

Д. А. Кудрявцева

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ РАЗМЕРОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА КРЕМНИЕВОГО РЕЗОНАНСНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДАВЛЕНИЯ

D. A. Kudryavtseva

RESEARCH OF INFLUENCE OF THE CONSTRUCTIVE SIZES ON CHARACTERISTIC THE SENSITIVE ELEMENT OF A SILICON RESONANT PRESSURE TRANSDUCER

А н н о т а ц и я. *Актуальность и цели.* К современным измерительным устройствам предъявляются требования по повышению помехоустойчивости и снижению массогабаритных показателей. Повышению помехоустойчивости способствует использование преобразователей с частотным выходным сигналом. Снижению массы и габаритных размеров преобразователя способствует использование МЭМС-технологии для изготовления чувствительного элемента (ЧЭ) в интегральном исполнении. Рассматривается первичный измерительный преобразователь давления в изменение частоты колебаний ЧЭ струнного типа. Объектом исследования является конструкция ЧЭ кремниевого резонансного преобразователя давления. Предметом исследования является зависимость частоты колебаний ЧЭ в виде кремниевой струны от ее геометрических параметров. Цель работы – исследование влияния конструктивных размеров на изменение собственной частоты чувствительного элемента кремниевого резонансного преобразователя давления. *Материалы и методы.* Приведены и обоснованы преимущества изготовления кремниевой струны интегральным способом из монокристаллического кремния. С помощью аналитических расчетов и численных методов построена и проанализирована зависимость резонансной частоты колебаний от геометрических параметров струны. *Результаты.* Проведенные расчеты и анализ результатов показали, что для приведенных в статье соотношений размеров струны численное моделирование на основе метода конечных элементов дает удовлетворительные результаты для собственных частот колебаний однородной балки. Однако для малых размеров поперечного сечения струны наблюдались отклонения от линейного закона, что свидетельствует о необходимости учета особенностей построения конечноэлементной сетки для моделирования струн таких пропорций. *Выводы.* Для вычислений и инженерного анализа конструктива упругого элемента систем с микроминиатюрными струнами рекомендуется использовать топологию сетки конечных элементов в виде параллелепипеда либо балочного типа. При моделировании воздействия динамики струны на полупроводниковую структуру, располагающуюся на поверхности или непосредственно в массиве струны, необходимо тщательно подбирать топологию сетки конечных элементов. В качестве первичной верификации результатов численного моделирования можно использовать совпадения результатов моделирования с результатами расчетов по приведенным в статье аналитическим выражениям.

A b s t r a c t. Background. Modern measuring devices are required for improving the noise immunity and reduce weight and size. To improve noise immunity promotes the use of pre-adjustable frequency output signal. Reduction of the weight and dimensions of the Converter promotes the use of MEMS technology for the fabrication of sensitive element (SE) in the integrated design. Is considered the primary measuring Converter of pressure change in the oscillation frequency f of the string type. The object of research is the design of the sensor silicon resonant pressure transducer. The subject of research is the dependence of the oscillation frequency f in the form of a silicon strings from its geometrical parameters. The work purpose is research of influence of structural dimensions on the change in natural frequency of the sensitive element of a silicon resonant pressure transducer. **Materials and methods.** Given and the advantages of making silicon strings integral way of monocrystalline silicon. Using analytical calculations and numerical methods are constructed and analyzed the dependence of resonance frequency of oscillations on the geometric parameters of the string. **Results.** The calculations and analysis of the results showed that given in article, the ratio of the size of the string numerical simulation based on the finite element method gives satisfactory results for natural frequencies of uniform beams. However, for small cross-sectional dimensions of the strings observed deviations from the linear law, which indicates the necessity of taking into account of the peculiarities of constructing the finite element mesh for modeling strings of such proportions. **Conclusions.** For computing and engineering analysis of structural elements of the elastic element systems with miniature strings consider the topology of the finite element mesh in the form of parallelepipeds or beam type. In modeling the impact dynamics of a string on a semiconductor structure located on the surface or in the array of strings, you must carefully choose the topology of the finite element mesh. As the primary verification of the results of numerical simulation it is possible to use a matching simulation results with the results of calculations cited in the article analytical expressions.

К л ю ч е в ы е с л о в а: резонансный преобразователь давления, кремниевая струна, резонансная частота, МЭМС-технологии.

