

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1067-1079

УДК 534-16

Оптимизации конструкции резонансно-частотного МЭМС датчика давления на основе численного моделирования

Сергей Евгеньевич Вторушин¹✉, Алёна Алексеевна Таловская²,
Евгений Сергеевич Барбин³, Иван Владимирович Кулинич⁴,
Мария Сергеевна Вайсбеккер⁵

^{1,2,3,4,5} Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация

³ Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация

¹ sergei.e.vtorushin@tusur.ru✉, <https://orcid.org/0009-0008-9407-9552>

² alena.a.talovskaia@tusur.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6796-1135>

³ bar_es@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5904-0216>

⁴ kulinich@tusur.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0768-3495>

⁵ mariya_vaisbekker@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1078-4649>

Аннотация

Введение. Кремниевые микроэлектромеханические датчики давления резонансно-частотного типа выделяются высокой линейностью и стабильностью выходных характеристик, что делает их особенно перспективными для прецизионных измерений. Представлено исследование влияния геометрии и напряженно-деформированного состояния мембран на чувствительность резонансно-частотных датчиков давления, а также разработка рекомендаций по оптимальному размещению резонаторов и выбору технологического маршрута формирования мембран. **Метод.** С использованием трехмерных моделей мембран различных геометрических форм выполнено численное моделирование их напряженно-деформированного состояния под действием статического давления с помощью метода конечных элементов. Метод позволяет выявить зоны локализации деформаций, наиболее подходящие для размещения резонаторов. Для изготовления тестовых образцов кремниевых мембран применено жидкостное травление с предварительным утонением пластин и последующей финишной механической обработкой. **Основные результаты.** Показано, что максимальная чувствительность достигается при позиционировании резонатора в зонах пиковых растягивающих и сжимающих напряжений. Проведен анализ зависимости формы мембраны на распределение напряжений и отклик резонатора, что позволило выявить оптимальные места расположения резонатора с точки зрения технологических допусков и чувствительности. Выполнено сравнение методов подготовки мембраны: химическое и механическое утонение с последующей полировкой. На основании проведенных измерений параметров шероховатости для мембран, изготовленных разными методами, описана более оптимальная технология их подготовки. **Обсуждение.** Полученные результаты позволяют оптимизировать геометрию и технологический процесс изготовления резонансно-частотного датчика давления, что способствует повышению чувствительности, расширению технологических допусков, снижению затрат на производство и повышению надежности устройств в промышленной эксплуатации.

Ключевые слова

мембрана, резонатор, механические напряжения, чувствительность, травление, шероховатость

Благодарности

Результаты исследований получены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FEWM-2024-0008) (численное моделирование, расчет допусков).

Работа выполнена в рамках программы развития Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники на 2025–2036 годы программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (механическое утонение мембраны).

Ссылка для цитирования: Вторушин С.Е., Таловская А.А., Барбин Е.С., Кулинич И.В., Вайсбеккер М.С. Оптимизации конструкции резонансно-частотного МЭМС датчика давления на основе численного моделирования // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 6. С. 1067–1079. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1067-1079

Optimization of the resonant frequency MEMS pressure sensor based on numerical simulation

Sergey E. Vtorushin^{1✉}, Alena A. Talovskaia², Evgenii S. Barbin³, Ivan V. Kulinich⁴, Mariya S. Vaisbekker⁵

^{1,2,3,4,5} Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation

³ V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, RAS, Siberian Branch, Tomsk, 634055, Russian Federation

¹ sergei.e.vtorushin@tusur.ru✉, <https://orcid.org/0009-0008-9407-9552>

² alena.a.talovskaia@tusur.ru, <https://orcid.org/0009-0001-6796-1135>

³ bar_es@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5904-0216>

⁴ kulinich@tusur.ru, <https://orcid.org/0009-0001-0768-3495>

⁵ mariya_vaisbekker@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-1078-4649>

Abstract

Silicon microelectromechanical pressure sensors of the resonant-frequency type are distinguished by high linearity and stability of their output characteristics, making them particularly promising for precision measurements. This paper presents a study of the influence of membrane geometry and stress-strain state on the sensitivity of resonant-frequency pressure sensors. Recommendations for optimal resonator placement and the selection of a process route for membrane formation are also developed. Using three-dimensional models of membranes of various geometric shapes, numerical simulation of their stress-strain state under static pressure was performed using the finite element method. This method allowed us to identify the zones of localized deformation most suitable for resonator placement. Wet etching with preliminary wafer thinning and subsequent finishing machining was used to fabricate test samples of silicon membranes. It is shown that maximum sensitivity is achieved by positioning the resonator in zones of peak tensile and compressive stresses. An analysis of the membrane shape relationship to stress distribution and resonator response was conducted, enabling the identification of optimal resonator locations in terms of manufacturing tolerances and sensitivity. Membrane preparation methods were compared: chemical and mechanical thinning followed by polishing. Based on roughness measurements for membranes manufactured using different methods, the optimal preparation technology was described. The obtained results enable optimization of the geometry and manufacturing process of the resonant-frequency pressure sensor, which contributes to increased sensitivity, wider manufacturing tolerances, reduced production costs, and improved reliability in industrial operation.

Keywords

membrane, resonator, mechanical stress, sensitivity, etching, roughness

Acknowledgements

The results were obtained within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FEWM-2024-0008) (numerical modeling, tolerance calculation).

This project was executed within the scope of the TUSUR Development Program for 2025-2036, as part of the Strategic Academic Leadership Program, “Priority 2030” (mechanical thinning of the membrane).

For citation: Vtorushin S.E., Talovskaia A.A., Barbin E.S., Kulinich I.V., Vaisbekker M.S. Optimization of the resonant frequency MEMS pressure sensor based on numerical simulation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 6, pp. 1067–1079 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-6-1067-1079

Введение

Микроэлектромеханические (МЭМС) датчики давления находят широкое применение в промышленности, энергетике и нефтегазовом секторе. Особое место среди них занимают резонансно-частотные датчики давления. В отличие от емкостных и тензорезистивных, резонансно-частотные датчики давления обладают высокой стабильностью, практически полным отсутствием гистерезиса, но при этом имеют более низкую чувствительность [1–5]. Актуальной задачей является повышение чувствительности резонансно-частотного датчика давления путем оптимизации геометрии их чувствительного элемента, совершенствованием технологических процессов, проектирования схемотехнических и алгоритмических методов обработки первичной информации и других. Особое внимание

уделяется вопросам технологических погрешностей изготовления, так как эти ошибки могут существенно снижать чувствительность датчика [6].

На сегодняшний день известно достаточное количество научных публикаций, связанных с исследованием нагруженных мембран МЭМС датчиков давления и степенью их влияния на чувствительность первичных преобразователей тензорезистивного, емкостного, частотно-резонансного и других типов.

В работах [5, 7–10] представлены результаты по оптимизации геометрии мембран и первичных преобразователей. Представлено решение задачи поиска более оптимальной формы мембраны на основании анализа их напряженно-деформированного состояния, а также поиска наиболее эффективного расположения преобразователей на мембранах. В [5, 7–10] выполнен анализ мембран квадратной и круглой форм, а также

мембраны с модификацией их планарной поверхности путем введения концентраторов напряжений.

В [4, 11–13] приведено подробное описание напряженно-деформированного состояния мембраны МЭМС датчика давления и обобщенные математические модели нагруженных статическим давлением мембран круглой и квадратной форм. Рассмотрены модели, описывающие поведение тензорезистивных преобразователей в зависимости от их расположения на мембране. Полученные математические модели позволяют аналитически достаточно быстро построить картину распределения прогибов и напряжений по поверхности мембран с учетом их геометрических особенностей.

