

ТЕХНОЛОГИИ

Обеспечение вакуума

при корпусировании на уровне пластины. Сварка через стеклокерамический припой



Текст: Александр Скупов



В предыдущей статье, посвящённой данной теме (журнал «Вектор высоких технологий» № 3(24) май 2016 г.), были кратко изложены методы соединения пластин и сохранения вакуума в герметичном пространстве между ними. Данная статья продолжает обзор технологических решений для корпусирования на уровне пластины, описывая применение сварки через стеклокерамический припой. Рассматриваются вопросы выбора материала, режимов обработки пластин, а также эксплуатационных характеристик устройств, полученных при использовании данной технологии.

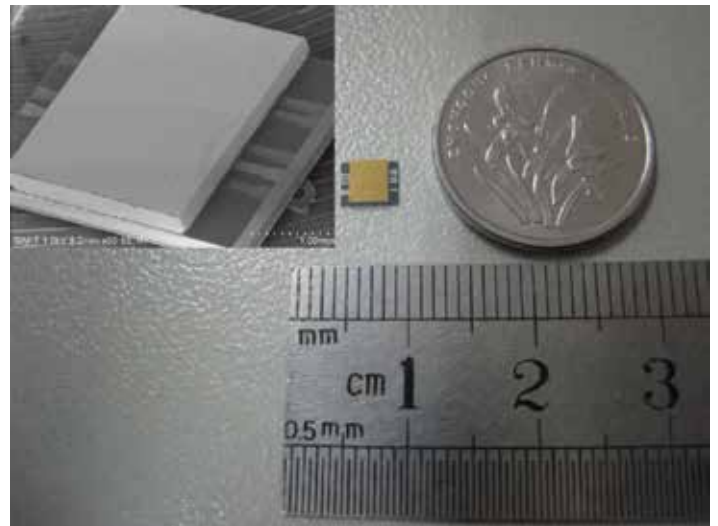
Введение

В предыдущей статье были описаны основные методы, используя которые можно выполнить вакуумное корпусирование МЭМС, МОЭМС и прочих устройств электроники на уровне пластины: сварка через полимеры, металлы и сплавы, стеклокерамический припой, непосредственная, анодная.

Выбор метода сварки, прежде всего, определяется уровнем вакуума, который требуется поддерживать внутри герметичного объёма между пластинами. В предыдущем материале было отмечено, что обеспечить низкий вакуум ($>10^3$ Па) можно всеми вышеперечисленными методами. Для поддержания среднего вакуума (10^3 — 10^{-1} Па) пригодны все методы, кроме сварки через полимеры. Поддержание высокого вакуума ($<10^{-1}$ Па) является более сложной задачей, и применяемый метод сварки должен быть совместим с использованием газопоглотителей — геттеров. Если метод позволяет обеспечить высокий вакуум в герметичном объёме, то он обладает наибольшей универсальностью, а значит, позволяет производителю изготавливать широкую номенклатуру изделий.

Один из таких универсальных методов — сварка пластин через стеклокерамический припой. Этот метод применим для корпусирования устройств, требующих для своей работы среднего и высокого вакуума, например, микроболометров и МЭМС-резонаторов **рис 1**. Данные изделия имеют широчайшую перспективную область применения. Последнее время у автопроизводителей возник интерес к применению сенсоров на основе микроболометров для построения систем инфракрасного зрения, повышающих безопасность дорожного движения в условиях плохой освещённости. МЭМС-резонаторы из кремния во многих применениях могут прийти на замену традиционным кварцевым. Радиочастотные переключатели на основе МЭМС могут заменить ключи на транзисторах. Описанные области использования требуют выпуска огромного количества таких изделий при низкой стоимости. Это означает, что для их производства необходимы высокопроизводительные технологии, и вакуумное корпусирование с помощью стеклокерамического припоя отвечает этому требованию.

Для успешного решения задачи по поддержанию вакуума в герметичном объёме между пластинами необходимо тщательно подойти к вопросам выбора материалов, оборудования, режимов обработки пластин.



