

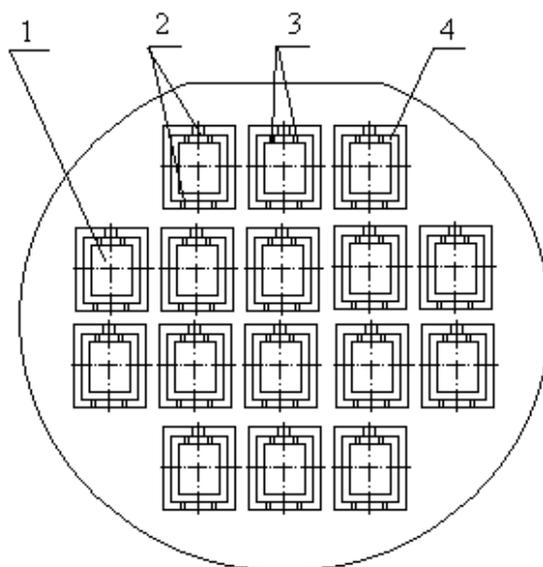
УДК 539.67

И.В. Китаев<sup>1</sup>, В.И. Обухов<sup>2</sup>**РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ СОЕДИНЕНИЯ СИСТЕМЫ «Si – Si – Si» С МИНИМАЛЬНЫМИ ОСТАТОЧНЫМИ ВНУТРЕННИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ**ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «Темп-Авиа»<sup>1</sup>,  
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева<sup>2</sup>

Предложен способ группового соединения системы «Si – Si – Si» и приспособление для сварки такой системы. Рассмотрены теоретические аспекты обеспечения оптимального режима соединения системы «Si – Si – Si» с целью минимизации в ней остаточных внутренних напряжений.

*Ключевые слова:* структурные деформации, полупроводниковый кремний, чувствительный элемент, трехслойная система, упругий подвес, мембрана.

Работы, проводимые авторами в рамках НИОКР, позволили освоить групповой метод соединения микромеханических деталей выполненных из монокристаллического кремния, и создать устройство для сварки, позволяющее существенно повысить качество соединяемых микромеханических деталей и процент выхода годных [4]. Для обеспечения групповой технологии сварки нами предложен способ соединения отдельных деталей чувствительных элементов (ЧЭ), которые остаются закрепленными в монокристаллическом кремнии после травления за счет технологических перемычек (рис. 1). Только после выполнения сварки ЧЭ «выламываются» из пластины.



**Рис. 1. Монокристаллическая кремниевая пластина с вытравленными микромеханическими деталями (например, акселерометра):**

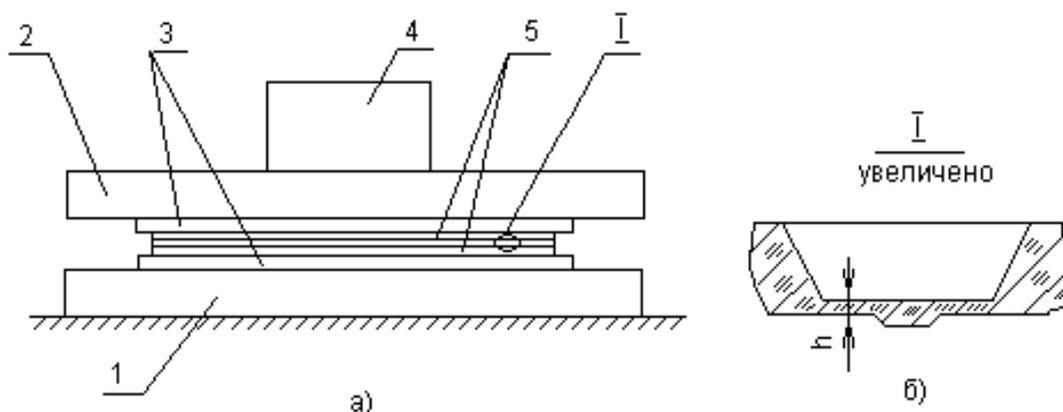
1 – чувствительная масса акселерометра; 2 – технологические перемычки;  
3 – упругие подвесы чувствительной массы; 4 – рамка

Известные приспособления для соединения микромеханических деталей не всегда полностью отвечают тем требованиям, которые к ним предъявляются. Например, приспособ-

ление, использующее метод анодной сварки предназначено для соединения одного или нескольких элементов, чаще всего это структура «стекло – кремний – стекло». Это приспособление не предназначено для групповой сборки. При сварке соединяемых микромеханических деталей их необходимо точно позиционировать относительно друг друга и создать необходимое усилие прижатия на каждую соединяемую структуру.

