

# Сварка полупроводниковых пластин через полимеры

А. Скупов<sup>1</sup>

УДК 621.3 | ВАК 05.27.06

С увеличением степени интеграции изделий микроэлектроники, их функционала, быстродействия и энергоэффективности широкую перспективу для разработчиков открывают технологии 2,5D- и 3D-интеграции. Для технологов, воплощающих передовые разработки в конечное изделие, возникает много новых задач в этой области. Технологической основой 2,5D- и 3D-интеграции, а также изготовления МЭМС и устройств микрофлюидики являются различные методы сварки пластин. Среди самых распространенных методов – сварка через полимеры (англ. adhesive bonding). Данная статья посвящена основным особенностям данного процесса и применяемым для него материалам.

**К**лассификация различных методов сварки пластин приведена на рис. 1. Методы позволяют соединять две или более пластины из полупроводников или иных материалов (металла, стекла, керамики, кристаллических диэлектриков), получая прочное долговечное соединение. О многих методах мы подробно рассказывали ранее [1, 2]. Каждый из них обладает своими преимуществами, недостатками и ограничениями.

Все методы непосредственной сварки требуют очень качественной поверхности с экстремально высокими требованиями к чистоте и шероховатости. Анодная сварка не применима для многих задач 3D-интеграции из-за несовместимости стекла с полупроводниковым производством. Процессы сварки через металл часто сложны для отладки технологического процесса из-за металлургических эффектов. Многие методы сварки требуют наличия дополнительного технологического оборудования, помимо установки сварки пластин.

Сварка через полимеры во многом лишена приведенных недостатков и является относительно простой в исполнении.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА

Полимер, с помощью которого производится сварка, наносится на одну из пластин методом центрифугирования или спреем. Затем при необходимости в нем формируется топологический рисунок, после чего пластины соединяются внутри специальной установки, где под воздействием механического прижима и температуры формируется их надежное соединение.

В качестве полимеров могут быть использованы практически любые материалы для фотолитографии или межслойной изоляции самых верхних уровней металлизации. Если используются фоточувствительные полимеры, то можно формировать в них рисунок обычным литографическим методом. Способ удобен тем, что для его использования не требуется какое-либо дополнительное оборудование, кроме установки сварки. Слои формируются при помощи стандартного литографического процесса.

Преимущества такого метода:

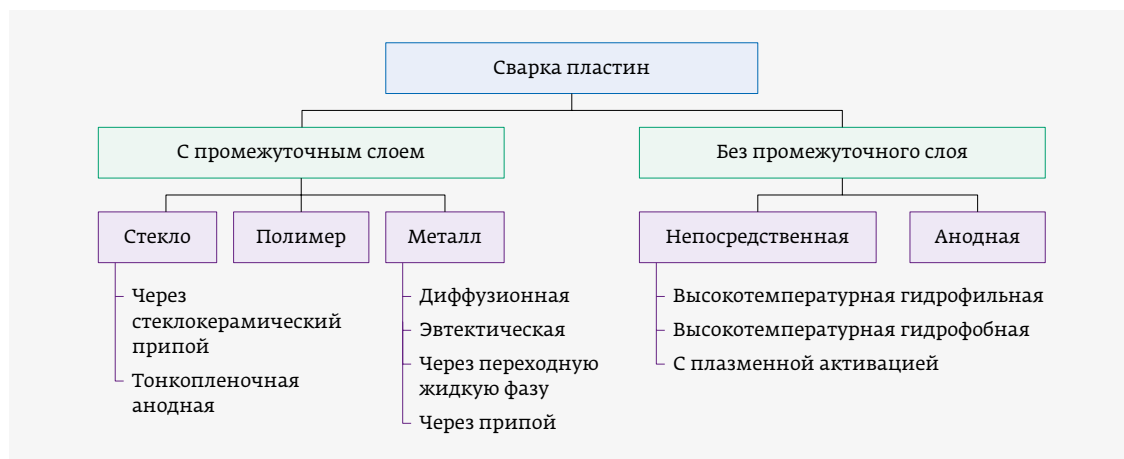
- невысокие требования к шероховатости поверхности и геометрии пластин;
- низкая чувствительность к дефектам;
- небольшие усилия прижима;
- невысокая температура в процессе сварки.

