

ТЕХПОДДЕРЖКА

АНОДНАЯ И НЕПОСРЕД- СТВЕННАЯ

сварка пластин
для микроэлектроники.

Выбор материалов и ключевые параметры



Текст: Александр Скупов

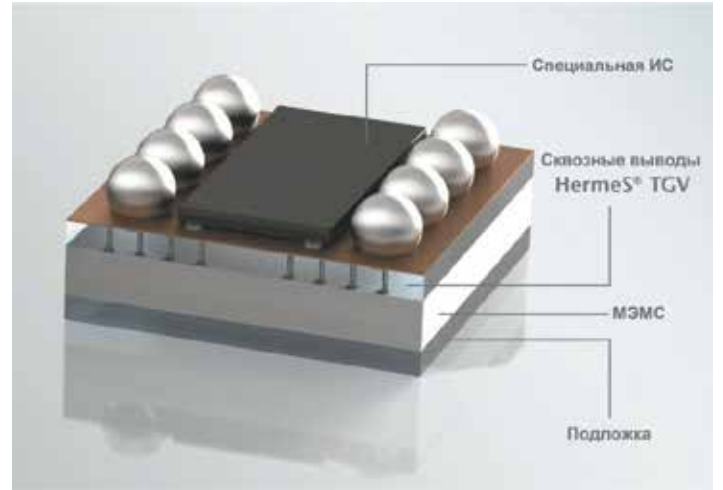


В статье представлен обзор двух методов сварки пластин для микроэлектроники без использования промежуточного материала. Каждый метод рассматривается с точки зрения технологичности, области применения и возможности расширения на смежные отрасли, также обозначены основные требования к материалам, используемым в данном процессе.

Введение

Традиционными способами создания различных функциональных слоёв на поверхности полупроводниковых пластин долгое время являлись процессы эпитаксии, парофазного осаждения, напыления, а также химической модификации (например, окисление). Обычно толщина слоёв, созданных таким образом, сверху ограничивается единицами микрон. Однако развитие микроэлектроники и смежных индустрий потребовало найти способы, позволяющие создавать толстые слои (десятки и сотни микрон) материалов с различными свойствами, в т.ч. слоёв с кристаллической структурой на аморфных плёнках. Примерами задач, где требуется использование подобных методов, являются производство структур «полупроводник на диэлектрике» (кремний на сапфире — КНС, кремний на изоляторе — КНИ), а также создание резких р-п переходов для дискретных транзисторов и диодов.

Также появилась необходимость трёхмерной интеграции различных устройств, созданных в рамках совершенно различных и часто несовместимых друг с другом технологических процессов. Примером такой интеграции может являться соединение МЭМС (микроэлектромеханические системы) и схемы электрической обработки сигнала, которая дополнительно служит крышкой, защищающей МЭМС от воздействия внешней среды рис 1. Весьма интересными являются технологии трёхмерной интеграции памяти и процессора либо нескольких слоёв памяти. При этом наиболее перспективный способ интеграции — соединение на уровне пластин, что позволяет минимизировать длину про-

