



НАНОСТРУКТУРЫ

математическая физика и моделирование



НАНОСТРУКТУРЫ

математическая физика и моделирование

Nanostructures.
Mathematical Physics & Modelling

2022, volume 22(1)

Наноструктуры. Математическая физика и моделирование

Редколлегия:

**В.А. Аветисов, А.А. Белолипецкий И.В. Волович,
В.В. Гусаров, П.Н. Дьячков, Р.Г. Ефремов, Ю.Е. Лозовик,
М.А. Мазо, В.П. Маслов (главный редактор),
А.В. Махиборода (ответственный секретарь), А.Ю. Морозов,
С.А. Никитов, Г.Э. Норман, Р.А. Сурис, В.А. Тулин, Ю.А. Флёров,
А.С. Холево, А.Р. Хохлов, А.В. Чаплик,
Л.А. Чернозатонский, К.В. Шайтан**

Электронная версия журнала размещается на сайте
<http://nano-journal.ru>

Адрес редакции:

123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34, каб. 429
+7 (495) 916-88-76
nanostructures@hse.ru

Москва

© 2022, ООО Сенсор Микрон

Содержание

В.Ф. Дегтярев, А.П. Жилинский Перестройка резонансных уровней прозрачности при образовании квантово-размерной цепочки	5
В.А. Беспалов, М.Ю. Фомичёв, Н.А. Дюжев., М.А. Махиборода, Е.Э. Гусев TSV — Ключевая технология для построения трехмерных интегральных схем	19
В.А. Беспалов, П.С. Иванов, Н.А. Дюжев, М.А. Махиборода, Е.Э. Гусев Обзор методов герметизации при помощи технологии термокомпрессионного бондинга полупроводниковых пластин	45
И.А. Лазичный Изучение распределения плотности кинетической энергии в областях со сложной геометрией (однородная и блочная среды)	81
Информация и правила для авторов	89

Contents

V.F. Degtiarev, A.P. Zhilinsky Restructuring of resonant transparency levels during the formation of a quantum-dimensional chain	5
V.A. Bespalov, M.Y. Fomichev, N.A. Djuzhev, M.A. Makhaboroda, E.E. Gusev TSV — the key technology for creating three-dimensional integrated circuits (3D ICs)	19
V.A. Bespalov, P. S. Ivanin, N. A. Djuzhev, M. A. Makhaboroda, E. E. Gusev Review of sealing methods using thermal compression bonding technology of semiconductor wafers	45
I.A. Lazichny Study of kinetic energy density distribution in areas with complex geometry (homogeneous and block media)	81
The information and rules for authors	89

ПЕРЕСТРОЙКА РЕЗОНАНСНЫХ УРОВНЕЙ ПРОЗРАЧНОСТИ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ КВАНТОВО-РАЗМЕРНОЙ ЦЕПОЧКИ

В.Ф. Дегтярев¹, А.П. Жилинский²

*Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Авиамоторная ул., 8а;
E-mail: ¹vfsteel2008@gmail.com, ²zhilinsk@yandex.ru*

Поступила 18.02.2022

Исследован процесс перестройки резонансных туннельных уровней при образовании слоистой квантово-размерной структуры. Для частиц с энергией, равной энергии уровней, прозрачность структуры равна единице. Установлено, что с увеличением числа звеньев происходит расщепление этих уровней на близкие подуровни и изменение волновой функции. Определены энергии этих подуровней и волновые функции. Предложены схемы и рассмотрен механизм перестройки уровней в цепочке. В основе этого механизма лежат представления о точках смены фаз колебаний осцилляторов при образовании цепи. Установлено, что параметры этих подуровней (энергия, волновая функция) зависят от параметров барьеров, ям и числа ячеек в цепочке. Рассмотрена модель, позволяющая определить характеристики этих подуровней, в частности их энергию и волновые функции. Исследована зависимость волновой функции и параметров уровней от характеристик цепочки. Рассмотрены два случая, когда $E < U$ и когда $E > U$.

Ключевые слова: квантовая механика, квантовый барьер, волновая функция, прозрачность, наноэлектроника, резонансное туннелирование.

УДК 537.9

DOI: 10.31145/2224-8412-2022-22-1-5-18

Введение

В современных наноэлектронных приборах (резонансных туннельных диодах и транзисторах и др.) активная область имеет размеры порядка нескольких нанометров. Эта величина сравнима с длиной волны электрона и межатомным расстоянием типичных полупроводников, что приводит к существенному влиянию квантово-размерных эффектов на их работу. Среди этих эффектов значительную роль играют резонансные явления при туннелировании.

Резонансное туннелирование в сверхрешетках представляет собой новое быстро развивающееся направление исследований в наноэлектронике. Описанию свойств сверхрешеток посвящен ряд обзоров, например [1-3]. В этих работах достаточно подробно рассмотрена их энергетическая структура, оптические и электрические свойства. Следует ожидать, что роль квантово-размерных эффектов с увеличением размеров сверхрешетки будет возрастать, определяя их основные свойства.

Размерное квантование приводит к значительной перестройке энергетического спектра наноструктур [4,5]. При этом в квантово-размерной цепочке возникают новые резонансные уровни, приводя к существенному изменению их электрических и оптических свойств.

В данной работе изучен процесс перестройки этих уровней при увеличении числа квантово-размерных ячеек, образующих структуру. Рассмотрены два случая, когда энергия частицы меньше, и больше высоты барьера.

Методика моделирования

В настоящей работе нахождение волновых функций и коэффициентов прозрачности системы барьеров проводилось путем непосредственного решения уравнения Шредингера для заданного потенциала с соответствующими граничными условиями в системе компьютерной алгебры MAPLE. Была рассмотрена цепочка ям и барьеров с параметрами: ширина барьера (a) — 1 нм, его высота (U) — 2 эВ, ширина ямы (b) — 1 нм, период (d)—2 нм. Амплитуда падающей волны принималась равной единице ($\Psi_{in}(x) = e^{ikx}$). В работе исследовалась зависимость прозрачности структуры от энергии частицы. По зависимости $T(E)$ (T — коэффициент прозрачности цепочки) определялось положение максимума пика (E_0), его энергетическая ширина ΔE_{05} на половине высоты и добротность. Отметим, что результаты, полученные в данной работе, а также развитая методика, могут быть применены и к слоистым структурам другой природы [6].

Резонансное прохождение частиц через элементарную ячейку

Элементарной ячейкой в рассматриваемой системе является двойная квантово-барьерная структура (ДКБС), показанная на рис. 1А. Пусть энергия частицы меньше высоты барьера. В этом случае при определенных значениях энергии наблюдается резонансное туннелирование частиц. Соответствующие значения энергии и волновые функции показаны на рис. 1А. Основные результаты компьютерного моделирования показывают следующее.

Как известно [4], резонансное туннелирование наблюдается при выполнении условия

$$\frac{1}{2}\left(\eta - \frac{1}{\eta}\right) = \text{cth}(\beta a) \text{ctg}(Kb), \text{ где } \eta = \frac{K}{\beta}, K = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} E}, \beta = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (U - E)} \quad (1)$$

где a — ширина барьера, b — ширина ямы, E — энергия частицы (эВ), U — высота барьера (эВ).

В данных условиях в квантовой яме (КЯ) образуются три локальных уровня. Их энергетическое положение, согласно результатам моделирования, следующее: $E_{01} = 0.228949$ эВ, $E_{02} = 0.887202$ эВ и $E_{03} = 1.818140$ эВ. Поскольку речь идет о резонансных уровнях их энергию при моделировании необходимо определять с высокой точностью. Прозрачность ДКБС при прохождении частиц с такой энергией равна единице. На кривых прозрачности (рис. 1Б) этим уровням соответствуют узкие резонансные линии 1, 2, 3.

Рассмотрим случай $E > U$. Кривая прозрачности для этого случая показана на рис. 1Б (область $E > 2$ эВ). При этом вместо отдельных пиков наблюдаются широкие полосы. Ограничим рассмотрение только уровнем с энергией 2.37 эВ. Этот уровень является наиболее близким к барьеру и взаимодействует с ним более сильно. Как показано на рис. 1Б (см. вставку к рисунку) этот пик представляет собой суперпозицию двух уровней с энергиями 2.371 эВ и 2.376 эВ. Волновые функции, соответствующие этим уровням, показаны на рис. 2 А и 2Б.

Из рисунка 2А видно, что при энергии частицы 2.371 эВ между барьерами образуется стоячая волна. Вне этой системы частица движется свободно. Это говорит о достаточно сильном взаимодействии частицы с барьером. Поэтому при рассмотрении цепочки будет рассмотрено расщепление именно этого уровня.

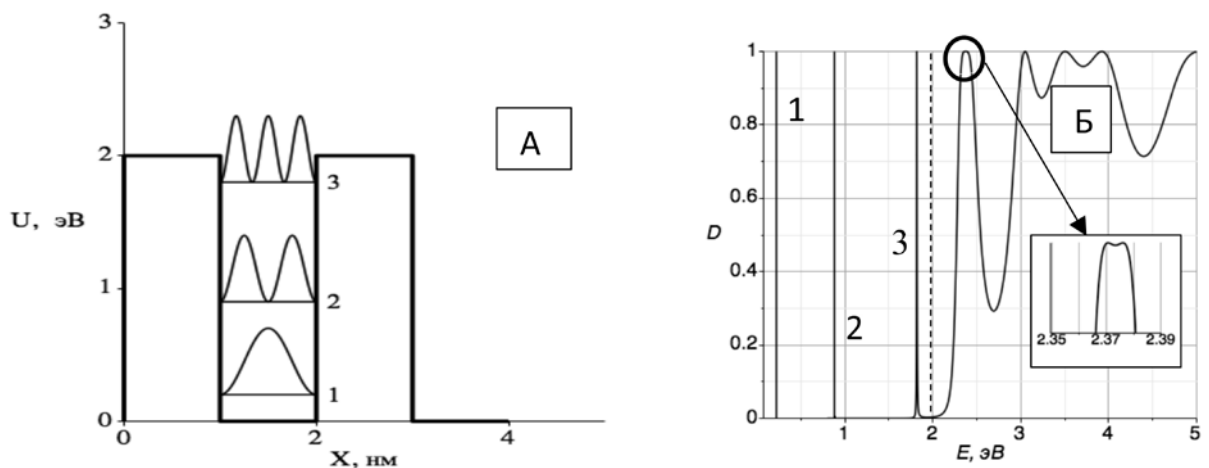


Рис. 1. А. Схема элементарного звена цепочки и волновые функции в случае: 1 — на ширине ямы укладывается одна полуволна, 2 — две полуволны, 3 — три полуволны. Б. Спектр прозрачности элементарного звена. Пунктир — высота барьера (2 эВ).

В случае, когда $E=2.376$ эВ, между барьерами стоячая волна не образуется и в этом промежутке частица движется свободно. Такое движение можно рассматривать как движение над системой невзаимодействующих изолированных барьеров. Это подтверждается также сходством волновых функций и равенством энергии прозрачности этого уровня и одиночного барьера.

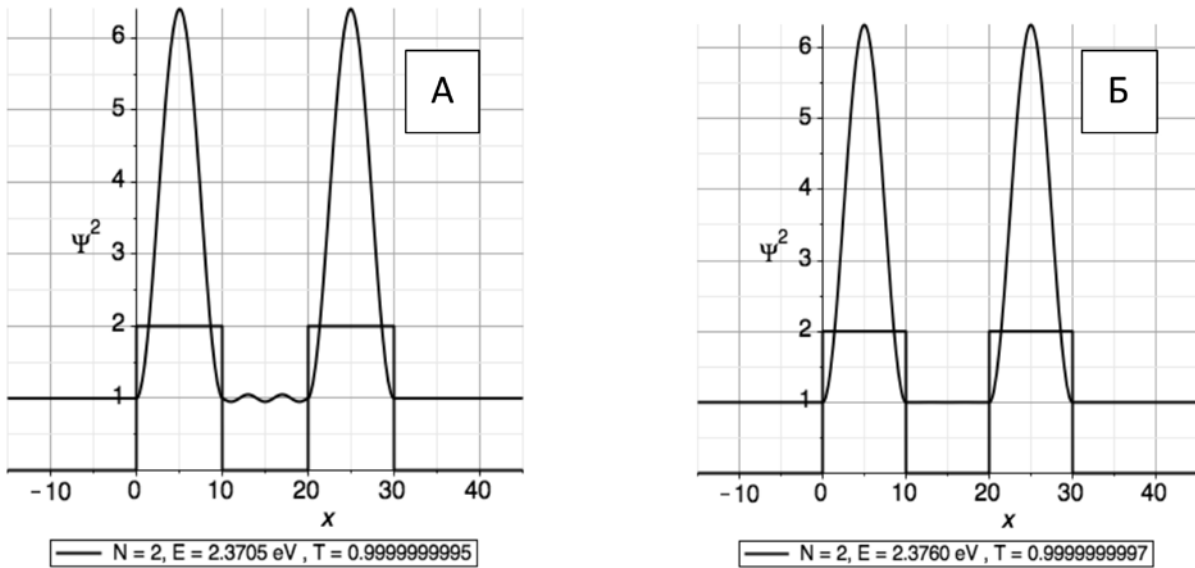


Рис. 2. Квадраты модуля волновых функций, соответствующих уровням $E=2.3705$ эВ (А) и $E=2.376$ эВ (Б).

Расчеты прозрачности для симметричной двухбарьерной структуры для случая $E > U$ приведены, например, в [4]. Прозрачность при этом описывается соотношением,

$$D = \left\{ 1 + \frac{(K^2 - K_2^2)^2 \sin^2(K_2 a)}{4K^2 K_2^2} R \right\}^{-1}, \quad \text{где} \quad K = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} E}, \quad K_2 = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - U)}, \quad (2)$$

$$R = \frac{[(K^2 + K_2^2) \sin(K_2 a) \sin(Kb) - 2KK_2 \cos(K_2 a) \cos(Kb)]^2}{K^2 K_2^2} \quad (3)$$

В соответствии с этими соотношениями при $\sin(K_2 a)$ или $R=0$ коэффициент прозрачности будет равен единице. Заметим, что при $R=1$ выражение (2) совпадает с коэффициентом прозрачности для одиночного барьера.

При $\sin(K_2 a) = 0$ коэффициент прозрачности равен единице и не зависит от параметров структуры. В этом случае не возникает отраженных волн ни от первого, ни от второго барьера. Эта ситуация проиллюстрирована на рис. 2Б. При этом между барьерами концентрация частиц равна концентрации частиц с данной энергией, испускаемых источником. Следовательно, частицы в этом случае накапливаются только в области барьеров и поэтому про-

хождение частиц через систему барьеров подобно прохождению через систему одиночных не взаимодействующих между собой барьеров.

При $R=0$ коэффициент прохождения над каждым барьером по отдельности не равен единице. В этом случае происходит частичное отражение потока от барьеров и между барьерами образуется стоячая волна (рис.2А). При этом за счет накопления частиц в области между барьерами полный поток частиц, прошедших второй барьер будет равен потоку частиц, испускаемых источником, и будет подавлено отражение частиц, налетающих на первый барьер. Коэффициент прозрачности системы из двух барьеров будет равным единице. Однако за счет образования стоячей волны барьеры будут взаимодействовать между собой.

Таким образом, систему уровней прозрачности, образующихся при надбарьерном движении частицы (при $E > U$) можно разбить на два типа. В первом случае происходит достаточно сильное взаимодействие частиц с барьерами. При этом происходит расщепление уровней на подуровни. Во втором случае движение частицы подобно движению над системой отдельных изолированных друг от друга барьеров. Трансформацию этих уровней при образовании цепочки можно рассматривать по отдельности независимо друг от друга.

Расщепление резонансных уровней на подуровни при увеличении числа звеньев

С увеличением числа звеньев в цепи резонансные уровни расщепляются на подуровни, число которых равно числу звеньев в системе (числу степеней свободы). Такое поведение РТУ представляется естественным, если считать систему до образования цепочки N -кратно вырожденной. Образование цепочки приводит к снятию вырождения и возникновению подуровней.

Некоторые особенности расщепления уровней в ДКБС рассмотрены в работах [4,5,7]. В [4,7] определены значения энергии этих подуровней и соответствующие им волновые функции. Было установлено, что прозрачность цепочки для этих значений энергии равна единице.

В настоящем разделе рассмотрен процесс расщепления исходных резонансных уровней при увеличении числа звеньев в цепи. Представляет интерес исследовать два случая, когда 1) $E < U$ и когда 2) $E > U$. Схемы расщепления уровней в этих случаях приведены на рис. 3 и 4.

Сходство схем на рис. 3 и 4 говорит о подобии процессов расщепления в этих случаях. При образовании цепочки происходит взаимодействие осцилляторов в отдельных звеньях. При этом возникающая волновая функция является суперпозицией волновых функций в ячейках [4,9]. Заметим, что здесь речь идет именно о самой волновой функции, а не о квадрате ее модуля. Рассмотрим для определенности первый энергетический уровень (уровень $E=0.228949$ эВ на рис. 1). В этом случае на ширине ямы при резонансе укладывается одна полуволна. Пусть теперь к данному звену присоединили второе.

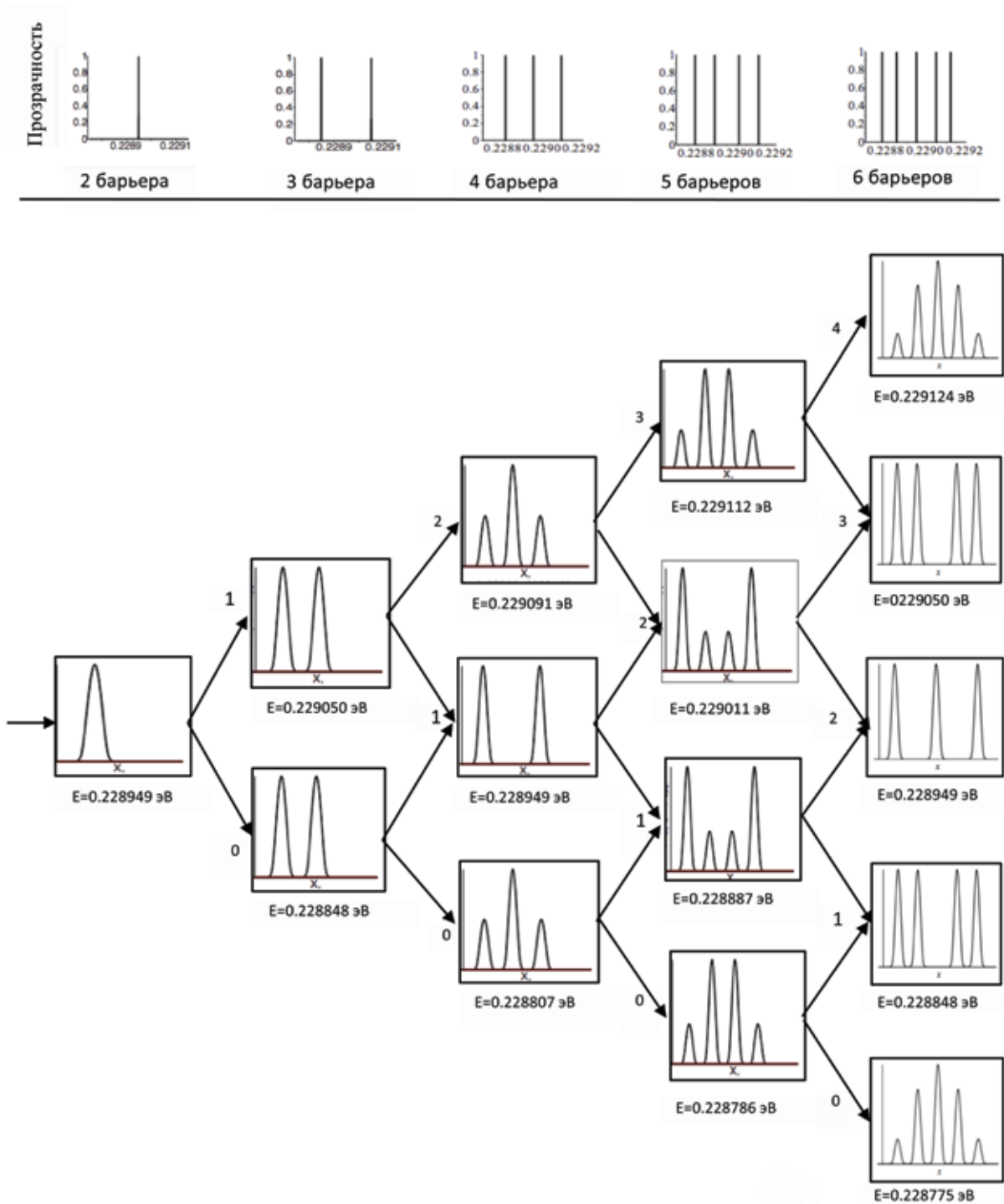


Рис. 3. Схема расщепления первого уровня прозрачности в простой цепочке (в квадратах показаны квадраты модуля соответствующих волновых функций).

Цифры возле стрелочек показывают число точек смены фаз колебаний для каждой конфигурации волновой функции.

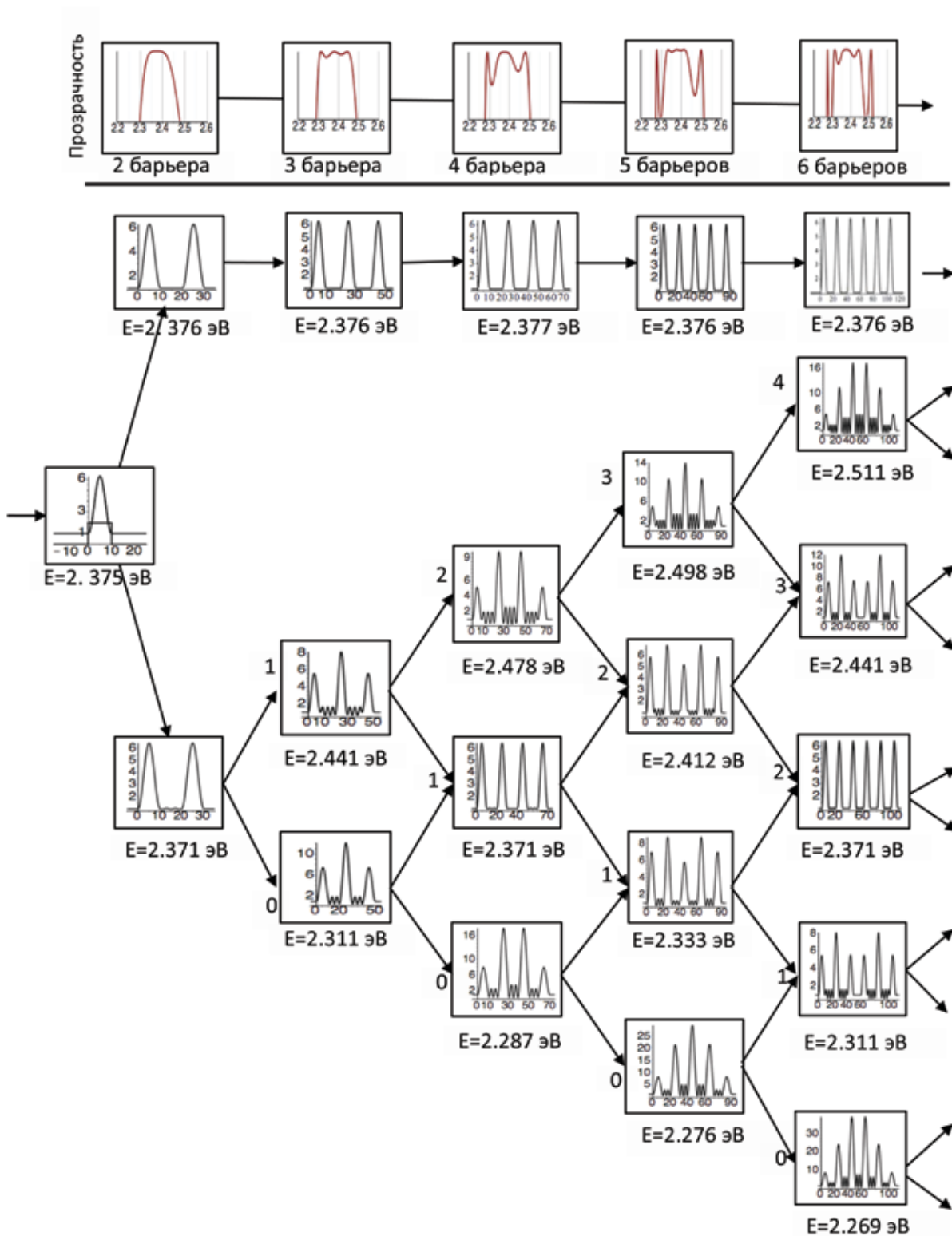


Рис. 4. Схема расщепления уровней при $E > U$ в процессе образования цепочки.

Цифрами возле стрелочек обозначено число точек смены фаз колебаний.

В результате взаимодействия осцилляторов в звеньях образуется новая волновая функция, которая описывает колебания, происходящие в первой и второй ячейках. Если в результате взаимодействия осцилляторов колебания в обеих полу волнах происходят в одной фазе, то энергия колебаний уменьшается. Если колебания происходят в противоположных фазах, то энергия колебаний увеличивается [4,10-12]. Таким колебаниям соответствует симметричная и антисимметричная волновая функция [4,10]. В результате исходный уровень расщепляется на два. Если при этом воспользоваться аналогией с механическими колебаниями грузиков на пружинках, то в точках смены направлений колебаний пружины растянуты сильнее, что увеличивает энергию колебаний и, следовательно, энергию подуровня. При этом уменьшение энергии первого подуровня компенсируется увеличением энергии второго, что обеспечивает выполнение закона сохранения энергии. Следует отметить, что аналогичным образом изменяется частота колебаний и в связанных электрических контурах [11,12].

При увеличении числа звеньев взаимодействие осцилляторов в соседних ячейках происходит аналогичным образом. Схема расщепления уровней при увеличении числа звеньев показана на рис. 3 и 4. При этом число точек смены фаз колебаний (число узлов волновой функции, число мод колебаний) может изменяться от 0 до максимального значения $N-1$, где N -число звеньев в цепи. Число подуровней будет равно числу звеньев в цепочке. Подуровень, который соответствует колебаниям, происходящим синфазно, обладает наименьшей энергией. С появлением точек смены фаз энергия подуровня возрастает пропорционально числу этих точек. Следует отметить, что положение точек смены фаз не влияет на энергию подуровней. С увеличением длины цепочки энергетическое расстояние между подуровнями уменьшается, что связано с ослаблением взаимодействия между звеньями.

Пусть теперь $E > U$. В этом случае в элементарном звене, содержащем два барьера, образуются два подуровня с энергиями 2.371 эВ и 2.376 эВ. Второй из этих уровней (рис.2Б) имеет волновую функцию, характерную для не взаимодействующих барьеров, и наблюдается в цепочке с любым их числом (рис. 4). Энергия этих уровней и вероятность нахождения частицы в этих состояниях не зависят от числа звеньев в цепи. Первый уровень (с энергией 2.371эВ) образуется только в системах с четным числом барьеров. Это обусловлено тем обстоятельством, что для образования подобных комплексов необходимы два барьера. Для уровня 2.376 эВ в этом нет необходимости. При увеличении числа звеньев происходит расщепление уровней. Схема трансформации уровней показана на рис. 4. При этом заданному числу барьеров соответствует такое же число уровней и число главных максимумов в серии. Между главными максимумами располагаются побочные максимумы, обусловленные наличием стоячей волны между барьерами. При этом представ-

ления о смене фаз колебаний при образовании цепочки оказываются полезными для определения характера расщепления и вида волновых функций.

Для описания расщепления уровней воспользуемся уравнением Шредингера для цепочки

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + U\right)\Psi(x) = E\Psi(x), \text{ где } U \text{ — потенциальная энергия} \quad (4)$$

Так как цепочка состоит из одинаковых звеньев, то U и Ψ — периодические функции. Поскольку размеры цепочки ограничены, то необходимо учесть граничные условия, которые можно записать в виде:

$$\Psi(0) = 0 \quad \text{и} \quad \Psi(x_{N+1}) = 0 \quad (5)$$

Искомую функцию $\Psi(x)$ можно записать в следующем виде $\Psi(x) = \sum_n C_n \Psi_n^0(x)$, где $\Psi_n^0(x)$ — волновая функция электрона в отдельной ячейке. Учитывая взаимодействие электрона только с ближайшими соседями [8-10], получим уравнение, описывающее поведение электрона в n -ой ячейке

$$(E_m - E_{0m})C_n = -A_m C_{n-1} - A_m C_{n+1} \quad (6)$$

Здесь для уровня с номером m ($m=1, 2, 3$ на рис. 1) $-A_m = -H_{n,m} = \int \Psi_n^* H \Psi_m dx$ и энергия исходного уровня составляет E_{0m} . Поскольку размеры цепочки ограничены, то происходит отражение волн от передней и задней границы и образуется стоячая волна. Поэтому искать решение уравнения (6) следует в виде

$$C_n = (\alpha \exp(ikx) + \beta \exp(-ikx)) \quad (7)$$

Значения коэффициентов α и β определяются из граничных условий. Подставляя выражение (7) в (6), после преобразований получаем

$$E_m = E_{0m} - 2A_m \cos(kd) \quad (8)$$

Это соотношение дает связь между энергией электрона и его волновым числом.