К e y w o r d s: Silicon resonant pressure transducer, Silicon with, resonance frequency, MEMS-structure.

Наиболее ответственным составным элементом любого измерительного средства являются первичные измерительные преобразователи (ПИП), предназначенные для измерения электрических величин (деформации, давления, усилия, перемещения и т.д.).

В настоящее время интенсивно развивается направление, связанное с созданием ПИП на основе технологии микроэлектромеханические системы (МЭМС) и микросистемной техники. Принцип работы широкого ряда измерительных МЭМС-устройств основан на механическом резонансе. В таких устройствах индуцируют колебания чувствительного элемента с резонансной частотой, которая определяется свойствами материала и геометрией элемента. Под влиянием измеряемого воздействия изменяется частота резонансных колебаний, что позволяет количественно оценить воздействующий фактор.

Традиционные конструкции резонансных преобразователей давления используют в качестве резонатора металлическую струну, закрепленную в держателях методом сжатия. Следствием такого закрепления является возникновение контактных деформаций, негативно влияющих на стабильность метрологических характеристик резонансного преобразователя давления. Кроме этого, несовершенство технологий изготовления металлических струн приводит к погрешностям формы струны в виде неоднородности сечения по ее длине и, как следствие, снижению добротности резонансного преобразователя давления. Стабильность геометрических размеров формы струны может быть достигнута при изготовлении резонансного преобразователя давления из монокристаллического кремния с использованием МЭМС-технологий [1].

Монокристаллический кремний обладает рядом достоинств по сравнению с традиционно применяемыми материалами (прецизионные сплавы, кварц и др.):

- наличие минимального числа структурных дефектов по сравнению с аморфным или поликристаллическим веществами; монокристаллическая структура позволяет существенно снизить или вообще исключить влияние механических свойств поликристаллических материалов на метрологические характеристики измерительных преобразователей;

- снижение влияния на метрологические характеристики чувствительного элемента (ЧЭ) упругого и неупругого механического последствия и ползучести вследствие уменьшения числа структурных дефектов;

- возможность использования анизотропии свойств (механических, электрических и т.д.) для повышения симметрии колебательных движений; анизотропия (кристаллическая симметрия) механических свойств материала совпадает с симметрией колебательной системы (струны) и обеспечивает более высокую стабильность колебаний и, следовательно, уменьшает влияние паразитных форм колебаний струны на измерительный сигнал;

- возможность применения стандартных технологических методов микроэлектроники для изготовления конструкции преобразователя групповым методом при значительном уменьшении массы и габаритов [2].

Кремниевая струна рассматривается как упругая балка (рис. 1), параллелепипед, два размера которого существенно меньше третьего, т.е. $l \leq h, b$ (в исследуемом случае $l = 5000$ мкм, $h \leq 20$ мкм, $b \leq 120$ мкм). Это позволяет достаточно точно аналитически описывать динамику ЧЭ резонансного преобразователя давления на основе теории механических колебаний.

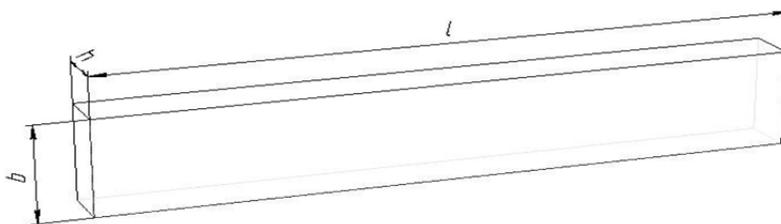


Рис. 1. Геометрия монокристаллической кремниевой струны: l – длина, h – толщина, b – ширина

Гармонические поперечные колебания балки с учетом наличия постоянной удельной растягивающей силы N описываются уравнением

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (Nu) + \omega^2 \rho S u = 0, \quad (1)$$

где u – перпендикулярное перемещение относительно средней (нейтральной) плоскости балки вдоль толщины или ширины; ρ – объемная плотность; $S = h \cdot b$ – площадь поперечного сечения; ω – собственная частота гармонического колебания; E – модуль Юнга; J – момент инерции поперечного сечения (для выбранной геометрии $J = hb^3/12$ для оси в плоскости толщины и $J = bh^3/12$ для оси в плоскости ширины).