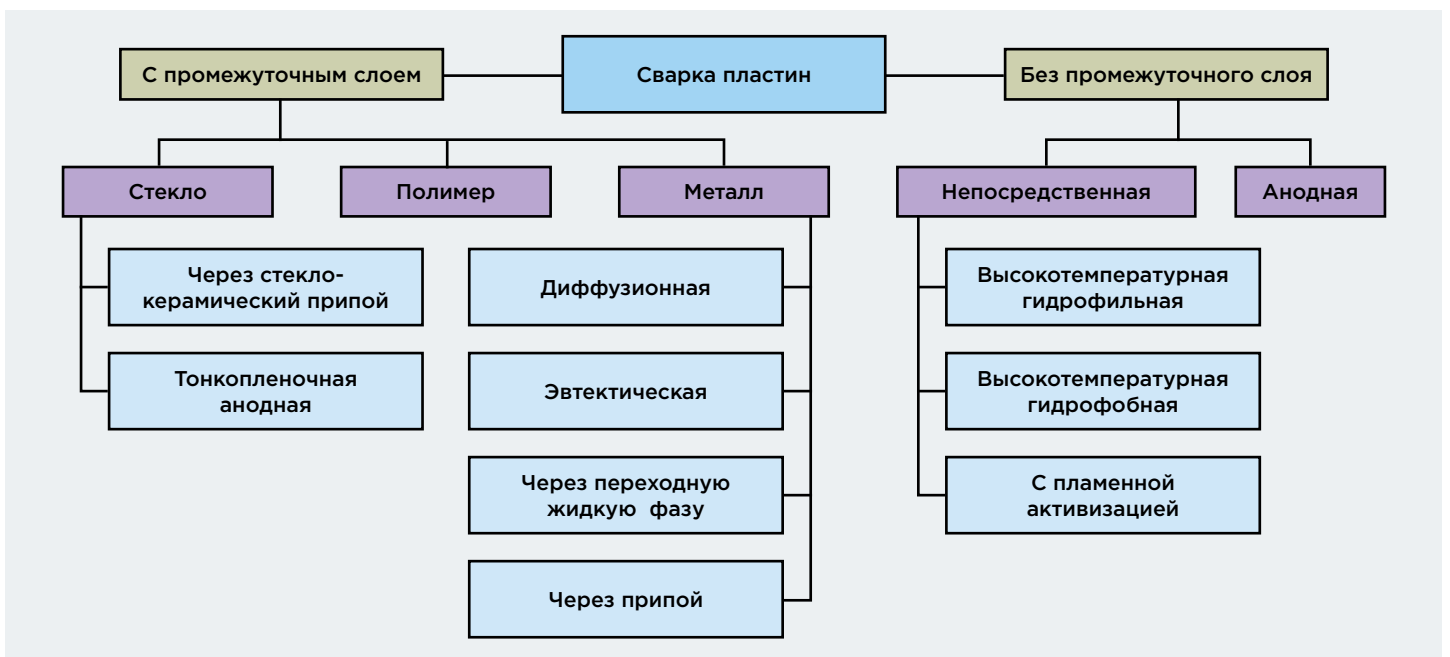


1 Пример интеграции МЭМС и микросхемы на уровне пластины [1]

дников, переходные ёмкости и сопротивления, а также максимально удешевить и ускорить производство.

Все эти задачи позволяет решить сварка пластин, когда с помощью промежуточного слоя или без него создаётся неразрывное соединение между двумя и более полупроводниковыми пластинами.

За всё время своего развития полупроводниковая индустрия разработала множество способов соединения пластин друг с другом, включая соединение через полимеры, стеклокерамические припои, металлы и сплавы, а также непосредственно без промежуточных материалов рис 2. В настоящем обзоре будут рассмотрены только те способы, которые не предполагают использо-



2 Общая классификация методов сварки пластин в микроэлектронике

вание промежуточных слоёв. К таковым относятся непосредственная сварка кремниевых пластин друг с другом, а также анодная сварка пластин кремния и стекла.

Оба метода сварки могут быть использованы для производства МЭМС, для данной индустрии выбор метода определяется требованиями, предъявляемыми к стоимости и эксплуатационным характеристикам конечных устройств. Непосредственная сварка используется для производства структур КНИ, а также является перспективной для трёхмерной интеграции с очень большой плотностью выводов. Анодная сварка широко используется в тех применениях, где требуется оптическая прозрачность и доступ света к внутренним частям конечного изделия — МОЭМС (микрооптоэлектромеханические системы), оптические приборы, устройства микрофлюидики.

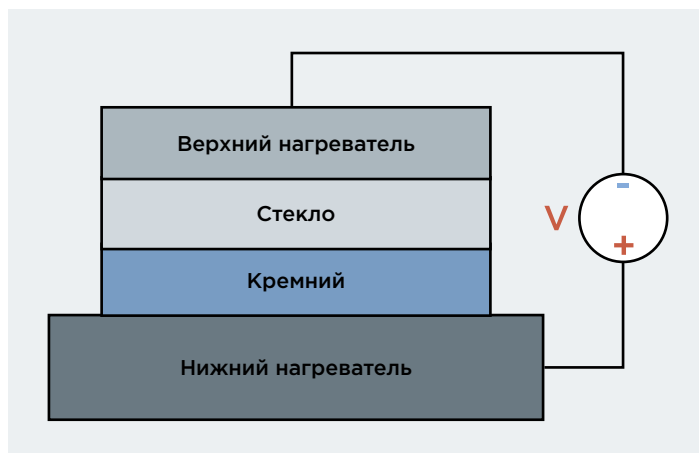
От того, какие способы сварки пластин и материалы будут выбраны для создания конечных приборов, будут зависеть эксплуатационные характеристики, надёжность и стоимость данных устройств.

Анодная сварка

Процесс заключается в соединении друг с другом пластин кремния и стекла. Широко используется для производства МЭМС (например, акселерометр СМА300 от VTI Technologies) и устройств микрофлюидики (различные медицинские химические анализаторы, лаборатории на кристалле, рис 3). Её применение в области создания гетероструктур и трёхмерной интеграции ограничено физическими и химическими свойствами используемых стёкол.



3 Микрофлюидное устройство, изготовленное с помощью анодной сварки стекла и кремния



4 Схема процесса анодной сварки пластин стекла и кремния

Параметры процесса

Анодная сварка пластин кремния и стекла происходит, когда на пластины, приведённые в контакт и предварительно нагретые, подаётся постоянное электрическое напряжение. Схема процесса показана на рис 4. Температура процесса обычно поддерживается в диапазоне 200-400 °С, а электрическое напряжение — 200-2000 В. Для проведения данной операции существует множество коммерчески доступных машин, в числе которых наиболее привлекательными являются установки фирмы EVG. Иногда для сварки использовалась собственноручно разработанная оснастка, пример в публикации [6].