Большинство работ по исследованию геометрии мембран МЭМС датчиков давления, как правило, ограничены двумя-тремя формами и направлены на описание математических моделей нагруженного состояния мембран. В настоящей работе исследован расширенный набор вариантов геометрии мембран с целью определения наиболее подходящей формы для обеспечения не только высокой чувствительности, но и возможности расширения технологических допусков позиционирования резонаторов на мембране. В работе поставлена следующая задача: методами численного моделирования определить степень влияния механического напряжения мембраны на чувствительность резонансно-частотного преобразователя в зависимости от геометрии мембраны и места его расположения. Метод конечных элементов, который относится к численным методам, в значительной степени сокращает время расчета, обеспечивая при этом высокую точность.

Актуальность темы данной работы подтверждается объемом мировых научных публикаций в области разработки МЭМС датчиков давления, где задачи повышения чувствительности и снижения технологических погрешностей остаются ключевыми задачами при проектировании МЭМС. Новизна настоящей работы основана на анализе работ по схожей тематике, в которых недостаточно уделено внимание оценке возможных погрешностей расположения первичного преобразователя и как эта погрешность влияет на точность чувствительного элемента датчика. При формировании резонаторов рассовмещение топологий может достигать десятков микрометров в зависимости от используемого оборудования. Это приводит к ошибкам позиционирования первичного преобразователя на мембране и снижению его чувствительности.

Проведенные исследования позволяют определить наиболее эффективное расположение резонатора на мембране на основе анализа градиента напряжений в мембранах. Наиболее эффективным расположением будет считаться такое, при котором сохраняется высокая чувствительность и при этом будут расширены допуски технологических процессов совмещения топологий при формировании резонатора.

Описание модели и метода исследования

В качестве предмета исследования выбрана трехмерная модель кристалла квадратной формы с размерами сторон 3 мм и толщиной 500 мкм. В кристал-

ле сформирована мембрана определенной геометрии площадью 1,96 мм² и толщиной 110 мкм. На плоской стороне мембраны расположен резонатор, представляющий из себя балку длиной 100 мкм с площадью сечения 0,5 мкм². Материал модели (мембрана и резонатор) — монокристаллический кремний с ориентацией пластины в направлении (100).

В качестве форм для мембраны выбрано 8 различных форм, три из которых наиболее часто встречающихся в МЭМС датчиках давления [4, 5]: квадратная, круглая, круглая с жестким центром. Также для анализа выбраны 5 дополнительных форм: треугольная, прямоугольная, ромбовидная, эллиптическая, гексагональная. Выбор таких форм обусловлен системным подходом, позволяющим охватить особенности ключевых форм мембран в МЭМС датчиках давления. Предложенные формы мембран позволят оценить характер градиента напряжений в зависимости от количества сторон, соотношения размеров сторон, их ориентации относительно резонатора, плавности контура и других особенностей формы мембраны.

Исследование модели проводилось методом конечных элементов в программе ANSYS. Для определения чувствительности использовался связанный анализ, включающий в себя определение отклика мембраны на статическую нагрузку с дальнейшим расчетом собственных частот и форм колебаний резонатора при нагруженной и ненагруженной мембране. В качестве граничных условий использовалось ограничение трех степеней свободы для основания кристалла. В качестве статической нагрузки на мембрану прикладывалось давление 100 кПа. Такое давление обеспечивает деформацию мембраны в пределах 1 мкм (менее 1 % от ее толщины), а напряжения, возникающие в мембране и резонаторе, не превышают предела прочности кремния с учетом коэффициента запаса по прочности $SF = 2$. При таких условиях имеет место линейный характер и обратимость деформаций, что позволяет руководствоваться линейной теорией упругости. На рис. 1 приведен пример конечно-элементной модели кристалла с резонатором на квадратной мембране.

Принцип работы такого чувствительного элемента основан на частотно-резонансном методе детектирования. При воздействии давления мембрана изгибается, из-за чего резонатор испытывает продольные деформации, и его собственная частота изменяется. При этом смещение собственной частоты резонатора будет пропорционально приложенному давлению к мембране.

Исследование напряженного состояния нагруженных мембран

В процессе исследования образцов мембран различных форм резонатор располагался на их поверхностях сначала в центре, затем перемещался на шаг 2 мкм в направлении периферии мембраны. В каждой точке расположения резонатора рассчитывалась его чувствительность, а также строился график напряжений на мембране вдоль этого направления.

Для резонатора чувствительность определяется по сдвигу собственной частоты, возникающему при появ-

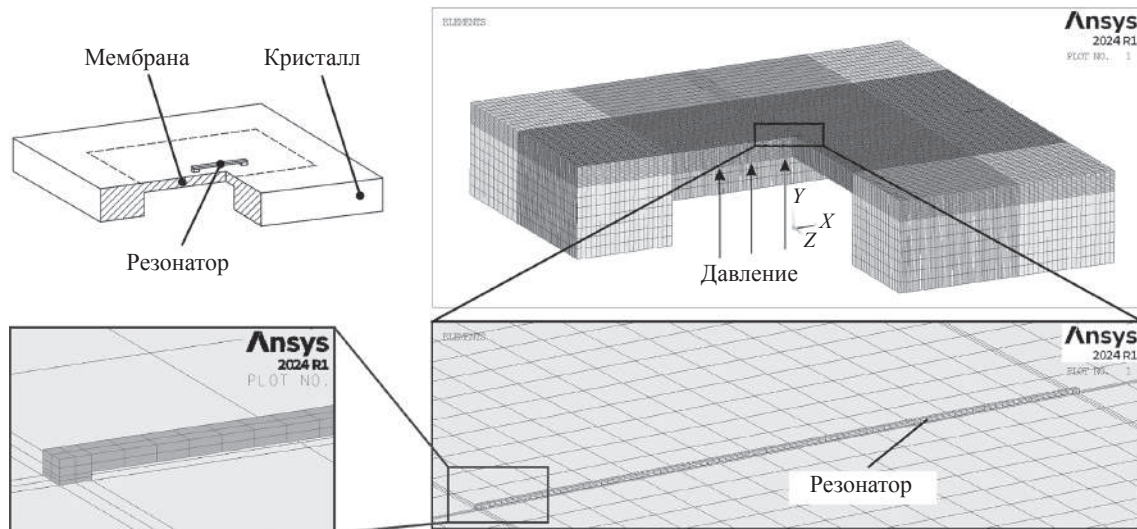


Рис. 1. Конечно-элементная модель мембраны квадратной формы

Fig. 1. Finite-element model of the square membrane

лении в них механических напряжений. Эти напряжения образуются в резонаторах в результате деформации мембраны под действием внешнего измеряемого давления. Смещение собственной частоты основного тона резонатора имеет вид

$$f = f_0 \sqrt{1 \pm \frac{\sigma}{\sigma_c}},$$

где f_0 — собственная частота резонатора при отсутствии напряжений; σ — напряжения в резонаторе; σ_c — критические напряжения, приводящие резонатор к потере устойчивости [14].

Согласно данному выражению, добиться максимального смещения собственной частоты можно, обеспечив накопление максимальных напряжений в резонаторе. Так как деформации от мембраны передаются на резонатор, то, чем больше деформации мембраны в зоне его расположения, тем больше деформации в самом резонаторе. Именно поэтому важно иметь представление о картине распределения напряжений по мембране. При этом расположение резонатора в зонах пиковых значений механических напряжений может негативно сказываться на чувствительности резонатора из-за технологических погрешностей совмещения топологий при литографии. Картина градиента напряжений на мембране может содержать несколько локальных максимумов, которые могут существенно различаться по характеру их изменения по поверхности мембраны. Для некоторых экстремумов характерен резкий перепад напряжений на малом расстоянии, в то время как для других — плавный спад, создающий обширную область с устойчиво высоким уровнем напряжений.

На основании теории пластин и оболочек, распределение напряжений на мембране такое, что максимальные растягивающие напряжения локализуются в центре мембраны (рис. 2, а: точка с координатой 0), а максимальные сжимающие напряжения — по периферии мембраны (рис. 2, а: локальные экстремумы в

окрестностях координаты, равной 1), что подтверждается результатами конечно-элементного анализа.

