

# Установка диффузионной сварки подложек микроэлектромеханических систем

**В статье рассмотрены механизмы диффузионной сварки подложек из стекла, кремния и пьезокерамики, конструктивные принципы построения и технические характеристики установки диффузионной сварки ЭМ-4044, предназначенной для получения неразъемного соединения элементов МЭМС.**

**Ольга Клим**

olga\_v\_klim@mail.ru

**Олег Кременьков  
Владимир Ланин  
Александр Лапатин  
Владимир Нестерович  
Святослав Школык**

**Введение**

На протяжении нескольких десятилетий основными мировыми тенденциями в области науки, техники и технологий являются микроминиатюризация и интеграция систем при непрерывном совершенствовании их технических характеристик, которые основаны на использовании новых технологических возможностей микроэлектроники и микромеханики.

В настоящее время изделия микросистемотехники наиболее перспективны и востребованы в мире. Составляющие этих изделий — микроэлектромеханические системы (МЭМС) — осуществляют преобразование механической энергии, оптических, акустических и других видов воздействий в электрический сигнал, состоят из чувствительных элементов, первичных преобразователей и являются основой интегрированных датчиков физических и химических величин, разрабатываемых с использованием микросистемных технологий: акселерометров, гироскопов, датчиков давления и т. д. [1]. Вот почему сегодня особенно актуальна разработка и создание нового поколения МЭМС и унифицированных интегрированных систем двойного назначения на их основе.

Один из основных этапов микросистемной технологии — получение неразъемного соединения элементов МЭМС (подложек, корпусов и т. д.), изготавливаемых из широкого ряда неметаллических материалов: кремния, стекло, таких пьезоэлектрических материалов, как пьезокварц, ниобат лития, танталат лития, лангасит, лангата [2], обладающих физико-химическими свойствами, затрудняющими обработку традиционными методами и манипулирование ими в процессе производства МЭМС. Данные материалы хрупки и разрушаются при незначительных тепловых воздействиях, некоторые имеют пиротехнический эффект.

Анализ технологии производства изделий микросистемотехники показал, что наиболее перспективным и прогрессивным способом получения неразъемных соединений элементов МЭМС является диффузионная сварка в вакууме. В отличие от других данный вид сварки позволяет получить надежное,

прочное, герметичное соединение, сохраняя при этом исходные свойства материалов соединяемых элементов МЭМС, что является принципиальным и особо важным при производстве данного рода изделий. Поэтому наличие специального технологического оборудования для осуществления данного процесса весьма актуально.

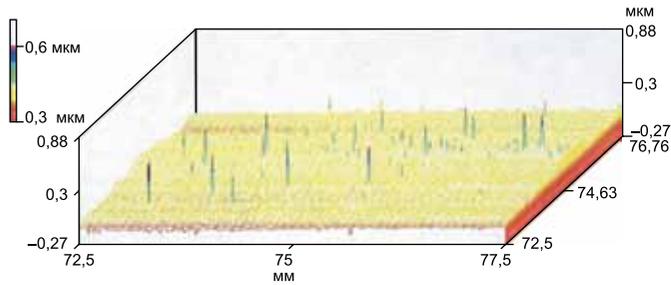
Для технического перевооружения предприятий, разрабатывающих и производящих конкурентоспособные МЭМС, а также для решения задач производства новых поколений МЭМС, необходимых для выпуска высокотехнологичной наукоемкой электронной продукции мирового уровня, новых поколений приборов гражданского, специального и двойного применения разработана установка диффузионной сварки подложек МЭМС.

## Механизмы диффузионной сварки

Диффузионная сварка — разновидность сварки давлением, представляющая собой соединение твердых материалов в результате возникновения атомных связей, сформированных путем местной незначительной пластической деформации при относительно длительном воздействии повышенной температуры и взаимной диффузии в поверхностные слои [3]. Для защиты соединяемых элементов от интенсивного отрицательного воздействия внешних факторов в процессе разогрева и сварки в рабочей камере создается вакуум. Применяют следующие виды диффузионной сварки [4]:

- прямая сварка материалов (без промежуточного слоя);
- сварка материалов через промежуточный слой.

Иногда камеры заполняют инертным газом или газом, обладающим восстановительными свойствами. Нагрев соединяемых деталей производят в собранном состоянии до температур, равных 0,6–0,7 температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов. Защитная среда и вакуум в камере способствуют удалению конечных поверхностных загрязнений на соединяемых материалах. В зависимости от вида соединяемых материалов прочное соединение обра-


**Рис. 1.** Топография поверхности пьезокварцевого стекла

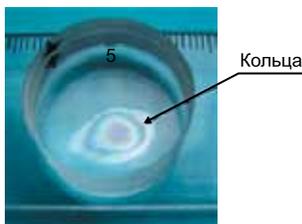
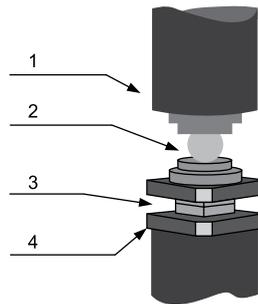
зается за 5 мин. и более. Основные параметры диффузионной сварки — усилие сжатия, температура нагрева, степень разрежения и время.

