

**Исследование балочных резонаторов
для частотных акселерометров с учетом
термоупругого демпфирования и остаточного напряжения**

Аунг Тхура, Б.М. Симонов, С.П. Тимошенко

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия*

В микроэлектромеханических приборах и системах резонаторы используются в конструкциях генераторов, датчиков инерциально-навигационных систем, СВЧ-приемопередатчиков и других устройств.

В работе исследовано изменение собственной частоты характерных конструкций резонаторов из кремния с различной кристаллографической ориентацией под воздействием механической силы, представлены результаты моделирования в программе ANSYS. Исследовано влияние на собственные частоты резонатора термоупругого демпфирования, происходящего в результате механических колебаний, а также остаточного напряжения, возникающего в структуре резонатора вследствие различия технологий изготовления. Рассчитана добротность четырех типов конструкций резонаторов с помощью программы COMSOL. В результате проведенных исследований выбрана оптимальная конструкция резонатора для частотных акселерометров, у которых добротность больше. Даны рекомендации по выбору оптимальной конструкции резонатора и кристаллографической ориентации кремния для повышения чувствительности и стабильности параметров частотного микроакселерометра.

Полученные результаты предполагается использовать в реальных конструкциях разрабатываемых микроэлектромеханических приборов.

Ключевые слова: частотный микроакселерометр; резонатор; термоупругое демпфирование; остаточное напряжение; собственная частота; добротность.

Для цитирования: Аунг Тхура, Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Исследование балочных резонаторов для частотных акселерометров с учетом термоупругого демпфирования и остаточного напряжения // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 52–61. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-52-61

Research of Change in Natural Frequencies of Bar Resonators under Influence of Thermoplastic Damping and Residual Stress

Aung Thura, B.M. Simonov, S.P. Timoshenkov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

In micro-electromechanical systems the resonators are used in the construction of generators, sensors of inertial navigation systems, in RF transceivers, for increasing the sensitivity (acoustic, biological, mechanical, etc.).

In this paper the change in the natural frequency of four characteristic resonators under the influence of mechanical force has been investigated and the simulation results in the ANSYS program have been presented. The effect of thermoplastic damping on the natural frequencies of the resonator, which occurs as a result of the mechanical oscillation of the resonator, as well as the residual stress, arising in the structure of the resonator due to the difference in manufacturing technique, has been investigated. The Q-factors of these resonators have been calculated using the COMSOL program and the optimum resonator design have been chosen to increase the sensitivity of the frequency microaccelerometer.

The obtained results are assumed to be used in real constructions of the micro-electromechanical devices to be developed.

Keywords: resonator; thermoplastic damping; residual stress; natural frequency; quality factor.

For citation: Aung Thura, Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Research of change in natural frequencies of bar resonators under influence of thermoplastic damping and residual stress // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 52–61. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-52-61

Введение. Чувствительность частотного акселерометра (преобразователя ускорения) определяется тем, на сколько герц меняется частота при воздействии единичного ускорения $1 g$ (g – ускорение свободного падения). Резонатору, функционирующему в составе частотного акселерометра, для быстрой и точной реакции на изменение воздействующего на прибор ускорения требуются узкая полоса пропускания и высокая добротность. На добротность резонатора могут влиять различные виды демпфирования: газовое, электрическое, термоупругое и др. [1–4].

Цель настоящей работы – исследование влияния термоупругого демпфирования, происходящего в результате механических колебаний резонатора, на его добротность. Также рассмотрено влияние остаточного напряжения на собственную частоту балочных резонаторов различных конструкций.

Исследованы четыре типа конструкций резонаторов балочной формы, которые находят применение в частотных микроакселерометрах [5]. С помощью моделирования в программе ANSYS рассчитаны собственные частоты резонаторов, определены изменения этих частот при воздействии силы (ускорения) и сформулированы рекомендации по повышению чувствительности частотных микроакселерометров за счет обоснованного выбора конструкции резонатора. Практически у всех планарных конструкций МЭМС-датчиков

имеется остаточное напряжение в их конструктивах [1, 6], в результате моделирования установлено влияние этого напряжения на собственную частоту резонаторов.

