

О РАСЧЕТЕ МЕМБРАН ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Ю.Н. Тиняков, А.С. Николаева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: tinjakov48@mail.ru; nikolaeva@bmstu.ru

В настоящее время широкое распространение в технике получили микроэлектромеханические системы. Важную роль играют микродатчики для измерения значений физических параметров и преобразования их в электрические сигналы. Основным элементом датчиков давления является микроэлектромеханический кремниевый преобразователь, критериями для разработчика при расчете которого являются чувствительность и линейность выходного сигнала. Однако в существующих исследованиях по оптимизации размеров и характеристики кремниевых чувствительных элементов не приводится конкретных рекомендаций разработчику по выбору конструкции мембран и топологии расположения тензорезисторов. В настоящем исследовании проведено сравнение различных конструктивно-технологических решений для кремниевых мембран и даны рекомендации по выбору наилучшего. Решена задача оптимизации датчика. Критериями являлись равенство максимальных деформаций разного знака и минимальная нелинейность зависимости линейных деформаций от давления. Алгоритм реализован в конечно-элементном программном комплексе ANSYS с использованием программы pSeven. Результатом предложенного исследования являются рекомендации разработчику по выбору конструктивно-технологического решения для мембран и расположения тензорезисторов для наиболее эффективной работы микродатчиков.

Ключевые слова: датчик давления, упругая мембрана, пластина.

COMPUTATION OF PRESSURE SENSOR MEMBRANE

Yu.N. Tinyakov, A.S. Nikolaeva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: tinjakov48@mail.ru; nikolaeva@bmstu.ru

Microelectromechanical systems (MEMS) are widely used in the current technology nowadays. Microsensors become important in both measuring values of physical parameters and transforming them into electrical signals. A silicon MEMS transducer is the basic pressure sensor element. Sensitivity and linearity of the output signal are the main criteria for a designer to calculate it. However, there are no specific recommendations about choosing the membrane structure and the layout of resistance strain gauges in the existing research into improving the size and characteristics of the silicon sensitive elements. The authors compare various structural and technological solutions for silicon membranes and provide the recommendations on how to selecting the best one. The problem of sensor optimization is solved. The criteria are chosen as follows: the equality of opposite sign maximum deformations and the minimum nonlinearity of linear deformations-pressure characteristics. The algorithm was implemented in the ANSYS finite element software package using the pSeven software.

The research resulted in some recommendations for a designer about the membrane structure choice and the layout of resistance strain gauges ensuring the most efficient microsensors operation.

Keywords: pressure sensor, elastic membrane, plate.

В современных микротехнологиях кремний широко распространен не только как полупроводниковый, но и как конструкционный материал [1]. Тот факт, что кремний, помимо своей обычной роли электронного материала с хорошо развитой технологией изготовления микроэлектронных устройств, может также использоваться как прецизионный, высоконадежный и прочный конструкционный материал, лежит в основе проектирования микроэлектромеханических систем (МЭМС).

Микроэлектромеханические системы включают в себя широкий круг функциональных микроустройств, среди которых ключевую роль играют микродатчики для измерения значений физических параметров и преобразования их в электрические сигналы [2]. Основным элементом датчика давления является микроэлектромеханический кремниевый преобразователь с тензорезистивным эффектом. Расчет оптимального расположения тензорезисторов на мембране является основой для проектирования МЭМС датчиков физических величин, в частности, давления.

Цель настоящей статьи — подготовка рекомендаций разработчику по выбору конструктивно-технологического решения для мембран и топологии расположения тензорезисторов для наиболее эффективной работы микродатчиков и защиты мембраны от разрушения при несанкционированной перегрузке по давлению.

Важным моментом при проектировании упругого элемента из кремния является выбор рабочих напряжений в зоне расположения тензорезисторов. Существуют различные подходы к выбору расположения тензорезисторов на кремниевых мембранах. Одной из распространенных конструкций является плоская мембрана, в которой резисторы располагаются в области заделки [3] мембраны. Другой вариант — прямоугольная мембрана с жестким центром прямоугольной формы, в которой резисторы располагаются в области заделки мембраны и на периферии жесткого центра.

Основными критериями для разработчика при расчете кремниевых преобразователей давления являются чувствительность и линейность выходного сигнала. Для однозначного выбора конструкции мембраны для чувствительного элемента датчика давления необходимо исследовать характеристики плоской мембраны и мембраны с жестким центром на предмет чувствительности, линейности выходного сигнала, а также защиты мембраны от перегрузки давлением.

