

Evdokimova Ekaterina Olegovna – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ekaterina_tut@inbox.ru; 142, Kuznechnaya street, ap. 9, Taganrog, 347930, Russia; phone: +79897238449; the department of fundamentals of radio engineering; postgraduate student.

УДК 681.5.017; 681.5.03.23

П.Г. Михайлов, В.И. Лапшин, Д.А. Сергеев

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КОНСТРУИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

Статья посвящена вопросам моделирования и конструирования кремниевых чувствительных элементов (ЧЭ) емкостных датчиков давления. Предложены модели и представлены конструкции ряда емкостных чувствительных элементов, выполненных из монокристаллического кремния (МК). Изготовление емкостных ЧЭ на основе МК, который одновременно является и конструкционным и функциональным материалом, что позволяет изготавливать их с применением групповых технологий микроэлектроники. А это, в свою очередь, позволяет резко снизить цену и уменьшить габариты и вес ЧЭ и самих датчиков. Приведены расчетные зависимости конструктивных параметров, которые напрямую влияют на метрологию емкостных датчиков.

Монокристаллический кремний; микроэлектронные датчики; емкостной чувствительный элемент; электроды; расчетная модель; напряжение; мембрана; рабочая емкость; микромеханический емкостной датчик; диапазона измерения.

P.G. Mikhailov, V.I. Lapshin, D.A. Sergeev

MODELING AND DESIGN OF SILICON SENSORS CAPACITIVE PRESSURE SENSORS

The article deals with modeling and design of silicon sensors (SE) of capacitive pressure sensors. Models and designs are a number of capacitive sensing elements made of single-crystal silicon (MC). Manufacture of capacitive Jae-based MC, who is also the structural and functional materials that can produce them with the use of group technology in microelectronics. This, in turn, can dramatically reduce the cost and reduce the size and weight of the SE and the sensors themselves. Calculated according to the design parameters, which directly affect the metrology capacitive sensors.

Monocrystalline silicon; micro-electronic sensors; capacitive sensor element; electrodes; calculation model; voltage, membrane; operating capacity; micromachined capacitive sensor; the measurement range.

Монокристаллический кремний является перспективным конструктивным и функциональным материалом для многих приборов микросистемной техники (МСТ), к которым относятся и микроэлектронные датчики. Кремний обладает высокими прочностными характеристиками, его формообразование может проводиться немеханическими методами, например, газовым и жидкостным травлением, что позволяет получать прецизионные сложные структуры микронных размеров групповыми методами [1, 2]. МК с успехом применяется в миниатюрных емкостных датчиках давления и ускорения, позволяя получать весьма стабильные и недорогие датчики. Конструкции емкостных кремниевых датчиков базируются на различных конструктивных решениях, но в большинстве своем имеют сходство в конструкциях емкостных чувствительных элементов (ЕЧЭ), поэтому рассмотрим базовый ЕЧЭ и промоделируем его функционирование.

Конструкции и схемы кремниевых емкостных ЧЭ представлены на рис. 1. ЧЭ представляют собой герметичные коробчатые конструкции из монокристаллического кремния с напыленными на поверхности пластин электродами из алюминия. Электроды и подвижные и неподвижные пластины образуют систему опорных (C_0) и измерительных (C_x) конденсаторов соединенных параллельно-последовательно. Такое соединение конденсаторов позволяет скомпенсировать влияние температуры.

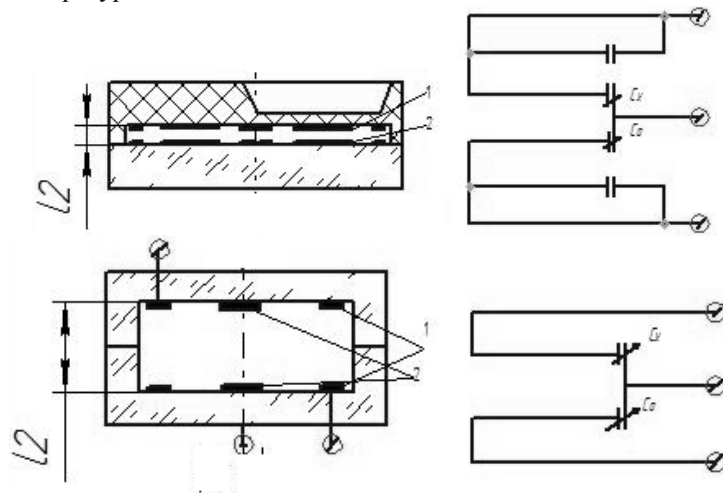


Рис. 1. Конструкции и схемы емкостных ЧЭ: 1 – подвижный электрод; 2 – неподвижный электрод

Расчетная модель полупроводникового ЕЧЭ датчика давления с растягивающейся диафрагмой или мембраной показана на рис. 2. Круглая мембрана диаметром $2a$ при воздействии одностороннего давления принимает форму сферы, а ее отклонение Y от ненагруженного состояния для любого радиуса r может быть представлено

$$Y = 2\sigma / P \left[\sqrt{1 - (rP/2\sigma)^2} - \sqrt{1 - (aP/2\sigma)^2} \right], \quad (1)$$

где σ – напряжение в диафрагме по окружности; P – давление.

