

## РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ КРЕМНИЕВЫХ МЕМБРАН ДЛЯ АКУСТИЧЕСКОГО ПРИЕМНИКА

Т. А. Ефимов<sup>1</sup>, Е. А. Рассолов<sup>1,2</sup>, Ю. Н. Кульчин<sup>1,2</sup>, С. В. Малохатко<sup>3,4</sup>,  
Е. Ю. Гусев<sup>3</sup>, О. А. Агеев<sup>3,4</sup>, И. Н. Завестовская<sup>5</sup>

*В статье представлены результаты моделирования и экспериментального исследования резонансных свойств мембран для акустических приемников. Моделирование производилось в программном пакете Comsol Multiphysics (Acoustic Solid Interaction, Frequency Domain), определялась амплитудно-частотная характеристика прямоугольных мембран размером  $8 \times 8 \times 0.05$  мм<sup>3</sup>, изготовленных из монокристаллического кремния. Проведена верификация работы построенной модели. Установлено соответствие рассчитанной и экспериментально измеренной резонансных частот мембраны. Показано, что за счет изменения условий крепления мембраны возможно существенное увеличение чувствительности акустического приемника при сохранении геометрических размеров мембраны.*

**Ключевые слова:** кремниевая мембрана, акустический приемник, резонансные колебания, адаптивный интерферометр.

*Введение.* Характеристики и область применения мембран определяются их конструкцией, геометрическими параметрами и материалом [1]. Многообразие конструктивных решений позволяет подобрать форму, подходящую для конкретного приложе-

<sup>1</sup> Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, 690041 Россия, Владивосток, ул. Радио, 5; e-mail: efimov@iacp.dvo.ru.

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, 690091 Россия, Владивосток, ул. Суханова, 8.

<sup>3</sup> Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета, 347922 Россия, Таганрог, ул. Шевченко, 2.

<sup>4</sup> Научно-образовательный центр “Нанотехнологии” Южного федерального университета, 347922 Россия, Таганрог, ул. Шевченко, 2.

<sup>5</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53.

ния. В настоящее время актуально направление разработки акустических волоконно-оптических приемников, в которых в качестве чувствительных элементов используются мембраны из полимеров или металлов [2]. Стоит отметить, что акустические приемники зачастую работают в открытых средах (в том числе агрессивных), что накладывает свои ограничения на выбор материала чувствительных элементов. Мембраны из монокристаллического кремния могут стать достойной альтернативой, так как позволяют повысить защищенность устройств от воздействия агрессивных сред и благодаря большей жесткости позволяют повысить чувствительность устройств [3]. Таким образом, определение подходов и методов повышения чувствительности акустических приемников мембранного типа является актуальной задачей.

*Моделирование колебаний.* В настоящей работе проведено моделирование вынужденных колебаний прямоугольной мембраны, вызванных точечным источником акустических волн. Амплитуда колебаний мембраны измерялась в диапазоне частот от 100 Гц до 30 кГц. В качестве материала мембраны выбран монокристаллический кремний со следующими параметрами: плотность – 2.3 г/см<sup>3</sup>; модуль Юнга – 170 ГПа; коэффициент Пуассона – 0.28; мембрана имела прямоугольную форму со сторонами 8 × 8 мм<sup>2</sup>, толщину 50 мкм. Мембраны закреплялись на основании размером 20 × 20 мм<sup>2</sup>, толщиной 320 мкм. Моделирование выполнялось методом конечных элементов в среде Comsol Multiphysics. Для построения модели использован встроенный модуль Comsol Multiphysics – Acoustic Solid Interaction, Frequency Domain. Мембрана была помещена в центр расчетной области, ограниченной сферой радиусом 24 мм, как показано на рис. 1(а). На границе расчетной области построен идеальный согласованный слой (perfectly matched layer – PML), который устранял отражение акустической волны от границ сферы. Источник акустических волн мощностью 10 мВт установлен внутри сферы на расстоянии 20 мм от центра мембраны. В результате построения расчетной области были сформированы элементы сетки конечных элементов размерами от 34 до 270 мкм (элементы MESH). Амплитуда вынужденных колебаний определялась в области диаметром 600 мкм в центре мембраны как среднее отклонение всех точек этой области. Диаметр выбранной области определен размером лазерного пучка из волоконного световода, который может быть использован для детектирования колебаний в мембранных акустических приемниках [4, 5]. Полученная в результате амплитудно-частотная характеристика представлена на рис. 1(б).