При прямой диффузионной сварке для получения качественного соединения встык значительную роль играют требования к качеству поверхностей. При данной сварке предъявляются жесткие требования в отношении профиля, параллельности, шероховатости и чистоты соединяемых поверхностей. После шлифования, притирания и полирования поверхности должны иметь шероховатость не более  $(0,02 \pm 0,01)$  мкм. На рис. 1 приведена топограмма поверхности сканированного пьезокварцевого стекла.

Температура нагрева при прямой сварке, усилие сжатия и время их воздействия определяются физическими и химическими свойствами соединяемых материалов. Поэтому одним из главных факторов при прямой диффузионной сварке является минимальное различие температурных коэффициентов линейного расширения соединяемых материалов и их одинаковая температура трансформации.

При прямой диффузионной сварке пьезокварцевых стекол [5] в вакууме или инертном газе используют вертикально сжимающее устройство (рис. 2), которое создает постоянное контактное усилие на образцы в течение всего процесса. В конструкции сжимающего устройства имеет существенное значение применение шарового механизма между плунжером и базовой платой, гарантирующего плотный контакт свариваемых поверхностей и равномерность распределения прилагаемого усилия на пластины. Поверхности предварительно очищаются от загрязнений смесью этанола и эфира в пропорции 60:40.

Температурный цикл сварки включает три фазы: нагрева, пластичности с непрерывным процессом диффузии и охлаждения. Критерием формирования качественного соединения пьезокварцевого стекла является наличие колец Ньютона, показанных на рис. 3.

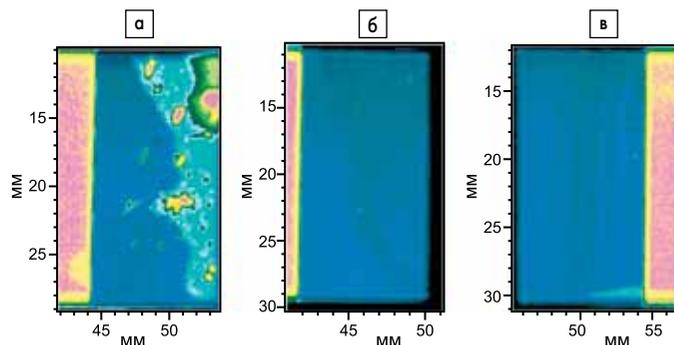

**Рис. 3.** Соединение пьезокварцевых стекол (кольца Ньютона)

**Рис. 2.** Сжимающее устройство:

- 1 — плунжер; 2 — шарик;
- 3 — кварцевое стекло; 4 — основание

Температурные показатели соединения пьезокварцевого стекла прямой диффузионной сваркой при скорости нагрева и охлаждения материалов  $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ , усилие сжатия 2 кН, вакууме до  $10^{-1}$  мбар представлены в таблице 1. Ультразвуковое сканирование, приведенное на рис. 4, показывает, что качественное соединение получается при достаточно высокой температуре —  $1100^\circ\text{C}$ .

**Таблица 1.** Режимы диффузионной сварки пьезокварцевого стекла

Температура сварки, $^\circ\text{C}$	Время сварки, ч	Результат сварки
+800	2	нет соединения
+900	2	нет соединения
+1000	2	нет соединения
+1050	2	Кольца Ньютона
+1100	2	Кольца Ньютона
+1100	6	Кольца Ньютона
+1100	11	Кольца Ньютона
+1100	12	Кольца Ньютона


**Рис. 4.** Ультразвуковое сканирование соединения пьезокварцевых стекол при  $+1100^\circ\text{C}$ : а) 6 ч; б) 11 ч; в) 12 ч

Поэтому с целью снижения температуры сварки, а также требований к качеству поверхностей соединяемых материалов (параллельности, шероховатости), что значительно снижает затраты на подготовку, применяют диффузионную сварку материалов через промежуточный слой. Особо перспективным в диффузионной сварке через промежуточный слой таких соединений материалов, как кремний-кремний; кремний-стекло; стекло-стекло; пьезоэлектрик-стекло, а также пьезоэлектрик-пьезоэлектрик является использование низкотемпературного боросиликатного стекла, компенсирующего возникающие напряжения и предотвращающего образование нежелательных фаз в зоне соединения, а также позволяющего расширить номенклатуру и комбинации соединяемых материалов.

Сварка на уровне пластин (wafer-level-packaging) — это существенный технологический шаг при формировании чувствительных структур МЭМС [6]. По сравнению с другими методами сварка с применением низкотемпературного боросиликатного стекла универсальна для широкого ряда МЭМС, не зависит от предшествующих шагов процесса и конструктивных вариантов изделий микросистемотехнических устройств.