Основным недостатком способа является невозможность обеспечения герметичности из-за того, что полимеры в силу своей структуры пропускают молекулы газов. Это ограничение не позволяет применять способ в тех устройствах, где требуется вакуум (различные высокочастотные резонаторы в МЭМС, устройства вакуумной микроэлектроники, изделия со стабильной атмосферой в герметичном объеме). Однако в области 2,5D- и 3D-интеграции, для несложных массовых МЭМС и устройств микрофлюидики данный способ выглядит привлекательным. Он лишен тех принципиальных недостатков и сложностей, которые есть у других процессов сварки.

## ВЫБОР МАТЕРИАЛА

В зависимости от изделия для полимерной сварки могут быть применены как фоточувствительные, так и нефоточувствительные материалы, свойства которых приведены в табл. 1. Как видно из табл. 1, все материалы обладают довольно низким модулем упругости. Это свойство

<sup>1</sup> ООО «Остек-Интегра», главный специалист отдела технического сопровождения skupov.a@ostec-group.ru.



**Рис. 1.**  
Основные  
методы сварки  
пластин

позволяет им распределять механические напряжения, возникающие при соединении пластин с разными коэффициентами теплового расширения (КТР). Учитывая, что процесс сварки проводится при относительно невысоких температурах, использование данных материалов позволяет осуществлять 3D-интеграцию разнородных устройств, выполненных на основе разных полупроводников.

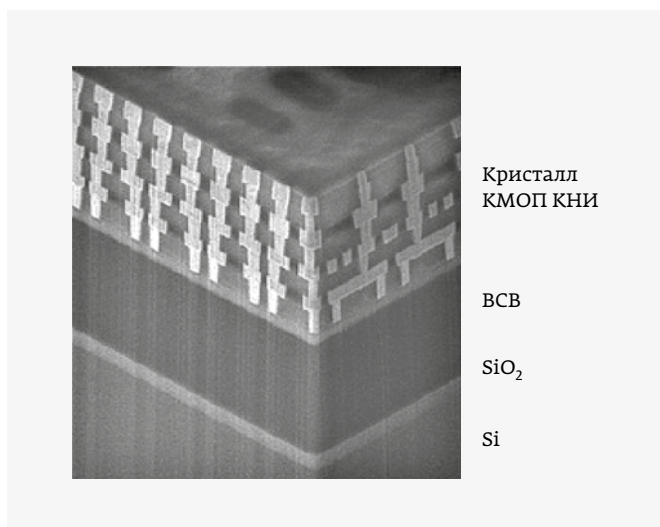
Нефоточувствительные материалы применяются тогда, когда не нужно создавать топологию в соединяющем слое, то есть когда происходит сварка с помощью сплошного слоя. Такой способ может быть использован, например, для соединения двух пластин, когда одна сторона предназначена для соединения с подложкой с помощью шариковых выводов, а другая – для проволоочной разварки. Нефоточувствительные материалы в основном используются, если не требуется непосредственная интеграция функциональных свойств, но требуется экономия площади изделия.

Примеры нефоточувствительных материалов, которые могут использоваться для сварки, – это полимер на основе бензоциклобутена (BCB) Cyclotene серии 3000 и нефоточувствительные полиимиды серий PI 2500 и PI 2600. На рис. 2 приведена микрофотография кристалла, при изготовлении которого пластины были соединены с помощью полимера на основе BCB.