Механизм сварки основан на химических реакциях, происходящих между поверхностями стекла и кремния при повышенной температуре и воздействии электрического поля. Основная часть этих реакций носит электрохимический характер и вызвана окислением кремния ионами кислорода O^{2-} , отделёнными от ионов щелочных металлов Na^+ , K^+ внешним электрическим полем. Процесс известен с 1969 года, для подробного ознакомления с ним можно обратиться к источникам на русском [7] и английском [2-5] языках.

Процесс можно проводить как в атмосферных условиях, так и в вакууме либо инертной среде. Характерное время процесса составляет несколько минут и определяется температурой процесса, электрическим напряжением и площадью контакта поверхностей. Каждая пара пластин обрабатывается индивидуально в камере установки для сварки. Температура процесса, главным образом, определяется величиной различия коэффициентов температурного расширения (КТР) стекла и кремния, позволяя минимизировать термомеханические напряжения, вызванные разницей этих величин [3, 8].

Требования к материалам

Класс устройств, создание которых возможно с использованием анодной сварки, а также эксплуатационные характеристики данных устройств, в первую очередь, определяются физико-химическими свойствами стёкол, используемых в процессе. В меньшей степени процесс зависит от параметров кремниевых пластин.

Шероховатость поверхностей стекла и кремния не должна превышать 2 нм, а вариации толщины (Total Thickness Variation — TTV) должны находиться в пределах 10 мкм [9]. Ширина нерабочей области у обоих типов пластин должна быть как можно меньше. Поскольку стекло является хрупким материалом, крайне важна качественная обработка кромки пластины с отсутствием каких-либо сколов и зубцов.

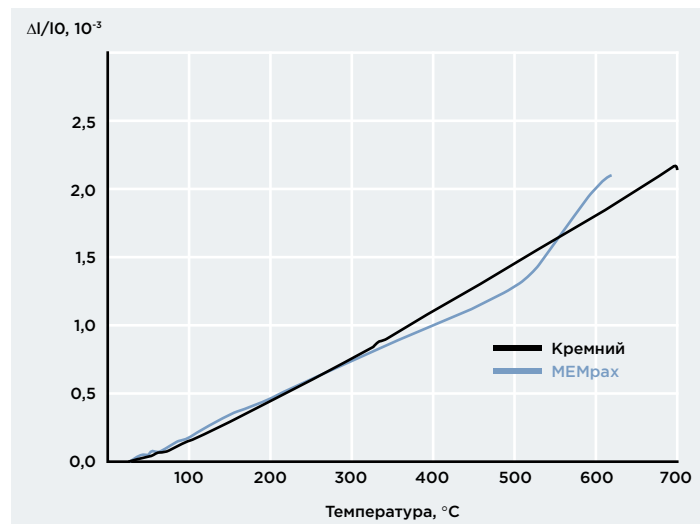
Для получения неразрывного однородного механического соединения между кремнием и стеклом в составе стекла должно быть 2-4 % Na либо K. Меньшие количества данных элементов приведут к увеличению времени процесса, что отрицательно скажется на производительности. Большие концентрации будут негативно отражаться на физических и химических свойствах стекла.

Вторым важнейшим критерием при выборе стекла для анодной сварки является КТР стекла в сравнении с кремнием. Поскольку процесс проводится при относительно высоких температурах, а конечные устройства эксплуатируются в широком диапазоне температур, наличие механических напряжений, вызванных разницей КТР, может плохо сказаться на эксплуатационных характеристиках устройств. При больших различиях КТР могут наблюдаться сбои, связанные с механическим разрушением структур, а также недопустимые деформации особенно чувствительных элементов устройств. По этим причинам КТР используемого стекла должен быть максимально близок к КТР кремния рис 5.

Химический состав стекла также крайне важен, если требуется формировать в нём какую-либо топологию с помощью травления. Именно сложности, связанные с травлением стекла, препятствуют его широкому использованию в трёхмерной интеграции, поскольку требуется создание сквозных выводов в стекле

затруднительно формировать плотные сквозные выводы, поскольку скорость травления в плазме мала (0,5-1 мкм/мин.), а жидкостное травление даёт слишком большой уход размеров в планарном направлении [10]. Минимальная ширина сквозного вывода в стекле составляет сотни микрон, и для их формирования часто используют пескоструйную обработку либо лазер [11].

