкостным травлением (рис. 5e).

Следующие операции направлены на формирование отверстий в посадочном месте пластины-шаттла. Для этого в локальную область посадочного места наносится адгезив. На обратную сторону пластины-шаттла магнетронным напылением наносят алюминий толщиной 1100 ± 50 нм и на него вторым слоем наносят фоторезист толщиной 2.0 ± 0.2 мкм на центрифуге. Затем экспонируют через второй фотошаблон и проявляют фоторезист, формируя маску. Не закрытый маской алюминий удаляют жидкостным травлением, после чего удаляют слой маски из фоторезиста (рис. 5f).

Сухим плазмохимическим способом травят кремний до стоп-слоя из адгезива. После этого удаляют маску из алюминия. В результате формируются отверстия (рис. 5g). Адгезив может быть удален жидкостным химическим травлением (рис. 5h), что благодаря открытию отверстий обеспечит удерживание рабочей пластины в шаттле вакуумным способом, или может быть оставлен для обеспечения ее клеевой фиксации во время обработки.

В случае применения способа клеевой фиксации обрабатываемой пластины в посадочном месте ее прикрепление может осуществляться термокомпрессионным методом. Для травления клея и отделения пластины от шаттла после проведения необходимых технологических операций ее обработки может быть применен жидкий химический реактив, поступающий через отверстия в посадочном месте.

5. Апробация пластины-шаттла. Одно из применений, демонстрирующих использование шаттла – формирование пригодных для изготовления TSV структур отверстий с высоким аспектным соотношением в тонкой кремниевой пластине. В качестве подложки выбрана утоненная пластина, имеющая диаметр 100 мм и толщину 32 мкм. Без использования пластины-шаттла выполнение технологических операций обработки такой ультратонкой пластины на стандартном оборудовании недопустимо благодаря ее высокой хрупкости, а также по причине несовместимости с автоматизированными загрузчиками пластин, рассчитанными только на работу с подложками стандартных размеров. Для проведения технологических операций обработки этой пластины изготовлен шаттл с глубиной посадочного места 30 мкм. Шаттл имеет сквозные отверстия для вакуумного удержания пластины в посадочном месте.

Ниже представлен технологический маршрут указанного применения пластины-шаттла, который начинается с помещения рабочей пластины (в которой будут формироваться TSV структуры) в посадочное место пластины-шаттла (рис. 6a). Затем наносят слой фоторезиста на центрифуге. Толщина фоторезиста составляет 2.0 ± 0.2 мкм (рис. 6b). После этого проводят операцию экспонирования через фотошаблон и проявления фоторезиста (рис. 6c). После формирования фоторезистивной маски в рабочей пластине травятся отверстия плазмохимическим (Bosch-процесс) способом (рис. 6d). Травление производится на всю глубину рабочей пластины. После формирования отверстий фоторезист удаляется жидкостным методом (рис. 6e).

В результате выполнения приведенного маршрута был сформирован массив TSV структур на пластине $\varnothing 100$ мм. Аспектное соотношение отверстий равно 5/1 (глубина – 32 ± 2 мкм; диаметр – 6.2 ± 1 мкм), рис. 7. Операции фотолитографии и ПХТ рабочей пластины проводились в пластине-шаттле.