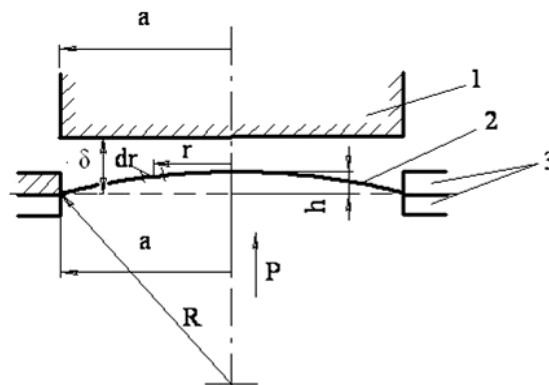


Рис. 2. Чувствительный элемент с растягивающейся мембраной: 1 – неподвижный электрод; 2 – мембрана; 3 – держатель

Уравнение (1) можно записать в виде ряда

$$Y = \frac{P}{4\sigma} \left[(a^2 - r^2) + \frac{1}{16} \left(\frac{P}{\sigma} \right)^2 (a^4 - r^4) + \frac{1}{512} \left(\frac{P}{\sigma} \right)^4 (a^6 - r^6) + \dots \right]. \quad (2)$$

Когда отклонения незначительны, то достаточно первого члена уравнения (2), который определяет линейную составляющую зависимости между отклонением и давлением. Таким образом, для $(h/a)^2 \ll 1$:

$$Y = \frac{P}{4\sigma} (a^2 - r^2). \quad (3)$$

Для узкой кольцеобразной зоны на сфере шириной dr и длиной $2\pi r$, первоначально располагавшейся на расстоянии δ от неподвижной пластины, приращение емкости

$$\Delta C = \varepsilon 2\pi r \cdot dr / (\delta - Y). \quad (4)$$

Для малых отклонений ($Y/\delta \ll 1$) $1/(\delta - Y)$ можно приближенно выразить

$$\frac{1}{(\delta - Y)} \approx \frac{1}{\delta} \left(1 + \frac{Y}{\delta} \right). \quad (5)$$

Тогда полная емкость между сферической поверхностью отклоняемой мембраны и неподвижным электродом (при начальной емкости C_0) равна

$$C_0 + \Delta C = \int_0^a dC = \frac{2\pi\varepsilon a}{\delta} \int_0^a \left(1 - \frac{Y}{\delta} \right) r dr. \quad (6)$$

Подставляя значение Y из уравнения (3), для малых отклонений, получим

$$C_0 + \Delta C = \frac{2\pi\varepsilon a}{\delta} \int_0^a \left[1 + \frac{P}{4\sigma\delta} (a^2 - r^2) \right] r dr = \frac{\pi\varepsilon}{\delta} a^2 + \frac{\pi\varepsilon P}{\delta 4\sigma\delta} \int_0^a (a^2 - r^2) r dr. \quad (7)$$

Первый член уравнения (7) представляет начальную емкость C_0 мембраны до деформации, следовательно, изменение емкости под действием давления будет

$$\Delta C = \frac{\pi\varepsilon P}{4\sigma\delta^2} \int_0^a (a^2 - r^2) r dr = \frac{\pi\varepsilon P a^4}{8\delta^2\sigma}. \quad (8)$$

Анализируя формулу (8), можно сделать следующие выводы:

- ◆ изменение емкости линейно зависит от измеряемого абсолютного давления P , диэлектрической проницаемости среды ε между обкладками конденсатора, радиуса и обратно пропорциональна квадрату перемещения δ мембраны, напряжению, возникающему в мембране при воздействии давления, равного пределу измерения;
- ◆ в связи с тем, что диапазон измерения абсолютного давления наиболее сильно зависит от радиуса «а» мембраны, следует минимизировать технологические допуски на ее геометрические размеры.

На рис. 3 представлена конструктивная модель ЕЧЭ, на основе кремния.

