

*В. Е. Пауткин*

## ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНОДНОГО СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*V. E. Pautkin*

### PHYSICAL AND CHEMICAL BASES OF THE ANODE COMPOUND OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS ELEMENTS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Рассмотрены физико-химические основы формирования чувствительных элементов микромеханических акселерометров методами анодного соединения. Целью работы является анализ физических эффектов, приводящих к созданию неразъемного соединения деталей. **Материалы и методы.** При рассмотрении данного вопроса использованы положения физической химии, физики твердого тела. **Результаты.** Предложены рекомендации для улучшения процесса анодного соединения «кремний-стекло». **Выводы.** Применение анодного соединения при сборке чувствительных элементов позволяет создавать датчики, отличающиеся малыми габаритами, высокими эксплуатационными характеристиками.

**A b s t r a c t. Background.** The physicochemical principles of the formation of sensitive elements of micromechanical accelerometers by the methods of anode connection are considered. The aim of the work is to analyze the physical effects leading to the creation of a permanent connection of parts. **Materials and methods.** Used the provisions of physical chemistry, solid state physics in the consideration of this issue. **Results.** Recommendations for improving the anodic silicon-glass process are proposed. **Conclusions.** The use of anode connection in the assembly of sensitive elements allows you to create sensors that are characterized by small dimensions, high performance.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** анодное соединение, щелочное стекло, твердофазный электролиз, чувствительный элемент, датчик.

**К e y w o r d s:** anodic compound, alkaline glass, solid-phase electrolysis, sensitive element, sensor.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) – направление в технике, получившее широкое распространение в технологии приборостроения при создании датчиков различного назначения, в том числе датчиков давления, ускорения, угловой скорости и т.п. [1, 2]. Технология МЭМС-датчиков, содержащих чувствительные элементы, по крайней мере одна из деталей которого выполнена из кремния, известна как кремниевая микромеханика [3]. В настоящее время кремниевая микромеханика позволяет выполнять миниатюрные чувствительные элементы таких датчиков, как например, датчиков ускорения, давления, которые при этом носят название микромеханических.

Конструктивно чувствительный элемент микромеханического датчика содержит кремниевый кристалл, соединенный со стеклянной пластиной. В случае микромеханического акселерометра кристалл соединен со стеклянными пластинами с обеих сторон (рис. 1).

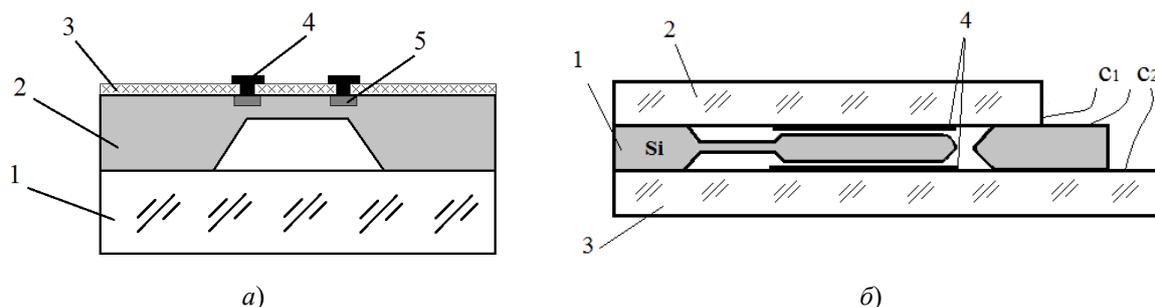


Рис. 1. Чувствительные элементы: *а* – датчика абсолютного давления: 1 – стеклянная пластина; 2 – кремниевый кристалл; 3 – изолирующий оксид кремния; 4 – металлизация; 5 – пьезорезисторы; *б* – датчика ускорения: 1 – кремниевая пластина; 2, 3 – стеклянные пластины; 4 – металлизация

Технология сборки данных чувствительных элементов обеспечивает получение жесткого неразъемного соединения деталей. Прочность зоны соединения оказывается выше прочности соединяемых материалов [4]. При этом особый интерес вызывают физико-химические эффекты, приводящие к получению данного соединения.