Используя граничные условия (5), получим

$$\begin{cases} \alpha + \beta = 0 \\ \alpha \exp(ik(N+1)d) + \beta \exp(-ik(N+1)d) = 0. \end{cases}$$

Отсюда $\exp(ik(N+1)d) - \exp(-ik(N+1)d) = 0$.

Или

$$\sin(k(N+1)d) = 0 \quad (9)$$

В цепочке, содержащей N ям, существует N возможных решений, соответствующих определенным модам колебаний. Этим модам (j — номер моды колебаний) соответствуют значения волнового числа

$$k_j = \frac{\pi j}{(N+1)d}, \quad \text{где } j=1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

Подставляя (10) в (8), получаем для энергии подуровней следующее соотношение

$$E_{mj} = E_{0m} - 2A_m \cos\left(\frac{\pi j}{N+1}\right), \quad \text{где } j=1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

Проведенное рассмотрение приводит к зонному характеру распределения состояний по энергии и позволяет найти энергетический спектр частиц в зависимости от количества звеньев в цепи [9].

В случае $E > U$ расчет выполняется аналогично, но необходимо учесть, что частицы локализуются в области барьеров, и число барьеров на единицу больше, чем число ям. Соответствующий расчет приводит к соотношению

$$E_{mj} = E_{0m} - 2A_m \cos\left(\frac{\pi j}{M}\right), \quad \text{где } j=1, 2, \dots, M-1 \text{ и } M \text{ — число барьеров.} \quad (12)$$

При расчете числа подуровней следует помнить, что имеется еще один подуровень (в нашем случае это $E=2.376$ эВ), который не расщепляется на подуровни. Таким образом в сверхрешетке, содержащей M барьеров образуется M подуровней.

Перестройка волновых функций при образовании цепочки

При образовании слоистой квантово-размерной структуры существенные изменения испытывают не только энергетические уровни, но и волновые функции. Волновые функции для $E < U$ и $E > U$ приведены на рис. 5.

Пусть $E < U$. Для определенности рассмотрим волновые функции, соответствующие первому уровню (рис. 1, $E=0.228949$ эВ) в цепочке, содержащей шесть барьеров. Волновые функции, соответствующие первым трем модам, показаны на рис. 5А. Здесь рис. 5А-1 соответствует первой моде колебаний, а рис. 5А-2 — второй, рис. 5А-3 — третьей моде колебаний.

В элементарном звене квадрат модуля волновой функции имеет характерный колоколообразный вид (рис. 1А, кривая 1). При образовании цепочки волновая функции приобретает сложный вид. Конфигурация волновой функции при этом в значительной степени определяется структурой цепочки.

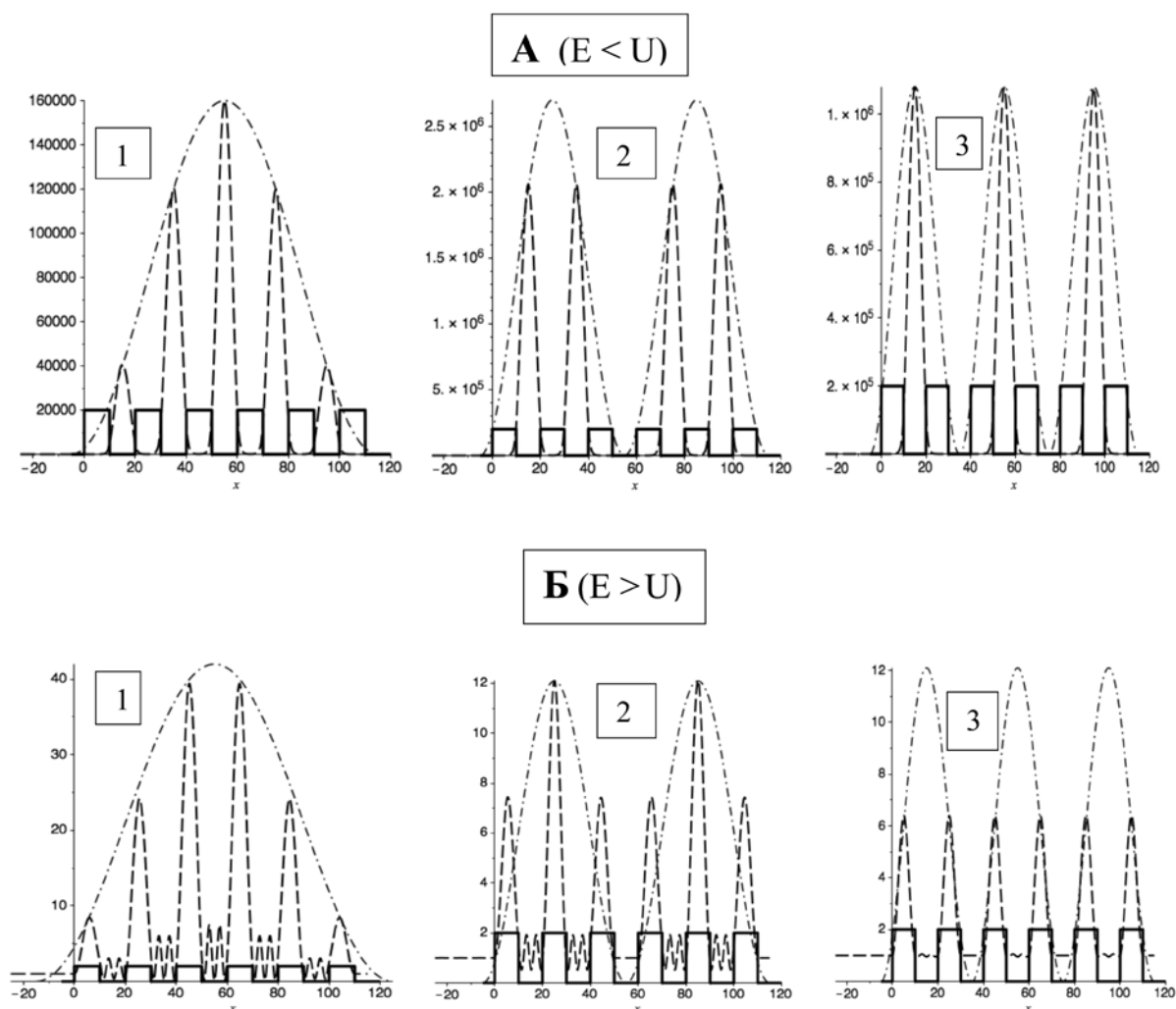


Рис. 5. Квадраты модуля волновых функций частиц в цепочке, содержащей шесть барьеров.

А — энергия частицы меньше высоты барьера;

Б — энергия частицы больше высоты барьера.

1 — первая мода; 2 — вторая мода; 3 — третья мода

Существенную роль при этом играют развитые в предыдущем разделе представления о точках смены фаз колебаний. Число мод колебаний определяется числом ячеек. Наименьшую энергию имеют колебания, соответствующие первой моде, когда на длине цепочки укладывается одна полуволна ($E=0.228786$ эВ). Колебания осцилляторов здесь во всех звеньях происходят

в одной фазе (точки смены фаз отсутствуют (рис. 5А-1)). Для второй моды колебаний на длине цепочки укладывается две полуволны (рис. 5А-2). Такой конфигурации соответствует одна точка смены фаз колебаний (один узел) и энергия уровня $E=0.228887$ эВ.

Отметим следующую особенность. В случае $E < U$ частицы локализованы в потенциальных ямах. Так как число ям на единицу меньше числа барьеров, то и число пиков волновой функции соответственно на единицу меньше. При этом, если положение точки смены фаз совпадает с ямой, то соответствующий пик волновой функции не возникает и общее число пиков уменьшается. С увеличением номера моды такая ситуация может повторяться (рис. 5 А-2,3)

Рассмотренная ситуация сохраняется и для последующих мод колебаний. Здесь также росту номера моды соответствует увеличение числа точек смены фаз и увеличение энергии подуровней. Заметим, что энергия подуровней не зависит от места положения точек смены фаз колебаний.

В случае $E > U$ перестройка волновых функций носит более сложный характер. В этом случае частицы локализуются, главным образом, в области барьеров (рис. 5Б), где их кинетическая энергия достаточно мала. Понятие о точках смены фаз колебаний (об узлах волновой функции) оказывается полезным и в этом случае. Здесь также с увеличением номера моды растет энергия подуровней.

Имеется, однако, и ряд особенностей по сравнению со случаем $E < U$.

1) Число пиков волновой функции равно числу барьеров. Их количество определяется только числом барьеров и не зависит от номера моды.

2) В случае совпадения узла волновой функции с барьером соответствующий пик не исчезает. Уменьшается лишь его высота.

3) Из всей совокупности подуровней можно выделить один (в данном случае это уровень $E=2.376$ эВ), который не расщепляется на подуровни. Соответствующая волновая представляет собой систему волновых функций одиночного прямоугольного барьера рис. 2 Б). Число пиков при этом равно числу барьеров (рис. 4).

Обращает на себя внимание симметричный вид волновых функций относительно середины цепочки. Именно такой вид волновой функции обеспечивает, по нашему мнению, равенство потоков частиц слева направо и справа налево, что и приводит к высокой прозрачности цепочки. Следует отметить также, что волновые функции m -ой и $(N+1-m)$ -ой мод имеют совершенно одинаковый вид.

Действительно из (4) и (6) вытекает, что вероятность обнаружить частицу в ячейке с номером n можно представить в виде

$$\Psi^2 = a \cdot \sin^2(kx_n) = a \sin^2\left(\frac{\pi j n}{N+1}\right) \quad (13)$$

Здесь учтено, что $x_n = nd$, n — номер ячейки ($n=1..N$), d — период структуры, j —номер моды ($j=1..N$). Из этого соотношения видно, что при

$$j_1 + j_2 = N + 1 \quad \Psi_1^2 = \Psi_2^2, \quad \text{и при} \quad n_1 + n_2 = N + 1 \quad \Psi_1^2 = \Psi_2^2$$

Таким образом, рассмотренная модель позволяет объяснить основные особенности перестройки волновых функций при образовании слоистой структуры.

Заключение

В работе рассмотрен процесс перестройки резонансно-туннельных уровней (РТУ) при образовании слоистой квантово-размерной структуры. Показано, что существенным изменениям при этом подвергается и волновая функция.

1. Установлено, что при образовании цепочки РТУ расщепляются на систему подуровней, число которых равно числу звеньев в цепочке.

2. Определены значения энергии этих подуровней и соответствующие им волновые функции в зависимости от числа звеньев. Прозрачность цепочки для этих значений энергии равна единице. Предложена методика, позволяющая оценить эти энергии и построить соответствующие волновые функции.

3. Для объяснения механизма перестройки уровней развиты представления о точках смены фаз колебаний. Это такие точки, в которых фазы колебаний в соседних звеньях изменяются на противоположные. Число таких точек изменяется в пределах от нуля до $N-1$. Соответственно число подуровней, на которые расщепляется исходное состояние, равно числу звеньев в цепи. Чем больше таких точек, тем выше энергия колебаний.

4. Рассмотренные представления справедливы как для $E < U$, так и для $E > U$. Установлено, что для $E > U$ имеется энергия, при которой цепочку можно рассматривать как совокупность независимых барьеров такой же высоты.

Литература

1. Демиховский В. Я, Вугальтер Г. А. Физика квантовых низкоразмерных структур.// М.: Логос, 2000, 248 с.
2. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки.// М., Мир, 1989, 240 с.
3. Силин А.П. Полупроводниковые сверхрешетки.// УФН, т. 147, вып. 3, 485-516 с.
4. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г., Гридчин В. А. Наноэлектроника, часть 1.//М., «Юрайт», 2019, 285 с.
5. Аладышкин А. Ю. Туннельные явления в нанозифике.// Н. Новгород: Нижегород. гос. ун-т., 2011, 32 с.
6. Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е. Основы физики плазмы.// СПб: Лань, 2011, 448 с.

7. Давыдов А.С. Квантовая механика. //М.: Наука, 1973, 702 с.
8. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике, т. 9, Квантовая механика (II).// М.: Мир, 1967, 259 с.
9. Дегтярев В.Ф., Жилинский А.П. Трансформация резонансных туннельных уровней при образовании слоистой квантово-размерной структуры. // Наноструктуры. Математическая физика и моделирование. 2020, т.21, № 2, 33-48 с.
10. Киттель Ч. Введение в физику твердого тела.// М.: Наука, 1978, 791 с.
11. Стрелков С.П. Введение в теорию колебаний.// СПб: Лань, 2005, 440 с.
12. Крауфорд Ф. Берклеевский курс физики, т.3, Волны. // М.: Наука, 1984, 521 с.

RESTRUCTURING OF RESONANT TRANSPARENCY LEVELS DURING THE FORMATION OF A QUANTUM-DIMENSIONAL CHAIN

V.F. Degtiarev¹, A.P. Zhilinsky²

Moscow Technical University of Communications and Informatics,

Moscow, Aviamotornaya st., 8a;

E-mail: ¹vfsteel2008@jmail.com, ²zhilinsk@yandex.ru

Received 18.02.2022

The process of rearrangement of resonant tunneling levels during the formation of a layered quantum-size structure has been studied. For particles with an energy equal to the energy of the levels, the transparency of the structure is equal to unity. It has been established that with an increase in the number of links, these levels split into similar sublevels and the wave function changes. The energies of these sublevels and wave functions are determined. Schemes are proposed and the mechanism of level restructuring in the chain is considered. This mechanism is based on ideas about the points of phase change of oscillations of oscillators during the formation of a chain. It has been established that the parameters of these sublevels (energy, wave function) depend on the parameters of barriers, wells, and the number of cells in the chain. A model is considered that makes it possible to determine the characteristics of these sublevels, in particular, their energy and wave functions. The dependence of the wave function and level parameters on the characteristics of the chain is studied. Two cases are considered when $E < U$ and when $E > U$.

Keywords: quantum mechanics, quantum barrier, wave function, transparency, nanoelectronics, resonant tunneling.

TSV — КЛЮЧЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В.А. Беспалов, М.Ю. Фомичёв*, Н.А. Дюжев., М.А. Махиборода,
Е.Э. Гусев

НИУ МИЭТ

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

Поступила 19.01.2022

Среди всех известных методов системной интеграции 3D-интеграция с созданием сквозных межсоединений в кремнии (TSV) является наиболее перспективной технологией, поскольку она позволяет создавать сборки самых малых размеров, при этом обеспечивая наиболее высокую плотность межсоединений и лучшую производительность. Изготовление TSV — это ключевая технология, служащая для обеспечения связи между разными слоями 3D — интегрированной системы. Обзор посвящен основным технологическим операциям изготовления TSV: плазмохимическое травление; формирование изоляционного, барьерного и зародышевого слоев; заполнение TSV металлом. Представлены требования к технологическим процессам, основные характеристики функциональных слоёв и возможные дефекты в структурах.

Ключевые слова: сквозные межсоединения в кремнии, микросборка, трехмерная интеграция.

DOI: 10.31145/2224-8412-2022-22-1-19-44

Введение

Схемы интеграции как по технологии создания трехмерных интегральных схем (3D-ИС), так и с использованием кремниевого интерпозера (2.5D-ИС) являются наиболее перспективными методами преодоления ограничений закона Мура благодаря таким преимуществам, как малое энергопотребление, компактность и большая функциональная плотность [1–4]. Для построения 2.5D и 3D — сборок необходимы такие техноло-

гии, как создание сквозных межсоединений (TSV), утонение, бондинг и другие процессы обработки пластин. Также в этот ряд входит технология временного бондинга, которая в настоящее время продолжает активно развиваться [5, 6]. При этом операцию создания TSV можно рассматривать как сердце технологии 3D-ИС.

Как известно, технологический процесс изготовления интегральных схем можно условно разбить на три основных этапа. Это начальные операции обработки полупроводниковых пластин (формирование транзисторной структуры, FEOL), средние (промежуточные) этапы обработки, такие как формирование TSV, утонение, временный бондинг (при изготовлении 2,5- и 3D ИС, MEOL) и завершающие операции обработки полупроводниковых пластин, включающие металлизацию (BEOL).

В зависимости от маршрута 3D/2.5D сборки можно выделить три схемы интеграции по технологии TSV. В случае, когда TSV формируют перед процессами КМОП, такой подход называется *via first*. В случае подхода *via middle* после формирования TSV — структур выполняются только процессы BEOL. Третья схема, в которой создание TSV происходит после завершения всех процессов КМОП, называется *via last*. Также к схеме *via last* можно отнести сценарий под названием *via after bonding*, когда TSV формируются на последнем этапе, после бондинга двух пластин или кристаллов друг с другом сторонами с полностью сформированной электроникой.

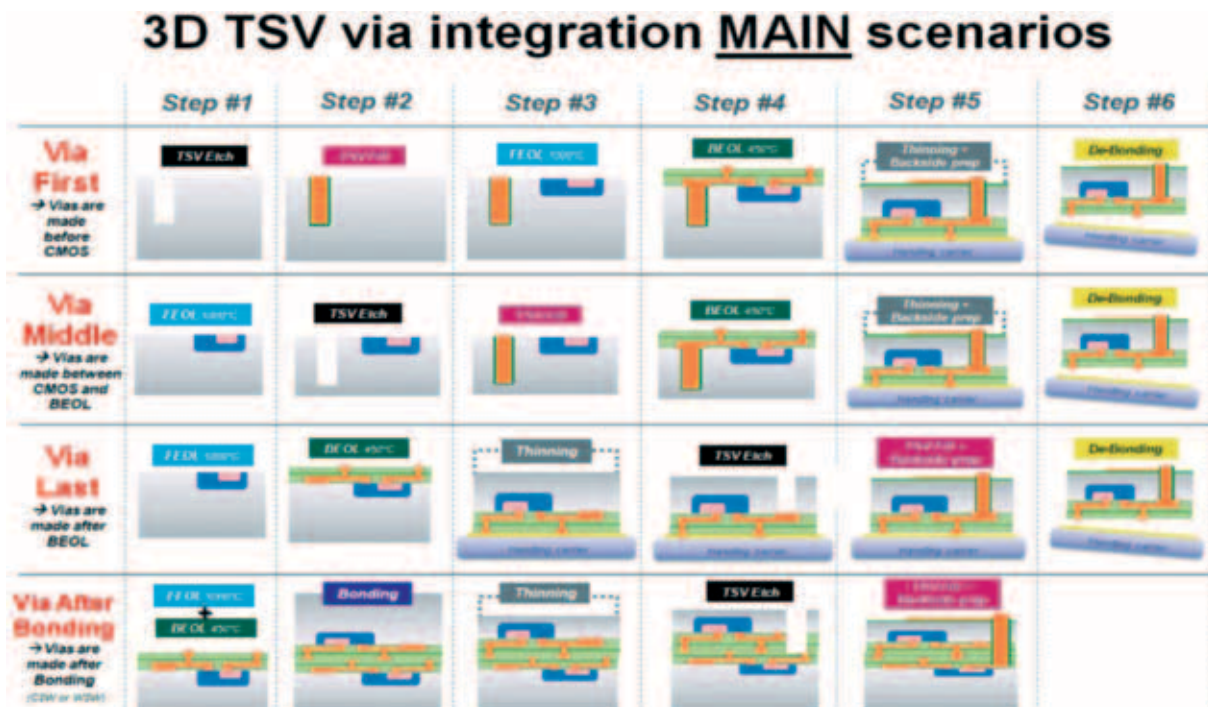


Рис. 1. Основные схемы 3D-интеграции по технологии TSV.

Выбор схемы интеграции зависит от применения конечного изготавливаемого устройства. В настоящее время технология TSV уже была разработана и адаптирована для множества применений, таких как МЭМС, мобильные телефоны, КМОП-датчики изображений, биомедицинские системы и устройства памяти. Соответственно, был проведен ряд исследований по изготовлению TSV. Однако в настоящее время технология TSV в 3D-ИС и некоторых наиболее продвинутых схемах сборки ещё не окончательно реализована из-за сохранения относительно высокой стоимости изготовления [7, 8]. В обзоре рассматриваются наиболее важные процессы изготовления TSV и связанные с ними возможные дефекты. К процессам изготовления TSV относится образование отверстий методом глубокого реактивно-ионного травления, нанесение диэлектрического, барьерного и зародышевого (затравочного) слоев, заполнение отверстий, химико-механическая полировка (ХМП) и отжиг меди. Подробные детали каждого процесса будут представлены далее.

Формирование TSV

Широко используемое в микроэлектронике глубокое плазмохимическое травление кремния, или процесс Bosch является наиболее предпочтительным для глубокого травления кремния, применяемого для изготовления TSV — структур. Процесс Bosch имеет высокую скорость травления в 5 — 10 мкм / мин, селективность по фоторезисту от 50 до 100 и до 200 по оксидной маске. Процесс состоит из следующих шагов: (1) травление кремния с использованием в качестве травителя SF_6 ; (2) создание пассивирующей пленки с помощью газа C_4F_8 для предотвращения бокового подтравления кремния во время следующего этапа; и (3) травление пассивации и слоя кремния в плазме SF_6 с использованием направленной ионной бомбардировки для обеспечения большой глубины. Затем пассивирующий слой удаляется плазмой O_2 и Ar. На рис. 2 показаны структуры TSV диаметром 10 мкм, полученные с помощью Bosch — процесса [9, 10]. Однако такой процесс неизбежно создает шероховатость боковых стенок, которая может стать причиной плохого выполнения последующих процессов их покрытия. Это может привести к утечкам тока и проблемам с надежностью. Уменьшение степени шероховатости боковых стенок при травлении TSV достигается путем подбора длительности процессов травления и пассивации во время операции глубокого травления кремния [11]. Зазубрины на боковых стенках отверстий влияют на качество их покрытия диэлектрическим, барьерным и затравочным слоем меди, увеличивают количество и размер пустот в TSV. Поэтому для проведения качественного процесса плазмохимического глубокого травления кремния важно обеспечить уменьшение шероховатости поверхностей так, чтобы ребристость боковых стенок была сведена к минимуму; это требование становится ещё более важным по мере уменьшения размеров TSV [12-15].

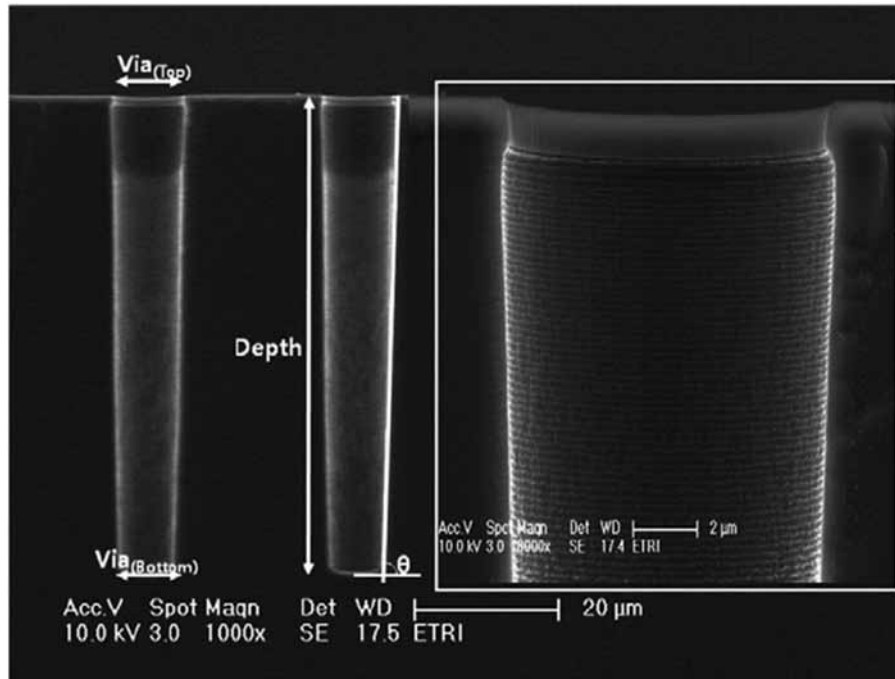


Рис. 2. Отверстия диаметром 10 мкм, полученные в результате травления кремния методом Bosch.

Изготавливаемые TSV — структуры могут иметь различные размеры, обусловленные как функциональным назначением конечного устройства, так и предъявляемыми к нему техническими требованиями, такими как мощность, температурный режим работы, массогабаритные показатели, плотность компоновки и прочими. На рис. 3 показана сравнительная подборка отверстий с различными параметрами глубины и ширины, справа указан список соответствующих литературных источников.

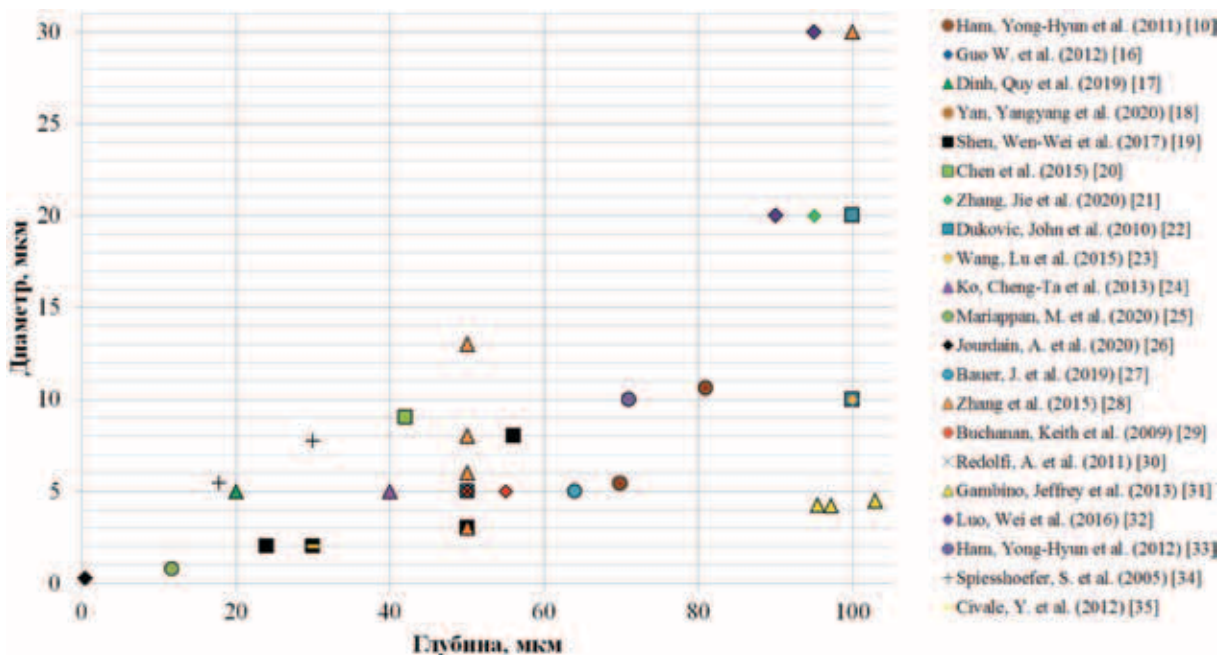


Рис. 3. Графическое сравнение размеров TSV из различных литературных источников.

Формирование диэлектрического слоя

Перед тем, как начинать заполнение TSV металлом необходимо создать диэлектрический слой для обеспечения достаточной электрической изоляции кремниевой пластины. К диэлектрическому слою предъявляются следующие технологические требования: хорошее качество покрытия и однородность, отсутствие токов утечки, низкие внутренние напряжения, высокое напряжение пробоя и различные ограничения максимальной температуры операции формирования диэлектрика для разных схем интеграции TSV [36]. В качестве диэлектрического слоя обычно используется SiO_2 или Si_3N_4 при химическом осаждении из паровой фазы с плазменным усилением (PECVD) или субатмосферном химическом осаждении из паровой фазы (SACVD) для TSV. Однако, когда диаметр TSV меньше 3 мкм, диэлектрический слой целесообразно наносить методом атомно-слоевого осаждения (ALD). ALD имеет ряд преимуществ, таких как более низкая температура процесса, лучшая равномерность покрытия по сравнению с другими существующими процессами, хорошая масштабируемость, сокращение времени операции ХМП благодаря образованию более тонкого диэлектрического слоя, и при этом отсутствие требований к подготовке поверхности перед осаждением диэлектрика. На рис. 4 [37] показано конформное покрытие диэлектрическим оксидным слоем TSV-отверстия с размерами 3×50 мкм методом ALD; толщина оксидного слоя на боковой стенке и дне составляет приблизительно 95 нм. Поскольку соотношение сторон или Aspect Ratio (AR) равно 17, можно утверждать, что на данном рисунке продемонстрирован отличный результат осаждения диэлектрического слоя для миниатюрных применений TSV.

