

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ БИПОЛЯРНОГО ТЕНЗОТРАНЗИСТОРА

MODELING OF SENSITIVE ELEMENT FOR PRESSURE SENSOR BASED ON BIPOLAR PIEZOTRANSISTOR

Басов Михаил Викторович

инженер-технолог I категории

E-mail: basov.vniia@gmail.com

Пригодский Денис Михайлович

вед. инженер-исследователь

E-mail: dprigodskiy@gmail.com

Холодков Денис Анатольевич

нач. отдела

E-mail: hdenis79@yandex.ru

Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова, Москва

Аннотация: Проведено моделирование высокочувствительной микроэлектромеханической системы (МЭМС) преобразователя давления, основанной на функционировании электрической схемы дифференциального каскада с тензочувствительными активными (биполярные $n-p-n$ транзисторы) и пассивными (резисторы p -типа) элементами. Анализ тензочувствительности проводился на основе разработанной математической модели для кристалла датчика давления с электрической схемой тензорезистивного моста и теоретических выводов относительно изменения электрических параметров биполярного транзистора при воздействии деформации.

Ключевые слова: чувствительный элемент, давление, пьезорезистивный эффект, анизотропия подвижности, дифференциальный каскад, тензотранзистор, тензорезистор, метод конечных элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Непрерывно растущая потребность в полупроводниковых преобразователях датчиков давления (ДД) приводит к развитию новых типов кремниевых интегральных чувствительных элементов (кристаллов, выполненных в виде МЭМС) с электрической тензосхемой резистивного моста Уитстона (кристалл ТМ) (рис. 1, а) [1]. Критерии функционирования МЭМС определяют области применения данных разработок. В настоящий момент актуальным направлением исследований в области параметрических возможностей МЭМС является задача, связанная с повышением выходной тензочувствительности элемента. Известны разработки кристаллов ДД [2–6], в которых достижение требуемого значения тензочувствительности было получено благодаря изменению гео-

Basov Mikhail V.

First Rank Process engineer

E-mail: basov.vniia@gmail.com

Prigodskiy Denis M.

Leading Engineer-Researcher

E-mail: dprigodskiy@gmail.com

Holodkov Denis A.

Head of Department

E-mail: hdenis79@yandex.ru

All-Russian Research Institute of Automatics, Moscow

Abstract: The paper describes modeling of high-sensitivity MEMS pressure sensor based on a circuit containing both active and passive stress-sensitive elements: a differential amplifier utilizing two $n-p-n$ transistors and four p -type piezoresistors. The analysis on the basis of the developed mathematical model for a pressure sensor with traditional piezoresistive Wheatstone bridge and theoretical conclusions regarding the change in the electrical parameters of a bipolar transistor under the influence of deformation was carried out.

Keywords: sensitive element, pressure, piezoresistive effect, anisotropy of mobility, on-chip differential amplifier, piezotransistor, piezoresistor, finite element method.

метрической структуры мембраны кристалла: изменялось количество жестких центров (ЖЦ) и их площадь, увеличивалась площадь мембраны или уменьшалась ее толщина. В свою очередь, данные изменения приводят к отрицательным факторам,

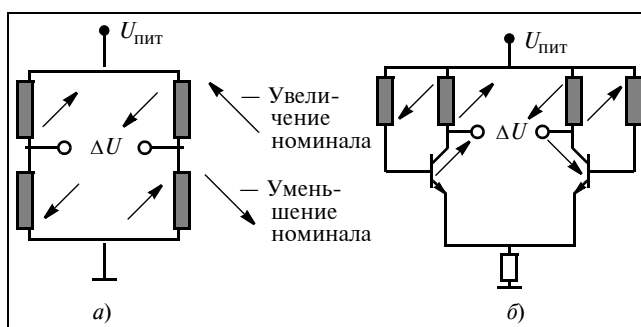


Рис. 1. Вид электрических тензосхем кристаллов:
а — мост Уитстона; б — дифференциальный каскад

которые связаны с увеличением габаритных размеров кристалла или с уменьшением порогового значения давления разрушения для кремниевой структуры мембраны.

Разработка кристалла ДД с электрической тензосхемой дифференциального каскада (кристалл ТДК) (рис. 1, б), где чувствительными к давлению являются как пассивные элементы в виде тензорезисторов (ТР) *p*-типа, так и активные в виде биполярных тензотранзисторов (БТТ) *n-p-n*-типа, способна существенно повысить выходную тензочувствительность относительно аналогов — кристаллов ТМ.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛА ТМ

Построим математическую модель кристалла ТМ по расчету чувствительности и сравним полученные результаты с измерениями серийных образцов (использовано 110 кристаллов ТМ). В дальнейшем используем верифицированную математическую модель для раскрытия принципов функционирования кристалла ТДК. Сравнительный анализ кристаллов с разными видами тензосхем (кристаллы ТМ и ТДК) будет проведен при условии использования одинаковой геометрии мембраны (рис. 2), размеры которой представлены в табл. 1.

Теоретические исследования тензоэффекта устанавливают взаимосвязь между изменением электрического сопротивления области полупроводника и механическим напряжением в кремниевой структуре при деформации.

