

УДК 621.791.9

И.К. Козлов<sup>1</sup>, Д.Г. Сироткин<sup>2</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ АНОДНОЙ СВАРКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева<sup>1</sup>,  
ОАО «АБАИР», Нижний Новгород<sup>2</sup>

**Цель работы:** Разработка технологии и оборудования для изготовления компонентов МЭМС, что позволит обеспечить их отечественное производство и увеличить процент выхода годных изделий.

**Методология:** Достижение поставленной цели предполагает проведение исследований процесса анодной сварки, изучение влияния параметров процесса на качество сварки.

**Результат:** Представлены результаты оптимизации технологического процесса анодной сварки пластин кремний-стекло, разработана и изготовлена опытно-промышленная установка анодной сварки компонентов МЭМС.

**Новизна:** Разработанная технология и изготовленная установка дают возможность проведения широкого круга исследований по данной тематике.

*Ключевые слова:* микроэлектроника, МЭМС, анодная сварка, кремний, стекло, пирекс.

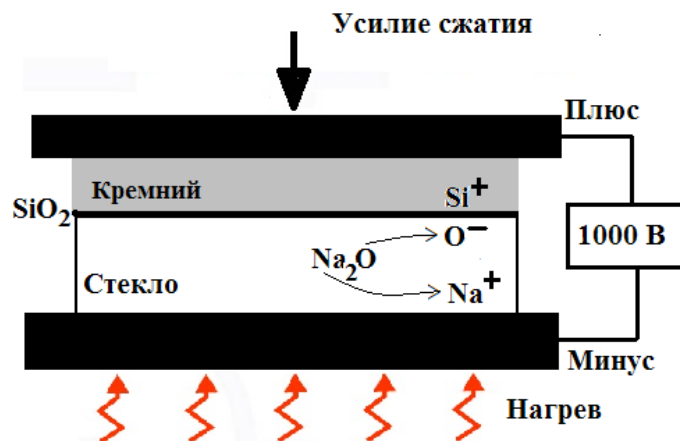
За последние годы в области микроэлектромеханических систем (МЭМС) и соответствующих технологий достигнуты значительные успехи. Выпуск компонентов на основе МЭМС достиг уровня порядка \$10 млрд в год.

МЭМС находят широкое применение в автомобильной электронике, бытовой технике (смартфоны, ноутбуки и др.), приборах специального назначения: медицинском оборудовании, военной и аэрокосмической технике, системах управления и мониторинга и т.д.

Основу ряда МЭМС составляет двухслойный пакет пластин кремний-стекло, полученный методом анодной сварки (anodic bonding). Наиболее распространен вариант сварки по всей поверхности пластин толщиной 0,3-3,0 мм, диаметром от 30 до 150 мм [1-7].

С промежуточным слоем стекла можно сваривать две и более кремниевые пластины, формируя многослойные пакеты. В объемах приваренных кремниевой и стеклянной пластин в пределах единичных элементов заданной формы и размеров (несколько мм) формируются соответствующие структуры. В дальнейшем производится разделительная резка на отдельные элементы.

Сущность процесса анодной сварки [1-7] заключается в сжатии пластин из кремния и стекла, их нагрев до температуры (200÷550) °С и приложения электрического напряжения 200÷2000 В постоянного тока (так называемое анодное напряжение) (рис. 1).



**Рис. 1. Принципиальная схема процесса анодной сварки**

При нагреве происходит расщепление оксидов натрия в стекле, под воздействием электрического поля, положительно заряженные ионы щелочных металлов перемещаются от границы соприкосновения с пластиной кремния, тем самым оставляя на границе слой, обогащенный кислородом, который вступает в реакцию с кремнием, окисляя его. Это процесс необратимый, связь между стеклом и кремнием реализуется без промежуточного слоя, так называемая анодная связь. Критерием оптимальности технологического процесса является качество образующегося окисла кремния и его толщина, определяющие прочность сварного соединения при испытании на сдвиг.

Оборудование для анодной сварки компаний EVG, SUSS и ряда других зарубежных фирм, ориентировано под конкретные изделия, требует высокоспециализированного сервиса со стороны производителя и малодоступны для большинства российских предприятий.

Процесс анодной сварки весьма сложен и имеет множество нюансов, поэтому изучение процесса сварки, разработка и изготовление сварочного оборудования являются крайне актуальными задачами для российской нано- и микроэлектроники, что позволит расширить отечественное производство МЭМС компонентов и увеличить процент выхода годных изделий.