На рис. 2 для каждой исследуемой мембраны приведены диаграммы распределения напряжений, а также графики нормальных напряжений вдоль ключевых направлений, представляющих интерес для исследования. В качестве ключевых направлений выбраны радиальные направления от центра к периферии мембран. Радиальное размещение пары резонаторов вдоль этих направлений позволяет реализовать дифференциальное детектирование полезного сигнала с датчика.

Для квадратной мембраны (рис. 2, а) можно выделить два ключевых направления: перпендикулярное одной из сторон мембраны (X -направление) и диагональное (XZ -направление). На графике для квадратной формы мембраны (рис. 2, а) отчетливо видна разница распределения напряжений в зависимости от направления. График распределения напряжений представляет собой нормированную кривую по значениям напряжений и координатам. Началу координат соответствует геометрический центр мембраны, где для симметричных конструкций локализуются максимумы растягивающих напряжений (положительные значения). Нормированная координата, равная единице, соответствует периферии мембраны — область жесткого закрепления. В X -направлении, вблизи области закрепления, концентрируются сжимающие напряжения, характеризующиеся отрицательными значениями. В диагональном направлении (XZ -направление), где нормированной координате, равной 1, соответствует угол мембраны, область сжимающих напряжений имеет более плавный градиент, а сами напряжения меньше по модулю, чем в X -направлении. При этом максимум сжатия смещен от угла к центру.

Похожая тенденция наблюдается и у мембран других геометрических форм. Для многоугольных мембран (рис. 2, а–е) центральная часть характеризуется растягивающими напряжениями, а крутизна графика в этих зонах зависит от выбранного направления. В областях

сжимающих напряжений, направления, перпендикулярные сторонам, демонстрируют более резкий спад напряжений, в то время как диагональные направления имеют меньший градиент, а сами сжимающие напряжения ниже по величине.

Такая картина распределения напряжений позволяет прогнозировать оптимальные зоны размещения резонатора. Для обеспечения высокой чувствительности резонатор следует размещать в радиальных направлениях, перпендикулярных сторонам мембраны,

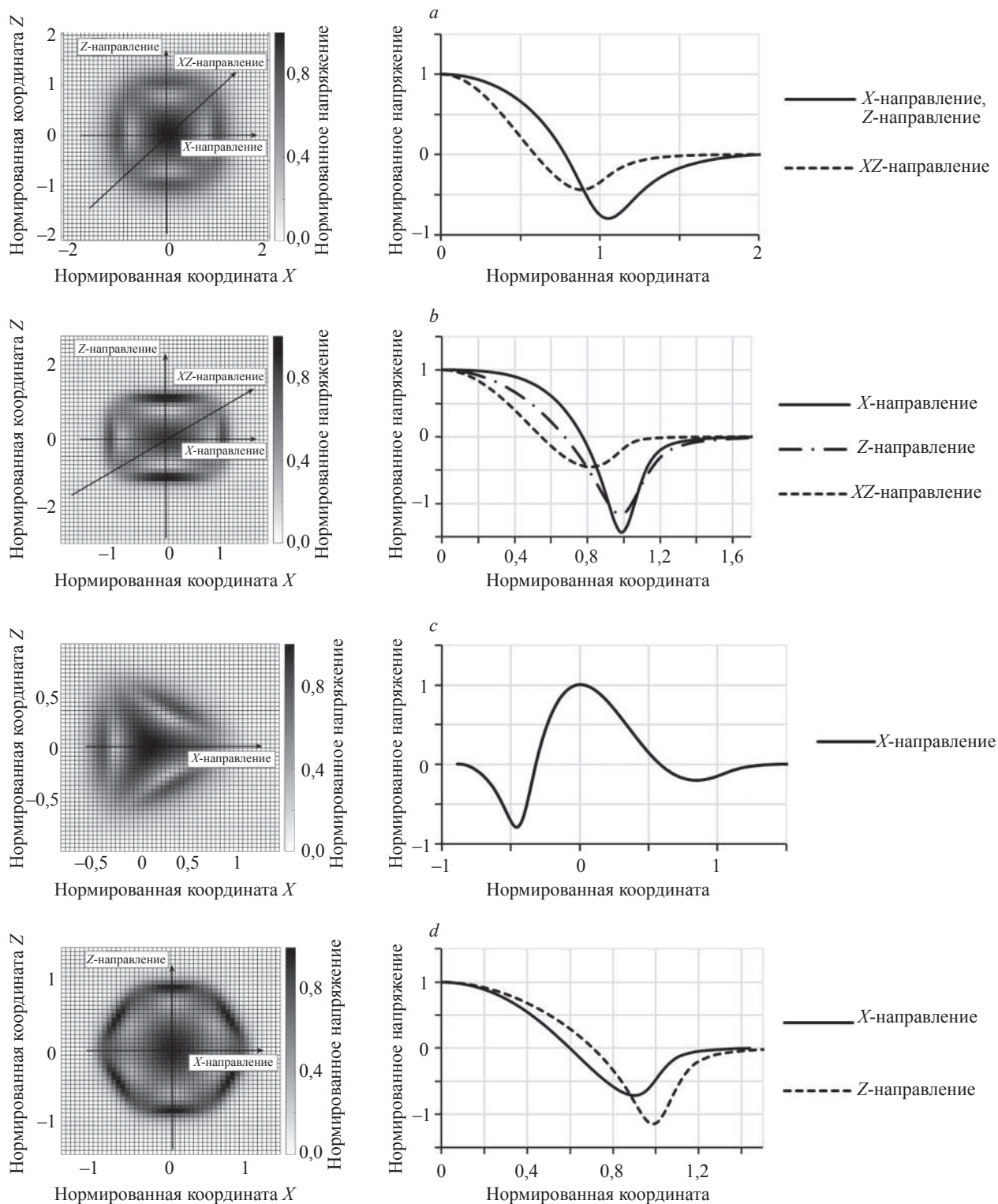


Рис. 2. Диаграммы и графики напряженного состояния мембран различных форм: квадратная (a); прямоугольная (b); треугольная (c); гексагональная (d); ромбовидная (e); эллиптическая (f); круглая (g); круглая с жестким центром (h)

Fig. 2. Pictures and profiles of the stress state of various shapes membranes: square (a); rectangular (b); triangular (c); hexagonal (d); rhomb-shaped (e); elliptical (f); round (g); round with rigid center (h)

