

УДК 531.781.2

А. И. Котлов, А. Е. Обушев,
Е. М. Павлов**ВЫБОР ГЕОМЕТРИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ТЕНЗО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОНСОЛЬНОГО ТИПА**

Проанализировано напряженно-деформированное состояние ряда моделей кремниевых интегральных тензопреобразователей численным методом. Приведены рекомендации по выбору рациональной геометрии преобразователей консольного типа, соответствующей наибольшему диапазону измеряемых величин при максимально возможной предельной деформации и достаточном запасе прочности.

Принцип действия тензометрических преобразователей [1], или тензорезисторов, основан на изменении электрического сопротивления материалов их чувствительных элементов при деформировании. Предпочтительными являются полупроводниковые интегральные тензопреобразователи, отличающиеся высокой чувствительностью и отличными метрологическими качествами, а также возможностью миниатюризации. Интегральные тензопреобразователи содержат обычно полные мостовые схемы.

Рассмотрим одну из типовых конструкций полупроводникового чувствительного элемента (акселерометра консольного типа) размером $b \times l$ ($b = 1$ мм; $l = 3,4$ мм), состоящего из трех частей (рис. 1).

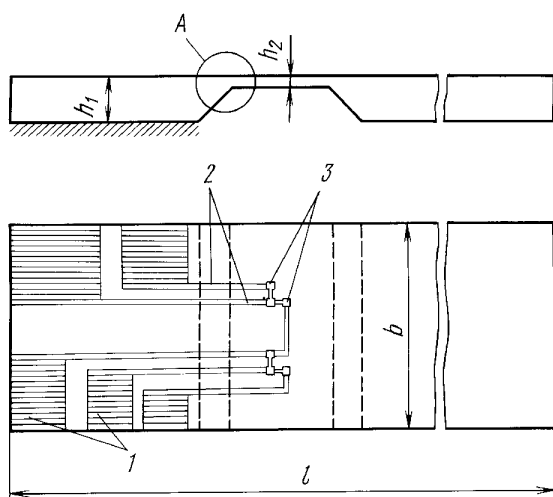


Рис. 1. Типовая конструкция полупроводникового чувствительного элемента

Чувствительный элемент левой частью ($h_1 = 0,26$ мм) приклеивается к объекту, правая (такой же толщины) служит массой, перемещая которую можно определить ускорение исследуемого объекта. Тензорезисторы располагают в зоне упругой перемычки, толщину которой делают малой ($h_2 = 0,052$ мм) для получения больших деформаций.

Четыре тензорезистора 3 (см. рис. 1) образуют полную мостовую схему, к которой подведены проводники 2, заканчивающиеся контактными площадками 1. Перемычку можно получить [2] двумя способами — анизотропным травлением или обработкой лазером. При любом из этих способов внутренние углы имеют малый радиус скругления. В случае изгиба рабочей части преобразователя в этих углах возникает концентрация напряжений [3, 4], значительно снижается прочность консольного элемента.

Решая задачу о напряженно-деформированном состоянии (НДС) интегрального тензопреобразователя, можно рационально выбрать место расположения тензорезисторов (зоны 3, см. рис. 1). Эти зоны необходимо расположить в местах максимальных продольных деформаций.

Проще всего такое решение можно получить методом конечных элементов (МКЭ).

Эпюра нормальных продольных напряжений σ_x в зоне A изменения толщины преобразователя изображена на рис. 2, где в районе галтели заметна концентрация напряжений.