Диффузионная сварка с использованием низкотемпературного боросиликатного стекла основана на его низкой точке плавления как промежуточного слоя при сварке. Это свойство стекла является немаловажным фактором, так как при диффузионной сварке нагрев соединяемых деталей в собранном состоянии производят до температур, равных  $0,6-0,7$  температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов [7, 8].

Стекло, нанесенное на свариваемые поверхности, в течение нагрева размягчается и смачивает поверхности пластин благодаря механическому давлению. Во время охлаждения формируется герметичное соединение. При температуре сварки стекло размягчается настолько, что закрывает неровности и имеющуюся шероховатость поверхностей соединяемых материалов. Таким образом низкотемпературное боросиликатное стекло работает как выравнивающий и уплотняющий слой между двумя свариваемыми поверхностями. Термическое расширение стекла адаптировано к кремнию и многим другим материалам, что понижает риск возникновения напряжений в стыке при сварке.

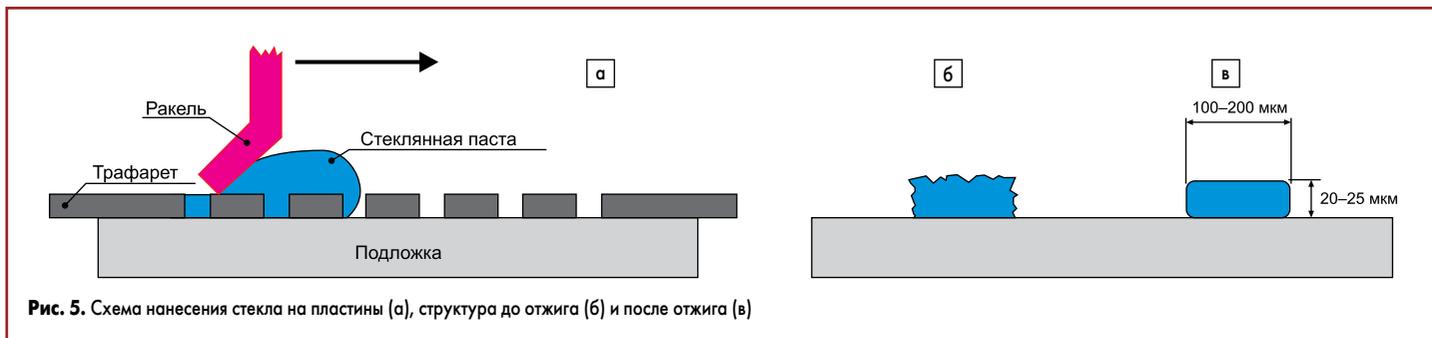


Рис. 5. Схема нанесения стекла на пластины (а), структура до отжига (б) и после отжига (в)