Исследование собственных частот балочных резонаторов характерных конструкций. На рис.1 представлены конструкции четырех типов резонатора балочной формы. Балки первого и третьего типов (рис.1,а,в) имеют одинаковую площадь сечения по всей длине, балки второго и четвертого типов (рис.1,б,г) – утолщения в торцевых частях. Кроме того, у балок первого и второго типов крепление (фиксация) осуществляется по всей поверхности каждого торца, у балок третьего и четвертого типов фиксация реализуется через отростки (торсионы), отходящие от торцов. Резонаторы имеют одинаковые геометрические параметры. Длина резонатора $L = 550$ мкм, длина торцевой части $w = 45$ мкм, расстояние между двумя балками резонатора $d = 50$ мкм, ширина резонатора $b = 4$ мкм, толщина консольной балки $h = 8$ мкм (на рисунке не показана), длина подвеса $m = 55$ мкм, ширина торцевой части $s = 2$ мкм.

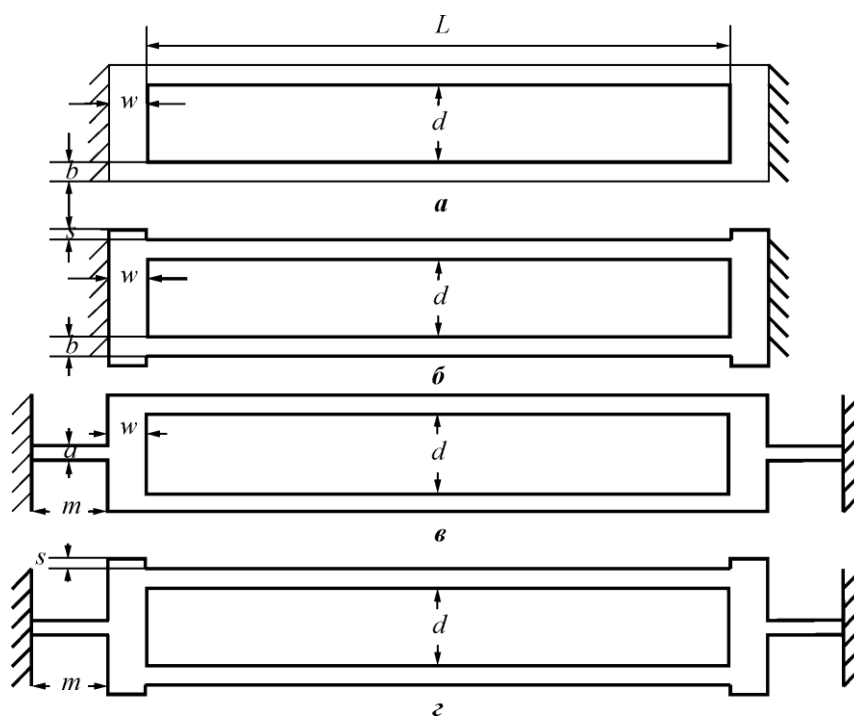


Рис.1. Характерные типы конструкций резонаторов:
а–г соответствуют первому – четвертому типам конструкций
Fig.1. Different designs of resonators [5]

При моделировании использовались значения параметров кремниевых пластин различной кристаллографической ориентации, применяемых для изготовления резонаторов: модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν ; плотность кремния $\rho = 2,33$ г/м³ (табл.1).

В табл.2 представлены результаты моделирования в программе ANSYS собственных частот резонаторов различных конструкций (см. рис.1,а–г). Из полученных данных видно, что наибольшее изменение собственной частоты колебаний имеет место в случае, когда для изготовления резонаторов использовались кремниевые пластины ориентации $\langle 100 \rangle$, наименьшее – для пластин с ориентацией $\langle 111 \rangle$. Для всех четырех типов конструкций изменение собственной частоты Δf_0 при растягивающей силе $F = 50$ мкН было одинаковым. Таким образом, существенное влияние на величину изменения Δf_0 резонаторов имеет кристаллографическая ориентация использованных для их изготовления пластин кремния.

