

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВАКУУМА ПРИ КОРПУСИРОВАНИИ НА УРОВНЕ ПЛАСТИНЫ – СВАРКА СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИМ ПРИПОЕМ

А.Скупов¹

УДК 621.382
ВАК 05.27.06

В журнале "ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ" была опубликована статья [1], посвященная проблеме обеспечения вакуума внутри микроэлектронных устройств при их корпусировании на уровне пластины. В ней кратко изложены методы соединения пластин и сохранения вакуума в герметичном пространстве между ними. Продолжаем обзор технологических решений для корпусирования на уровне пластины – речь пойдет о применении сварки стеклокерамическим припоем. Рассмотрим, как выбрать материал припоя, режимы обработки пластин, а также каковы границы применимости такой технологии сварки.

Вакуумное корпусирование микроэлектромеханических систем (МЭМС), микрооптоэлектромеханических систем (МОЭМС) и прочих устройств электроники на уровне пластины выполняется при использовании следующих основных методов: сварка полимерами, металлами и сплавами, стеклокерамическим припоем, непосредственная, анодная [1].

Выбор метода сварки определяется, прежде всего, уровнем вакуума, который требуется поддерживать внутри герметичного объема между пластинами. В предыдущем материале отмечалось, что обеспечить низкий вакуум ($>10^3$ Па) можно любым из вышеперечисленных методов. Для сохранения среднего вакуума (10^3 – 10^{-1} Па) пригодны все методы, кроме сварки через полимеры.

Поддержание высокого вакуума ($<10^{-1}$ Па) – более сложная задача, и применяемый метод сварки должен быть совместим с использованием газопоглотителей – геттеров. Метод сварки, обеспечивающий высокий вакуум в герметичном объеме, – наиболее универсальный, а значит, предоставляет производителю возможность изготавливать широкую номенклатуру изделий.

Один из универсальных методов – сварка пластин стеклокерамическим припоем – применим для корпусирования устройств, требующих среднего и высокого вакуума, например, микроболометров и МЭМС-резонаторов (рис.1) [2]. Данные изделия имеют широчайшую перспективную область применения. Автопроизводители проявляют интерес к использованию сенсоров на основе микроболометров для построения систем инфракрасного зрения, повышающих безопасность дорожного движения в условиях плохой освещенности. МЭМС-резонаторы из кремния во многих прило-

¹ ООО "Остек-Интегра", главный специалист отдела технического сопровождения, skupov.a@ostec-group.ru.

жениях могут заменить собой традиционные кварцевые, а радиочастотные переключатели на основе МЭМС – ключи на транзисторах. Данные области применения требуют выпуска огромного количества таких изделий, причем недорогостоящих. Для их производства необходимы высокопроизводительные технологии, и вакуумное корпусирование с помощью стеклокерамического припоя отвечает этому требованию.

Для решения задачи по поддержанию вакуума в герметичном объеме между пластинами необходимо тщательно подойти к выбору материалов, оборудования и режимов обработки пластин.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДА

Стеклокерамический припой для соединения пластин стекла, кремния либо иных материалов представляет собой пастообразное вещество. Основу пасты составляют оксиды различных металлов (англ.: fritt), органическое связующее и растворитель, корректирующий вязкость. Такую пасту можно нанести на пластину путем дозирования либо трафаретной печати. Затем пластину подвергают температурной обработке, в результате чего удаляются все органические вещества, и паста превращается в стеклообразное неорганическое вещество, обладающее малыми газовыделением и газопроницаемостью.

Благодаря данному способу, который применяется для корпусирования МЭМС, МОЭМС и прочих устройств, удавалось обеспечить внутрикорпусное давление менее 0,1 Па, то есть высокий вакуум [3, 4]. Подобные соединения пластин отличаются высокой герметичностью – $7 \cdot 10^{-9}$ атм·см³/с [5].

СВОЙСТВА СТЕКЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПРИПОЕВ

Стеклокерамические припои могут быть кристаллическими (crystallizing, non-vitreous) и некристаллическими (vitreous). В первом случае после оплавления пасты в ней образуются включения кристаллической фазы. Физические свойства такого материала существенно отличаются от свойств частиц порошка для приготовления пасты. Некристаллические пасты имеют аморфную структуру, это стеклообразные материалы, полностью идентичные исходному сырью, из которого сформирована твердая часть пасты.