Как видно из рис. 1, рассчитанная амплитудно-частотная характеристика кремниевой мембраны содержит два резонансных пика на частотах 10010 Гц и 16500 Гц. Макси-

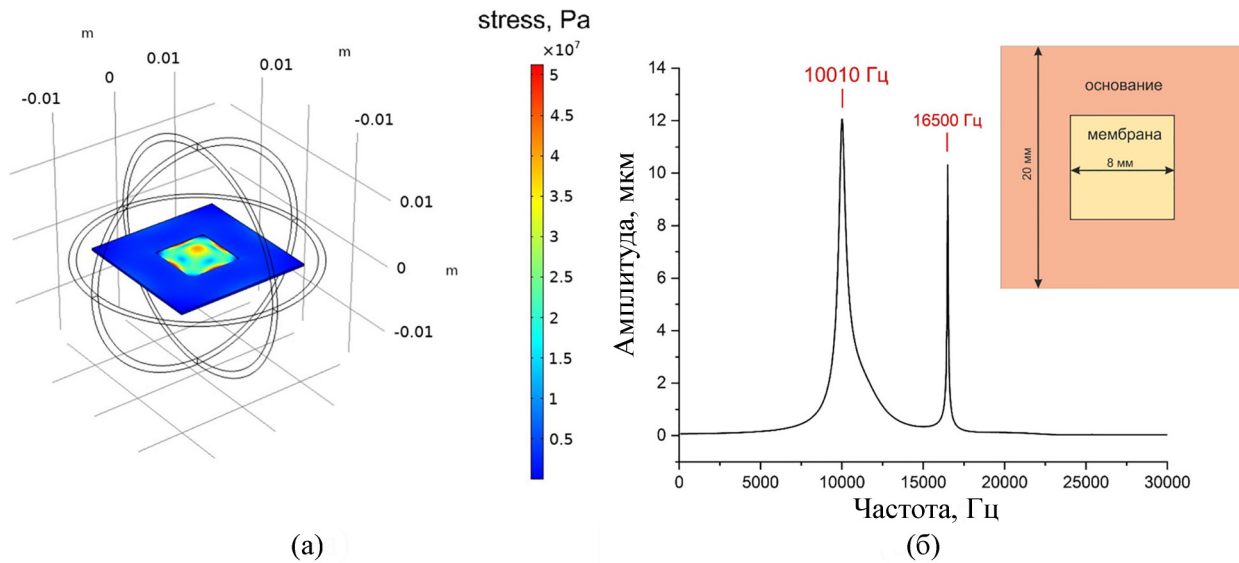


Рис. 1: Результат моделирования колебаний кремниевой мембраны: (а) распределение напряжения (*stress solid*) по поверхности мембраны, (б) амплитудно-частотная характеристика вынужденных колебаний кремниевой мембраны.

мальная амплитуда колебаний составляет 12 мкм при частоте 10010 Гц. Распределение колебаний по поверхности мембраны на этой частоте показано на рис. 1(а).

*Экспериментальное исследование колебаний мембраны.* Для проверки результатов моделирования проведено экспериментальное измерение амплитудно-частотной характеристики мембраны, геометрические размеры которой совпадают с размерами, использованными в численной модели. Мембрана изготовлена методом анизотропного жидкостного травления [6] на пластине монокристаллического кремния. Экспериментальное измерение амплитудно-частотной характеристики произведено с помощью адаптивного голографического интерферометра [5, 7]. Колебания мембраны возбуждались электродинамическим звуковым преобразователем, размещенном на расстоянии 20 мм от мембраны. На электродинамический преобразователь подавался сигнал синусоидальной формы с плавно меняющейся частотой от генератора сигналов Agilent 33500В. Регистрация амплитуды колебаний осуществлялась анализатором спектра Agilent N9030А, синхронизованного с генератором сигналов. Экспериментально измеренная амплитудно-частотная характеристика кремниевой мембраны, показанная на рис. 2, имеет четко выраженный пик на частоте 10159 Гц. Экспериментально измеренная частота колебаний первой моды колебаний хорошо соответствует частоте, полученной при моделировании (рис. 1(б)). Некоторые отличия в значениях резонансных

частот, по всей видимости, связаны с неизбежными отклонениями в геометрических размерах и форме мембраны, возникающими при ее изготовлении. С учетом этого можно заключить о достоверности данных, полученных в результате моделирования.