Анодное соединение, также известное как электростатическое соединение, открыто Уоллисом и Померанцем в качестве метода соединения металла с натриевым стеклом [5]. В настоящее время данный способ используется для соединения кремния со стеклом. При этом к стеклу предъявляются особые требования, а именно, наличие ионов щелочного металла, чаще всего натрия Na, входящего в состав стекол в виде оксида натрия  $\text{Na}_2\text{O}$ . Содержание ионов натрия в стекле необходимо для проведения процесса сборки чувствительного элемента. Другим важным требованием является соответствие коэффициента термического линейного расширения (КТЛР) стекла КТЛР кремния. К числу таких стекол можно отнести стекла марок ЛК 5 (РФ), Borofloat 33 («Schott», Германия), Ноуа (Япония).

При сборке чувствительных элементов в специальных технологических приспособлениях детали – кремниевая и стеклянная пластина – приводятся в тесный контакт. Сборка нагревается до температуры (400–460) °С. При такой температуре оксид натрия  $\text{Na}_2\text{O}$ , входящий в состав щелочного стекла (~4,0 % по составу), распадается на ионы натрия  $\text{Na}^+$  и кислорода  $\text{O}^{2-}$ . На сборку подается постоянное напряжение (400–800) В в зависимости от конструкции чувствительного элемента и толщины используемых пластин. На кремниевую пластину подается положительный потенциал, на стеклянные детали подается отрицательный потенциал. В стеклянных деталях под действием напряжения возникает ионный электрический ток из-за движения положительных ионов натрия  $\text{Na}^+$  и отрицательных ионов кислорода  $\text{O}^{2-}$  (рис. 2).

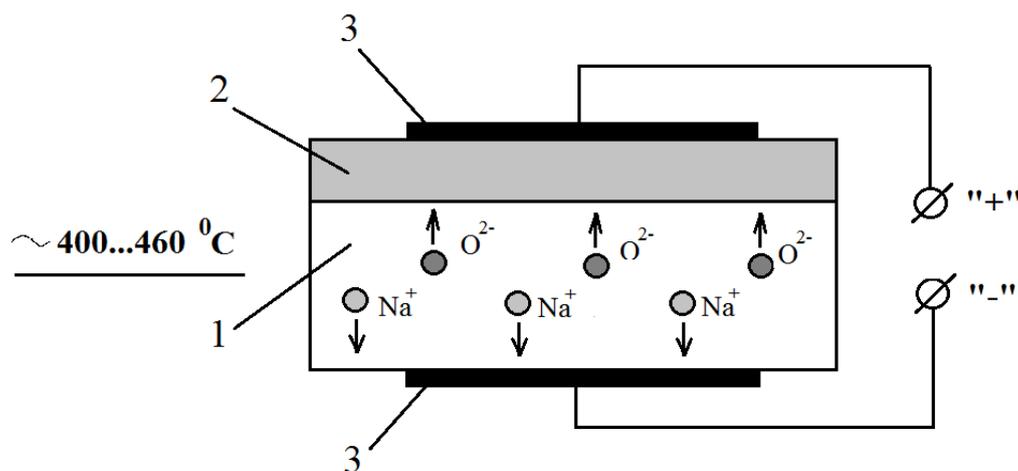


Рис. 2. Схема анодного соединения: 1 – стеклянная пластина; 2 – кремниевая пластина; 3 – металлические электроды

Для появления ионного тока необходима активация движения ионов натрия и кислорода. Она может быть описана моделью Андерсона – Стюарта [6]. Согласно данной модели для диффузии иона и перемещения его в новое положение необходимо разрушение связи между ним и окружающими ионами в стекле. При диффузии ион должен преодолеть узкое пространство между соседними пустотами, существующими в структурной сетке стекла. Энергия активации электропроводности представляет сумму двух независимых членов

$$E_{\sigma} = E_b + E_s,$$

где  $E_b$  – энергия электростатической связи, необходимая для разрыва локальной связи;  $E_s$  – энергия деформации, необходимая для продвижения иона между соседними пустотами.

