

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.3.032

В. С. Волков, Е. А. Рыблова

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЛЕГИРУЮЩЕЙ ПРИМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРНУЮ ЗАВИСИМОСТЬ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ

V. S. Volkov, E. A. Ryblova

THE STUDY OF DOPANT CONCENTRATION INFLUENCE ON THE TEMPERATURE DEPENDENCE OF GAGE FACTOR FOR SEMICONDUCTOR STRAIN GAUGES

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. Целью работы является исследование зависимости коэффициента тензочувствительности тензорезисторов p -типа от температуры и уровня легирования, а также определение оптимального значения концентрации легирующей примеси для обеспечения минимальной температурной зависимости тензочувствительности. **Материалы и методы.** Проведено аналитическое и графическое моделирование влияния температуры и концентрации примеси на коэффициент тензочувствительности полупроводниковых тензорезисторов p -типа. **Результаты.** Показано, что полупроводниковые тензорезистивные датчики давления имеют значительную температурную погрешность, которая зависит от уровня концентрации примеси в полупроводнике. В ходе исследования графически было определено оптимальное значение уровня легирования, при котором температурная погрешность минимальна. Для найденного значения концентрации примеси были рассчитаны значения сопротивлений тензорезисторов, выходной сигнал мостовой схемы и температурная погрешность тензочувствительности. **Выводы.** Аналитические и графические зависимости, полученные в результате исследования, могут быть использованы для определения оптимальной концентрации легирующей примеси по критериям минимальной температурной погрешности и максимальной чувствительности аналитическим методом.

A b s t r a c t. Background. The object of the research is study of temperature and dopant dependence of gage factor for the p -type strain gages, as well as the determination of the dopant concentration optimal values to ensure a minimum temperature dependence of the gage factor. **Materials and methods.** The analytical and graphical simulation of influence temperature and dopant concentration on the gage factor of p -type semiconductor strain gauges was completed. **Results.** It has been shown that semiconductor strain gage pressure sensors have significant

temperature error, which depends on the dopant concentration in the semiconductor. During the study was graphically determined optimum value of the doping level at which the temperature error is minimal. Using optimal the concentrations of impurities were calculated values of strain gauges resistance, the output signal of the bridge circuit and the temperature error of gage factor. **Conclusions.** Analytical and graphical dependences obtained in this research can be used to determine the optimal concentration of dopant to provide the minimum temperature error and maximum sensitivity by the analytical method.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полупроводниковый тензорезистивный датчик давления, коэффициент тензочувствительности, аналитическое моделирование, концентрация примеси, температурная погрешность.

Key words: semiconductor piezoresistive pressure sensor, gage factor, analytical simulation, dopant concentration, temperature error.

Одним из самых распространенных типов чувствительных элементов для датчиков давления являются чувствительные элементы на базе полупроводниковых технологий, построенные на основе тензорезистивного эффекта. Это объясняется тем, что в большинстве случаев требуется одновременно обеспечить выполнение требований по нескольким параметрам датчиков точности, стабильности выходных характеристик, надежности, долговечности, низкой цене. Наиболее полно таким требованиям, по сравнению с чувствительными элементами, основанными на других принципах преобразования, удовлетворяют датчики, содержащие размещенную на упругом элементе мостовую измерительную схему, состоящую из кремниевых тензорезисторов, легированных примесью p -типа (бором) [1–6].

Они характеризуются значительной дополнительной температурной погрешностью выходного сигнала, которая является следствием зависимости коэффициента тензочувствительности от температуры [1, 4–6]. По этой причине актуальной является задача исследования механизма влияния температуры на параметры тензорезисторов, определяющие характеристики чувствительного элемента и датчика в целом [7, 8].

Целью статьи является исследование модели зависимости коэффициента тензочувствительности тензорезисторов p -типа от температуры и концентрации примеси для определения значений концентрации примеси, позволяющей обеспечить минимальную температурную зависимость тензочувствительности.

Влияние температуры и уровня легирования на тензосопротивление монокристалла кремния характеризует модель Канда, которая описывает зависимость коэффициента тензочувствительности для полупроводников p -типа от температуры при различных значениях концентрации легирующей примеси [9].