Стекло должно обладать умеренно проводящими свойствами, что обеспечит возникновение области объемного заряда, и иметь коэффициент теплового расширения, близкий к коэффициенту теплового расширения кремния как в рабочем диапазоне температур МЭМС, так и в температурном диапазоне технологической операции анодной сварки.

Данным требованиям соответствует боросиликатное стекло типа «Pyrex», стекла Borofloat, Corning 7740, HOYA SD-2 и ряд других [4].

Несоответствие коэффициентов расширения вызывает растрескивание пластин, преимущественно, как показали проведенные исследования, при охлаждении. Однако высокая температура нагрева более 500 °С и скорость охлаждения более 20 °С/мин даже для стеклотипа «Pyrex» способствует растрескиванию. Растрескиванию также способствует неравномерный характер окружающего температурного поля при поднятом верхнем электроде.

Проведенные исследования показали, что охлаждение сваренного пакета пластин необходимо производить в условиях, соответствующих условиям сварки, т.е. не снимая сварочного усилия (сохраняя контакт с верхним электродом) до достижения температуры на нижнем электроде 70-80°С. Целесообразно сохранять неизменным приложенное анодное напряжение в процессе охлаждения изделия до 100 °С.

Для формирования качественного сварного соединения необходим нагрев до температуры, существенно меньшей, чем точка размягчения стекла, но обеспечивающей распад оксида натрия на ионы. По данным литературных источников [2,5,7] и результатам проведенных исследований, оптимальное значение температуры для стекла типа «Pyrex» лежит в пределах 350-450 °С.

Исследования показали, что получение качественной сварки возможно только для очищенных от загрязнений и пыли свариваемых поверхностей, необходима обработка поверхностей в течение 5 мин в водном растворе H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, в соотношении 1:2,5 объемных долей [4].

Необходимо учесть следующие требования:

- а) пластины толщиной 0,3–3,0 мм, должны иметь разброс по толщине в пределах ± 20 мкм, неплоскостность поверхностей в пределах +/- 2мкм;
- б) шероховатость свариваемых поверхностей не более 0,1-1,0 мкм;
- в) изгиб и коробление пластины не должны быть более 30 мкм;
- г) наличие технологической зоны по периферии пластин размером не менее 5-10 мм.

Известно, что высокое напряжение (свыше 1500 В) разрушает полупроводниковые элементы на поверхности кристалла [1, 3], соответственно оно должно иметь минимально возможное значение. Значение анодного напряжения зависит от температуры, температура, в свою очередь, зависит от марки, размеров и толщины стекла: чем толщина и размеры стекла больше, тем выше температура [5]. Исследования показывают, что нижний предел режима сварки пластин толщиной 0,3÷1,0 мм составляет 350 °С, 250 В.

Важным фактором является характер приложения анодного напряжения. Результаты проведенных исследований и результаты, приведенные в работе [2], показывают, что приложение высокого значения анодного напряжения приводит пусть и кратковременному, но высокому по значению (до 30 мА и выше) броску тока, пиковый ток приводит к дефектам сварного соединения. Целесообразно ступенчатое повышение напряжения от нуля при достижении температуры 300 °С. Количество ступеней повышения напряжения не менее трех (25%, 60%, 100% от номинального значения с интервалом 1-2 мин). Это особенно важно в случае применения анодного напряжения 750 В и выше.

Анодную сварку можно проводить как в условиях атмосферного давления, так и в условиях вакуума, но более качественные соединения получаются при сварке в вакуумной камере [1-7]. Результаты исследований и обзор литературных данных [7] показывают, что вакуум 0,1 мбар (10 Па) является достаточным. Более высокая степень откачки не только усложняет конструкцию вакуумной системы, но и способствует возникновению дугового разряда, что приводит к шунтированию сварочного тока. Качественная изоляция вводов токоподводящих проводов, отсутствие свободных от контакта с пластинами участков электродов – обязательное требование к конструкции сварочной установки.

Исследования показали, что возрастание тока в цепи высокого напряжения свыше 5-10 мА с большой вероятностью свидетельствует о возникновении дугового разряда в вакууме в так называемой диффузной форме, характеризующейся довольно размытым столбом по вакуумной камере, по внешнему виду похожим на столб тлеющего разряда. Процесс сварки при этом становится нестабильным и слабоуправляемым, энергия в большей мере расходуется на поддержание дугового разряда, а не на процесс формирования сварного соединения. Данный процесс требует дополнительного исследования, внимание следует обратить на работу [8]