Так как величины E , J и N в рассматриваемом случае являются постоянными, то уравнение (1) можно привести к виду

$$\frac{\partial^4 u}{\partial x^4} + \frac{N}{EJ} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \omega^2 \frac{\rho S}{EJ} u = 0.$$

Если положить $N = 0$, уравнение приведет к классическому виду для прогиба гармонически колеблющейся балки с частотой ω , пропорциональной выражению

$$\omega \sqrt{\frac{EJ}{\rho S}}.$$

Из соотношения видно, что если a – характерный размер поперечного сечения упругого элемента, так что $S \sim a^2$ и $J \sim a^4$, то при уменьшении сечения струны частота будет изменяться линейно с характерным размером, т.е. $\omega \sim \sqrt{S} \sim a$.

Такая же линейная зависимость будет наблюдаться, если уменьшать площадь поперечного сечения только лишь за счет одного из размеров h или b . Частота, соответствующая фиксированному размеру, должна оставаться неизменной [3–5].

При условии $N \neq 0$ выражение для частоты существенно усложняется. Но в случае $J \rightarrow 0$, который выполняется, если площадь поперечного сечения также устремить к нулю ($S \rightarrow 0$), второе слагаемое со второй производной в (1) начнет существенно превышать первое слагаемое с четвертой производной, поэтому частота в этом пределе будет стремиться к выражению

$$\omega \sim \sqrt{\frac{N}{\rho S}} \sim \sqrt{\frac{T}{\rho}}.$$

Здесь учтено, что $N/S = T$ является напряжением в поперечном сечении струны, т.е. является натяжением струны, которое и используют при описании классической математической струны. При уменьшении поперечного сечения струны, описываемой упругим элементом в виде балки, при отсутствии растягивающего усилия (натяжения) частота должна изменяться линейно с характерным размером данного сечения $\omega \sim a$, либо не превышать значения по этой зависимости [6–8].

В качестве программной среды для численного моделирования методом конечных элементов была выбрана система CAESolidWorks как наиболее распространенная среди начинающих разработчиков и исследователей. Данная система имеет наиболее характерные для методик численных расчетов недостатки и недочеты, которые в меньшей степени присутствуют в более тяжелых САЕ типа ANSYS или ABAQUS благодаря наличию в последних встроенных полуэмпирических правил по оптимизации топологии сетки или расчетных методик. С помощью метода конечных элементов проведено численное моделирование в CAESolidWorks зависимости частоты колебаний от геометрических параметров струны.

На рис. 2, 3 представлены графики нормированных на максимальную аналитическую частоту зависимостей частот колебаний в плоскостях ширины и толщины соответственно от ширины струны.

Результаты расчетов:

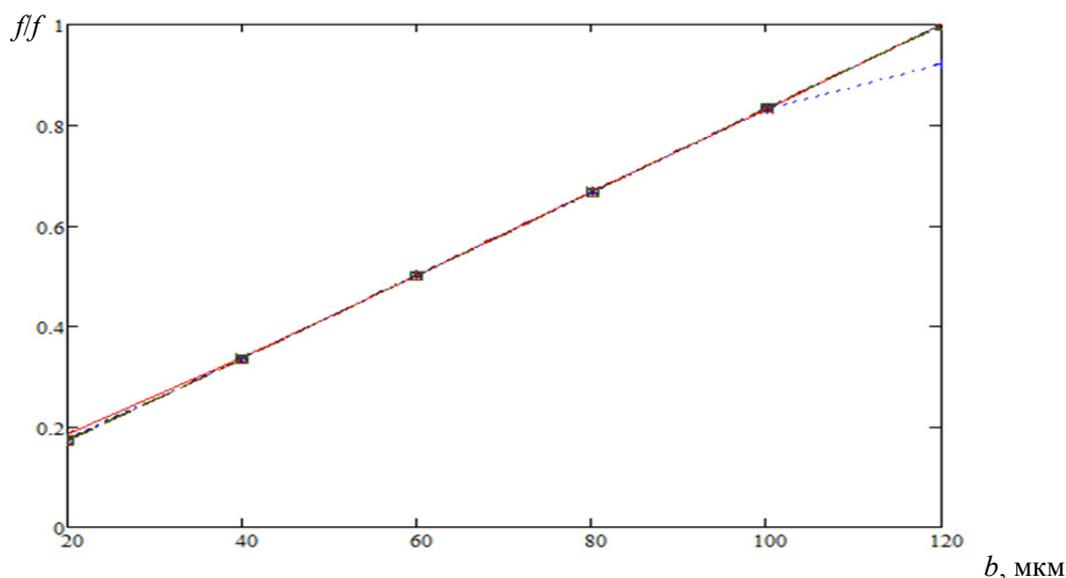


Рис. 2. Зависимость нормированной частоты колебания струны (в плоскости толщины h) от b для разных толщин h