В соответствии с моделью Канда коэффициент тензочувствительности монокристаллического кремния выражается зависимостью

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

где $\pi(N, 300 \text{ K})$ – тензорезистивный коэффициент для слаболегированного кремния при нормальной температуре 300 К; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} ; T – абсолютная температура, К; K – постоянная Больцмана. Для определения влияния концентрации легирующей примеси на характеристики тензорезисторов и мостовой схемы в целом проведем компьютерное имитационное моделирование температурной зависимости выходного сигнала от концентрации примеси и температуры [8, 10].

Определение коэффициента тензочувствительности как функции примеси и температуры производится в следующей последовательности:

1. Определяется безразмерная величина

$$\varepsilon(N, T) = \frac{N}{N_S(T)}, \quad (2)$$

где N – текущий уровень легирования в кремнии, см^{-3} ; N_s – поправочный коэффициент, учитывающий температурную зависимость концентрации, который рассчитывается по следующей формуле:

$$N_s(T) = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{0,59}{300} T \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

2. Для определения уровня Ферми используется упрощенная аппроксимация Джойса – Диксона:

$$\eta_f(N, T) = \ln(\epsilon(N, T)) + \frac{1}{\sqrt{8}} \cdot \epsilon(N, T). \quad (4)$$

3. Главный тензорезистивный коэффициент как функция температуры эксплуатации и концентрации бора определяется по формуле

$$P(N, T) = \frac{300}{T} \cdot \frac{1}{(1 + \exp(-\eta_f(N, T))) \cdot (\ln(1 + \exp(\eta_f(N, T))))}. \quad (5)$$

На рис. 1 представлена зависимость главного тензорезистивного коэффициента от концентрации примеси при различных значениях температуры для кремния p -типа [9].

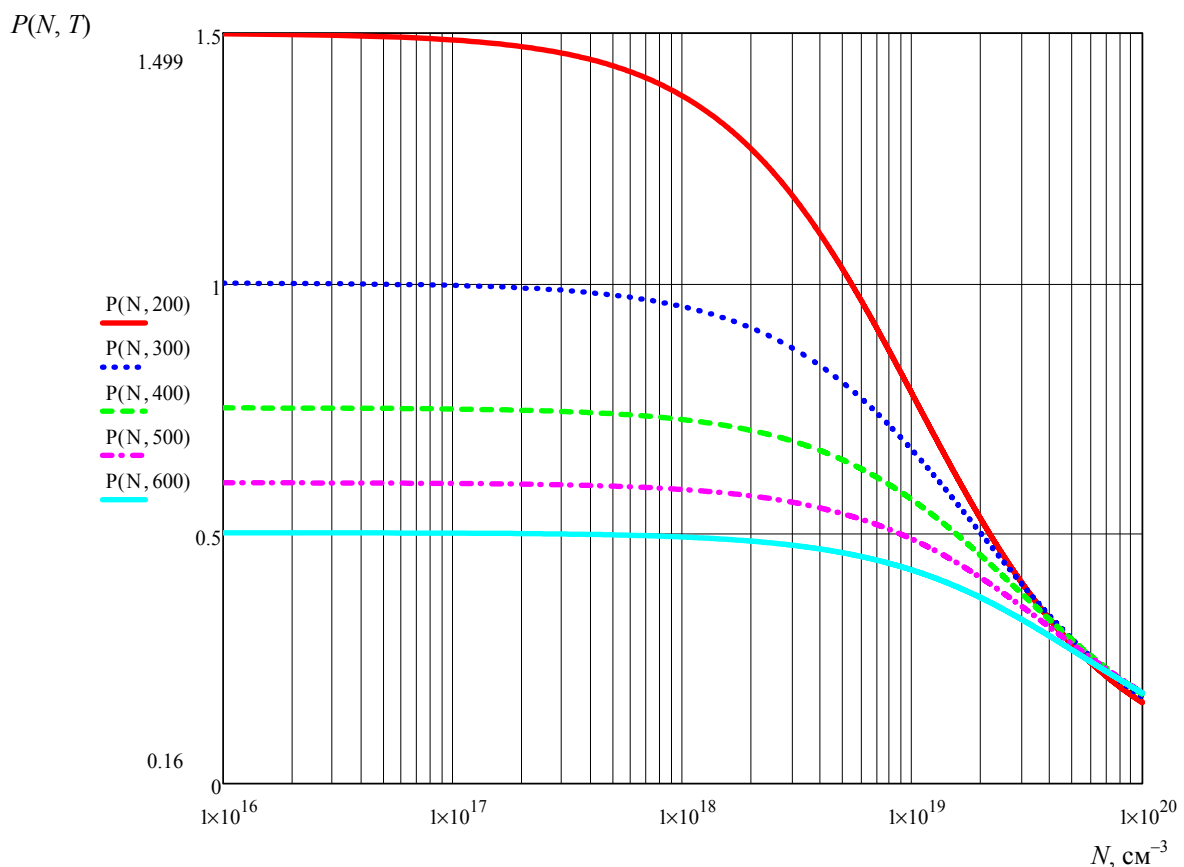


Рис. 1. Зависимость тензорезистивного коэффициента от концентрации легирующей примеси