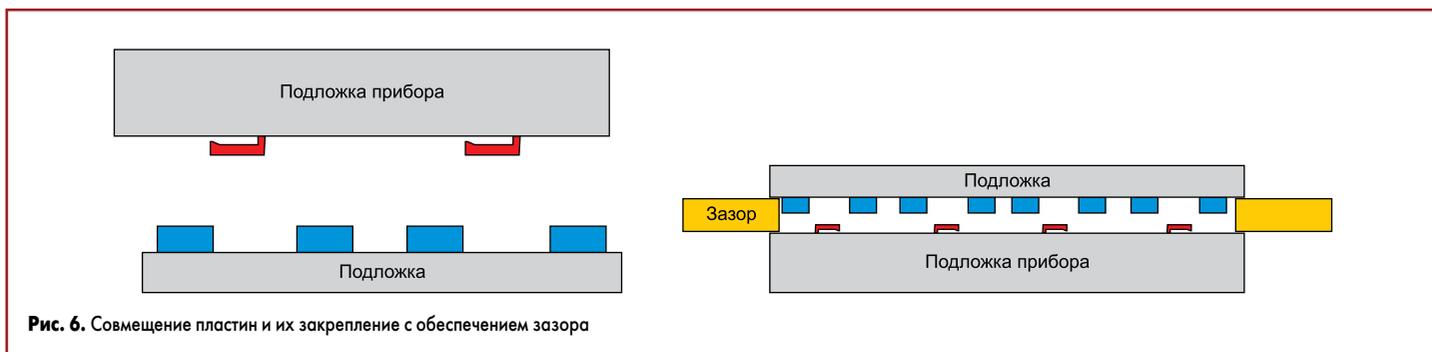


Рис. 6. Совмещение пластин и их закрепление с обеспечением зазора

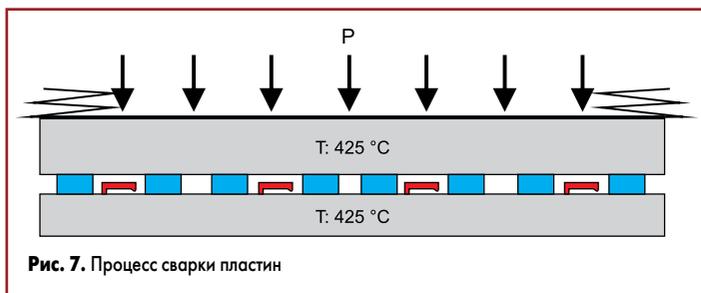


Рис. 7. Процесс сварки пластин

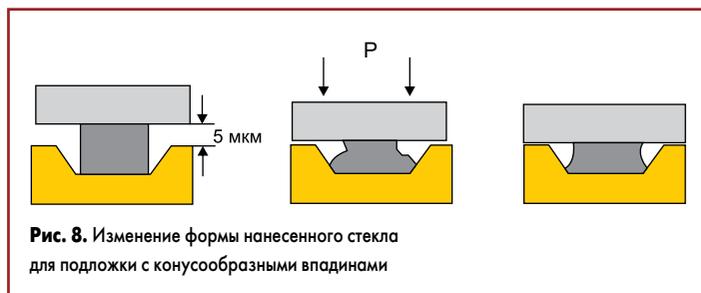


Рис. 8. Изменение формы нанесенного стекла для подложки с конусообразными впадинами

Диффузионная сварка с использованием низкотемпературного боросиликатного стекла, в процессе которой применяются усилия сжатия и нагрева, относится к группе термокомпрессионной сварки. Благодаря физическим свойствам боросиликатного стекла температура нагрева при сварке не превышает +450 °С. Перед нанесением на поверхности стекло трансформируют в пасту, затем она легко может быть нанесена на пластину МЭМС с помощью технологии трафаретной печати. Стекло смалывают в пудру (с величиной зерна менее чем 15 мкм) и смешивают с органическим связывающим компонентом. Неорганические наполнители, имеющиеся в составе смеси, влияют на температуру

сварки, поскольку их термическое расширение адаптируется к другим материалам.

Данные стеклоприпой (низкотемпературные боросиликатные стекла) производятся различными фирмами. К наиболее распространенным относится стекло FX-11-036 фирмы Ferro, схема нанесения которого на пластины показана на рис. 5. После снятия трафарета на подложке формируется структура из стекла, которую отжигают при температуре +400 °С. Затем осуществляется процесс совмещения свариваемых пластин (рис. 6): подложка со стеклянной топологией располагается относительно подложки со структурой прибора с определенной точностью. Пластины

закрепляются в специальном транспортном устройстве с обеспечением щупами требуемого зазора между ними. Такой зазор необходим, чтобы полностью удалить с пластин конечные загрязнения в камере установки диффузионной сварки. Сварка пластин происходит в вакуумной камере или в контролируемой среде при воздействии температуры +425 °С и усилия сжатия P (рис. 7).

На рис. 8 видно, что диффузионная сварка с применением низкотемпературного стекла хорошо подходит для соединения подложек с различной конфигурацией, компенсируя неровности. На рис. 9 изображен стык материалов при качественной диффузионной сварке с при-

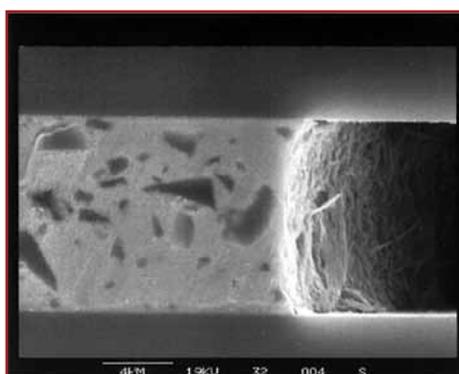


Рис. 9. Изображение стыка материалов при диффузионной сварке

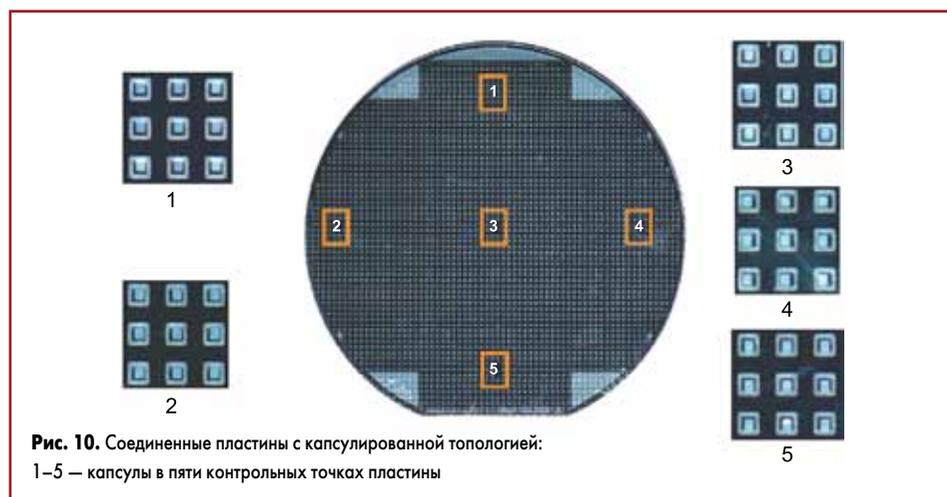


Рис. 10. Соединенные пластины с капсулированной топологией: 1–5 — капсулы в пяти контрольных точках пластины

менением стекла, полученный инфракрасным сканированием. В результате сварки формируется соединение пластин необходимой структуры и топологии с надежной капсулизацией (рис. 10). В дальнейшем пластины разрезаются на отдельные части, используемые в приборах.