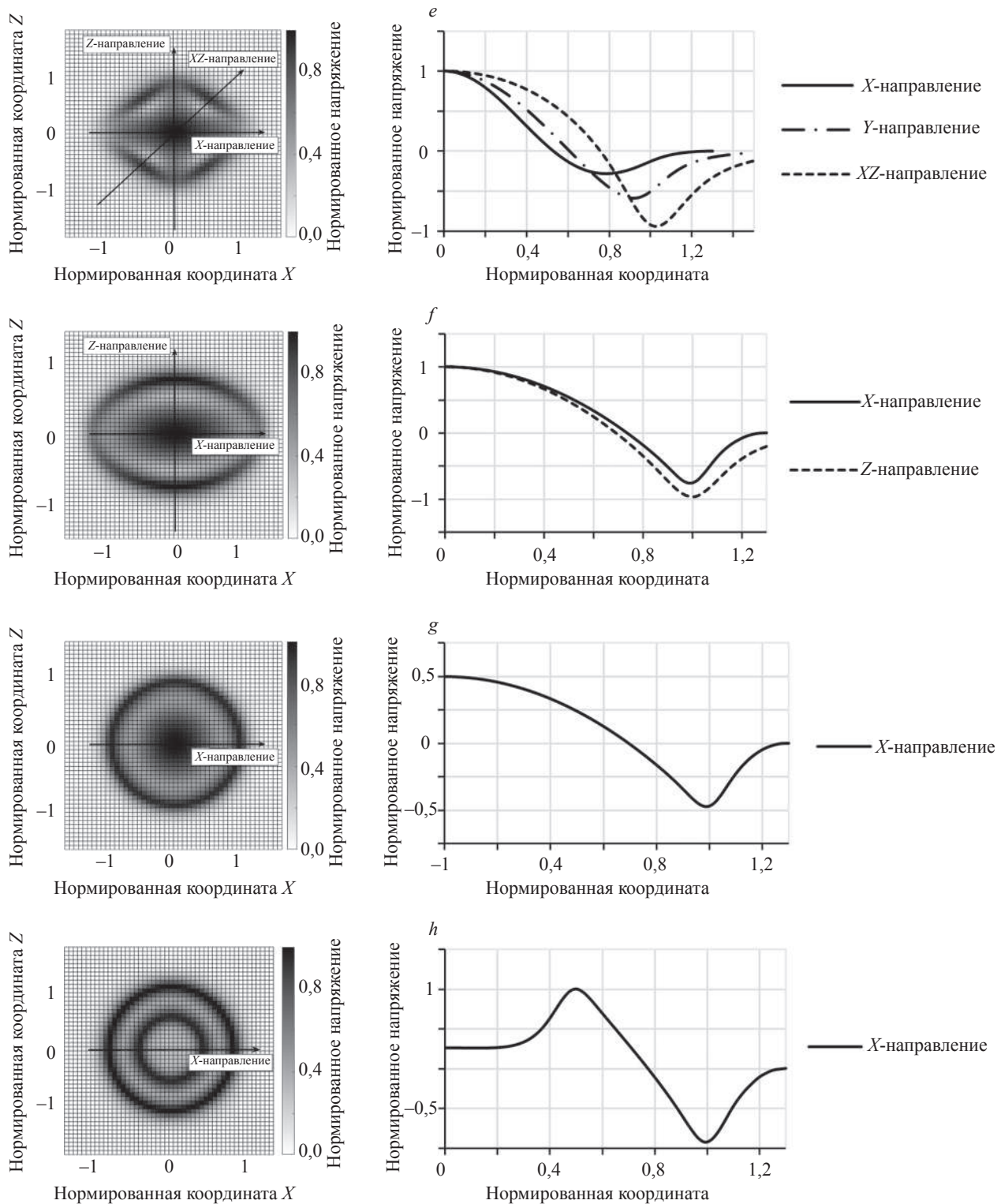


Рис. 2. Продолжение

Fig. 2. Continuation

где напряжения по модулю максимальны. Однако при размещении резонатора на периферии возникают повышенные требования к точности совмещения топологий во время технологического процесса изготовления. Ошибка позиционирования может привести к смещению рисунка топологии резонатора от области максимальных напряжений и, как следствие, к снижению

чувствительности. При размещении резонатора в диагональных направлениях требования к допускам могут быть менее жесткими, поскольку градиент напряжений ниже, и даже при небольшой величине рассовмещения топологий чувствительность остается высокой.

Оценку чувствительности резонатора в зависимости от его расположения вдоль ключевых направле-

ний можно провести путем расчета его собственной частоты в нагруженном и ненагруженном состояниях. Величина чувствительности при этом может быть рассчитана следующим образом:

$$S = \frac{f - f_0}{P},$$

где f_0 — собственная частота ненагруженного резонатора; f — собственная частота резонатора при нагрузке мембраны статическим давлением; P — приложенное статическое давление к мембране.

На рис. 3 представлены кривые чувствительности резонатора в зависимости от его положения на поверхности мембраны.

Графики чувствительности показывают корреляцию величин чувствительности с напряжениями на мембранах. Максимумы напряжений соответствуют максимумам чувствительности, что согласуется с предположениями о размещении резонатора в местах концентрации напряжений на мембране.

На основании полученных данных можно оценить технологические допуски на позиционирование резонатора в зависимости от его расположения на мембране

и формы мембраны. Такую оценку можно сделать на основании критерия максимально допустимого спада чувствительности. Критической величиной спада чувствительности можно считать величину температурного дрейфа датчика, который, как правило, составляет 1–10 % от чувствительности датчика к давлению [15–18]. Критический спад чувствительности, используемый для расчета допусков, целесообразно устанавливать на уровне фундаментальных погрешностей датчика, таких как температурный дрейф. Это позволяет гарантировать, что производственный разброс не станет доминирующим источником погрешности. Исходя из этого, можно определить границы технологического допуска на позиционирование резонатора, в пределах которого спад чувствительности по давлению не будет превышать 10 %. В соответствии с рис. 3 рассчитаны величины допустимых погрешностей для некоторых вариантов мембран при двух вариантах критической величины спада чувствительности: 1 % и 10 % (табл. 1).

На основании полученных результатов (табл. 1) и графиков чувствительности (рис. 3) можно сделать вывод, что допуски на совмещение топологий будут тем шире, чем плавнее градиент механических напряжений в окрестностях планируемого расположе-

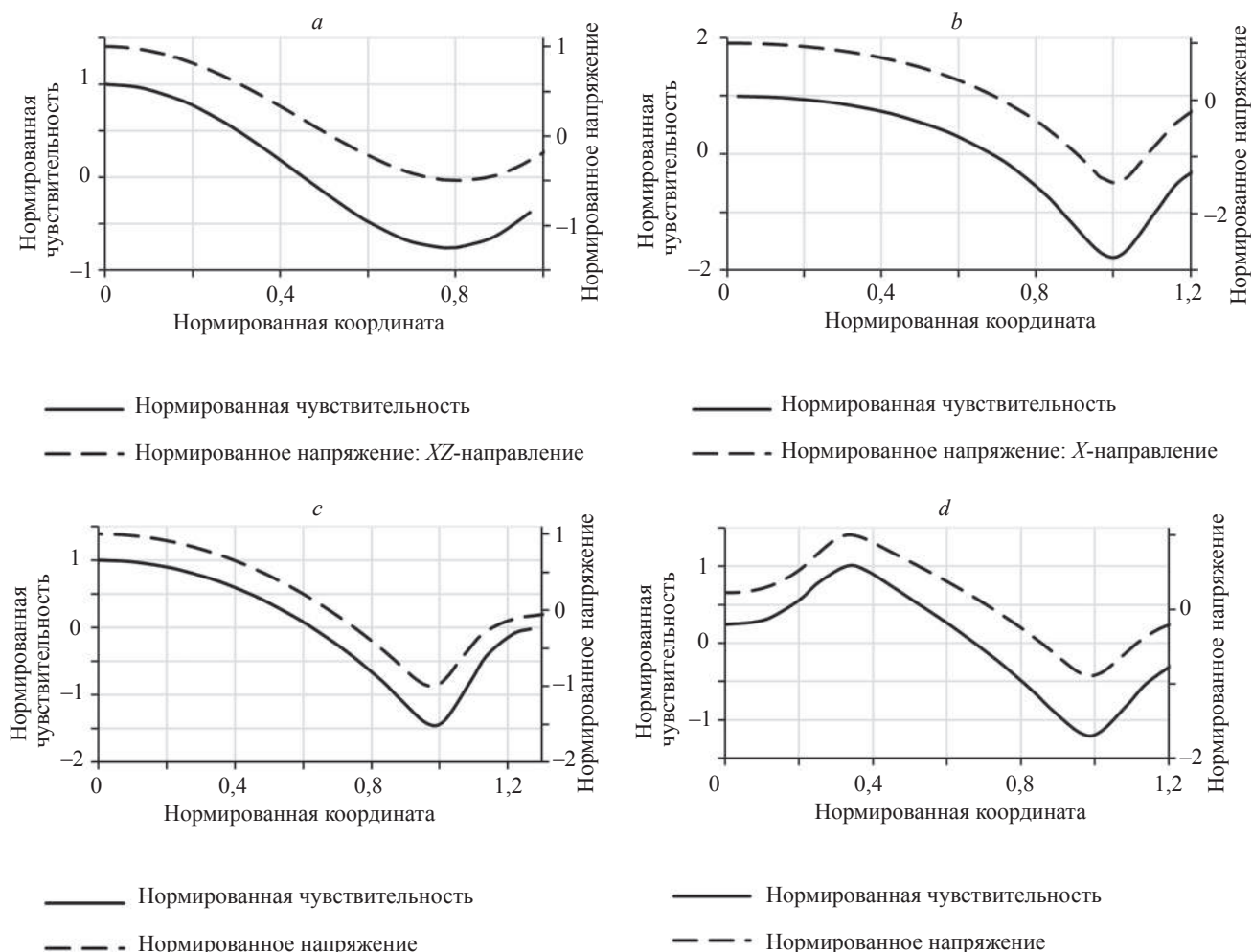


Рис. 3. Графики чувствительности для мембран: квадратной формы (XZ-направление) (a); квадратной формы (X-направление) (b); круглой (c); круглой с жестким центром (d)