На основе выражений (1)–(5) была построена зависимость главного тензорезистивного коэффициента от температуры при различных значениях концентрации легирующей примеси N . Этот коэффициент уменьшается с увеличением температуры и увеличением концентрации примеси.

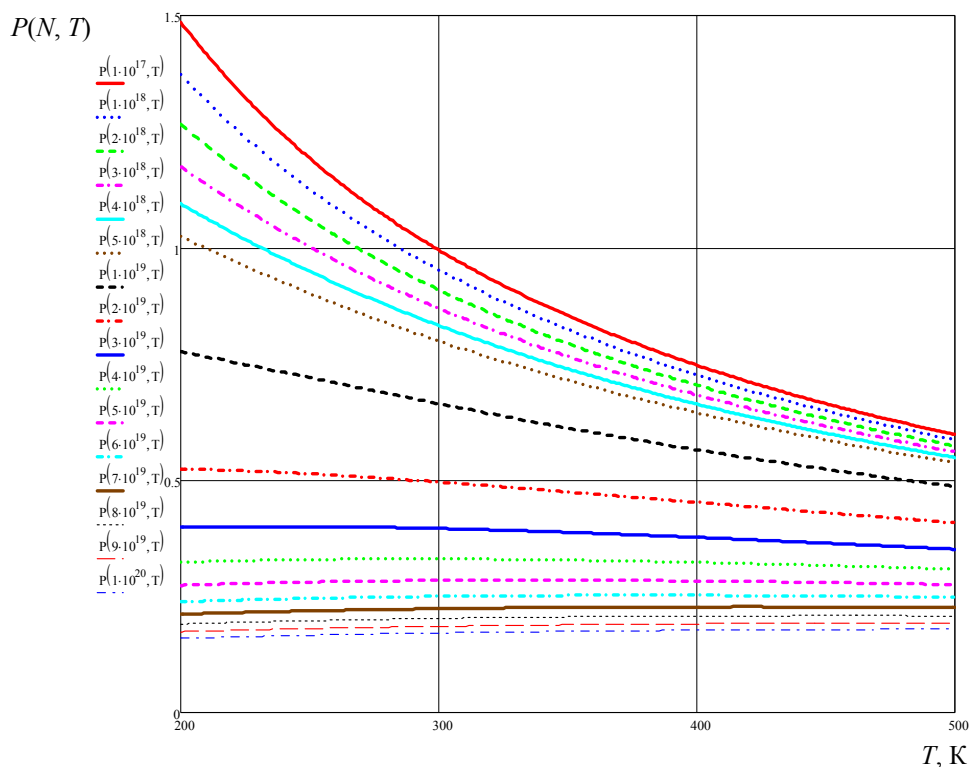


Рис. 2. Зависимость тензорезистивного коэффициента от температуры

Из графика видно, что при концентрации примеси, начиная со значения $N = 1 \cdot 10^{19}$, температурная зависимость коэффициента тензочувствительности существенно уменьшается. Для большей наглядности была построена зависимость тензорезистивного коэффициента от температуры при концентрациях примеси начиная с $1 \cdot 10^{19}$ до $1 \cdot 10^{20}$ (рис. 3).

