

УДК 621.382

## ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДАВЛЕНИЯ

Г.Ю.Вечерко, А.Н.Стукалов, **Б.М.Шишлянников\***

*ОАО «ОКБ-ПЛАНЕТА», Великий Новгород, [VecherkoGU@okbplaneta.ru](mailto:VecherkoGU@okbplaneta.ru)*

*\*Институт электронных и информационных систем НовГУ*

Рассмотрены подходы к проектированию элементов чувствительного модуля датчиков давления, технологические аспекты реализации того или иного топологического варианта. Показано, что наиболее простым способом температурной компенсации чувствительности является метод самокомпенсации.

**Ключевые слова:** *полупроводниковый преобразователь давления, топологическое моделирование, чувствительный элемент*

The approaches to designing of pressure transducer sensors and technological aspects of some topological variant realization are considered. It is shown that the simplest way of temperature compensation of sensitivity is the self-compensation method.

**Keywords:** *semiconductor pressure transducer, topologic modeling, sensor*

В современных условиях все большую актуальность приобретают системы автоматизированного контроля и управления. Данные системы невозможно представить без разнообразных средств сбора информации, в частности датчиков физических величин. Одним из важнейших видов таких датчиков являются полупроводниковые датчики давления, преобразующие внешнее распределенное механическое давление (давление жидкости и газа) в электрические сигнал. Преобразователи давления можно использовать при любых измерения статического и динамического давления в газах и жидкостях (при необходимости и агрессивных).

### Выбор топологического варианта

При проектировании чувствительного модуля в качестве основных факторов, ответственных за преобразовательные характеристики датчика (чувствительность, нелинейность, гистерезис, температурный дрейф параметров), полагаются следующие: 1) связанные с конструкцией и упругими характеристиками системы связи прибора с измеряемым внешним воздействием: структура и форма мембраны, способ ее соединения с корпусом, соотношение толщины мембраны и стрелы прогиба, кристаллографическая ориентация плоскости; 2) топологического характера: геометрия, ориентация и месторасположение резисторов на поверхности мембраны; 3) определяемые электрофизическими характеристиками материала упругого элемента и технологическими особенностями процесса изготовления чувствительного элемента: уровень и способ локального легирования кремния при создании резисторов.

Конструкция чувствительного элемента создавалась исходя из необходимости достичь оптимального сочетания высокой чувствительности датчика с малой величиной нелинейности характеристики преобразования. За основу был выбрана классический топологический вариант на квадратной мембране на плоскости (100) с краевым расположением резисторов (рис.1).

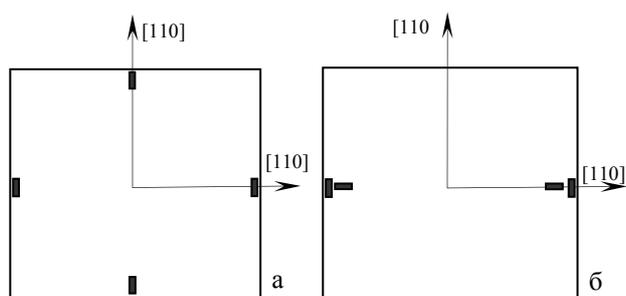


Рис.1. Классический топологический вариант на плоскости (100) (а) и его аналог (б)

В процессе разработки было проведено топологическое моделирование для мембраны на плоскости (110), так как в данной плоскости в направлении [111] тензоэффект в кремнии  $p$ -типа максимален [1].

Топологическое моделирование для чувствительных элементов преобразователей выполнено с использованием модели тонкой пластинки квадратной формы при следующих допущениях. Пластинка жестко закреплена по краям. Упругие характеристики пластинки анизотропны, анизотропия упругих характеристик соответствует монокристаллическому телу с кубической симметрией. Пьезорезистивные свойства пластинки анизотропны. Резисторы преобразователя предполагаются точечными, переход к протяженным (полосковым) резисторам предполагает усреднение откликов точечных резисторов по площади протяженных.

Последовательность моделирования топологических вариантов сводилась к следующему. Находилось распределение прогибов нагруженной равномерно распределенной нагрузкой пластинки и распределение механических напряжений, вызванных этой нагрузкой, по поверхности пластинки. Затем находилось приращение сопротивлений точечных резисторов с различной ориентацией (их отклик на напряжение) в каждой точке поверхности пластинки и строились поверхности отклика. Суммарное приращение четырех резисторов, включенных в мостовую схему, позволяло рассчитать чувствительность к внешнему воздействию (давлению) выбранной конфигурации резисторов текущего топологического варианта.