Конструктивно ЕЧЭ представляет собой мембранную коробку, состоящую из двух соединенных между собой кремниевых мембран (1 и 2), на которых сформированы обкладки конденсатора (3, 4), образующие между собой первоначальный зазор h , величиной около 5 мкм. Для снятия сигнала с ЕЧЭ предусмотрены контактные площадки (5, 6), к которым крепятся электрические выводы.

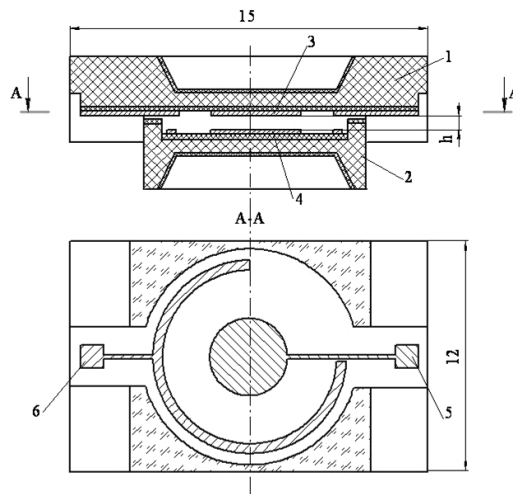


Рис. 3. Чувствительный элемент микромеханического емкостного датчика абсолютного давления: 1, 2 – мембраны; 3, 4 – обкладки конденсатора; 4, 5 – контактные площадки

Емкость каждого плоского конденсатора Cx_0 определяется

$$Cx_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot Sx_0}{\delta_0}, \quad (9)$$

где C_x – рабочая емкость (емкость изменяемая пропорционально изменению межэлектродного зазора, вызванного прогибом мембраны от измеряемого давления P); C_0 – опорная емкость (постоянная емкость не зависящая от прогиба мембраны); $\epsilon_0 = 0,00885$ пФ/мм – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость межэлектродной среды, для вакуума $\epsilon \approx 1$; $\delta_0 = 0,005$ мм – исходный межэлектродный зазор при отсутствии прогиба мембраны от измеряемого давления (обеспечивается конструкцией).

Первоначальная емкость между обкладками конденсатора должна составлять порядка 5 пФ. Исходя из этого, емкость обкладки конденсатора на каждой мембране должна составлять 10 пФ, для последовательного соединения имеем

$$\Delta C_0 = \frac{Cx \cdot C_0}{Cx + C_0} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \text{ пФ}. \quad (10)$$

Из формулы (9) находим $Sx = S_0 = 5,72 \text{ мм}^2$ – площадь обкладок рабочего и опорного конденсатора (обеспечивается конструкцией).

Зная площадь обкладок конденсаторов $S = 2 \cdot \pi \cdot R^2$, можно определить геометрические размеры для рабочего и опорного конденсатора.

На предлагаемой конструкции ЧЭ емкость опорного конденсатора имеет площадь $\frac{3}{4}$ площади кольца. Такая конфигурация увеличивает ширину проводящего слоя, которая облегчает задачу совмещения топологических слоев.

Для расширения диапазона измерений (в область низкого давления) микромеханического емкостного датчика сверхнизких абсолютных давлений необходимы очень тонкая мембрана и очень малый зазор. Толщина мембраны предложенного ЧЭ для диапазона измерений от 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст. составит 5 мкм, зазор между мембранами и соответственно межэлектродный зазор составит 5 мкм.

На рис. 4 представлены 3D-модели микромеханического измерительного модуля и ЕЧЭ датчика абсолютного давления.

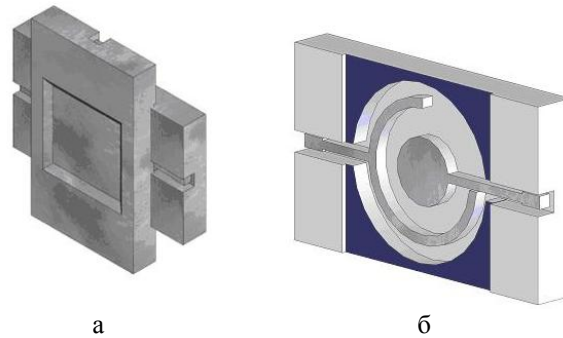


Рис. 4. 3D-модели микромеханического измерительного модуля емкостного датчика абсолютного давления: а – ИМ в сборе; б – емкостный ЧЭ

Были предложены расчетные модели, подтвердившие работоспособность предлагаемой конструкции ЕЧЭ.