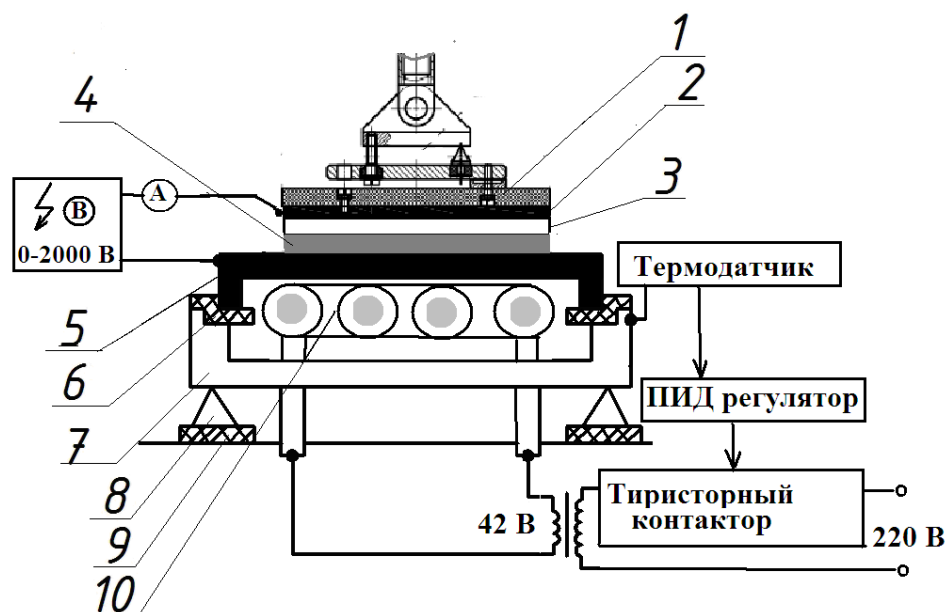
Исследования производились на экспериментальных образцах: стеклянных пластинах диаметром 76 мм и толщиной 3,0 мм, кремниевых пластинах – диаметром 60 и толщиной 0,3 мм. Проверка качества производилась испытанием на сдвиг кремниевой пластины относительно стеклянной подложки. На начальном этапе сварка производилась вне вакуумной камеры, в атмосферных условиях. После изготовления опытно-промышленной установки исследования производились в вакуумной камере с остаточным давлением 50 Па.

Длительность выдержки при заданной температуре определяется значениями температуры и анодного напряжения. При температуре 450 °С длительность составляет 30-40 мин при анодном напряжении 700 В и 10 мин при 1200 В (давление в камере 30-50 Па, усилие прижима 1500 Н). Существенное влияние на качество сварки оказывает циклограмма приложения анодного напряжения, скорости нагрева и охлаждения зоны сварки. Процесс требует непрерывного контроля, в первую очередь за значением сварочного тока. Превышение значения сварочного тока свыше 5 мА с большой долей вероятности свидетельствует о шунтировании сварочного тока дуговым разрядом, причиной возникновения которого может служить и растрескивание пластин.

При разработке сварочной установки исходили из следующих этапов процесса:

- 1) установка и фиксация свариваемых пластин в сборочном приспособлении;
- 2) установка в вакуумной камере на нижнем электроде по упорам и фиксаторам (через дверцу посредством роликового транспортера) приспособления, с установленными на нем соединяемыми пластинами;
- 3) закрытие дверцы входа в камеру, посредством эксцентрикового прижима;
- 4) выполнение цикла сварки (откачка; нагрев; приложение сжимающего усилия, подача высокого напряжения, выдержка в течение заданного времени, отключение нагрева, наддув воздуха или азота, отключение высокого напряжения);
- 5) после окончания цикла сварки, открывается дверца и извлекается приспособление с изделием, производится внешний осмотр и съем изделия с приспособления.

Для реализации процесса была разработана и изготовлена установка анодной сварки (рис. 2), состоящая из следующих узлов.



**Рис. 2. Принципиальная схема установки анодной сварки:**

1, 6, 9 – изолятор; 2 – верхний электрод (минус); 3 – стеклянная пластина; 4 – кремниевая пластина; 5 – нижний электрод (плюс); 7 – поддон; 8 – опора; 10 – ТЭН

1. Система размещения свариваемых деталей и их нагрева, включает в себя поддон, в котором размещен ТЭН-нагреватель и нижний электрод, выполненный из медного сплава, что обеспечивает равномерность нагрева установленном на нем приспособлении с пластинами. Нижний электрод обеспечивает также подвод положительного потенциала высокого напряжения к кремниевой пластине, поэтому он крепится к нагревательному столику через изолятор.

Верхний электрод, также выполненный из медного сплава, обеспечивает подвод отрицательного потенциала к стеклянной пластине (размещаемой на кремниевой). Через изолятор верхний электрод крепится к штоку пневмоцилиндра, обеспечивающего сжатие пластин.