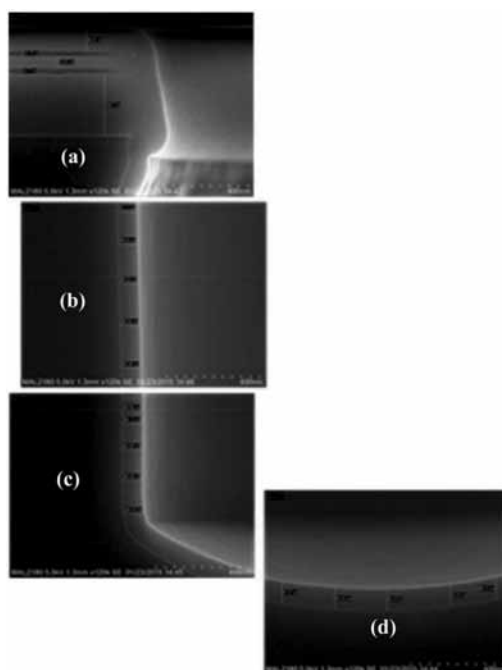


Рис. 4. РЭМ — изображения поперечного сечения TSV с размерами 3×50 мкм после осаждения диэлектрического оксидного слоя методом ALD. a-d: пленка толщиной 91-95 нм внутри TSV [37].

В результате, критериями оценки качества ближайшего к Si диэлектрического слоя являются конформность, однородность, отсутствие токов утечки, воспроизводимость процесса при низкой температуре осаждения [38-40].

Формирование барьерного и зародышевого слоев

Следующим процессом является осаждение барьерного слоя для предотвращения диффузии атомов Cu из заполненных медью TSV во время отжига, для которого требуется температура 400 °С. Кроме того, барьерный слой действует как адгезив между слоем диэлектрика и слоем меди. Распространенными барьерными материалами являются Ti, Ta, TiN и TaN. В качестве методов их нанесения применяется вакуумное напыление (PVD), химическое газофазное осаждение (CVD) или атомное слоевое осаждение (ALD) в зависимости от размеров изготавливаемых TSV. Металлические барьерные слои, такие как Ta и Ti, осаждаются методом PVD. Преимущество этого подхода в низкой температуре процесса, однако, при высоких соотношениях сторон TSV (>10:1) можно получить плохое покрытие [41]. Таким образом, приходится осаждать более толстый металлический барьерный слой для решения проблемы плохого покрытия, что увеличивает стоимость производства. Барьерные слои из TiN или TaN могут быть нанесены методом CVD, который имеет преимущество в хорошей однородности, но требует применения высокой температуры.

В следующем процессе затравка из меди осаждается в TSV обычно с помощью метода PVD. В исследовании, проведенном ИМЕС [35], при использовании ALD TiN в качестве барьера была достигнута однородность металлизации TSV размерами 2×30 мкм приблизительно в 80% (соотношение сторон = 15). Затем было проведено осаждение непрерывного и высококонформного щелочного затравочного слоя на боковые стенки и дно TSV (рис. 5).

На следующем шаге в результате было произведено заполнение TSV медью без пустот по всей пластине. В этом маршруте щелочное нанесение зародышевого слоя меди может быть успешно заменено её осаждением методом PVD, выполняемым перед шагом гальванического заполнения TSV снизу вверх.

Ключевыми целями, которых, как правило, стремятся достичь при применении технологии TSV, являются уменьшение температурных параметров технологических процессов и снижение стоимости производства.

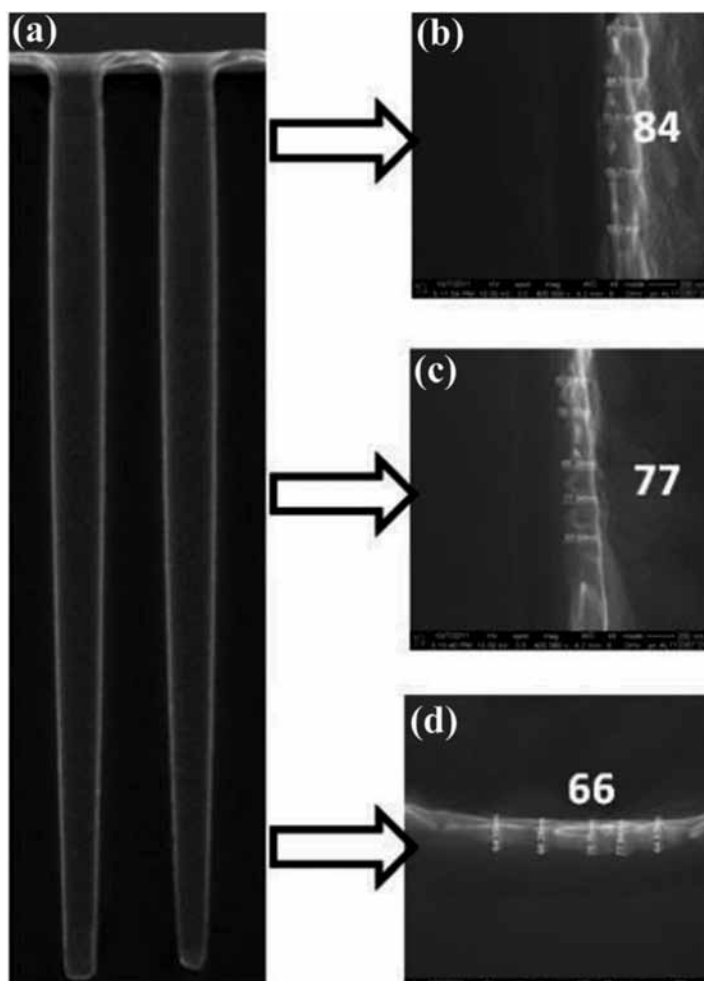


Рис. 5. Изображения поперечного сечения TSV с размерами 2 x 30 мкм, полученные на РЭМ, сделанные после щелочного осаждения меди и перед электрохимическим осаждением (ЭХО или ECD): a — общий вид, b — верх, c — середина, и d — нижняя часть TSV. [35].

При формировании TSV, выполняемом после операций BEOL, требуется особая забота об ограничениях максимальных температур, применяемых в соответствующих процессах. Поэтому в данном случае для изготовления TSV с высокими аспектными соотношениями можно выполнять «полностью жидкостный» набор процессов низкотемпературного электрохимического осаждения как барьерного, так и медного зародышевого слоя. Гальваническое осаждение Co-W-B и Cu в качестве барьерного/зародышевого слоев достигается путем использования наночастиц Au или наночастиц Pd в качестве катализатора [42-44]. На рис. 6 показано изображение одного TSV после адсорбции наночастиц Pd при комнатной температуре в течение 3 ч. Наночастицы Pd равномерно осаждаются по всему TSV с размерами 2×24 мкм, и при этом не наблюдается их скоплений. Результаты процесса ЭХО Cu/Co-W-B, проведенного на следующем шаге, показаны на рис. 7. Такой результат был получен благодаря применению наночастиц Pd в качестве катализатора по всему TSV.

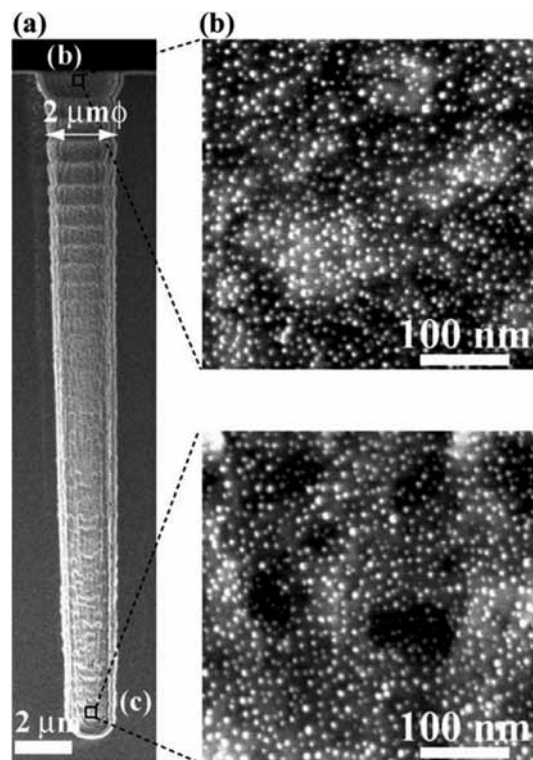


Рис. 6. РЭМ-изображения поперечного сечения TSV (2×24 мкм) после адсорбции наночастиц Pd на его стенках: а — общий вид, б — верх и с — низ TSV [43].

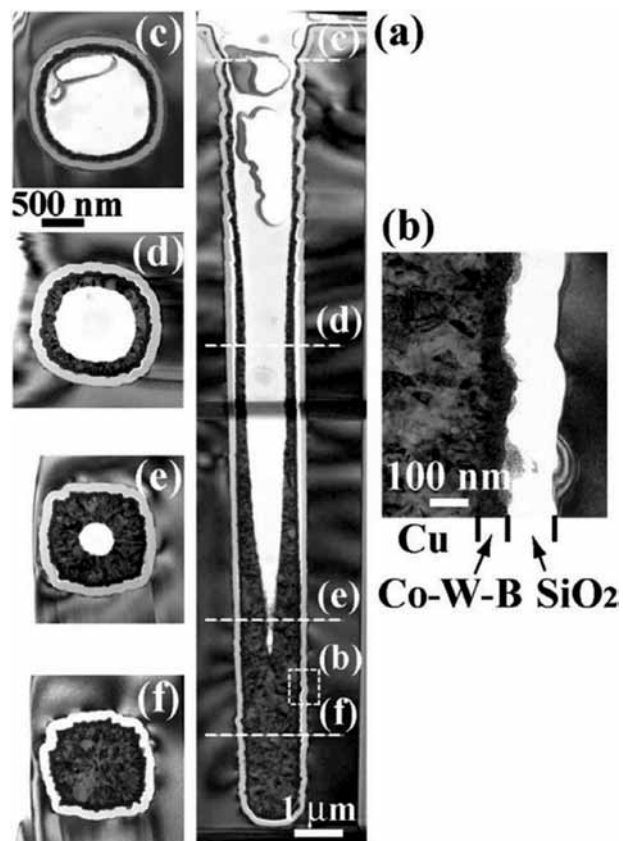


Рис. 7. РЭМ-изображения электрохимически осажденного слоя Cu / Co-W-B: а — общий вид, б — изображение вертикального сечения боковой стенки, и с-f: изображения горизонтальных сечений на различной глубине [43].

Даже не смотря на наличие зазубрин на стенках TSV, удалось успешно сформировать на них непрерывную и однородную пленку Co-W-B толщиной 60 нм при 60 °С. Затем при 70 °С гальваническая медь осаждается прямо на слой Co-W-B. Диффузия ингибиторов в нижней части TSV ниже, чем в верхней; следовательно, затравочный слой меди, образующийся при электролитическом осаждении, толще в нижней части TSV, чем в верхней. Не смотря то, что полностью жидкостные процессы нанесения барьерного и затравочного слоев обеспечивают применение низких температур обработки, необходимы дополнительные эксперименты, чтобы доказать их надежность.

Таким образом, критериями оценки качества барьерного и зародышевого слоев являются конформность, однородность, а также воспроизводимость процесса при низкой температуре осаждения [29, 45- 47].

Заполнение TSV

Существует три метода заполнения TSV: конформное покрытие [48, 49], размещение бампов с заполнением снизу вверх [50, 51], и суперконформное покрытие [52-56]. Этот набор методов нанесения покрытия основан на существовании множества различных конкретных применений 3D-интеграции. Как правило, структуры TSV имеют форму цилиндра с глубиной от 10 до 200 мкм. Глубина TSV определяется требуемой толщиной чипа или пластины в сборке, а аспектное отношение определяется в процессах изготовления диэлектрического / барьерного / зародышевого / заполняющего слоев. Хотя существует множество различных геометрий TSV для применения в 2,5D и 3D интеграции, их можно свести к трем общим типам, указанным в Таблице 1 [57].

Таблица 1. Основные типы TSV [57]

Применение	Заполнение	Глубина	Диаметр	Аспектное соотношение
Фотоматрицы	Конформное	50 — 100	30 — 50	1 — 3
Интерпозеры	Полное	50 — 150	20 — 30	4 — 8
Устройства	Полное	20 — 60	2 — 10	5 — 15

Конформное заполнение

Конформное покрытие медью проводится аналогично нанесению рисунка меди для слоев металлизации (RDL) или разводки на уровне пластины (WLCSP) с применением резистивных масок; такое нанесение меди частично подходит для TSV с низким аспектным соотношением. Если взять в качестве примера фотоматрицу, основные технологические процессы этапа изготовления TSV можно увидеть на рис. 8; к ним относится глубокое реактивно-ионное травление кремния для достижения контакта с металлическим слоем КМОП, формирование оксида для изоляции, осаждение барьерного и затравочного слоев методом PVD, и, наконец, нанесение конформного медного покрытия для металлизации [58].

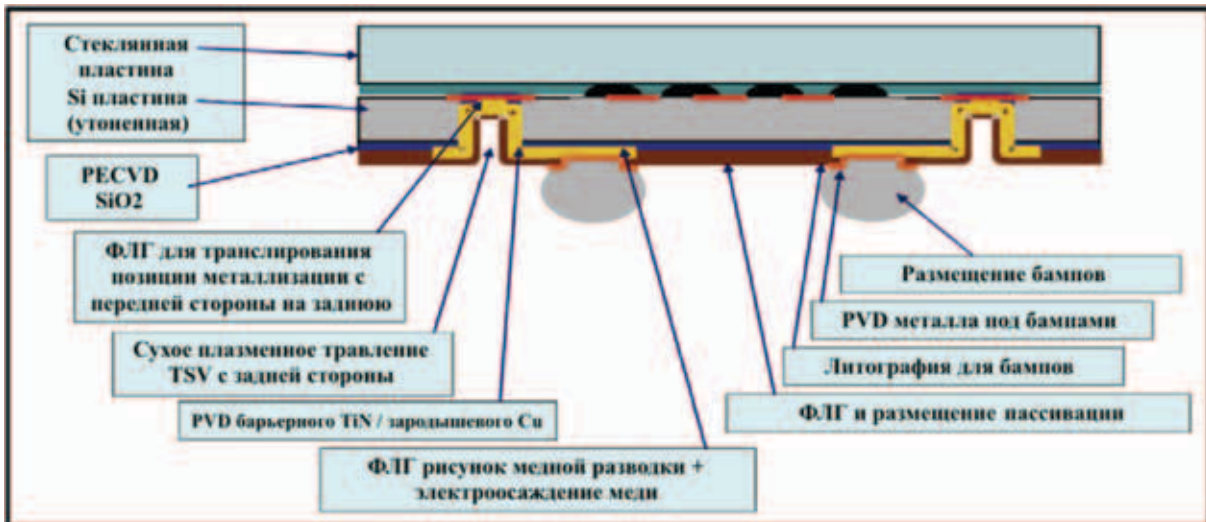


Рис. 8. Поперечное сечение фотоматрицы с TSV [58].

Медь толщиной от 5 до 10 мкм выращивается в структуре резистивной маски, образуя топологию TSV и схемы разводки на поверхности кремния, как показано на рис. 9 [48].

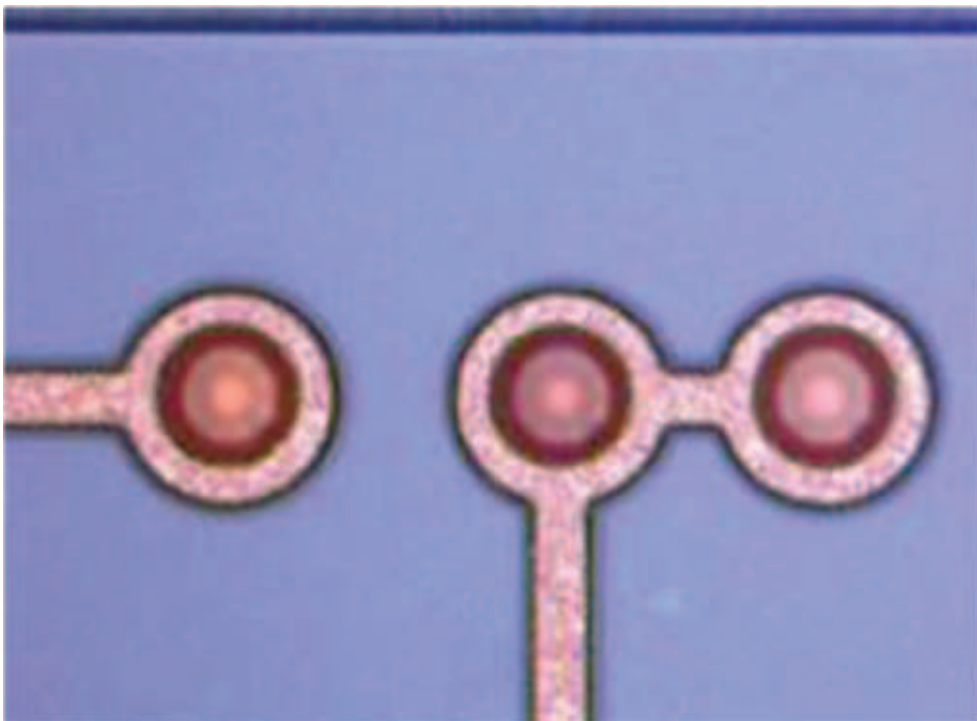


Рис. 9. Оптическое изображение TSV после ECD Cu и травления зародышевого слоя [48].

На рис. 10 показаны изображения поперечных сечений отверстий с различными соотношениями сторон (AR от 1 до 5) после выполнения этапов формирования конформного медного покрытия. Однако, их применение ограничено AR, равным 3, из-за появляющегося прерывавания затравочного слоя Cu [49].

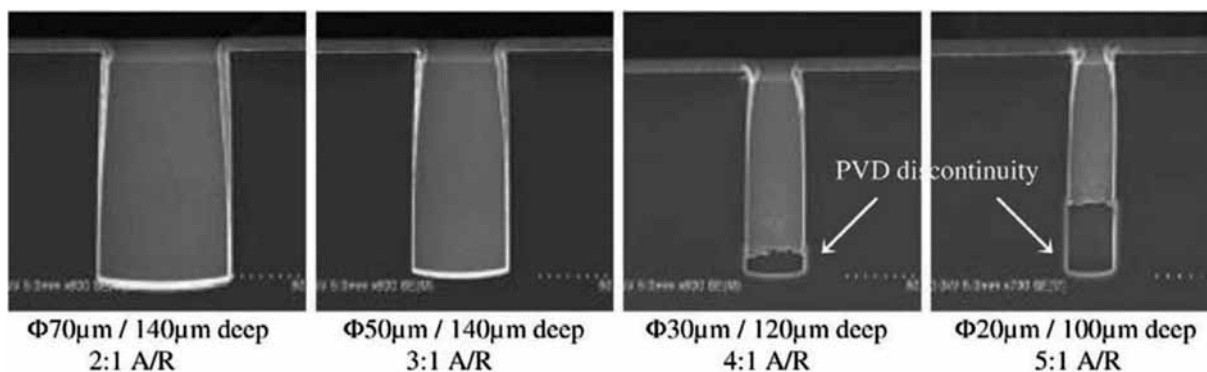


Рис. 10. Поперечные сечения TSV с различными соотношениями сторон после нанесения барьера/затравки и конформного покрытия Cu [49].

Герметизация бампами и заполнение TSV снизу вверх

Одним из преимуществ подхода заполнения TSV «снизу вверх» является возможность избегать образования пустот или швов [59, 60]. Кроме того, такое заполнение подходит для применения в схеме «via last». Обычно для выполнения такого процесса заполнения TSV с затравочным слоем меди требуется технология временного бондинга. Операция удаления пластины-носителя или прикрепленного металла может привести к дополнительным затратам и проблемам с надежностью; поэтому был предложен новый подход, заключающийся в предварительном размещении бампов перед металлизацией Cu TSV, основанной на процессе заполнения «снизу вверх», как показано на рис. 11 [51].

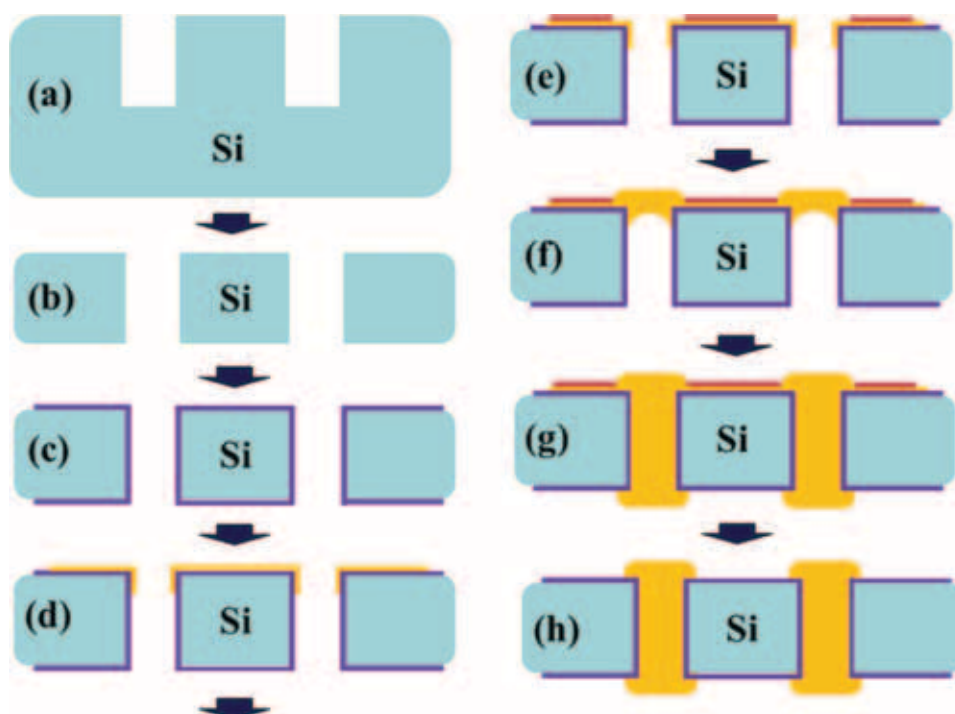


Рис. 11. Технологический процесс заполнения отверстий медью снизу вверх с формированием бампов: а — травление TSV, b — утонение, с — формирование оксидной изоляции, d — осаждение затравочного слоя, e — формирование фоторезистивной маски, f — закупоривание отверстий бампами, g — заполнение TSV металлом, начиная с бампов, h — удаление фоторезиста.

Контроль на оптическом микроскопе, РЭМ, а также рентгеновский анализ гарантируют отсутствие дефектов после нанесения покрытия снизу вверх с помощью предложенного подхода (рис. 12). При таком варианте изготовления TSV структур с бампами заполнение отверстий металлом осуществляется всего за один этап, что упрощает производственный процесс и позволяет применять его для трехмерной интеграции по схеме *via last*.

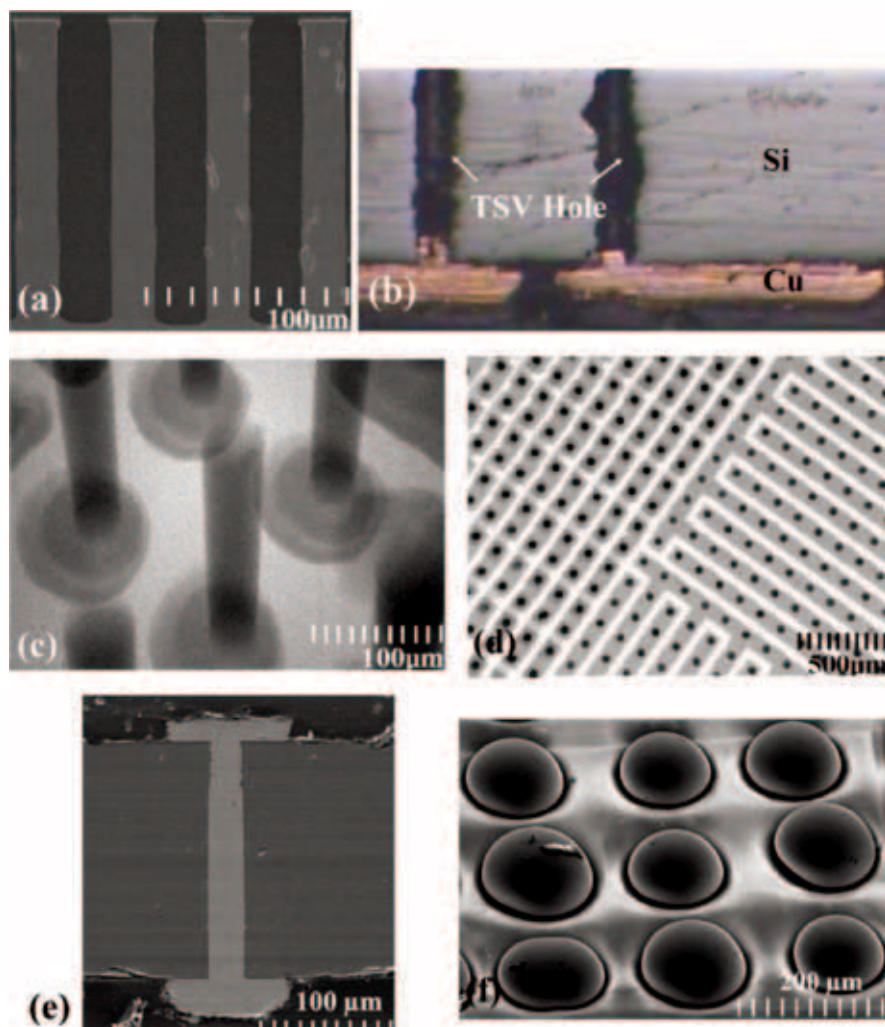


Рис. 12. а: Профиль сухого травления TSV глубиной 25 мкм. б: Герметизация TSV бампами перед заполнением. с: Рентгенологический контроль TSV, заполненных без пустот. d: Черные точки — Cu в TSV; белая область — SiO₂; область серого цвета — металлические линии. е: Поперечное сечение TSV с медными выступами с обеих сторон. f: Готовые TSV — структуры с медными бампами [51].

Супер-конформное заполнение

Супер-конформное заполнение медью адаптировано для широкого круга применений, от некоторых технологий, близких к процессу damascene, до изготовления интерпозеров и целых устройств. Основным требованием к такому заполнению является отсутствие швов или пустот внутри TSV, обнаруживаемое с помощью рентгеновского анализа, который проводят после того, как медь с поверхности и барьерный слой будут удалены методом

ХМП. На рис. 13 показан механизм заполнения TSV, включающий характеристики рецепта и свойства органических добавок [61]. При выполнении стандартного гальванического осаждения постоянным током часто наблюдается проблема, изображенная на рис. 13а. Поэтому подбор параметров рецепта нанесения покрытия является важным фактором для обеспечения качественного заполнения TSV.

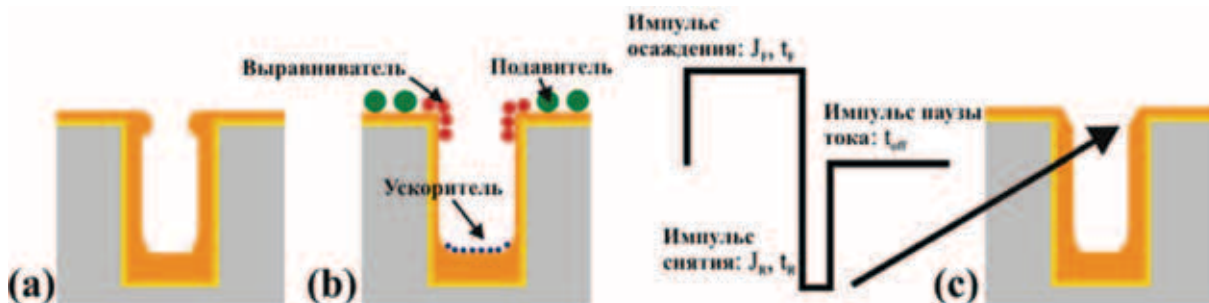


Рис. 13. Принцип суперконформного покрытия TSV медью:
 а — Не оптимизированное покрытие постоянным током. б — Аддитивный подход.
 с — Форма волны импульсного реверсивного тока [61].