### Технические характеристики и описание установки ЭМ-4044

На сегодня ведущими мировыми фирмами, производящими оборудование для диффузионной сварки для МЭМС, являются EVG и Karl Suss (Suss MicroTec) [9, 10]. Внешние виды установок этих фирм приведены на рис. 11. Установка диффузионной сварки ЭМ-4044, разработанная ГНПО «ПЛАНАР», соответствует уровню зарубежных аналогов, позволяет получить соединения большей номенклатуры материалов и их сочетаний и расширяет возможности производства новых поколений МЭМС. Внешний вид установки ЭМ-4044 показан на рис. 12. Основные параметры и характеристики установки ЭМ-4044, предназначенной для диффузионной сварки с применением низкотемпературного боросиликатного стекла, приведены в таблице 2.

При эксплуатации установки в нее подается сжатый воздух, азот технический газообразный и вакуум. Для получения качественных соединений в установке предусмотрено регулирование и программирование основных параметров диффузионной сварки: величины остаточного давления в камере, усилия сжатия соединяемых пластин, температуры и скорости нагрева пластин; скорости охлаждения со-

**Таблица 2.** Основные параметры и характеристики установки ЭМ-4044

Параметр	Значение
Соединяемые материалы и их сочетание при сварке	кремний-кремний; стекло-стекло; кремний-стекло; пьезоэлектрик-стекло; пьезоэлектрик-пьезоэлектрик
Диаметр соединяемых пластин, мм	76, 100, 150
Количество одновременно соединяемых пластин, шт.	2
Толщина соединяемых пластин, мм: для пластин Ø76 мм для пластин Ø100 мм, Ø150 мм	0,15 0,3–1
Диапазон регулирования температуры нагрева рабочей зоны столиков, °С	+50...500
Скорость нагрева рабочей зоны столиков, °С/мин.	до 30
Скорость охлаждения рабочей зоны столиков, °С/мин.	до 14
Равномерность температуры рабочей зоны столиков, %	±1,5
Остаточное давление (вакуум) в рабочей камере, Па	$1,3 \times 10^{-3}$
Максимальное усилие сжатия пластин при сварке, кН	8
Управляющая система	операционная система Windows
Максимальная потребляемая мощность, кВт	не более 6
Напряжение, В; частота, Гц	230 В, 50 Гц
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	1300×800×1600
Масса, кг	350
Средняя наработка на отказ, ч	не менее 1000



**Рис. 11.** Установка:  
а) SB6L (Karl Suss); б) EVG 510 (EVG)

единенных пластин, напуска в рабочую камеру инертного газа.

Предусмотрена диагностика основных функциональных устройств. На установке выполняются следующие операции:

- загрузка и выгрузка пластин в рабочую камеру вручную;
- ввод программы режима сварки подложек на экране монитора (программирование цикла сварки);
- автоматическая сварка подложек по заданной программе.

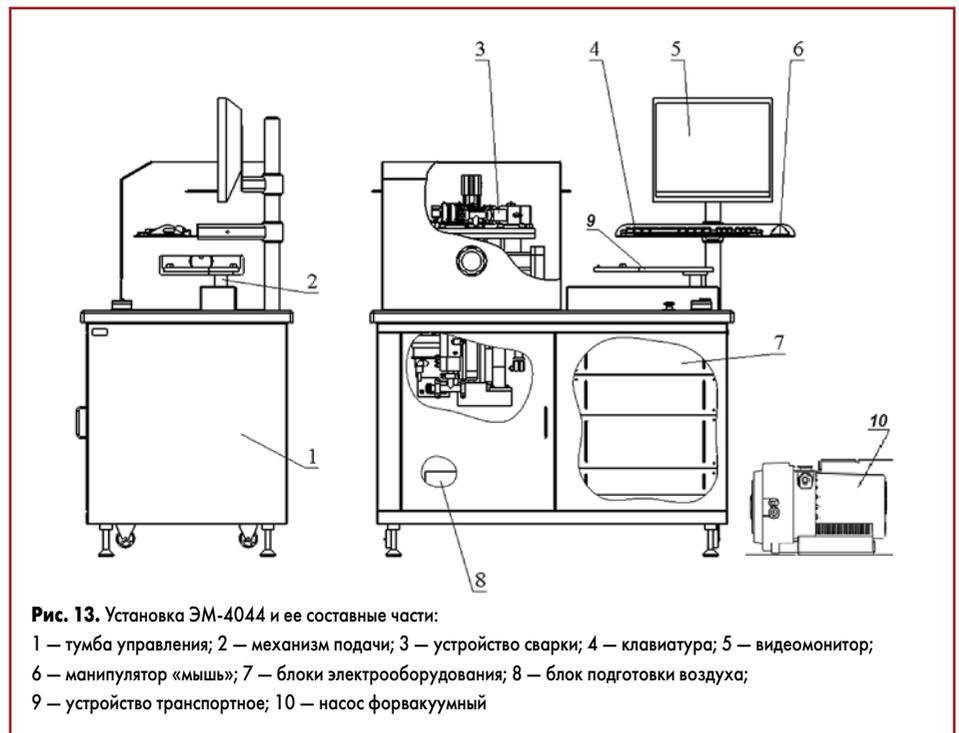
Система управления установки реализована на базе компьютера типа IBM PC и предназна-