2. Вакуумная камера, в которой осуществляется процесс сварки, и поддерживаются заданные (программируемые) параметры процесса. Камера круглая со съемной верхней крышкой, используемой только при сборке и ремонте, а также дверцей без окна, с вакуум-плотным резиновым уплотнением и эксцентриковым замком.

3. Вакуумная система откачки и наддува размещается в нижней части станины и состоит из вакуумного насоса, вакуумметра, электропневмоклапана с регулируемой подачей на напуск азота, а также штуцера подключения трубопровода системы вакуумирования, напуска и откачки газа. Система предназначена для откачивания камеры до заданного остаточного давления (формирование вакуума в камере) и поддержания его на протяжении всего цикла сварки. Выбор компонентов устройства основывался на возможности откачивания камеры от атмосферного давления до остаточного давления 1 Па.

Исходя из требований обеспечения минимизации газовыделения, а также обеспечения достаточной механической и термической прочности для изготовления составных частей камеры предпочтительным является отожженная при  $420^{\circ}\text{C}$  в вакууме коррозионно-стойкая сталь 12X18H10T. К камере через патрубок подсоединен мембранный клапан безопасности срабатывающий при превышении давления в 2 бара в камере. После завершения сварочного процесса камера вентилируется с помощью клапана напуска.

4. Пневматический механизм нагружения, обеспечивающий сжатие соединяемых пластин с заданным усилием.

5. Система подачи и управления высоким напряжением, реализованная на базе блока питания компании ULTRAVOLT.

6. На станине размещен блок управления, на лицевой панели которого в размещены система управления откачкой и наддувом, система управления нагревом, система управления подачей высокого напряжения, таймер. На лицевой панели управления также размещены кнопки включения вышеуказанных устройств, а также амперметр, показывающий значение сварочного тока в цепи нагрева. В нижней части камеры размещаются элементы системы откачки и напуска, штуцер подключения трубопровода вакуумного насоса, трансформатор системы нагрева.

На стадии приемо-сдаточных испытаний для ограничения тока в цепи высокого напряжения значением 26 мА, (при напряжении 1200 В) в цепи высокого напряжения установлено ограничительное сопротивление 46 кОм.

Основой системы управления нагревом является ПИД регулятор МЕТАКОН-315. На поддоне, в котором размещен ТЭН с напряжением питания 42 В устанавливается термопара ТП ХА (К). Так как термопара установлена не на нижнем электроде, а на поддоне, была разработана таблица пересчета температур. Обеспечена изоляция верхнего и нижнего электродов, нагревательного столика от корпуса вакуумной камеры, высокая степень изоляция цепи нагрева столика. Подвод высокого напряжения осуществляется непосредственно к верхнему и нижнему электродам. Обеспечена изоляция рабочей части прижима, (верхнего бронзового электрода) непосредственно контактирующей с поверхностью верхней детали и осуществляющей сжатие деталей и подвод высокого напряжения.

На рис. 3 представлена фотография разработанной и изготовленной опытно-промышленной установки анодной сварки.