Однако формирование неглубокой топологии (несколько десятков микрон) в стекле всё же возможно. Для плазменного травления стекла в нём должно содержаться минимальное количество стойких инертных оксидов (Al_2O_3), поскольку они существенно замедляют травление или же значительно снижают селективность по отношению к материалу маски (как правило, металл либо кремний после анодной сварки). То же требование равным образом относится и к жидкостному травлению в растворах на основе HF. При жидкостном травлении также важно, чтобы содержание Ca в стекле было максимально низким, поскольку данный элемент крайне негативно влияет на адгезию маски (как правило, металл с фоторезистом) [10]. Также стеклянные пласти-



5 Сравнение КТР стекла Borofloat 33 (MEMрах) и кремния при различных температурах [1]

Т 1 Свойства стеклянных пластин Borofloat 33, рекомендуемых для анодной сварки с кремнием

Параметр	Значение			
Диаметр, мм	100	150	200	300
Толщина, мкм	100-1000	100-1000	500-1000	775-1000
TTV, мкм	<10			
Шероховатость, нм	<1,5			
КТР, 10 ⁻⁶ К-1	3,25			
Коэффициент преломления	1,4713			
Химический состав	SiO ₂ : 81 %, B ₂ O ₃ : 13 %, Na ₂ O/K ₂ O: 4 %, Al ₂ O ₃ : 2 %			

ны не должны содержать в своём составе посторонних макроскопических включений (пузырьки воздуха), т.к. данные дефекты могут стать центрами разрушения пластины.

Перечисленным критериям удовлетворяет стекло Vогоfloat 33, которое доступно в виде пластин различного диаметра. Свойства данного материала перечислены в **Т 1**.

Таким образом, анодная сварка пластин кремния и боросиликатного стекла активно применяется для производства МЭМС, устройств микрофлюидики, а также в приложениях, где требуется интеграция разнородных устройств на одном кристалле.

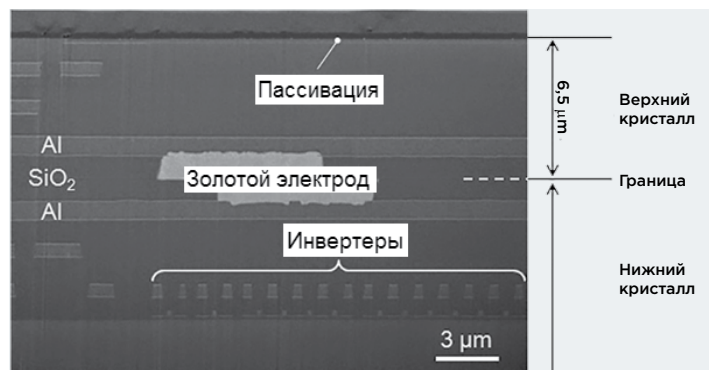
К используемым в анодной сварке пластинам предъявляются требования низких геометрических допусков, низкой дефектности, согласования КТР с кремнием, оптимального химического состава.

К преимуществам данного процесса относятся его простота и совместимость с Al металлизацией. К недостаткам — плохая совместимость с КМОП-производством из-за риска перекрёстного загрязнения оборудования щелочными металлами, ограниченная производительность, термомеханические напряжения, связанные с разнородностью соединяемых материалов.

Непосредственная сварка

Непосредственная сварка используется для создания прочного неразрывного соединения между двумя кремниевыми пластинами. Существуют два вида непосредственной сварки кремниевых пластин: гидрофильная и гидрофобная. В первом случае кремниевые пластины соединяются друг с другом за счёт слоёв оксида кремния (гидрофильные поверхности), во втором — после удаления слоёв естественного оксида с каждой пластины (гидрофобные поверхности).

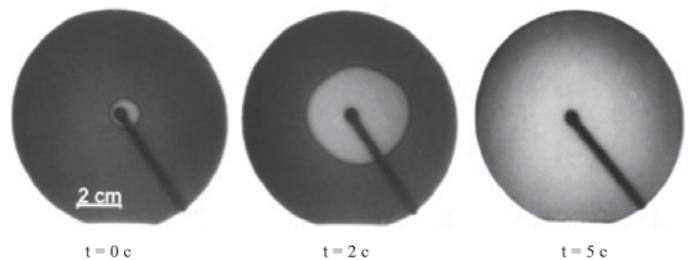
Гидрофильная сварка применяется для создания структур КНИ [12] и МЭМС (устройства с вертикальными ограничителями движения, датчики на основе толстослойных КНИ) [9]. Существенные успехи в развитии методов активации поверхностей делают возможным её применение в области трёхмерной интеграции **рис 6**, а также для соединения разнородных веществ: КНС, Si/кварц, Si/GaAs, Si/Ge и т. п. [14]. Непосредственная гидрофобная сварка используется в производстве МЭМС, например, для создания герметичных проводящих выводов из высоколегированного кремния **рис 7**. Также можно использовать данную технологию вместо эпитаксиального наращивания толстых слоёв, поскольку этот метод существенно дешевле [9, 14].