Стеклокерамические припои могут быть как диэлектриками, так и проводниками. Для проводимости в пасту добавляют порошок 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. Припои с малыми КТЛР дают возможность соединять пластины кремния или стекла, существуют также припои, позволяю-

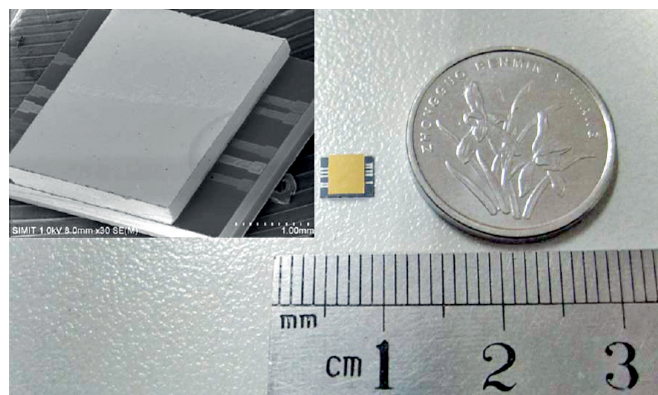


Рис.1. МЭМС-резонатор, корпусированный путем сварки стеклокерамическим припоем в вакууме на уровне пластины

щие соединять пластины, КТЛР которых сильно различаются.

Примером паст для сварки стеклокерамическим припоем являются продукты компаний Ferro (США) и Namics (Япония) (табл.1).

ТЕХНОЛОГИЯ

Вакуумное корпусирование производится в два этапа. Суть первого в подготовке пластины-крышки, второй включает обработку стека пластин и заключается в их совмещении, откачке до требуемого давления, активации геттера и сращивании (рис.2).

Перед сваркой паста и геттер наносятся только на одну пластину, причем последний в целях экономии площади кристалла чаще всего формируют на пла-



Рис.2. Основные этапы сварки пластин стеклокерамическим припоем. BEOL (back end of line) – конечный этап изготовления схемы

Таблица 1. Основные свойства стекланных паст Ferro и Namics, разработанных для герметизации на уровне пластины

Производитель	Ferro				Namics	
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
Плотность 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
Размер частиц (D99'), мкм	<15	<50	<15	<15	<20	<15
Твердая фаза, %	76±1	85±2	86±1,5	78±0,1	86,9	80–84
Температура выжигания органического связующего T_{BO} , $^{\circ}\text{C}$	295	360	315	400	250	250
Температура оплавления T_{F} , $^{\circ}\text{C}$	400–425	425–450	425–450	500	350±5	500±5
Рекомендуемая температура сварки, $^{\circ}\text{C}$	425–450	475–550	450–470	575–625	320–375	480–520

* 99% частиц в пасте имеют указанный размер.

стине-крышке. На ту же пластину наносится и паста, поскольку выполняются процессы с высокой вероятностью привнесения дефектности. Дефекты могут быть очень критичны для МЭМС, МОЭМС и устройств вакуумной электроники.

ПОДГОТОВКА ПЛАСТИНЫ-КРЫШКИ. НАНЕСЕНИЕ И ТЕРМООБРАБОТКА ПАСТЫ

Два наиболее распространенных способа нанесения пасты на поверхность пластин – трафаретная печать и дозирование.

Первый метод – самый популярный благодаря 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 отличается 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 мкм [6].

При нанесении пасты путем дозирования используется специальный принтер с прецизионным перемещением пластины относительно печатающей головки, из сопла которой с определенным давлением и скоростью подается паста. При этом требуются менее вязкие пасты, чем для трафаретной печати. Минимальная

ширина линий составляет около 200 мкм (примерно соответствует диаметру сопла), точность совмещения – как при трафаретной печати. Производительность дозирования в значительной мере зависит от числа кристаллов на пластине. При большом их количестве это недостаточно производительный и эффективный способ.

Поскольку ширина линий при любом способе нанесения составляет сотни микрон, а точность совмещения – десятки, необходимо обеспечить довольно большое расстояние между кристаллами.

После нанесения пасты она подвергается термообработке (в англоязычной литературе – глазурированию, glazing) (рис.3). Можно выделить три ключевых этапа

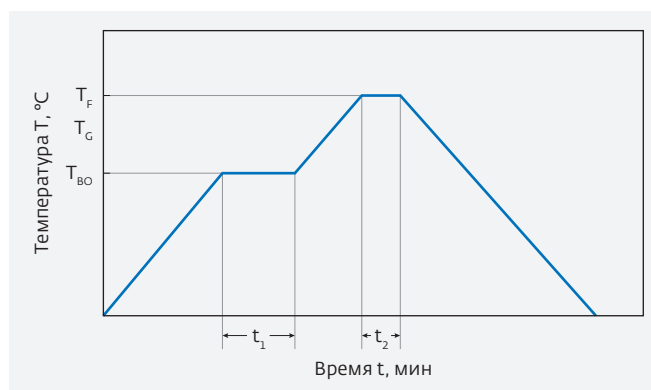


Рис.3. Общий вид термопрофиля оплавления стеклокерамического припоя

термообработки: сушка (drying), выжигание органического связующего (organics burn-out) и оплавление пасты (firing, glazing).