Существует также устройство для группового соединения деталей в составе нескольких пластин, описанное в [3]. Соединение в таком устройстве происходит за счет задаваемой температуры в зоне соединяемых деталей и усилия их сжатия. Совмещение двух или более пластин с микромеханическими деталями в нем обеспечивается штырями, которые вставляются в имеющиеся в пластинах отверстия.

Получение качественной сварки нами было достигнуто за счет того, что в приспособление для группового соединения микромеханических деталей (рис. 2, а), дополнительно введены две прижимные пластины, одна из которых расположена между основанием и пластинами с соединяемыми микромеханическими деталями, а другая между крышкой и пластинами с соединяемыми деталями. Каждая из прижимных пластин содержит подпружиненные упругими мембранами прижимы (рис 2, б).



**Рис. 2. Приспособление для группового соединения микромеханических деталей:**

а – приспособление: 1 – основание; 2 – крышка; 3 – прижимные пластины; 4 – груз; 5 – свариваемые пластины; б – прижимная мембрана

Прижим на пластине расположен таким образом, что его центр находится на пересечении биссектрис, выходящих из трех углов треугольника, образованного тремя точками сварки. Отличие разработанного приспособления для сварки по сравнению с используемыми нами ранее, заключается в наличии новых по конструкции прижимов. Новые прижимы (прижимные мембраны) обеспечивают равномерный прижим каждой из свариваемой системы, несмотря на возможную погрешность геометрии формы пластин, например, неравномерность толщины пластины. Сварка пластин с микромеханическими деталями осуществляется в вакууме при давлении  $P = 1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-5}$  мм.рт.ст. и при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ , через слой эвтектики.

Микромеханические детали при сжатии должны иметь плоскопараллельное смещение, так как соединение должно происходить по всей плоскости (в нашем случае по трем точкам). Соединяемые детали получены в процессе травления в рамке 4 (см. рис. 1) на пластине. Следовательно, прогиб рамки будет определять качество соединения, при этом необходимо учитывать и жесткость прижимов, так как соединяемые детали имеют жесткость намного выше, чем жесткость рамки, в которой они сформированы. Чтобы обеспечить плотное соединение микромеханических деталей, необходимо выполнить условие:

$$G_m \geq G_p, \quad (1)$$

где  $G_m$  - жесткость прижимной мембраны;  $G_p$  - жесткость рамки в пластине.

Для определения требуемых упругих характеристик мембраны: ее прогиба и жёсткости, примем ее расчетную модель (рис. 3).

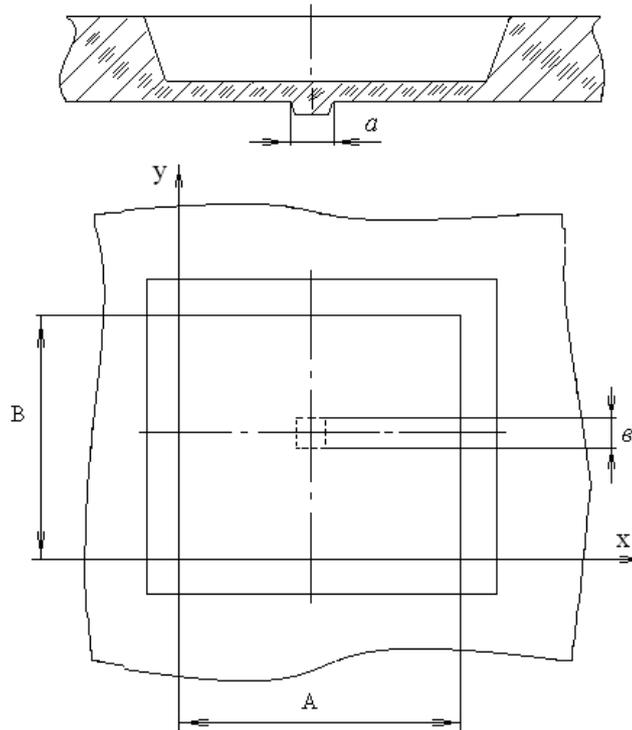


Рис. 3. Расчетная модель прижимной мембраны

В качестве граничных условий примем жёсткую область мембраны (размеры более  $A$  и  $B$ ) по внешнему контуру, так как мембрана выполнена монолитно с корпусной пластиной. Вдоль рёбер, параллельных оси  $x$  и  $y$ , граничные условия запишутся [1]:

$$w = 0; \quad \partial w \partial w / \partial x = 0, \quad w = 0; \quad \partial w \partial w / \partial y = 0, \quad (2)$$

