

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В МОСТОВОЙ СХЕМЕ ТЕНЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КНС

**Пирогов А.В., Стучебников В.М.**

Математическое моделирование физических процессов, происходящих в сплошных средах, в настоящее время находит широкое применение при разработке различных устройств. Для описания работы полупроводниковых тензопреобразователей (ТП) необходимо учитывать довольно сложные зависимости параметров среды области моделирования от пространственных координат и характеристик механического нагружения, анизотропию проводимости и ее нелинейную зависимость от температуры. Кроме того, существенное осложнение в моделировании ТП вносит взаимовлияние распределения электрических и тепловых полей, особенно в нестационарном режиме. Широко распространенные пакеты численного моделирования ANSYS, Algor, NASTRAN, PATRAN и др. не охватывают всей совокупности поставленных физических задач, поэтому нами предпринята попытка разработки собственного программного обеспечения, некоторые применения которого описаны ниже.

ТП механических величин на основе структур кремний на сапфире (КНС), как правило, имеют тензочувствительную схему в виде замкнутого моста [1]. Такая схема имеет более стабильные и воспроизводимые характеристики, чем разомкнутый мост [2]. Дополнительная подгонка начального выходного сигнала производится удалением перемычек кремниевых подстроечных резистора. Типичная топология одного из тензорезисторов, входящих в мостовую схему, приведена на рис. 1. Как видно из рисунка, как тензорезистор, так и подстроечные резисторы являются распределенной структурой.

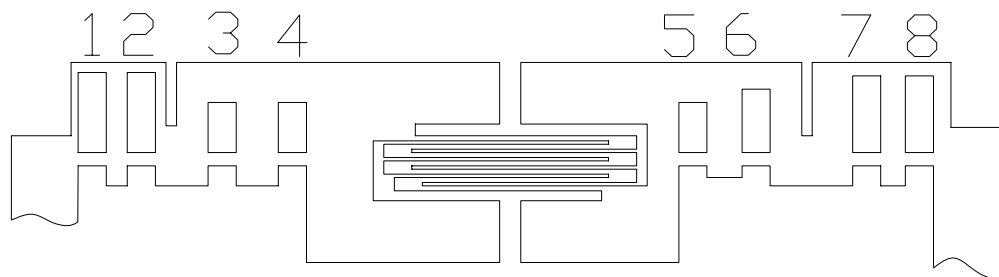


Рис. 1 Фрагмент тензорезистивного моста с пронумерованными подгоночными резисторами

Конечной задачей при расчете топологии тензомоста является определение разности потенциалов на выходных контактах, следовательно, для распределенных структур необходимо найти значения потенциалов во всех точках. При расчете разбаланса тензомоста в зависимости от его топологии малыми изменениями проводимости кремния (в общем случае зависящей от многих факторов) можно пренебречь. Следовательно, проводящую среду (кремний) можно считать однородной. В этом случае распределение электрического потенциала описывается уравнением,