Расчет изменения сопротивления при подаче давления проводился с использованием механических напряжений, формирующихся на поверхности мембраны в областях расположения ТР. Это связано с тем, что основной заряд в ТР, выполненных с помощью процесса диффузии или ионного легирования, проходит рядом с поверх-

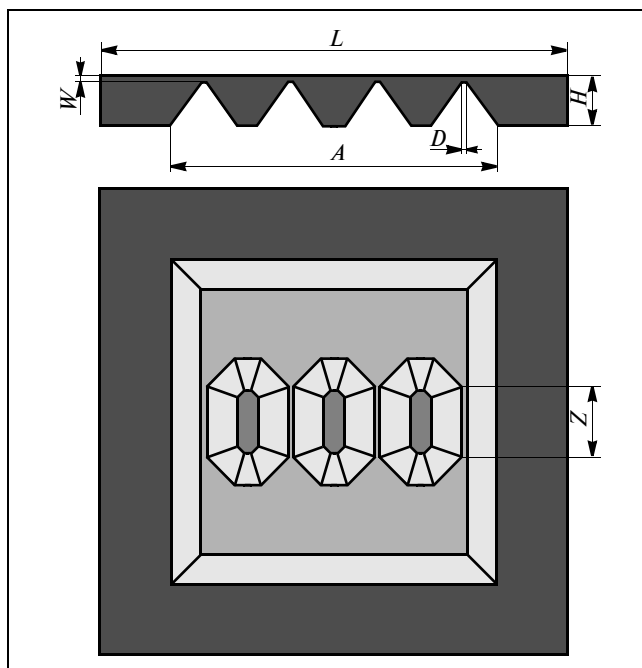


Рис. 2. Геометрическая структура мембранной части кристалла: *L* — длина стороны кристалла (кристалл имеет квадратную форму); *W* — толщина мембраны; *H* — толщина кристалла; *A* — длина стороны мембраны (мембрана имеет квадратную форму); *D* — ширина канавки между жесткими центрами или жестким центром и рамкой; *Z* — длина ребра жесткого центра

ностью. В рассматриваемом случае ТР имеет форму прямоугольника с шириной 20 мкм и длиной 400 мкм, поэтому в расчетах использовались усредненные значения напряжений по площади ТР.

Механические напряжения в кремнии рассматриваются при подаче давления $\Delta P = 100$ кПа со стороны мембраны кристалла для трех видов тонкой части упругого элемента (см. рис. 2 и табл. 1) с варьируемым значением толщины мембраны *W* для дальнейшего сравнительного анализа относительно серийных образцов (*W* = 33; 42; 63 мкм).

Два ТР электрической схемы моста Уитстона расположены в зоне максимального сжатия, т. е. между утолщенной областью мембраны (рамкой) и ЖЦ, и их сопротивление увеличивается при подаче давления, два других ТР расположены в зоне максимального растяжения, т. е. между двумя ЖЦ, и их сопротивление уменьшается при подаче давления. Изменение выходного сигнала кристалла ТМ при подаче давления зависит от изменения сопротивления ТР следующим образом:

$$\Delta U = U_{\text{пит}} \times \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{((R_1 + \Delta R_1) + (R_4 + \Delta R_4))((R_2 + \Delta R_2) + (R_3 + \Delta R_3))},$$

Таблица 1
Основные геометрические параметры кристалла (образцы 1, 2, 3)

Параметр мембраны	1	2	3
	Размер, мкм		
<i>L</i>		4000	
<i>W</i>	33	42	63
<i>H</i>		420	
<i>A</i>		2280	
<i>D</i>		41	
<i>Z</i>		490	

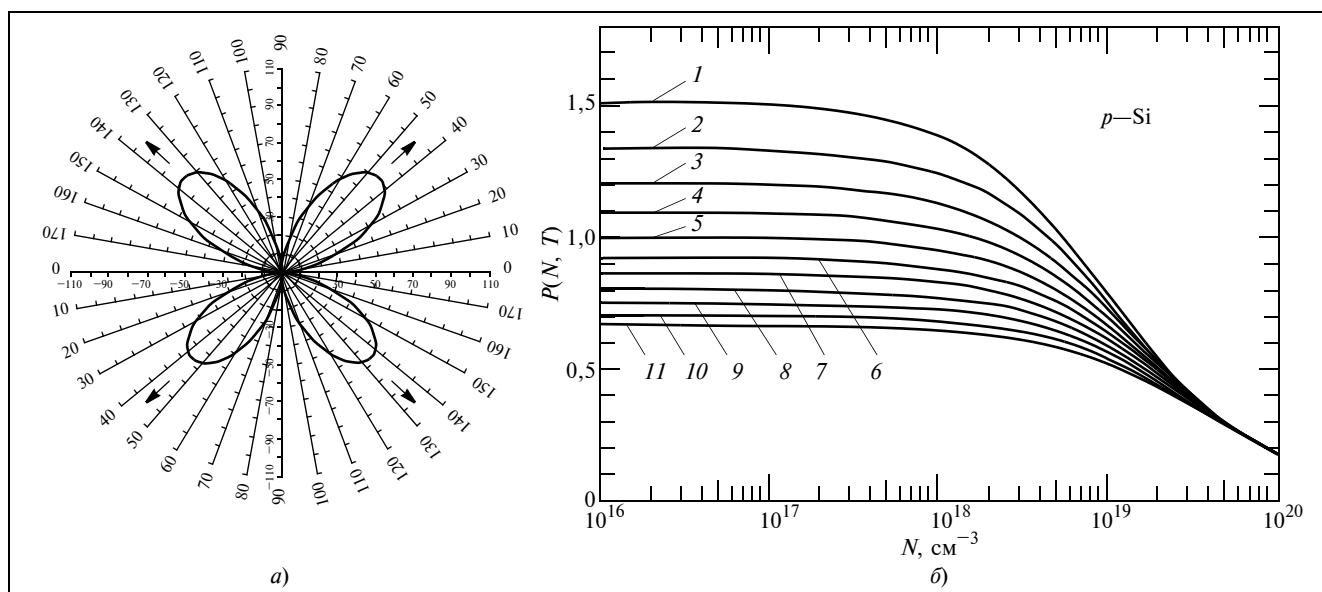


Рис. 3. Зависимость пьезорезистивных коэффициентов для *p*-типа кремния:

a — в кристаллографической плоскости (100) при комнатной температуре от кристаллографического направления; *б* — от концентрации и температуры; 1 — $T = -75\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — $T = -50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 — $T = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 — $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 — $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; 6 — $T = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 7 — $T = 75\text{ }^{\circ}\text{C}$; 8 — $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 9 — $T = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$; 10 — $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$; 11 — $T = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$

где ΔU — изменение выходного сигнала тензосхемы при подаче давления, мВ; $U_{\text{пит}}$ — напряжение питания тензосхемы, В; $R_{1,3}$ и $R_{2,4}$ — сопротивления ТР, расположенных, соответственно, в зоне сжатия и растяжения мембраны при подаче давления со стороны мембраны, Ом; $\Delta R_{1,2,3,4}$ — абсолютное изменение сопротивлений ТР, Ом.

Формулу для относительного изменения сопротивления ТР можно записать следующим образом:

$$\delta = \Delta R/R = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_s \sigma_s,$$

где π_l , π_t , π_s — продольный, поперечный и сдвиговый пьезорезистивные коэффициенты кремния, соответственно, Па^{-1} ; σ_l , σ_t , σ_s — продольное, поперечное и сдвиговое механическое напряжение в области ТР соответственно, Па.

В статье рассматривается кристалл, который был изготовлен в кристаллографической плоскости (100) и ТР направлен в кристаллографическом направлении [110]. В данном случае сдвиговый пьезорезистивный коэффициент π_s равен нулю [7, 8]. В работах [9–12] представлены способы определения значений для π_l и π_t (рис. 3, *a*). При расчете необходимо учитывать технологические аспекты создания ТР — метод получения легированных слоев и значение поверхностной концентрации примеси N_S (рис. 3, *б*). В рассматриваемом случае используется метод ионного легирования с концентрацией $N_S = 3,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Также имеется зависимость пьезорезистивных коэффициентов от температуры, но в данной работе ограничимся анализом случая только при комнатной температуре ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$). В итоге получены следующие значения для коэффициентов $\pi_l = -\pi_t = 6,12 \cdot 10^{-9} (\text{Па}^{-1})$. Значения σ_l продольного и σ_t поперечного механического напряжения определены с помощью компьютерного моделирования и представлены в табл. 2.

Моделирование проводилось методом конечных элементов в программном пакете ANSYS. Оптимизация задействованных компьютерных ресурсов и точности конечного решения осуществлялась выбором параметров разбиения геометрической модели кристалла на сетку конечных элементов (КЭ). Использовались прямоугольные КЭ размером 50 мкм с локальным уменьшением до 15 мкм в местах расположения ТР. Такой подход позволяет уменьшить время расчета и увеличить его точность без увеличения задействованных компьютерных ресурсов.

При данной геометрии мембраны механические напряжения, получаемые на ТР в зонах сжатия и растяжения, фактически равны по абсолютному значению и противоположны по знаку. Пример распределения механических напряжений для мембраны с толщиной $W = 33 \text{ мкм}$ (образец 1) показан на рис. 4.

