



УДК 621.3.032
DOI 10.21685/2587-7704-2018-3-1-5



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Минимизация температурной составляющей погрешности и повышение чувствительности полупроводникового датчика давления

В. С. Волков

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

Е. А. Рыблова

Пензенский государственный университет, Россия, 440026 г. Пенза, ул. Красная, 40

Аннотация. Определено оптимальное значение концентрации легирующей примеси графическим и аналитическим методом, при котором температурная составляющая погрешности минимальна. Рассчитаны выходной сигнал и температурный коэффициент ухода чувствительности при двух значениях концентрации легирующей примеси. В программе COMSOL Multiphysics проведено физическое моделирование плоской и профилированной мембраны. Выбрано оптимальное расстояние до ступеньки от центра профилированной мембраны. Для плоской и профилированной мембран рассчитана погрешность линейности.

Ключевые слова: тензочувствительность, температурная погрешность, плоская мембрана, профилированная мембрана, компенсация погрешности, аналитическое моделирование.

Minimization of the error temperature component and sensitivity increase of the semiconductor pressure sensor

V. S. Volkov

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

E. A. Ryblova

Penza State University, 40 Krasnaya Street, 440026, Penza, Russia

Abstract. The optimal value of the dopant concentration by the graphical and analytical method, at which the temperature component of the error is minimal, is determined. The output signal and the temperature sensitivity drift coefficient for two values of the dopant concentration are calculated. Physical modeling of a flat and profiled membrane is conducted using the COMSOL Multiphysics program. The optimal distance to the step from the center of the profiled membrane has been selected. The linearity error is calculated for the flat and profiled membranes.

Key words: strain-sensitivity, temperature error, flat membrane, profiled membrane, error compensation, analytical modeling.

Одним из наиболее распространенных типов чувствительных элементов для датчиков давления являются чувствительные элементы, основанные на полупроводниковых технологиях. Измерительной схемой таких чувствительных элементов, как правило, является мостовая схема – мост Уитстона. Широкое распространение полупроводниковых тензорезистивных датчиков давления обусловлено

тем, что в большинстве случаев при разработке приходится учитывать сразу несколько критериев, таких как надежность, стабильность выходных характеристик, точность, низкая стоимость. Однако такие датчики характеризуются дополнительной температурной погрешностью выходного сигнала, которая является следствием зависимости коэффициента тензочувствительности от температуры [1, 2].

Влияние температуры и уровня легирования на тензосопротивление монокристалла кремния характеризует модель Канда, в соответствии с которой коэффициент тензочувствительности монокристаллического кремния выражается зависимостью [3]

$$\pi(N, T) = \pi(N_0, 300K) \cdot P(N, T). \quad (1)$$

В соответствии с этой формулой была выведена зависимость главного тензорезистивного коэффициента от температуры и уровня легирующей примеси

$$P(N, T) = \frac{300}{T} \cdot \frac{1}{(1 + \exp(-\eta_f(N, T))) \cdot (\ln(1 + \exp(\eta_f(N, T))))}. \quad (2)$$

На основе выведенного выражения была построена зависимость главного тензорезистивного коэффициента от температуры при различных значениях концентрации легирующей примеси (рис. 1). Значения уровня легирующей примеси задавались от $1 \cdot 10^{19}$ до $1 \cdot 10^{20}$ [4].