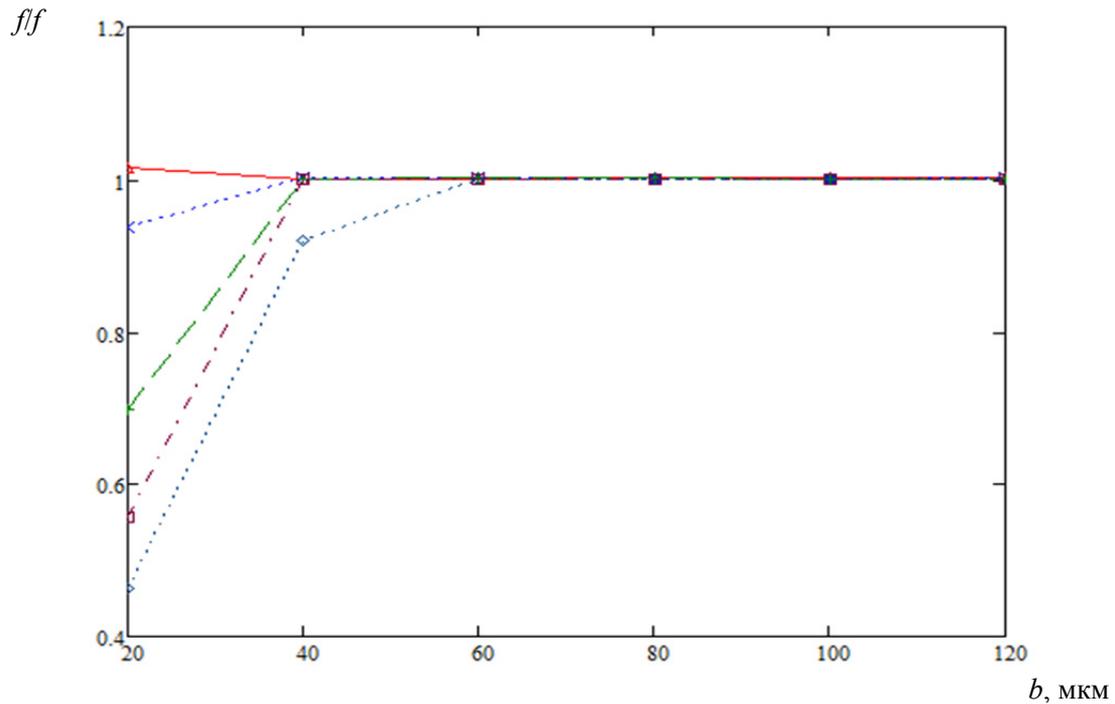


Рис. 3. Зависимость нормированной частоты колебания струны (в плоскости толщины b) от b для разных толщин h

На рис. 4, 5 представлены графики зависимостей относительных (с сохранением знака) погрешностей частот колебаний в плоскостях ширины и толщины от ширины струны.