Fig. 3. Sensitivity diagrams for membranes: square XZ-direction (a), square X-direction (b), round (c), round with a rigid center (d)

Таблица 1. Сравнительная таблица характеристик чувствительного элемента

Table 1. Comparison table of the sensitive element characteristics

Параметр	Форма мембраны							
	Квадратная, 1,4 × 1,4 мм (X-направление)		Квадратная, 1,4 × 1,4 мм (XZ-направление)		Круглая, R = 0,7898 мм		Круглая с жестким центром, R ₁ = 0,5 мм, R = 0,7898 мм	
Критическая величина спада чувствительности, %	1	10	1	10	1	10	1	10
Технологический допуск (центральное расположение), мкм	±40,3	±177,5	±29,9	±127,4	±39,1	±155,9	±14,6	±45,0
Технологический допуск (краевое расположение), мкм	±11,9	±37,8	±26,5	±84,8	±13,0	±42,2	±13,8	±45,0
Абсолютная чувствительность (центральное расположение), Гц/кПа	144,5		144,3		159,4		169,3	
Абсолютная чувствительность (краевое расположение), Гц/кПа	255,2		109,2		226,9		198,2	

Примечание. R — внешний радиус круглой мембраны и мембраны с жестким центром, R₁ — радиус жесткого центра.

ния резонатора. Например, для квадратной мембраны (1,4 × 1,4 мм) при критическом спаде чувствительности в 1 %, допустимое смещение резонатора в центральной зоне при его ориентации вдоль X-направления составляет ±40,3 мкм, в то время как при ориентации в XZ-направлении — ±29,9 мкм. В случае размещения резонатора на периферии мембраны допуски шире при ориентации резонатора в XZ-направлении: ±26,5 мкм по сравнению с ±11,9 мкм в X-направлении. В то же время краевое расположение резонатора характеризуется заметно более высоким уровнем чувствительности 255,2 Гц/Па при ориентации вдоль X-направления в сравнении с 109,2 Гц/Па при ориентации вдоль XZ-направления.

Круглая мембрана, как показали расчеты, является наиболее технологичной. Ее центральная зона характеризуется высокими допусками (±155,9 мкм), что снимает проблему ориентации резонатора по причине симметрии напряжений вдоль любого радиального направления. Однако при периферийном размещении допуски резко снижаются (±42,2 мкм), становясь сравнимыми с наихудшими случаями для других форм мембран.

Результаты изготовления тестовых образцов

Для формирования мембраны резонансно-частотного датчика давления была выбрана квадратная форма с диагональным расположением резонаторов. Технологически такая конструкция мембраны может быть изготовлена целиком из кремния методами жидкостного или, например, плазменного травления. Резонаторы изготавливаются также из кремния или другого материала методами электронно-лучевого испарения. Основной технологической операцией при производстве такой мембраны является создание упругой области на кристалле кремния. В отличие от плазмохимического травления, жидкостные травители обладают большей доступностью, обеспечивают селективность при анизотропном травлении кремния ориентации

(100), а также являются более экономически эффективными при обработке на значительную глубину.

В качестве маски для жидкостного травления применен оксид кремния толщиной 0,5 мкм, сформированный в атмосфере сухого кислорода [19]. В качестве травителя использован тетраметиламмония гидроксид (ТМАГ) [20], который позволяет травить пластину кремния (100) со скоростью до 0,5 мкм/мин при температуре 70 °С. При этом время травления пластины толщиной 450 мкм на глубину 250 мкм составляет 15 ч, что снижает эффективность данного метода. Для оценки возможности ускорения процесса травления было опробовано два подхода:

- повышение температуры травления до 90 °С — увеличивает скорость до 2 мкм/мин, однако снижает селективность, требуя утолщения маски;
- использование травителя на основе гидроксида калия (КОН) — повышает скорость до 8 мкм/мин, сохраняя селективность процесса [21].

Помимо увеличения скорости травления, сокращение времени технологической обработки кремния без ухудшения характеристик устройства может быть достигнуто за счет предварительного утонения кремниевой пластины.

Для утонения кремния использовался ультразвуковой метод (УЗМ) в 32 % растворе КОН, что позволило равномерно уменьшить толщину кремниевой подложки без образования крупных дефектов [22, 23]. Время травления при этом составило приблизительно 1,5 ч. Добавление в раствор изопропилового спирта (ИПС) в соотношении 20 % КОН:80 % (H₂O:ИПС = 4:1) привело к увеличению продолжительности травления и визуальному повышению шероховатости поверхности (рис. 4).

Оценка качества подготовленной поверхности проводилась с использованием сканирующего электронного микроскопа Raith 150. Наилучших результатов с точки зрения однородности и шероховатости полученной поверхности удалось добиться при утонении кремниевой пластины в 32 % растворе КОН с использованием ультразвуковой ванны.