1 МЭМС-резонатор, корпусированный с помощью сварки через стеклокерамический припой в вакууме на уровне пластины¹

Общая характеристика метода

Стеклокерамический припой, используемый для соединения пластин стекла, кремния либо иных материалов, представляет собой пастообразное вещество. Основу пасты составляют оксиды различных металлов (англ.: frit), органическое связующее и какой-либо растворитель, корректирующий вязкость. Такой состав позволяет нанести пасту на пластину с помощью либо дозирования, либо трафаретной печати. После нанесения пластины с пастой подвергают температурной обработке, в результате которой удаляются все органические вещества, и паста превращается в стеклообразное неорганическое вещество, обладающее малыми газовыделением и газопроницаемостью.

Данный способ успешно применяется для корпусирования МЭМС, МОЭМС и прочих устройств. С помощью этого метода удавалось достигнуть внутрикорпусного давления менее 0,1 Па, т. е. высокого вакуума^{2,3}. Подобные соединения пластин также демонстрируют высокий уровень герметичности — $7 \cdot 10^{-9}$ атм*см³/с⁴.

¹ G.Wu et al, Wafer-Level Vacuum Packaging for MEMS Resonators Using Glass Frit Bonding, JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 21, NO. 6, 2012, PP 1484-1491

² D. Sparks et al, Reliable Vacuum Packaging Using NanoGetters and Glass Frit Bonding, Proc. SPIE Vol. 5343, Jan 2004, PP 70-78

³ D. Lemoine, Vacuum WLP for MEMS and Monolithic Integration of MEMS and CMOS, McGill University, 2009

⁴ H. Chang et al, High Hermetic Performance of Glass Frit for MEMS Package, IEEE 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2010

Т 1

Основные свойства стекланных паст Ferro и Namics, разработанных для герметизации на уровне пластины

Производитель	Ferro				Namics	
	11-036	11-155	11-201	1180A	DM2700P/J105	DM2995P/J204
Марка	11-036	11-155	11-201	1180A	DM2700P/J105	DM2995P/J204
КТЛР ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	9	9	10	7,5	7,7	6,4
Вязкость, Пуаз	550-850	500-1000	700-1000	545-705	700-1100	580-1100
Число ячеек трафарета, меш	250-325	170-250	250-325	250-325	80-230	80-230
Толщина слоя после сушки (мкм)	22-28	45-60	22-28	22-28	200±50	125±50
Толщина слоя после оплавления (мкм)	11-14	20-25	11-14	11-14	100-180	50-125
D99 размер частиц (мкм)	<15	<50	<15	<15	<20	<15
Твёрдая фаза, %	76±1	85±2	86±1,5	78±0,1	86,9	80-84
Температура выжигания органического связующего $T_{\text{во}}$ ($^\circ\text{C}$)	295	360	315	400	250	250
Температура оплавления $T_{\text{р}}$ ($^\circ\text{C}$)	400-425	425-450	425-450	500	350±5	500±5
Рекомендуемая температура сварки	425-450	475-550	450-470	575-625	320-375	480-520

Свойства стеклокерамических припоев

Стеклокерамические припои могут быть кристаллическими (crystallizing, non-vitreous) и некристаллическими (vitreous). В первом случае после оплавления пасты в её объёме образуются включения кристаллической фазы. Физические свойства такого материала существенно отличаются от свойств частиц порошка, использованного для приготовления пасты. В отличие от них некристаллические пасты имеют аморфную структуру, это стеклообразные материалы, в своём объёме полностью идентичные исходному сырью, использованному для формирования твёрдой части пасты.

Стеклокерамические припои могут быть как диэлектриками, так и проводниками. Для проводимости в пасту добавляют порошок какого-либо металла, например серебра. Чаще всего для герметизации МЭМС и МОЭМС данным способом используют диэлектрические пасты.

Коэффициент термического линейного расширения (КТЛР) припоев зависит от их состава. Существуют припои с малыми КТЛР, что позволяет соединять друг с другом пластины кремния или стекла, а также припои, позволяющие соединять пластины, КТЛР которых сильно различаются.