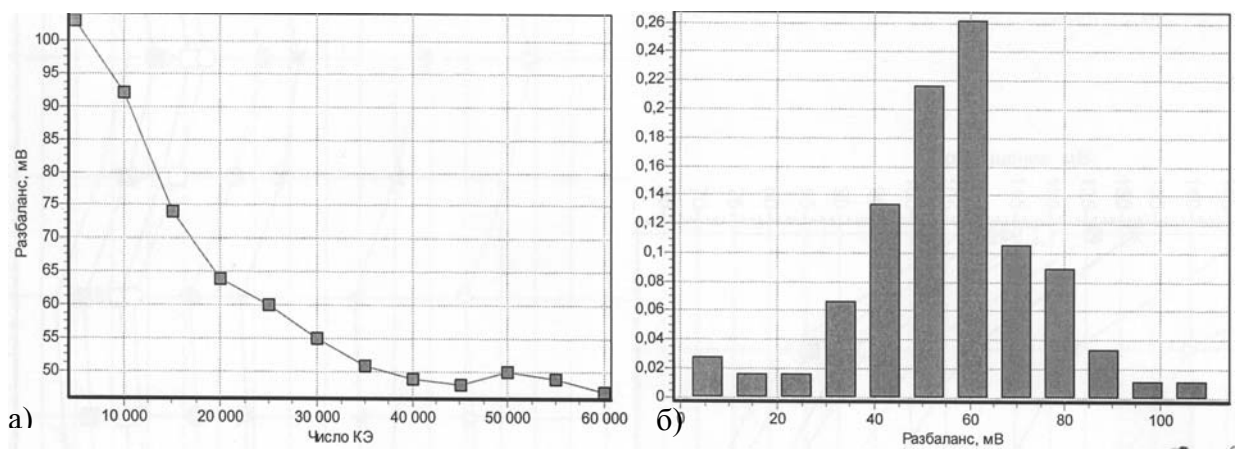


Рис 2. Выходной сигнал чувствительных элементов, используемых при производстве датчиков давления МИДА. а) Расчетная зависимость начального разбаланса от числа КЭ б) Экспериментальное распределение начального выходного сигнала тензомоста.

$$\operatorname{div}(\operatorname{grad}\varphi) = 0.$$

Данного уравнения, с учетом граничных условий, вполне достаточно для анализа тонкопленочных резисторов. Если предположить, что толщина тензорезистора также постоянна, то задача сводится к двумерной.

Решение приведенного уравнения, за исключением некоторых простых случаев, возможно только численными методами. Из-за сложной геометрической формы области моделирования наиболее подходящим методом является метод конечных элементов (МКЭ).

Вопросы по применению МКЭ достаточно подробно описаны в литературе, например [3]. Приведем характерные особенности метода, использованные нами. Область моделирования разбивалась на множество конечных элементов (КЭ) – треугольников. Разбиение выполнялось автоматически с использованием алгоритма, описанного в [4]. Изменение потенциала в треугольнике аппроксимировалось линейной зависимостью от координат точек. По этой аппроксимации и заданным граничным условиям формировалась система линейных уравнений, которая решалась итерационными методами. В результате решения этой системы находились значения в узлах сетки.

Очевидно, что при достаточно сложной геометрии протекания тока точность моделирования будет зависеть от размера треугольников, причем размер КЭ должен быть меньшим в областях с большими градиентами потенциала. Кроме того, не последнюю роль играет форма треугольников: чем больше отношение значения максимального угла в треугольнике к минимальному, тем больше будет погрешность счета. Поэтому при решении задач каким-либо сеточным методом необходимо последовательно сгущать сетку, пока не прекратится существенное изменение результата решения. Дальнейшее сгущение сетки может привести к возрастанию ошибок счета, вызванному погрешностью машинной арифметики.

Для моделирования распределения электростатического поля в тонкопленочных тензорезисторах был разработан пакет ElStat. Данный пакет включает в себя простейший графический редактор, конвертор DXF файлов во внутренний формат, генератор треугольных сеток, модуль итерационного решения систем линейных уравнений и модуль управлением работой пакета с встроенным языком программирования.

На рис. 2 приведены расчетные значения разбаланса и экспериментально полученное распределение выходного сигнала мостовых тензочувствительных элементов, используемых при производстве датчиков давления МИДА [5]. Как видно из рисунка 2а, существует некое минимальное число КЭ, когда погрешность, обусловленная разбиением, не превышает погрешности вычислений, причем это число зависит от конфигурации области моделиро-

вания. Экспериментальное значение начального разбаланса равно  $58 \pm 19$  мВ, расчетное –  $49 \pm 2$  мВ.

Была проверена также применимость разработанного программного обеспечения для определения разбаланса, вносимого подстроечными резисторами (рис. 1) при удалении пемычек. Сопоставление экспериментального и расчетного значений величин разбаланса проведено в таблице.

№ рез.	1	2	3	4	5	6	7	8
Экспер.	61	44	6	4	8	12	19	26
Расчет	58	42	6	4	9	11	19	25

По приведенным результатам видно, что с учетом технологического разброса параметров тонкопленочной мостовой схемы точность расчетов можно считать вполне удовлетворительной.

#### Литература

1. Белоглазов А.В. и др. Полупроводниковые тензопреобразователи силы и давления на основе гетероэпитаксиальных структур “кремний на сапфире” // Приборы и системы управления. 1982. № 5. с. 21,22,27.
2. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.
3. Зинкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 541 с.
4. Joe B., Simpson R. B. Triangular meshes for regions of complicated shape // Intern. J. Num. Math. Eng. 1986. vol. 23. pp. 751-778.
5. Бушев Е.Е., Николайчук О. Л., Стучебников В. М. Серия микроэлектронных датчиков МИДА // Датчики и системы. 2000. №1. с. 21-27.