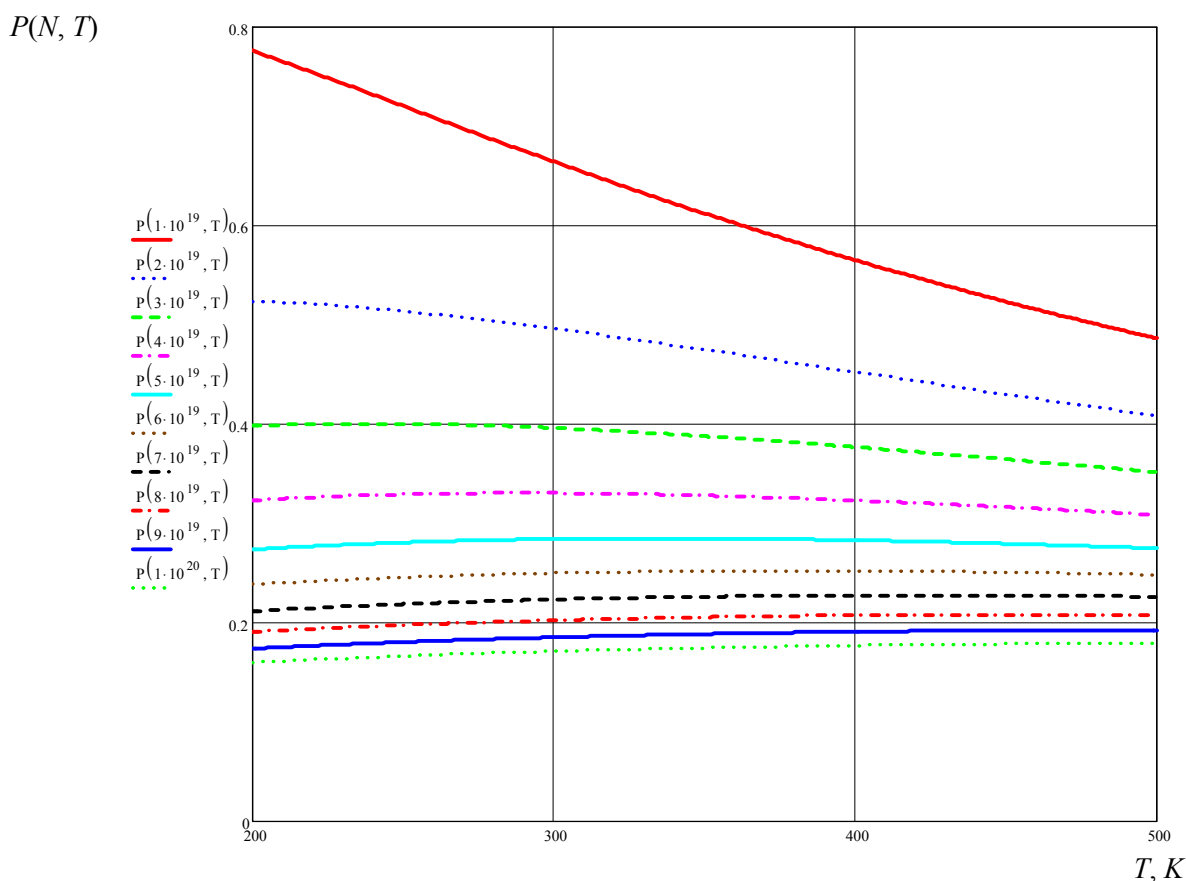
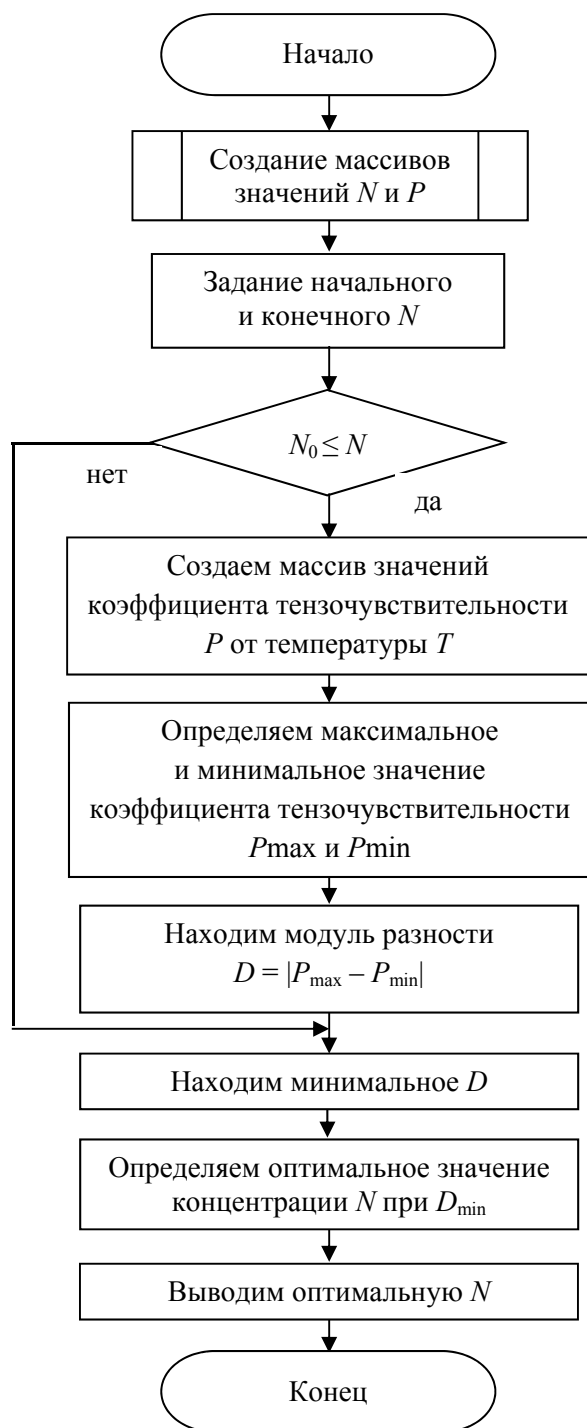