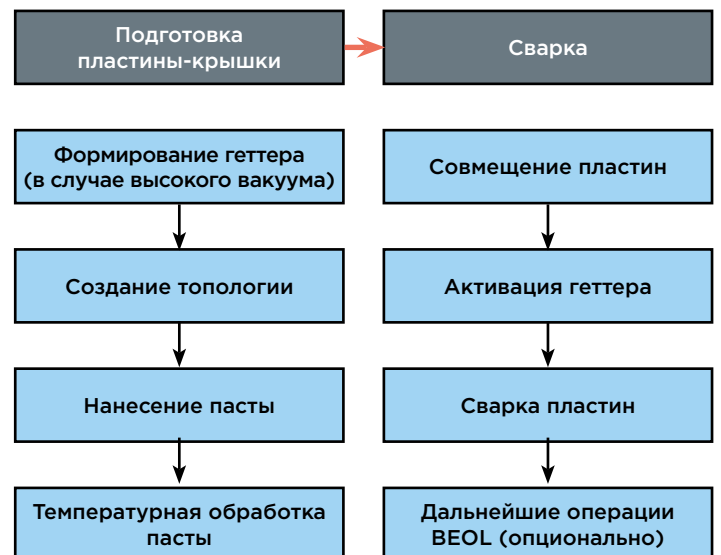
Примером паст, применяемых для сварки через стеклокерамический припой, являются продукты компаний Ferro (США) и Namics (Япония), основные свойства которых приведены в Т 1.

Технология

Вакуумное корпусирование производится в два этапа. Суть первого в подготовке пластины-крышки, второй

включает обработку сборки пластин и заключается в их совмещении, откачке до требуемого давления, активации геттера и сращивании рис 2.

Паста наносится только на одну из пластин перед сваркой. Геттер также достаточно нанести на одну пластину, в целях экономии площади кристалла его чаще всего формируют на пластине-крышке. На ту же пластину наносится и паста, поскольку для этого применяются процессы с высокой вероятностью привнесения дефектности. Дефекты могут быть очень критичны для МЭМС, МОЭМС и устройств вакуумной электроники.



2

Основные этапы сварки пластин через стеклокерамический припой

ПОДГОТОВКА ПЛАСТИНЫ-КРЫШКИ. НАНЕСЕНИЕ И ТЕРМО-ОБРАБОТКА ПАСТЫ

Существуют два наиболее распространённых способа нанесения пасты на поверхность пластин: трафаретная печать и дозирование.

Первый метод является самым популярным благодаря своей высокой производительности, относительно высокому разрешению и малому разбросу по толщине наносимого слоя. При печати используется сетчатый трафарет. Данный метод требует специального принтера, позволяющего контролировать скорость печати и давление, подаваемое на рапель. Трафаретная печать обладает высокой производительностью. При использовании этого метода минимальная воспроизводимая ширина герметизирующих рамок из стеклокерамического припоя составляет 150 мкм, шаг между линиями не менее 120 мкм, а точность совмещения – ±90 мкм⁵.

При нанесении пасты дозированием используется специальный принтер с прецизионным перемещением пластины относительно печатающей головки, из сопла которой с определённым давлением и скоростью подаётся паста. При этом требуется использование менее вязких паст, чем для трафаретной печати. Минимальная ширина линий составляет около 200 мкм (грубо соответствует диаметру сопла), точность совмещения — как при трафаретной печати. Производительность дозирования существенно зависит от количества кристаллов на пластине. Если их много — это недостаточно производительный и эффективный способ.