В химической ванне для заполнения TSV обычно используются три добавки, включающие подавитель (suppressor), ускоритель (accelerator) и выравниватель (leveler) [62-66]. Медленно диффундирующий и быстро адсорбирующийся подавитель, такой как полиэтиленгликоль (ПЭГ), адсорбируется преимущественно на плоской поверхности. Быстро распространяющийся ускоритель, такой как бис-(3-сульфопропил)-дисульфид (SPS), проникает в отверстия и увеличивает скорость осаждения. Медленно диффундирующий выравниватель, такой как Janus Green B (JGB), может деактивировать ускоритель и распределяться у краев. Результаты осаждения с использованием различных добавок показаны на рис. 13b. Для предотвращения преждевременного закрытия отверстий TSV при заполнении медью применяется импульсный реверсивный ток. Рецепт такого нанесения включает четыре параметра: время обратного импульса (t_R), время паузы (t_{off}), время прямого импульса (t_F), и соответствующие плотности тока (j_F, j_R), как показано на рис. 13c [67, 68]. Кроме того, была предложена трехступенчатая форма волны тока для сокращения времени заполнения и уменьшения количества дефектов в заполненном TSV [69]. Прогрессия процесса заполнения медью изображена на рис. 14, где показаны массивы TSV размером 8×56 мкм после 5, 10, 15 и 20 минут заполнения Cu в полиэфирной супрессорной системе $\text{CuSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Cl}^-$. Безпустотное заполнение наблюдается через 20 минут [70]. Однако заполнение TSV с высоким аспектным отношением занимает довольно много времени из-за применения импульсного обратного тока, который оставляет ионы меди на боковых стенках отверстий. Таким образом, необходимо сокращать время заполнения TSV для трехмерной интеграции. Существует четыре

разновидности подходов оптимизации и повышения эффективности заполнения, которые включают оптимизацию положения анода, заполнение TSV в несколько этапов, изменение концентрации добавок и оптимизацию плотности тока осаждения [71]. В конце используется ХМП для удаления внешнего слоя меди, а также барьерного слоя с поверхности пластины. Как правило, эта технология требует выполнения двух шагов. На первом шаге происходит удаление толстого слоя Cu с углублениями или выступами после заполнения TSV, и оно останавливается на барьерном слое. На втором шаге удаляют барьерный слой, останавливаясь на слое диэлектрика. Для обеспечения хорошей изоляции, минимизации рельефа и избегания возможных дефектов используются различные суспензии, обладающие селективностью [72].

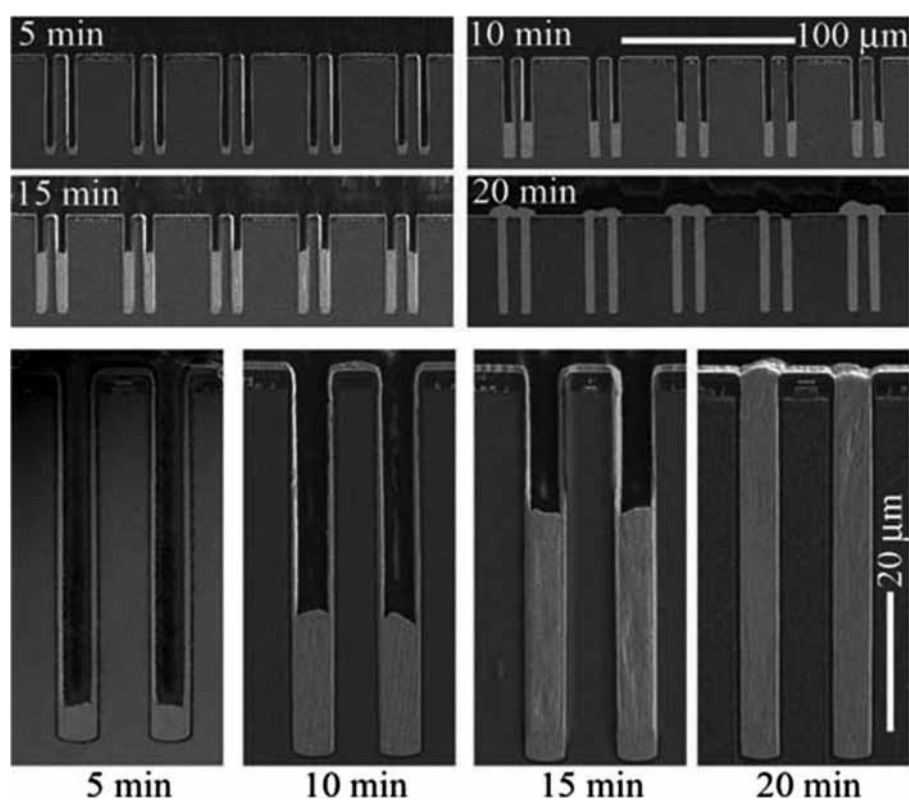


Рис. 14. Изображения поперечных сечений TSV, показывающие прогрессию заполнения медью круглых отверстий снизу вверх в то время, когда на соседствующих свободных поверхностях осаждение практически незначительно. Четыре верхних изображения демонстрируют равномерность заполнения внутри массивов отверстий [70].

Таким образом, для формирования металлизации TSV крайне важно обеспечить заполнение отверстий без пустот и прерываний [73-75].

Отжиг меди в TSV

Проблемы термомеханической надежности являются очень важными, поскольку во время проведения последующих процессов формирования RDL, размещения бампов и многослойной сборки пластины подвержены повторя-

ющимся термическим нагрузкам, которые могут стать причиной накопления термомеханических напряжений. Они в свою очередь могут стать результатом появления таких критических проблем, как расслоение и образование пустот, если напряжения не будут в достаточной степени уменьшены путем выполнения процесса отжига после заполнения TSV медью. Ещё одной проблемой является расширение металла в TSV из-за различий коэффициентов теплового расширения (КТР) кремниевой пластины и материала заполнения TSV, что может вызвать растрескивание диэлектрического слоя [76-79].

Таким образом, чтобы уменьшить количество внутренних напряжений в кремнии, после выполнения процесса гальванического осаждения необходимо проводить предварительный отжиг TSV. Коэффициент теплового расширения меди равен $17,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, что выше, чем у кремния, КТР которого равен $2,6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Вследствие этого во время отжига может наблюдаться экструзия или выпячивание металла из TSV [80, 81].

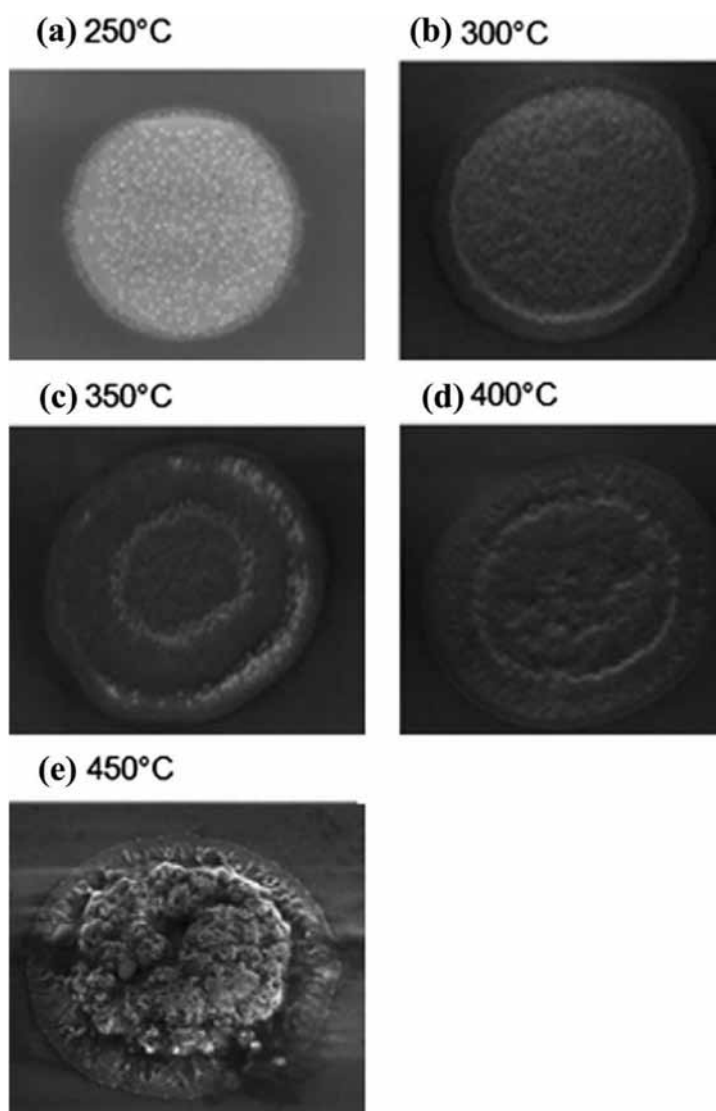


Рис. 15. РЭМ-микрофотографии TSV, показывающие степень выпячивания меди вследствие отжига при различных температурах от 250 до 450 °C (вид сверху) [82].

На ряде образцов, подвергнутых процессам отжига при разных условиях, было исследовано влияние температуры отжига на конечный результат. На рис. 15 представлены РЭМ-микрофотографии различных форм выступов из TSV размерами 5×50 мкм, обусловленных отжигом в течение 30 минут при разных температурах в диапазоне от 250 до 450 °С. Медь начинает выступать, начиная с температуры отжига в 350 °С, и вздувается при 450 °С, как показано на рис. 15е. Этот процесс имеет два возможных механизма. Первый механизм — это пластическая деформация материала Си, который во время отжига расширяется в вертикальном направлении. Вторым механизмом связан с диффузионной ползучестью, когда распределение напряжений в TSV не является равномерным [82]. На степень выступления металла из TSV кроме температуры отжига также влияет выбор материалов и толщина слоев барьера и изоляции.

Температура отжига должна быть достаточной для устранения внутренних напряжений в TSV — структурах; в то же время подбор условий отжига ограничивается максимальными температурами, не влияющими губительно на сформированную электронику. В маршруте изготовления TSV, разработанном в IMEC, для отжига применяется температура в 420 °С в течение 20 минут [83].

На следующем шаге после проведения процесса отжига применяется ХМП для удаления медных выступов и для открытия TSV с обратной стороны.

Возможные виды дефектов

Можно выделить три разновидности дефектов, появляющихся при изготовлении TSV: дефекты, связанные с травлением Si, дефекты, связанные с формированием затравочного слоя Си, и, наконец, дефекты, связанные с гальваническим покрытием Си [84].

Как уже упоминалось ранее, поскольку TSV травятся сухим способом с использованием процесса Bosch, существует несколько возможных дефектов, связанных с травлением Si; они могут приводить к таким видам недостатков затравочного слоя Си, как локальное отсутствие покрытия, шероховатость поверхности или образование губчатых структур, как показано на рис. 16. Когда есть какие-либо проблемы при проведении операций изготовления TSV, обычно можно наблюдать дефекты, проявляющиеся в виде пустот после гальванического покрытия меди.

Нарушения заполнения отверстий медью, вызванные губкообразными дефектами, также могут привести к отсутствию электрического контакта (рис. 17). Также ещё одной причиной возникновения дефектов может быть окисление или плохое нанесение затравочного слоя Си.

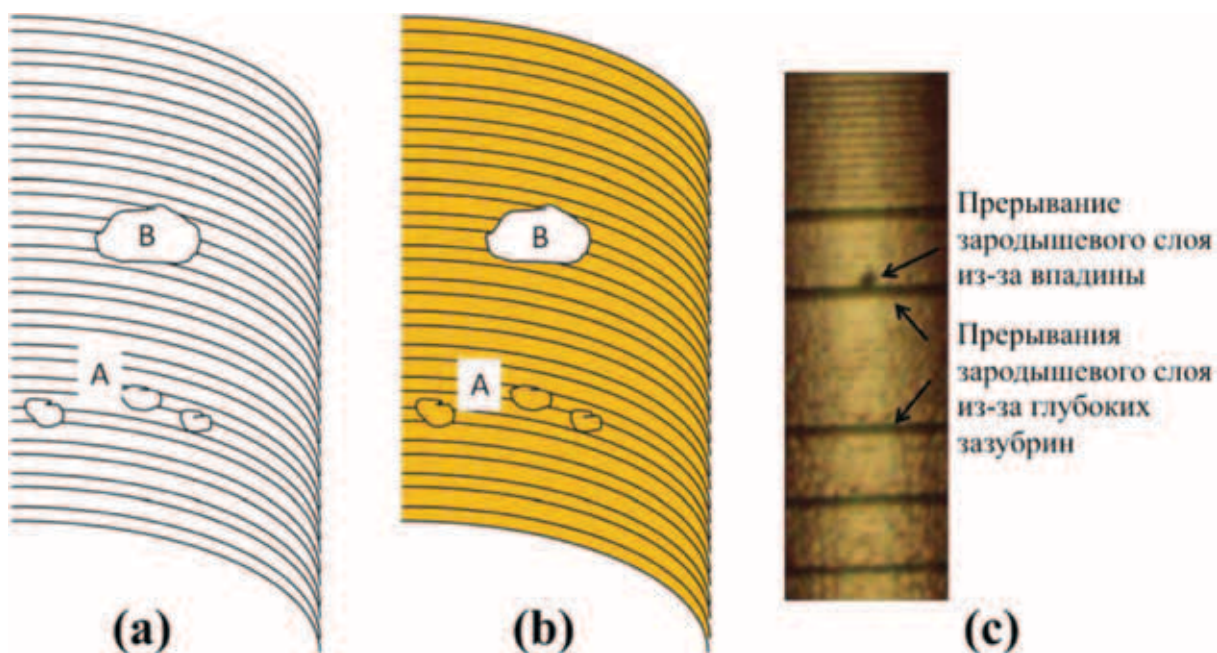


Рис. 16. Механизм, вызывающий потерю затравочного слоя Cu из-за губчатых структур и глубоких шероховатостей:
 а — после травления Si. б — после осаждения затравочного слоя Cu.
 с — микроскопическое изображение затравочного слоя Cu, осажденного на TSV размерами 60 мкм × 250 мкм [45].

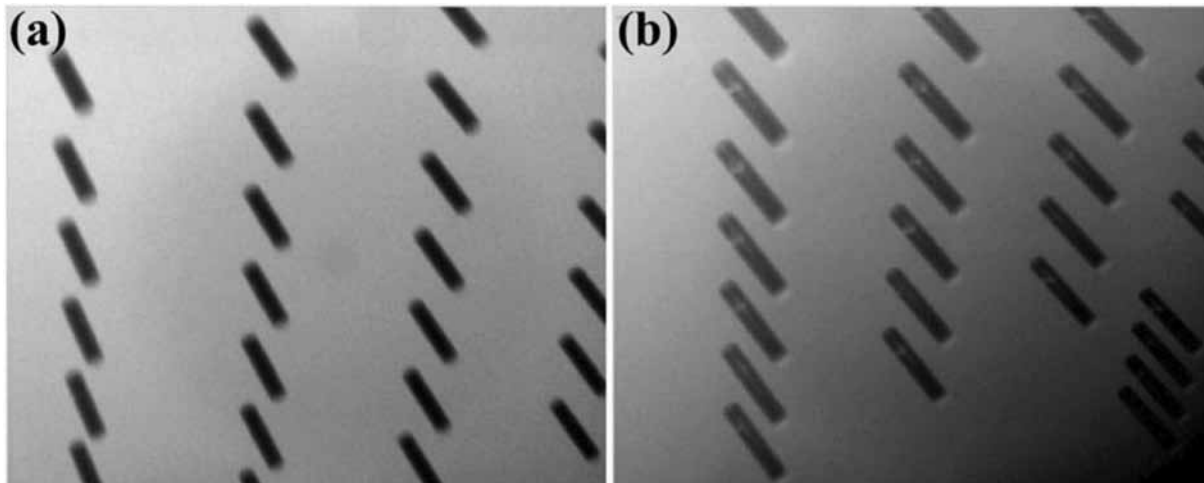


Рис. 17. Рентгеновские изображения TSV после гальванического покрытия Cu:
 а — TSV без дефектов заполнения Cu.
 б — TSV с дефектами заполнения Cu, вызванными прерываниями затравочного слоя Cu из-за губкообразных дефектов в TSV размерами 30 мкм × 150 мкм [45].

Из-за окисления затравочного слоя меди через 10 дней после осаждения PVD-Cu может начаться образование пустот в верхней области TSV [45]. Этот эффект демонстрирует, что оксид меди уменьшает реальную площадь покрытия отверстий затравочным слоем Cu, что влияет на конечный результат, как показано на рис. 18.

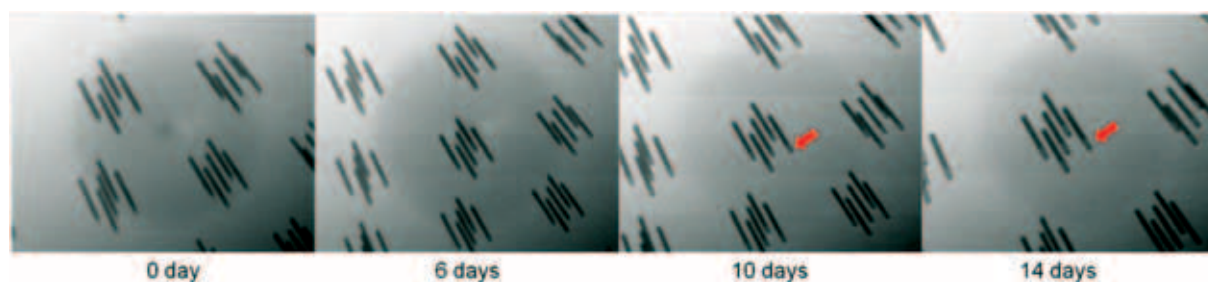


Рис. 18. Рентгеновские изображения, показывающие состояние затравочного слоя меди в TSV размерами 10×100 мкм после прохождения разных периодов времени от его осаждения [45].

Наконец, чтобы предотвратить дефекты гальванического заполнения Cu, важно оптимизировать как химическую концентрацию трех добавок, так и плотность тока в процессе ЭХО. Таким образом, формирование TSV без пустот может быть достигнуто путем предотвращения образования известных видов дефектов на соответствующих этапах изготовления.

Выводы

В этом обзоре были рассмотрены различные технологии, применяющиеся с целью изготовления TSV для задач трехмерной интеграции. Описаны параметры основных процессов, особенности заполнения отверстий медью для различных применений и виды дефектов, которые могут при этом возникать. Разработаны методы формирования диэлектрического, барьерного и затравочного слоев для преодоления негативного влияния шероховатости боковых стенок отверстий и решения проблемы неравномерного нанесения затравочного слоя меди с целью обеспечения дальнейшего качественного электрохимического осаждения меди в TSV.

Сформированы требования к ключевым технологическим операциям. Показана важность формирования отверстий с малой величиной шероховатости поверхности в процессе плазмохимического травления кремния. Критериями оценки качества диэлектрического слоя, ближайшего к Si, является конформность, однородность, а также воспроизводимость процесса при низкой температуре осаждения. К барьерному и зародышевому слоям предъявляются аналогичные требования.

В статье описаны три разновидности процессов заполнения TSV медью: конформное нанесение, герметизация бампами для упрощения процесса металлизации и проведения беспустотного заполнения снизу вверх, и создание суперконформного покрытия, которое используется для изготовления интерпазеров и устройств. Указаны возможные причины возникновения пустот, которые могут привести к отсутствию электрических контактов и проблемам с надежностью. Приводятся технологические решения проблемы термического напряжения, вызванного разницей коэффициентов теплового линейного расширения материала металла и близлежащих слоёв.

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

Литература

- [1] Koester SJ, Young AM, Yu RR, Purushothaman S, Chen KN, La Tulipe DC, Rana N, Shi L, Wordeman MR, Sprogis EJ (2008) Wafer-level 3D integration technology. *IBM J Res Dev* 52: 583–597.
- [2] Chen KN, Tan CS (2011) Integration schemes and enabling technologies for three-dimensional integrated circuits. *Very Large Scale Integr (VLSI) Syst* 5: 160–168.
- [3] Lau JH (2012) Recent advances and new trends in nanotechnology and 3D integration for semiconductor industry. *3D Systems Integration Conference*: 1-23.
- [4] Liu D, Park S (2014) Three-dimensional and 2.5 dimensional interconnection technology: state of the art. *J Electron Packag* 136:014001-1–014001-7.
- [5] Fomichev M.Y., Makhiboroda M.A., Djuzhev N.A., Dedkova A.A., Gusev E.E., Development of adhesive wafer bonding technology // *IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering, ELCONRUS 2021*; pp 2558-2562, DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396080.
- [6] Djuzhev N. A., Makhiboroda M. A., Gusev E. E., Fomichev M. U., Dedkova A. A., Ivanin P. S., Investigation of the influence of the parameters of the temporary bonding and thinning operations on the bending of silicon wafers // *International Conference on Micro- and Nano-Electronics 2021*; 1215712 (2022), DOI: 10.1117/12.2623584.
- [7] Ranade AP, Havens R, Srihari K (2014) The application of through silicon vias (or TSVs) for high power and temperature devices. *ITHERM Conference*: 1270-1278.
- [8] Stiebing M, Vogel D, W.Steller, Wolf MJ, Wunderle B (2015) Challenges in the reliability of 3D integration using TSVs. *International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*: 1-8.
- [9] Ayón AA, Braff R, Lin CC, Sawin HH, Schmidt MA (1999) Characterization of a time multiplexed inductively coupled plasma etcher. *J Electrochem Soc* 146:339–349.
- [10] Ham YH, Kim DP, Park KS, Jeong YS, Yun HJ, Baek KH, Kwon KH, Lee K, Do LM (2011) Dual etch processes of via and metal paste filling for through silicon via process. *Thin Solid Films* 519:6727–6731.
- [11] Blauw MA, Craciun G, Sloof WG, French PJ, van der Drift E (2002) Advanced time-multiplexed plasma etching of high aspect ratio silicon structures. *J Vac Sci Technol B* 20:3106–3110.

- [12] Voss, L. & Shao, Qinghui & Conway, Adam & Reinhardt, Cathy & Graff, Robert & Nikolic, Rebecca. (2013). Smooth Bosch Etch for Improved Si Diodes. *Electron Device Letters, IEEE*. 34. 1226-1228. 10.1109/LED.2013.2278374.
- [13] Craigie, C. & Sheehan, T & Johnson, V. & Burkett, Susan & Moll, Amy & Knowlton, Bill. (2002). Polymer thickness effects on Bosch etch profiles. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. 20. 10.1116/1.1515910.
- [14] Kenoyer, L. & Oxford, R. & Moll, Amy. (2003). Optimization of Bosch etch process for through wafer interconnects. 338 — 339. 10.1109/UGIM.2003.1225759.
- [15] Rudy, A. & Morozov, O. & Kurbatov, S. (2021). A Modernized Bosch Etching Process for the Formation of Tapered Structures on a Silicon Surface. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 15. 461-466. 10.1134/S1027451021030162.
- [16] W. Guo, G. Van der Plas, A. Ivankovic, V. Cherman, G. Eneman, B. De Wachter, M. Togo, A. Redolfi, S.Kubicek, Y.Civale, T.Chiarella, B.Vandeveldel, K.Croes, I.DeWolf, I.Debuschere, A. Mercha, A. Thean, G. Beyer, B. Swinnen, E. Beyne. Impact of through silicon via induced mechanical stress on fully depleted bulk finFET technology, *IEDM (2012)*, pp. 18.4.1–18.4.4. DOI: 10.1109/IEDM.2012.6479066.
- [17] Dinh, Quy & Kondo, Kazuo & Hirato, Tetsuji. (2019). Reduction of TSV Pumping. 1-4. DOI: 10.1109/3DIC48104.2019.9058846.
- [18] Yan, Yangyang & Wang, Guojun & Su, Hanqiang & Dai, Fengwei & Sun, Peng & Cao, Liqiang. (2020). Multi-chip Stacking with Fine Pitch μ bumps and TSVs for Heterogeneous Integration. 1-4. DOI: 10.1109/ICEPT50128.2020.9202456.
- [19] Shen, Wen-Wei & Chen, Kuan-Neng. (2017). Three-Dimensional Integrated Circuit (3D IC) Key Technology: Through-Silicon Via (TSV). *Nanoscale Research Letters*. 12. DOI: 10.1186/s11671-017-1831-4.
- [20] Chen, Cool X.M. & Loh, Woon & Chui, K. & Mao, Ying & Wickramanayanaka, Sunil. (2015). CMP process optimization on temporary-bonded wafer for via-last through-silicon-via from backside. 1-4. DOI: 10.1109/EPTC.2015.7412401.
- [21] Zhang, Jie & Ding, Ye & Wei, Wei & Li, Hangxu & Li, Zhenjie & Ji, Xiaolu & Jing, Xiaoping & He, Cong & Cao, LiQiang & Jiang, Xiaoshan & Zhu, Kejun & Liu, Peng & Chen, Yuanbo. (2020). The TSV process in the hybrid pixel detector for the High Energy Photon Source. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 980. 164425. DOI: 10.1016/j.nima.2020.164425.
- [22] Dukovic, John & Ramaswami, S. & Pamarthy, S. & Yalamanchili, R. & Rajagopalan, N. & Sapre, K. & Cao, Z. & Ritzdorf, Tom & Wang, Y. & Eaton, Brad & Ding, R. & Hernandez, M. & Naik, Mehul & Mao, D. & Tseng, J. & Cui, D. & Mori, Glen & Fulmer, P. & Sirajuddin, K. & Luo, L. (2010). Through-silicon-

- via technology for 3D integration. 1 — 2. DOI: 10.1109/IMW.2010.5488399.
- [23] Wang, Lu & Cai, Jian & Wang, Qian & Hu, Yang & Zhang, Wenqi. (2015). Electroplating Cu on ALD TiN for high aspect ratio TSV. 676-680. DOI: 10.1109/ICEPT.2015.7236676.
- [24] Ko, Cheng-Ta & Chen, Kuan-Neng. (2013). Reliability of key technologies in 3D integration. *Microelectronics Reliability*. 53. 7–16. DOI: 10.1016/j.microrel.2012.08.011.
- [25] Mariappan, Murugesan & Mori, K. & Kojima, T. & Hashimoto, H. & Bea, J.C. & Fukushima, Tak & Koyanagi, M. (2020). Nano Ni/Cu-TSVs with an Improved Reliability for 3D-IC Integration Application. 1-5. DOI: 10.1109/ASMC49169.2020.9185397.
- [26] Jourdain, A. & Schleicher, Filip & De Vos, Joeri & Stucchi, Michele & Chery, Emmanuel & Miller, Andy & Beyer, Gerald & Plas, Geert & Walsby, Edward & Roberts, Kerry & Ashraf, Huma & Thomas, Dave & Beyne, Eric. (2020). Extreme Wafer Thinning and nano-TSV processing for 3D Heterogeneous Integration. 42-48. DOI: 10.1109/ECTC32862.2020.00020.
- [27] Bauer, J. & Fursenko, Oksana & Marschmeyer, S. & Heinrich, Friedhelm & Villasmunta, Francesco & Villringer, Claus & Zesch, Christoph & Schrader, Sigurd. (2019). Spectroscopic reflectometry for characterization of Through Silicon Via profile of Bosch etching process. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 37. 062205. DOI: 10.1116/1.5120617.
- [28] Zhang, Junhong & Luo, Wei & Li, Yi & Gao, Liming & Li, Ming. (2015). Wetting process of copper filling in through silicon vias. *Applied Surface Science*. 359. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.10.214.
- [29] Buchanan, Keith & Burgess, Stephen & Giles, Kathrine & Muggeridge, Matthew & Zhao, Hao. (2009). Etch, dielectrics and metal barrier-seed for low temperature through-silicon via processing. 1-4. DOI: 10.1109/3DIC.2009.5306552.
- [30] Redolfi, A. & Velenis, Dimitrios & Thangaraju, Savithry & Nolmans, P. & Jaenen, P. & Kostermans, M. & Baier, U. & Van Besien, Els & Dekkers, Hendrik & Witters, T. & Jourdan, Nicolas & Ammel, A. & Vandersmissen, Kevin & Rodet, S. & Philipsen, Harold & Radisic, A. & Heylen, Nancy & Travaly, Y. & Swinnen, Bart & Beyne, Eric. (2011). Implementation of an Industry Compliant, $5 \times 50 \mu\text{m}$, Via-Middle TSV Technology on 300 mm Wafers. *Proceedings — Electronic Components and Technology Conference*. DOI: 10.1109/ECTC.2011.5898692.
- [31] Gambino, Jeffrey & Doan, T. & Trapasso, J. & Musante, Charles & Dang, D. & Vanslette, D. & Grant, D. & Marx, D. & Dudley, R. (2013). Through-silicon-via process control in manufacturing for SiGe power amplifiers. *Proceedings — Electronic Components and Technology Conference*. 221-226. DOI: 10.1109/ECTC.2013.6575575.
- [32] Luo, Wei & Zhang, Junhong & Li, Yi & Gao, Liming & Li, Ming. (2016). Pretreatment to assure the copper filling in through-silicon vias. *Journal of Materials*

- Science: Materials in Electronics. 27. DOI: 10.1007/s10854-016-4723-y.
- [33] Ham, Yong-Hyun & Kim, Dongpyo & Baek, Kyu-Ha & Park, Kunsik & Kim, Moonkeun & Kwon, Kwang-Ho & Lee, Kijun & Do, Lee-Mi. (2012). Metal/Dielectric Liner Formation by a Simple Solution Process for through Silicon via Interconnection. *Electrochemical and Solid-State Letters*. 15. H145. DOI: 10.1149/2.esl113678.
- [34] Spiesshoefer, S. & Rahman, Ziaur & Vangara, G. & Polamreddy, S. & Burkett, Susan & Schaper, L. (2005). Process integration for through-silicon vias. *Journal of Vacuum Science & Technology A — J VAC SCI TECHNOL A*. 23. 824-829. DOI: 10.1116/1.1864012.
- [35] Civale, Y. & Armini, Silvia & Philipsen, Harold & Redolfi, Augusto & Velenis, Dimitrios & Croes, Kristof & Heylen, Nancy & El-Mekki, Zaid & Vandersmissen, Kevin & Beyer, Gerald. (2012). Enhanced Barrier Seed Metallization for Integration of High-Density High Aspect-Ratio Copper-Filled 3D Through-Silicon Via Interconnects. *Proceedings — Electronic Components and Technology Conference*. DOI: 10.1109/ECTC.2012.6248928.
- [36] Garrou P, Bower C, Ramm P (2011) *Handbook of 3D integration: volume 1—technology and applications of 3D integrated circuits*, John Wiley & Sons.
- [37] Zhang D, Smith D, Kumarapuram G, Giridharan R, Kakita S, Rabie MA, Feng P, Edmundson H, England L (2015) Process development and optimization for 3 μm high aspect ratio via-middle through-silicon vias at wafer level. *IEEE Trans Semicond Manuf* 28:454–460.
- [38] Ranganathan, Nagarajan & Lee, Da & Youhe, Liu & Lo, Guo-Qiang & Prasad, Krishnamachar & Pey, Kin. (2011). Influence of Bosch Etch Process on Electrical Isolation of TSV Structures. *Components, Packaging and Manufacturing Technology*, *IEEE Transactions on*. 1. 10.1109/TCPMT.2011.2160395.
- [39] Okoro, C., & Obeng, Y. S. (2012). Effect of thermal cycling on the signal integrity and morphology of TSV isolation liner- SiO₂. 2012 IEEE International Interconnect Technology Conference. DOI: 10.1109/iitc.2012.6251582.
- [40] Civale, Y., Majeed, B., Tezcan, D. S., Soussan, P., & Beyne, E. (2010). Spin-on dielectric liner TSV for 3D wafer level packaging applications. 2010 IEEE International Interconnect Technology Conference. DOI: 10.1109/iitc.2010.5510314.
- [41] Civale Y, Redolfi A, Velenis D, Heylen N, Beynet J, Jung I, Woo JJ, Swinnen B, Beyer G, Beyne E (2012) Highly-conformal plasma-enhanced atomiclayerdeposition silicon dioxide liner for high aspect-ratio through-silicon via 3D interconnections. *Electronic System-Integration Technology Conference*: 1–4.
- [42] Inoue F, Shimizu T, Yokoyama T, Miyake H, Kondo K, Saito T, Hayashi T, Tanaka C, Terui T, Shingubara S (2011) Formation of electroless barrier and seed layers in a high aspect ratio through-Si vias using Au nanoparticle catalyst for all-

wet Cu filling technology. *Electrochimica Acta* 56:6245–6250.