В качестве модели изгибаемой срединной плоскости при расчетах поля напряжения на поверхности мембраны принимается следующее выражение:

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} w_{mn}(x, y),$$

где  $w_{mn}$  — функции, дающие гладкую поверхность изгибаемой срединной плоскости пластинки и удовлетворяющие граничным условиям;  $A_{mn}$  — коэффициенты, определяющиеся из граничных условий. Нами использовался полином  $w_{mn} = (x^2 - a^2)^2 (y^2 - b^2)^2 x^m y^n$  при  $m = n = 0, 2, 4, 6$ ;  $a$  и  $b$  — половины длин сторон пластинки.

Как было показано ранее [2], полином шестой степени дает адекватную картину распределения напряжений по поверхности для квадратных и прямоугольных пластинок с соотношением длины к ширине до 1:4.

Для конкретизации чувствительности мостовой схемы, соответствующей той или иной топологии, т.е. для определенного конструктивного решения необходимо выбрать размер стороны мембраны чув-

ствительного элемента, толщину мембраны, соответствующую величине измеряемого давления и определить значения пьезорезистивного коэффициента  $\pi_{44}$ . Зависимость последнего от уровня легирования кремния бором показана на рис.2.

Значение коэффициентов  $\pi_{44}$  определены нами из опытов по одноосному растяжению кремниевых диффузионных тензорезисторов, ориентированных в

дании квадратной мембраны на выбранной плоскости кремниевой пластины методом анизотропного травления. Проведенные эксперименты по анизотропному травлению кремния в 33% водном растворе КОН на плоскости (110) показали, что при изготовлении квадратных мембран классическим способом с резкими границами перехода от тонкой части к толстой периферии возникают определенные сложности.

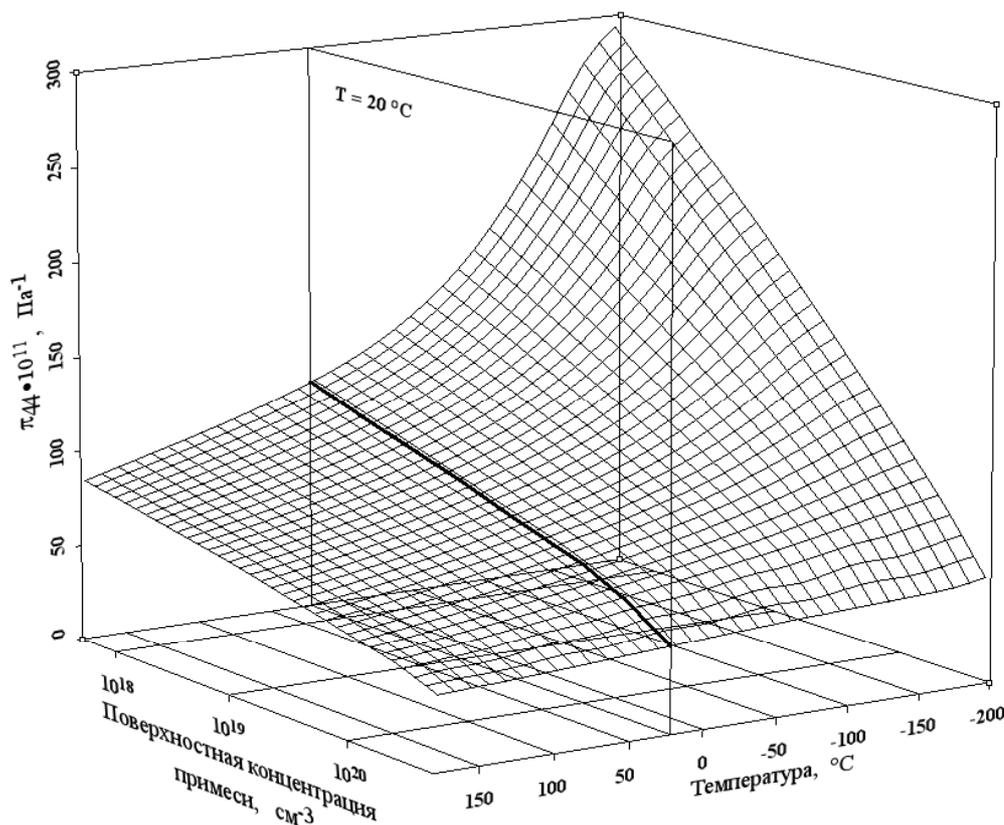


Рис.2. Поверхность отклика пьезорезистивного коэффициента  $\pi_{44}$  в диапазоне температур от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $+177^{\circ}\text{C}$  и поверхностных концентраций  $N_s$  в диапазоне  $5 \cdot 10^{17} \div 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для диффузионных слоев кремния, легированных бором