Таблица 1
Параметры кремния различной ориентации

Parameters of silicon of different orientations

Параметр	Кристаллографическая ориентация		
	<100>	<110>	<111>
E , ГПа [1]	129,5	168,0	186,5
ν [3]	0,278	0,062	0,262

Таблица 2
Собственные частоты резонаторов f_0 , кГц, изготовленных из кремния
разной кристаллографической ориентации

The natural frequencies of resonators made of silicon
of different crystallographic orientation

Типы конструкций резонаторов				F , мкН	Δf_0 , кГц
Первый (см. рис.1, <i>a</i>)	Второй (см. рис.1, <i>б</i>)	Третий (см. рис.1, <i>в</i>)	Четвертый (см. рис.1, <i>г</i>)		
<100>					
100,09	100,40	100,22	100,48	0	1,69
101,78	102,09	101,91	102,17	50	
<110>					
113,96	114,26	114,07	114,35	0	1,48
115,44	115,74	115,56	115,83	50	
<111>					
120,11	120,47	120,26	120,57	0	1,41
121,52	121,88	121,67	121,98	50	

Значения f_0 четырех типов конструкций исследованных резонаторов отличаются друг от друга. Можно отметить несколько более высокие значения f_0 для конструкций с увеличенной площадью торцевых частей резонаторов и с креплением через подвесы (торсионы). Известно, что при воздействии ускорения на акселерометр возникает сила, действующая на резонатор. Изменение частоты резонатора определяется выражением [7]

$$f = f_0 \sqrt{1 \pm F \frac{0,295L^2}{Ehb^3}}, \quad (1)$$

здесь f – собственная частота при воздействии ускорения (силы); f_0 – собственная частота до действия ускорения; знак «плюс» ставится при приложении растягивающей силы, знак «минус» – сжимающей силы; F – осевая сила, возникающая при воздействии ускорения.

Полученные результаты моделирования, отражающие изменение f_0 при воздействии силы на резонаторы, хорошо согласуются с (1).

Термоупругое демпфирование. При возбуждении резонатора (при колебаниях) его верхняя часть растягивается и одновременно нижняя часть сжимается, в результате чего он нагревается и его энергия теряется. Теплопередача от нагретой части структуры к холодной зависит от времени вибрации и от конструкции резонатора. Оптимизация конструкции резонатора может повысить его добротность.

Для различных конструкций резонаторов рассчитать параметры термоупругого демпфирования сложно, хотя знать их необходимо. В настоящей работе проведен анализ простой конструкции резонатора (рис.2), для которой уже были сделаны аналитические расчеты, моделирование и эксперимент [3, 6, 8]. Для термоупругого демпфирования двухфиксированной балки используется выражение [3]

$$\frac{1}{Q} = \frac{E\alpha^2 T_a}{\rho c_p} \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}. \quad (2)$$

Здесь Q – добротность; T_a – абсолютная температура; c_p – теплоемкость; α – коэффициент термического расширения; ω – резонансная угловая частота колебаний; τ – тепловая постоянная времени релаксации системы. Параметр τ определяется выражением

$$\tau = \frac{\rho c_p h^2}{\pi^2 \kappa},$$

где h – толщина консольной балки; κ – теплопроводность, а резонансная частота

$$\omega = 22,373 \frac{h}{L^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho}}. \quad (3)$$

Выражение (3) используется для расчета резонансной частоты двухфиксированной балки.

Для наглядности на рис.2 представлены результаты моделирования в программе COMSOL простой двухфиксированной балки, имеющей длину 400 мкм и размер сечения 12×12 мкм. Для этой балки собственная частота, рассчитанная по выражению (3), $f_0 = 0,62383$ МГц, добротность, рассчитанная по выражению (2), $Q = 10498$. По результатам моделирования в программе COMSOL $f_0 = 0,6327$ МГц, $Q = 10668$. Полученные данные согласуются с результатами, представленными в [6], где даны только результаты моделирования – расчетные данные ($f_0 = 0,63$ МГц, $Q = 10300$), в [8] приведены экспериментальные значения этих же параметров ($f_0 = 0,57$ МГц, $Q = 10281$). На рис.3