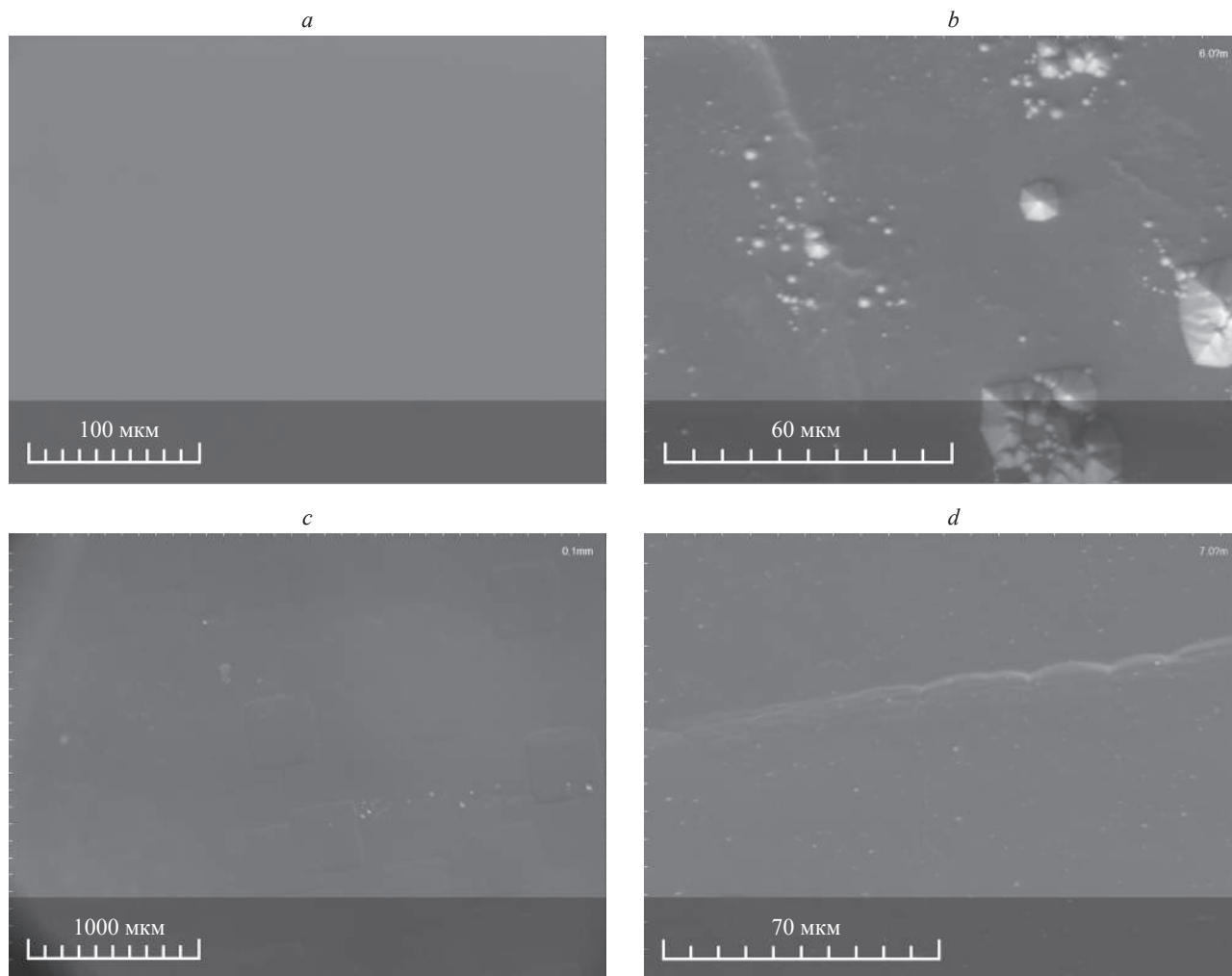


Рис. 4. Фотографии поверхности кремниевой пластины сканирующим электронным микроскопом: до утонения (а), утонение с использованием 32 % KOH (b), утонение с использованием 32 % KOH + УЗМ (с), утонение с использованием 32 % KOH + УЗМ+ ИПС (d)

Fig. 4. Scanning electron microscope photograph of the surface of a silicon wafer: before thinning (a), thinning with 32 % KOH solution (b), thinning with 32 % KOH solution + USB (c), thinning with 32 % KOH solution + USM + IPA (d)

В качестве альтернативных методов утонения применялись механическая обработка на шлифовальном станке и механическое утонение с последующей полировкой. В результате были получены четыре образца мембран на пластинах, обработанных различными способами утонения. Для химического утонения использовались две пластины, одна из которых имела предварительно полированную поверхность (рис. 5).

Пластины после обработки имеют различную шероховатость (Ra) — среднее отклонение от идеальной поверхности, величина которой может существенно влиять на качество формообразования резонаторов на поверхности мембраны. Показатели шероховатости мембран, приведенные в табл. 2, получены с использованием профилометра Profilm 3D.

На основании полученных результатов (табл. 2) можно сделать вывод, что оптимальной технологией

Таблица 2. Параметры шероховатости изготовленных мембран

Table 2. Roughness parameters of manufactured membranes

Метод утонения мембраны	Шероховатость Ra , нм	
	вокруг мембраны	внутри мембраны
Химическое утонение (не полированная пластина)	710	530
Химическое утонение (полированная пластина)	190	210
Механическое утонение	320	580
Механическое утонение с последующей полировкой	2	10

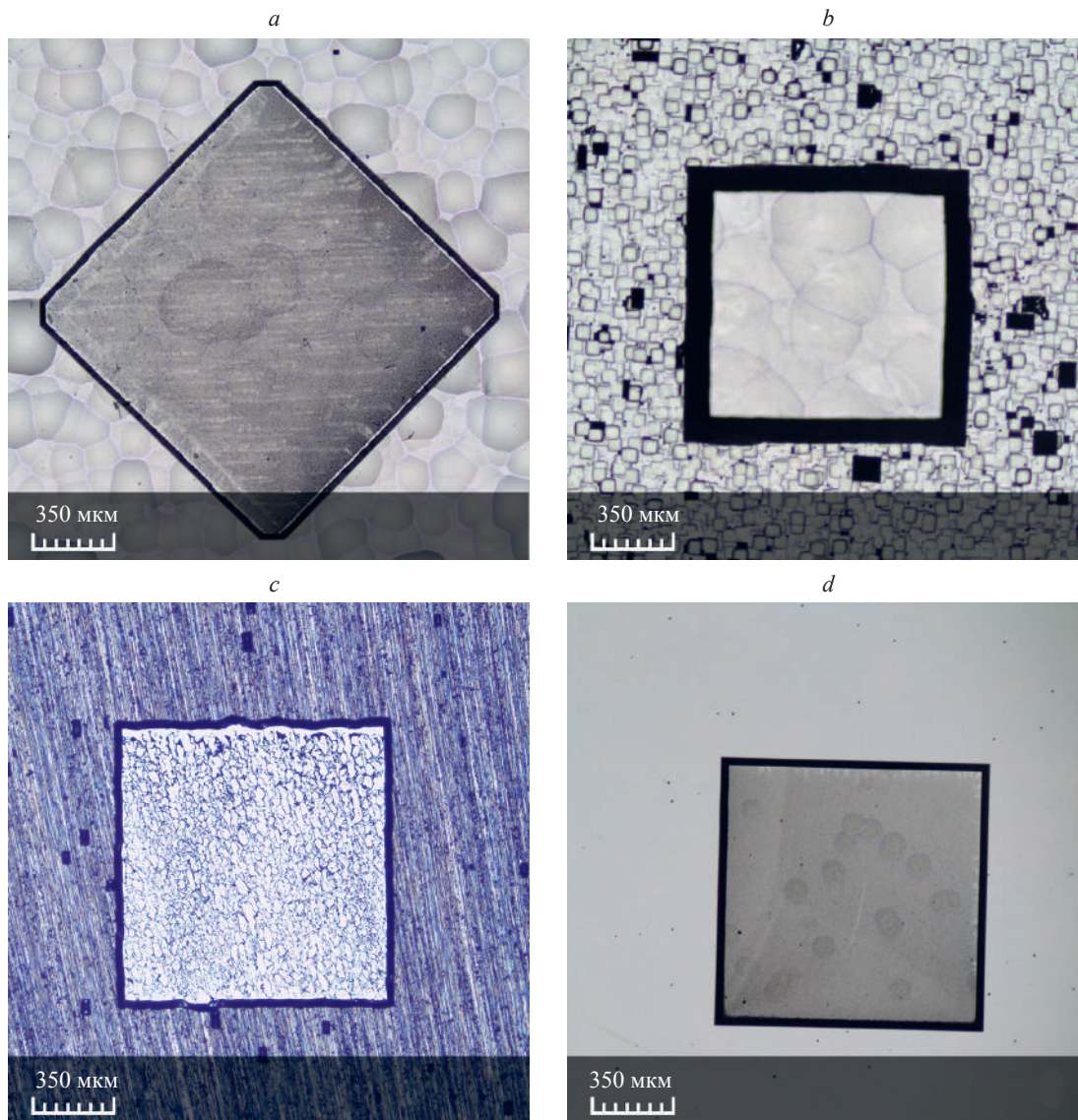


Рис. 5. Образцы мембран резонансно-частотного датчика давления при разных методах утонения: химическое утонение (не полированная пластина) (a); химическое утонение (полированная пластина) (b); механическое утонение (c); механическое утонение с последующей полировкой (d)

Fig. 5. Samples of membranes of a resonant frequency pressure sensor with different thinning methods: chemical thinning (non-polished plate) (a); chemical thinning (polished plate) (b); mechanical thinning (c); mechanical thinning followed by polishing (d)

формирования мембраны является предварительное механическое утонение пластины с последующей полировкой поверхности, а затем химическое травление с использованием ТМАГ через маску из термически окисленного кремния.

Обсуждение результатов

Исследование напряженно-деформированного состояния мембран показало, что зоны с плавным градиентом напряжений демонстрируют существенно более высокие технологические допуски на совмещение топологий при формировании резонатора, но при этом имеют более низкий уровень чувствительности. Количественно это подтверждается данными из табл. 1. Для квадратной формы мембраны при расположении резонатора в центре его целесообразно ориентировать в

X-направлении, при размещении на периферии мембраны — в диагональном XZ-направлении. В случае, если требуются широкие допуски, диагональное направление может быть более выгодным решением, хотя при этом абсолютная чувствительность ниже.