[43] Inoue F, Shimizu T, Miyake H, Arima R, Ito T, Seki H, Shinozaki Y, Yamamoto T, Shingubara S (2013) Highly adhesive electroless barrier/Cu-seed formation for high aspect ratio through-Si vias. *Microelectron Eng* 106:164–167.

[44] Chen J, Fujita K, Goodman D, Chiu J, Papapanayiotou D (2015) Physicochemical effects of seed structure and composition on optimized TSV fill performance. *Electronic Compon Technol Conf*: 566-572.

[45] Hara, Yukihiro & Webb, Eric & Sukamto, John & Mariappan, Murugesan & Fukushima, Tak & Kodera, Masako. (2019). Impact of Seed Layers on TSV Filling by Electrochemical Deposition. 10.7567/SSDM.2019.J-2-02.

[46] Civale, Y. & Armini, Silvia & Philipsen, Harold & Redolfi, Augusto & Velenis, Dimitrios & Croes, Kristof & Heylen, Nancy & El-Mekki, Zaid & Vandersmissen, Kevin & Beyer, Gerald. (2012). Enhanced Barrier Seed Metallization for Integration of High-Density High Aspect-Ratio Copper-Filled 3D Through-Silicon Via Interconnects. *Proceedings — Electronic Components and Technology Conference*. 10.1109/ECTC.2012.6248928.

[47] Wong, S. & Ryu, Changsup & Lee, Haebum & Loke, Alvin & Kwon, Kee-Won & Bhattacharya, Som & Eaton, Rory & Faust, Rick & Mikkola, Bob & Mucha, Jay & Orm, John. (1999). Barrier/Seed Layer Requirements for Copper Interconnects. *Proceedings of the IEEE 1998 International Interconnect Technology Conference*. 10.1109/IITC.1998.704764.

[48] Henry D, Jacquet F, Neyret M, Baillin X, Enot T, Lapras V, Brunet-Manquat C, Charbonnier J, Aventurier B, Sillon N (2008) Through silicon vias technology for CMOS image sensors packaging. *Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*: 556-562.

[49] Gagnard X, Mourier T (2010) Through silicon via: from the CMOS imager sensor wafer level package to the 3D integration. *Microelectron Eng* 87:470–476.

[50] Saadaoui M, Wien W, Zeijl HV, Schellevis H, Laros M and Sarro PM (2007) Local sealing of high aspect ratio vias for single step bottom-up copper electroplating of through wafer interconnects. *IEEE Sensors conference*: 974 — 977.

[51] Chiang CH, Kuo LM, Hu YC, Huang WC, Ko CT, Chen KN (2013) Sealing bump with bottom-up Cu TSV plating fabrication in 3-D integration scheme. *IEEE Electron Device Lett* 34:671–673.

[52] Kobayashi K, Sano A, Akahoshi H, Itabashi T, Haba T, Fukada S, Miyazaki H (2000) Trench and via filling profile simulations for copper electroplating process. *IEEE International Interconnect Technology Conference*: 34-36.

[53] Chiu YD, Dow WP, Huang SM, Yau SL, Lee YL (2011) Sensitivity enhancement for quantitative electrochemical determination of a trace amount of accelerator in copper plating solutions. *J Electrochem Soc* 158:D290–D297.

[54] Huynh TMT, Hai NTM, Broekmann P (2013) Quasireversible interaction

of MPS and chloride on Cu(1 0 0) studied by in situ STM. *J Electrochem Soc* 160:D3063–D3069.

[55] Zheng Z, Stephens RM, Braatz RD, Alkire RC, Petzold LR (2008) A hybrid multiscale kinetic Monte Carlo method for simulation of copper electrodeposition. *J Comput Phys* 227:5184–5199.

[56] Dow WP, Liu CW (2006) Evaluating the filling performance of a copper plating formula using a simple galvanostat method. *J Electrochem Soc* 153:C190–C194.

[57] Tan CS, Chen KN, Koester SJ (2012) 3D intergration for VLSI systems. 92.

[58] Tan CS, Chen KN, Koester SJ (2012) 3D intergration for VLSI systems. 241.

[59] Chang HH, Shih YC, Hsu CK, Hsiao ZC, Chiang CW, Chen YH, Chiang KN (2008) TSV process using bottom-up Cu electroplating and its reliability test. *Electron Systeminteg Technol Conf*:645–650.

[60] Aibin Y, Lau JH, Soon WH, Kumar A, Hnin WY, Lee WS, Jong MC, Sekhar VN, Kripesh V, Pinjala D, Chen S, Chan CF, Chao CC, Chiu CH, Hunag CM, Chen C (2011) Fabrication of high aspect ratio TSV and assembly with fine-pitch low-cost solder microbump for Si interposer technology with high-density interconnects. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol* 1:1336–1344.

[61] Hofmann L, Ecke R, Schulz SE, Gessner T (2011) Investigations regarding through silicon via filling for 3D integration by periodic pulse reverse plating with and without additives. *Microelectron Eng* 88:705–708.

[62] Dow WP, Huang HS, Yen MY, Huang HC (2005) Influence of convection dependent adsorption of additives on microvia filling by copper electroplating. *J Electrochem Soc* 152:C425–C434.

[63] Moffat TP, Ou Yang LY (2010) Accelerator surface phase associated with superconformal Cu electrodeposition. *J Electrochem Soc* 157:D228–D241.

[64] Matsuoka T, Otsubo K, Onishi Y, Amaya K, Hayase M (2012) Inverse analysis of accelerator distribution in copper through silicon via filling. *Electrochim Acta* 82:356–362.

[65] Kim MJ, Kim HC, Choe S, Cho JY, Lee D, Jung I, Cho WS, Kim JJ (2013) Cu bottomup filling for through silicon vias with growing surface established by the modulation of leveler and suppressor. *J Electrochem Soc* 160:D3221–D3227.

[66] Chiu YD, Dow WP (2013) Accelerator screening by cyclic voltammetry for microvia filling by copper electroplating. *J Electrochem Soc* 160:D3021–D3027.

[67] Kondo K, Yonezawa T, Mikami D, Okubo T, Taguchi Y, Takahashi K, Barkey DP (2005) High-aspect-ratio copper-via-filling for three-dimensional chip stacking. *J Electrochem Soc* 152:H173–H177.

[68] Hayashi T, Kondo K, Saito T, Okamoto N, Yokoi M, Takeuchi M, Bunya M, Marunaka M, Tsuchiya T (2013) Correlation between filled via and produced cuprous ion concentration by reverse current waveform. *J Electrochem Soc*

160:D256–D259.

- [69] Hong SC, Lee WG, Kim WJ, Kim JH, Jung JP (2011) Reduction of defects in TSV filled with Cu by high-speed 3-step PPR for 3D Si chip stacking. *Microelectron Reliab* 51:2228–2235.
- [70] Moffat TP, Josell D (2012) Extreme bottom-up superfilling of through-silicon vias by damascene processing: suppressor disruption, positive feedback and turing patterns. *J Electrochem Soc* 159:D208–D216.
- [71] Zhang Y, Ding G, Wang H, Cheng P, Liu R (2015) Optimization of innovative approaches to the shortening of filling times in 3D integrated through silicon vias (TSVs). *J Micromech Microeng* 25:1–11.
- [72] Chen JC, Lau JH, Tzeng PJ, Chen SC, Wu CY, Chen CC, Hsin YC, Hsu YF, Shen SH, Liao SC, Ho CH, Lin CH, Ku TK, Kao MJ (2012) Effects of slurry in Cu chemical mechanical polishing (CMP) of TSVs for 3-D IC integration. *IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol* 2:956–963.
- [73] Yuwen, Hui-Hui & Zhang, Xin-Ping. (2016). Numerical simulation of the TSV-Cu filling by electroplating process with the accelerator and suppressor. 721-726. 10.1109/ICEPT.2016.7583233.
- [74] Choi, Jae Woong & Guan, Ong & Yingjun, Mao & Jieli, Xie & Lan, Chow & Kim, Soon-Wook & Murthy, Ramana & Kiat, Eugene & Wickramanayaka, Sunil. (2013). Effect of Cu seed layer aging on Cu filling failure in through Si vias (TSVs). 420-423. 10.1109/EPTC.2013.6745755.
- [75] Choi, Eun-Hey & Lee, Youn Seoung & Rha, Sa-Kyun. (2012). Effects of Current Density and Organic Additives on via Copper Electroplating for 3D Packaging. *Korean Journal of Materials Research*. 22. 10.3740/MRSK.2012.22.7.374.
- [76] Gusev, E.E., Tovarnov, D.A., Dedkova, A.A., Onufrienko, A.P., Djuzhev, N.A., Experimental Study Mechanical Stresses and Strength in Multilayer PECVD SiO₂ // *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2021*, 2021, стр. 2437–2441, 9396248, DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396248.
- [77] Novak, A.V., Novak, V.R., Dedkova, A.A., Gusev, E.E., Dependence of Mechanical Stresses in Silicon Nitride Films on the Mode of Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition // *Semiconductors*, Том 52, Выпуск 15, Стр. 1953 — 1957, 2018, DOI: 10.1134/S1063782618150095.
- [78] Dyuzhev, N.A., Gusev, E.E. et. al., Fabrication and Study of Parameters and Properties of Nanostructured Membranes for MEMS Devices, *Nanotechnologies in Russia*, 2017, 12(7-8), pp. 426–437, DOI: 10.1134/S1995078017040073.
- [79] Djuzhev, N.A., Gusev, E.E., Dedkova, A.A., Makhboroda, M.A., Non-destructive method of surface mapping to improve accuracy of mechanical stresses measurements // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, том 289, B. 1, 2018, DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012007.

- [80] Ji L, Jing X, Xue K, Xu C, He H, Zhang W (2014) Effect of annealing after copper plating on the pumping behavior of through silicon vias. In International Conference on Electronic Packaging Technology:101-104.
- [81] Malta D, Gregory C, Lueck M, Temple D, Krause M, Altmann F, Petzold M, Weatherspoon M, Miller J (2011) Characterization of thermo-mechanical stress and reliability issues for Cu-filled TSVs. Electronic Components and Technology Conference:1815-1821.
- [82] Heryanto A, Putra WN, Trigg A, Gao S, Kwon WS, Che FX, Ang XF, Wei J, Made R, Gan CL, Pey KL (2012) Effect of copper TSV annealing on via protrusion for TSV wafer fabrication. J Electron Mater 41:2533–2542.
- [83] Xiangmeng Jing, Hongwen He, Liang Ji, «Effect of Thermal Annealing on TSV Cu Protrusion and Local Stress», Electronic Components and Technology Conf, May2013, pp. 461-466.
- [84] Choi JW, Guan OL, Yingjun M, Mohamad Yusoff HB, Jieli X, Lan CC, Loh WL, Lau BL, Hwee Hong LL, Kian LG, Murthy R, SweeKiat ET (2014) TSV Cu filling failure modes and mechanisms causing the failures. IEEE Trans Compon Packag Manuf Technol 4:581–587

TSV — THE KEY TECHNOLOGY FOR CREATING THREE-DIMENSIONAL INTEGRATED CIRCUITS (3D ICS)

V.A. Bespalov, M.Y. Fomichev*, N.A. Djuzhev, M.A. Makhaboroda,
E.E. Gusev

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

Received 19.01.2022

3D integration with through-silicon via (TSV) is the most promising technology among all known system-level integration methods because it allows to create assemblies with the smallest dimensions, while providing the highest density of interconnects and the best performance. TSV fabrication is the key technology to permit communications between various strata of the 3D integration system. The review focuses on the main technological operations of TSV manufacturing: deep reactive-ion etching; formation of dielectric, barrier and seed layers; TSV filling. The requirements to the process parameters, the main characteristics of the functional layers and possible defects in the structures are presented.

Keywords: TSV, microassembly, 3D integration.

ОБЗОР МЕТОДОВ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМОКОМПРЕССИОННОГО БОНДИНГА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН

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

НИУ МИЭТ

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

Поступила 20.01.2022

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

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

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

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

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

УДК 621.792

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

Введение

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

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

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

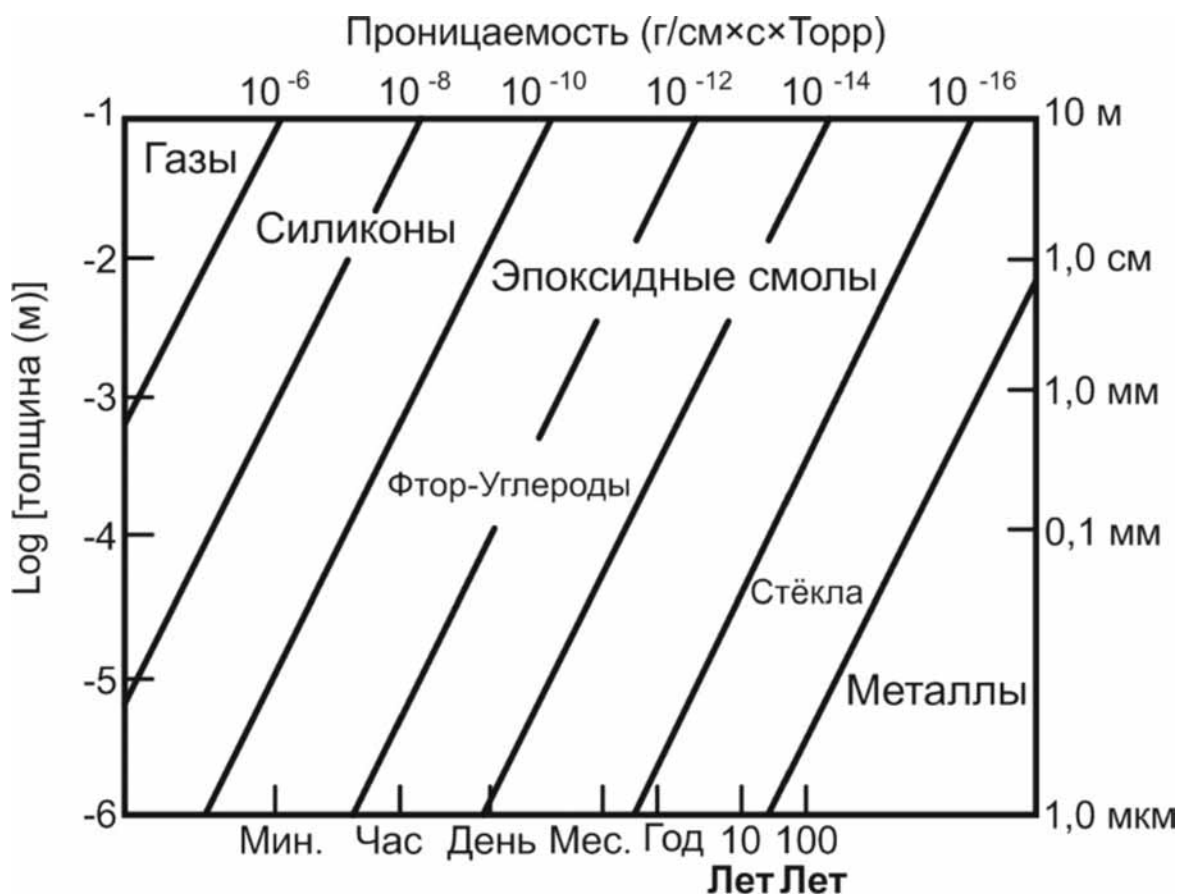


Рис. 1. Показатель герметичности для различных материалов.

1. Выбор метода соединения материала

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

1.1. Анодный бондинг.

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

1.2. Сращивание пайкой.

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

1.3. Эвтектический бондинг.

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

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

1.4. Бондинг с оплавлением стекла

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

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

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

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

1.6. Адгезивный бондинг

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

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

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

Таким образом, благодаря этому механизму в технологии адгезивного бондинга удастся наиболее легко и эффективно компенсировать недостатки поверхности, такие как неровности или наличие частиц.

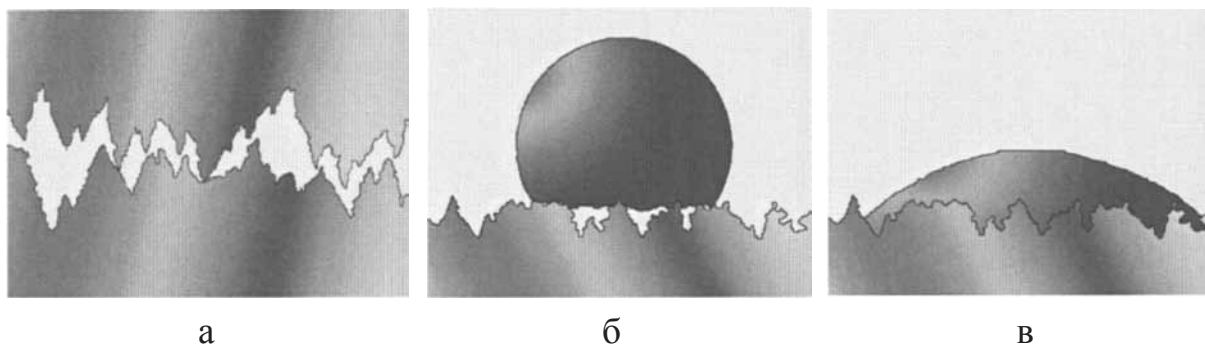


Рис. 2. (а) Две контактирующие макроскопически плоские твердые поверхности, (б) Твёрдая поверхность с жидкостью, которой она не смачивается и (в) поверхность, смоченная жидкостью.

Селективный или локализованный адгезивный бондинг достигается путем нанесения полимерного адгезива только на те участки, где требуется склеивание. Такое избирательное нанесение адгезива легко реализуется благодаря возможности делать это вручную. Технология также обеспечивает проведение разделения пластин механическим способом при комнатной температуре, что позволяет сохранить пластины целыми даже если одна из них является ультратонкой.

Благодаря этим особенностям адгезивный бондинг считается наиболее простым и при этом высокотехнологичным методом сращивания пластин, применяемым как для изготовления различных микро— и наноэлектронных устройств, датчиков и микросистем, так и для сборки либо герметизации различных компонентов. Метод успешно используется во многих областях, включая авиацию, космос и машиностроение.

К основным преимуществам адгезивного бондинга относятся использование в процессе относительно низких температур (между комнатной и 450 °С, в зависимости от материала полимера), отсутствие чувствительности к наличию топологии на поверхностях соединяемых пластин, полная совместимость со стандартной технологией КМОП и возможность сращивать подложки почти из любых материалов. Для проведения адгезивного бондинга не требуется специальная подготовка поверхности, такая как планаризация или тщательная очистка. Структуры и частицы на поверхностях пластин могут быть допущены и в некоторой степени компенсированы полимерным клеем. Несмотря на то, что адгезивное склеивание является сравнительно простым, надежным и недорогим процессом, необходимо учитывать такие вопросы, как ограниченная температурная стабильность

и ограниченная долгосрочная стабильность многих полимерных клеев в сложных условиях.

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

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

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

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

2. Термокомпрессионное герметичное соединение

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

Таблица 1 — Различные параметры процесса бондинга

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

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

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

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

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

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

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

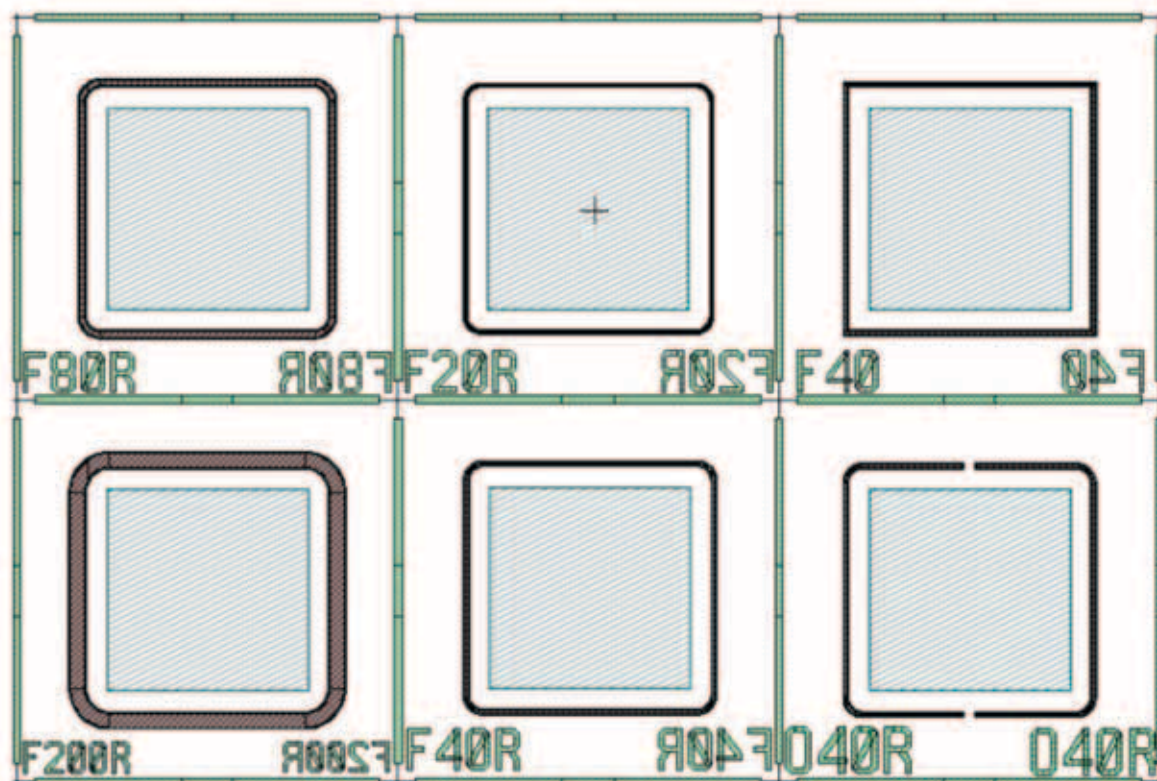


Рис. 3. Макет маски для шести дизайнов кадра. В левом нижнем углу каждого штампа есть ключ, описывающий конструкцию: «F» — рамка, «80» — номинальная ширина рамки 80 мкм, а «R» — закругленный угол [25]

Бондинг

Перед склеиванием на все верхние и нижние пластины методом напыления был нанесен слой TiW толщиной 400 нм и слой Au толщиной 1,2 мкм. Слои Au и TiW были сформированы путем жидкостного травления на верхних и нижних пластинах, оставив Au только в областях связующего каркаса. TiW был на 50 мкм шире, чем Au на верхней пластине, и на 20 мкм шире на нижней пластине. Чтобы допустить определенное смещение во время склеивания, Au-каркасы, нанесенные на верхние пластины, были на 40 мкм шире, чем их соответствующие выступающие каркасные структуры на нижних пластинах. На рисунке 4 схематически показано поперечное сечение склеенного кристалла [22].

Пластины были выровнены, а затем склеены в установке для бондинга пластин компании Suss MicroTec. Пластины были разделены прокладками в связующем слое после выравнивания. Окружающее давление в камере для склеивания было снижено до уровня ниже 5×10^{-3} мбар перед тем, как распорки были удалены. Термокомпрессионное склеивание выполняли путем приложения давления инструмента 2266 мбар при температуре склеивания в диапазоне 150–300 °С в течение 15 минут. Приложенное давление инструмента соответствовало давлению соединения 8,5 МПа. Обзор параметров склеивания четырех склеенных рамок приведен в таблице 2.

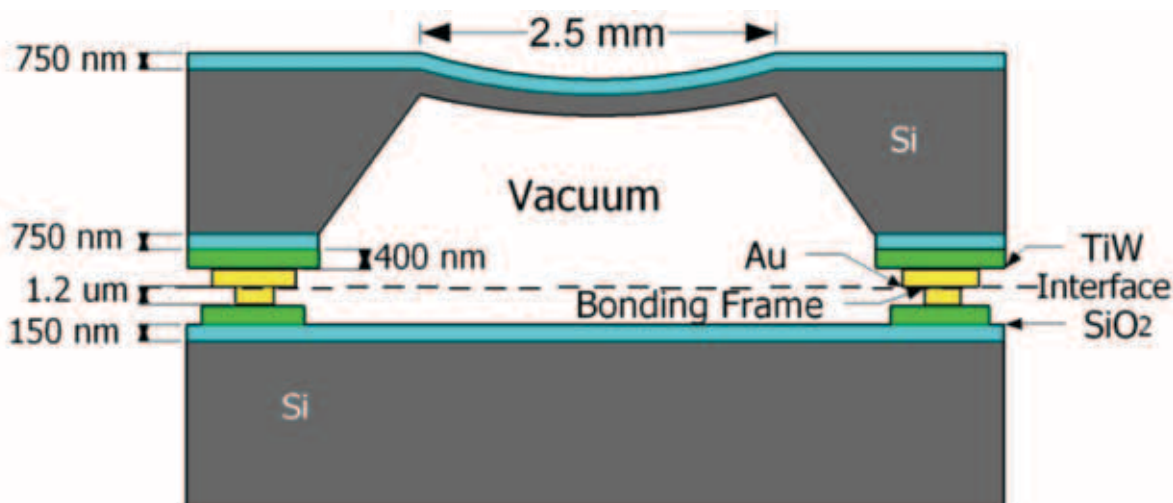


Рис. 4. Схематическое сечение приклеенной матрицы. Верхние пластины содержали мембранные структуры [22].