На первом этапе температура подложки повышается до 100–120 °С, при этом происходит испарение растворителей. Продолжительность этапа при данной температуре – 10–15 мин. Обычно в термопрофиле не выделяют отдельное плато в этом диапазоне, поскольку скорость нагрева не должна превышать 3–5 °С/мин, чтобы за время нагрева до нужной температуры следующего этапа гарантировать испарение растворителя [6].

Органическое связующее выжигается при температуре T_{BO} (рис.3, табл.1), которая должна быть ниже температуры стеклования твердой фазы пасты (T_g). Продолжительность выжигания зависит от размера частиц пасты, толщины нанесенного 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 и не удастся обеспечить желаемые уровни герметичности и прочности соединения.

На последнем этапе термообработки пластина нагревается до температуры плавления припоя (T_p). Необходимое для данного процесса время определяется условиями хорошей смачиваемости поверхности и освобождения расплава от захваченных на предыдущих этапах газов. После оплавления пасты пластина охлаждается со скоростью, равной скорости нагрева на предыдущих этапах: 3–5 °С/мин.

Термическую обработку пасты лучше всего проводить в нормальной атмосфере либо в азоте. Если паста нанесена на пластину, где уже сформированы пленки геттера, то подвергать ее термообработке нужно в инертной атмосфере. При контакте с воздухом после извлечения из печи геттер покроется защитной пленкой 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 к последующей сварке. Перед совмещением пластины можно отмыть в органическом растворителе либо снимателе фоторезиста – последовательность процедуры такая же, как между операциями осаждения диэлектриков (либо отжига) и фотолитографией. Применять сильные окислители (смесь Каро, SC-1, SC-2) недопустимо. При обработке пластин с оплавленным припоем рекомендуется использовать оборудование, которое не задействовано в производстве микросхем (из-за опасности привнесения загрязнений).

СОВМЕЩЕНИЕ, АКТИВАЦИЯ ГЕТТЕРА И СВАРКА

Поскольку путем сварки стеклокерамическим припоем невозможно обеспечить точность совмещения свыше нескольких десятков микрон, использовать оптическое совмещение по специальным меткам нецелесообразно. Достаточно совместить пластины по базовым срезам. Стандартные допуски на длины срезов обеспечивают точность ± 50 мкм.

Толщина проставок, разделяющих пластины в камере бондера во время откачки газа, может превышать 150 мкм. Величина зазора, созданного проставками, существенно влияет на точность совмещения при остальных методах сварки, но в этом случае не принципиальна. Напротив, при данном способе можно обеспечить максимальный зазор между пластинами при откачке, что позволит быстро удалить газ и свести к минимуму разброс давления между центральными и периферийными кристаллами.

При сварке контролируются следующие параметры: давление (откачка), температура, усилие прижима пластин. Все они задаются во времени согласно определенному профилю (рис.4) [7].

После откачки до требуемого давления пластина с геттером нагревается до температуры его активации. Эффективность процесса зависит от температуры и времени (рис.5) [8]. 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, могут меняться его свойства, особенно если припой нанесен на слой SiO_2 [6, 9].

После активации геттера обе пластины нагреваются до температуры сварки и припой плавится. Температура должна быть подобрана так, 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) [6].

Когда температура внутри камеры достигает диапазона плавления припоя, необходимо выдержать паузу в несколько минут для гарантированного выравнивания температур. По окончании 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 вызывает скольжение пластин относительно друг