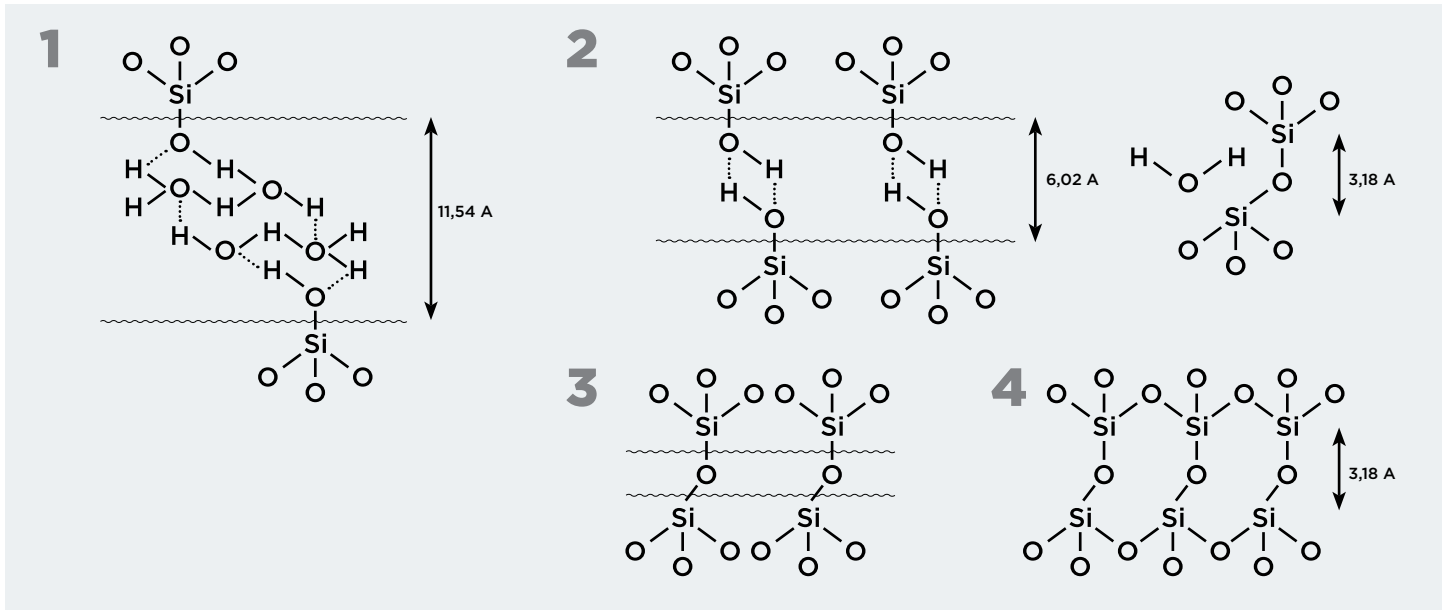
6 Гибридная низкотемпературная сварка двух пластин по технологии DBI (Direct Bond Interconnect – межсоединения с непосредственной сваркой), реализованная с помощью непосредственной гидрофильной сварки [13]



7 Поперечное сечение устройства, изготовленного по технологии Si-Via с использованием гидрофобной и гидрофильной сварки кремниевых пластин [15]



8 Процесс соединения 100 мм кремниевых пластин, наблюдаемый в проходящем ИК свете [16]

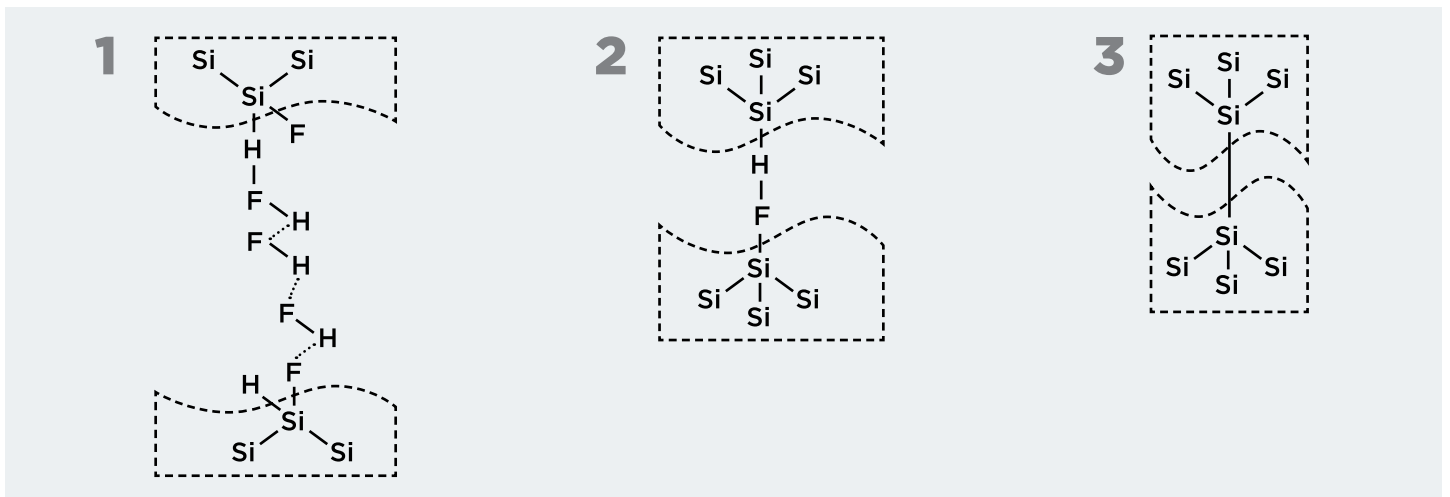


9 Взаимодействия между поверхностями пластин, происходящие при непосредственной гидрофильной сварке

