



# Перспективы использования кремниевого резонатора в резонансных преобразователях давления

**Д. А. Кудрявцева**

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

**С. Р. Таишев**

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

**Аннотация.** Представлена конструкция струнного датчика, чувствительный элемент которого выполнен в виде балки (струны), совершающей колебания в магнитном поле на собственной резонансной частоте. Показаны преимущества струнного метода, технологических решений для струны, выполненной из кремния на основе МЭМС-технологии. Произведен расчет частоты колебательных мод резонатора с электромагнитным и электростатическим возбуждением, с использованием программы конечно-элементного моделирования ANSYS.

**Ключевые слова:** Резонансный преобразователь давления, чувствительный элемент, кремниевая струна, микросистемная техника МЭМС-технологии.

## Prospects for using silicon resonator in resonant pressure transducers

**D. A. Kudryavtseva**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

**S. R. Taishev**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

**Abstract.** The paper presents the design of stringed sensor, the detecting element of which is made in the form of a beam (string), oscillating in a magnetic field at its own resonant frequency. The advantages of the string method, technological solutions for a string made of silicon based on MEMS technology are given. The calculation of the frequency of vibrational modes of the resonator with electromagnetic and electrostatic excitation is made using the finite element modelling ANSYS.

Key words: resonant pressure transducer, detecting element, silicon string, microsystems engineering of MEMS technology.

Теория и практика использования струнных датчиков достаточно развиты, так как в той или иной мере этими вопросами занимались с начала XX в. Однако по мере накопления опыта эксплуатации стали возникать вопросы, связанные с точностью и надежностью как самих датчиков, так и вторичных измерительных преобразователей. Это обусловлено в разной степени:

- длительным сроком эксплуатации датчиков, уже достигшим рубежа 40 лет;
- недостаточным совершенством технологии производства, допускающей разброс параметров датчиков в относительно широких пределах;
- повышением требований к надежности конструкции.

В связи с этим представляется правильным провести исследование технологий и методов, используемых в системах, реализующих измерение с помощью струнных датчиков, с целью выявления путей и способов повышения точности и надежности вторичной измерительной аппаратуры.

Струнный метод измерения заключается в том, что любая измеряемая величина либо непосредственно, либо через цепь предварительных промежуточных преобразователей приводится к изменению силы натяжения струны, что вызывает изменение частоты ее собственных поперечных колебаний. Естественной входной величиной струнного преобразователя является продольная сила, а выходной – частота [1].

Струнные датчики, у которых один из концов струны не имеет жесткой заделки, работают в режиме измерения силы. Достоинством таких датчиков является малое влияние изменения температуры окружающей среды на метрологические характеристики, поскольку изменение температуры приводит к изменению длины струны, а не к изменению силы ее натяжения. Недостатком является их высокая чувствительность к вибрационным перегрузкам ввиду того, что второй конец струны жестко не зафиксирован [2, 3].

При возрастании усилия  $P$  появляется упругая деформация балки  $\sigma$ , величина которой на длине  $L$  в соответствии с законом Гука будет равна

$$\delta = \frac{PL}{S_{\delta}E_{\delta}}, \quad (1)$$

где  $S_{\delta}$ ,  $E_{\delta}$  – площадь поперечного сечения и модуль упругости материала балки соответственно.

При появлении деформации  $\delta$  возрастает упругая деформация струны на ту же величину  $\delta$ .

Широко используемые в настоящее время методы преобразования давления в электрический сигнал имеют очевидные принципиальные ограничения по стабильности и устойчивости к перегрузкам по причине остаточной деформации и механической усталости мембраны чувствительного элемента, а также температурной зависимости пьезорезистивных датчиков.

Наиболее перспективными является конструкция струнного датчика, чувствительный элемент которого выполнен в виде балки (струны), совершающей колебания в магнитном поле на собственной резонансной частоте. Частота колебаний струны напрямую зависит от ее геометрии.

В случае кремниевого резонатора собственную частоту прибора определяют только два параметра: масса (которая остается неизменной) и геометрические размеры (жестко зафиксированные размеры кристаллической решетки). Проводимые за рубежом испытания кремниевых резонаторов подтверждают их высокую стабильность по сравнению с традиционными приборами, например резонансный датчик давления, изготовленный по MEMS-технологии и конструктивно состоящий из кремниевой перемычки особой конструкции (резонатора), присоединенной к кремниевой мембране. Резонатор возбуждают электростатическим либо электромагнитным способом, его колебания улавливаются тензорезисторами, расположенными на резонаторе. Прикладываемое давление измеряется по сдвигу резонансной частоты [4].