В качестве преобразователя давления в электрический сигнал используются тензорезисторы, которые формируются в теле мембраны

кремниевого преобразователя. Формирование резисторов происходит за счет внесения примеси другой проводимости в кристаллографическую решетку кремния методом диффузии. Согласно практике проектирования достаточно рассматривать только механические явления (без учета пьезоэлектрического эффекта). Помимо этого были приняты следующие допущения: упругие характеристики мембраны анизотропны, тензорезисторы преобразователя предполагаются точечными (переход к протяженным резисторам предполагает усреднение откликов). Изменение сопротивления тензорезисторов можно представить в виде следующего выражения:

$$\Delta R/R = K_f \varepsilon,$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора; K_f — коэффициент тензочувствительности, который зависит от электронных свойств кремния и является величиной постоянной для кремния данной проводимости и ориентации подложки; ε — линейная деформация (толщина тензорезисторов не превышает 2 мкм).

Поэтому основным параметром, влияющим на чувствительность и линейность преобразователя давления, является деформация мембраны, возникающая под действием давления. Необходимо исследовать деформации мембраны для выявления областей максимальных деформаций и минимальной нелинейности. Учитывая малые размеры диффузионных тензорезисторов (дина 100 мкм, ширина 10 мкм), считаем, что с помощью тензорезистора можно измерять деформацию в точке. Попытки оптимизировать размеры и характеристики кремниевых чувствительных элементов предпринимались в работах [4–7]. Конструкции датчиков давления для различных уровней давления рассмотрены в работах [8–10]. К сожалению, в этих работах нет конкретных рекомендаций разработчику по выбору конструкции мембран и топологии расположения тензорезисторов.

В настоящем исследовании для оптимизации расположения тензорезисторов требуется определить, где в мембране с жестким центром и плоской мембране возникают максимальные линейные деформации. Для этого был использован метод конечных элементов (МКЭ) [11, 12]. В качестве объектов исследований возьмем кремниевые кристаллы размером 4000×4000 мкм, один из которых имеет мембрану 2000×2000 мкм с жестким центром 1000×1000 мкм, а другой — плоскую мембрану размером 2000×2000 мкм. Толщина мембраны 40 мкм. На расстоянии 10 мкм от пластины расположен упор (рис. 1).

В комплексе ANSYS были созданы конечно-элементные модели пластин с жестким центром и без жесткого центра (рис. 2). Был использован 10-узловой элемент SOLID 187.

Свойства материала следующие: модуль упругости $1,3 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,266. Пластины жестко закреплены по

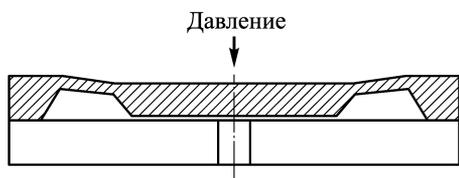


Рис. 1. Защита от перегрузки для датчиков

перемещения для пластин с жестким центром и без жесткого центра составляют 10 и 41 мкм.

Обычно в экспериментах с пластинами с жестким центром тензорезисторы формируют в заделке (тензорезистор 1, рис. 4) и на границе жесткого центра (тензорезистор 2, см. рис. 4): скачки на эпюре напряжений наблюдаются в местах резкого изменения геометрии. Для пластин без жесткого центра используют только тензорезисторы, которые формируют в области заделки.

Зависимости линейных деформаций в тензорезисторе 1, расположенном в области заделки (см. рис. 4), от внешнего давления для пластины с жестким центром и без него приведены на рис. 5. В пластине с жестким центром эта зависимость в целом является более линейной, чем в пластине без жесткого центра. Значения нормальных напряжений и линейных деформаций по оси тензорезистора при давлении $p_1 = 1,2$ МПа в тензорезисторе 1, расположенном в области заделки приведены в таблице.

