

Учёт особенностей конечно-элементного метода при моделировании кремниевых преобразователей давления

И.В. Годовицын,
с.н.с., к.т.н., iog@tscen.ru,
П.А.Еремин,
М.Н.С.

НПК "Технологический центр", г. Москва, Зеленоград

Достижение приемлемой точности при расчете характеристик кремниевых преобразователей давления с использованием приближенных аналитических соотношений затруднено из-за сложной геометрии преобразователя. Наиболее эффективным подходом является использование конечно-элементного метода, который позволяет создать модель структуры преобразователя с учётом мельчайших деталей. Однако, разбиение объекта на элементы, размер которых много меньше самого объекта, приводит большому объёму вычислений, что требует использования вычислительной техники большой мощности. В работе обсуждаются подходы, позволяющие обеспечить компромисс между точностью результата и временем, затраченным на расчёт.

Achieving acceptable accuracy in the calculation of output characteristics of silicon pressure transducers using approximate analytical relationships is difficult because of the complex geometry of transducers. The most effective approach is to use the finite element method, which gives opportunity to create a model of the structure of the transducer, taking into account the smallest details. However, splitting an object into elements that are much smaller than the object itself results in a large amount of computations, which requires the use of high-power computing. The paper discusses approaches to reach a trade-off between the accuracy of the result and calculation time.

Конечно-элементное моделирование реализует итерационный подход к решению системы нелинейных уравнений, описывающих модель объекта [1, 2] и позволяет получить зависимости выходных характеристик кремниевых преобразователей давления от конструктивных параметров без существенных материальных и временных затрат [3,4]. Широкое распространение конечно-элементное моделирование получило только в последние десятилетия, когда вычислительная мощность компьютеров стала достаточно высокой. В основе конечно-элементного моделирования лежит разбиение модели на элементы, размер которых значительно меньше самой модели. Каждый элемент имеет связь с соседними элементами, испытывает воздействие с их стороны и воздействие от приложенной нагрузки. Для каждого элемента составляется уравнение равновесия относительно какой-либо физической величины (сила, ускорение, температура, давление и т.д.). Это уравнение будет иметь N неизвестных, где N - количество элементов, на которое разбита модель. Большинство коэффициентов в этом уравнении равны нулю, так как каждый элемент связан не со всеми оставшимися элементами, а только с ближайшими соседями. Вся модель будет описываться системой из N уравнений с N неизвестными. Данную систему уравнений можно представить в следующем виде:

$$\{K\} \cdot \{X\} = \{B\}, \quad (1)$$

где $\{K\}$ – матрица коэффициентов связи, так называемая "матрица жесткости", $\{X\}$ – вектор неизвестных, $\{B\}$ – вектор граничных условий.

Решение системы уравнений (1) достигается путем умножения вектора граничных условий на матрицу, обратную матрице K :

$$\{X\} = \{B\} \cdot \{K\}^{-1}. \quad (2)$$

Недостатком конечно-элементного метода является большой объём вычислений. По этой причине широкое применение конечно-элементного моделирования началось только с развитием вычислительной техники.

Использование конечно-элементного моделирования в разработке кремниевых преобразователей давления дает существенную экономию временных и материальных ресурсов. Наиболее важной проблемой, которую приходится решать при моделировании – нахождение баланса между точностью получаемых результатов и временными затратами. Последние напрямую связаны с компьютерными ресурсами, находящимися в распоряжении разработчика. В большинстве случаев эти ресурсы ограничены настольным компьютером офисной конфигурации. Точность расчета прямо пропорциональна количеству элементов модели, поэтому для получения достоверных результатов необходимо увеличение количества элементов до максимально возможного. Однако, увеличение количества элементов приводит к увеличению времени расчета, причем эта зависимость имеет нелинейный, близкий к экспоненциальному характер. Для получения удовлетворительной точности результатов за приемлемое время необходима оптимизация процесса конечно-элементного моделирования, то есть создание модели, имеющей наименьшее количество элементов и обеспечивающую удовлетворительную точность расчёта.

Структура кремниевого преобразователя давления имеет ряд существенных особенностей, обусловленных как используемыми материалами, так и технологией изготовления [5,6].

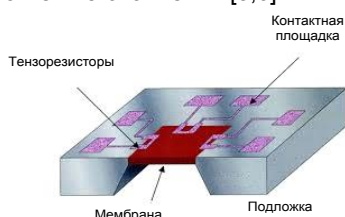


рис. 1 – Структура чувствительного элемента кремниевого преобразователя давления

С точки зрения конструкции, структура кремниевого преобразователя давления имеет те же элементы, что и предшествовавшие не кремниевые (металлические) преобразователи давления (рисунок 1) – мембрана, рамка, тензорезисторы, токоведущие дорожки и др.

Наиболее эффективным подходом, используемым для уменьшения размера модели кремниевого преобразователя давления, является использование симметрии преобразователя, который позволяет проводить расчет модели не полного преобразователя, а половины или четверти. Тем самым размер модели существенно уменьшается. Влияние отброшенной части модели описывается граничными условиями симметрии. В результате, уменьшается время расчёта, что снижает требования к вычислительной мощности вычислительного оборудования.