направлении [111]. Приведенные результаты эксперимента достаточно хорошо, особенно в области высоких концентраций примеси, соответствуют данным, представленным в литературе ранее, но охватывают существенно больший диапазон концентраций и представлены в более удобном для практического использования виде. Необходимые значения коэффициента  $\pi_{44}$  при различных  $N_s$ , требуемые при расчете чувствительности преобразователя, могут быть вычислены из следующего моделирующего выражения, которое аппроксимирует результаты эксперимента:

$$\pi_{44} = (-9 \cdot 10^{-3} + 8,96 \cdot 10^{-6} \cdot T \cdot \lg T + 3,46 \cdot 10^{-5} \cdot (\lg N_s)^2 + 4,27 \cdot 10^{-22} \cdot N_s / \lg N_s)^{-1} \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}.$$

#### Технологические аспекты проектирования

Проблема технической реализации того или иного топологического варианта преобразователя давления связана с возможностью управляемого соз-

Конструктивно чувствительный элемент преобразователя представляет собой кристалл со сформированной на нем мембраной. Мембрана формируется методом локального анизотропного травления и представляет собой тонкую кремниевую пластинку с жесткой периферией. В нашем случае в преобразователях используется профилированная мембрана с постоянной толщиной в пределах рабочей области. Толщина мембраны составляет 25-40 мкм в зависимости от диапазона измеряемых давлений.

На поверхности мембраны методами планарной технологии при помощи диффузии создается мостовая резисторная схема, интегрированная с мембраной. При подключении одной из диагоналей мостовой схемы к источнику напряжения или тока во второй появляется пропорциональный внешнему воздействию (давлению жидкости или газа) электрический сигнал за счет изменения сопротивлений резисторов преобразователя.

Использование диффузии в качестве метода формирования резисторов обусловлено рядом причин. Основными является использование в наших приборах эффекта самокомпенсации температурного коэффициента чувствительности (подробнее на нем мы остановимся ниже), который требует использования высоколегированных резистивных слоев, что в свою очередь при использовании ионного легирования потребовало бы очень больших доз легирования. Для сокращения технологического разброса номиналов резисторов по кристаллу, вызванного неравномерностью распределения диффузанта в камере, предложен вариант размещения резисторов (как продольных, так и поперечных) по двум сторонам мембраны (рис.1б).

Создание преобразующего модуля, т.е. соединение кристалла с мембраной и кремниевое основания осуществляется методом прямого монтажа в вакууме, при этом под мембраной образуется герметичная вакуумная полость (датчик абсолютного давления, см. рис.3). Соединение осуществляется при помощи специального легкоплавкого стекла. Для преобразующего модуля датчика относительного давления в корпусе делается отверстие, соединяемое с источником «опорного» давления, относительно которого и ведутся дальнейшие измерения.

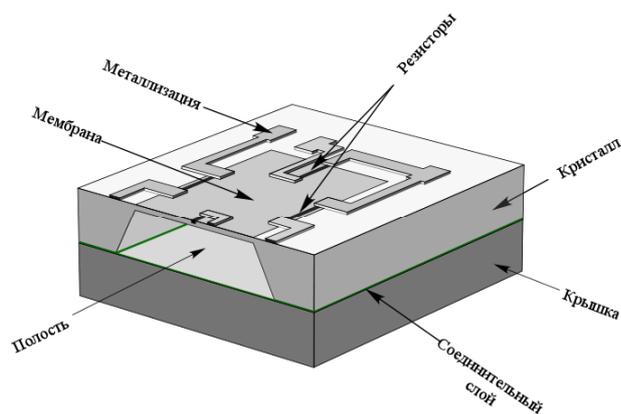


Рис.3. Конструкция чувствительного элемента датчика абсолютного давления

### Метод самокомпенсации

Общеизвестны достаточно сильная зависимость параметров преобразователей от температуры и связанная с этим необходимость термодатчика основной параметр — нулевого сигнала (выходного напряжения при равенстве давлению с обеих сторон мембраны) и чувствительности. Для массового и, следовательно, дешевого преобразователя давления необходимо использовать наиболее простые и эффективные методы минимизации температурной нестабильности параметров. Решая задачу поиска методов компенсации, необходимо решить и обратную задачу — определить требования к характеристикам преобразователей, при удовлетворении которых эффективность коррекции становится достижимой в широком интервале температур.