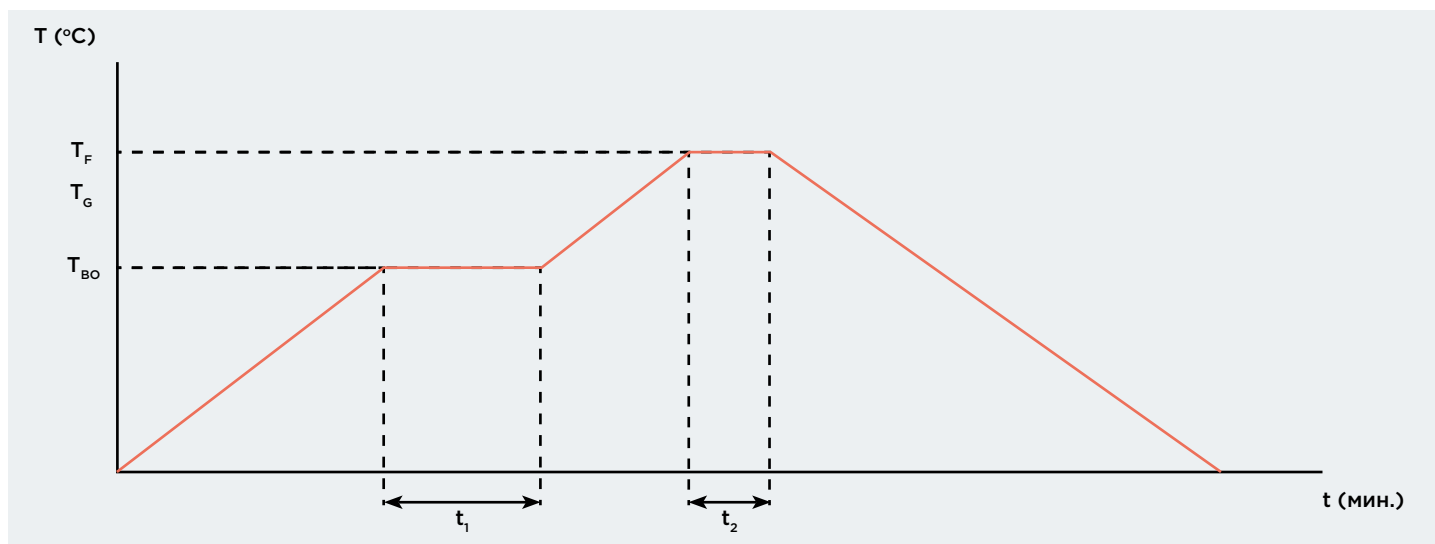
Учитывая, что ширина линий при любом способе нанесения составляет сотни микрон, а точность со-

вмещения — десятки, необходимо обеспечить довольно большое расстояние между кристаллами.

После нанесения пасты проводится её термообработка (в англоязычной литературе — glazing, глазурирование). Общий вид термопрофиля обработки пасты приведён на рис 3. Можно выделить три ключевых этапа термообработки: сушка (англ.: drying), выжигание органического связующего (англ.: organics burn-out) и оплавление пасты (англ.: firing, glazing).

На первом этапе температура подложки увеличивается до 100-120 °С, при этом происходит испарение растворителей. Время этапа при данной температуре — 10-15 минут. Обычно в термопрофиле не выделяют отдельное плато в этом диапазоне, поскольку температура нагрева не должна быть выше 3-5 °С/мин, поэтому за время нагрева до характерной температуры следующего этапа должно произойти гарантированное испарение растворителя.

Выжигание органического связующего происходит при температуре T_{BO} рис 2, 1. Необходимо, чтобы эта температура была ниже температуры стеклования твёрдой фазы пасты (T_G). Время, требуемое для выжигания, зависит от размера частиц пасты, толщины нанесённого слоя и свойств использованного органического вещества. Важно выбрать правильную температуру и время на данном этапе, поскольку при ненадлежащем выжигании органических связующих в герметизирующей линии останутся пустоты, не будут достигнуты желаемые характеристики по герметичности и прочности соединения.



3 Основные этапы сварки пластин через стеклокерамический припой

Т 2

Основные свойства стеклянных паст Ferro и Namics, разработанных для герметизации на уровне пластины

Свойство	Характеристика	Преимущество/недостаток
Чувствительность к неровностям поверхности	Низкая	+
Спектр материалов	Широкий	+
Использование площади пластины	Неэкономное	-
Точность совмещения	Низкая	-
Контроль толщины слоя между пластинами	Ограничен	-
Высокий вакуум	Возможен	+
Температурный диапазон сварки	320-625 °C	+

На последнем этапе температурной обработки пластина нагревается до температуры плавления припоя (T_F). Время, необходимое для данного процесса, определяется условием хорошей смачиваемости поверхности и освобождением расплава от захваченных на предыдущих этапах газов. После оплавления пасты пластина охлаждается со скоростью, равной скорости нагрева на предыдущих этапах: 3-5 °C/мин.