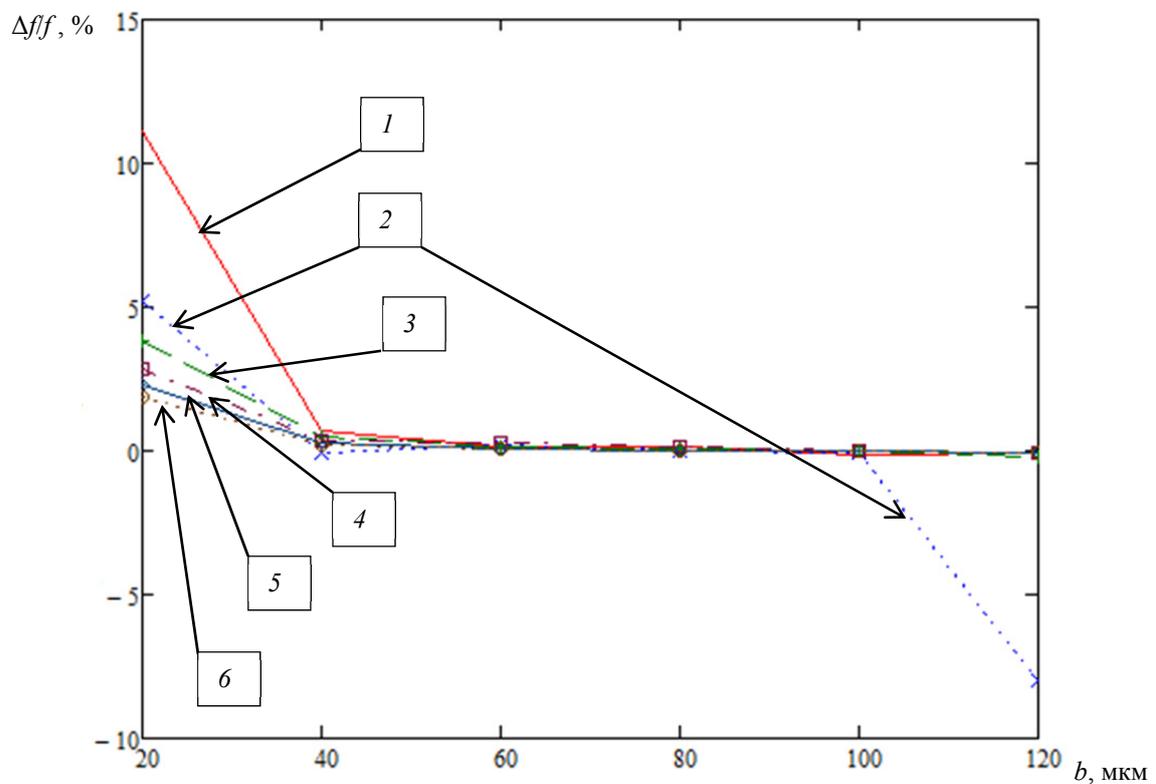


Рис. 4. Зависимость относительных (с сохранением знака) погрешностей частоты колебания струны (в плоскости ширины b) от b для разных толщин h :
1 – квадрат; 2 – 40 мкм; 3 – 60 мкм; 4 – 80 мкм; 5 – 100 мкм; 6 – 120 мкм