где  $w$  - прогиб прижимной мембраны. Дополнительным граничным условием в данной задаче является условие жёсткого центра мембраны, которое выражается значением максимального прогиба вдоль оси  $z$  недеформируемого центра, т.е. при  $x = (A - a)/2$  и  $y = (B - a)/2$ :

$$w = w_{\max}. \quad (3)$$

Для решения поставленной задачи воспользуемся интегральным соотношением Бубнова-Галеркина, выражающее равенство нулю работы всех внешних и внутренних сил, приложенных к изогнутой срединной поверхности мембраны при возможных ее перемещениях.

$$\int_{x=0}^{x=A-a} \int_{y=0}^{y=B-a} [D \nabla^4 w(x, y) - \Delta p] \varphi(x, y) dx dy = 0, \quad (4)$$

где  $D$  - цилиндрическая жёсткость мембраны;  $\nabla^4$  - бигармонический дифференциальный оператор;  $\Delta p = p_1 - p_2$  - разность давлений равномерно распределённых между верхней и

нижней поверхностям мембраны;  $p_1$  – давление с нижней стороны прижимной мембраны  $p_1 = 0$ ,  $p_2$  – давление создаваемое грузом 4 (см. рис. 2).

$$p_2 = \frac{F}{S} = \frac{mg}{S}, \quad S = \sum s_k \cdot n, \quad (5)$$

где  $S$  – суммарная площадь соединяемых пластин;  $s_k$  – площадь соединяемого микроэлемента;  $n$  – количество мультиплицированных и вытравленных элементов на пластине;  $m$  – масса груза;  $g$  – ускорение свободного падения.

Функция  $[D\nabla^4 w(x, y) - \Delta p]$ , называемая функцией Софи-Жермен, представляет собой проекцию на ось  $z$  всех внешних и внутренних сил, приложенных к элементарной площадке  $dxdy$ ; функция  $\varphi(x, y)$  возможных перемещений по оси  $z$ . Функция прогиба в общем виде может быть записана в виде [1]

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \alpha_{kl} \varphi(x, y), \quad (6)$$

где функция  $\varphi(x, y) = [1 - \cos(2k\pi x / (A - a))] [1 - \cos(2l\pi y / (B - b))]$ , которая удовлетворяет всем граничным условиям;  $\alpha_{kl}$  – константы, зависящие от геометрических размеров мембраны, механических свойств материала мембраны и действующего давления;  $A, B, a, b$  – размеры прижимной мембраны и жёсткого центра.

В двойном интеграле (4) цилиндрическая жесткость мембраны может быть определена

$$D = \frac{E_{[100]} h_m^3}{12(1 - \nu^2)}, \quad (7)$$

где  $E_{[100]}$  – модуль упругости в направлении [100];  $h_m$  – толщина мембраны;  $w_{\max}$  – необходимый прогиб прижимной мембраны;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Из соотношений (6) и (7) можно определить величину прогиба квадратной мембраны с жёстким центром:

$$w = \frac{\Delta p (A - a)^4}{8\pi^4 D}. \quad (8)$$

Если в равенство (8) подставить значение  $D$ , можно определить необходимую толщину мембраны для заданной массы груза 4 приспособления для групповой сварки чувствительных элементов:

$$h_m = \sqrt[3]{\frac{12\Delta p (A - a)^4 (1 - \nu^2)}{8\pi^4 E_{[100]} w}}. \quad (9)$$