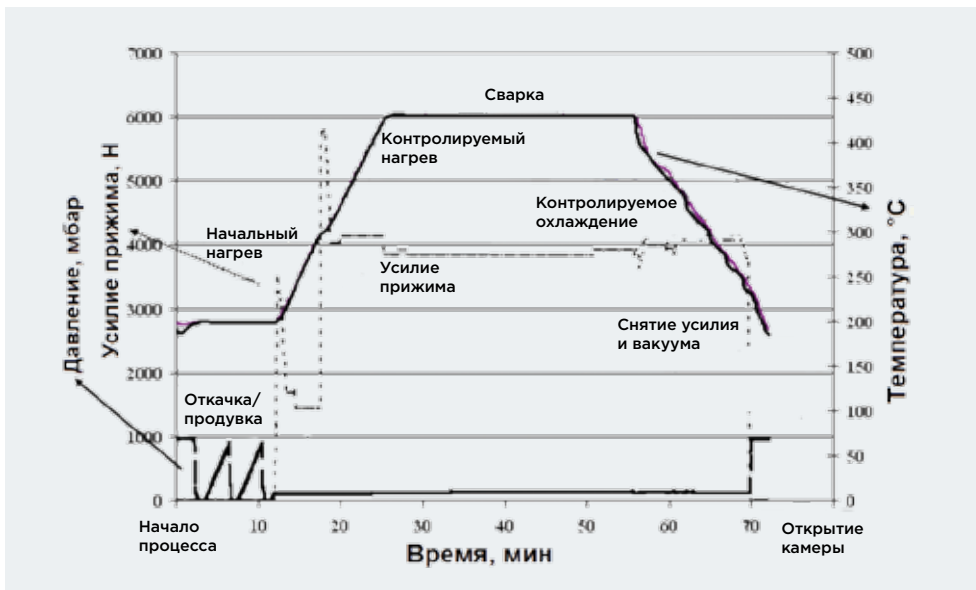
Термическую обработку пасты лучше всего проводить при нормальной атмосфере либо в азоте. Если паста нанесена на пластину, где уже сформированы плёнки геттера, то термообработку нужно проводить в инертной атмосфере. При контакте с воздухом после извлечения из печи геттер покрывается защитной плёнкой оксидов и гидридов, его финальная активация должна производиться уже непосредственно перед сваркой в камере бондера.

По окончании термообработки пластины охлаждаются до комнатной температуры. После этого они готовы для совмещения с приборной пластиной

и последующей сварке. Перед совмещением может быть проведена отмычка пластин в каком-либо органическом растворителе либо снимателе фоторезиста — шаги процесса могут быть такими же, как между операциями осаждения диэлектриков (либо отжига) и фотолитографией. Использование сильных окислителей (смесь Каро, SC-1, SC-2) недопустимо. При обработке пластин с оплавленным припоем следует использовать оборудование, которое не задействовано в производстве микросхем (по причинам опасности привнесения загрязнений).

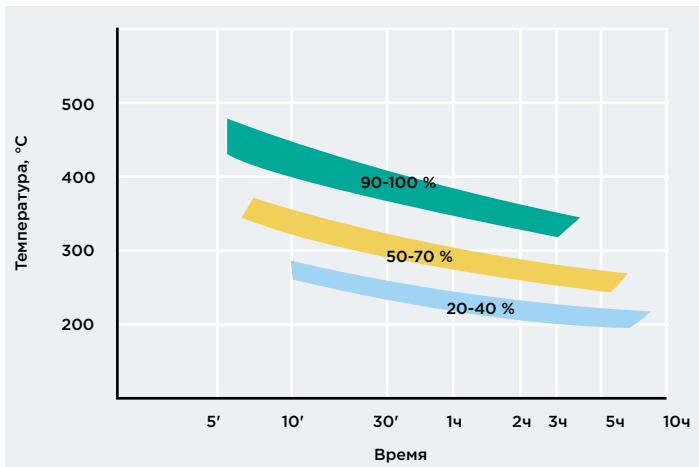
СОВМЕЩЕНИЕ, АКТИВАЦИЯ ГЕТТЕРА И СВАРКА

Поскольку сварка через стеклокерамический припой не способна обеспечить точность совмещения более нескольких десятков микрон, использование оптического совмещения по специальным меткам является избыточным. Достаточно совместить пластины по базовым срезам. Стандартные допуски на длины срезов позволяют обеспечить точность ± 50 мкм.