Рассмотрим конструкцию резонансного преобразователя давления со струнным резонатором на основе структуры «кремний–стекло», которая приведена на рис. 1. Для формирования структуры резонатора используются КНИ-пластины, в последнее десятилетие ставшие доступным материалом для разработки и изготовления МЭМС-преобразователей. Структура КНИ-пластины включает рабочий слой толщиной от 30 мкм, диэлектрический слой толщиной 5–6 мкм и подложку толщиной 400 мкм. Основное достоинство КНИ-пластин заключается в возможности формирования в рабочем слое изолированных островков монокристаллического кремния, из-под которых потом диэлектрический (жертвенный) слой может быть частично или полностью удален. При этом путем подбора геометрических размеров элементов и времени травления жертвенного слоя могут быть сформированы жестко закрепленные, изолированные от подложки и механически подвижные элементы [3].

Произведен расчет частоты колебательных мод резонатора с электромагнитным и электростатическим возбуждением с использованием программы конечно-элементного моделирования ANSYS. Для электромагнитного типа возбуждения частота 1-й моды колебаний составляет 148 КГц, а для электростатического – 134 кГц [5].

В промышленных условиях резонансный метод является единственной альтернативой емкостному и пьезорезистивному методам измерения давления благодаря таким функциональным особенностям, как отсутствие промежуточного преобразования сигнала, высокая стабильность нуля и линейность выходного сигнала. Наиболее перспективным является изготовление резонатора из кремния с применением МЭМС-технологий, так как это позволяет улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики при одновременном уменьшении массы и габаритов резонаторов.

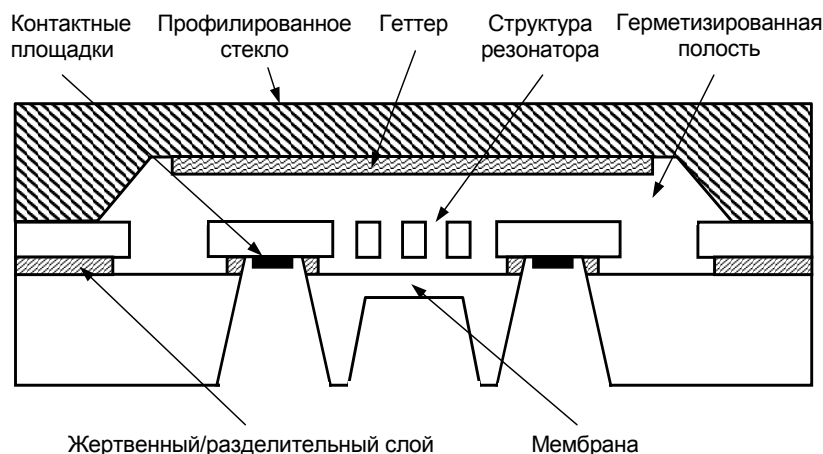


Рис. 1. Конструкция резонансного преобразователя давления

МЭМС находят самое широкое применение как в средствах массового спроса, таких как электронные системы автомобилей и потребительская техника (сотовые телефоны, ноутбуки, нетбуки и др.), так и в сложных приборах специального назначения, производимых небольшими партиями: медицинском оборудовании, военной и аэрокосмической технике, промышленных АСУ, аппаратуре мониторинга метеословий.

### Библиографический список

1. Волков, В. С. Температурная компенсация чувствительности высокотемпературного полупроводникового датчика давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов, В. Ю. Дарвин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 13–15.
2. Волков, В. С. Использование микропленочных геттеров в технологии вакуумирования чувствительных элементов датчиков абсолютного давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов, В. Ю. Дарвин // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 2. – С. 162–164.
3. Баринов, И. Н. Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 50–60.
4. Волков, В. С. Автоматизация разработки диагностического обеспечения интеллектуальных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2009. – № 12. – С. 20–25.
5. Фандеев, В. П. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования приборов : учеб. пособие / В. П. Фандеев, В. С. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – 76 с.

### Кудрявцева, Д. А.

Перспективы использования кремниевого резонатора в резонансных преобразователях давления / Д. А. Кудрявцева, С. Р. Таишев // Инжиниринг и технологии. – 2017. – Vol. 2(1). – DOI 10.21685/2587-7704-2017-2-1-5