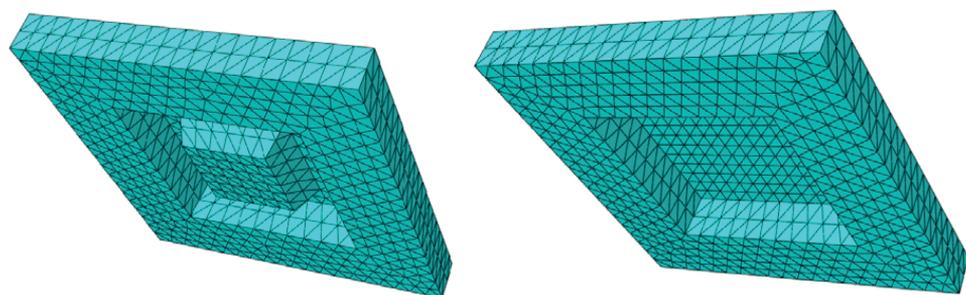


Рис. 2. Конечно-элементные модели пластин с жестким центром и без него

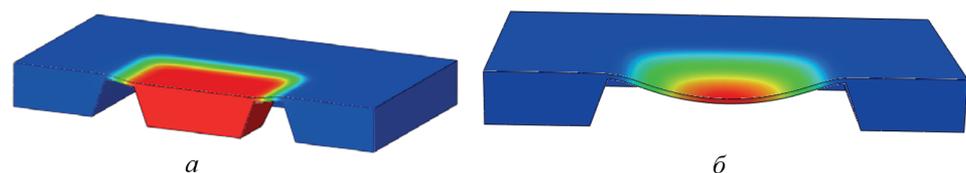


Рис. 3. Вертикальные перемещения точек пластины с жестким (а) и без жесткого (б) центра

нижней плоскости. Нагрузка — это давление, при котором пластина с жестким центром достигает упора ($p_1 = 1,2$ МПа), примененное к верхней плоскости пластины. Результаты работы программы для расчета пластин приведены на рис. 3. Наибольшие вертикальные

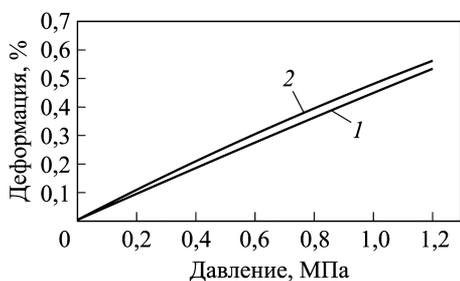


Рис. 5. Зависимость линейных деформаций в мембране от давления для пластин с жестким центром (1) и без жесткого центра (2)

Варьируемым параметром являлся размер стороны квадратного жесткого центра. Он изменялся от 1000 до 1800 мкм. Критериями являлись: равенство максимальных линейных деформаций на поверхности мембраны разного знака (точность 0,0001) (рис. 6) и минимальная нелинейность (отношение наибольшего отклонения зависимости $\varepsilon(p)$ от линейного закона к значению наибольшей линейной деформации при наибольшем давлении) зависимости линейной деформации в точке расположения тензорезистора I от давления. Решение выполнялось в программе PSE/MACROS методом робастной многокритериальной оптимизации (Robustmulti-objective optimization) [13, 14]. Оптимальное решение — датчик с размером стороны квадратного жесткого центра 1100 мкм.

Выводы. Выполнен анализ зависимости деформаций в мембране датчика давления от внешней нагрузки. Показано, что зависимость деформаций от давления в пластине с жестким центром является линейной, а в пластине без жесткого центра в целом — нелинейной. Показано, что с точки зрения повышения чувствительности и линейности преобразователя давления предпочтительно формировать мембрану с жестким центром, для формирования измерительного моста располагать резисторы в заделке мембраны и на гранях жесткого центра. Решена задача оптимизации пластины с жестким центром, в рамках которой определены размеры жесткого центра, удовлетворяющие критериям равенства максимальных линейных деформаций поверхности разного знака и минимальной нелинейности зависимости линейной деформации в тензорезисторе от давления. Таким образом, подгото-

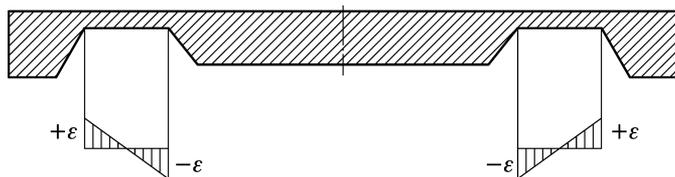


Рис. 6. Эпюры деформаций ε_x для оптимальной конструкции пластины

Преобразователь с мембраной с жестким центром позволяет защитить мембрану от разрушения, которое возникает при несанкционированной перегрузке по давлению. Принцип защиты от перегрузки заключается в том, что жесткий центр ложится на упор при достижении допустимого давления.