Круглая мембрана и мембрана с жестким центром на периферии имеют высокую крутизну кривой чувствительности, а следовательно, более узкие допуски, что накладывает более жесткие требования на позиционирование резонатора, однако позволяют добиться наивысшей чувствительности в случае расположения резонатора на периферии мембраны.

Анализ графиков напряжений пяти дополнительных форм (треугольная, прямоугольная, гексагональная, ромбовидная, эллиптическая) позволил выявить общую закономерность: наиболее плавные градиенты напряжений, а следовательно, и наиболее широкие

технологические допуски, наблюдаются в зонах резкого изменения геометрии мембраны, а именно — в углах многогранных структур. В таких областях формируются обширные зоны с относительно высоким и плавно меняющимся напряжением, в отличие от остроконечных экстремумов вдоль прямых сторон. Для данных форм мембран рекомендации по расположению резонаторов будут аналогичны трем предыдущим формам (квадратная, круглая, круглая с жестким центром).

Для реализации опытного образца была выбрана квадратная мембрана на основании результатов в табл. 1. В ходе отработки технологии формирования мембраны было установлено, что комбинированный метод, включающий механическое утонение с последующей полировкой и финишным химическим травлением ТМАГ, позволяет получить поверхность с наименьшей шероховатостью. Этот параметр является критическим, так как непосредственно влияет на качество формирования резонатора и его характеристики.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует решающую роль пространственного градиента механических

напряжений, при проектировании микроэлектромеханических датчиков давления. Установлено, что размещение резонатора в зонах с плавным изменением напряжений (например, в окрестностях углов многогранных мембран) позволяет существенно расширить технологические допуски на совмещение топологий при литографии, снизив влияние производственного разброса на чувствительность устройства.

С практической точки зрения, для реализации данного подхода был обоснован выбор мембраны квадратной формы для технологической реализации. Выбранный метод подготовки поверхности мембраны позволит изготавливать образцы чувствительного элемента резонансно-частотного датчика давления с мембранами минимальной шероховатости, что обеспечит больший процент годных образцов после формирования резонаторов на поверхности мембраны.

Результаты исследования с точки зрения практической значимости представляют ценность для инженеров проектировщиков микроэлектромеханических датчиков давления, так как позволяют обеспечить обоснованный подход к проектированию.

Дальнейшие исследования планируется проводить по отработке формообразования резонаторов малой толщины методами плазменного напыления.

Литература

1. Jha C.M., Bahl G., Melamud R., Chandorkar S.A., Hopcroft M.A., Kim B., Agarwal M., Salvia J., Mehta H., Kenny T.W. High resolution microresonator-based digital temperature sensor // *Applied Physics Letters*. 2007. V. 91. N 7. P. 074101 <https://doi.org/10.1063/1.2768629>
2. Кудрявцева Д.А. Использование кремниевого резонатора в резонансных преобразователях давления // Труды международного симпозиума “Надежность и качество.” 2015. Т. 2. С. 118–121.
3. Lu Y., Zhang S., Yan P., Li Y., Yu J., Chen D., Wang J., Xie B., Chen J. Resonant pressure micro sensors based on dual double ended tuning fork resonators // *Micromachines*. 2019. V. 10. N 9. P. 560. <https://doi.org/10.3390/mi10090560>
4. Андреев К.А., Тиняков Ю.Н., Шахнов В.А.. Математические модели гибридных чувствительных элементов датчиков давления // Датчики и системы. 2013. № 9 (172). С. 2–9.
5. Тиняков Ю.Н., Николаева А.С. О расчете мембран датчиков давления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2015. № 6 (105). С. 135–142. <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2015-6-135-142>
6. Clark S.K., Wise K.D. Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors // *Proc. of the IEEE Transactions on Electron Devices*. 1979. V. 26. N 12. P. 1887–1896. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19792>
7. Yu Z., Zhao Y., Li L., Tian B., Li C. Geometry optimization for micro-pressure sensor considering dynamic interference // *Review of Scientific Instruments*. 2014. V. 85. N 9. P. 095002. <https://doi.org/10.1063/1.4895999>
8. Гулиева Д.А., Цыпин Б.В., Кучумов Е.В. Повышение чувствительности струнного первичного преобразователя путем изменения габаритно-массовых характеристик чувствительного элемента // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. N 3 (55). С. 88–97. <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2020-3-9>
9. Munas F.R., Amarasinghe Y.W.R., Kumarage P., Dao D.V., Dau V.T. Design and simulation of MEMS based piezoresistive pressure sensor for microfluidic applications // *Proc. of the Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*. 2018. P. 215–220. <https://doi.org/10.1109/MERCon.2018.8421908>
10. Тун П.В., Симонов Б.М., Тимошенко С.П. Исследование возможностей повышения чувствительности МЭМС-датчика давления емкостного типа с мембранами различных геометрических

References

1. Jha C.M., Bahl G., Melamud R., Chandorkar S.A., Hopcroft M.A., Kim B., Agarwal M., Salvia J., Mehta H., Kenny T.W. High resolution microresonator-based digital temperature sensor. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 91, no. 7, pp. 074101 <https://doi.org/10.1063/1.2768629>
2. Kudriavtseva D.A. Use of silicon resonator in resonant pressure transducers. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, 2015, vol. 2, pp. 118–121. (in Russian)
3. Lu Y., Zhang S., Yan P., Li Y., Yu J., Chen D., Wang J., Xie B., Chen J. Resonant pressure micro sensors based on dual double ended tuning fork resonators. *Micromachines*, 2019, vol. 10, no. 9, pp. 560. <https://doi.org/10.3390/mi10090560>
4. Andreev K.A., Tinyakov Yu.N., Shakhnov V.A. Mathematical models hybrid sensing elements transducers pressure. *Sensors & Systems*, 2013, no. 9 (172), pp. 2–9. (in Russian)
5. Tinyakov Yu.N., Nikolaeva A.S. Computation of pressure sensor membrane. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2015, no. 6 (105). pp. 135–142. (in Russian). <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2015-6-135-142>
6. Clark S.K., Wise K.D. Pressure sensitivity in anisotropically etched thin-diaphragm pressure sensors. *Proc. of the IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, vol. 26, no. 12, pp. 1887–1896. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1979.19792>
7. Yu Z., Zhao Y., Li L., Tian B., Li C. Geometry optimization for micro-pressure sensor considering dynamic interference. *Review of Scientific Instruments*, 2014, vol. 85, no. 9, pp. 095002. <https://doi.org/10.1063/1.4895999>
8. Gulieva D.A., Tsypin B.V., Kuchumov E.V. Increasing of the string primary converter sensitivity by changing the overall and mass characteristics of the sensitive element. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2020, no. 3 (55), pp. 88–97. (in Russian). <https://doi.org/10.21685/2072-3059-2020-3-9>
9. Munas F.R., Amarasinghe Y.W.R., Kumarage P., Dao D.V., Dau V.T. Design and simulation of MEMS based piezoresistive pressure sensor for microfluidic applications. *Proc. of the Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, 2018, pp. 215–220. <https://doi.org/10.1109/MERCon.2018.8421908>
10. Tun P.V., Simonov B.M., Timoshenkov S.P. Investigation of the possibilities of increasing the sensitivity of a capacitive-type MEMS