Обычные фоторезисты являются классическими фоточувствительными материалами. Это простейший пример материалов для сварки пластин. С точки зрения прочности соединений, которые можно создавать с помощью фоторезистов, практически нет корреляции с тональностью этого материала (позитивный или негативный). Производители фоторезистов обычно не предоставляют данные по диэлектрическим характеристикам своих материалов, а также по долговременной стабильности их свойств, поскольку эти данные не требуются в обычном фотолитографическом процессе. Поэтому такие материалы могут быть использованы для сварки при

**Таблица 1.** Свойства полимеров для сварки

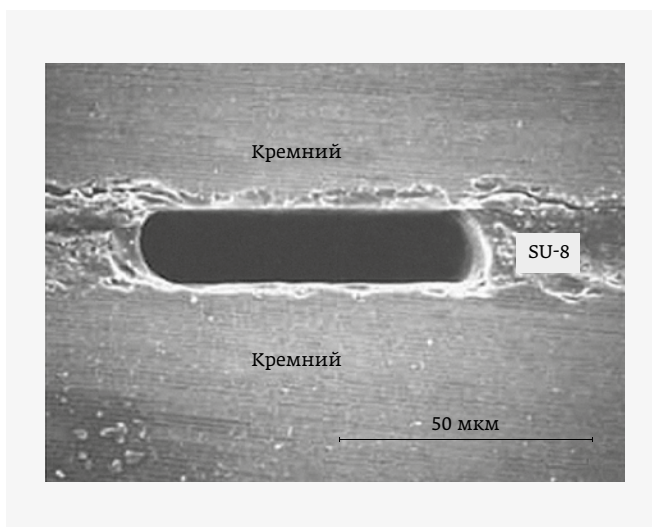
Свойство	Бензоциклобутен (BCB)	Полиимиды	Фоторезисты	PermiNex
Модуль упругости, ГПа	2,7–3,1	2,0–8,5	2–4	2,2–2,3
Относительное удлинение, %	5,5–18,0	10–60	–	5
КТР, 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	42–45	3–55	40–50	90–98
Температура стеклования, °C	>350	270–360	90–150	105
Удельное сопротивление, Ом·см	10 <sup>14</sup> –10 <sup>19</sup>	10 <sup>16</sup>	–	10 <sup>14</sup>
Диэлектрическая прочность, В/мкм	510–530	100–470	100–700	115
Остаточные напряжения в пленке, МПа	26–31	10–37	–	9–10
Термостабильность, °C	150–350	430–620	120–150	296
Диэлектрическая проницаемость	2,65–2,94	2,9–3,36	4–4,5	–
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,0008–0,0170	0,001–0,01	–	–



**Рис. 2.** Пример устройства, изготовленного с помощью сварки пластин через BCB

изготовлении прототипов изделий МЭМС, для проверки технологических концепций в области 2,5D- и 3D-интеграции, но не для перманентной сварки в изделиях, требующих долговременной эксплуатации. В одноразовых изделиях микрофлюидики для неагрессивных жидкостей сварка через фоторезисты может быть применена при серийном производстве, поскольку для данных изделий не существует требований к электрическим характеристикам. Примером фоторезистов, которые можно рекомендовать для сварки через полимеры, является серия AZ P4000. Это позитивные химически усиленные фоторезисты, которые позволяют наносить пленки толщиной 1–30 мкм. Механические и диэлектрические свойства этого материала стабилизируются после дополнительной тепловой обработки вслед за проявлением (post develop backing).

Особым классом материалов для сварки пластин являются перманентные фоторезисты, предназначенные для формирования функциональных слоев. Они обладают



**Рис. 3.** Поперечное сечение границы двух кремниевых пластин, сращенных через SU-8

стабильностью механических свойств и высокой химической стойкостью. Самый известный пример – фоторезисты серии SU-8. Экспериментально было показано [3], что при использовании данных материалов достигается наивысшая прочность соединения пластин по сравнению с другими фоторезистами. На рис. 3 приведена фотография поперечного сечения двух кремниевых пластин, соединенных при помощи SU-8.