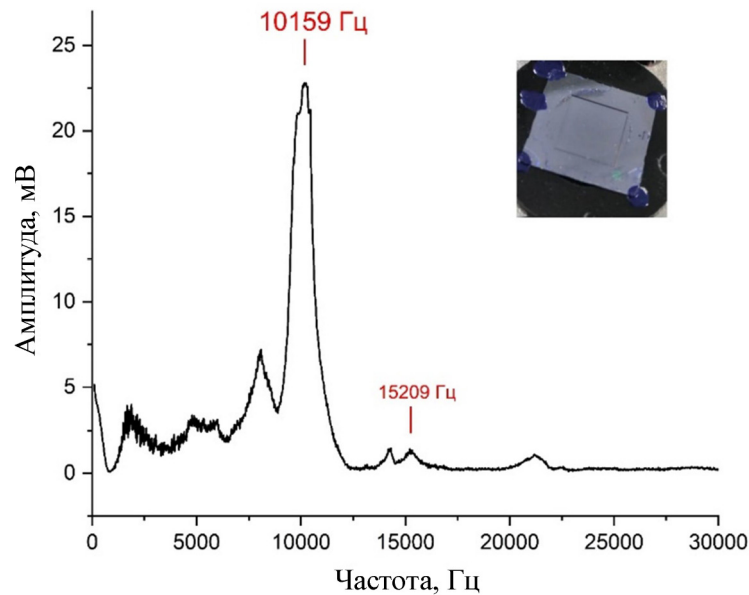


Рис. 2: Экспериментально полученная амплитудно-частотная характеристика вынужденных колебаний кремниевой мембраны.

*Увеличение чувствительности к акустическому давлению.* Ряд акустических приложений связан с необходимостью детектирования сигналов в средней и низкой области частот. Понижение резонансной частоты может быть достигнуто за счет увеличения отношения площади мембраны к ее толщине. Однако применение на практике тонких мембран или мембран с большой площадью является затруднительным, прежде всего ввиду опасности их разрушения. В настоящей работе предложен и исследован подход к уменьшению резонансной частоты за счет изменения условий крепления мембраны к основанию без изменения ее геометрии. Рассмотрен случай, когда мембрана закрепляется только с двух сторон (см. вставку на рис. 3(б)). На рис. 3 показан результат моделирования колебаний такой мембраны – форма первой моды колебаний мембраны и ее амплитудно-частотная характеристика.

Результат моделирования показал, что изменение способа крепления мембраны на основании приводит к сдвигу частоты первой моды колебаний с 10010 Гц до 6675 Гц, при этом амплитуда колебаний увеличилась с 12 мкм до 270 мкм. Как следствие, применение мембраны с измененной геометрией крепления к основанию в качестве приемного