Другим, не менее эффективным подходом, с помощью которого можно уменьшить размер модели преобразователя давления, служит использование элементов различного размера для описания разных компонентов структуры. Чтобы получить детальную информацию, необходимо наиболее подробно описать данную область, то есть увеличить количество элементов для этого компонента, уменьшив их размер. Другие компоненты структуры, которые не представляют интереса, могут быть описаны меньшим количеством элементов.

Описанные выше подходы использованы при разработке модели кремниевого тензорезистивного преобразователя давления (рисунок 2). Модель имеет компоненты с разными характерными размерами – от 1 мкм (тензорезисторы) до 400 мкм (подложка). При использовании для всей модели элемента с размером 1 мкм ее размер будет очень велик и расчет на обычном компьютере окажется невозможным. Поэтому используются оба подхода к уменьшению размера модели – разбиение на части по плоскостям симметрии и применение элементов разного размера для разных компонентов структуры.

Расчёт основных характеристик кремниевого преобразователя давления может быть проведен с помощью программы конечно-элементного моделирования ANSYS, которая дает возможность расчета тензорезистивных эффектов с учетом анизотропии тензорезистивных и упругих свойств материала [7].

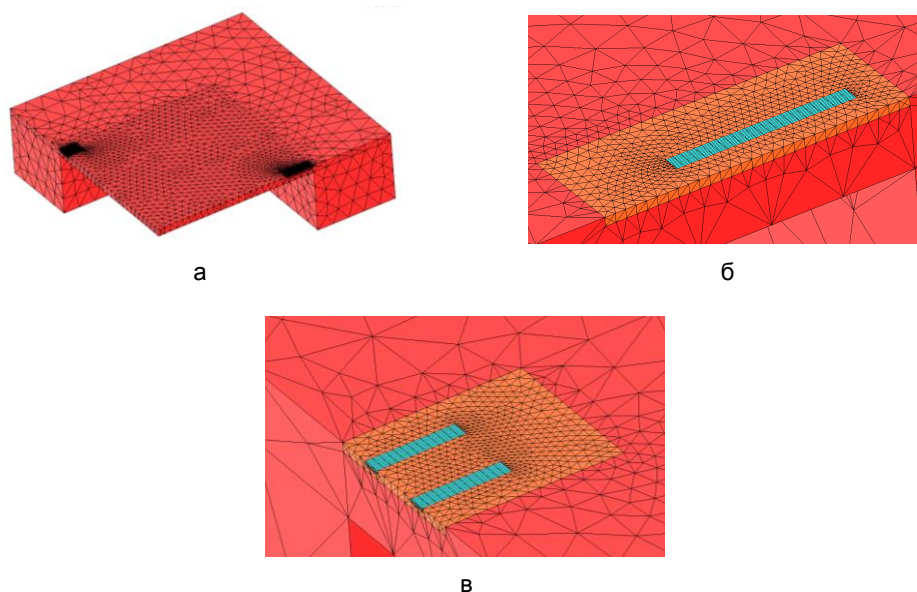


рис. 2 – Модель преобразователя давления после построения сетки:
а – общий вид; б – радиальный тензорезистор; в – тангенциальный тензорезистор

Разработанная модель имеет около 30 тыс. элементов. По оценке, расчет одной точки выходной характеристики для на компьютере офисной конфигурации будет занимать 2-3 минуты. Это время является приемлемым, так как позволяет выполнять значительный объем расчетов за относительно небольшой временной промежуток.

В работе использовалось оборудование ЦКП "Функциональный контроль и диагностика микро- и наносистемной техники" (ЦКП НПК "Технологический центр").

Работы выполнены при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Соглашение № 14.577.21.0245, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI57717X0245).

Литература

1. Обзор современных систем автоматизированного проектирования: рыцари физики эфира – научная библиотека по физике и новым технологиям [электронный ресурс] ULD: <http://www.bourabai.ru/graphics/dir.htm> (дата обращения: 01.12.2017).
2. Introduction to Finite Element Methods: Department of Aerospace Engineering Sciences University of Colorado at Boulder [электронный ресурс] ULD: <http://www.colorado.edu/engineering/cas/courses.d/IFEM.d/> (дата обращения: 01.12.2017).
3. Годовицын И.В., Расчёт деформации электростатических ВЧ-переключателей аналитическим и конечно-элементными методами // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 11. С.41-46.
4. Годовицын И.В., Амеличев В.В., Ильков А.В., Костромин А.Ю., Моделирование микродвигателя на основе КНИ-структуры // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2012. № 1(93). С.43-47.
5. Данилова Н.Л., Панков В.В., Суханов В.С., Михайлов Ю.А. Интегральный преобразователь давления // Патент РФ №2362132. 2009.
6. Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А. О показателе чувствительности конструкции кремниевых тензопреобразователей давления, Датчики и системы. 2008. №10, С. 35–38.
7. Официальный сайт компании ANSYS [электронный ресурс] ULD: www.ansys.com (дата обращения: 01.12.2017).