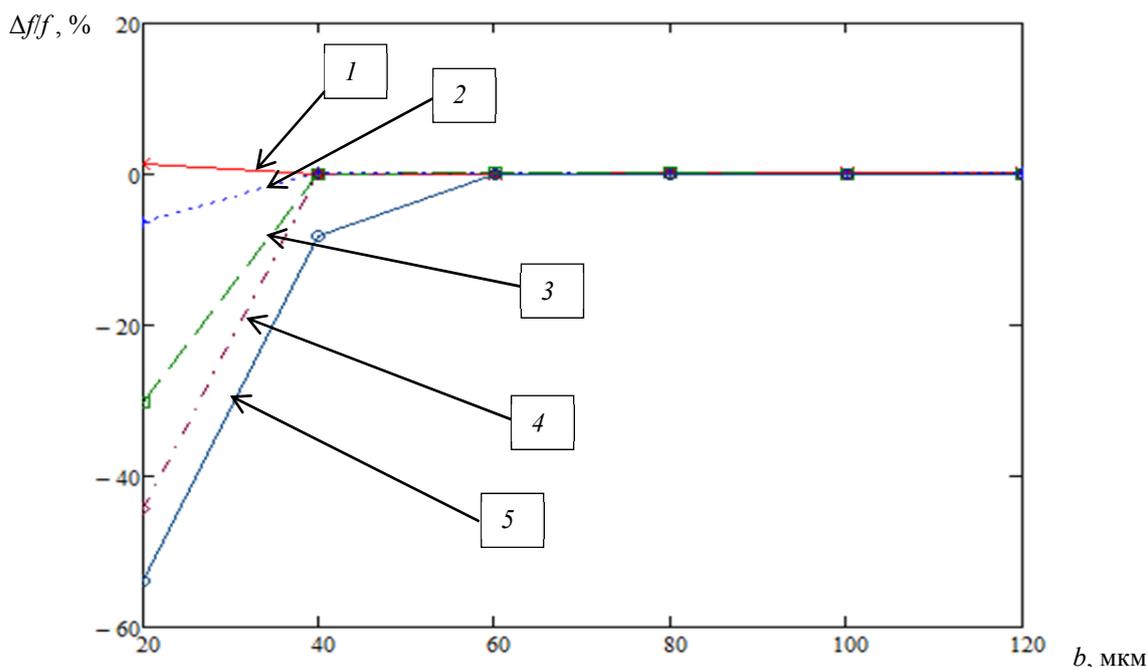


Рис. 5. Зависимость относительных (с сохранением знака) погрешностей частоты колебания струны (в плоскости толщины h) от b для разных толщин h :
1 – 40 мкм; 2 – 60 мкм; 3 – 80 мкм; 4 – 100 мкм; 5 – 120 мкм

В результате проведенных исследований выявлены следующие закономерности:

1) для струны квадратного сечения с размером $b = h = 20$ мкм присутствует небольшое отклонение в сторону завышения частоты по сравнению с аналитическим расчетом того же размера;

2) для струн с прямоугольным поперечным сечением имеется аналогичное отклонение частоты колебаний в плоскости ширины b при минимальной ширине $b = 20$ мкм, при этом оно постепенно уменьшается с ростом толщины h струны;

3) для струны с прямоугольным поперечным сечением толщины $b = 40$ мкм имеется также существенная расхожимость, и при максимальной ширине $b = 120$ мкм;

4) у всех типов прямоугольных сечений струны при ширине $b = 20$ мкм для колебаний в плоскости толщины h имеется значительное расхождение, причем оно растет с увеличением h , а при $h = 120$ мкм появляется значительное расхождение с аналитическим значением частоты и для $b = 40$ мкм.

Как было показано в начале статьи, при уменьшении поперечного сечения кремниевая струна, представляющая собой балку, при наличии растягивающего усилия начинает все больше и больше соответствовать классической теории математической струны с бесконечно малым поперечным сечением, у которой колебания определяются только силами натяжения [9]. Поэтому адекватная приближенная (численная) математическая модель при отсутствии исходного натяжения струны не должна давать значения частоты, существенно отличающиеся от линейного закона, полученного на основании аналитического выражения для частоты однородной балки.

Так как изучаемая модель (рис. 1) имеет простейшую геометрическую форму и не имеет конструктивных особенностей вроде концентраторов напряжения или многосвязных областей, то топологическая структура конечной элементной сетки должна быть достаточно однородной. Поэтому ожидалось, что именно струна с квадратным сечением будет давать наилучшее приближение при уменьшении поперечного сечения [10]. Проведенные исследования квадратного и прямоугольного сечения струны позволяют говорить о том, что конечноэлементная модель, построенная с помощью CAESolidWorks, характеризуется отклонением от линейной зависимости для малых поперечных сечений. Результаты численного моделирования превышают аналитически рассчитанные значения. Судя по тому, что относительная погрешность

для минимальной ширины струны при увеличении ее толщины постепенно уменьшается (см. рис. 4), основная причина такого несоответствия кроется в ограниченной плотности конечных элементов в сечении модели струны. Всплеск относительной погрешности для максимальной ширины одной из струн прямоугольного сечения (рис. 4, ломаная 2) является случайностью построения конечно-элементной сетки с плохо обусловленной матрицей, что еще раз подтверждает важность топологии структуры конечных элементов у численной модели струны. У всех типов прямоугольных сечений струны при ширине $b = 20$ мкм для колебаний в плоскости толщины h имеется значительное расхождение, причем оно растет с увеличением h , а при $h = 120$ мкм появляется значительное расхождение с аналитическим значением частоты и для $b = 40$ мкм, что также является следствием зависимости точности расчета от топологии конечных элементов. Объяснение указанных особенностей поведения расчетов кроется в том, что система CAESolidWorks строила топологию сетки с элементом случайности распределения узлов. Увеличение плотности сетки позволяло повысить точность решения, но иногда приводило к частично или полностью неудовлетворительным результатам.