Рис.2. Простая двухфиксированная балка при термоэластичном демпфировании: 1 – горячая часть в результате сжатия; 2 – холодная часть в результате растяжения

Fig.2. A simple two-fixed beam under thermoelastic damping: 1 – the hot part due to compression; 2 – the cold part due to stretching

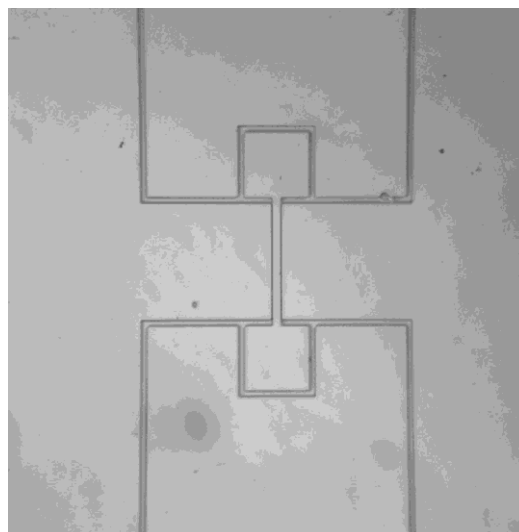


Рис.3. Фотография образца резонатора в виде двухфиксированной балки
Fig.3. Photograph of a resonator sample in the form of a double-fixed beam

представлена фотография полученного с помощью плазмохимического травления (ПХТ) образца резонатора из кремния в виде прямоугольной балки, толщина пластины кремния 300 мкм, размеры образца 2×2 мм.

На рис 4,а-г представлены результаты моделирования четырех типов конструкций резонаторов (см. рис.1). В табл.3 приведены собственные частоты и добротности четырех типов конструкций резонаторов в соответствии с ориентацией использованных для их изготовления пластин кремния. Из четырех типов два последних (см. рис.4,в,г) имеют наименьшее термоупругое демпфирование, поэтому у этих резонаторов по сравнению с другими добротность больше.