4

Измеренный профиль давления и температуры во время процесса сварки через стеклокерамический припой⁶



5 Эффективность активации геттера при различных температурах⁷

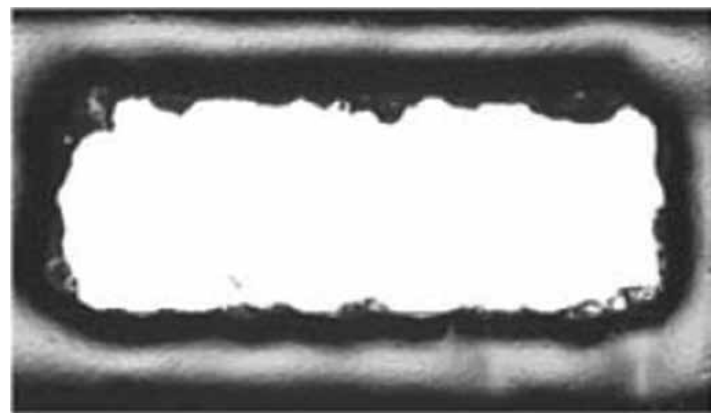
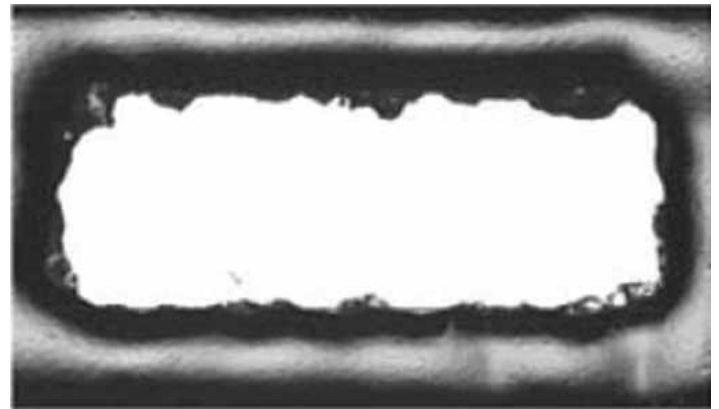
Толщина проставок, разделяющих пластины в камере бондера во время откачки газа, может быть выше 150 мкм. Величина зазора, созданного проставками, существенно влияет на точность совмещения во всех остальных методах сварки, но здесь это не принципиально. Напротив, при данном способе можно обеспечить максимальный зазор между пластинами при откачке, что даст быстрое удаление газа и минимизирует разброс давления между центральными и периферийными кристаллами.

При сварке контролируются следующие параметры: давление (откачка), температура, усилие прижима пластин. Все они задаются во времени согласно профилю, вид которого представлен на рис 4.

После откачки до требуемого давления пластина с геттером нагревается до температуры его активации. На рис 5 показаны характерные температура и время, при которых происходит этот процесс. Для оптимизации производительности достаточно активировать геттер на 70-80 %. Температура внутри камеры при активации геттера не должна приводить к преждевременному плавлению припоя. В противном случае он может непредсказуемо растекаться, а также могут меняться его свойства, особенно если припой нанесён на слой SiO₂⁸.

После активации геттера обе пластины нагреваются до температуры сварки. При этом припой плавится. Температура должна быть подобрана таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить надлежащую герметизацию, а с другой — предотвратить попадание расплавленного припоя в область кристалла, где расположены функциональные элементы. Обычно растекание ограничивают канавками или выступами, предусмотренными в топологии одной из пластин рис 6.

Когда температура внутри камеры достигает диапазона плавления припоя, необходимо выдержать паузу в несколько минут для гарантированного выравнивания



6 Результат трафаретной печати: а - на плоской поверхности; б — на поверхности с выступами

температур. По окончании этой паузы разделительные проставки автоматически убираются и сборка сжимается. Давление, прикладываемое к сборке при срачивании, необходимо лишь для сглаживания неоднородностей поверхностей пластин, обычно оно составляет 0,3-1,5 бар, что обеспечивает конечную толщину припоя 5-10 мкм. Давление неизбежно вызывает скольжение пластин относительно друг друга при возникновении составляющей внешней силы, параллельной поверхности. Для минимизации этого эффекта стараются прикладывать давление максимально равномерно, а также использовать проставки с КТЛР, приближенным к КТЛР материала пластин. Тем не менее, это явление приводит к дополнительному рассовмещению в 10-20 мкм.