Таблица 2 — Обзор типов ламината и параметров бондинга

Идентификатор ламината	Давление инструмента, мбар	Температура, °С	Время, мин
Au150	2266	150	15
Au200	2266	200	15
Au250	2266	250	15
Au300	2266	300	15

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

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

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

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

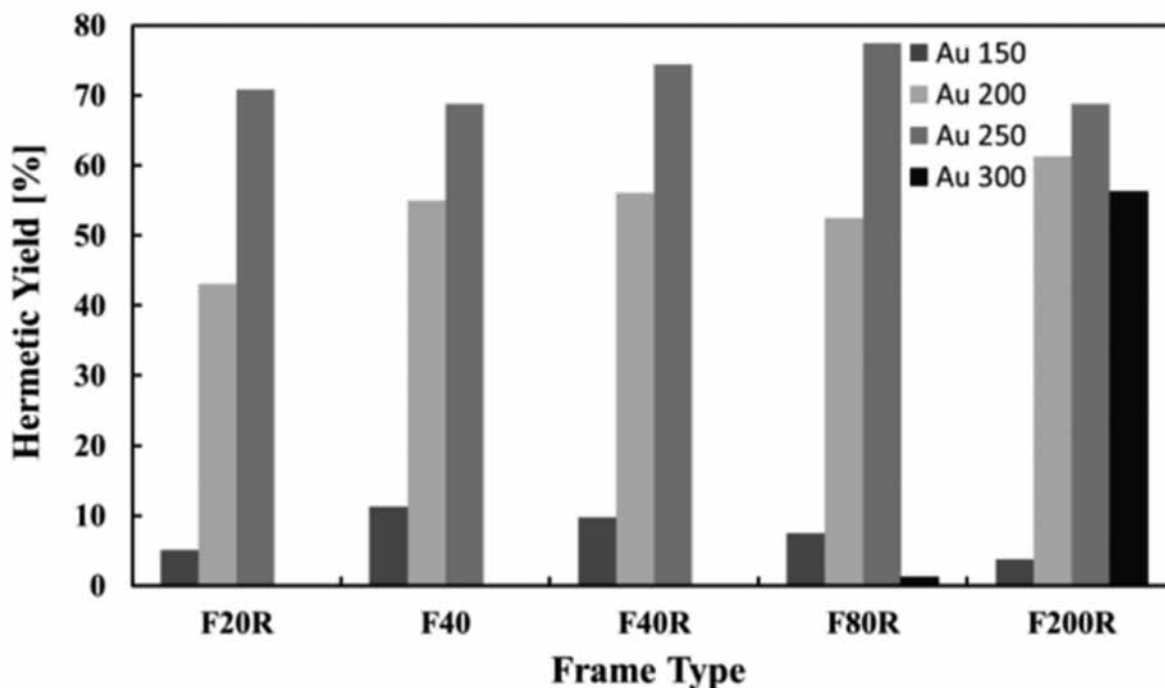


Рис. 5. Герметичность 401 штампа из всех склеенных ламинатов до испытаний на воздействие окружающей среды. Ламинаты склеивались в течение 15 минут при давлении инструмента 2266 мбар при различных температурах в диапазоне 150–300 °С [22].

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

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

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

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

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

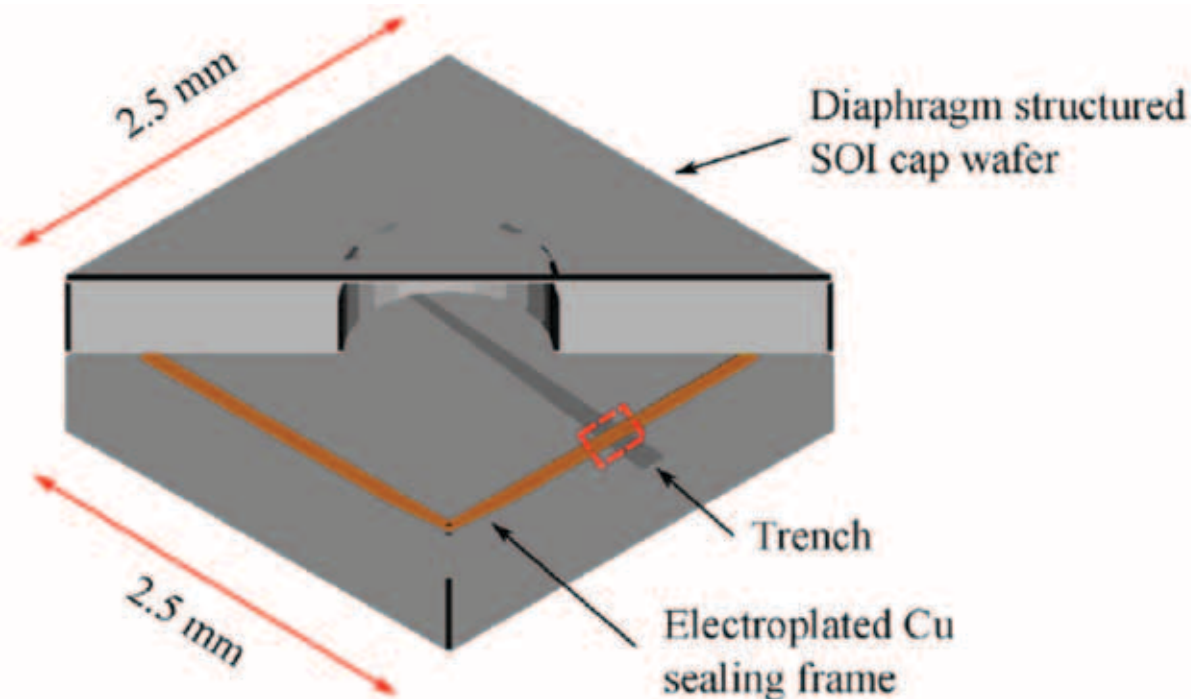


Рис. 6. Схематичное изображение устройства [19].

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

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

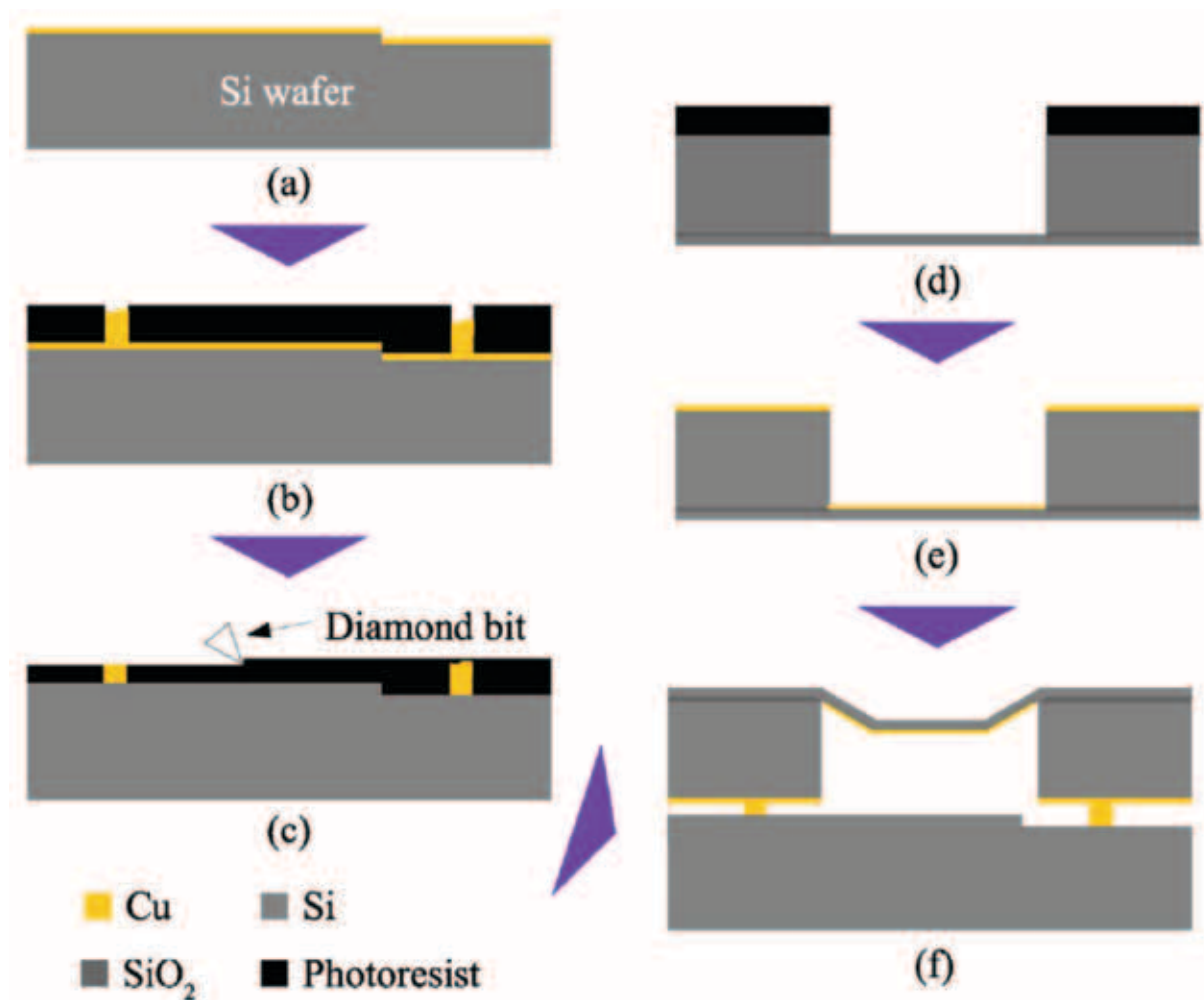


Рис. 7. Процесс изготовления испытательного устройства для склеивания.

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

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

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

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

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

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

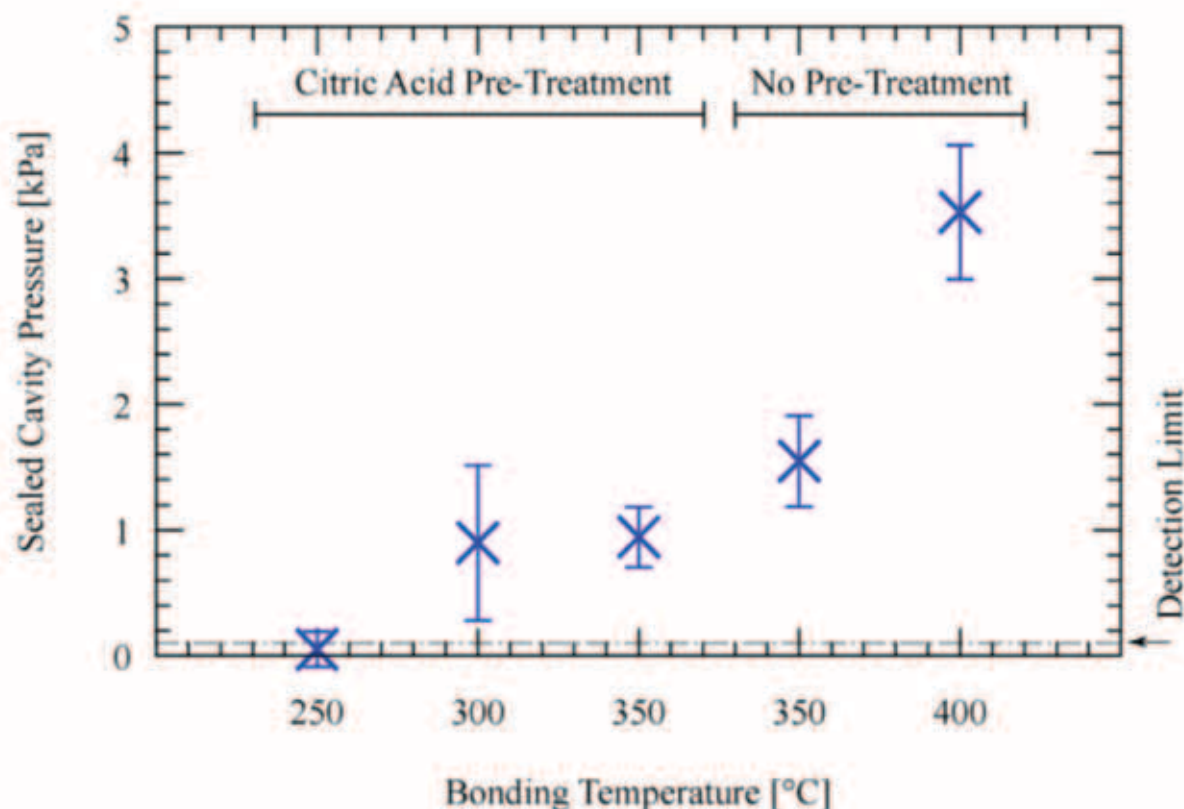


Рис. 8. Измерение давления в герметичной полости образцов, склеенных при различных температурах с предварительной обработкой поверхности и без нее [19]

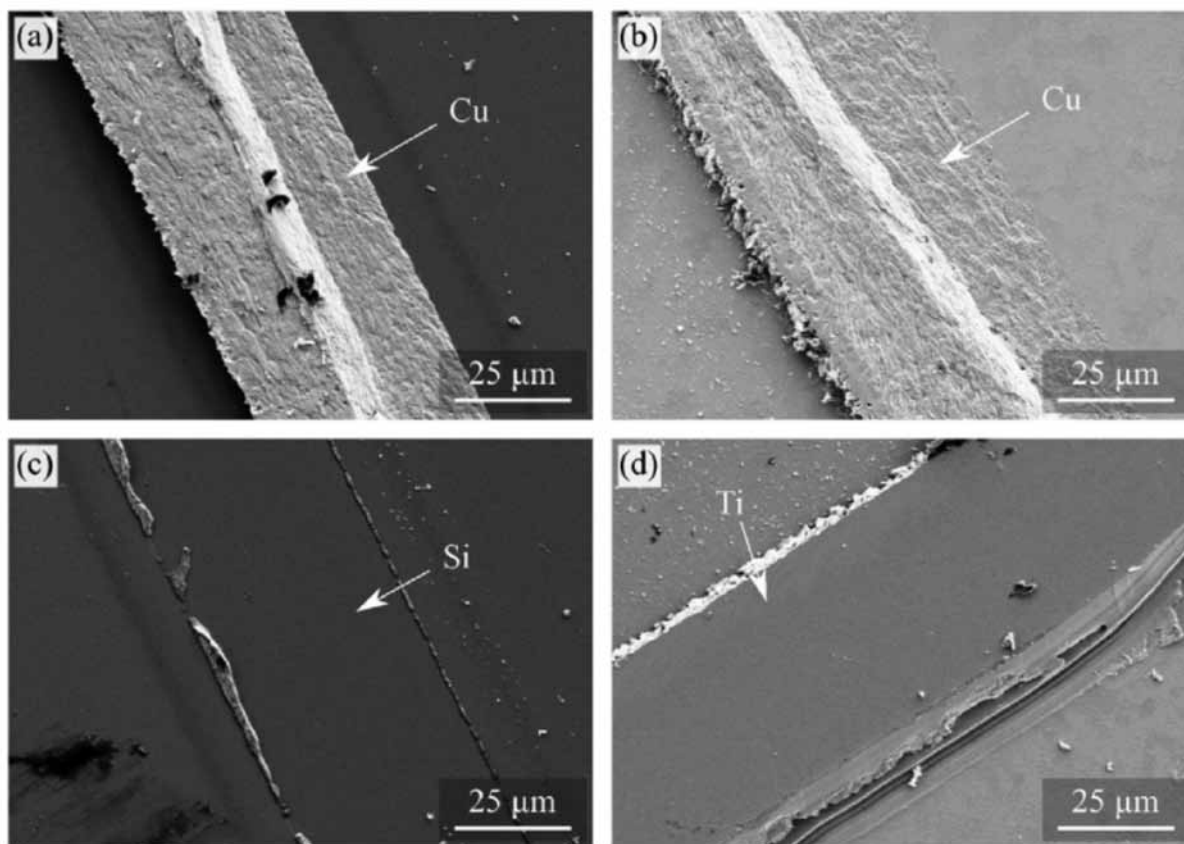


Рис. 9. РЭМ-изображения зачищенного интерфейса со стороны чипа устройства (а), со стороны чипа крышки диафрагмы (б) для склеивания при 350 °С без какой-либо предварительной обработки, (в) со стороны чипа устройства, (г) сторона чипа крышки диафрагмы для склеивания при 350 °С с предварительной обработкой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

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

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

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

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

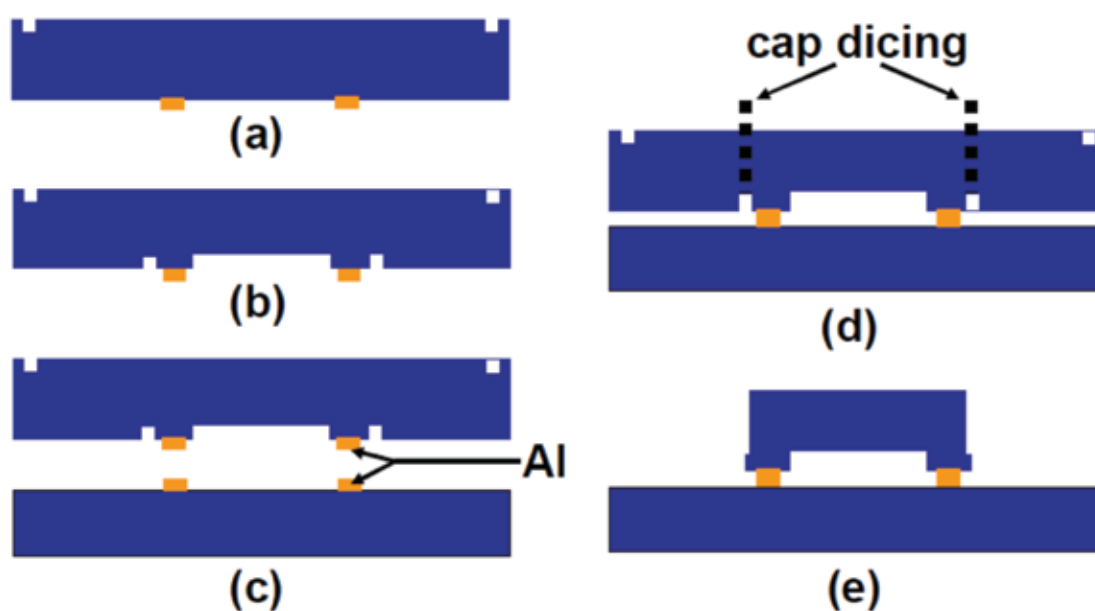


Рис. 10. Процесс изготовления крышек со связкой Al-Al для испытания на прочность сцепления и герметичность [8]

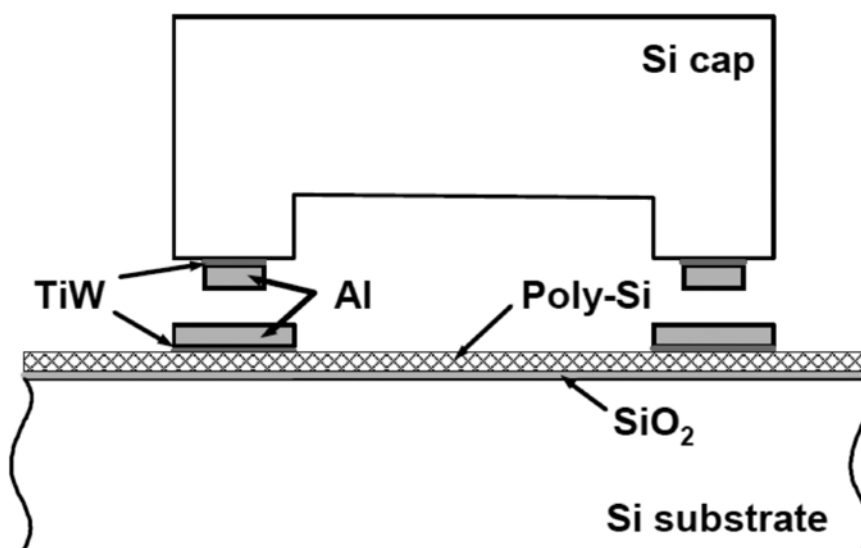


Рис. 11. Подробное изображение образца для испытания на склеивание.

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

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

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

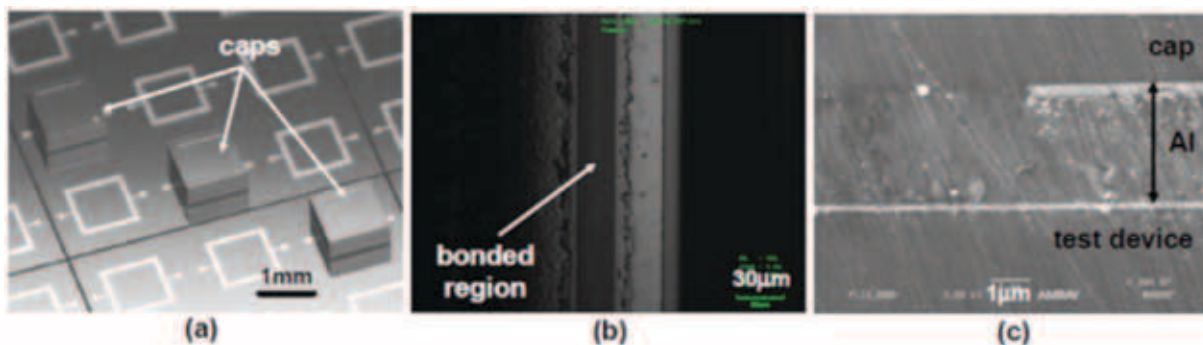


Рис. 12. (a) Крышки, соединенные Al-Al (b) ИК-микрофотография прикрепленного уплотнительного кольца. Из-за высокого усилия (18 кН) соединения излишки алюминия были выдавлены из области соединения. (c) Поперечное сечение соединения Al на сканирующем электронном микроскопе, не показывающее заметной границы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

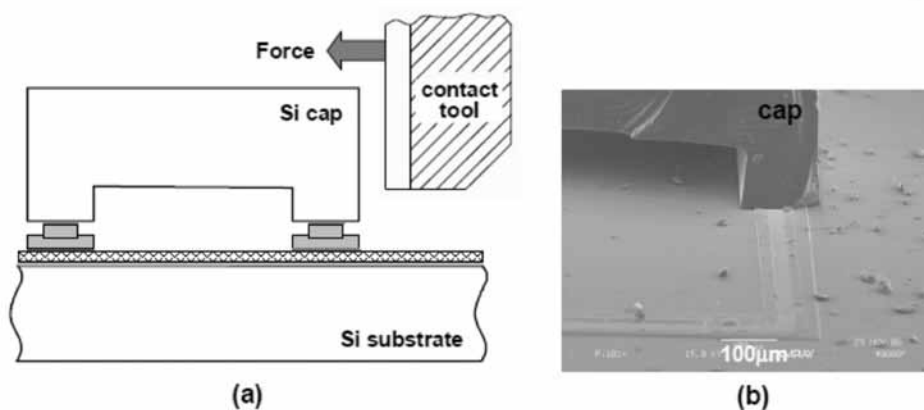


Рис. 13. (a) Измерение прочности связи на сдвиг кристалла. (b) Трещина крышки Si после испытания на сдвиг [8].

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

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

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

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

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

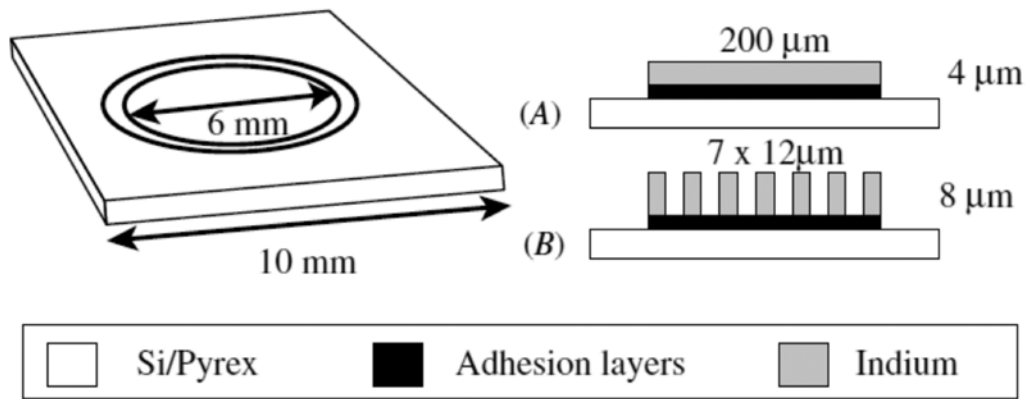


Рис. 14. На левом рисунке показан образец для испытания на растяжение с металлическим кольцом шириной 200 мкм. На схемах справа описаны различные стандартные варианты металлизации, используемые для испытаний на растяжение и скорость утечки. (А) Плоская пластина. (В) Пластина с адгезионным слоем шириной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

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

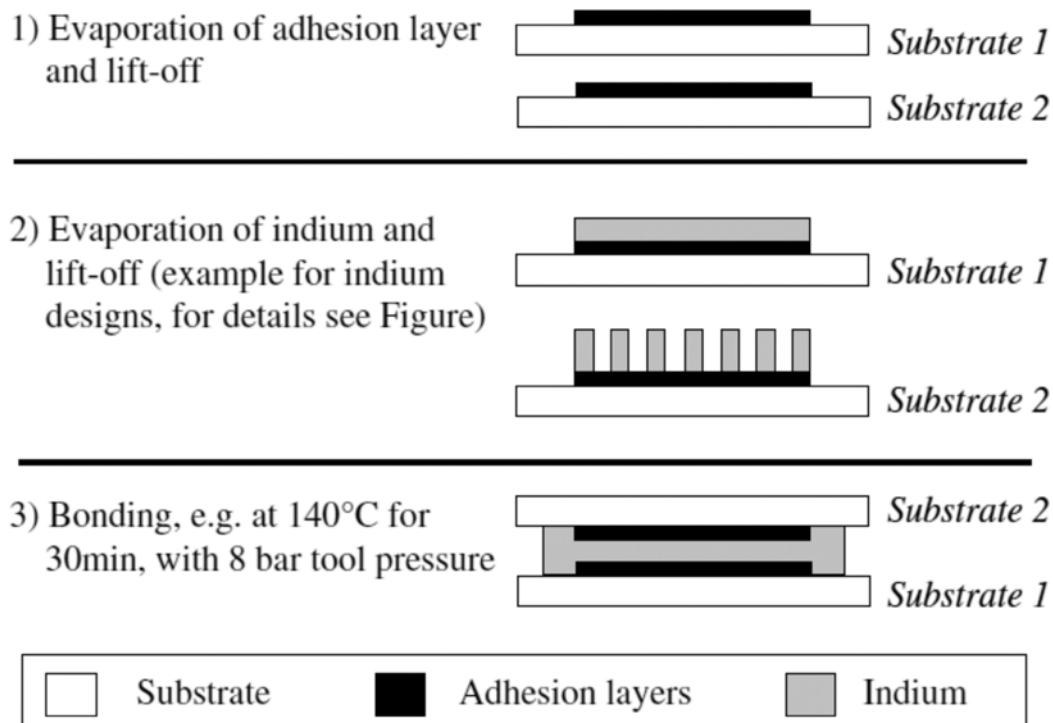


Рис. 15. Базовый процесс бондинга In-In [26].