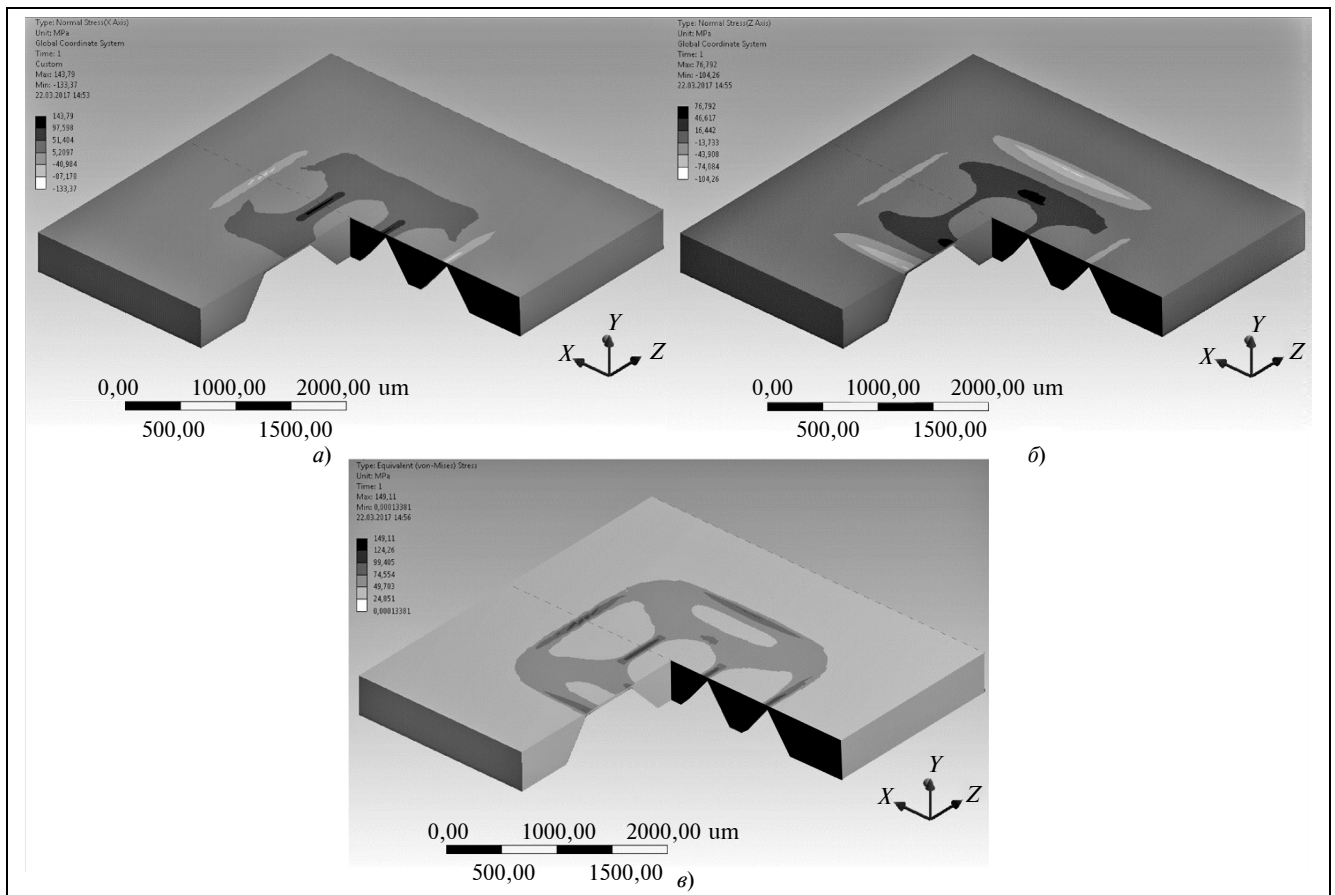


Рис. 4. Распределение механических напряжений в кристалле с толщиной мембраны $W = 33$ мкм:
a — в поперечном направлении относительно расположения ТР; *б* — в продольном направлении относительно расположения ТР;
в — по фон Мизесу

Расчет выходной тензочувствительности S кристалла ТМ проводился по формуле:

$$S = \frac{\Delta U_0}{U_{пит} \Delta P},$$

где ΔP — значение подаваемого давления, кПа.

Значения выходной тензочувствительности представлены в табл. 2. На рис. 5 показаны графики зависимости выходной тензочувствительности

от толщины мембраны W . Результаты моделирования достаточно точно прогнозируют работу кристалла ТМ, т. е. относительное изменение номиналов тензоэлементов при подаче давления и, как следствие, выходную тензочувствительность.

Расхождение средних значений чувствительности серийных образцов с расчетными данными составляет 5...10 %. Чувствительность кристалла ТМ зависит от геометрии мембраны, а также от

Таблица 2

Моделируемые параметры тензоэффекта ТМ (образцы 1, 2, 3)

Параметр		Значение						Размерность
		1		2		3		
		Растяжение			Сжатие			
Пьезорезистивный коэффициент	π_l	$6,12 \cdot 10^{-10}$						1/Па 1/Па МПа МПа МПа
Механическое напряжение	σ_l	$-6,12 \cdot 10^{-10}$						
	σ_f	111	66	27	-111	-65	-26	
	Σ	34	21	8	-30	-18	-7	
		98	58	23	99	59	23	
Образцы		1		2		3		— мВ/кПа/В
Тензочувствительность кристалла ТМ	S	0,487		0,283		0,113		
Тензочувствительность кристалла ТМ (практика)		0,511		0,305		0,126		

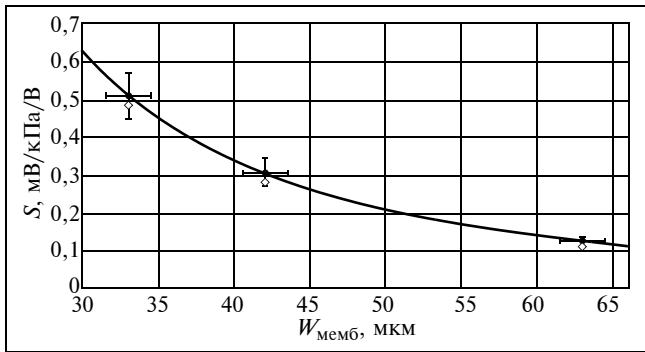


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных данных зависимости тензочувствительности S от толщины мембраны W : —●— — S (серийные образцы), мкВ/кПа/В; ◇ — S (моделирование), мкВ/кПа/В

концентрации носителей заряда и распределения примеси по глубине легированного слоя, являющегося ТР. Вероятно, такое расхождение связано с проблемой точного выбора этих параметров, используемых в моделировании. Тем не менее, полученный уровень расхождения позволяет с высокой степенью достоверности проводить расчет чувствительности для чувствительных элементов давления.

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛА ТДК

Вышеописанная математическая модель может быть использована при проектировании рабо-

ты кристалла ТДК. Для дополнения модели необходимо раскрыть принцип воздействия давления на биполярный транзистор (БТТ) и получить теоретические значения относительного изменения параметров транзистора.