Задача оптимизации. Рассмотрим задачу оптимизации пластины с жестким центром. Варьируе-

влены рекомендации по выбору конструктивно-технологического решения для мембран и расположения тензорезисторов для наиболее эффективной работы микродатчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Petersen K.E.* Silicon as a mechanical material // *Proceedings of the IEEE*. 1982. Vol. 70. No. 5. P. 420–457.
2. *Stefanescu D.M.* Handbook of Force Transducers. Berlin: Springer, 2011. 612 p.
3. *Феодосьев В.И.* Сопrotивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 592 с.
4. *Вазанов В.И.* Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 138 с.
5. *Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е.П. Осадчего.* М.: Машиностроение, 1979. 480 с.
6. *Ушков А.В.* Разработка конструктивно-технологических основ производства кремниевых чувствительных элементов давления с повышенной стойкостью к перегрузкам. Дисс... канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
7. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
8. *Yasukawa A., Shimazoe M., Matsuoka J.* Simulation of Circular Silicon Pressure Sensors with a Center Boss for very Low Pressure measurement // *IEEE Transactions on Electronic Devices*. 1989. Vol. 36. No. 7. P. 1295–1302.
9. *Guo S., Guo J., Ko W.H.* A monolithically integrated surface micromachined touch mode capacitive pressure sensor // *Sensors and Actuators A*. 2000. No. 80. P. 224–232.
10. *Elgamel A.* A simple and efficient technique for the simulation of capacitive pressure transducers // *Sensors and Actuators A*. 1999. No. 77. P. 183–186.
11. *Белкин А.Е., Гаврюшин С.С.* Расчет пластин методом конечных элементов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 232 с.
12. *Каплун А.Б.* ANSYS в руках инженера. М.: Эдиториал УРСС. 272 с.
13. <http://www.datadvance.net/> (дата обращения 05.03.2014).
14. *Гаврюшин С.С., Макмиллан А., Подкопаева А.С.* Синтез микроактюатора дискретного действия по заданным функциональным параметрам // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2014. № 1. С. 55–60.

REFERENCES

- [1] Petersen K.E. Silicon as a mechanical material. *Proc. of the IEEE*, 1982, vol. 70, no. 5, pp. 420–457.
- [2] Stefanescu D.M. Handbook of Force Transducers. Berlin, Springer, 2011. 612 p.
- [3] Feodos'ev V.I. Soprotivlenie materialov [Strength of Materials]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman Publ., 1999. 592 p.
- [4] Vaganov V.I. Integral'nye tenzopreobrazovateli [Integral Piezoconverters]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 138 p.
- [5] Osadchiy E.P., ed. Proektirovanie datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin [Design of Sensors for Measuring Mechanical Quantities]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 480 p.
- [6] Ushkov A.V. Razrabotka konstruktivno-tekhnologicheskikh osnov proizvodstva kremnievykh chuvstvitel'nykh elementov davleniya s povyshennoy stoykost'yu k peregruzkam. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of Constructional and Technological Bases of Manufacturing Silicon Pressure Sensors with High Resistance to Overloads. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, MGТУ im. N.E. Bauman, 2008.

- [7] Raspopov V.Ya. Mikromekhanicheskie pribory [Micromechanical Devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 400 p.
- [8] Yasukawa A., Shimazoe M., Matsuoka J. Simulation of Circular Silicon Pressure Sensors with a Center Boss for very Low Pressure measurement. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 1989, vol. 36, no. 7, pp. 1295–1302.
- [9] Guo S., Guo J., Ko W.H. A monolithically integrated surface micromachined touch mode capacitive pressure sensor. *Sensors and Actuators A*, 2000, no. 80, pp. 224–232.
- [10] Igamel A. A simple and efficient technique for the simulation of capacitive pressure transducers. *Sensors and Actuators A*, 1999, no. 77, pp. 183–186.
- [11] Belkin A.E., Gavryushin S.S. Raschet plastin metodom konechnykh elementov [Calculation of Plates by Finite Element Method]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2008. 232 p.
- [12] Kaplun A.B. ANSYS v rukakh inzhenera [Using ANSYS by Engineers]. Moscow, Editorial URSS Publ. 272 p.
- [13] <http://www.datadvance.net/> (accessed 05.03.2014).
- [14] Gavryushin S.S., Makmillan A., Podkopaeva A.S. Synthesis of discrete microactuators from specified functional parameters. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved., Mashinostr.* [Proc. of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering], 2014, no. 1, pp. 55–60 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 29.05.2015

Тиняков Юрий Николаевич — ведущий инженер НОЦ “Наноинженерия” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Tinyakov Yu.N. — Leading engineer, Research and Education Center Nanoengineering, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Николаева Анна Сергеевна — аспирантка кафедры “Динамика и прочность машин” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Nikolaeva A.S. — Ph.D. student, Department of Dynamics and Strength of Machines, Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Тиняков Ю.Н., Николаева А.С. О расчете мембран датчиков давления // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 6. С. 135–142.

Please cite this article in English as:

Tinyakov Yu.N., Nikolaeva A.S. Computation of pressure sensor membrane. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 6, pp. 135–142.