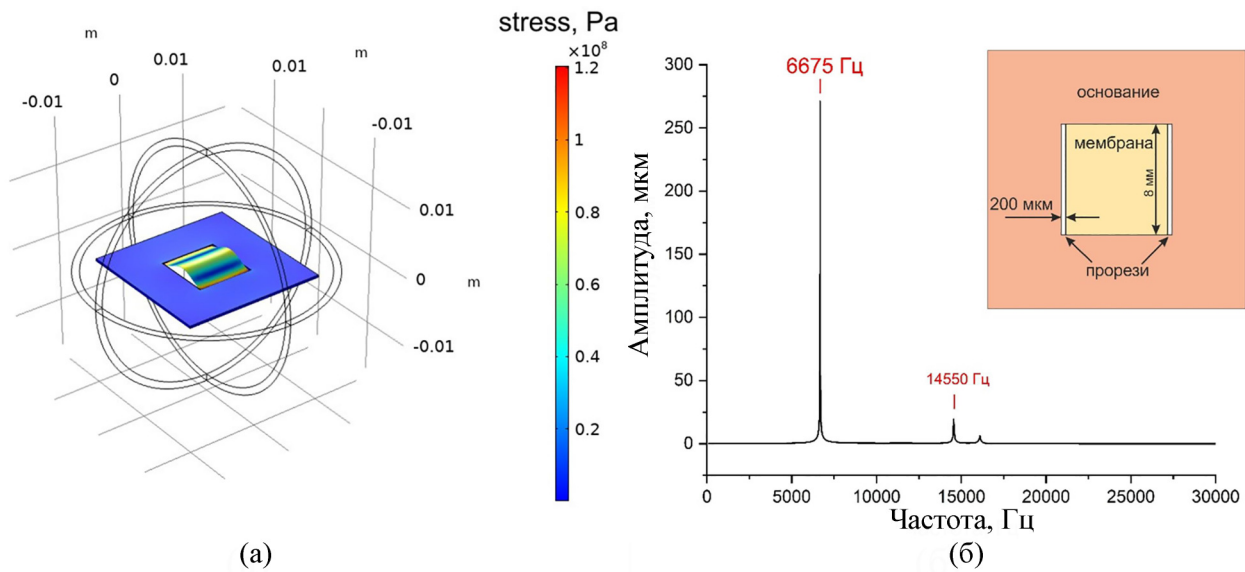


Рис. 3: Результат моделирования колебаний кремниевой мембраны, закрепленной на основании только с двух сторон: (а) распределение напряжения (*stress solid*) по поверхности мембраны, (б) амплитудно-частотная характеристика вынужденных колебаний.

элемента акустического сенсора позволяет на порядок повысить его чувствительность. Кроме того, наличие прорезей уравнивает статическое давление на обеих сторонах мембраны, что, в свою очередь понизит вероятность ее разрушения.

*Заключение.* Таким образом, в настоящей работе представлена модель для расчета резонансных характеристик кремниевых прямоугольных мембран в среде COMSOL Multiphysics. Достоверность данных, полученных в результате моделирования, подтверждена экспериментально.

Показано, что благодаря изменению условий закрепления мембраны на основании, а именно за счет перехода от закрепления по всему периметру к закреплению только с двух сторон, можно существенно увеличить чувствительность мембраны к детектируемому акустическому давлению в 22 раза, сохранив при этом габаритные размеры и форму мембраны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 19-12-00323). Мембраны изготовлены при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90087.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] G. M. Sessler, *Sensors and Actuators A: Physical* **26**(1-3), 323 (1991). DOI: 10.1016/0924-4247(91)87011-Q.
- [2] Y. M. Seo, J. J. Park, S. H. Lee, et al., *Journal of Applied Physics* **111**(2), 023504-1 (2012). DOI: 10.1063/1.3676262.
- [3] C. H. Huang, H. Gao, R. Naouari, et al., *IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*. **IEEE**, 1 (2017). DOI: 10.1109/ULTSYM.2017.8092985.
- [4] Р. В. Ромашко, Ю. Н. Кульчин, М. Н. Безрук, С. А. Лазерный, *Квантовая электроника* **46**(3), 277 (2016) DOI: 10.1070/QEL15976.
- [5] R. V. Romashko, Y. N. Kulchin, and E. Nippolainen, *Laser Physics* **24**(11), 115604 (3pp) (2014). DOI: 10.1088/1054-660X/24/11/115604.
- [6] S. V. Malokhatko, E. Y. Gusev, E. A. Rassolov, et al., *Journal of Physics: Conference Series* **1695**, 012183 (4pp) (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1695/1/012183.
- [7] A. A. Kamshilin, R. V. Romashko, and Y. N. Kulchin, *Journal of Applied Physics* **105**, 031101-1 (2009). DOI: 10.1063/1.3049475.

Поступила в редакцию 7 декабря 2021 г.

После доработки 7 декабря 2021 г.

Принята к публикации 26 января 2022 г.