По результатам литературного обзора [13–21] и анализа экспериментального образца в виде единичного БТТ (соединение по схеме с общим эмиттером), отдельно расположенного на тонкой части упругого элемента кристалла ТМ (рис. 6), сформировалась теоретическая основа для исследования БТТ, состоящая из двух эффектов:

- анизотропии подвижности основных носителей заряда в базовой области;
- тензоэффекта на сопротивлении базовой области.

Эффект анизотропии подвижности основных носителей заряда в базовой области кремниевого БТТ (в данном случае в p -типе) при воздействии деформации связан с расщеплением двукратно вырожденной по энергии валентной зоны Бриллюэна в точке $k = 0$. При этом один из эллипсоидов постоянной энергии смещается вверх (по оси со значением энергии) и имеет показания эффективной массы “легких” дырок, а второй — смещается вниз с эффективной массой “тяжелых” дырок. Отношение значений подвижности дырок

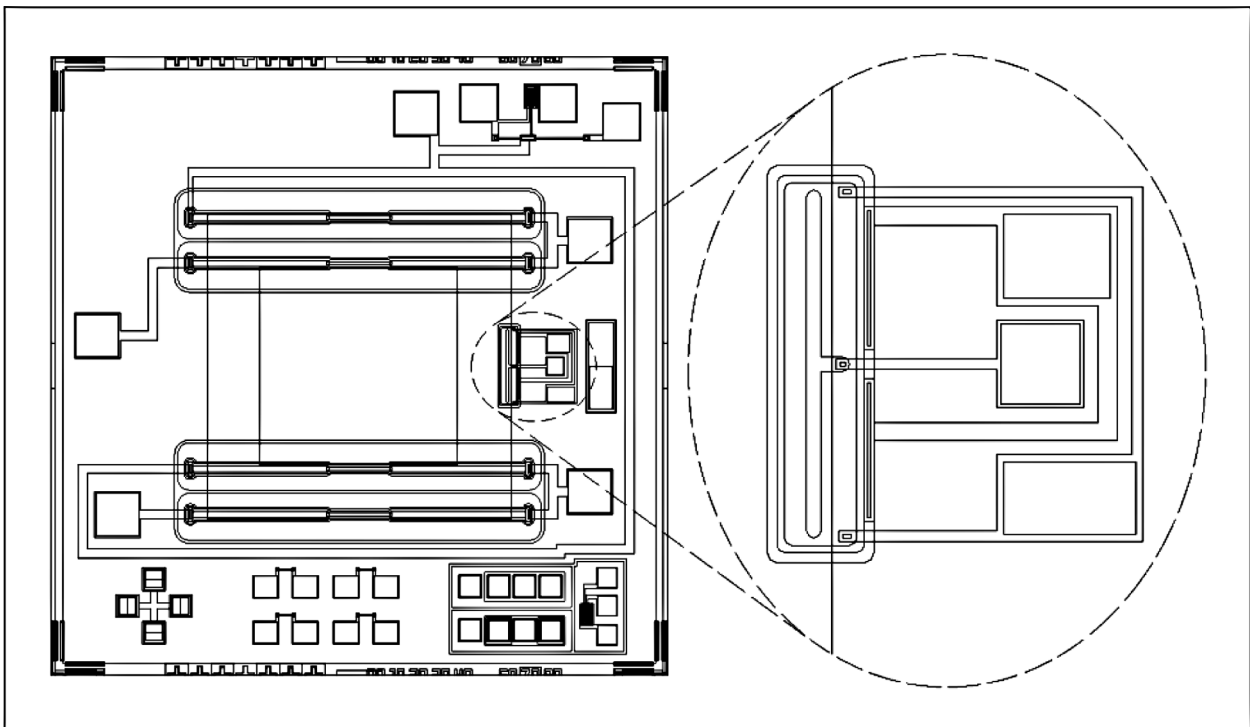


Рис. 6. Кристалл ТМ с отдельно сформированным БТТ

при деформации и без деформации может быть выражено следующим образом:

$$\frac{\mu_p}{\mu_{p0}} = \frac{m_{л}^{1/2}}{m_{л}^{1/2} + m_{т}^{1/2}} \frac{1 + \frac{m_{т}^{1/2}}{m_{л}^{1/2}} K'^{3/2} \exp\left(\frac{(\Delta E'_{v1} - \Delta E'_{v2})\sigma}{kT}\right)}{1 + K'^{3/2} \exp\left(\frac{(\Delta E'_{v1} - \Delta E'_{v2})\sigma}{kT}\right)},$$

где $m_{л,т}$ — эффективная масса “легких” и “тяжелых” дырок соответственно, кг; $K' = m_1/m_2$, $m_{1,2}$ — эффективные массы в минимумах зоны проводимости; $\Delta E'_{v1} - \Delta E'_{v2}$ — коэффициент расщепления вершины валентной зоны, эВ/Па; σ — механическое напряжение в области БТТ, Па; k — постоянная Больцмана, эВ/К; T — температура, К.