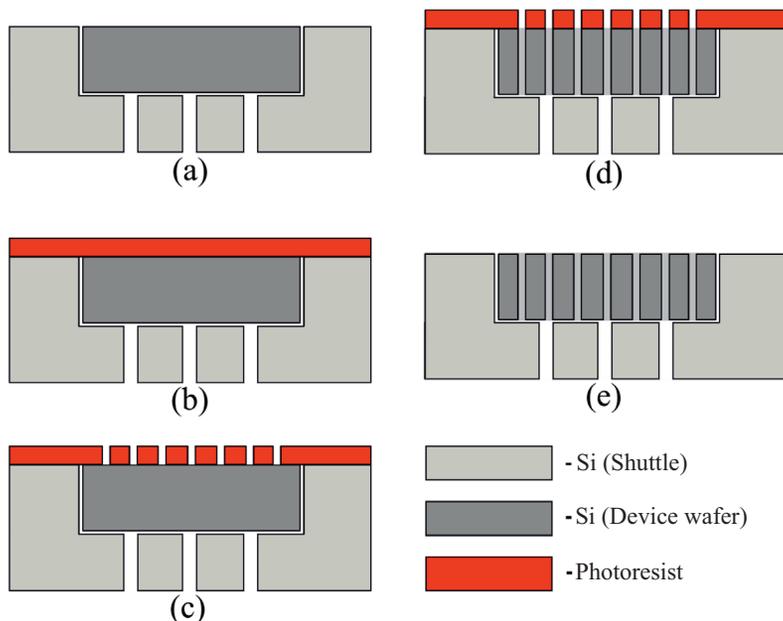


Рис. 6. Технологический маршрут формирования TSV с использованием пластины-шаттла $\varnothing 150$ мм.

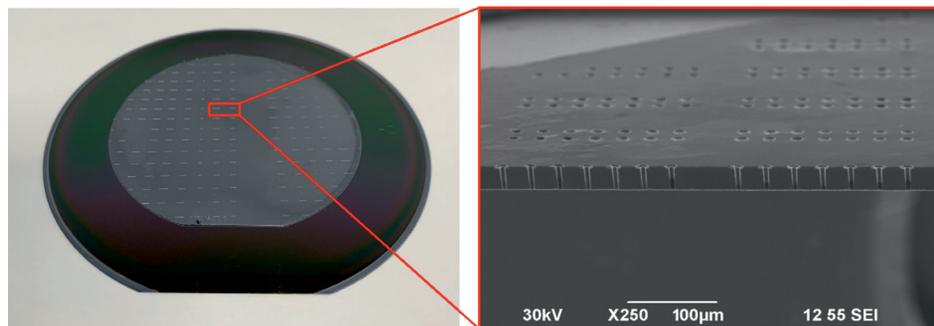


Рис. 7. Пластина-шаттл с ультратонкой рабочей пластиной $\varnothing 100$ мм, в которой сформированы отверстия.

С целью сравнения параметров сформированных отверстий с другими мировыми результатами был проведен анализ статей и научных работ в этой области. Сравнение размеров полученных отверстий с размерами отверстий иных исследователей отображено на рис. 8. Аспектные соотношения сквозных отверстий в массиве данных зарубежных исследователей составляют от 1:2 до 1:36. Структуры, представленные в данной работе, имеют аспектное соотношение около 1:5, что является хорошим размерным параметром отверстий для создания TSV структур с точки зрения компоновки межсоединений.

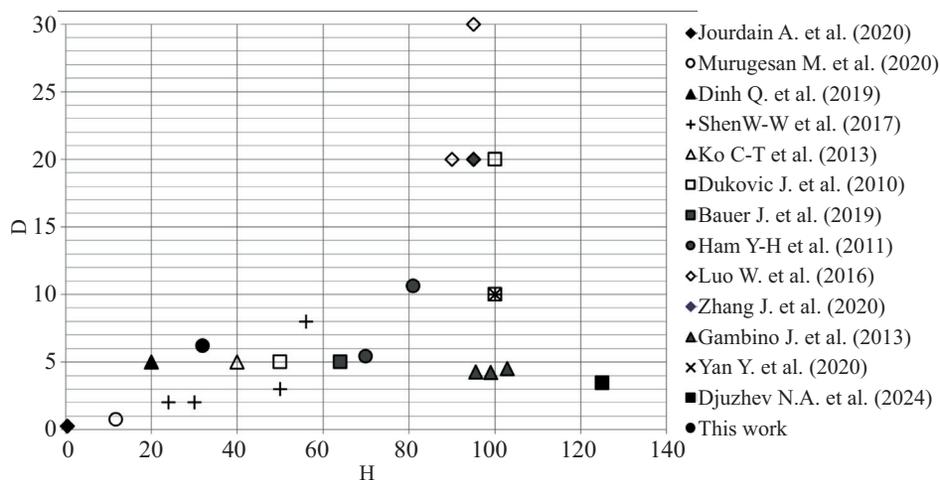


Рис. 8. Сравнение размеров сформированных отверстий с мировыми результатами, где черным кругом показан результат, полученный в этой работе, а другими фигурами – результаты других работ [19–31]. По оси x – H – глубина, измеряемая в мкм, по оси y – D – диаметр, измеряемый в мкм.