После приведения пластин в контакт при заданном усилии прижима, сборка выдерживается в течение нескольких минут для гарантированного смачивания припоем поверхности противоположной пластины. Затем сборка охлаждается с заданной скоростью. Давление прижима снимается только после того, как температура опустилась ниже температуры стеклования припоя (T_g), одновременно с этим можно отключить откачку.

Границы применимости метода

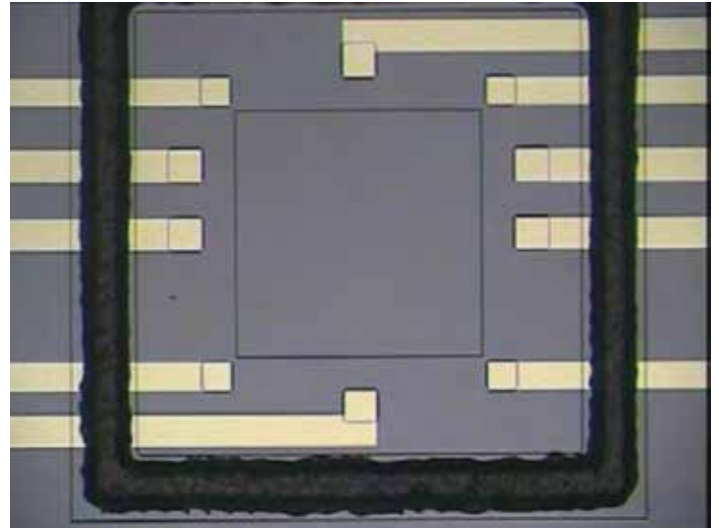
Описанный способ сварки пластин для реализации вакуумного корпусирования является гибким и простым. Он позволяет обеспечить глубокий вакуум в герметизируемом объеме с геттером. Поэтому сварка через стеклокерамический припой может быть использована при производстве микроболометрических сенсоров, МЭМС-гироскопов и других приборов, требующих в своей работе высокого вакуума. Основные преимущества и недостатки данного метода приведены в **Т 2**.

Малая чувствительность к неровностям поверхности является одним из главных преимуществ данного метода по сравнению с другими, пригодными для вакуумного корпусирования. Поэтому с его использованием очень просто решается задача создания электрических контактов к элементам, находящимся в вакуумном объеме **рис 7**. Однако недостатки данного метода не позволяют применить его там, где требуются высокая точность совмещения пластин, точный зазор между ними и/или экономичное использование площади пластины. Во всех остальных случаях сварка через стеклокерамический припой является привлекательным методом.

В любом случае, при выборе способа сварки нужно учитывать его особенности и соотносить их с требованиями к устройствам, производство которых планируется.

Заключение

Сварку через стеклокерамический припой можно использовать в том случае, если требуется создать давление менее 0,1 Па внутри герметичного пространства между срачиваемыми пластинами. При выборе материала учитываются химические и физические свойства пасты и материала обеих пластин.



7 Герметизирующая рамка из стеклокерамического припоя

Техпроцесс состоит из двух ключевых этапов: подготовки крышки с рисунком из припоя и срачивания. На производстве необходимо иметь оборудование, позволяющее осуществлять трафаретную печать на пластине либо дозирование, печь для термообработки, а также бондер, чтобы производить откачку камеры сварки.

Специалисты Группы компаний Остек готовы оказать поддержку при выборе стеклокерамических припоев, оборудования для работы с ними, а также для осуществления процесса вакуумного корпусирования с помощью сварки пластин через стеклокерамический припой. Компанией накоплен большой опыт поставок оборудования и материалов для сварки пластин для производства МЭМС, МОЭМС и других изделий микроэлектроники, в том числе с помощью описанного метода. **▣**