

ДАТЧИКИ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗАЦИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ. ИНЖЕНЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

*П.Г. Михайлов, д.т.н., профессор - научный руководитель,
М. Златогорский – магистрант, Ю. Клейменов – магистрант, А. Верева –
магистрант, А. Усачев – магистрант.*

Пензенский филиал МГУТУ им. К. Г. Разумовского, г. Пенза

Тел. 89273788810

E-mail: pit_mix@mail.ru

На практике при разработке конструкции, технологии и освоении производства новых или модернизации средств автоматизации машиностроения, зачастую сталкиваются с факторами многозначности, многофакторности реальных процессов жизненного цикла разрабатываемой продукции. При этом невозможно учесть все влияющие при этом факторы, поэтому ранее разработанные стохастические модели устройств зачастую имеют недостаточную точность, адаптивность и информативность. В тоже время полностью адаптивные модели средств автоматизации создавать сложно, а зачастую и нецелесообразно по экономическим затратам. Приемлемым компромиссом между указанными моделями может служить третий тип моделей, включающих экспертные составляющие, возникающие из накопленных опытных данных и знаний специалистов (экспертов) в рассматриваемой сфере, в частности, в измерительных средствах систем автоматизации машиностроения. Экспертные методики и модели, включающие опыт разработчиков, технологов и производственников, принято называть инженерными моделями. Инженерные методики моделирования и создаваемые в процессе моделирования инженерные модели, не требуют высокой научной квалификации разработчиков, позволяя с приемлемой точностью проводить расчеты, не прибегая к дорогим, трудно осваиваемым, специализированным компьютерным программам. Рассмотрим применение инженерных методов к основному узлу измерительных преобразователей (ИП) – полупроводниковому чувствительному элементу (ПЧЭ) преобразователя давления (ИПД).

Моделирование прочности упругого элемента

Толщина деформируемой части ИП – воспринимающего элемента (ВЭ) является определяющим чувствительность, диапазон линейного преобразования и геометрические размеры ПЧЭ. Технология жидкостного анизотропного травления, позволяет получить очень тонкие ВЭ, чем достигается увеличение чувствительности ИПД при сохранении постоянных его посадочных размеров. Или, наоборот, чувствительность преобразования может быть постоянной, но при этом могут быть уменьшены его геометрические размеры. Поэтому, используя типовую топологию сенсорной схемы, можно получить целый ряд ПЧЭ и измерительных модулей (ИМ), рассчитанных на различные диапазоны измеряемой величины путем изменения только толщины ВЭ, но не его размеров [1-4].

В отличие от обычных интегральных схем, в ПЧЭ на разброс характеристик ИПД, кроме обычных технологических факторов влияет ряд дополнительных, в частности, разброс геометрических размеров ВЭ преобразователя, который может достигать несколько десятков процентов. Отсюда становится очевидным, что контроль и воспроизводимость толщины ВЭ очень важны для минимизации разброса функции преобразования ИПД [5, 6].

Упругие свойства изотропных тел при объемном механическом напряженном состоянии определяются тремя параметрами: модулем Юнга Y , коэффициентом Пуассона ν и модулем сдвига G . Два из них независимы, а третий выражается через них однозначно. Для анизотропных материалов, к которым принадлежат все полупроводники, упругие свойства определяются набором гораздо большего числа физических коэффициентов [7].

Поскольку кремний является анизотропным материалом, то, очевидно, и значения этих модулей не будут постоянными, а будут зависеть от выбранного направления в кристалле. В практике создания полупроводниковых ИПД, наиболее распространены плоскости ориентации кремниевых пластин: (111), (100) и (110). На рис. 1а представлено произвольное расположение системы координат плоскости ВЭ, а на рисунке 1б представлена модель ВЭ.