Авторами данной модели предложены следующие зависимости:

$$E_b = \frac{\beta z z_0 e^2}{\gamma(r + r_0)},$$

где  $\beta$  – фактор, учитывающий расстояние между позициями катионов и анионов в структурной сетке стекла;  $z$  и  $r$  – заряд и радиус катиона;  $z_0$  и  $r_0$  – заряд и радиус аниона;  $e$  – заряд электрона;  $\gamma$  – степень ковалентности, равная диэлектрической постоянной стекла.

Энергия деформации описывается следующим уравнением:

$$E_s = 4\pi G r_d (r - r_d)^2,$$

где  $G$  – модуль сдвига стекла;  $r_d$  – диаметр отверстия между соседними пустотами.

Как видно из представленной модели, энергия активации электропроводности зависит от диэлектрической постоянной стекла, расстояния между позициями катионов и анионов, а также диаметра отверстий в структурной сетке стекла.

На практике, на стороне стеклянной пластины, обращенной к металлическому электроду, происходит выделение металлического натрия. Таким образом, в щелочных стеклах при высоких температурах и постоянном напряжении происходит электролиз в твердой фазе, о чем свидетельствует выделение металлического натрия. На границе кремний-стекло из-за взаимодействия ионов кислорода с кремнием происходит образование тонкого слоя  $\text{SiO}_2$ , который ответственен за формирование неразъемного соединения деталей.

При анодном соединении также присутствует эффект, названный эффектом Джонсона-Рабека. Джонсон и Рабек исследовали силу притяжения между полупроводниковой пластиной (в качестве диэлектрика с низким удельным сопротивлением) и металлической пластиной в присутствии электрического поля [7]. Ими было обнаружено, что фактическая сила притяжения между пластинами оказалась намного выше, чем было рассчитано по известной формуле силы электростатического притяжения:

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2 S U^2}{2x^2},$$

где  $\epsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость кремния;  $\epsilon_2$  – диэлектрическая проницаемость стекла;  $S$  – площадь контакта;  $U$  – напряжение, подаваемое на пластины;  $x$  – зазор между пластинами.

Экспериментальный эффект объяснялся предположением о том, что в диэлектрическом слое непосредственно на контактной границе электродов находятся постоянные электрические заряды. При этом были обнаружены небольшие электрические токи на границе раздела электродных пластин, увеличивающие силу трения соприкасающихся поверхностей при их соединении. Увеличение силы трения, помимо воздействующих электростатических сил, также способствует образованию более тесного контакта поверхностей, сильно зависящего от шероховатости поверхности обеих пластин.

На практике не существует топографически гладких поверхностей. Все твердые поверхности, в том числе поверхность кремниевой и стеклянной пластин, являются сравнительно грубыми в нанометровых масштабах. Однако после анодного соединения из-за силы электростатического притяжения, эффекта Джонсона – Рабека, поверхность раздела стеклянной и кремниевой пластин становится практически плоской (рис. 3).