И, наконец, в арсенале программного обеспечения средств САЕ есть различные виды специальных конечных элементов, в частности, в виде балочной функции. Их применение показало полное соответствие результата расчета аналитической теории, при этом существенно сократив время на проведение расчета.

Моделирование струны с помощью других, более тяжелых САЕ (ANSYS и ABAQUS), где для данной геометрии система выбрала в качестве решетки наиболее близкую геометрию в виде прямоугольных параллелепипедов, позволило получить результаты, которые по точности почти не уступали значениям из аналитического решения или конечных элементов в виде балки. Однако такой подход к решению будет существенно осложнен при необходимости моделирования какой-либо топологии на поверхности струны или в ее структуре, а также при разработке струны более сложной формы, чем представленная на рис. 1.

Проведенные расчеты и анализ результатов показали, что для выбранных соотношений размеров струны численное моделирование на основе метода конечных элементов дает удовлетворительные результаты для собственных частот однородной балки. Однако для малых размеров поперечного сечения струны наблюдались отклонения от линейного закона. Причем тот факт, что данная погрешность уменьшалась при увеличении отношения толщины к ширине, в то время как в перпендикулярной плоскости наблюдалось увеличение относительной погрешности собственной частоты, говорит о том, что имеет место существенное влияние топологии конечных элементов численной модели струны.

Наличие одного значительного выброса погрешности вычисления не критично, но лишней раз указывает на то, что при расчетах для сравнения надо проводить серию вычислительных экспериментов с разными топологиями сеток, как минимум – два.

Для вычислений и инженерного анализа конструктива упругого элемента систем с микроминиатюрными струнами рекомендуется использовать топологию с конечными элементами в виде параллелепипедов либо балочного типа. При необходимости моделирования воздействия динамики струны на топологию, располагающуюся на поверхности или непосредственно в ее массиве, необходимо будет тщательно подбирать топологию конечных элементов. В качестве первичной верификации результатов численного моделирования можно использовать совпадения результатов моделирования с результатами расчетов по приведенным в статье аналитическим выражениям.

Библиографический список

1. Кучумов, Е. В. Струнный автогенераторный измерительный преобразователь на основе пьезоструктуры / Е. В. Кучумов, И. Н. Баринев, В. С. Волков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 2 (8). – С. 58–65.
2. Кудрявцева, Д. А. Исследование влияния температуры на выходной сигнал кремниевого резонансного преобразователя давления / Д. А. Кудрявцева, Б. В. Цыпин // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 42–51.
3. Милохин, Н. Т. Частотные датчики систем автоконтроля и управления / Н. Т. Милохин // Библиотека по автоматике. – 2013. – № 310. – С. 131–138.

4. Карцев, Е. А. Датчики неэлектрических величин на основе унифицированного микро-механического резонатора / Е. А. Карцев // Приборы и системы управления. – 1966. – № 4. – С. 136–141.
5. Тимошенко, С. П. Сопротивления материалов / С. П. Тимошенко. – М. : Наука, 1979. – 135 с.
6. Баринов, И. Н. Оптимизация параметров полупроводниковых чувствительных элементов датчиков абсолютного давления / И. Н. Баринов // Приборы. – 2009. – № 4. – С. 47–51.
7. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
8. Баринов, И. Н. Высокотемпературные чувствительные элементы датчиков давления со структурой «кремний на диэлектрике» / И. Н. Баринов // Датчики и системы. – 2007. – № 1. – С. 36–39.
9. Эткин, Л. Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л. Г. Эткин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 408 с.
10. Новицкий, П. В. Цифровые приборы с частотными датчиками / П. В. Новицкий, В. Г. Кнорринг, В. С. Гутников. – Л. : Энергия, 1970. – 424 с.

Кудрявцева Дарья Александровна

аспирант,

Научно-исследовательский институт

физических измерений

(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10)

E-mail: dashuliy2308@yandex.ru

Kudryavtseva Dar'ya Aleksandrovna

postgraduate student,

Scientific-research Institute

of physical measurements

(8/10 Volodarskogo street, Penza, Russia)

УДК 51-74:621, 681.5

Кудрявцева, Д. А.

Исследование влияния конструктивных размеров на характеристики чувствительного элемента кремниевого резонансного преобразователя давления / Д. А. Кудрявцева // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 3 (21). – С. 74–81. DOI 10.21685/2307-5538-2017-3-11.