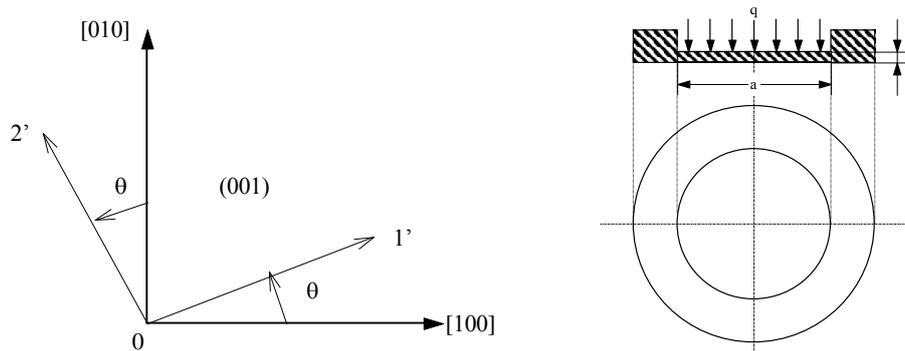


Рис. 1. а - расположение произвольной системы координат относительно исходной для плоскостей (001); б - геометрическая модель ВЭ - кремниевой мембраны

Согласно принятым в сопромате методикам, прогиб в центре ВЭ для плоскости (001) выражается формулой [8, 9]:

$$W_0 = 0,131 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{R^4}{h^3} \cdot q, \quad (1)$$

где $R=a/2$ - рабочий радиус мембраны, мм; h - толщина мембраны, мм; q - давление, Па.

Отметим, что края мембраны жестко закреплены, диаметр мембраны во много раз превышает ее толщину ($2a \gg h$). Отсюда следует, что прогибы мембраны незначительны и не превышают 20 % от ее толщины.

Для нахождения толщины мембраны необходимо найти максимальное значение МН на окружности мембраны $r = R$ в направлении радиуса:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{r \max} = \frac{3}{4} \cdot \frac{PR^2}{h^2}, \quad (2)$$

где R = радиус мембраны, мм., откуда

$$h = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot R \cdot \sqrt{\frac{P}{\sigma_{\max}}}, \quad (3)$$

где P - приложенное давление.

Определим максимальное значение σ_{\max} из следующей формулы:

$$\sigma_{\max} = E_{\min} \cdot \varepsilon_{\max}, \quad (4)$$

где $E_{\min} = 1,3 \cdot 10^{11}$ Н/м² - модуль Юнга кремния в направлении [011]; $\varepsilon_{\max} = 5 \cdot 10^{-4}$ - максимальная деформация рабочей зоны мембраны.

Алгоритм прочностного расчета ВЭ представлен на рис. 2.

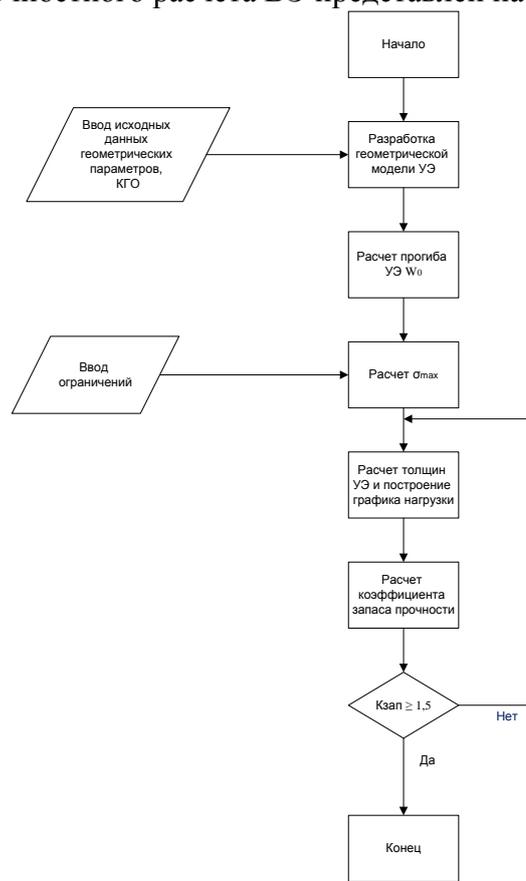


Рис. 2. Алгоритм прочностного расчета кремниевого ВЭ

По полученной аналитической нелинейной зависимости (3), с использованием программы *MS Excel*, была рассчитана графическая модель (рис. 3), по которой можно спрогнозировать механическую прочность ВЭ КЧЭ интегрального датчика. На графике также показана экспонента, аппроксимирующая зависимость $h_x=f(P_x)$.