6. Заключение. Впервые в России была проведена обработка пластины диаметром 100 мм на автоматизированном оборудовании для пластин 150 мм без его перестройки. Для реализации данной технологии была разработана пластина-шаттл. Разработка позволяет сохранять механическую целостность образцов во время их обработки и транспортировки, обеспечивает возможность бесконтактного жидкостного разделения, а также возможность обработки образца в пластине-шаттле на вакуумном столике. Выбор конструкции пластины-шаттла был сделан на основе результатов исследований механических свойств утоненных кремниевых пластин, проведенных на стенде с применением разработанной оснастки. На основании полученных данных выполнен расчет толщины ультратонкой Si пластины, которая может быть обработана в шаттле на установках с вакуумным столиком без ее повреждения. С помощью шаттла в кремниевой пластине с диаметром 100 мм и толщиной 32 мкм изготовлены сквозные отверстия для TSV структур с аспектным соотношением 1 : 5. Размерные параметры сформированных отверстий близки к другим результатам мирового уровня.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 24-22-00443).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Panfeng J. et al.* High quality and uniformity GaN grown on 150 mm Si substrate using in-situ NH_3 pulse flow cleaning process // *Superlattices Microstruct.* 2017. V. 104. P. 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.02.019>
2. *Musolino M. et al.* Paving the way toward the world's first 200mm SiC pilot line // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2021. V. 135. P. 106088. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106088>

3. *Peter O.H.* The 300 mm silicon wafer – a cost and technology challenge // *Microelectron. Eng.* 2001. V. 56. № 1–2. P. 3–13.
[https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(00\)00499-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(00)00499-8)
4. *Goldstein M., Watanabe M.* 450 mm Silicon Wafers Challenges - Wafer Thickness Scaling // *ECS Transactions*. 2008. V. 16. № 6. P. 3–13.
<https://doi.org/10.1149/1.2980288>
5. *Sotnik L., Hubar A.* Impact of automation and calcs technologies on human factor in production // The 5th International scientific and practical conference “Perspectives of contemporary science: theory and practice”. 2024. P. 243.
6. *D’Addona D. et al.* Adaptive automation and human factors in manufacturing: An experimental assessment for a cognitive approach // *CIRP Annals*. 2018. V. 67. № 1.
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.123>
7. *Shiojima T. et al.* Development of Self-releasing adhesive tape as a temporary bonding material for 3D integration // *IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference*. 2020. P. 75–82.
<https://doi.org/10.1109/ECTC32862.2020.00025>
8. *Sakamoto Y. et al.* A Temporary Bonding De-Bonding Tape with High Thermal Resistance and Excellent TTV for 3DIC // *International Conference on Electronics Packaging*. 2023. P. 39–40.
<https://doi.org/10.23919/ICEP58572.2023.10129768>
9. *Oh S., Zheng T., Bakir M.S.* Electrical Characterization of Shielded TSVs With Airgap Isolation for RF/mmWave Applications // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2024. V. 14. № 2. P. 202–210.
<https://doi.org/10.1109/TCPMT.2024.3358102>
10. *Handbook of wafer bonding* / Ed. *Ramm P., Lu J. Q., Visser Taklo M.* Wiley-VCH Verlag & Co. KgaA, 2012. P. 329.
<https://doi.org/10.1002/9783527644223.ch15>
11. *Lychev S. et al.* Deformations of Single-Crystal Silicon Circular Plate: Theory and Experiment // *Symmetry*. 2024. V. 16. № 2. P. 137.
<https://doi.org/10.3390/sym160201374>
12. *Dyuzhev N.A. et al.* Study of the Effect of Radiation Exposure on Grain Size and Mechanical Properties of Thin-Film Aluminum // *Mechanics of Solids*. 2024. V. 59. P. 20–26.
<https://doi.org/10.1134/S0025654423601040>
13. *Дюжев Н.А. и др.* Особенности влияния ориентации и размера зерен на механические свойства тонкопленочных мембран Al/Mo // *Письма в ЖТФ*. 2024. Т. 50. № 9. С. 10–15.
<https://doi.org/10.61011/PJTf.2024.09.57561.19833>
14. *Kozlov V. et al.* Study of the mechanical strength of thin silicon wafers in the dependance on their surface treatment during thinning // *Tech. Phys. Lett.* 2022. № 9. P. 26.
<https://doi.org/0.21883/TPL.2022.09.55077.19244>
15. *Petersen K.E.* Silicon as a mechanical material // *Proceedings of the IEEE* 1982. V. 70. №. 5. P. 420–457.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12331>
16. *Lychev S. et al.* Deformations of Single-Crystal Silicon Circular Plate: Theory and Experiment // *Symmetry*. 2024. V. 16. № 2. P. 137.
<https://doi.org/10.3390/sym16020137>
17. *Huda Z., Saufi M., Shaifulazuar.* Mechanism of Grain Growth in an Aerospace Aluminum Alloy // *J. Ind. Technol.* 2006. V. 15. № 2. P. 127–136.