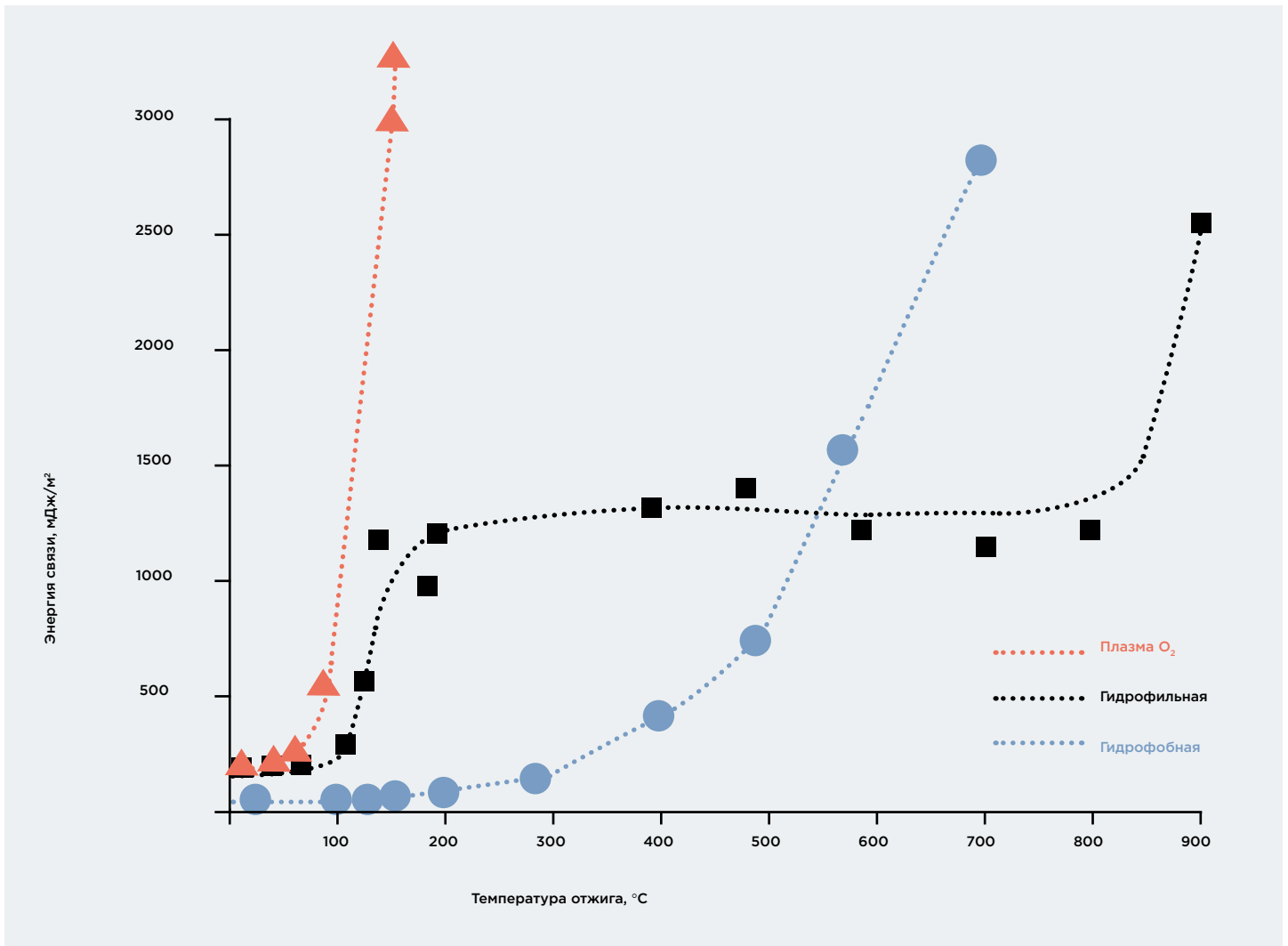
Параметры процесса

Перед приведением пластин в контакт они подвергаются стандартной химической обработке в растворах Piranha-solution, SC-1 и (опционально) SC-2. Такая обработка способствует удалению всех загрязнений с поверхности, а также формирует на поверхностях мономолекулярные слои, за счёт которых будет происходить первичный контакт пластин. При гидрофильной сварке пластины могут быть соединены друг с другом при комнатной температуре в атмосфере чистого помещения после точечного воздействия, инициирующего контакт поверхностей рис 8. Для гидрофобной сварки необходимо дополнительно обработать пластины в буферном травителе оксида и обеспечить инерт-