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

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

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

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

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

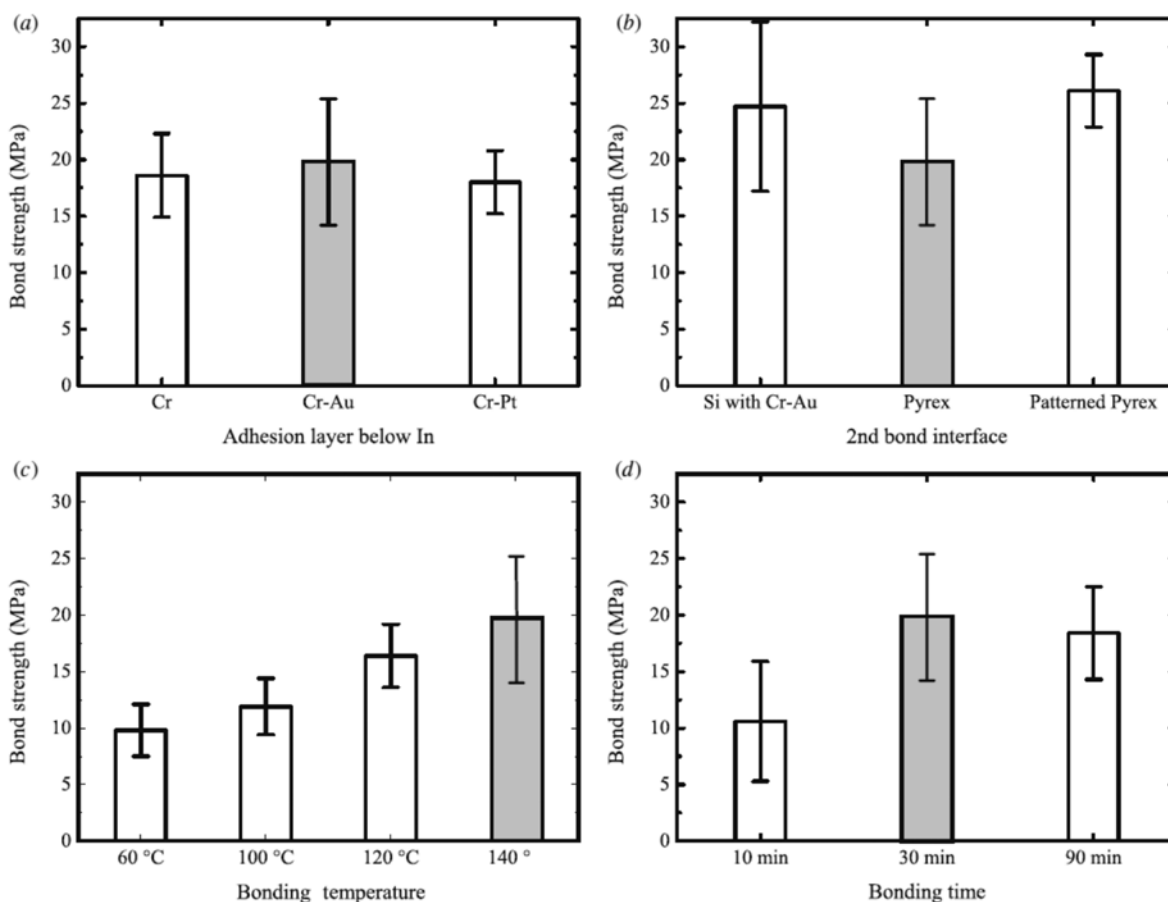


Рис. 16. Сравнение прочности на растяжение для разных параметров.

(а) Различный адгезионный слой под индием.

(б) Различные субстраты.

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

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

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

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

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

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

3.1. Стандартное соединение чистых пластин Al-Al

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

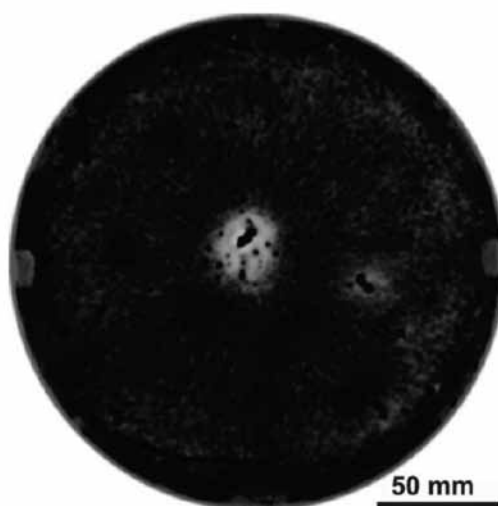


Рис. 17. Результат C-SAM для алюминиевых пластин диаметром 200 мм (стандартное напыление), склеенных при 550 °С в течение 3 часов и напряжением 60 кН [13].

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

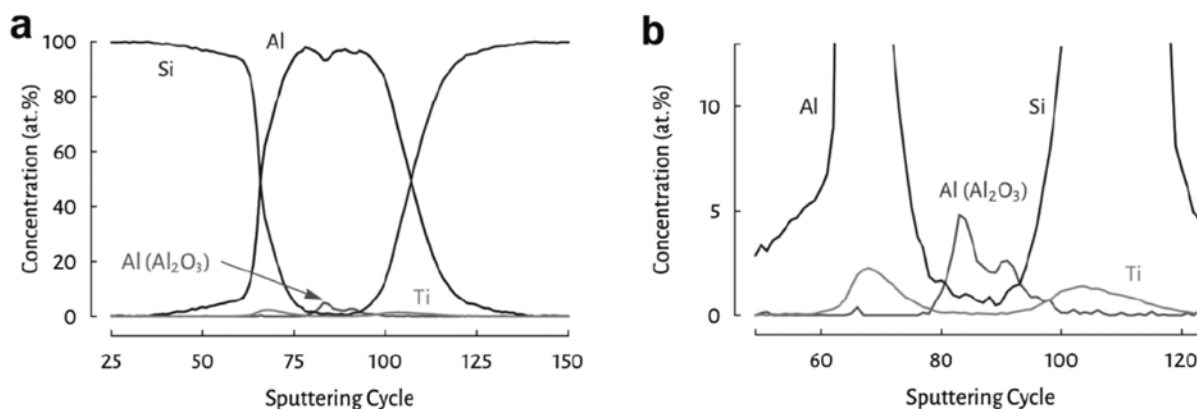


Рис. 18. Профиль AES по глубине связанной пары пластин Al ALPS толщиной 300 нм, показывающий структуру поверхности пластины (Si-Ti-Al), а также присутствие оксида алюминия на границе раздела. На (b) представлен более подробный вид циклов распыления вокруг поверхности соединения [13].

3.2. Соединение чистых пластин Al-Al с предварительной обработкой

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

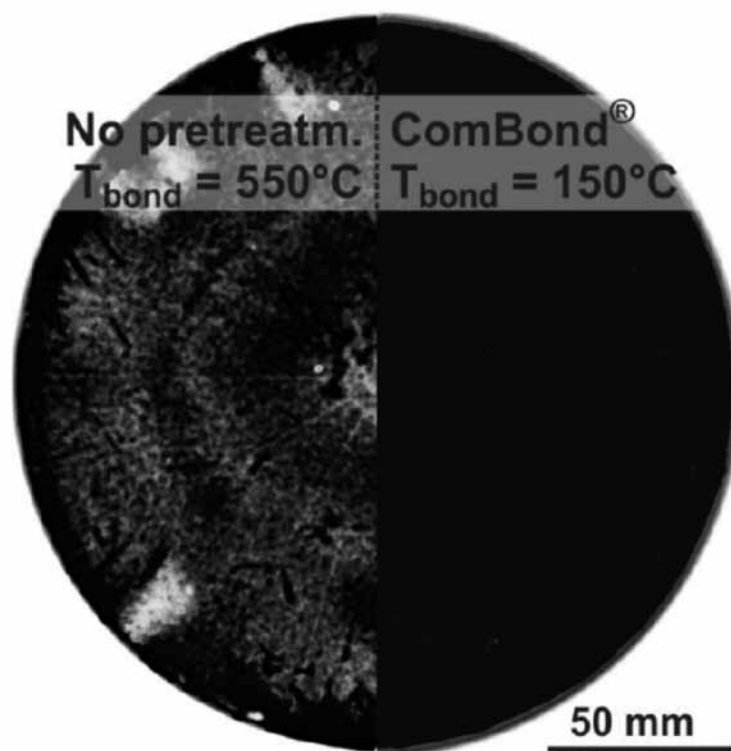


Рис. 19. C-SAM изображения пар склеенных пластин Al ALPS (слева) без предварительной обработки и (справа) с обработкой поверхности ComBond® перед склеиванием пластин. Обе пары пластин склеивали при 60 кН (1,9 МПа) в течение 1,5 часов [13].

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

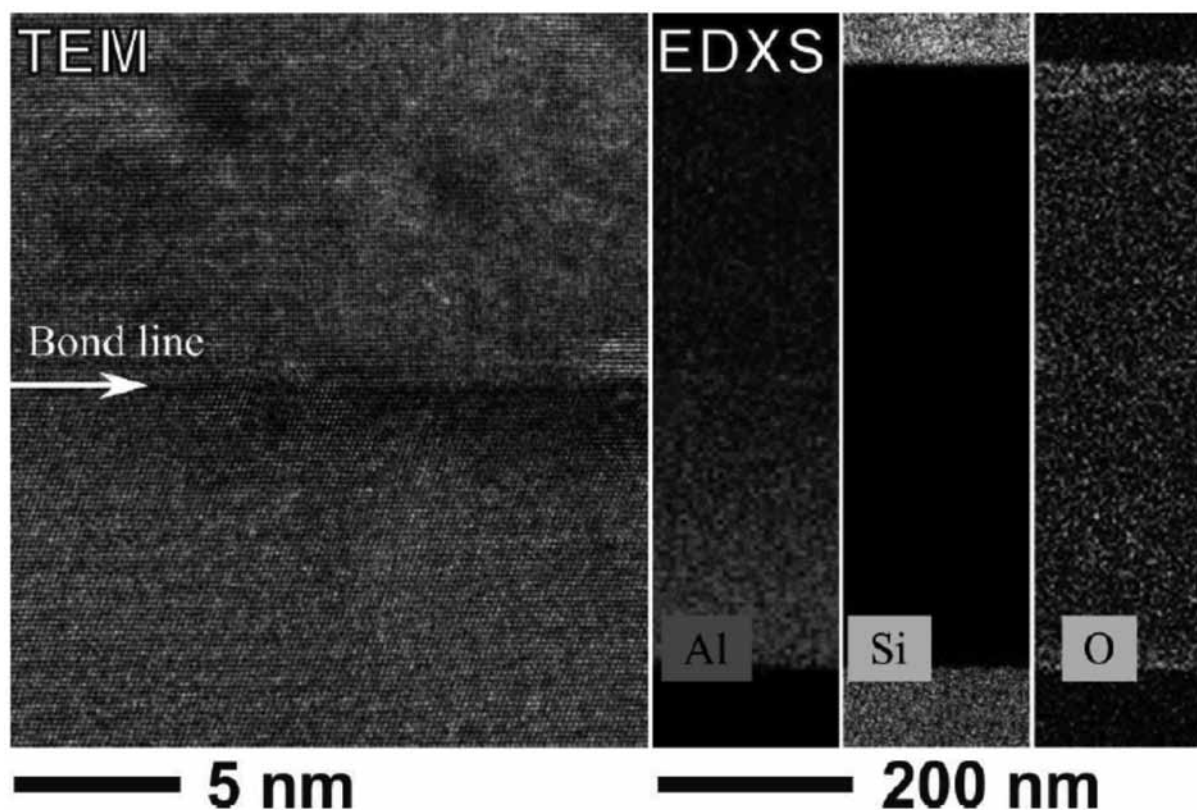


Рис. 20. ПЭМ-изображение с высоким разрешением и карта EDXS границы раздела пары пластин из Al с предварительно обработанной поверхностью и низкотемпературной связкой, демонстрирующие атомный контакт без оксидов. Пара пластин склеивалась при 60 кН (1,9 МПа) и температуре 150 °С в течение 1 часа [30].

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

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

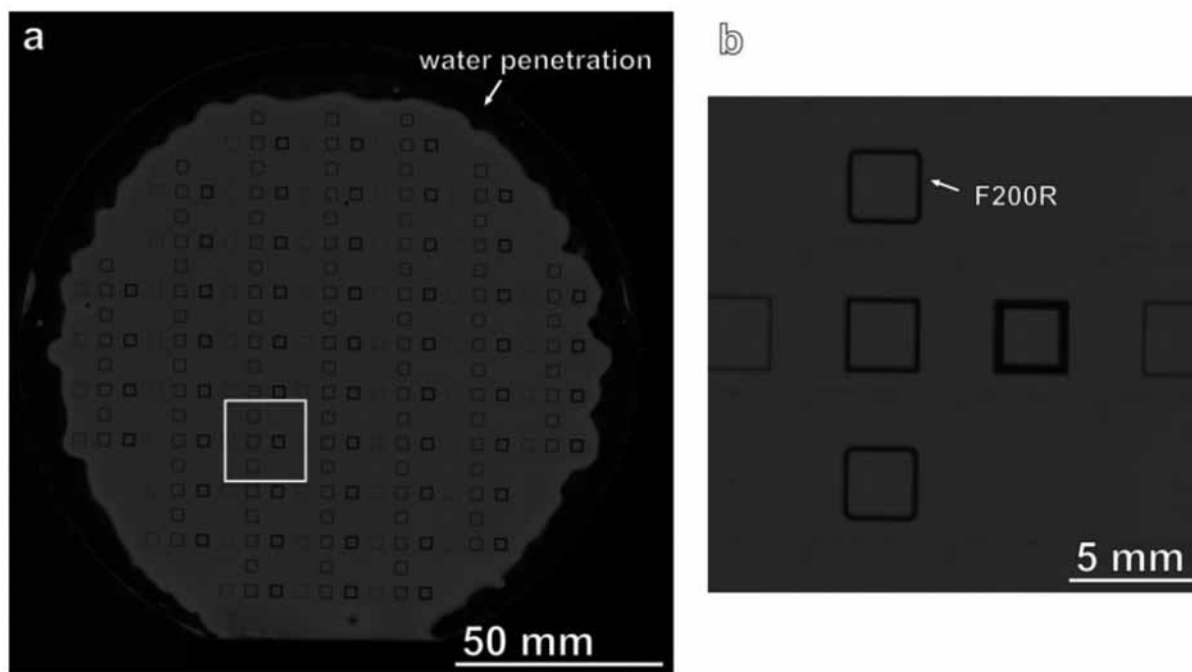


Рис. 21. Измерение C-SAM каркасных пластин после обработки поверхности и последующего склеивания при 100 °С в течение 1 часа с усилием 60 кН (114 МПа).

На (b) показано подробное сканирование скрепляющих рамок.

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

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

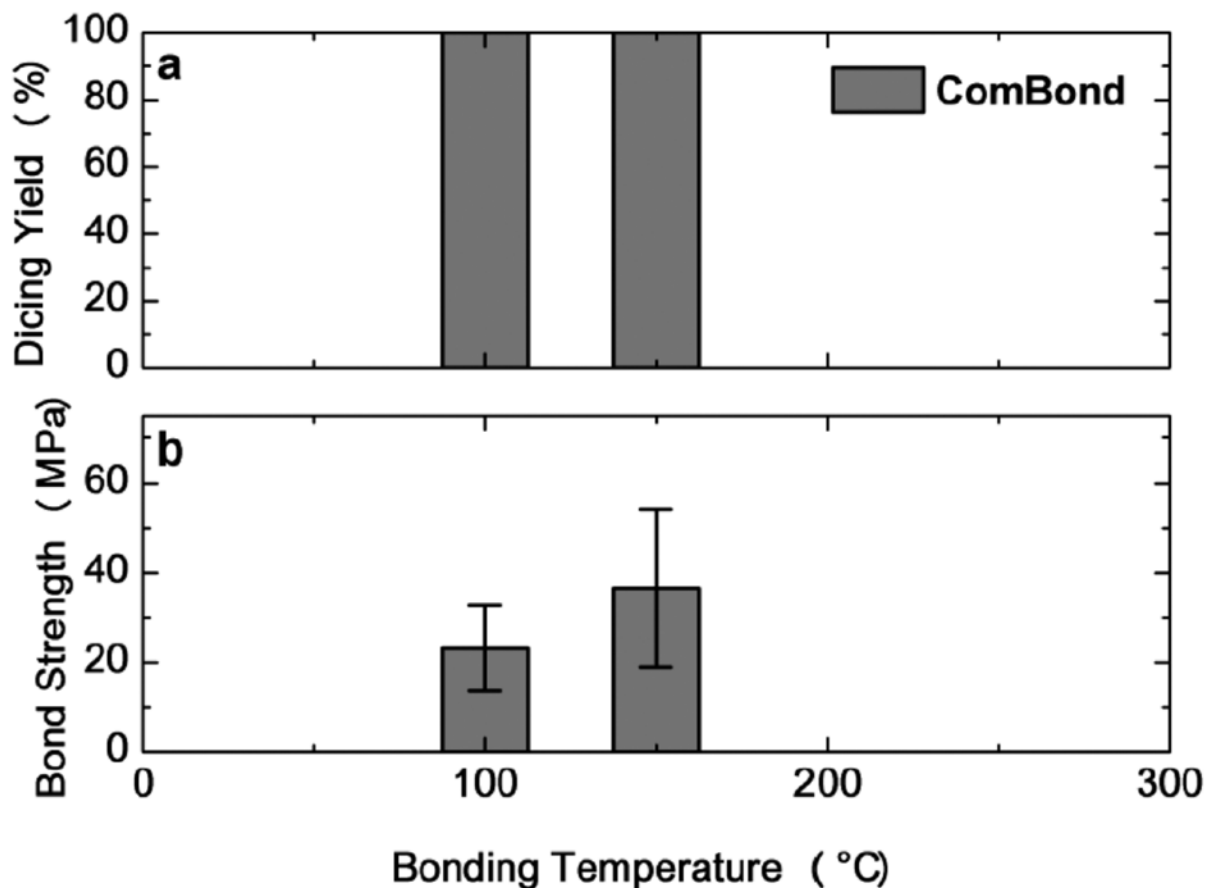


Рис. 22. Сравнение результатов (а) текучести нарезания кубиками и (б) прочности сцепления при растяжении.

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

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

3.4. Соединение пластин Al-Al с добавлением примесного материала

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

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

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

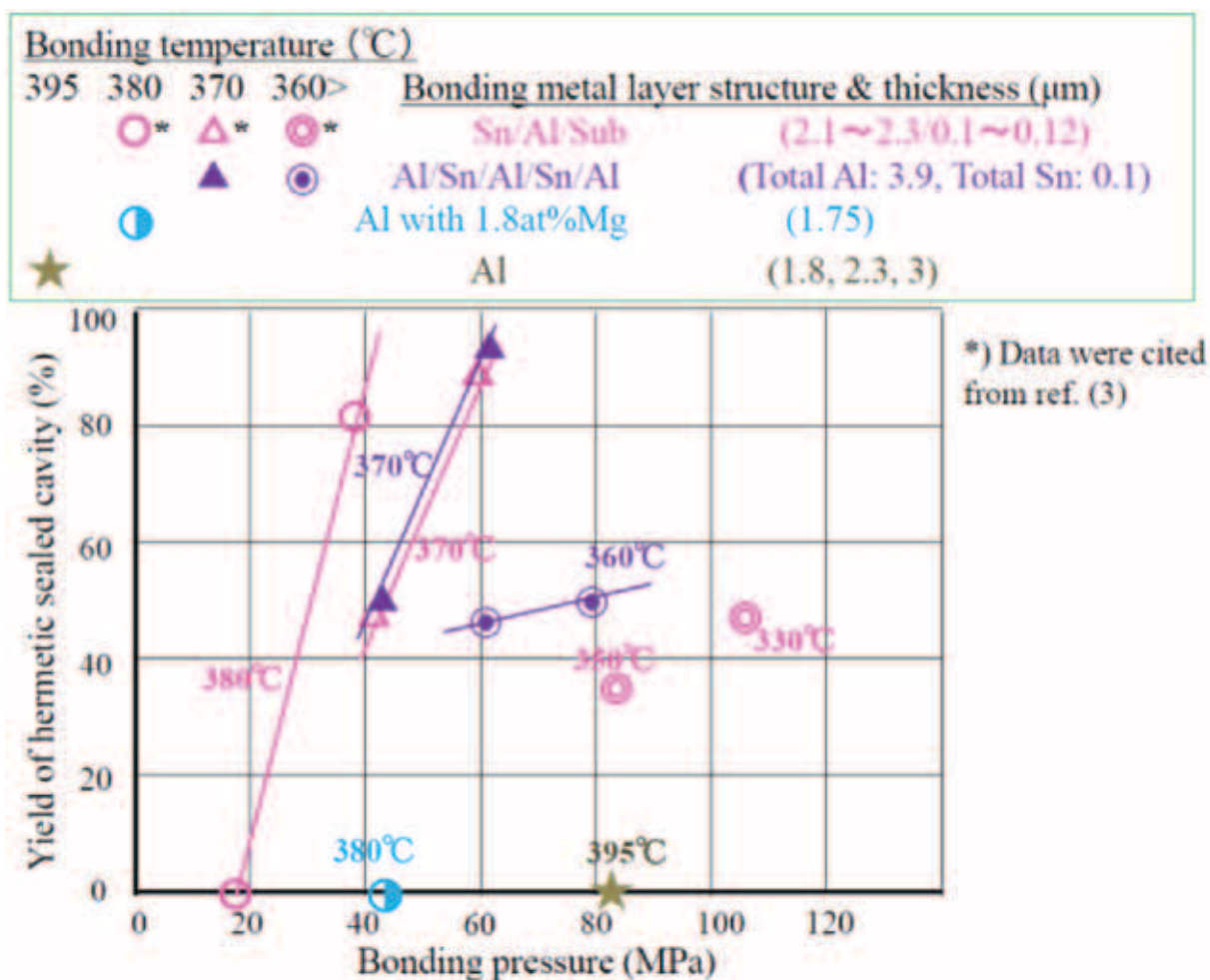


Рис. 23.Выход герметичной полости в зависимости от давления склеивания [18].

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

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

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

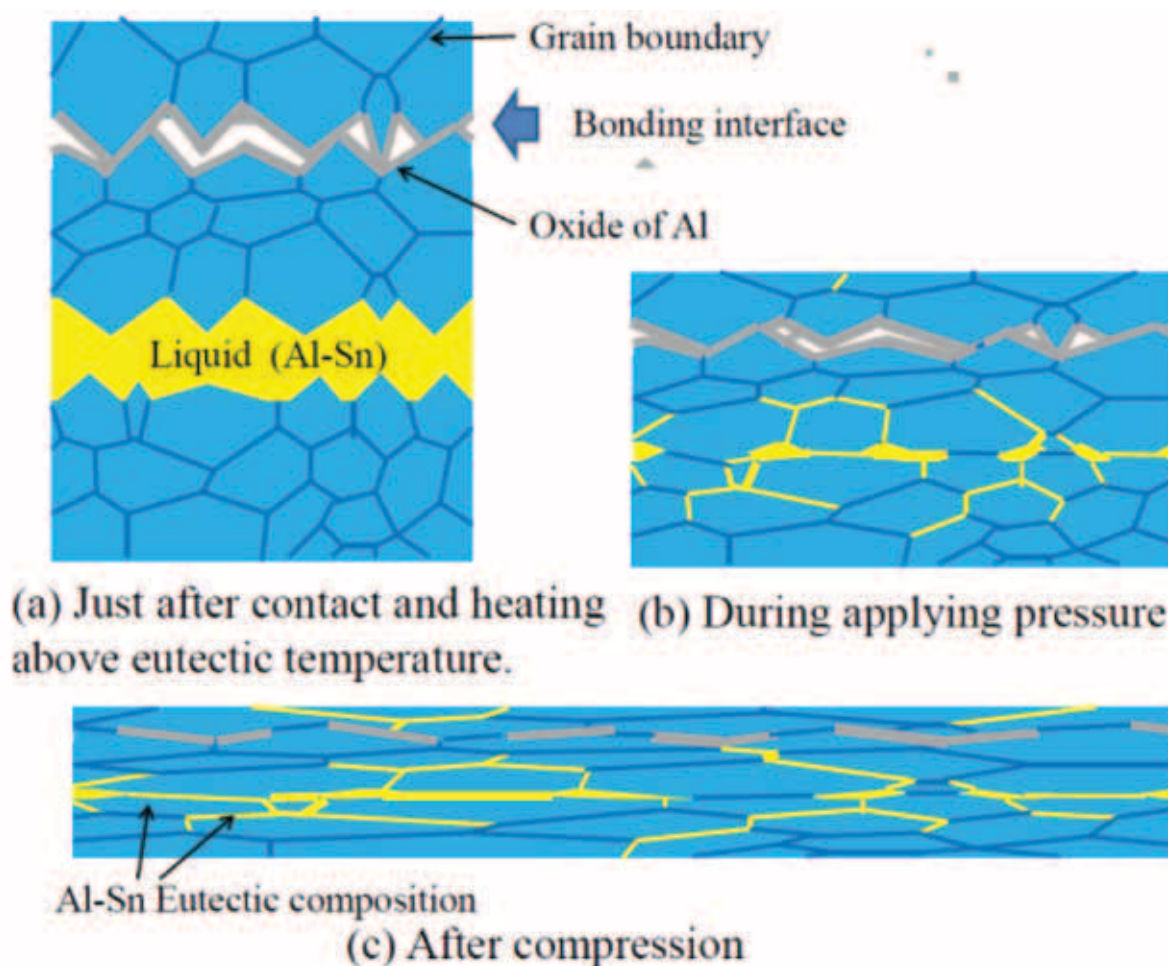


Рис. 24. Переходная модель интерфейса связывания [32].

4. Вывод соединяющих шин из рабочей области герметизации

4.1. Вывод через периферийную область

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

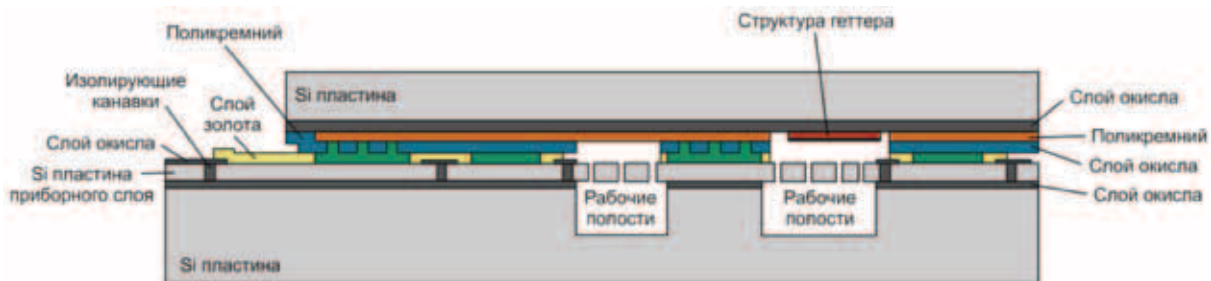


Рис. 25. Устройство с выводом соединяющих шин через периферийную область.

4.2. Вывод через обратную сторону основания

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

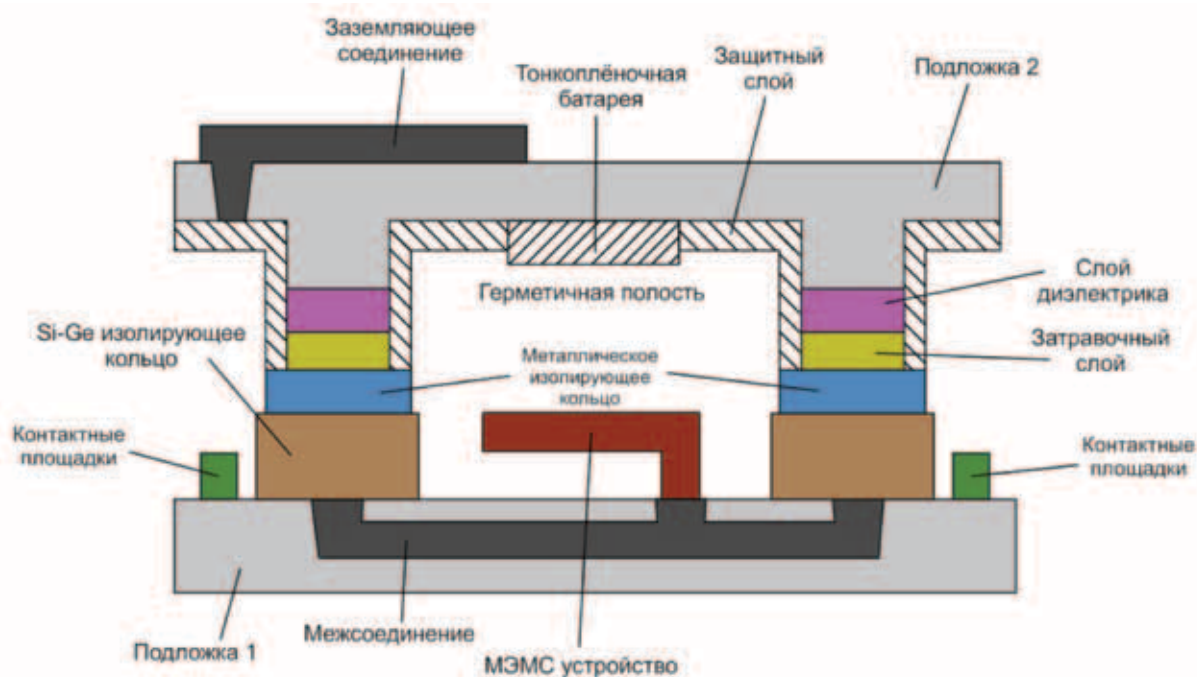


Рис. 26. Устройство с выводом соединяющих шин через обратную сторону основания.