Полученное поле эквивалентных напряжений σ_{eqv} , подсчитанных в соответствии с теорией начала разрушения Мора [5], изображено на рис. 3, а, а поле продольных деформаций ε_x — на рис. 3, б. Графики из-

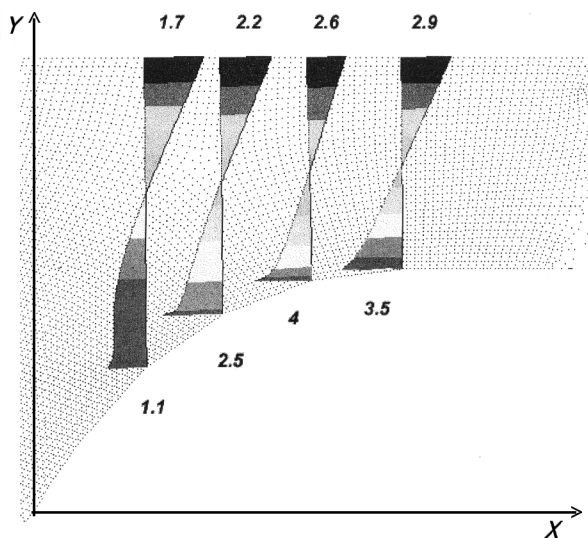


Рис. 2. Эпюры нормальных продольных напряжений σ_x

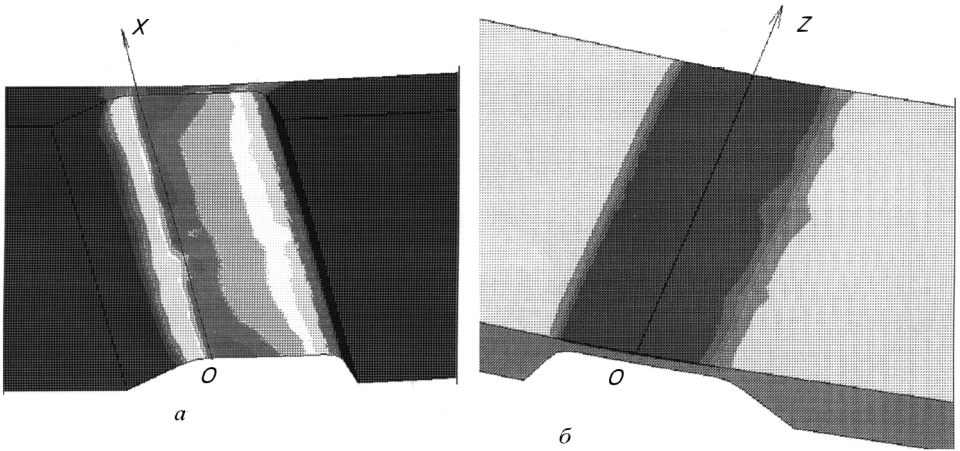


Рис. 3. Поля эквивалентных напряжений σ_{eqv} (а) + и продольных деформаций ϵ_x (б)

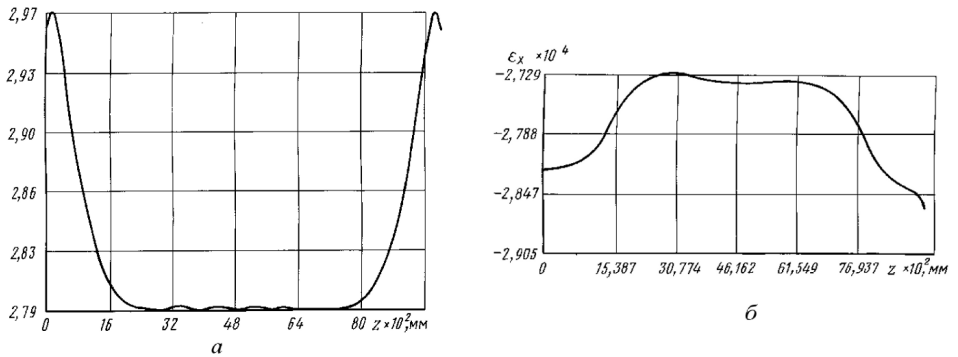


Рис. 4. Графики изменений эквивалентных напряжений σ_{eqv} (а) и продольных деформаций ϵ_x (б)

менения эквивалентных напряжений σ_{eqv} и продольных деформаций ϵ_x вдоль оси Z изображены на рис. 4, а и б.