Рис. 1. Зависимость главного тензорезистивного коэффициента от температуры при различных значениях концентрации примеси

Из графика видно, что наименьшая температурная зависимость соответствует значению легирующей примеси, равному $5 \cdot 10^{19}$.

Так как графический метод не дает достаточной точности, оптимальное значение легирующей примеси для минимизации температурной погрешности было найдено аналитическим способом. Для этого в программе MathCAD была составлена программа, алгоритм которой представлен на рис. 2 [4–6].



1. Задаем массив значений главного тензорезистивного коэффициента (P) как функция зависимости от температур от $T_{\min} = 200$ К до $T_{\max} = 500$ К, с шагом 1.

2. Задаем начальное значение концентрации $4 \cdot 10^{19}$ и конечное значение концентрации $7 \cdot 10^{19}$.

3. Проверяем условие « N начальное меньше или равно N конечному», если данное условие выполняется, то для заданных значений температуры в диапазоне от T_{\min} до T_{\max} создаем массив значений коэффициента тензочувствительности, зависящего от температуры, для текущего значения концентрации.

4. Находим максимальное и минимальное значение коэффициента тензочувствительности и находим модуль разности данных значений.

5. Находим минимальное значение модуля разности.

6. Определяем значение концентрации легирующей примеси, которой соответствует минимальное значение модуля разности коэффициентов тензочувствительности. Данное значение составляет $4,903 \cdot 10^{19}$, что почти соответствует графически найденному значению.

Рис. 2. Блок-схема и описание нахождения оптимального значения концентрации примеси

Для полученных значений концентрации легирующей примеси был рассчитан выходной сигнал и температурный коэффициент ухода чувствительности (ТКУЧ).

Выходной сигнал мостовой схемы из тензорезисторов при значении легирующей примеси $5 \cdot 10^{19}$ составляет $U_{\text{вых}}(T) = 0,077$ В, а для значения легирующей примеси $4,9 \cdot 10^{19}$ составляет $U_{\text{вых}}(T) = 0,078$ В. Погрешность выходного сигнала мостовой схемы при определении оптимального значения концентрации легирующей примеси графическим путем составила 1,3 %. Полученные значения температурного коэффициента ухода чувствительности и погрешности приведены в табл. 1.

Анализ табл. 1 показывает, что значение ТКУЧ для оптимальной концентрации, определенной графическим способом, вдвое ниже, чем значение для оптимальной концентрации, определенной численным моделированием, хотя погрешность самого значения концентрации составляет 2,04 %.

Таблица 1

Способ определения концентрации легирующей примеси	Значение концентрации N , см^{-3}	ТКУЧ	Погрешность определения ТКУЧ графическим методом
Графический	$5 \cdot 10^{19}$	$-1,715 \cdot 10^{-3}$	49,9 %
Численный	$4,9 \cdot 10^{19}$	$-3,437 \cdot 10^{-3}$	

Чувствительность тензорезистивного преобразователя давления зависит от толщины мембраны и от наличия в ее профиле концентраторов механических напряжений.

Для исследования зависимости механических напряжений в мембране от формы профиля было выбрано две мембраны: плоская и профилированная.

На рис. 3 представлены профили данных мембран.