18. Многофункциональный подложкодержатель для пластин, используемый при изготовлении монокристаллических интегральных схем: пат. 224497 Рос. Федерация. № 2023122514 / Гусев Е.Э., Иванин П.С., Фомичёв М.Ю., Зольников К.В.; госрегистрация 28.03.24.
19. *Jourdain A., Schleicher A., Vos J.* Extreme Wafer Thinning and nano-TSV processing for 3D Heterogeneous Integration // 70th Electronic Components and Technology Conference. 2020. P. 42.
<https://doi.org/10.1109/ECTC32862.2020.00020>
20. *Murugesan M. et al.* Nano Ni/Cu-TSVs with an Improved Reliability for 3D-IC Integration Application // 31st Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference. 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ASMC49169.2020.9185397>
21. *Dinh Q., Kondo K., Hirato T.* Reduction of TSV Pumping // International 3D Systems Integration Conference. 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/3DIC48104.2019.9058846>
22. *Shen W-W, Chen K-N.* Three-Dimensional Integrated Circuit (3D IC) Key Technology: Through-Silicon Via (TSV) // Nanoscale Research Letters. 2017. V. 12. № 56.
<https://doi.org/10.1186/s11671-017-1831-4>
23. *Ko C.-T., Chen K.-N.* Reliability of key technologies in 3D integration // Microelectron. Reliab. 2013. V. 53. № 1. P. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.08.011>
24. *Dukovic J. et al.* Through-Silicon-Via Technology for 3D Integration // IEEE International Memory Workshop. 2010. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/IMW.2010.5488399>
25. *Bauer J. et al.* Spectroscopic reflectometry for characterization of Through Silicon Via profile of Bosch etching process // J. Vacuum Science & Technology B, 2019. V. 37. № 6.
<https://doi.org/10.1116/1.5120617>
26. *Ham Y.-H., Kim D., Baek K.-H.* Metal/Dielectric Liner Formation by a Simple Solution Process for through Silicon via Interconnection // Electrochem. Solid-State Lett. 2011. V. 15. № 5.
<https://doi.org/10.1149/2.esl113678>
27. *Luo W. et al.* Pretreatment to assure the copper filling in through-silicon vias // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2016. V. 27. № 7. P. 7460–7466.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-4723-y>
28. *Zhang J. et al.* The TSV process in the hybrid pixel detector for the High Energy Photon Source // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2020. V. 980. № 164425.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164425>
29. *Gambino J. et al.* Through-silicon-via Process Control in Manufacturing for SiGe Power Amplifiers // Proc.- Electron. Compon. Technol. Conf. 2013. P. 221.
<https://doi.org/10.1109/ECTC.2013.6575575>
30. *Yan Y. et al.* Investigation of reliability and security of the 3D packaging structure // 21st International Conference on Electronic Packaging Technology. 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICEPT50128.2020.9202416>
31. *Djuzhev N.A. et al.* Technology for Manufacturing TSV Structures for the Creation of Silicon Interposers Using Temporary-Bonding Technology // Nanobiotechnology Reports. 2024. V. 19. № 2. P. 197–207.
<https://doi.org/10.1134/S2635167624600408>