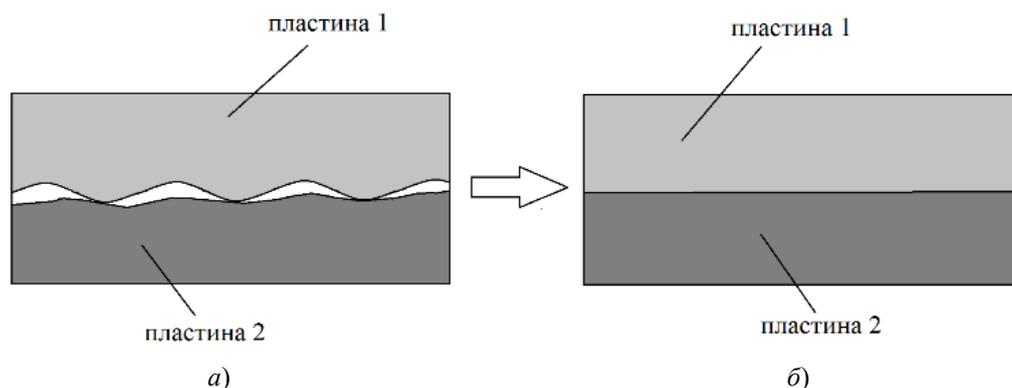


Рис. 3. Граница раздела «кремний-стекло» до (а) и после (б) анодного соединения

Понимание механизмов анодного соединения способствует оптимизации технологического процесса сборки чувствительных элементов. Для улучшения параметров процесса электростатического соединения необходим тщательный подбор марок щелочного стекла для соединения с кремниевыми пластинами, применение пластин с минимально возможной шероховатостью поверхности, а также тщательный контроль параметров процесса анодного соединения, таких как температура, подаваемое напряжение.

Применение анодного соединения при сборке чувствительных элементов позволяет создавать датчики, отличающиеся малыми габаритами и массой, высокими эксплуатационными характеристиками.

#### Библиографический список

1. Дмитриенко, А. Г. Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики / А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирынина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3 (5). – С. 45–53.
2. Мокров, Е. А. Акселерометры НИИ Физических Измерений – элементы микросистемной техники / Е. А. Мокров, А. А. Папко // Микросистемная техника. – 2002. – № 1. – С. 3–9.
3. Аверин, И. А. Особенности формирования микроэлектромеханических элементов первичных преобразователей информации / И. А. Аверин, В. Е. Пауткин // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2014. – № 2 (30). – С. 24–32.
4. Козин, С. А. Разработка технологии и специального оборудования для соединения кремния со стеклом в поле высокого напряжения / С. А. Козин, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин // Датчики и системы. – 2005. – № 9. – С. 46–47.
5. Косогооров, В. М. Разработка технологии электростатического соединения многослойных стеклокремниевых структур / В. М. Косогооров, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин // Датчики и системы. – 2000. – № 7. – С. 59–60.
6. Шелби, Дж. Структура, свойства и технологии стекла / Дж. Шелби ; пер. с англ. Е. Ф. Медведева. – Москва : Мир, 2006. – 288 с.
7. Atkinson, R. A simple theory of the Johnson-Rahbek effect / R. Atkinson // Journal of Physics D: Applied Physics. – Vol. 2, № 3. – P. 325–333.

#### References

1. Dmitrienko A. G., Papko A. A., Torgashin S. I., Kiryanina I. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2013, no. 3 (5), pp. 45–53. [In Russian]
2. Mokrov E. A., Papko A. A. *Mikrosistemnaya tekhnika* [Microsystem technology]. 2002, no. 1, pp. 3–9. [In Russian]
3. Averin I. A., Pautkin V. E. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2014, no. 2 (30), pp. 24–32. [In Russian]
4. Kozin S. A., Fedulov A. V., Pautkin V. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2005, no. 9, pp. 46–47. [In Russian]
5. Kosogorov V. M., Fedulov A. V., Pautkin V. E. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2000, no. 7, pp. 59–60. [In Russian]

6. Shelbi Dzh. *Struktura, svoystva i tekhnologii stekla* [Structure, properties and technologies of glass]. Transl. from Engl. by E. F. Medvedev. Moscow: Mir, 2006, 288 p. [In Russian]
7. Atkinson R. *Journal of Physics D: Applied Physics*. Vol. 2, no. 3, pp. 325–333.

---

**Пауткин Валерий Евгеньевич**

кандидат технических наук, главный специалист,  
Научно-исследовательский институт  
физических измерений  
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)  
E-mail:gorvlad1@yandex.ru

**Pautkin Valeriy Evgen'evich**

candidate of technical sciences, chief specialist,  
Scientific-research Institute  
of physical measurements  
(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

---

**Образец цитирования:**

Пауткин, В. Е. Физико-химические основы анодного соединения элементов МЭМС / В. Е. Пауткин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2 (28). – С. 94–98. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-2-11.