Работа кристалла ТДК происходит при небольших деформациях, т. е. в случае, когда $\Delta E_G < kT$, где ΔE_G — изменение ширины запрещенной зоны, эВ, а kT — это тепловая энергия, равная при комнатной температуре 25,7 мэВ (при $\Delta E_G > kT$ основной вклад в значение коллекторного тока ΔI_K вносит изменение собственной проводимости Δn_i). В качестве механических напряжений принимается значение напряжения по фон Мизесу с коэффициентом 0,5 [20] для кристаллографического направления [110]. Значения $m_{л,т}$ — это табличные величины, равные соответственно $m_{л} = 0,12m_0 = 1,093 \cdot 10^{-31}$ кг и $m_{т} = 0,44m_0 = 4,001 \cdot 10^{-31}$ кг, где m_0 — масса свободного электрона, равная $9,11 \cdot 10^{-31}$ кг. Эффективные массы в минимумах зоны проводимости в данных условиях считаются фактически одинаковыми $m_1 = m_2$. Параметр расщепления вершины валентной зоны в кристаллографической плоскости (100) также является табличной величиной, одинаковой для простого одноосного сжатия и растяжения кремниевой структуры, и равен

$$\Delta E'_{v1} - \Delta E'_{v2} = 2,38 \cdot 10^{-11} \text{ эВ/Па.}$$

Ток коллектора БТТ при воздействии деформации равен:

$$\frac{I_K}{I_{K0}} = \left(\frac{\mu_p}{\mu_{p0}}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{\Delta E'_G \sigma}{kT}\right),$$

где ΔE_G — коэффициент изменения ширины запрещенной зоны, является табличной величиной ($\Delta E_G \text{ раст} = -3,57 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па и $\Delta E_G \text{ сжат} = -7,39 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па). Значения относительного изменения тока коллектора $\delta I_K \text{ аниз}$, связанного с эффектом анизотропии подвижности, представлены в табл. 3.

Тензоэффект на сопротивлении базовой области БТТ (база p -типа) свидетельствует о том, что значение коллекторного тока обратно пропорционально изменению номинала сопротивления в базовой области $\Delta I_K \text{ тенз} \sim 1/\Delta R_B$. Для достижения наибольшей эффективности БТТ по тензочувствительности необходимо, чтобы относительное изменение тока коллектора по ранее описанному эффекту и по тензоэффекту на сопротивлении базовой области имели одинаковый знак. Таким образом, БТТ, находящийся в левой ветви дифференциального каскада (см. рис. 1, а), т. е. у которого при подаче давления со стороны мембраны возрастает ток коллектора $\Delta I_K > 0$, необходимо располагать между рамкой и ЖЦ (зона сжатия) в радиальном расположении, так как в данном случае в резисторе p -типа номинальное значение будет уменьшаться. Аналогично БТТ, находящийся в правой ветви дифференциального каскада (см. рис. 1, б), т. е. у которого при подаче давления со стороны мембраны понижается ток коллектора $\Delta I_K < 0$, необходимо располагать между двумя ЖЦ (зона сжатия) в радиальном расположении, так как в данном случае в резисторе p -типа номинальное значение будет увеличиваться. При расположении базовой области БТТ вдоль тангенциального направления в мембране два эффекта будут иметь разные знаки и частично компенсируют друг друга.

Таблица 3

Моделируемые параметры тензоэффекта ТДК (образцы 1, 2, 3)

Параметр	Значение	Значение						Размерность
		1	2	3	1	2	3	
		Растяжение			Сжатие			
Относительное изменение тока коллектора δI_K	$\delta I_K \text{ аниз}$	-8,3	-4,8	-1,9	16,5	9,5	3,7	%
	$\delta I_K \text{ тенз}$	-4,5	-2,7	-1,1	5,2	3,0	1,2	
	δI_K	-12,8	-7,5	-3,0	21,7	12,4	4,8	