MULTIFUNCTIONAL SHUTTLE FOR PROCESSING SMALL DIAMETER AND ULTRA-THIN SEMICON-DUCTOR WAFERS

N. A. Djuzhev^a, E. E. Gusev^{a, *}, M. Y. Fomichev^a,
P. S. Ivanin^a, I. V. Kushnarev^a, V. A. Bespalov^a

^aNational Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

*E-mail: bubbledouble@mail.ru

In a first for Russia, a 100 mm diameter wafer was processed to create holes for TSV structures using automated equipment designed for 150mm diameter wafers without needing to reconfigure the installations. A shuttle wafer was developed for this purpose. The reliability of the silicon shuttle was determined through experimental studies of the mechanical strength of silicon. The thickness of the ultra-thin Si wafer that can be processed without damage in the shuttle wafer on installations with a vacuum table was calculated based on the data obtained.

Keywords: microassembly, 3D integration, TSV, surface relief, photolithography, DRIE, temporary bonding

REFERENCES

1. *Panfeng J. et al.* High quality and uniformity GaN grown on 150 mm Si substrate using in-situ NH₃ pulse flow cleaning process // *Superlattices Microstruct.* 2017. V. 104. P. 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2017.02.019>
2. *Musolino M. et al.* Paving the way toward the world's first 200mm SiC pilot line // *Mater. Sci. Semicond. Process.* 2021. V. 135. P. 106088. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2021.106088>
3. *Peter O.H.* The 300 mm silicon wafer - a cost and technology challenge // *Microelectron. Eng.* 2001. V. 56. № 1–2. P. 3–13. [https://doi.org/10.1016/S0167-9317\(00\)00499-8](https://doi.org/10.1016/S0167-9317(00)00499-8)
4. *Goldstein M., Watanabe M.* 450 mm Silicon Wafers Challenges – Wafer Thickness Scaling // *ECS Transactions.* 2008. V. 16. № 6. P. 3–13. <https://doi.org/10.1149/1.2980288>
5. *Sotnik L., Hubar A.* Impact of automation and calcs technologies on human factor in production // *The 5th International scientific and practical conference “Perspectives of contemporary science: theory and practice”.* 2024. P. 243.
6. *D'Addona D. et al.* Adaptive automation and human factors in manufacturing: An experimental assessment for a cognitive approach // *CIRP Annals.* 2018. V. 67. № 1. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.123>
7. *Shiojima T. et al.* Development of Self-releasing adhesive tape as a temporary bonding material for 3D integration // *IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference.* 2020. P. 75–82. <https://doi.org/10.1109/ECTC32862.2020.00025>
8. *Sakamoto Y. et al.* A Temporary Bonding De-Bonding Tape with High Thermal Resistance and Excellent TTV for 3DIC // *International Conference on Electronics Packaging.* 2023. P. 39–40. <https://doi.org/10.23919/ICEP58572.2023.10129768>