- форм // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2023. Т. 28. № 2. С. 222–231. <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-222-231>
11. Волков В.С., Франсузов М.В., Рыблова Е.А. Аналитическое и численное моделирование чувствительных элементов полупроводниковых датчиков давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2 (16). С. 110–117.
12. Цибизов П.Н. Чувствительные элементы для микроэлектронных датчиков давления информационно-измерительных систем: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Пенза, 2007. 173 с.
13. Цыпин Б.В., Арискина Е.В., Щипанов В.Д., Ярославцева Д.А., Волков В.С., Баринов И.Н. Моделирование характеристик чувствительных элементов микромеханических датчиков давлений для эксплуатации в особо жестких условиях // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2013. № 2 (4). С. 30–36.
14. Li Y., Lu Y., Xie B., Chen J., Wang J., Chen D. A micromachined resonant differential pressure sensor // IEEE Transactions on Electron Devices. 2020. V. 67. N 2. P. 640–645. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2957880>
15. Lu Y., Yan P., Xiang C., Chen D., Wang J., Xie B., Chen J. A resonant pressure microsensor with the measurement range of 1 MPa based on sensitivities balanced dual resonators // Sensors. 2019. V. 19. N 10. P. 2272. <https://doi.org/10.3390/s19102272>
16. Xiang C., Lu Y., Cheng C., Wang J., Chen D., Chen J. A resonant pressure microsensor with a wide pressure measurement range // Micromachines. 2021. V. 12. N 4. P. 382. <https://doi.org/10.3390/mi12040382>
17. Yan P., Lu Y., Xiang C., Wang J., Chen D., Chen J. A temperature-insensitive resonant pressure micro sensor based on silicon-on-glass vacuum packaging // Sensors. 2019. V. 19. N 18. P. 3866. <https://doi.org/10.3390/s19183866>
18. Harada K., Ikeda K., Kuwayama H., Murayama H. Various applications of resonant pressure sensor chip based on 3-D micromachining // Sensors and Actuators A: Physical. 1999. V. 73. N 3. P. 261–266. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(98\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00245-3)
19. Данилина Т.И., Смирнова К.И., Илюшин В.А., Величко А.А. Процессы Микро- и Нанотехнологии: учебное пособие. Томск: ТУСУР, 2004. 260 с.
20. Sundaram K.B., Vijayakumar A., Subramanian G. Smooth etching of silicon using TMAH and isopropyl alcohol for MEMS applications // Microelectronic Engineering. 2005. V. 77. N 3-4. P. 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2004.11.004>
21. Mitsumori K. Silicon etching // Scientific Wet Process Technology for Innovative LSI/FPD Manufacturing. 2018. P. 252–263. <https://doi.org/10.1201/9781315221076>
22. Pal P., Swarnalatha V., Rao A.V.N., Pandey A.K., Tanaka H., Sato K. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review // Micro and Nano Systems Letters. 2021. V. 9. N 1. P. 4. <https://doi.org/10.1186/s40486-021-00129-0>
23. Yu X., Ye Y., Zhu P., Wu L., Shen R., Zhu C. Wet anisotropic etching characteristics of Si{111} in KOH-based solution // ACS Omega. 2025. V. 10. N 3. P. 2940–2948. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09272>
- pressure sensor with membranes of various geometric shapes. Proceedings of Universities. *Electronics*, 2023, vol. 28, no. 2, pp. 222–231. (in Russian). <https://doi.org/10.24151/1561-5405-2023-28-2-222-231>
11. Volkov V.S., Frantsuzov M.V., Ryblova E.A. Analytical and numerical simulation of semiconductor piezoresistive pressure sensing elements. Measuring. *Monitoring. Management. Control*, 2016, no. 2 (16). pp. 110–117. (in Russian)
12. Tcibizov P.N. *Sensitive Elements for Microelectronic Pressure Sensors in Information-Measuring Systems*. Penza, PNZGU, 2007, 173 p. (in Russian)
13. Tcypin B.V., Ariskina E.V., Shchipanov V.D., Iaroslavtceva D.A., Volkov V.S., Barinov I.N. Simulation of sensing element characteristic for micromechanical pressure sensor for use for heavy duty. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, 2013, no. 2 (4), pp. 30–36. (in Russian)
14. Li Y., Lu Y., Xie B., Chen J., Wang J., Chen D. A micromachined resonant differential pressure sensor. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2020, vol. 67, no. 2, pp. 640–645. <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2957880>
15. Lu Y., Yan P., Xiang C., Chen D., Wang J., Xie B., Chen J. A resonant pressure microsensor with the measurement range of 1 MPa based on sensitivities balanced dual resonators. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 10, pp. 2272. <https://doi.org/10.3390/s19102272>
16. Xiang C., Lu Y., Cheng C., Wang J., Chen D., Chen J. A resonant pressure microsensor with a wide pressure measurement range. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 382. <https://doi.org/10.3390/mi12040382>
17. Yan P., Lu Y., Xiang C., Wang J., Chen D., Chen J. A temperature-insensitive resonant pressure micro sensor based on silicon-on-glass vacuum packaging. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 18, pp. 3866. <https://doi.org/10.3390/s19183866>
18. Harada K., Ikeda K., Kuwayama H., Murayama H. Various applications of resonant pressure sensor chip based on 3-D micromachining. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1999, vol. 73, no. 3, pp. 261–266. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(98\)00245-3](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(98)00245-3)
19. Danilina T.I., Smirnova K.I., Iliushin V.A., Velichko A.A. *Study Guide on Micro- and Nanotechnology Processes*. Tomsk, TUSUR, 2004, 260 p. (in Russian)
20. Sundaram K.B., Vijayakumar A., Subramanian G. Smooth etching of silicon using TMAH and isopropyl alcohol for MEMS applications. *Microelectronic Engineering*, 2005, vol. 77, no. 3-4, pp. 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2004.11.004>
21. Mitsumori K. Silicon etching. *Scientific Wet Process Technology for Innovative LSI/FPD Manufacturing*, 2018, pp. 252–263. <https://doi.org/10.1201/9781315221076>
22. Pal P., Swarnalatha V., Rao A.V.N., Pandey A.K., Tanaka H., Sato K. High speed silicon wet anisotropic etching for applications in bulk micromachining: a review. *Micro and Nano Systems Letters*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 4. <https://doi.org/10.1186/s40486-021-00129-0>
23. Yu X., Ye Y., Zhu P., Wu L., Shen R., Zhu C. Wet anisotropic etching characteristics of Si{111} in KOH-based solution. *ACS Omega*, 2025, vol. 10, no. 3, pp. 2940–2948. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c09272>

Авторы

Вторушин Сергей Евгеньевич — научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 56669651800](https://orcid.org/0009-0008-9407-9552), <https://orcid.org/0009-0008-9407-9552>, sergei.e.vtorushin@tusur.ru

Таловская Алёна Алексеевна — младший научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0001-6796-1135>, alena.a.talovskaia@tusur.ru

Барбин Евгений Сергеевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация; научный сотрудник, Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, 634055, Российская Федерация, [sc 56039318500](https://orcid.org/0000-0001-5904-0216), <https://orcid.org/0000-0001-5904-0216>, bar_es@mail.ru

Authors

Sergey E. Vtorushin — Scientific Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 56669651800](https://orcid.org/0009-0008-9407-9552), <https://orcid.org/0009-0008-9407-9552>, sergei.e.vtorushin@tusur.ru

Alena A. Talovskaia — Junior Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0001-6796-1135>, alena.a.talovskaia@tusur.ru

Evgeniy S. Barbin — PhD, Head of Laboratory, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation; Scientific Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics, [sc 56039318500](https://orcid.org/0000-0001-5904-0216), <https://orcid.org/0000-0001-5904-0216>, bar_es@mail.ru

Кулинич Иван Владимирович — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, [sc 57205437118](https://orcid.org/0009-0001-0768-3495), <https://orcid.org/0009-0001-0768-3495>, kulinich@tusur.ru

Вайсбеккер Мария Сергеевна — доцент, научный сотрудник, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 634050, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0002-1078-4649>, mariya_vaisbekker@mail.ru

Ivan V. Kulinich — PhD, Associate Professor, Senior Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, [sc 57205437118](https://orcid.org/0009-0001-0768-3495), <https://orcid.org/0009-0001-0768-3495>, kulinich@tusur.ru

Mariya S. Vaisbekker — Associate Professor, Scientific Researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, 634050, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0002-1078-4649>, mariya_vaisbekker@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.07.2025
Одобрена после рецензирования 08.10.2025
Принята к печати 23.11.2025

Received 03.07.2025
Approved after reviewing 08.10.2025
Accepted 23.11.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»