**Рис. 12.** Установка диффузионной сварки подложек ЭМ-4044

чена для сбора сведений о выполненных операциях, времени и режимах операций, а также сохранения этой информации в базе данных. Система контроля и диагностики состояния установки построена на современных принципах телеметрических систем, выполняет задачи сбора и обработки информации о текущих параметрах контроля состояния установки перед началом выполнения и во время работ, а также документирует результаты контроля и диагностики состояния установки на всех этапах ее эксплуатации.

Элементы, из которых состоит установка, изображены на рис. 13. В транспортном устройстве (ТУ) предварительно очищенные и прецизионно совмещенные относительно друг друга свариваемые пластины с нанесенной на них структурой жестко закреплены между шупами — это сделано для предотвращения смещения подложек относительно



**Рис. 13.** Установка ЭМ-4044 и ее составные части:

- 1 — тумба управления; 2 — механизм подачи; 3 — устройство сварки; 4 — клавиатура; 5 — видеомонитор; 6 — манипулятор «мышь»; 7 — блоки электрооборудования; 8 — блок подготовки воздуха; 9 — устройство транспортное; 10 — насос форвакуумный

друг друга при перемещении пластин между отдельными стадиями технологического процесса изготовления МЭМС. Пластины в фиксирующем устройстве помещаются в рабочую камеру установки диффузионной сварки, где за счет щупов обеспечивается зазор между свариваемыми подложками, необходимый для остаточного удаления примесей и загрязнений, которые могут повлиять на качество сварного стыка подложек.

Управление установкой и задание основных технологических параметров оператор осуществляет с помощью клавиатуры и курсора на мониторе установки. С помощью блоков электрооборудования и подготовки воздуха осуществляется контроль и поддержание параметров режима сварки. Основными блоками электрооборудования установки являются блоки управления приводом Z, нагревом, потоками сжатого воздуха, азота и вакуума, подаваемых в установку, турбомолекулярным и форвакуумным насосами, а также источник электропитания и устройство включения. Для контроля основных параметров сварки в установке имеется комплекс датчиков и контроллеров температуры, усилия сжатия, вакуума, газов и времени воздействия данных факторов.

Конструкция вакуумной камеры и ее объем выбраны исходя из того, что ее размеры должны быть достаточными для размещения транспортного устройства со свариваемыми изделиями, нижнего нагревательного столика и головки нагружения, а также минимизации времени откачки [11]. Особое требование, предъявляемое к конструкции камеры, — ее полная герметичность. Для этого необходимо применение газонепроницаемых материалов, высокая вакуумная плотность сварных швов, а также тщательная обработка внутренних

поверхностей камеры. Материал, из которого изготавливается камера, должен обеспечивать:

- наибольшую вакуумную плотность при малых толщинах;
- наименьшее газоотделение при повышенных температурах;
- хорошую механическую обрабатываемость и свариваемость различными способами;
- коррозионную стойкость.

Для выполнения этих требований и минимизации газовыделения, а также обеспечения достаточной механической и термической прочности при изготовлении составных частей камеры используется коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T.

При конструировании камеры предпочтение было отдано осесимметричным конструкциям, поверхности которых образованы телами вращения. Это относится и к присоединительным патрубкам. В камере использована цилиндрическая обечайка. Данный тип отличается простотой изготовления и рациональным расходом материала. Предпочтение отдано вертикальному типу исполнения обечайки.

Особенностью конструкции установки является использование в головке нагружения сильфона, выполненного из коррозионно-стойкой стали, к которому через соединение «ласточкин хвост» прикреплен верхний нагревательный столик, контактирующий базовым диском с поверхностью соединяемых изделий. Сильфон, представляющий собой кинематическую развязку, обеспечивает равномерность распределения нагрузки по всей поверхности соединяемых изделий. Давление, оказываемое сильфоном на свариваемые изделия, является дифференциальным между создаваемым давлением внутри сильфона и давлением, соз-

даваемым системой формирования вакуума и напуска газа в вакуумную камеру.