9. *Oh S., Zheng T., Bakir M.S.* Electrical Characterization of Shielded TSVs With Airgap Isolation for RF/mmWave Applications // *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*. 2024. V. 14. № 2. P. 202–210.
<https://doi.org/10.1109/TCPMT.2024.3358102>
10. *Handbook of wafer bonding* / Ed. *Ramm P., Lu J. Q., Visser Taklo M.* Wiley-VCH Verlag & Co. KgaA, 2012. P. 329.
<https://doi.org/10.1002/9783527644223.ch15>
11. *Lychev S. et al.* Deformations of Single-Crystal Silicon Circular Plate: Theory and Experiment // *Symmetry*. 2024. V. 16. № 2. P. 137.
<https://doi.org/10.3390/sym160201374>
12. *Dyuzhev N.A. et al.* Study of the Effect of Radiation Exposure on Grain Size and Mechanical Properties of Thin-Film Aluminum // *Mechanics of Solids*. 2024. V. 59. P. 20–26.
<https://doi.org/10.1134/S0025654423601040>
13. *Dyuzhev N.A. et al.* Features of influence of grain orientation and size on mechanical properties of Al/Mo thin film membranes // *Tech. Phys. Lett.* 2024. V. 50, № 9. P. 10–15.
<https://doi.org/10.61011/PJTF.2024.09.57561.19833>
14. *Kozlov V. et al.* Study of the mechanical strength of thin silicon wafers in the dependance on their surface treatment during thinning // *Tech. Phys. Lett.* 2022. № 9. P. 26.
<https://doi.org/0.21883/TPL.2022.09.55077.19244>
15. *Petersen K.E.* Silicon as a mechanical material // *Proceedings of the IEEE* 1982. V. 70. № 5. P. 420–457.
<https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12331>
16. *Lychev S. et al.* Deformations of Single-Crystal Silicon Circular Plate: Theory and Experiment // *Symmetry*. 2024. V. 16. № 2. P. 137.
<https://doi.org/10.3390/sym16020137>
17. *Huda Z., Saufi M., Shaifulazuar.* Mechanism of Grain Growth in an Aerospace Aluminum Alloy // *J. Ind. Technol.* 2006. V. 15. № 2. P. 127–136.
18. Multifunctional wafer holder used in monolithic integrated circuit manufacturing: patent 224497 Russian Federation. № 2023122514 / Gusev E.E., Ivanin P.S., Fomichev M.Y., Zolnikov K.V.; state registration 28.03.24.
19. *Jourdain A., Schleicher A., Vos J.* Extreme Wafer Thinning and nano-TSV processing for 3D Heterogeneous Integration // *70th Electronic Components and Technology Conference*. 2020. P. 42.
<https://doi.org/10.1109/ECTC32862.2020.00020>
20. *Murugesan M. et al.* Nano Ni/Cu-TSVs with an Improved Reliability for 3D-IC Integration Application // *31st Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference*. 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ASMC49169.2020.9185397>
21. *Dinh Q., Kondo K., Hirato T.* Reduction of TSV Pumping // *International 3D Systems Integration Conference*. 2019. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/3DIC48104.2019.9058846>
22. *Shen W.-W., Chen K.-N.* Three-Dimensional Integrated Circuit (3D IC) Key Technology: Through-Silicon Via (TSV) // *Nanoscale Research Letters*. 2017. V. 12. № 56.
<https://doi.org/10.1186/s11671-017-1831-4>
23. *Ko C.-T., Chen K.-N.* Reliability of key technologies in 3D integration // *Microelectron. Reliab.* 2013. V. 53. № 1. P. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2012.08.011>

-
24. *Dukovic J. et al.* Through-Silicon-Via Technology for 3D Integration // IEEE International Memory Workshop. 2010. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/IMW.2010.5488399>
 25. *Bauer J. et al.* Spectroscopic reflectometry for characterization of Through Silicon Via profile of Bosch etching process // J. Vacuum Science & Technology B, 2019. V. 37. № 6.
<https://doi.org/10.1116/1.5120617>
 26. *Ham Y.-H., Kim D., Baek K.-H.* Metal/Dielectric Liner Formation by a Simple Solution Process for through Silicon via Interconnection // Electrochem. Solid-State Lett. 2011. V. 15. № 5.
<https://doi.org/10.1149/2.esl113678>
 27. *Luo W. et al.* Pretreatment to assure the copper filling in through-silicon vias // J. Mater. Sci.: Mater. Electron. 2016. V. 27. № 7. P. 7460–7466.
<https://doi.org/10.1007/s10854-016-4723-y>
 28. *Zhang J. et al.* The TSV process in the hybrid pixel detector for the High Energy Photon Source // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 2020. V. 980. № 164425.
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164425>
 29. *Gambino J. et al.* Through-silicon-via Process Control in Manufacturing for SiGe Power Amplifiers // Proc.- Electron. Compon. Technol. Conf. 2013. P. 221.
<https://doi.org/10.1109/ECTC.2013.6575575>
 30. *Yan Y. et al.* Investigation of reliability and security of the 3D packaging structure // 21st International Conference on Electronic Packaging Technology. 2020. P. 1.
<https://doi.org/10.1109/ICEPT50128.2020.9202416>
 31. *Djuzhev N.A. et al.* Technology for Manufacturing TSV Structures for the Creation of Silicon Interposers Using Temporary-Bonding Technology // Nanobiotechnology Reports. 2024. V. 19. № 2. P. 197–207.
<https://doi.org/10.1134/S2635167624600408>