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

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

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

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

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

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

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

Литература

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

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

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

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

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

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

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

Received 20.01.2022

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

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

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

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

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

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ОБЛАСТЯХ СО СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ (ОДНОРОДНАЯ И БЛОЧНАЯ СРЕДЫ)

И.А. Лазичный

*Московский физико-технический институт
E-mail: ivanlazichny@gmail.com*

Поступила 11.03.2022

Цель данной работы заключается в изучении распределения плотности кинетической энергии в областях со сложной геометрией (однородная и блочная среды). В работе смоделирована математическая модель распространения упругих волн, которая представляет собой начально-краевую задачу для системы уравнений упругой динамики с наличием в области интегрирования внутренних границ. Проведены серии вычислительных экспериментов, в ходе которых были исследованы распределения плотности кинетической энергии в областях со сложной геометрией и различной частотой работы виброисточника при его продолжительной работе. В ходе проведения работы использовались такие методы исследования, как анализ, синтез, описание, обобщение и эксперимент. В результате проведенной работы сделан вывод о том, что модель применима для проведения содержательных экспериментов по исследованию распространения упругих волн в средах со сложной геометрией, внутренними границами и разными условиями сопряжения. Алгоритм показал высокую точность и скорость.

Ключевые слова: кинетическая энергия, задача римана, однородная среда, блочная среда, плотность, упругие волны, геометрия.

DOI: 10.31145/2224-8412-2022-22-1-81-88

Многие прикладные задачи сводятся к исследованию особенностей распространения упругих волн от постоянно действующего или действующего длительное время вибрационного источника, в сильно неоднородной среде, среде с внутренними границами, на которых реализуются различные условия сопряжения, отражающие различные физические условия на этих границах, в среде со сложной геометрией внутренних и внешних границ. При этом нередко необходимо рассматривать ситуации, когда размер виброисточника мал в сравнении с характерными размерами моделируемого явления и его (источник) целесообразно рассматривать как точечный. Исследование методами математического моделирования таких задач накладывает особые требования на используемый численный алгоритм решения начально-краевых задач. А именно, полученное решение начально-краевой задачи должно соответствовать условиям сопряжения на внутренних границах и граничным условиям на внешних границах.

Так как предполагается моделирование на длительные периоды времени работы источника, численная модель должна допускать реализацию неотражающих граничных условий. В противном случае, искусственные волны, отраженные от внешних границ, радикально исказят реальную картину волнового поля.

Численный алгоритм должен допускать обращение к точечным источникам. Традиционное решение проблемы малых по сравнению с характерными размерами задачи источников, состоящее в сгущении сетки в месте расположения источника, приводит в силу условий Куранта к неоправданному уменьшению расчетного шага по времени и, как следствие, к значительному увеличению общего времени расчета.

Поскольку предполагается исследование интерференции волн от разных источников и отраженных от различных, сложно устроенных внутренних и внешних границ, численный алгоритм должен иметь высокую точность и в тоже время быть достаточно быстрым, допускать эффективное распараллеливание.

В рамках выполнения данной работы была построена модель, которая основывается на необходимости нахождения решения задачи Коши для систем дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами, в рамках которого исходные данные являются непрерывными на всем исследуемом промежутке, но могут терпеть разрывы по некоторым гиперплоскостям. Вид задачи Коши, в соответствии с [1], имеет вид

$$\frac{\delta u(t, x)}{\delta t} + \sum_i^N A_i \frac{\delta u(t, x)}{\delta x_i} = 0, x \in R^N. \quad (1)$$

Данный вид задачи на практике чаще всего называется обобщенной задачей Римана с условиями на границе сопряжения [1]. Решение подобного рода задач, в зависимости от различных условий на границе, применяется для построения численных алгоритмов, которые используются для определения приближенных решений качально краевой задачи для гиперболических систем линейных дифференциальных уравнений первого порядка с постоянными коэффициентами [2].

Окончательный вид системы уравнений, являющихся решением данной задачи для исходных данных, являющихся непрерывными, кроме одной гиперплоскости, и для которых выполняется условие сопряжение с каждой из сторон такой гиперплоскости, можно записать в виде [3]

$$\begin{cases} l_{k1} \frac{\delta u}{\delta t}(t, x) = -l_{k1} \sum C_k \frac{\delta u}{\delta L_k(t, x)} \\ B \frac{\delta u}{\delta t}(t, x) = \frac{\delta b}{\delta t}(t) \end{cases}. \quad (2)$$

Используя выражение (2) и, подставляя в него определенные начальные условия для выбранной среды, становится возможным произвести необходимые вычисления для решения определенных задач. В рамках данной работы для этого применялся пакет Matlab.

В рамках первого эксперимента рассматривалась однородная прямоугольная среда с координатами $(-50, 0)$ и $(50, -50)$ — левый верхний угол и правый нижний, соответственно. В точке с координатами $(0, 0)$ был установлен периодический точечный источник вибрации. Сила воздействия данного источника направлена вертикально вниз и изменяется по закону $A \cdot \sin \omega t$, где A и ω являются амплитудой и частотой источника, соответственно. В данном эксперименте было исследовано распространение упругого возмущения точечного источника при разных частотах и амплитудах. На поверхности области задавались свободные граничные условия. На рисунке 1 и 2 приведены графики распределения плотности кинетической энергии упругой волны при частоте работе источника $\omega = 50$ Гц в различные временные моменты.

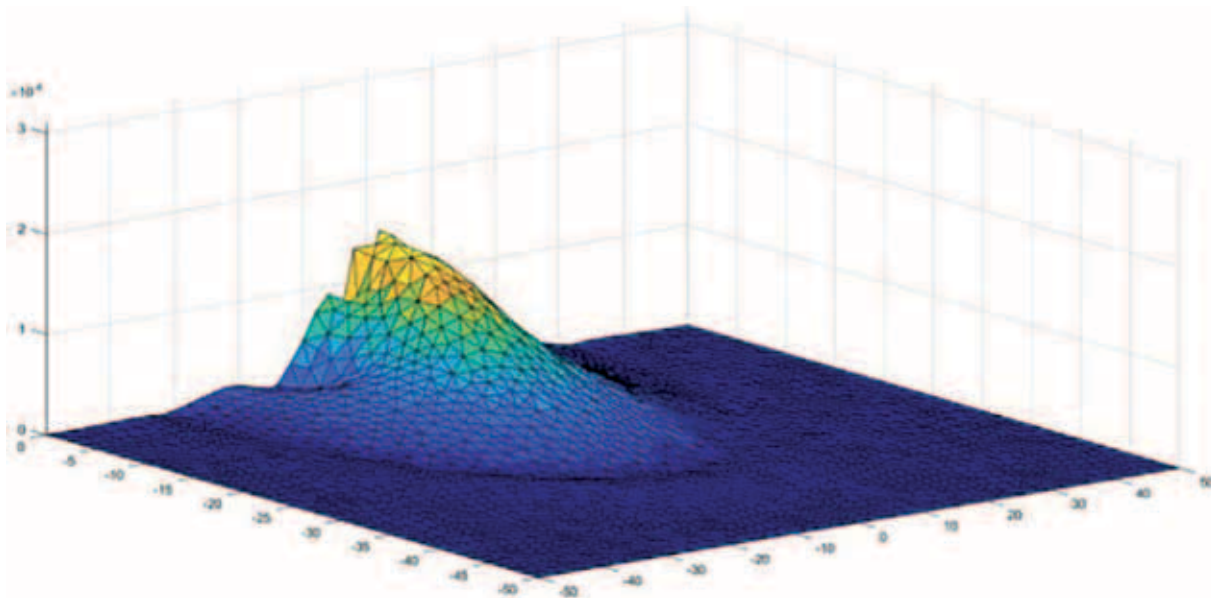


Рис. 1. Распределение плотности кинетической энергии в момент времени $t = 0,05$ с.

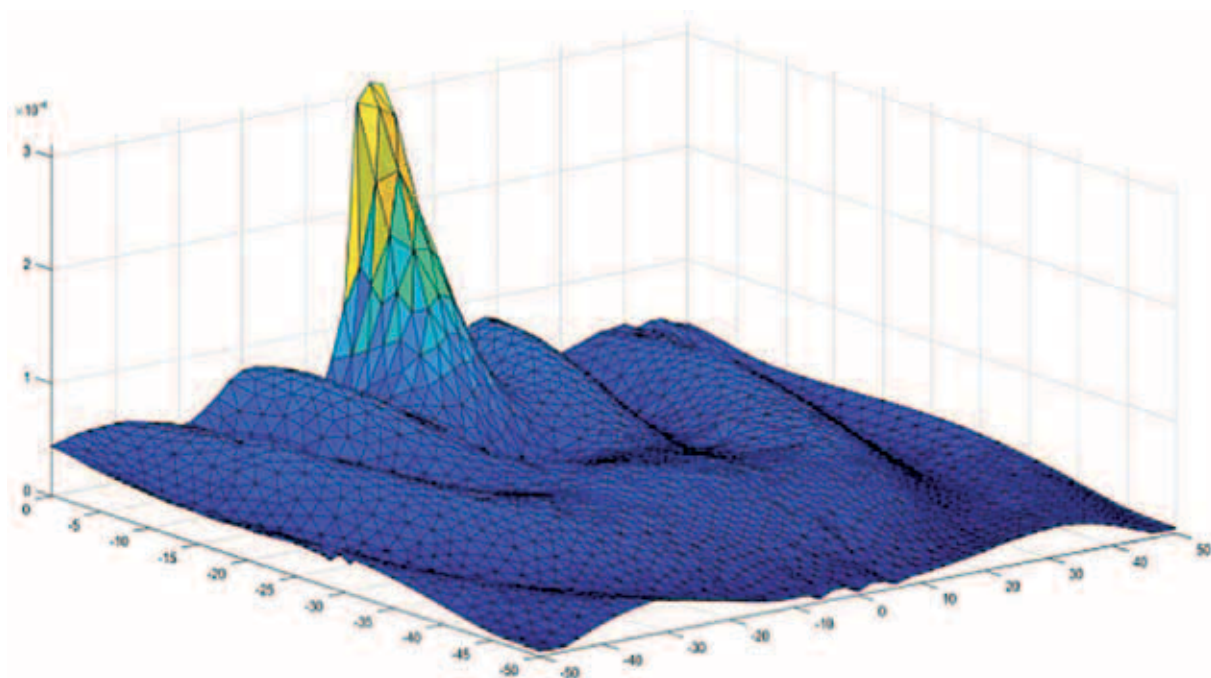


Рис. 2. Распределение плотности кинетической энергии в момент времени $t = 0,45$ с.

Из распределения плотности кинетической энергии можно с уверенностью сказать, что данная вычислительная модель позволяет смоделировать распространения волн от точечного источника верно: корректно реализованы прозрачные граничные условия, упругие волны проходят через границы области без отражений. Модель способна работать с точечным источником.

В следующей серии вычислительных экспериментов исследовалось распространение упругих волн в блочной среде при наличии внутренних границ со следующими условиями сопряжения на данных границах:

- условие «полного слипания»;
- условие «проскальзывания».

Была смоделирована ситуация, в которой упругие волны распространялись в блочно-трещиноватой среде, которая имеет размеры 600 м по вертикали и 60 м по горизонтали. Внутри этой области имеются внешние и внутренние вертикальные границы, разделяющие область на блоки. На поверхности установлен точечный периодический источник вибрации, сила воздействия которого направлена вертикально вниз. Работает данный источник по тому же закону, который был описан в предыдущем вычислительном эксперименте. На поверхности области были сформированы те же условия, как и в предыдущем вычислительном эксперименте. На рисунке 3 показаны результаты численных экспериментов по изучению распределения плотности кинетической энергии в блочно-трещиноватой среде при реализации на внутренних границах условия «полного слипания».

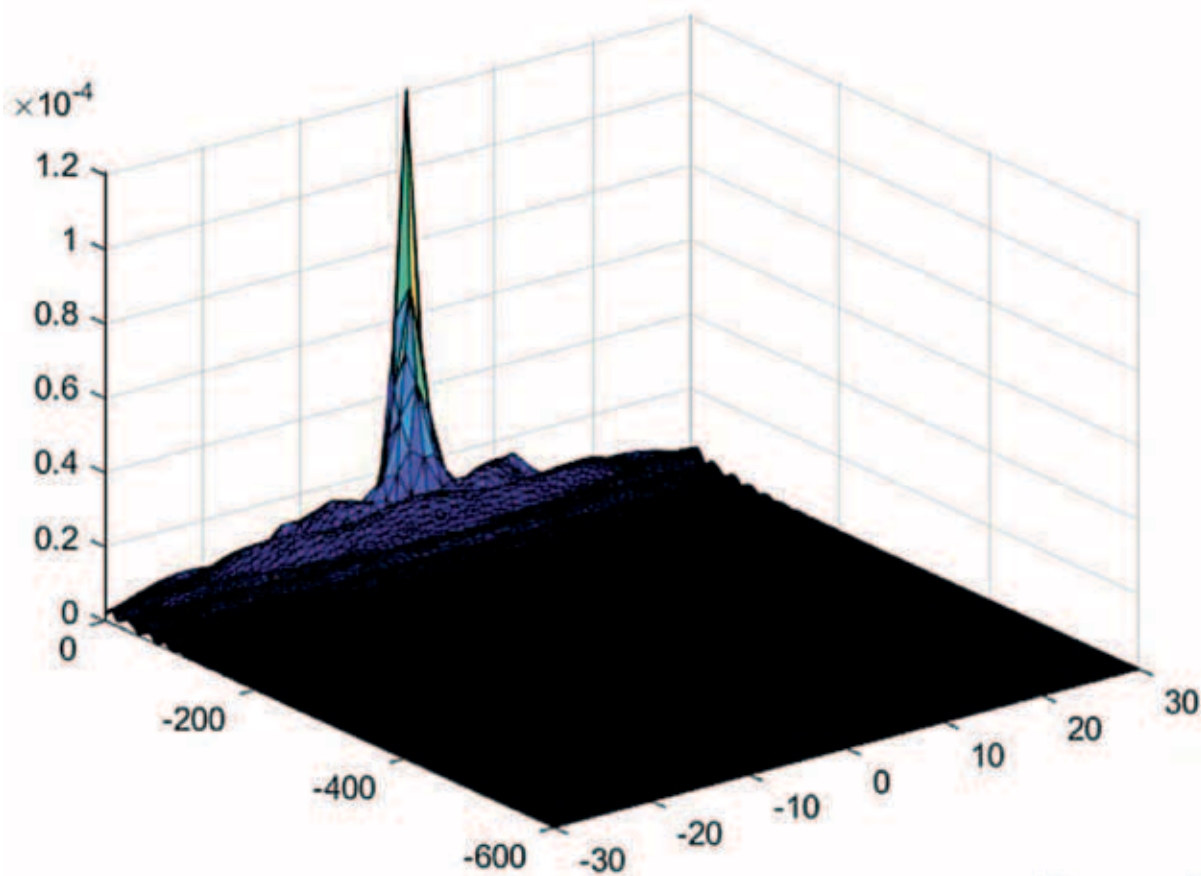


Рис. 3. Распределение плотности кинетической энергии в момент времени $t = 0,4$ с.

Как видно, возмущение, созданное виброисточником, распространяется во всех направлениях. Волны от источника почти без потери амплитуды пересекают внутренние границы области, на глубинах порядка 600 метров плотность энергии упругого возмущения имеет место после того, как спустя некоторое время процесс устанавливается.

В случае, когда скорость распространения волн в центральной области была выше, чем в крайних, то наблюдалась качественно иная картина распространения волн. По среднему каналу бежит волна, которая проникает в соседние области. Существенная часть энергии упругой волны распространяется по среднему каналу, однако упругая волна проникает и в соседние области.

В случае, когда скорость распространения волн в центральной области была ниже, чем в крайних, то отмечалось отсутствие движения волны внутри среднего канала области. Почти вся волна движется вдоль границы, а в глубину проникает пренебрежимо малая часть возмущений.

На рисунке 4 показаны результаты численных экспериментов по изучению распределения плотности кинетической энергии в блочно-трещиновой среде при реализации на внутренних границах условия «проскальзывания» для частоты источника, равной 10 Гц.

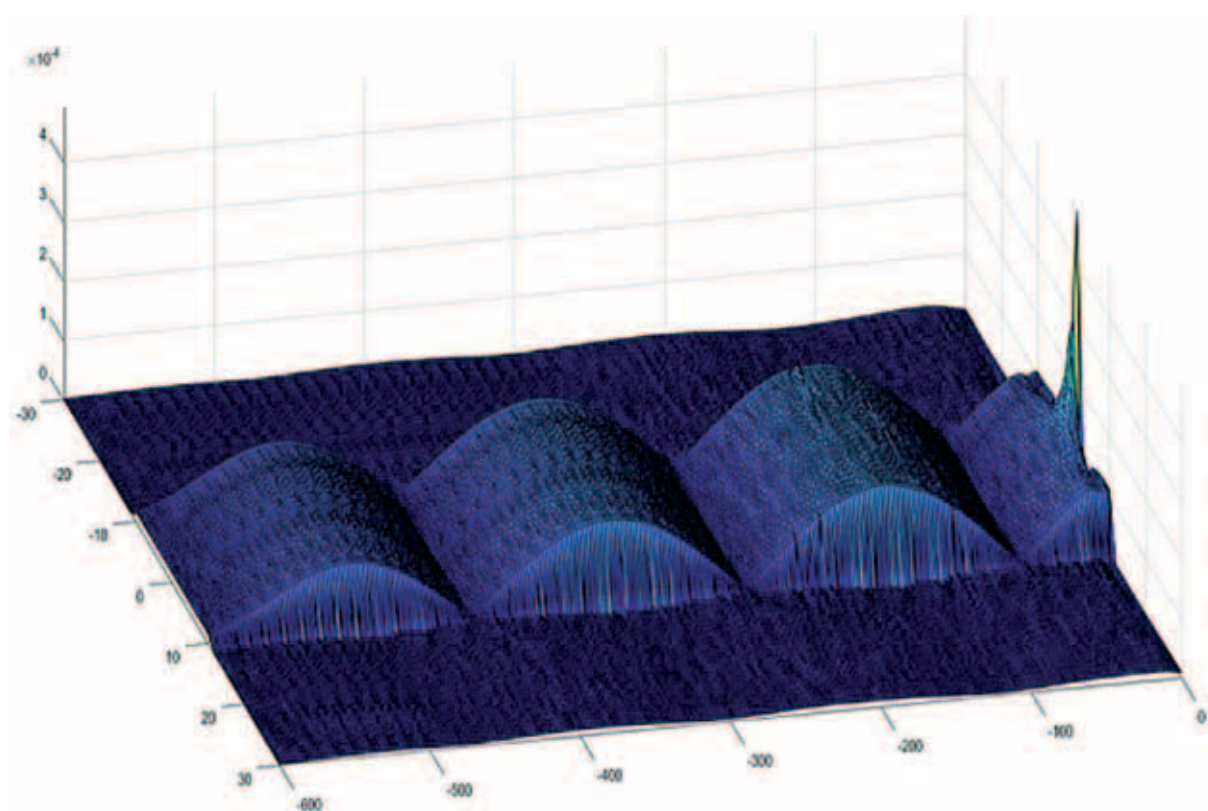


Рис. 4. Распределение плотности кинетической энергии в момент времени $t = 0,9$ с.

Полученные результаты вычислительных экспериментов показывают, что при реализации на внутренних границах условия «проскальзывания», возмущение, созданное виброисточником при частоте, равно 1 Гц, распространяется в канале между этими границами, и за пределы этих границ, проникает пренебрежимо малая его часть. Такая же картина имеет место при 10 Гц. Формируется фронт волны в канале. Качественно такие же, как на рисунках картины распределения энергии упругого возмущения имеют место после того, как спустя некоторое время процесс устанавливается. При повышении частоты работы виброисточника все большая часть энергии упругого возмущения проникает за пределы границ канала. При частоте виброисточника 100 и 150 Гц картина распространения энергии упругого возмущения качественно напоминает ситуацию, когда на внутренних границах реализованы условия «полного слипания».

Таким образом, можно с уверенностью сказать, что разработанная модель может применяться для проведения содержательных экспериментов по исследованию распространения упругих волн в средах с более сложной геометрией и реализации условий сопряжения на границах областей.

Литература

1. Куликовский А.Г., Математические вопросы численного решения гиперболических систем уравнений / А.Г. Куликовский, Н.В. Погорелов, А.Ю. Семенов. — М.: Физматлит, 2001. — 608 с.
2. Скалько Ю.И., Корректные условия на границе, разделяющей подобласти [Текст] / Ю.И. Скалько // Компьютерные исследования и моделирование. — 2014. — № 3 (6). — С. 347-356.
3. Гребенникова И.В., Уравнения математической физики: уч. пос. / И.В. Гребенникова. — Екатеринбург: УрФУ, 201

STUDY OF KINETIC ENERGY DENSITY DISTRIBUTION IN AREAS WITH COMPLEX GEOMETRY (HOMOGENEOUS AND BLOCK MEDIA)

I.A. Lazichny

*Moscow Institute of Physics and Technology
E-mail: ivanlazichny@gmail.com*

Received 11.03.2022

The purpose of this work is to study the distribution of kinetic energy density in areas with complex geometry (homogeneous and block media). The paper simulates a mathematical model of elastic wave propagation, which is an initial boundary value problem for a system of elastic dynamics equations with the presence of internal boundaries in the integration region. A series of computational experiments were carried out, during which kinetic energy density distributions were investigated in areas with complex geometry and different frequencies of the vibration source during its continuous operation. In the course of the work, such research methods as analysis, synthesis, description, generalization and experiment were used. As a result of the work carried out, it is concluded that the model is applicable for conducting meaningful experiments to study the propagation of elastic waves in media with complex geometry, internal boundaries and different interface conditions. The algorithm showed high accuracy and speed.

Keywords: kinetic energy, riemann problem, homogeneous medium, block medium, density, elastic waves, geometry.

Информация и правила для авторов

Общие положения

Журнал «Наноструктуры. Математическая физика и моделирование» (сокращенно: НМФМ) публикуется с 2009 года и является периодическим научным изданием. Электронная версия журнала размещается на сайте <http://www.nano-journal.ru>. Основная цель издания: представление новых теоретических и вычислительных методов моделирования наноструктур и мягкой материи, общих подходов в исследовании мезосистем, а также ключевых экспериментальных результатов в данной области и связанных с этим проблем математической физики.

Журнал НМФМ имеет междисциплинарный характер и в силу этого несет определенную образовательную направленность, а не только узко научную. Работы, представляемые в журнал, должны содержать вводные сведения, которые обеспечат понимание постановок задач и восприятие результатов не только прямыми специалистами. Определения понятий, объяснение обозначений и терминов, оценки характерных параметров, теоретические предпосылки и идеи, используемые методы, и т.п., должны быть кратко объяснены в тексте статьи, имея в виду читателей, специализирующихся в иных направлениях. Должны быть описаны базовые математические модели и уравнения. Во Введении и в последующих разделах очерчивается стратегия и основные трудности, это увязывается с используемыми моделями. Структура статьи ориентируется на прояснение общей логики и методики исследования, содержит резюмирующие выводы. В тексте должны быть рассмотрены характерные примеры (хотя бы, методические), ясно иллюстрирующие предлагаемые алгоритмы.

Журнал публикует научные обзоры, исследовательские статьи и краткие научные сообщения, а также избранные аналитические и информационно-образовательные материалы, тексты докладов и циклов лекций, прочитанных в университетах, научных центрах, на школах-семинарах, конференциях, нигде ранее не публиковавшиеся и не принятые к публикации в других изданиях. Язык публикации в журнале НМФМ, как правило, русский. Работы, представляемые в журнал, не могут иметь научно-популярный или компилятивный характер. Все статьи рецензируются и могут быть отклонены редколлегией журнала. В случае принятия работы к печати ее авторы передают издательству журнала НМФМ право на разовую безвозмездную публикацию текста и его размещение в электронной версии на сайте журнала. Перевод опубликованных в журнале статей на другие языки может осуществляться только с разрешения и при участии авторов.

Порядок представления статей

- В редакцию изначально представляются:
 - файл статьи, файлы с иллюстрациями;
 - сопроводительное письмо, можно в электронной форме, содержащее сведения об объеме статьи и обо всех авторах (фамилии, имена, отчества, полные названия мест работы, почтовый адрес с индексом, номер контактного телефона с кодом города, электронный адрес автора, ответственного за переписку с редакцией); предпочтительно, чтобы это письмо было выполнено на бланке учреждения, в котором работает кто-то из авторов, было заверено печатью и содержало утверждение о возможности открытого опубликования статьи;
 - файл с переводом на английский язык названия статьи, фамилий и инициалов авторов, аннотации, ключевых слов.
- Авторские файлы могут быть присланы на электронный адрес: papers@nano-journal.ru; (резервный адрес в случаях затруднений с пересылкой: nano@miem.edu.ru) или переданы в редакцию на любом электронном носителе. Авторы получают из редакции подтверждение о получении их материалов.
- Телефон (факс) редакции: +7 (495) 916-8876. Адрес редакции: Москва 109028, Б. Трехсвятительский пер., 3/12, Московский институт электроники и математики (МИЭМ), комн. 449.

Общие требования к представляемым файлам

- Допускается использование текстовых редакторов WORD и LATEX. К рабочим файлам должна быть приложена их pdf-копия. В названии файлов используется латинский алфавит, пробелы заменяются знаком `_`. Шапка статьи содержит название, инициалы и фамилии авторов, место работы, электронный адрес, краткую аннотацию, ключевые слова. В аннотации не следует использовать формулы и ссылки на текст работы или список литературы; в конце она должна содержать индекс УДК (к английской версии аннотации можно добавить индексы зарубежных рубрикаторов).
- Объем кратких сообщений 4-8 страниц, исследовательских статей, как правило, до 20 страниц, а обзоров – более 20 страниц. Верхняя граница согласуется с редколлегией. При подсчете объема нужно ориентироваться на страницы формата А4, шрифт 12, знаков в строке 80, интервалов между строками 1.
- Авторы не должны злоупотреблять сокращениями, составленными из заглавных начальных букв терминов. Предпочтительней каждый раз использовать полное наименование объекта. Возможно использование только устоявшихся аббревиатур.

Требования к файлам Word

- Рекомендуемый шрифт – Times New Roman.
- Строки в пределах абзаца не должны разделяться символом возврата каретки (Enter).
- Нельзя использовать автоматическое создание сносок, автоматический перенос или автоматический запрет переносов, создание списков, автоматический отступ и т.п.
- Ссылки на список литературы даются цифрами в квадратных скобках: [1], [5,6,7], [1-9].
- Все без исключения формулы и обозначения размерности, даже состоящие из одной латинской буквы, и в тексте и вынесенные в отдельную строку, всегда набираются в формульном редакторе и никогда – в обычном текстовом редакторе.

- При создании таблицы рекомендуется использовать возможности Word или MS Excel. Таблицы, набранные вручную (с помощью большого числа пробелов), не принимаются.

Требования к иллюстрациям

- Иллюстрации представляются в отдельных файлах, черно-белыми. Они должны иметь разрешение не менее 600 dpi.
- Форматы файлов – TIFF, EPS, PSD, JPEG.

Требования к списку литературы

- Ф.И.О. авторов или редакторов выделяются курсивом.
- Для статей приводится название. Названия отделяются от выходных данных знаком //. Расположение выходных данных указано на образце ниже. Номер тома выделяется жирным шрифтом, номер выпуска дается в скобках. Указываются номера первой и последней страниц статьи, либо уникальный номер статьи и ее объем. Для книг желательно указывать их объем. Если известна ссылка на электронный архив или сайт, то ее желательно указать.

Фамилия И.О. Название статьи // Назв. журн., 2000, **1** (1), 1-6.

Family F.M. and Family F. Title of the paper // Name of the Journal, 2006, **73**, 165313, 9 pp.

Фамилия И.О., Фамилия И.О. Название книги // Наука, С.-П., 1999, 176 стр.

Family F.M. Title of the paper // In book: Family F.M. (et al. eds), Title of the collection, Publisher, Boston, 2005, 9-24.

Family F.M. (ed.), Title of the collection // Publisher, N.Y., 2005, 324 pp.

Фамилия И.О. Название доклада // Доклад на конференции «Название конференции (место и дата проведения)»; ссылка на электронный ресурс.

Наноструктуры. Математическая физика и моделирование

Журнал зарегистрирован

в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС77-34934 от 29 декабря 2008 г.

Учредители

Московский институт электроники и математики (МИЭМ),

Европейский центр по качеству

Издатель

ООО Сенсор Микрон

Журнал входит в перечень ВАК РФ

Статьи рецензируются

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ НМФМ

Подписной индекс журнала в каталоге агентства «Урал-Пресс» 70017.

Электронный подписной каталог и контакты всех представительств «Урал-Пресс»
на сайте www.ural-press.ru.

Редакция предлагает подписчикам возможность безвозмездно получить подборку прошлых
выпусков журнала. Пришлите на электронный адрес nanostructures@hse.ru (или на почтовый адрес:
123458, Москва, ул. Таллинская, д. 34, каб. 429, редакция журнала НМФМ)
копию подписной квитанции, а также адрес для отсылки выпусков.