Концептуальная схема установки отвечает современным требованиям и обеспечивает высокий уровень разработки за счет реализации:

- головки нагружения на базе управляемого газопотоками сильфона, обеспечивающей программируемое равномерное сжатие соединяемых пластин, компенсирующей неплоскостность соединяемых поверхностей и предотвращающей разрушение пластин, а также сохранение совмещения пластин, закрепленных в транспортном устройстве;
- верхнего и нижнего нагревательных столиков, обеспечивающих программируемый двусторонний равномерный нагрев соединяемых элементов;
- системы формирования вакуума и напуска газа в камеру, создающей и поддерживающей остаточное давление в камере в заданном диапазоне давлений. Система включает вакуумную камеру, двухступенчатую систему откачки на базе турбомолекулярного и форвакуумного насосов, систему клапанов и датчиков, блок подготовки воздуха, а также элементы управления и контроля.

Программное обеспечение построено в режиме меню и предусматривает: рабочие программы (для оператора), технологические программы для экспериментальных работ и подбора режимов, диагностические, аттестационные и юстировочные программы. Подачей команды с помощью клавиатуры на экране монитора установки оператор осуществляет открытие входа в камеру, закрытого вакуумным затвором, затем вручную производит загрузку ТУ в камеру перемещением механизма подачи. Далее с помощью клавиатуры оператор подает команду на перемещение привода Z.

Привод из исходного положения осуществляет прецизионное перемещение по координате Z вверх на предварительную позицию сварки. Ловители, расположенные на нижнем нагревательном столе, при перемещении последнего вверх входят в отверстия ТУ, ориентируют и далее снимают его с механизма подачи. При этом нижняя пластина, закрепленная в ТУ, оказывается на базовой поверхности нижнего стола. В данном положении поджимные подпружиненные упоры головки нагружения дополнительно фиксируют ТУ к столику, предотвращая его смещение. Перемещение привода контролируется энкодером. Исходное положение и положение на позиции сварки привода определяется датчиками положения.

Оператор вручную перемещает механизм подачи из камеры в исходное положение и с клавиатуры подает команду закрыть затвор, который герметично закрывает вход в камеру. Открытое и закрытое положение затвора фиксируется датчиками. На экране монитора осуществляется ввод программы режима сварки подложек (программирование цикла сварки). Оператор имеет возможность выбрать готовый цикл сварки с подобранными параметрами или осуществить программирование нового цикла в матрице, показанной на рис. 14.

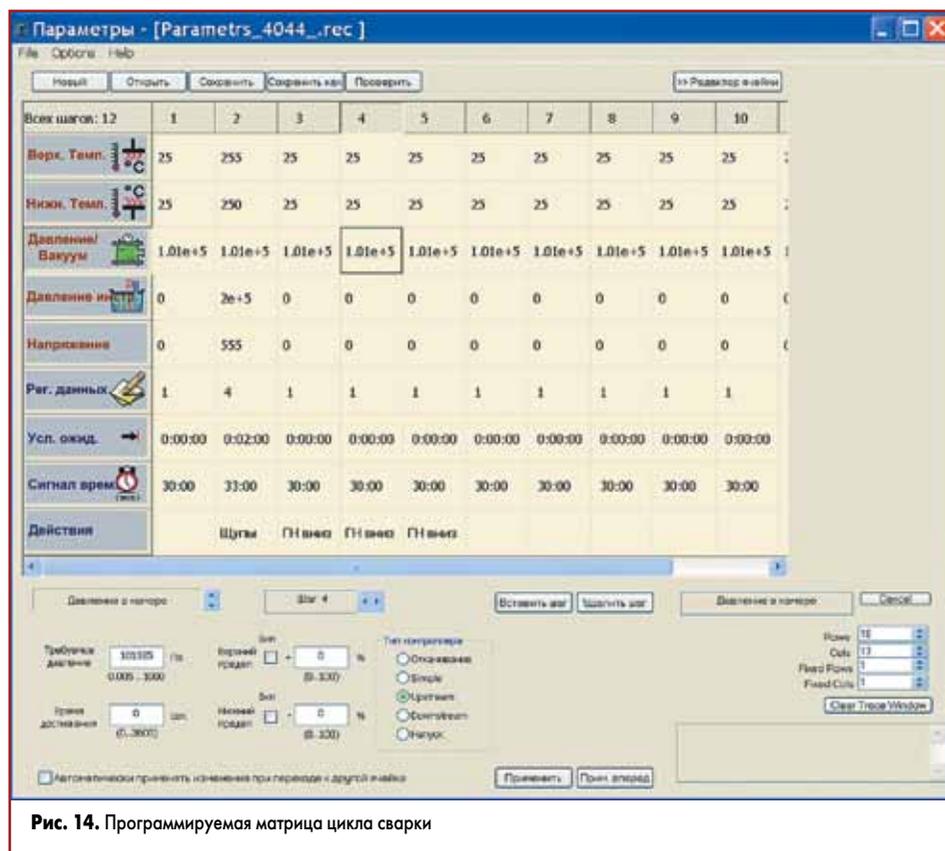


Рис. 14. Программируемая матрица цикла сварки

Программирование задает очередность шагов цикла сварки, а также необходимые технологические параметры сварки — остаточное давление в камере, усилие сжатия соединяемых элементов, температуры нагрева, скорости нагрева и охлаждения соединяемых пластин, время сварки и др.