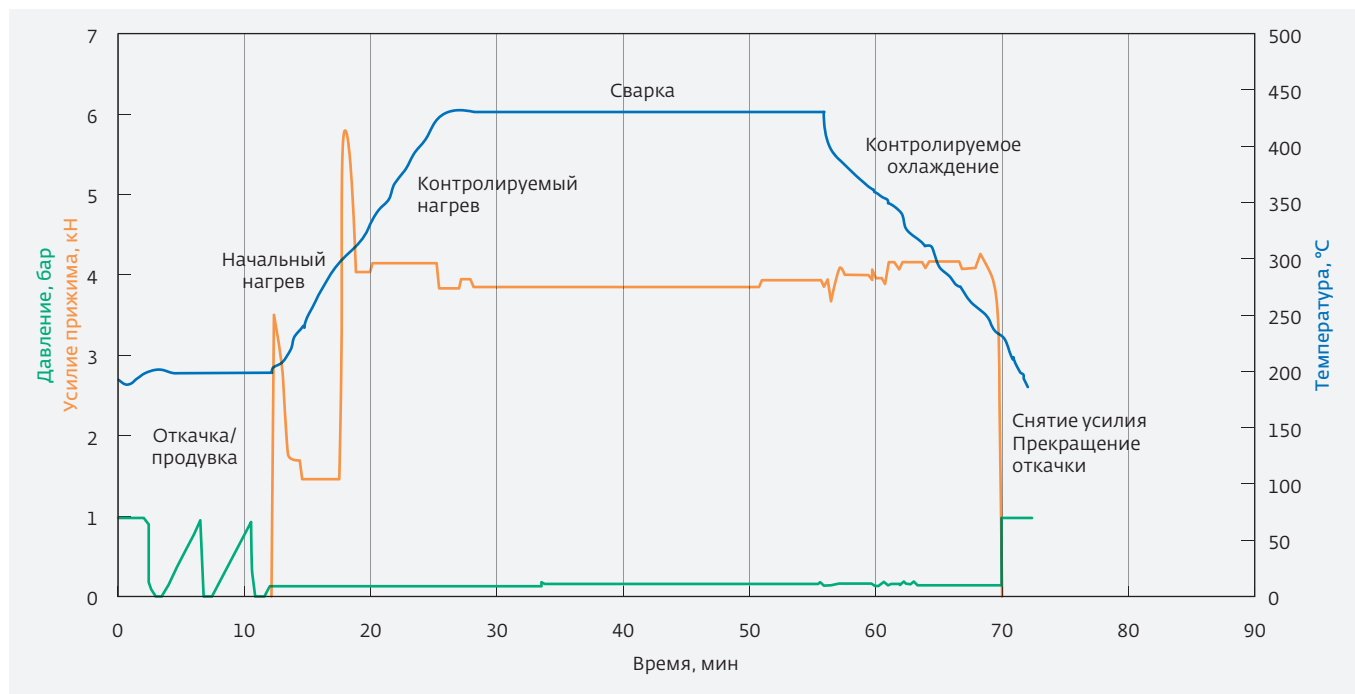


Рис.4. Измеренные профили давления и температуры во время процесса сварки стеклокерамическим припоем (числа по вертикальной оси относятся и к давлению, и к усилию прижима, но имеют разную размерность для этих величин)

друга из-за возникновения составляющей внешней силы, параллельной поверхности. Для минимизации этого эффекта давление прикладывают максимально равномерно, а также используют проставки с КТЛР, приближенным к КТЛР материала пластин.

Тем не менее это приводит к дополнительному рас-
совмещению в 10–20 мкм [6].

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

ГРАНИЦЫ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА

Описанный способ сварки пластин для реализации вакуумного корпусирования – гибкий и простой – позволяет обеспечить глубокий вакуум в герметизируемом объеме с геттером. Поэтому сварка стекло-