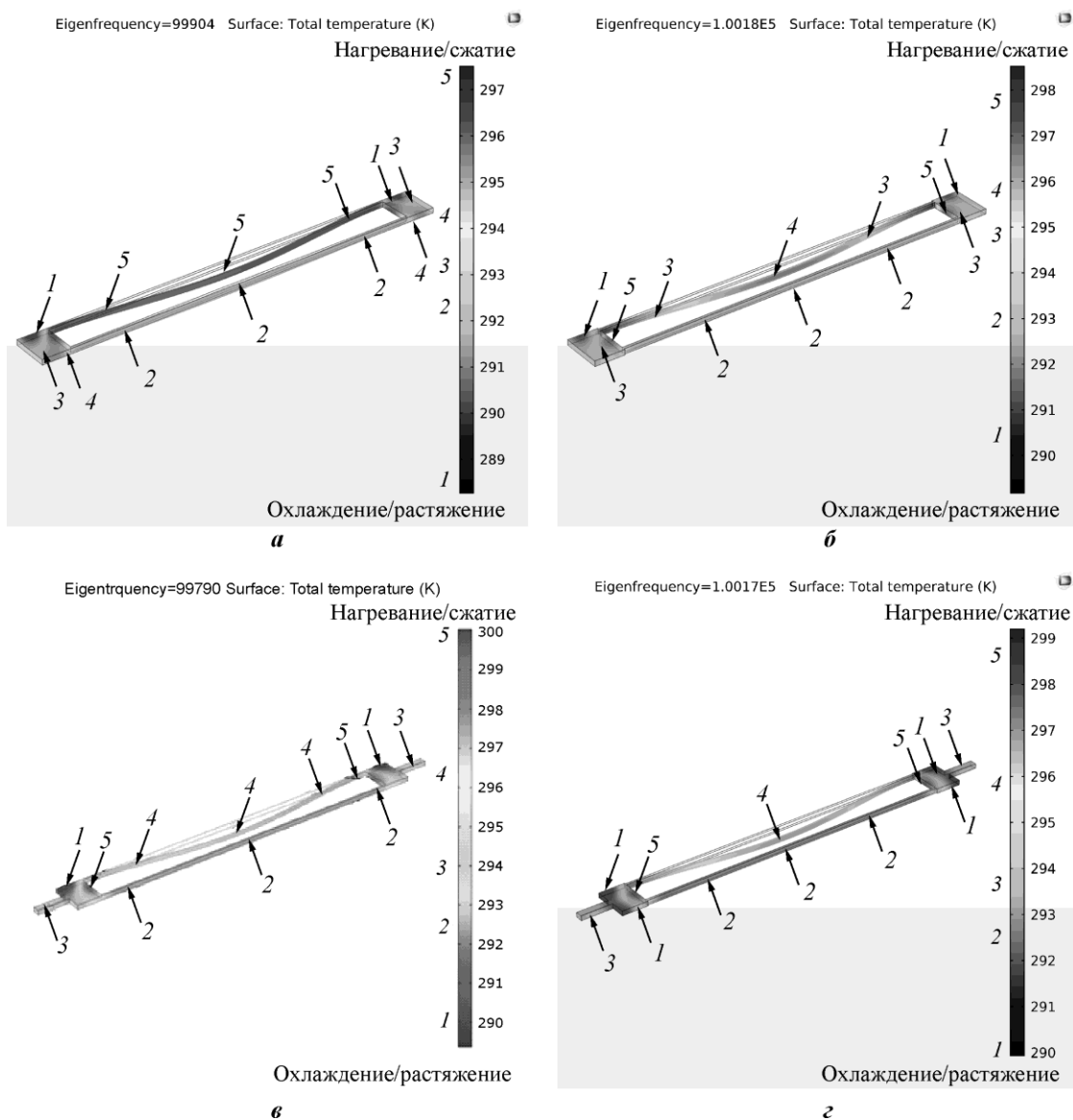


Рис.4. Результаты моделирования четырех типов конструкций резонаторов при термоупругом демпфировании: а-г соответствуют первому – четвертому типам конструкций

Fig.4. The first type (a), the second type (b), the third type (c), the fourth type (d) of resonator under thermoelastic damping

Таблица 3

Расчетные значения параметров резонаторов, изготовленных из кремния
разной кристаллографической ориентации

Table 3

Calculated values of the parameters of resonators made of silicon
of different crystallographic orientation

Типы конструкций резонаторов	Собственная частота f_0 , кГц			Добротность		
	<100>	<110>	<111>	<100>	<110>	<111>
Первый (см. рис.4,а)	99,90	113,56	119,72	$0,38 \cdot 10^6$	$0,26 \cdot 10^6$	$0,22 \cdot 10^6$
Второй (см. рис.4,б)	100,18	114,02	120,87	$0,38 \cdot 10^6$	$0,26 \cdot 10^6$	$0,22 \cdot 10^6$
Третий (см. рис.4,в)	99,79	113,71	119,74	$0,39 \cdot 10^6$	$0,27 \cdot 10^6$	$0,23 \cdot 10^5$
Четвертый (см. рис.4,г)	100,17	114,01	120,20	$0,39 \cdot 10^6$	$0,27 \cdot 10^6$	$0,23 \cdot 10^5$

Влияние термоупругого демпфирования на добротность незначительно, но это для простых конструкций резонаторов. В работе [8] приведены экспериментальные данные по добротности для различных конструкций резонаторов. Влияние этого эффекта значительно зависит от конструкции резонатора. У сложных конструкций резонаторов может быть хуже теплоотвод, что является причиной уменьшения добротности. При колебании резонаторов они нагреваются. Из данных табл.3 видно, что у первого и второго типов конструкций энергия колебаний теряется больше. У третьего и четвертого типов добротность больше, чем у других, потери энергии меньше, поэтому эти конструкции резонаторов наиболее подходят для частотных акселерометров. Также из табл.3 видно, что при использовании кремния с ориентацией <100> резонатор имеет наиболее высокую добротность и наименьшую собственную частоту колебаний.