ную среду до приведения пластин в контакт. В обоих методах сварки пластины сначала соединяются за счёт слабых межповерхностных взаимодействий (Ван-дер-Ваальса, гидростатическое): Si-OH — OH-Si между гидрофильными поверхностями рис 9, Si-H — F-Si между гидрофобными рис 10. Затем с увеличением температуры эти связи трансформируются в ковалентные Si-O — O-Si при гидрофильной сварке, Si-Si при гидрофобной. Трансформация связей происходит в течение 0,5–2 часов при температуре 1100 °C для гидрофильной сварки и 900 °C для гидрофобной. В последнее время разработано множество методов активации поверхностей, позволяющих снизить температуру непосред-



10 Взаимодействия между поверхностями пластин, происходящие при непосредственной гидрофобной сварке



11

Зависимость энергии связи пластин от температуры и условий отжига для различных видов непосредственной сварки кремниевых пластин [17]

ственной гидрофильной сварки до температур ниже 450 °C рис 11 [18].

Используемое технологическое оборудование зависит от требований, предъявляемых к процессу. В простейшем случае гидрофильная сварка может происходить без прецизионного совмещения пластин очень простым автоматическим либо ручным оборудованием, обеспечивающим грубое совмещение и приведение в контакт пластин. При этом достигается максимальная производительность, поскольку финальный отжиг

производится для большой группы предварительно соединённых пластин. Если между поверхностями необходимо обеспечить вакуум либо инертную среду, то используется специализированное оборудование. Следует отметить, что оба метода сварки обеспечивают вакуумплотное соединение, однако если требуется высокий вакуум, становится технологически сложно интегрировать геттер в герметичный объём.

Из-за слабой величины сил, соединяющих поверхности сразу после их приведения в контакт, при непосред-

T 2

Свойства стеклянных пластин Borofloat 33, рекомендуемых для анодной сварки с кремнием

Параметр	Диаметры пластин, мм			
	100	150	200	300
Шероховатость Rq, Å			≤5	
TTV, мкм			≤3	
Прогиб/коробление, мкм	≤30	≤30	≤40	≤50
Ширина кромки, мм			≤3	

ственной сварке возможно раннее выявление дефектов и разделение пластин для их повторной обработки. Все дефекты, затрудняющие контакт поверхностей, наблюдаются с помощью инфракрасной камеры в проходящем свете.

Требования к материалам

Поскольку взаимодействия, ответственные за первичный контакт между пластинами, являются короткодействующими, к пластинам, соединяемым с помощью данного метода, предъявляются экстремальные требования по чистоте и геометрии.

Все частицы должны быть удалены с поверхности пластин, поскольку даже незначительные по размеру субмикронные загрязнения формируют довольно большие по площади несвязанные области [19]. Поэтому процесс рекомендуется проводить в чистых помещениях класса ISO4 либо ISO3, а для обработки использовать реагенты уровня VLSI и выше.

Влияние геометрических свойств поверхностей на проведение процесса сварки довольно подробно изучено за всё время активного использования данного метода. Существуют рекомендации, которые были теоретически обоснованы и затем эмпирически проверены. В работе [20] рассматривается влияние шероховатости поверхности и выводится теоретический критерий, которому должны удовлетворять поверхности, чтобы реализовать гидрофильную непосредственную сварку. В работе [21] рассматривается влияние толщины пластин, их прогиба и плоскостности (Total Indicator Reading — TIR). Обобщая данные требования, можно заключить, что шероховатость поверхностей обеих пластин, приводимых в контакт, должна составлять не более 5Å. Требования, предъявляемые к плоскостности и прогибу, зависят от размера используемых пластин, а также их толщины. Важны также размер нерабочей области пластины и геометрия кромки, поскольку эти параметры будут определять полную площадь сварки и выход годных пластин в некоторых применениях. При слишком большой ширине нерабочей области пластины могут скалываться у кромки при манипуляциях в ряде технологических процессов (утонение, ХМП, глубокое жидкостное травление). Геометрические параметры, которым должны удовлетворять пластины для получения наилучшего соединения, приведены в **Т 2**.

Преимущества данного способа сварки пластин:

- отсутствие необходимости формирования каких-либо дополнительных слоёв на поверхности (кроме SiO₂ при гидрофильном соединении);
- возможность групповой обработки пластин после совмещения и первичного контакта, что существенно увеличивает производительность;

- отсутствие механических напряжений, связанных с разницей КТР;
- простота контроля дефектности и возможность устранения дефектов на ранней стадии.


Также такой метод сварки является особенно привлекательным для трёхмерной интеграции из-за возможности формирования в кремнии большого количества выводов. Недостатки: необходимость дополнительного технологического оборудования при использовании пластин с Al металлизацией либо в случае интеграции разнородных материалов, высочайшие требования к геометрии.