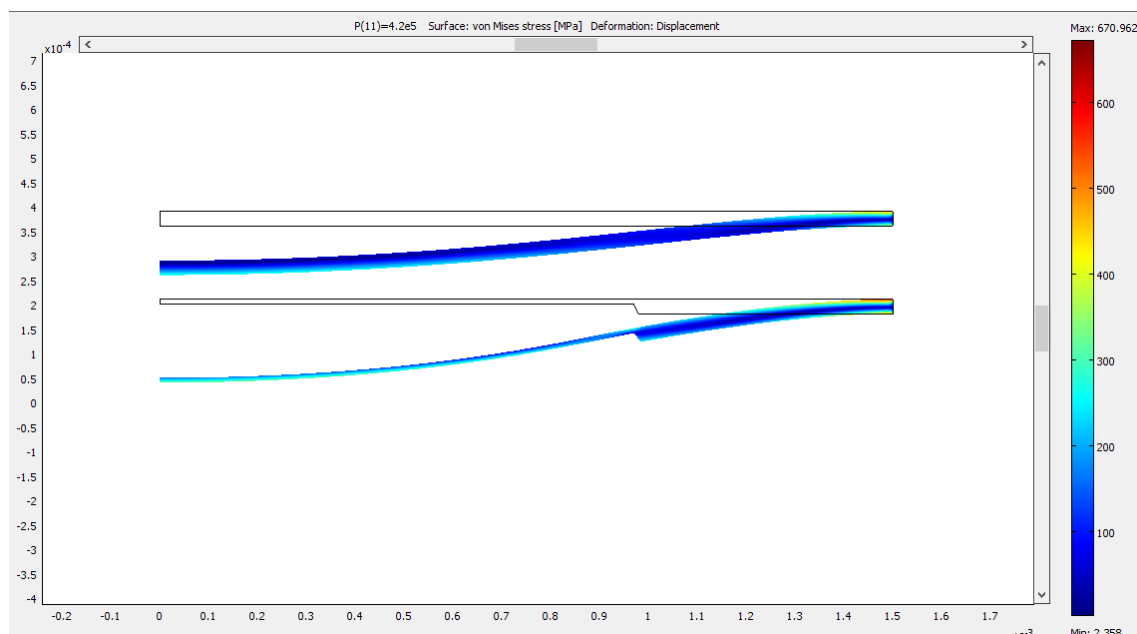


Рис. 3. Прогиб мембраны под действием приложенного давления (верхняя – плоская мембрана, нижняя – профилированная мембрана)

Для профилированной мембраны координата ступеньки задавалась на расстоянии от 0,5 мм до 1,2 мм от центра мембраны с шагом в 0,05 мм; для каждого случая был построен график зависимости радиального напряжения от приложенного давления. Наиболее чувствительной оказалась профилированная, с координатой ступеньки на расстоянии 0,95 мм от центра мембраны.

Для двух заданных мембран была построена зависимость радиального напряжения от приложенного давления. Изгиб профилированной мембраны задан на расстоянии 0,95 мм от центра. На рис. 4 красный график соответствует профилированной мембране, синий – плоской.

Для плоской и профилированной мембран была рассчитана погрешность линейности.

Для мембраны с плоским профилем погрешность линейности составила

$$\gamma = \frac{\Delta_{\text{л}}}{P_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{0,34 - 0,27}{0,34} \cdot 100\% \approx 20\% .$$

Для профилированной мембраны погрешность линейности составляет

$$\gamma = \frac{\Delta_{\text{л}}}{P_{\text{max}}} \cdot 100\% = \frac{0,43 - 0,37}{0,43} \cdot 100\% \approx 14\% .$$

Исходя из полученных данных, следует отметить, что оптимальное значение концентрации легирующей примеси, обеспечивающее минимизацию температурной составляющей погрешности, было найдено аналитическим методом, который является более точным по сравнению с графическим. Исследуя чувствительность полупроводникового чувствительного элемента, было выяснено, что повысить чувствительность можно, используя профилированную мембрану, причем для заданных геометрических параметров ступенька должна находиться на расстоянии 0,95 мм от центра мембраны.