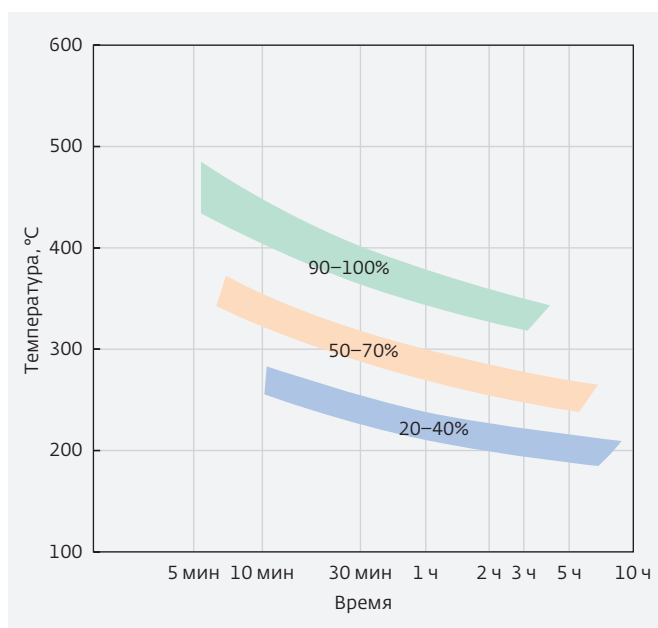


Рис.5. Эффективность активации геттера при различных температурах

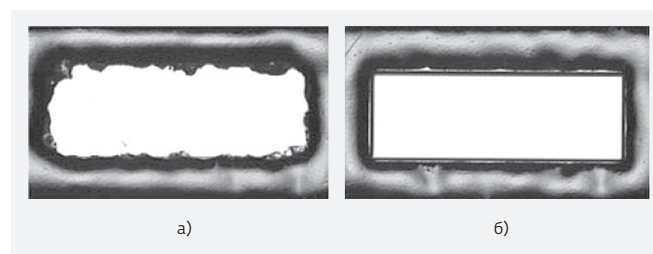


Рис.6. Результат трафаретной печати: а) на плоской поверхности; б) на поверхности с выступами

керамическим припоем подходит для применения в производстве микроболометрических сенсоров, МЭМС-гироскопов и других приборов, которым необходимо обеспечить высокий вакуум.

Малая чувствительность к неровностям поверхности – одно из главных преимуществ данного метода (табл.2) по сравнению с другими, пригодными для вакуумного корпусирования. Его использование обеспечивает простое решение задачи по созданию электрических контактов к элементам, находящимся в вакууме (рис.7) [2]. Однако недостатки данного метода не позволяют применить его там, где требуются высокая точность совмещения пластин, определенный зазор между ними и/или экономичное использование площади пластины. В остальных случаях сварка стеклокерамическим припоем – оптимальный метод.

При выборе способа сварки нужно учитывать его особенности и соотносить их с требованиями к устройствам, производство которых планируется.

Специалисты группы компаний Остек готовы оказать поддержку при выборе стеклокерамических припоев, оборудования для работы с ними, а также реализации процесса вакуумного корпусирования с помощью сварки пластин стеклокерамическим припоем. Компанией накоплен большой опыт поставок оборудования и материалов для сварки пластин

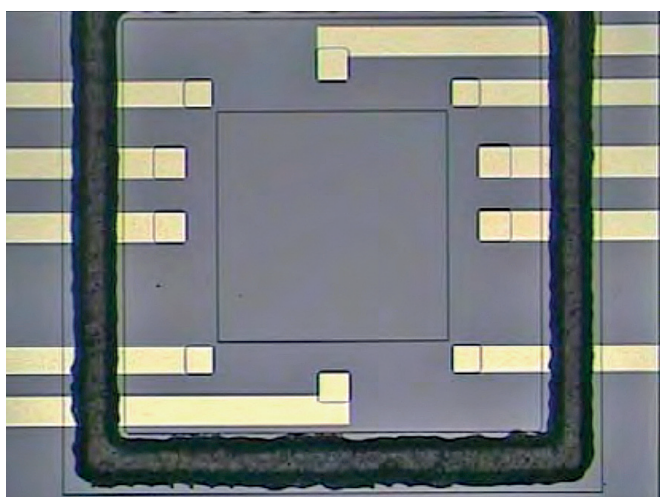


Рис.7. Герметизирующая рамка из стеклокерамического припоя

Таблица 2. Основные характеристики сварки пластин стеклокерамическим припоем

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 °С	+

при производстве МЭМС, МОЭМС и других изделий микроэлектроники, в том числе с помощью описанного метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Скупов А.** Вакуумное корпусирование на уровне пластины – геттеры. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. 2016. № 5.
2. **Wu G. 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.
3. **Sparks D. et al.** Reliable Vacuum Packaging Using NanoGetters and Glass Frit Bonding. – Proc. SPIE Vol. 5343, Jan 2004, pp. 70–78.
4. **Lemoine D.** Vacuum WLP for MEMS and Monolithic Integration of MEMS and CMOS, McGill University, 2009.
5. **Chang H. et al.** High Hermetic Performance of Glass Frit for MEMS Package. – IEEE 2010 5th International Microsystems Packaging Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2010.
6. **Knechtel R.** Glass frit bonding: an universal technology for wafer level encapsulation and packaging. – Microsyst. Technol. 2005. Vol. 12. № 1–2. PP. 63–68.
7. **Sridharan S., Dragoi V. et al.** Effect of Process Variables on glass Frit Wafer Bonding in MEMS Wafer Level Packaging. – Proceedings of Symposium GG: MEMS, materials and devices II – MRS, 2005.
8. **Ramesham R.** Evaluation of Non-Evaporable Getters for High Vacuum Hermetic Packages, California Institute of Technology, 1999.
9. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologie / Edited by V. Lindroos [and co-authors]. Burlington: Elsevier Inc., 2010, 636 p.