Остаточное напряжение. Часто остаточное напряжение возникает в результате изменения температуры или в результате различия коэффициентов термического расширения материалов чувствительного элемента и основной платы, выполненной, например, из стекла. Оно может появиться у резонаторов при напылении тонкопленочных покрытий. При этом температура меняется от 605 до 25 °С [6].

Для большинства изделий микроэлектроники, МСТ, МЭМС остаточное напряжение влияет на надежность и динамические характеристики приборов на их основе. При изготовлении этих изделий широко используются технологические процессы химического осаждения пленок из газовой среды (Chemical Vapor Deposition), осаждения их из паров в вакууме (Physical Vapor Deposition). Остаточное напряжение при осаждении возникает в результате изменения микроструктуры осажденного материала из-за несоответствия материалов по КТР и другим причинам. Если остаточное напряжение возникает неравномерно по поверхности резонатора (по причине различия физико-химических свойств поверхности), то из-за этого резонатор может отклоняться в ту или иную сторону после изготовления [9].

При изготовлении изделия в результате изменения температуры частота резонатора, у которого четыре консольные балки работают как пружины, выражается следующим уравнением [6,10]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4Et b^3}{mL^3} + \frac{24\sigma_r h b}{5mL}}. \quad (4)$$

Здесь m – инерционная масса; L – длина; b – ширина; h – толщина каждой консольной балки. Остаточное напряжение в каждой консольной балке

$$\sigma_r = \left(\frac{E}{1-\nu} \right) \epsilon, \quad (5)$$

где $\varepsilon = \alpha\Delta T$; α – коэффициент термического расширения материала; ν – коэффициент Пуассона; ΔT – разница между рабочей температурой и обычной температурой окружающей среды.

В работе проведено моделирование изменений собственных частот четырех типов конструкций резонаторов в результате наличия в них остаточного напряжения с учетом кристаллографической ориентации кремния, использованного для изготовления резонатора. Результаты моделирования представлены в табл.4. Из данных таблицы видно, что собственная частота исследованных типов конструкций резонаторов существенно возрастает с увеличением остаточного напряжения в их структурах.

Результаты моделирования – значения собственной частоты резонаторов исследованных конструкций в зависимости от величины остаточного напряжения – представлены в табл.4.

Таблица 4

**Расчетные значения собственной частоты резонаторов из кремния
разной кристаллографической ориентации с учетом остаточного напряжения**

Table 4

**The calculated values of the natural frequency of resonators from different
crystallographic orientation of silicon with considering of the residual stress**

Типы конструкций резонаторов	Кристаллографическая ориентация кремния	Остаточное напряжение σ , МПа					
		0	20	30	40	50	60
Первый (см. рис.1,а)	<100>	99,76	129,41	141,71	152,92	163,28	172,95
	<110>	113,56	147,15	161,08	173,79	185,52	196,48
	<111>	119,71	145,94	157,26	167,75	177,54	186,77
Второй (см. рис.1,б)	<100>	100,18	130,18	142,61	153,93	164,39	174,15
	<110>	114,02	148,00	162,08	174,91	186,76	197,82
	<111>	120,21	146,76	158,21	168,80	178,70	188,02
Третий (см. рис.1,в)	<100>	99,82	129,99	142,47	153,84	164,34	174,13
	<110>	113,63	147,94	162,14	175,06	187,00	198,13
	<111>	119,78	146,49	158,00	168,64	178,58	187,94
Четвертый (см. рис.1,г)	<100>	100,19	130,61	143,20	154,64	165,21	175,07
	<110>	114,03	148,64	162,95	175,97	187,98	199,19
	<111>	120,22	147,17	158,77	169,49	179,50	188,92

Обсуждение результатов. В результате исследования получены сравнительные данные по собственной частоте и добротности четырех характерных типов конструкций балочных резонаторов (см. табл.3), у третьего и четвертого типов добротность наибольшая. Кроме того, при использовании для изготовления резонаторов кремния с ориентацией <100> достигаются более высокая добротность и наименьшая собственная частота колебаний.