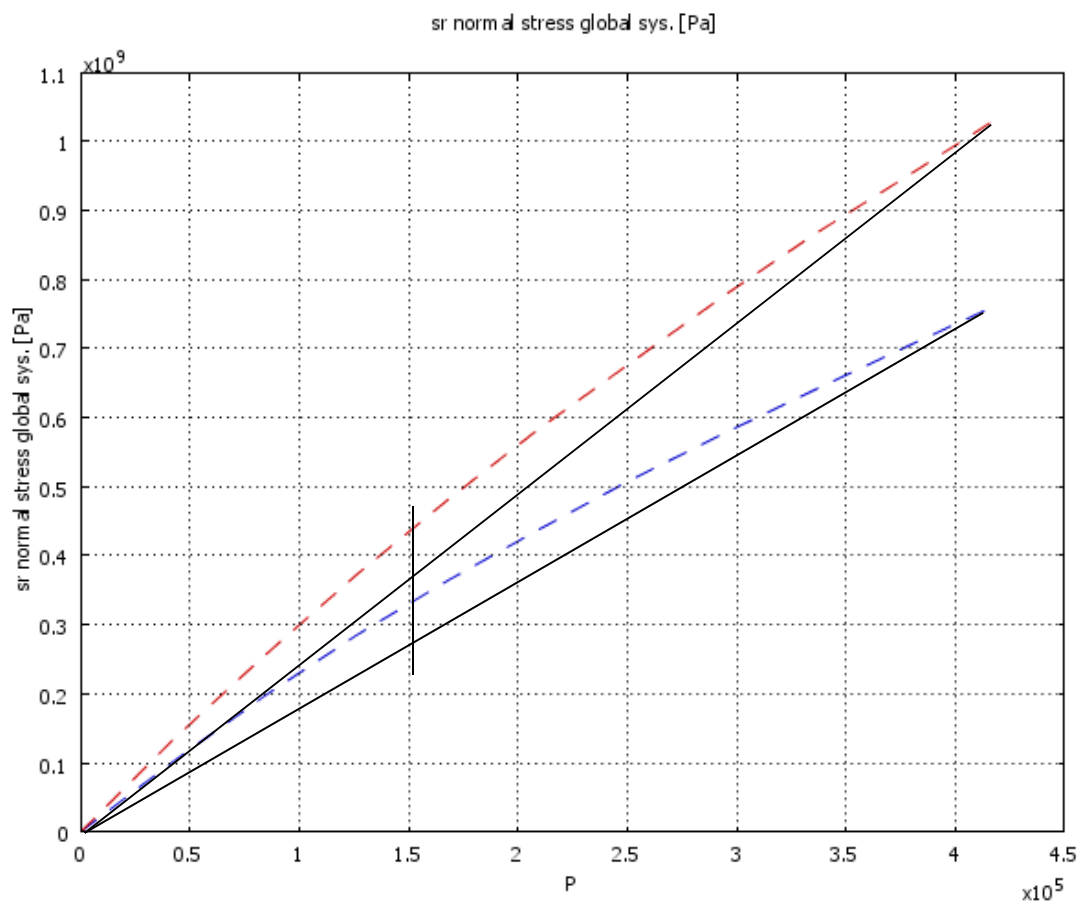


Рис. 4. Зависимость радиального напряжения от приложенного давления

Библиографический список

1. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, Б. В. Цыпин, С. П. Евдокимов // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
2. Баринов, И. Н. Конструктивно-технологические проблемы обеспечения долговременной стабильности параметров высокотемпературных полупроводниковых тензорезистивных датчиков давлений / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. Спец. выпуск. – 2011. – № 1. – С. 85–96.
3. Kanda, Y. A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon / Y. Kanda // IEEE Transactions on Electron Devices, ED-29. – 1982. – P. 64–70.
4. Рыблова, Е. А. Исследование температурной зависимости тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов / Е. А. Рыблова, В. С. Волков // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы : сб. науч. ст. V ежегодной межвуз. науч.-практ. конф. – Пенза, 2018.
5. Волков, В. С. Исследование зависимости выходного сигнала и температурной погрешности полупроводникового тензорезистивного датчика давления от температуры и концентрации легирующей примеси / В. С. Волков, Е. А. Рыблова // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : сб. ст. XXXII Междунар. науч.-техн. конф. – Пенза, 2017. – С. 200–203.
6. Волков, В. С. Исследование влияния концентрации легирующей примеси на температурную зависимость тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов / В. С. Волков, Е. А. Рыблова // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2017. – № 2 (20). – С. 40–47.

Волков, В. С.

Минимизация температурной составляющей погрешности и повышение чувствительности полупроводникового датчика давления / В. С. Волков, Е. А. Рыблова // Инжиниринг и технологии. – 2018. – Vol. 3(1). – DOI 10.21685/2587-7704-2018-3-1-5.