Максимум эквивалентных напряжений расположен у внешних краев упругой перемычки тензопреобразователя, в то время как распределение продольных деформаций практически постоянно по ширине этого чувствительного элемента. При разрушении реального тензопреобразователя рост трещины начинается от внешних краев, что подтверждается расчетом.

Предположим, что в результате некоторого изменения геометрии преобразователя удастся смягчить влияние концентрации напряжений на его прочность, сохранив при этом желаемый уровень продольных деформаций ϵ_x в рабочей зоне датчика. Было проанализировано несколько моделей тензопреобразователей (рис. 5, а–е).

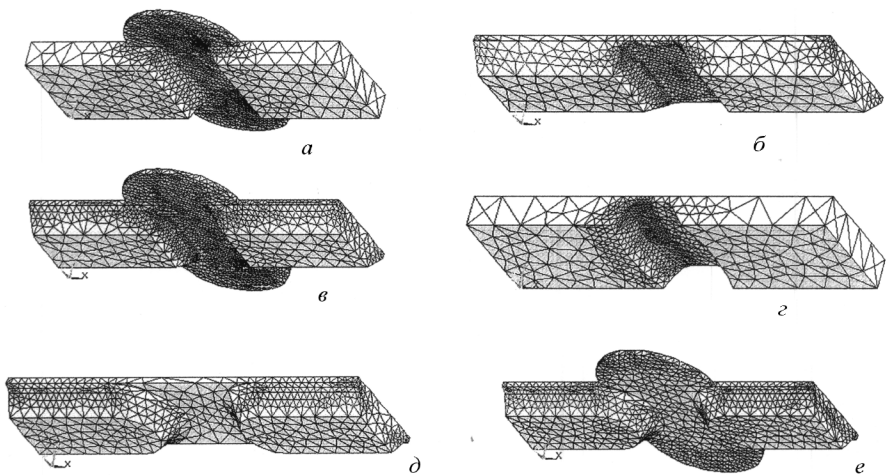


Рис. 5. Модели тензопреобразователей:

a — с “ушками”, *б* — с боковыми фасками; *в* — с “ушками” и боковыми фасками; *г* — с вогнутостью внутрь; *д* — с фасками и выпуклостью наружу; *е* — с “ушками”, фасками и выпуклостью наружу

Таблица

№ модели	$\sigma_{\text{eqv}}^{\text{max}}$, МПа	ε_x	s	$(\varepsilon_x)_{\text{lim}}$
1	31,4	$-2,86 \cdot 10^{-4}$	1,41	$-4,04 \cdot 10^{-4}$
2	45,0	$-2,90 \cdot 10^{-4}$	0,96	$-2,77 \cdot 10^{-4}$
3	30,8	$-2,82 \cdot 10^{-4}$	1,45	$-4,08 \cdot 10^{-4}$
4	38,5	$-2,85 \cdot 10^{-4}$	1,13	$-3,23 \cdot 10^{-4}$
5	44,8	$-3,12 \cdot 10^{-4}$	1,03	$-3,21 \cdot 10^{-4}$
6	34,0	$-2,53 \cdot 10^{-4}$	1,28	$-3,23 \cdot 10^{-4}$
7	33,5	$-2,43 \cdot 10^{-4}$	1,23	$-2,99 \cdot 10^{-4}$

Хотя характер распределения эквивалентного напряжения изменялся от модели к модели, максимум эквивалентного напряжения в модели 1 (см. рис. 3, *a*) имел наименьшую величину, что соответствует наибольшему запасу прочности. Величина продольной деформации ε_x в исследуемой зоне для тензопреобразователей различных моделей практически не меняется.