При сравнении отдельных конструкций можно отметить, что для первого типа конструкции имеет место несколько меньшее изменение собственной частоты с ростом остаточного напряжения. Кроме того, резонатор из кремния ориентации <111> имеет наименьшую динамику изменения собственной частоты с ростом остаточного напряжения в структуре резонатора. Резонаторы, изготовленные из кремниевых пластин с ориентацией <100>, имеют минимальные резонансные частоты, а изготовленные из пластин с ориентацией <110> – наибольшие.

Важно также учитывать влияние кристаллографической ориентации поверхности используемых для изготовления резонаторов кремниевых пластин на параметры резонаторов. Установлено, что существенное влияние на величину изменения собственной

частоты колебаний Δf_0 резонаторов имеет кристаллографическая ориентация использованных для их изготовления пластин кремния (см. табл.2). Наибольшее изменение Δf_0 резонатора при воздействии растягивающей силы имеет место для резонаторов из кремниевых пластин с ориентацией $\langle 100 \rangle$, они наиболее перспективны для достижения высокой чувствительности частотного микроакселерометра.

Собственная частота всех исследованных конструкций резонаторов существенно возрастает с ростом остаточного напряжения в их структурах. Полученные данные свидетельствуют о необходимости учета величины остаточного напряжения, возникающего в структуре резонатора, на его параметры и разработки мер по уменьшению величины этого напряжения и его контроля.

Наличие отработанной технологии изготовления, обеспечивающей воспроизводимое низкое значение остаточного напряжения в структуре резонатора, позволит повысить технологическую воспроизводимость параметров частотных микроакселерометров.

Заключение. В настоящей работе исследования выполнены для четырех характерных конструкций балочных резонаторов, которые находят применение в современных МЭМС, в частности в частотных микроакселерометрах. В работах [3, 8] приведены лишь примеры типовых расчетов добротности с учетом термоупругого демпфирования. В [5] рассмотрены четыре типа конструкций балочных резонаторов, но авторами исследовано только изменение собственной частоты f_0 под действием механической силы.

Исследования показали, что воздействие внешней механической силы на резонаторы приводит к изменению их собственной частоты колебаний f_0 . Выяснено, что на значение Δf_0 оказывает влияние кристаллографическая ориентация кремния, из которого выполнены резонаторы. При $\Delta f_0 = 1,69$ кГц и ориентации кремния $\langle 100 \rangle$ изменение максимальное, при $\Delta f_0 = 1,41$ кГц и ориентации кремния $\langle 111 \rangle$ – минимальное. Рост остаточного механического напряжения приводит к повышению собственной частоты колебаний резонаторов. Величина относительного изменения собственной частоты колебаний $\Delta f_0/f_0$ для рассмотренных конструкций резонаторов отличается незначительно. Однако на него заметно влияет кристаллографическая ориентация кремния – материала резонаторов. При остаточном напряжении 60 МПа $\Delta f_0/f_0$ составляет 0,734 для ориентации $\langle 100 \rangle$, 0,730 для ориентации $\langle 110 \rangle$ и 0,560 для ориентации $\langle 111 \rangle$, т. е. в последнем случае относительное изменение собственной частоты колебаний резонатора минимально.

Полученные результаты являются новыми, и предполагается их использование в реальных конструкциях разрабатываемых МЭМС-приборов. Отметим, что резонатор – это конструктив, определяющий качество функционирования частотного микроакселерометра, на его работу влияет множество факторов, внешних и внутренних, учет которых необходим при разработке подобных приборов высокого качества.