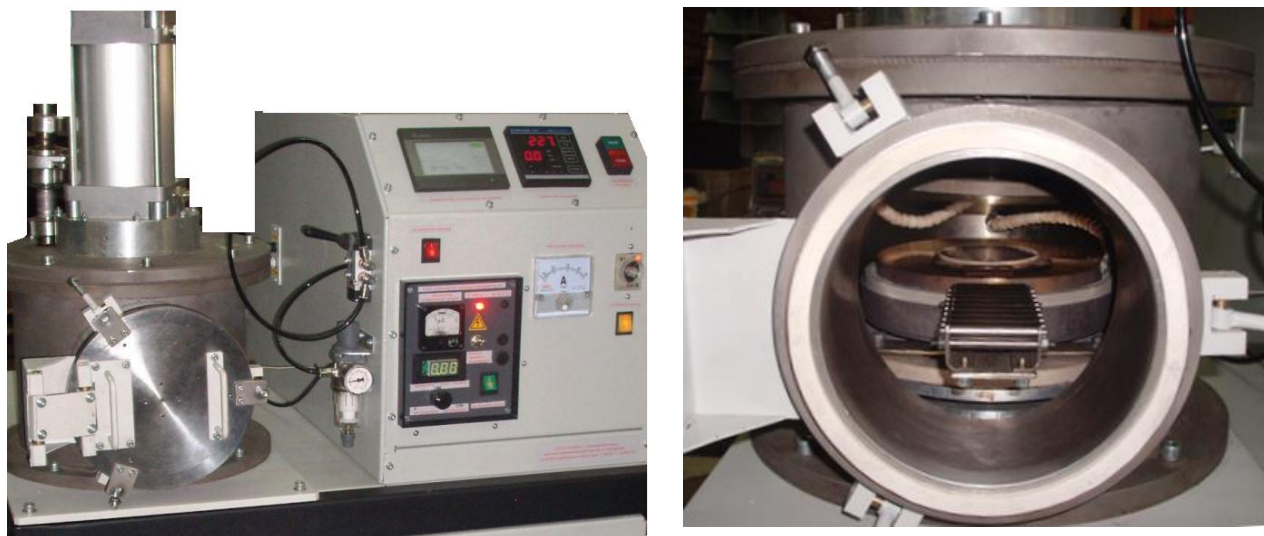


Рис. 3. Опытно-промышленная установка анодной сварки

### Выводы

1. Проведенные исследования позволили разработать рекомендации по оптимизации технологического процесса анодной сварки, как применительно к значениям основных параметров режима, так и циклограмме процесса. Важным фактором является характер приложения анодного напряжения. Целесообразно ступенчатое повышение напряжения от нуля при достижения температуры 300°C. Количество ступеней повышения напряжения не менее трех (25%, 60%, 100% от номинального значения с интервалом 1-2 мин). Это особенно важно в случае применения анодного напряжения 750 В и выше.

2. Проведенные исследования показали, что охлаждение сваренного пакета пластин

необходимо не снимая сварочного усилия (сохраняя контакт с верхним электродом) до достижения температуры на нижнем электроде 70-80°C. Целесообразно сохранять неизменным приложенное анодное напряжение в процессе охлаждения изделия до 100 °С

3. Проведенные исследования обеспечили разработку технического задания и на его базе изготовление опытно-промышленной установки анодной сварки. Разработанная установка дает возможность проведения широкого круга исследований по данной тематике.

#### Библиографический список

1. **Баринов, И.Н.** Конструктивно – технологические решения чувствительных элементов датчиков абсолютного давления / И.Н. Баринов, В.С. Волков, Н.П. Кривулин // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2008. Т. 1. С. 95–98.
2. **Медведев, Е.И.** Анодная сварка пластин для МЭМС применений // Степень интеграции. 2009. №1. С. 18–23.
3. **Хохлун, А.** Оборудование и технологии для производства МЭМС, микро – и наноструктур // Степень интеграции. 2009. №1. С. 14–16.
4. **Тимошенко, С.П.** Методы сборки и монтажа макетных образцов микроэлектромеханических систем / С.П. Тимошенко, А.Н. Бойко, Б.М.Симонов // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА. 2010. № 4(84). С. 58–63.
5. **Борзов, А.Б.** Термически изолированные ячейки в конструкциях преобразователей физических величин изготовленные электростатической анодной посадкой полупроводниковых и диэлектрических элементов / А. Б. Борзов [и др.] // Наука и образование. Научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. Эл №ФС77-48211. С. 243–258.
6. **Телец, В.А.** Изготовление трехмерных МЭМС методами термокомпрессионной сварки / В.А. Телец, Ю.С. Негина, А.А. Орлов // Микропроцессорная техника. 2004. №3. С 2–7.
7. С.С.Tripathi, Sharuti Jain, Powan Joshi. Development of low cost set up for anodic bonding and its characterization // Indian Journal of Pure & Applied Physics/. 2008. V. 46. P. 738–743.
8. **Неровный, В.М.** Способы стабилизации и управления тепловыми характеристиками дугового разряда при пайке в вакууме // Сварка и диагностика. 2013. №2. С. 34–39.

*Дата поступления  
в редакцию 11.12.2014*

**I. K. Kozlov<sup>1</sup>, D. G. Syrotkin<sup>2</sup>**

#### STUDIES AND DEVELOPMENTS IN THE FIELD OF ANODIC WELDING

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev<sup>1</sup>,  
ОАО “АВАИР”, Nizhny Novgorod<sup>2</sup>

**Purpose:** Development of technology and equipment for MEMS (microelectromechanical systems) components production. This will allow domestic production of the latter and an increase of the product yield ratio.

**Methodology:** Achievement of the set purpose suggests a research on anodic welding process and a study of the influence of the process parameters on the welding quality.

**Results:** The results of the technological process of silicon-glass plates anodic welding optimization are presented. A pilot unit for anodic welding of MEMS components is developed and produced.

**Novelty:** The developed technology and the produced unit enable a wide range of research on this matter.

*Key words:* microelectronics, MEMS, anodic welding, silicon, glass, pyrex.