К примеру, для прижимной мембраны с размерами  $A = B = 4.6$  мм,  $a = b = 0.8$  мм.;  $E_{[100]} = 1.46 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup>;  $\nu = 0.358$ ;  $p_2 = 3.6 \cdot 10^4$  Н/м<sup>2</sup>, нами была определена ее толщина, при условии, что количество мультиплицированных элементов на пластине  $n = 77$  (соответственно, столько же прижимных мембран на пластине):

$$h_m = \sqrt[3]{\frac{12 \times 360 \times 10^3 \times (4.6 \times 10^{-3} - 0.8 \times 10^{-3})^4 \times (1 - 0.358^2)}{8 \times 3.14^4 \times 1.46 \times 10^{11} \times 6 \times 10^{-6}}} = 10.49 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Найдем жесткость прижимной мембраны. Жёсткость любой мембраны определяется как отношение максимальной силы, действующей на мембрану к величине ее максимального прогиба т.о. максимальный прогиб имеет место при  $x = y = a/2$ :

$$G_m = \frac{8\pi^4 A^2 D}{(A-a)^4} \cdot \quad (10)$$

Для конкретных условий, которые были в нашем случае:

$$D = \frac{1.46 \cdot 10^{11} \times (104.9 \cdot 10^{-6})^3}{12 \times (1 - 0.358^2)} = 16.05 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м},$$

$$G_m = \frac{8 \times 3.14^4 \times (4.6 \cdot 10^{-3})^2 \times 16.05 \cdot 10^{-3}}{(4.6 \cdot 10^{-3} - 0.8 \cdot 10^{-3})^4} = 12.55.9 \text{ кН/м}^2.$$

Найдем жесткость рамки (рис. 1, поз. 4). Для нашего случая (рис. 4) жесткость рамки определяется выражением:

$$G_p = E_{[100]} J_x, \quad (11)$$

где  $J_x$  – момент инерции сечения рамки (см. рис. 4). Момент инерции  $J_x$  состоит из суммы моментов инерции двух тел, прямоугольника и ромба.

$$J_x = J_{x.пр} + J_{x.р}. \quad (12)$$

Вычислив значение  $J_x$  и подставив в равенство (11), определим жесткость одной рамки. Суммарная жесткость будет определяться произведением жесткости одной рамки на количество таких рамок на пластине.

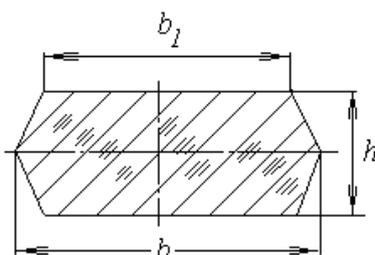


Рис. 4. Сечение рамки

Выполнение условия (1) позволяет реализовать такие усилия сжатия в процессе сварки системы «кремний – кремний – кремний», которые обеспечивают соединение микромеханических деталей с минимальными остаточными внутренними напряжениями. Выполненные расчеты по приведенным равенствам, и сварка с учетом рекомендаций, подтвердили ожидаемые результаты. В настоящее время на предприятии ОАО АНПП «Темп-Авиа» при-способление, которое используется для групповой сварки микромеханических деталей чувствительных элементов интегральных датчиков, претерпевает дальнейшие изменения. Предложенный способ групповой сварки микромеханических деталей обеспечивает идентичность режимов сварки по каждому отдельному чувствительному элементу, с минимальными остаточными внутренними напряжениями в их структуре.

### Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003.
2. **Добронравов, В.В.** Курс теоретической механики / В.В. Добронравов. – М.: Высш. школа, 1990.
3. **Пичугин, И.Г.** Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Ю.М. Таиров. – М.: Высш. школа, 1984.
4. Пат. РФ на изобретение № 2262154. Приспособление для группового соединения микромеханических деталей / Китаев, И.В., Былинкин, С.Ф. приоритет от 09.04. 2004.

*Дата поступления  
в редакцию 15.10.2010*

**I.V. Kitaev, V.I. Obuchov**

### **3-LAYER STRUCTURE (Si-Si-Si) BATCH BONDING METHOD OPTIMIZATION TO MINIMIZE RESIDUAL INTERNAL STRESSES.**

3-layer structure (Si-Si-Si) batch bonding method and apparatus are proposed. Theoretical aspects of 3-layer structure (Si-Si-Si) batch bonding method optimization to minimize residual internal stresses therein are disclosed.

*Key words:* structural deformation, semiconductor silicon, sensing element, 3-layer structure (Si-Si-Si), elastic suspension, membrane.