Литература

1. Тимошенко С., Бойко А., Симонов Б. Чувствительные элементы МЭМС: технология определяет параметры // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2008. – № 1. – С. 80–82.
2. Балансировка кремниевых датчиков угловой скорости в процессе изготовления / С.П. Тимошенко, Б.М. Симонов, О.М. Бритков и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2015. – Т. 20. – № 1. – С. 58–67.
3. Dileesh V.P., Salil S.K., Dnyanesh N.P. Analytical and numerical solutions for thick beams with thermoelastic damping // International J. of Mechanical Sciences. – 2015. – Vol. 94–95. – P. 1–26.
4. Weibin Z. Energy dissipation in MEMS resonators: fluid damping of flexural resonators and thermoelastic damping: Diss. Doct. of Phil. – Santa Barbara: University of California, 2006. – P. 1–143.
5. Jing L., Shangchun F., Zhanshe G. Design and analysis of silicon resonant accelerometer // Research J. of Applied Sciences, Engineering and Technology. – 2013. – Vol. 5. – No. 3. – P. 970–940.
6. 1998-2015 COMSOL, «MEMS Module Application Library Manual,» Version: COMSOL 5.2.
7. Design and implementation of a micromechanical silicon resonator accelerometer / H. Libin, Y. Hui, G. Yaung et al. // Sensor. – 2013. – Vol. 13. – P. 15785–15804.

8. Amy D., Rob N.C., Thomas W.K., Mathew V. Engineering MEMS resonators with low thermoelastic damping // J. of Microelectromechanical Systems. – 2006. – Vol. 15. – P. 1437–1445.
9. Kuo-Shen C. Techniques in residual stress measurement for MEMS and their applications. – Tainan, Taiwan, 2005. – P. 264–338.
10. Mohamed G.H. The MEMS handbook. – London: CRC Press, 2002. – P. 1–1332.

Поступила 15.02.2017 г.; принята к публикации 09.11.2017 г.

Аунг Тхура – аспирант Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), aungthura87@gmail.com

Симонов Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), serborsel@mail.ru

Тимошенко Сергей Петрович – доктор технических наук, профессор, директор Института нано- и микросистемной техники Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), spt@mail.ru

References

1. Timoshenkov S., Vojko A., Simonov B., Chuvstvitel'nye elementy MEMS: tekhnologiya opredelyaet parametry [Sensitive elements of MEMS: technology determines the parameters]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 2008, no. 1, pp. 80–82. (In Russian).
2. Timoshenkov S.P., Simonov B.M., Britkov O.M., Anchutin S.A., Timoshenkov A.S. Balansirovka kremnievyyh datchikov uglovoj skorosti v processe izgotovleniya [Balancing of silicon angular velocity sensors in the manufacturing process]. *Izvestiya vuzov. Elektronika – Proceedings of Universities. Electronics*, vol.20, no.1, 2015, pp.58–67. (In Russian).
3. Dileesh V.P., Salil S.K., Dnyanesh N.P. Analytical and numerical solutions for thick beams with thermoelastic damping. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, pp.1–26.
4. Weibin Z. *Energy dissipation in MEMS resonators: fluid damping of flexural resonators and thermoelastic damping*. University of California, Santa Barbara, 2006, pp.1–143.
5. Jing L., Shangchun F., Zhanshe G. Design and analysis of silicon resonant accelerometer. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2013, pp. 970–940.
6. 1998-2015 COMSOL. «MEMS Module Application Library Manual». Version: COMSOL 5.2.
7. Libin H., Hui Y., Yang G., Liye Z., Jinxing L. Design and Implementation of a Micromechanical Silicon Resonator Accelerometer. *Sensor*, 2013, no. 13, pp. 15785–15804.
8. Amy D., Rob N.C., Thomas.W.K., Mathew V. Engineering MEMS Resonators With Low Thermoelastic Damping. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2006, vol. 15, pp. 1437–1445.
9. Kuo-Shen C. *Techniques in residual stress measurement for MEMS and their applications*. Department of Mechanical Engineering, National Cheng-Kung University, Tainan, Taiwan, 70101, R.O.C, 2005, pp. 264–338.
10. Mohamed G.H. *The MEMS Handbook*. University of Notre Dame, CRC Press, London, 2002, pp. 1–1332.

Submitted 15.02.2017; accepted 09.11.2017.

Aung Thura – PhD student of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), aungthura87@gmail.com

Simonov Boris M. – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), serborsel@mail.ru

Timoshenkov Sergey P. – Dr. Sci. (Eng.), Prof., head of the Institute of Nano- and Microsystem Technology, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), spt@mail.ru