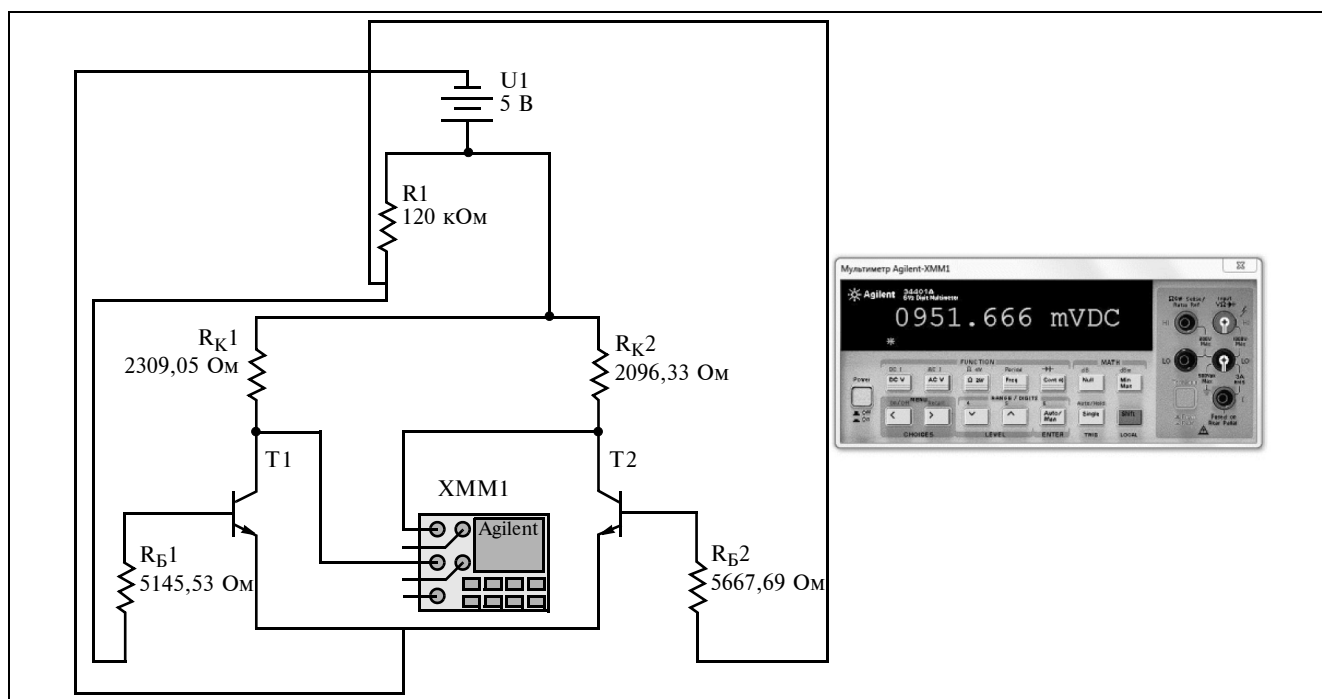


Рис. 7. Моделирование тензосхемы кристалла ТДК (образец 1) при подаче давления

Расчет изменения номинала сопротивления базовой области БТТ проводится по аналогии с методом, описанным в предыдущем разделе (моделирование кристалла ТМ). Отличие в радиальном и тангенциальном расположении заключается во взаимной замене продольного напряжения на поперечное и, соответственно, поперечного на продольное напряжение. Так как длина базовой области БТТ составляет порядка 50 мкм, то можно считать, что значения продольного механического напряжения для радиального расположения базы постоянно при нахождении в области максимальной деформации. Значения относительного изменения тока коллектора $\delta I_{К \text{ тенз}}$, связанного с тензоэффектом, представлены в табл. 3. Все ТР кристаллов ТМ и ТДК расположены тангенциально.

Сочетание двух эффектов дают полное значение изменения тока коллектора $\delta I_{К}$ в БТТ:

$$\delta I_{К} = \delta I_{К \text{ аниз}} + \delta I_{К \text{ тенз}}$$

Таблица 4

Моделируемые параметры тензоэффекта образцов 1, 2, 3 с помощью SPICE моделей

Кристалл	Значение			Размерность
	1	2	3	
ТДК	1,903	1,095	0,437	мВ/кПа/В
ТМ	0,487	0,283	0,113	
Преимущество	3,91	3,87	3,88	

Теоретические результаты сочетания двух эффектов приведены в табл. 3.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Смоделировав закономерности изменения всех тензоэлементов в кристаллах ТМ и ТДК, воспользуемся симулятором электрических схем (SPICE) в программном обеспечении NI Multisim (рис. 7).

При воспроизведении БТТ использовались следующие технологические параметры: потенциал поля перехода база—эмиттер $U_{БЭ} = 0,68$ мВ и обратный ток коллекторного перехода $I_{К \text{ обр}} = 1$ нА. Для всех видов тензосхем кристаллов используется одинаковое значение напряжения питания $U_{пит} = 5$ В. Номиналы тензоэлементов кристалла ТДК выбраны следующие: сопротивление к коллектору БТТ $R_{К} = 2,2$ кОм, сопротивление к базе БТТ $R_{Б} = 5,4$ кОм, коэффициент усиления БТТ $\beta = 50$. Для задания определенного тока базы БТТ используется внешний нечувствительный к давлению резистор номиналом $R_1 = 120$ кОм.

Результаты расчетной выходной тензочувствительности представлены в табл. 4.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное в статье моделирование кремниевого кристалла ТМ с мембранной, имеющей три ЖЦ, позволяет достаточно качественно спрогнозировать результаты выходной тензочувстви-

тельности преобразователя давления с погрешностью в 5...10 %. В работе рассмотрена теория изменения коллекторного тока БТТ при воздействии деформации. При расположении БТТ вдоль радиального направления мембраны эффекты анизотропии подвижности основных носителей заряда в базовой области и тензорезистивный эффект сопротивления базовой области складываются. По результатам моделирования можно сказать, что использование нового вида тензосхемы для кристалла ДД в виде дифференциального каскада, где чувствительными к давлению являются как резисторы, так и биполярные транзисторы, способно повысить выходную тензочувствительность в 3,9 раза относительно кристаллов ТМ.