Фоточувствительные диэлектрики на основе полиимидов и BCB также могут широко использоваться для сварки. Они сохраняют стабильность механических и диэлектрических свойств в широком диапазоне температур. Для формирования в них топологии не требуется нанесение дополнительного слоя фоторезиста, как для их нефоточувствительных аналогов. Диэлектрические свойства этих материалов в широком диапазоне частот позволяют использовать их при 2,5D- и 3D-интеграции телекоммуникационных изделий. Примеры материалов приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Технологические свойства фоточувствительных диэлектриков, пригодных для сварки через полимеры (производитель – компания DuPont)

Материал	Cyclotene 4000	Cyclotene P6505	HD-4100	HD-8820
Тип	BCB	BCB	PI	PI
Толщина пленки, мкм	1–30	3–5	5–40	5–12
Тональность	Негативный	Позитивный	Негативный	Позитивный
Проявитель	Органический растворитель	2,38% TMAN	Органический растворитель	2,38% TMAN

Примечание: BCB – бензоциклобутен; PI – полиимид; TMAN – тетраметиламмония гидроксид

Существуют специальные материалы, разработанные для перманентной сварки пластин. Компания Kayaku Advanced Materials (ранее известная как Microchem) выпускает серию материалов под брендом PermiNex. Они оптимизированы для процесса сварки с точки зрения адгезии к поверхности при нанесении. Также они обеспечивают большую прочность соединения на разрыв по сравнению с фоторезистами (даже SU-8), BCB и полиимидами.

Таким образом, существует множество полимерных материалов, пригодных для сварки при изготовлении разнообразных изделий. Обычные фоторезисты используются для изготовления прототипов МЭМС, некоторых изделий микрофлюидики. Полимеры, специально разработанные для сварки, и перманентные фоторезисты применяют при изготовлении прочих изделий МЭМС и микрофлюидики, где не требуется герметичность. Если необходимы высокие диэлектрические свойства и химическая стойкость герметизирующего шва, то для полимерной сварки используют полиимиды либо полимеры на основе BCB.

### ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА

Схема технологического процесса сварки пластин через полимеры приведена на рис. 4. Подготовка пластин перед сваркой полностью совпадает со стандартным литографическим процессом. В процессе нанесения полимера важно выполнить удаление краевого валика и промывку

обратной стороны пластины. Валик помещает приведению пластин в контакт и потребует значительного увеличения температуры и давления при сварке. После нанесения полимера на подготовленную поверхность пластины происходит сушка для испарения растворителя. Если полимер фоточувствительный, то проводится литография. После проявления и сушки производится дополнительная температурная обработка. Для фоторезистов она стабилизирует их свойства (температура 90–150 °С, время 5–20 мин). У полиимидов и BCB при температурной обработке происходят реакции сшивки входящих в их состав полимеров, эти процессы работают при температурах 200–250 °С в течение 10–60 мин. При полимеризации BCB необходима продувка азотом, поскольку неполимеризованный материал легко окисляется кислородом воздуха [4].

Для сварки желателен вакуум  $10^{-3}$  мбар. Откачка камеры установки сращивания позволяет избежать формирования воздушных пустот, а также снижает влияние атмосферного кислорода на полимеры [5].

После загрузки пластин в камеру сварки и откачки воздуха обе пластины нагреваются до температуры, которая на 10 °С превосходит температуру плавления полимера. Для фоторезистов это диапазон 110–150 °С. BCB и полиимиды являются более термически стойкими, для них температура в процессе нагрева подложек должна составлять около 250 °С. Пластины выдерживаются при выставленной температуре 10 мин для обеспечения равномерного прогрева.