Оказалось, что наиболее простым способом температурной компенсации чувствительности, который не требует применения дополнительных внеш-

них подстроечных элементов и самого процесса настройки, является метод самокомпенсации. Он основан на увеличении напряжения питания преобразователя с ростом температуры с температурным коэффициентом, равным по величине, но обратным по знаку температурному коэффициенту чувствительности измерительного модуля. Вместе с увеличением температуры увеличивается сопротивление моста. Поэтому при равенстве модулей температурных коэффициентов сопротивления моста и чувствительности при питании преобразователя от источника стабилизированного тока должна наблюдаться температурная стабилизация (см. рис.4). Качество температурной самокомпенсации чувствительности при питании постоянным током жестко определяется набором свойств внутреннего характера, заложенным в резисторы чувствительного элемента при изготовлении, прежде всего — значением уровня легирования резисторов, который определен экспериментально и должен воспроизводиться с высокой точностью.

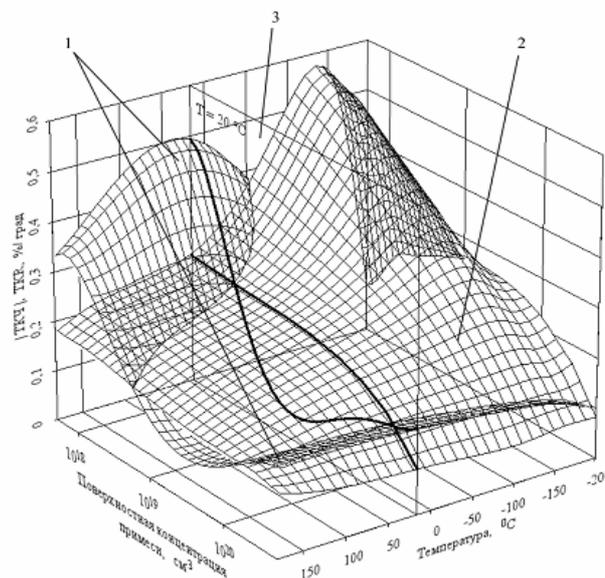


Рис.4. Поверхности отклика температурных коэффициентов сопротивления (1) и чувствительности (2) в диапазоне температур от  $-196^{\circ}\text{C}$  до  $+177^{\circ}\text{C}$  и поверхностных концентраций  $N_s$  в диапазоне  $5 \cdot 10^{17} + 5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$  для диффузионных слоев кремния, легированных бором; 3 — зависимости тех же коэффициентов при температуре  $20^{\circ}\text{C}$

### Выводы

Таким образом, в результате работ, проведенных ОАО «ОКБ — Планета» совместно с кафедрой физики твердого тела и микроэлектроники Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого были получены следующие результаты.

С помощью математического моделирования определено аналитическое выражение для коэффициента  $\pi_{44}$  в зависимости от концентрации примеси и температуры. Полученное выражение охватывает более широкий диапазон концентраций, чем это известно из литературных источников. Адекватность используемой математической модели подтверждена экспериментально.

Исходя из результатов моделирования, рассмотрены технологические аспекты проектирования монолитных преобразователей давления.

Разработана методика проектирования самокомпенсированных преобразователей давления (имеется в виду температурная компенсация), что имеет исключительно важное практическое значение.

Создана целая линейка преобразователей абсолютного давления, охватывающая диапазон измеряемых давлений от 10 до 500 кПа.

---

1. Ваганов В.И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1988. 136 с.
2. Шишлянников Б.М. Сравнительный анализ чувствительных элементов полупроводниковых преобразователей давления // Вестник НовГУ. Сер.: Техн. и естеств. науки. 1998. № 10. С.125-126.

**Bibliography (Transliterated)**

1. Vaganov V.I. Integral'nye tenzopreobrazovateli. M.: Ehnergoatomizdat, 1988. 136 s.
2. Shishljannikov B.M. Sravnitel'nyjj analiz chuvstvitel'nykh ehlementov poluprovodnikovyykh preobrazovatelej davlenija // Vestnik NovGu. Ser.: Tekhn. i estestv. nauki. 1998. № 10. S.125-126.