Авторы выражают благодарность Химушкину Борису Ивановичу за помощь в теоретических вопросах и Фомичеву Владимиру Юрьевичу за содействие в схемотехнических аспектах разработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meng X., Zhao Y. The design and optimization of a highly sensitive and overload-resistant piezoresistive pressure sensor // MDPI "Sensors". — 2016. — № 16. — P. 1—12.
2. Земляничников Н. С., Данилова Н. Л., Панков В. В. и др. Тензорезистивные преобразователи давления на основе сложнопрофилируемых кремниевых мембран // Нано- и микросистемная техника. — 2013. — № 4. — С. 32—36. [Zemljannikov N. S., Danilova N. L., Pankov V. V., et al. Tensoresistive pressure transducers based on complex silicon membranes // Nano- and microsystem technology. — 2013. — № 4. — P. 32—36. (In Russian)]
3. Суханов В. С., Панков В. В., Годовицын И. В. и др. Тензорезистивный интегральный МЭМС-преобразователь давления мембранного типа // Нано- и микросистемная техника. — 2011. — № 12. — С. 36—37. [Suhanov V. S., Pankov V. V., Godovitsyn I. V., et al. Strain-resistive integrated MEMS membrane pressure transducer // Nano- and microsystem technology. — 2011. — № 12. — P. 36—37. (In Russian)]
4. Артемова А. И., Михайлов Ю. А., Панков В. В., Суханов В. С. Оптимизация конструкции чувствительного элемента давления с распределенным жестким центром с помощью компьютерного трехмерного моделирования // Нано- и микросистемная техника. — 2014. — № 7. — С. 34—37. [Artemova A. I., Mihajlov Ju. A., Pankov V. V., Suhanov V. S. Optimization of the design of a pressure sensitive element with a distributed rigid center using computer-aided three-dimensional modeling // Nano- and microsystem technology. — 2014. — № 7. — P. 34—37. (In Russian)]
5. Игнатьева Е. В., Михайлов Ю. А., Тимошенко С. П. О проектировании мембраны с жестким центром кристаллов кремниевых тензопреобразователей на давлении от 0,025 до 25 МПа // Нано- и микросистемная техника. — 2010. — № 2. — С. 24—31. [Ignateva E. V., Mihajlov Ju. A., Timoshenkov S. P. About the design of a membrane with a rigid center of crystals of silicon strain gauges at a pressure of 0.025 to 25 MPa // Nano- and microsystem technology. — 2010. — N 2. — P. 24—31. (In Russian)]
6. Belov N. S., L. Lihua, V. Kim, V. Dinh. Low pressure sensors and flow sensors // Patent USA. US2015192487 A1.2016. P. 1—30.
7. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. — С. 15—27. [Vaganov V. I. Integral strain gauges. — Moscow: Jenergoatomizdat. — 1983. — P. 15—27. (In Russian)]
8. Агеев О. А., Мамиконова В. М., Петров В. В. и др. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. — Таганрог: ТРТУ, 2000. — С. 43—54. [Ageev O. A., Mamiikonova V. M., Petrov V. V., et al. Microelectronic converters of non-electrical quantities. — Taganrog: TRTU, 2000. — P. 54—65. (In Russian)]
9. Smith C. S. Piezoresistance effect in germanium and silicon // Physical Review. — 1954. — Vol. 94. — № 1. — P. 42—49.
10. Kanda Y. A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon // IEEE Transactions on electron devices. — 1982. — Vol. ED-29, № 1. — P. 64—70.
11. Eaton W. P. Surface micromachined pressure sensors: Author's abstract of dissertation of doctor of philosophy engineering. — Albuquerque, 1997. — P. 80—96.
12. Doll J. C., Pruitt B. L. Piezoresistor design and application. — New York: Springer, 2013. — P. 22—38.
13. Бабичев Г. Г., Козловский С. И., Романов В. А., Шаран Н. Н. Кремниевый двухэмиттерный дифференциальный тензотранзистор с ускоряющим электрическим полем в базе // Журнал технической физики. — 1999. — Т. 69, № 10. — С. 63—68. [Babichev G. G., Kozlovskij S. I., Romanov V. A., Sharan N. N. Silicon two-emitter differential strain gage with accelerating electric field in the base // Journal of Technical Physics. — 1999. — Т. 69, N 10. — P. 63—68. (In Russian)]
14. Неизвестный И. Г., Гридчин В. П. Использование напряженного кремния в МДП-транзисторах и КМОП-структурах // Микроэлектроника. — 2009. — № 2. — С. 83—98. [Neizvestnyj I. G., Gridchin V. P.]. The use of strained silicon in transistors and CMOS structures // Microelectronics. — 2009. — № 2. — P. 83—98. (In Russian)]
15. Ваганов В. И. Электронная измерительная техника. — Москва: Атомиздат, 1978. — С. 124—130. [Vaganov V. I. Electronic measuring technology. — Moscow: Atomizdat, 1978. — P. 124—130. (In Russian)]
16. Пат. СССР SU1328700. Микроэлектронный преобразователь давления / Ваганов В. И. // Бюл. — 1987. — С. 1—2. [Pat. USSR SU1328700 A1. Microelectronic pressure transducer / V. I. Vaganov // Bull. — 1987. P. 1—2. (In Russian)]
17. Полякова А. Л. К вопросу о чувствительности р-п переходов к малым деформациям // Акустический журнал. — 1967. — № 2. — С. 256—261. [Poljakova A. L. On the sensitivity of p-n transitions to small deformations // Acoustic journal. — 1967. — № 2. — P. 256—261. (In Russian)]
18. Полякова А. Л. Физические принципы работы полупроводниковых датчиков механических величин // Акустический журнал. — 1972. — № 1. — С. 1—22. [Poljakova A. L. Physical principles of operation of semiconductor sensors of mechanical quantities // Acoustic journal. — 1972. — № 1. — P. 1—22. (In Russian)]
19. Полякова А. Л. О чувствительности к давлению поверхностно-барьерных полупроводниковых приборов // Акустический журнал. — 1974. — № 3. — С. 443—448. [Poljakova A. L. On the sensitivity to pressure of surface-barrier semiconductor devices // Acoustic journal. — 1974. — № 3. — P. 443—448. (In Russian)]
20. Полякова А. Л. Деформация полупроводников и полупроводниковых приборов. — Москва: Энергия, 1979. — С. 124—128. [Poljakova A. L. Deformation of semiconductors and semiconductor devices. — Moscow: Energy, 1979. — P. 124—128. (In Russian)]
21. Видулин И. М., Стафеев В. И. Физика полупроводниковых приборов. — Москва: Радио и связь, 1990. — С. 209—218. [Vikulin I. M., Stafeev V. I. Physics of semiconductor devices. — Moscow: Radio and communication, 1990. — P. 209—218. (In Russian)]