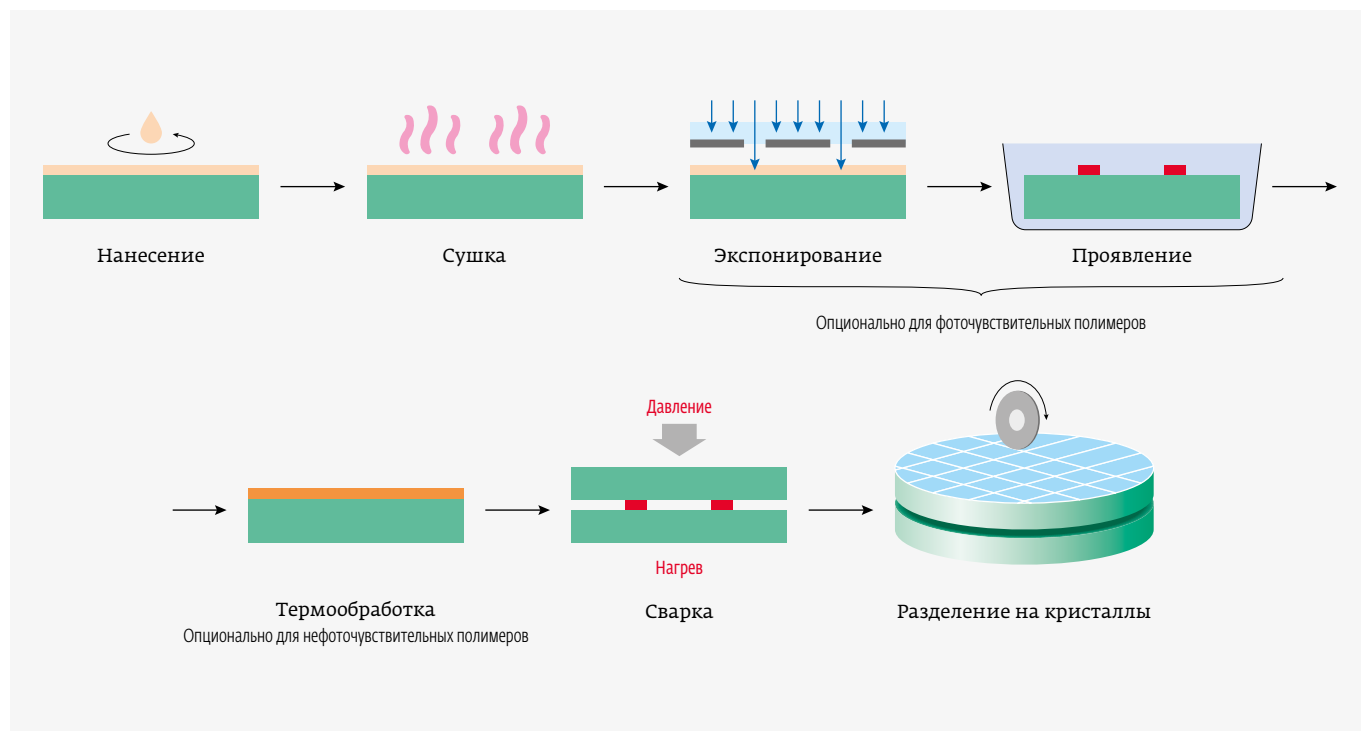
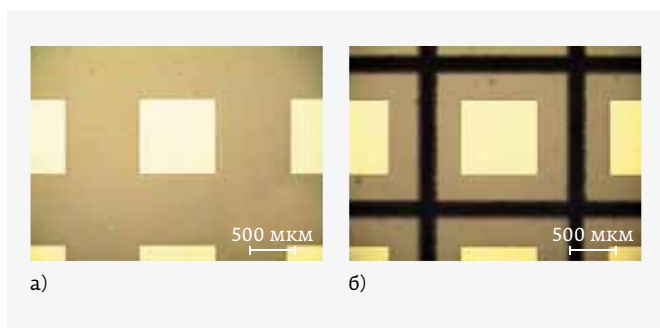


Рис. 4. Технологический маршрут сварки пластин через полимеры



**Рис. 5.** Пластины, сращенные с использованием полимера, до (а) и после (б) резки с помощью алмазного диска

После завершения прогрева убираются разделительные проставки между пластинами, и пластины приводятся в контакт. Для получения надежного соединения необходимо, чтобы полимер смочил поверхность пластины, с которой осуществляется сварка. При этом не требуется экстремально низкая шероховатость поверхности, как в случае непосредственной сварки, для полимерной сварки достаточно шероховатости до 10 нм. В процессе сварки к сборке равномерно прикладывается усилие 0,3–0,5 МПа. Полимер не чувствителен к мелким точечным дефектам поверхности (размером менее толщины пленки), они будут погружены в него и не повлияют на качество соединения. Через несколько минут после приложения усилия в камеру сварки напускается азот и происходит охлаждение пластин. При температуре около 50 °С для фоторезистов и 100 °С для полиимидов и ВСВ механическое усилие снимается. Пластины можно выгружать из установки при температуре 50 °С. После сварки создается высокопрочное соединение, которое без каких-либо повреждений выдерживает процесс разделения на кристаллы при помощи алмазного диска (рис. 5) и дальнейшие нагрузки при эксплуатации.