Прогиб мембраны без жесткого центра с жестко зашпеленным контуром под воздействием нагрузки, равномерно распределенной по всей поверхности, определяется по формуле [3]:

$$\omega = \frac{3 \cdot (1 - \mu^2) PR^4}{12 \cdot Eh^3}, \quad (11)$$

где P – измеряемое давление; R – радиус мембраны; h – толщина мембраны; E – модуль упругости материала; μ – коэффициент Пуассона.

Наибольшее эквивалентное напряжение, возникающее по краям мембраны от приложенного давления, определяется по формуле

$$\sigma_{\text{эkv}} = \frac{3 \cdot (1 - \mu + \mu^2) \cdot 0,5 PR^4}{4 \cdot h^2}. \quad (12)$$

Напряжения, возникающие в центре мембраны, определяется по формуле

$$\sigma_o = \frac{3 \cdot (1 + \mu) \cdot PR^4}{8 \cdot h^2}. \quad (13)$$

Коэффициент запаса по прочности определяется

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_{\text{эkv}}}. \quad (14)$$

Исходные расчетные данные представлены в табл. 1, а результаты численного моделирования сведены в табл. 2.

Расчет проводился для ЕЧЭ с диапазоном измерения от 10^{-5} до $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

Таблица 1

Исходные расчетные данные

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Значение
Воздействующее давление	P	кГ/см ²	0,0000272
Радиус мембраны	R	мм.	3
Толщина мембраны	h	мм.	0,005
Модуль упругости материала мембраны	E	кГ/мм ²	18 000

Окончание табл. 1

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Значение
Коэффициент Пуассона материала мембраны	μ		0,3
Предел упругости материала мембраны	σ_y	кГ/мм ²	9,47
Текущее значение радиуса мембраны	r	мм	0

Таблица 2

Результаты расчета кремниевой мембраны

Наименование характеристики	Обозначение	Размерность	Значение
Прогиб центра мембраны	ω	мм	0,00126783
Наибольшее напряжение у заделки мембраны	$\sigma_{эkv}$	кГ/мм ²	0,05686169
Напряжение в центре мембраны	σ_0	кГ/мм ²	0,04158336
Коэффициент запаса	n	–	166,5444681

Расчеты и экспериментальные данные подтвердили высокие механические свойства монокристаллического кремния. В отличие от поликристаллических материалов, кремний может многократно подвергаться воздействию механических напряжений, не проявляя эффекта усталости. Кремниевые структуры могут выдерживать давления свыше 350 МПа и ускорение до 10^6 м/с².

Однако под нагрузкой при комнатной температуре МК разрушается, в то время как металлы претерпевают пластическую деформацию. В разрушении МК-структур повинны дефекты, локализованные на краях или поверхности пластин. Полирование полупроводниковых пластин и химическая обработка резко повышают их прочность. Деформации, которые уверенно выдерживают МК кристаллы, лежат в пределах $2 \cdot 10^{-3}$... $4 \cdot 10^{-3}$. Специальная обработка поверхности дает возможность повысить деформацию в 2–2,5 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайлов П.Г., Смирнов И.Ю., Сергеев Д.А. Чувствительные элементы и измерительные модули датчиков. Конструкции и технологии // Современные информационные технологии: Труды МНТК. Вып. 13. – Пенза: ПГТА, 2011. – С. 22-25.
2. Михайлов П.Г. Микроэлектронные датчики, особенности конструкций и характеристик // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. – 2004. – № 6. – С. 38-41.
3. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. – 2-е изд. доп. – М.: Машиностроение, 1981. – 392 с.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.Е. Панич.

Михайлов Петр Григорьевич – ЗАО «НИИФИ и ВТ»; e-mail: petr.mixajlov.49@mail.ru; 440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3; тел.: 89273788810; д.т.н.; профессор; научный сотрудник.

Лапшин Владимир Ильич – тел.: 88412564520; генеральный директор.

Сергеев Дмитрий Андреевич – Пензенский государственный университет; e-mail: cnit@pnzgu.ru; г. Пенза, ул. Красная, 40; тел.: 89270910498; кафедра автоматизации и телемеханики; аспирант.

Mikhailov Peter Grigoryevich – CJSC "NIFI and BT"; e-mail: petr.mixajlov.49@mail.ru; 3, Lermontov street, Penza, 440026, Russia; phone: +79273788810; dr. of eng. sc.; professor; researcher.

Lapshin, Vladimir Pyich – phone: +78412564520; general manager.

Sergeev Dmitriy Andreevich – Penza State University; e-mail: cnit@pnzgu.ru; 40, Krasnaja street, Penza; phone: +79270910498; the department of automation and telemechanics"; postgraduate student.