Системой клапанов, входящих в устройство сварки, турбонасосом и форвакуумным насосом осуществляется формирование вакуума в камере и поддержание сформированного остаточного давления в ней на протяжении всего цикла сварки, а также вентиляция и напуск газа (азота) в камеру. В процессе откачивания и напуска газа в камеру разница давлений в камере и в сильфоне головки нагружения (дифференциальное давление) должна равняться нулю. Таким образом воздействие на стенки сильфона снаружи и изнутри будет одинаковым.

При достижении в камере заданного остаточного давления привод осуществляет вертикальное перемещение по оси Z вверх в положение сварки. В результате центральный подпружиненный штифт головки нагружения осуществляет прижатие верхней пластины к нижней в центральной точке, при этом жестко фиксируя верхнюю пластину относительно нижней, предохраняя ее от смещения. Далее удаляются прижимы и щупы ТУ и осуществляется равномерный нагрев соединяемых пластин нагревательными элементами, расположенными в верхнем и нижнем нагревательном столах, базовые поверхности столов нагреваются до заданной температуры, контролируемой термодатчиками. По достижении требуемой температуры подачей азота в сильфон головки нагружения осуществляется плавное равномерное сжатие соединяемых пластин до заданной величины. Регулированием работы клапанов напуска и откачки из сильфона давление в нем поддерживается на заданном уровне. Свариваемые подложки выдерживаются при заданном остаточном давлении, усилии сжатия и температуре

в течение заданного времени, обеспечивающего сварку. После завершения сварки откачивание камеры прекращается и осуществляется напуск в камеру азота до формирования в ней атмосферного давления.

После этого одновременно проводится охлаждение нижнего нагревательного стола и вентиляция камеры. Охлаждение стола осуществляется циркуляцией через него сжатого воздуха, подаваемого из магистрали сжатого воздуха. Нагретый воздух от стола удаляется в вытяжную магистраль. Камера вентилируется регулированием работы клапанов напуска и откачки газа устройства сварки. В результате сваренные подложки охлаждаются до нужной температуры, процесс прохождения потока воздуха через стол и азота через камеру контролируется термодатчиками. По достижении заданной температуры вентиляция и охлаждение столика прекращаются.

Далее осуществляется плавное снятие сформированного сильфоном усилия сжатия соединенных подложек за счет выпуска газа из сильфона.

Оператор открывает затвор и вручную перемещает механизм подачи в камеру. Привод Z возвращается в исходное положение. При этом происходит снятие ТУ с нижнего нагревательного стола и его базирование на механизм подачи, который затем перемещают в исходное положение.

### Заключение

Анализ технологии производства МЭМС показал, что наиболее перспективным способом получения неразъемных соединений между пластинами, изготавливаемыми из кремния, стекла и пьезокерамики, является диффузионная сварка в вакууме. Диффузионная сварка с применением низкотемпературного боросиликатного стекла позволяет сохранить исходную топологию чувствительных структур МЭМС. Разработанная установка диффузи-

онной сварки ЭМ-4044 отвечает современным требованиям и помогает решить актуальные задачи производства МЭМС, необходимых для выпуска высокотехнологичной наукоемкой электронной продукции мирового уровня и новых поколений технических систем гражданского, специального и двойного применения.

### Литература

1. [www.mems-exchange.org](http://www.mems-exchange.org)
2. [www.newpiezo.com](http://www.newpiezo.com)
3. Диффузионная сварка материалов: Справочник / Под ред. Н. Ф. Казакова. — М.: Машиностроение, 1981.
4. Kirchberger H., Lindner P., Wimplinger M. Novel bonding technologies for wafer-level transparent packaging of MOEMS // DTIP of MEMS&MOEMS 2007, Stresa, Italy, 25–27 April 2007.
5. Dahms S., Kulu P., Veinthal R., Basler U., Sandig S. Substance-to-substance joining of quartz glass // Estonian Journal of Engineering. 2009, 15. № 2.
6. Riley G. A. Wafer-level hermetic cavity packaging // Advanced Packaging. 2004. V. 13. № 5.
7. Knechtel R., Wiemer M., Frömel J. Wafer level encapsulation of microsystems using glass frit bonding // Microsystem Technologies. 2006. V. 12. № 5.
8. Knechtel R. Glass frit bonding: an universal technology for wafer level encapsulation and packaging // Microsystem Technologies. 2005. V. 12. № 1–2.
9. [www.suss.com](http://www.suss.com)
10. [www.evgroup.com](http://www.evgroup.com)
11. Барбарчук Д. В., Клим О. В., Мазовка Т. Е., Ковальчук Г. Ф., Ковенский А. Е., Царюк А. В., Циркун Д. П., Школьник С. Б., Барышников Д. П., Шубарев В. А. Оборудование для сборки изделий микросистемотехники // Нано- и микросистемотехника, 2012. № 8 (145).