Для обеспечения механической надежности работы ПЧЭ и всего ИПД в целом необходимо иметь запас прочности, $K_{\text{зап}} \geq 1,5$:

$$K_{\text{зап}} = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma_{\text{max}}} = \frac{\varepsilon_{\text{пред}}}{\varepsilon_{\text{max}}}, \quad (5)$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ и $\varepsilon_{\text{пред}}$ – соответственно максимально допустимые значения напряжения и деформации для кремния (справочные величины).

Подставив ранее определенные значения относительных деформаций в (5), получим:

$$K_{\text{зап}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-4}} = 2.$$

Таким образом, полученное значение $K_{\text{зап}}$ подтверждает достаточно надежную работу кремниевого УЭ и датчика в целом [10].

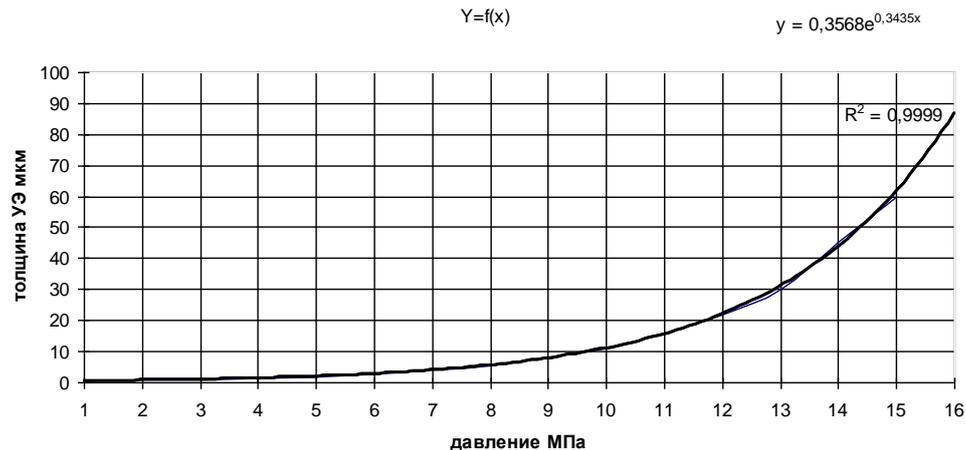


Рис. 3. Графическая зависимость толщины ВЭ КЧЭ от давления

Список литературы:

1. Михайлов П.Г., Мокров Е.А. и др. Особенности метрологического обеспечения современных датчиков пульсаций давления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 5 (130). 2012 г.С. 174 – 179.
2. Михайлов П.Г., Лапшин В.И., Сергеев Д.А. Моделирование и конструирование кремниевых чувствительных элементов емкостных датчиков давлений // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2013 г № 5. С. 128 – 133.
3. Михайлов П.Г., Варламов А.В. Микроэлектронные датчики. Разработка и проектирование // Датчики и Системы. 2007–№ 8- С. 23-26
4. Ожикенов К.А., Михайлов П.Г., Касимов А.О. Общие вопросы моделирования компонентов и структур микроэлектронных датчиков // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан № 6 2014. С. 27-34.
5. Михайлов П.Г., Ожикенов К.А., Касимов А.О., Аналиева А.У. Узлы и компоненты микроэлектронных датчиков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. № 3(164) 2015 С. 184-193.
6. P.G. Mikhajlov, Yu.N.. Slesarev, V.A. Chulkov Mathematical Modeling of Combined Sensor Information - Measuring Systems International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 11, Number 20 (2016) pp. 10332-10337 © Research India Publications. <http://www.ripublication.com>.
7. Най, Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц. / М.: Мир, 1967. 386 с.
8. Тихоненков, В.А. Теория, расчет и основы проектирования датчиков механических величин / Ульяновск: УлГТУ, 2000. 452 с.
9. Джексон, Р.Г. Новейшие датчики. Справочник. / Р.Г. Джексон, пер. с англ. М.: Техносфера, 2007. 380 с.
10. Ozhikenov K.A., Mikhailov P.G., Ismagulova R.S. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components. // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE).2016. Vol.1. -pp. 84-90.