Заключение

Сварка пластин в микроэлектронике позволяет получить неразрывные механически прочные соединения двух и более слоёв, состоящих в общем случае из разных материалов. Данный процесс широко используется в сфере производства гетероструктур, МЭМС, МОЭМС, устройств микрофлюидики и для трёхмерной интеграции.

Анодная сварка пластин позволяет получить устройства с высочайшими эксплуатационными характеристиками. Однако использование данного метода ограничено областями, где пластины после сварки не подвергаются воздействию высоких температур; не задействованы в технологическом процессе КМОП; термомеханические напряжения, связанные с разнородностью материалов, не приводят к нежелательным изменениям характеристик конечных устройств. Для получения надёжных соединений, обеспечения надлежащей герметичности, высокого выхода годных устройств и высокой воспроизводимости результатов процесса необходимо использовать пластины стекла с однородным и оптимальным химическим составом, строгими требованиями к геометрии, максимально согласованным с кремнием КТР.

Непосредственная сварка пластин применима для широчайшего спектра задач: от создания структур типа кремний-на-изоляторе до трёхмерной интеграции различных устройств. Данный процесс обладает высочайшей производительностью, но экстремально чувствителен к загрязнениям и геометрии исходных пластин. Поэтому для получения надёжного технологического процесса необходимо выбирать пластины с минимальными допусками по неплоскостности и шероховатости лицевой поверхности, а также обеспечить максимально возможную чистоту процесса.

Группа компаний Остек предлагает оборудование и материалы для реализации всех указанных методов сварки пластин. Специалисты компании готовы оказать поддержку при выборе методов и материалов для сварки, а также при отработке разнообразных технологий, необходимых для реализации данных процессов. 

ИСТОЧНИКИ:

1. <http://www.schott.com/english/>
2. T. Rogers, J. Kowal, Selection of glass, anodic bonding conditions and material compatibility for silicon-glass capacitive sensors, *Sensors and Actuators A*, Vol. 46-47, PP 113-120, 1995
3. G.Y. Li, L. Wang, Influence of bonding parameters on electrostatic force in anodic wafer bonding, *Thin Solid Films*, Vol. 462-463, PP 334- 338, 2004
4. Y. Kanda, The Mechanism of Field-assisted Silicon-Glass Bonding, *Sensors and Actuators*, Vol. A21-A23, PP 939-943, 1993
5. A. Cozma, B. Puers, Characterization of the electrostatic bonding of silicon and Pyrex glass, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 5, PP 98-102, 1995
6. C.C. Tripathi et al, Development of low cost set up for anodic bonding and its characterization, *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, Vol. 46, PP 738-743, 2008
7. Л.С. Синев, В.Т. Рябов «Согласование коэффициентов термического расширения при электростатическом соединении кремния со стеклом», *Микро- и наносистемная техника*, 2011, №5, с. 24-27
8. S. Weichel, «Silicon to Silicon Wafer Bonding for Microsystem Packaging and Formation», Ph.D. Thesis, Technical University of Denmark, 2005
9. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies / Edited by V. Lindroos [and co-autors]. Burlington: Elsevier Inc., 2010, 636 p.
10. A. Polyakov et al, Processability and Electrical Characteristics of Glass Substrates for RF Wafer-Level Chip-Scale Packages, *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, PP 875-880, 2003
11. J.W. Liu, Micromachining of Pyrex 7740 glass for micro-fluidic devices, 14th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences, Groningen, The Netherlands, PP 1907-1909, 2010
12. А. Л. Суворов и др., *Технологии структур КНИ*, М: МИЭТ, 407 с, 2004
13. <http://image-sensors-world.blogspot.ru/2014/09/image-sensors-at-iedm-2014.html>
14. Tommi Suni, Direct wafer bonding for MEMS and microelectronics, Espoo, 2006
15. Enabling the Sensory Revolution: Silex Microsystems Company Introduction, Silex Microsystems AG, Jarfalla, 2012
16. Q.-Y. Tong and U. Gösele (1998). The Electrochemical Society, ed. *Semiconductor Wafer Bonding: Science and Technology* (1 ed.). Wiley-Interscience.
17. <http://www.eecs.berkeley.edu/XRG/Summary/Old.summaries/02abstracts/ycho1.html>
18. M. Reiche and M. Wiegand, Plasma-enhanced semiconductor wafer bonding: Mechanism and applications
19. D. Pasquariello and K. Hjon, Mesa spacers: enabling non-destructive measurements of surface energy in room temperature wafer bonding, *Electrochemical Society Proceedings*, vol. 99-35, pp. 110-118
20. C. Gui et al, The effect of surface roughness on direct wafer bonding, *Journal of applied physics*, vol. 85, no. 10, 1999
21. Christen Harendt et al, Silicon fusion bonding and its characterization, *J. Micromech. Microeng.*, vol. 2, pp. 113-116, 1992