Таким образом, технологический процесс сварки достаточно прост. Если установка сварки оснащена принудительным охлаждением держателей пластин, то весь цикл от загрузки пластин до их выгрузки занимает 20–30 мин. Благодаря невысокой температуре, до которой нагреваются подложки, это время существенно меньше того, которое требуется для сварки через стеклокерамический припой и анодной сварки.

\* \* \*

Современная электроника, МЭМС и микрофлюидика при создании широкой номенклатуры изделий требуют соединения пластин из одинаковых или разнородных материалов. Существует множество методов осуществления данного процесса. Один из самых простых

способов – сварка пластин через полимеры. В отличие от многих других способов, она полностью совместима с КМОП-процессами и не требует дополнительного оборудования, кроме установки сращивания пластин.

Метод применим в основном для тех изделий, при эксплуатации которых не требуется вакуум. Примерами таких изделий являются вертикально интегрированные микросхемы, выполненные по технологиям 2,5D и 3D, МЭМС, изделия микрофлюидики. В отличие от подавляющего большинства других методов, сварка через полимеры не требует нагрева пластин до высоких температур. Также преимуществом являются низкие механические напряжения в пластинах после процесса и малая чувствительность к пылевидным дефектам, что особенно актуально при требовании высокого выхода годных изделий.

Для приложений, где не требуется создание топологии в соединительном слое полимера, для сварки могут быть использованы полимеры на основе полиимидов и ВСВ. Там, где необходимо создать топологический рисунок в соединительном слое, используются фоточувствительные версии тех же материалов. Кроме того, существуют специальные фоточувствительные полимеры, предназначенные для сварки пластин. Фоторезисты также могут быть использованы для сварки пластин во многих применениях.

ООО «Остек-Интегра» сотрудничает с производителями полимеров для самых передовых технологических процессов. Специалисты компании готовы оказать технологическую поддержку при выборе наилучшего материала для сварки пластин через полимеры и помочь с применением нового материала, сотрудничая с его производителем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Скупов А. С.** Анодная и непосредственная сварка пластин для микроэлектроники. Выбор материалов и ключевые параметры // Вектор высоких технологий. 2015. № 5 (18). С. 36–44.
2. **Скупов А.** Обеспечение вакуума при корпусировании на уровне пластины. Сварка через стеклокерамический припой // Вектор высоких технологий. 2016. № 4 (25). С. 14–20.
3. **Kim J., Kim I., Choi Y., Paik K.-W.** Studies on the Polymer Adhesive Wafer Bonding Method Using Photo-Patternable Materials for MEMS Motion Sensors Applications // IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology. 2012. V. 2. No. 7. PP. 1118–1127.
4. Processing Procedures for CYCLOTENE 4000 Series Photo-BCB Resins (Immersion Develop Process). – The Dow Chemical Company, 2009, 10 p.
5. **Niklaus F., Stemme G., Lu J.-Q., Gutmann R.J.** Adhesive wafer bonding // Journal of Applied Physics. 2006. V. 99. No. 3.



Стоимость 2200 р. за номер  
Периодичность: 10 номеров в год  
[www.electronics.ru](http://www.electronics.ru)



Стоимость 1430 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.photonics.ru](http://www.photonics.ru)



Стоимость 1430 р. за номер  
Периодичность: 6 номеров в год  
[www.j-analytics.ru](http://www.j-analytics.ru)

# ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

[www.technosfera.ru](http://www.technosfera.ru)



Стоимость 1056 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.firstmile.ru](http://www.firstmile.ru)



Стоимость 1287 р. за номер  
Периодичность: 8 номеров в год  
[www.nanoindustry.ru](http://www.nanoindustry.ru)



Стоимость 1716 р. за номер  
Периодичность: 4 номера в год  
[www.stankoinstrument.ru](http://www.stankoinstrument.ru)