Результаты расчета представлены в виде таблицы и приведены на диаграмме (рис. б). В таблице введены следующие обозначения: $s = \sigma_b / \sigma_{\text{eqv}}^{\text{max}}$ — коэффициент запаса по началу разрушения; $(\varepsilon_x)_{\text{lim}} = \varepsilon_x s$ — продольная деформация в предельном состоянии. Величина $(\varepsilon_x)_{\text{lim}}$ служит мерой чувствительности интегрального тензопреобразователя.

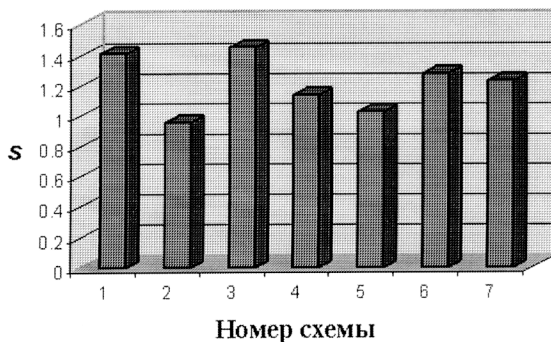


Рис. 6. Диаграмма запаса прочности s различных схем тензопреобразователей (1...7 — см. рис. 5, а...е соответственно)

Анализируя НДС моделей тензопреобразователей с различной геометрией, выявили, что модель 3 с боковыми фасками (см. рис. 4, б) более удачная, по сравнению с базовой (см. рис. 1). При сохранении такого же уровня продольных деформаций в зонах организации мостовой схемы, у модели 3 ниже концентрация напряжений. Сложность изготовления тензопреобразователей подобной модели не намного превышает сложность изготовления базовой, а в ряде случаев подобную модель изготовить даже проще, поэтому модель 3 тензопреобразователя с боковыми фасками стоит рекомендовать к производству.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Элементы приборных устройств. Ч.2 / Под ред. Тищенко О.Ф. – М.: Высшая школа, 1983. – 265 с.
2. Венгин С. И., Чистяков А. С. Технический кремний. – М.: Metallurgy, 1972. – 208 с.
3. Петерсон Н. Коэффициенты концентрации напряжений. – М.: Мир, 1980. – 320 с.
4. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М., 1979. – 560 с.
5. Гольденблат И. И., Копнов В. А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. – М.: Машиностроение, 1968. – 192 с.

Статья поступила в редакцию 26.04.2002

Александр Иванович Котов родился в 1944 г., окончил в 1967 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области динамики и прочности машин и приборов.

A.I. Kotov (b. 1944) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1967. Ph. D. (Eng.), ass. professor of “Applied Mechanics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 30 publications in the field of dynamics and strength of machines and devices.



Андрей Евгеньевич Обушев родился в 1976 г., окончил в 1999 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Прикладная механика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области механики деформируемых тел и теории прочности машин.

A.Ye. Obushev (b. 1976) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1999. Post-graduate of “Applied Mechanics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of mechanics of deformed bodies and theory of strength of machines.



Евгений Михайлович Павлов окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Элементы приборных устройств” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 научных работ в области приборостроения.

Ye.M. Pavlov graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School. Ph. D. (Eng.), ass. professor of “Elements of Instrument Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of over 10 publications in the field of instrument engineering.

**В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
имеется в продаже книга**

Светлицкий В.А.

Статистическая механика и теория надежности: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 504 с.: ил.

ISBN 5-7038-1772-2 (в пер.)

Изложены основные разделы статистической механики, основы теории надежности и их использование в практике проектирования приборов, машин и конструкций в различных отраслях промышленности. Описана теория случайных колебаний механических систем с конечным числом степеней свободы и систем с распределенными параметрами. Приведены методы численного решения прикладных задач статистической динамики; рассмотрены теория и численные методы определения надежности элементов конструкций, а также нетрадиционные задачи, при решении которых нельзя воспользоваться методами статистической динамики. Содержание учебника соответствует курсу лекций, который автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Книга предназначена для студентов технических университетов, аспирантов и инженеров-механиков, работающих в различных отраслях машиностроения.