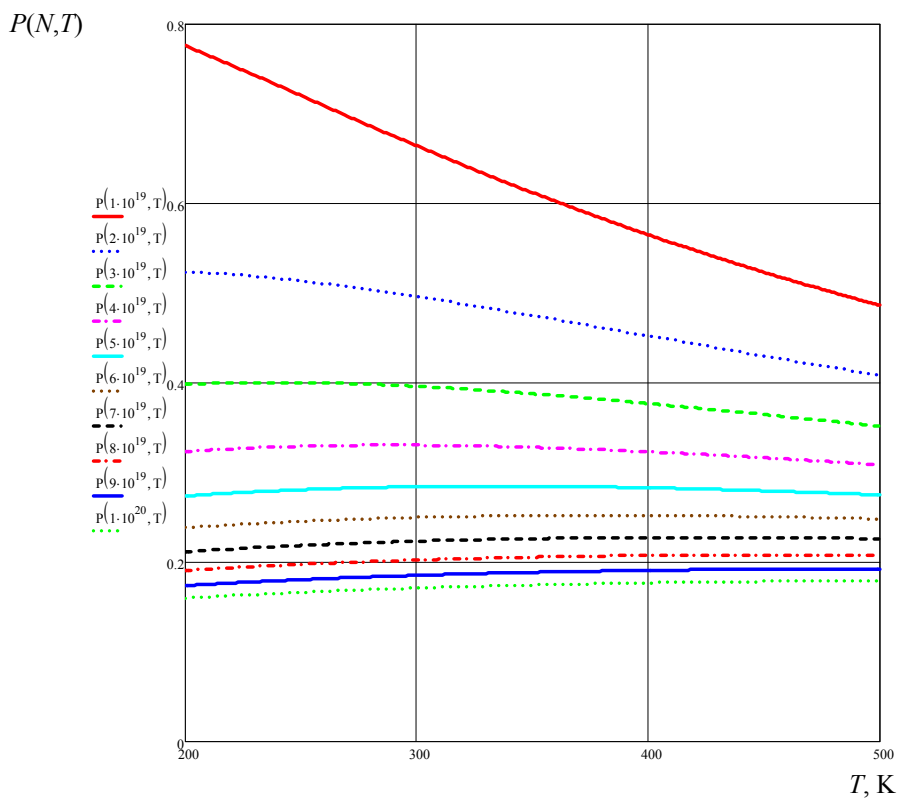


Рис. 3. Зависимость тензорезистивного коэффициента от температуры в диапазоне концентраций примеси от $1 \cdot 10^{19}$ до $1 \cdot 10^{20}$ cm^{-3}

Из рис. 3 видно, что наименьшая температурная зависимость соответствует концентрации примеси $\approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Следует отметить, что увеличение уровня легирования ухудшает тензочувствительность.

Для расчета выходного сигнала мостовой схемы принимаем следующие значения: номинальное значение сопротивления тензорезисторов $R_0 = 1000 \text{ Ом}$, тензорезистивный коэффициент принимаем равным $\pi_{44} = 138,1 \cdot 10^{-11}$. Значение концентрации примеси примем $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Напряжение питания $U_0 = 1 \text{ В}$, ток питания $I_0 = 1 \text{ мА}$.

Расчет выходного сигнала проведем в следующей последовательности:

1. Определяется подвижность носителей заряда:

$$\mu = 54,3 \cdot T_N^{-0,57} + \frac{1,36 \cdot 10^8 \cdot T^{-2,23}}{1 + \left[\frac{N}{2,35 \cdot 10^{17} \cdot T_N^{24}} \right] \cdot 0,88 \cdot T_N^{-0,146}}, \quad (6)$$

где T – температура, К; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} .

2. Рассчитывается удельное сопротивление тензорезистора:

$$\rho = \frac{1}{q \cdot \mu(N, T) \cdot N}, \quad (7)$$

где q – элементарный заряд, Кл; μ – подвижность, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} .

3. Рассчитывается температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\alpha(N) = \frac{\rho(N, 500) - \rho(N, 200)}{(500 - 200) \cdot \rho(N, 293)}, \quad (8)$$

где ρ – удельное сопротивление тензорезистора, $\text{Ом} \cdot \text{м}$; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} .

4. Для каждого из тензорезисторов определяется сопротивление как функция от температуры:

$$R1(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (9)$$

$$R2(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 - \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (10)$$

$$R3(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 + \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (11)$$

$$R4(T) = R_0 \cdot (1 + \alpha(N) \cdot \Delta T(T)) \cdot \left(1 - \frac{\pi_{44}}{2} \cdot P(N, T) \cdot \sigma\right), \quad (12)$$

где σ – нормальное напряжение в поперечном сечении, для значения деформации $\varepsilon = 10^{-3}$ напряжение $\sigma = 129,8 \text{ МПа}$; T – температура, К; N – концентрация легирующей примеси, см^{-3} ; α – температурный коэффициент выходного сопротивления моста, К^{-1} ; π_{44} – коэффициент тензосопротивления.

5. Определяется значение выходного сопротивления мостовой схемы:

$$R_m(T) = \frac{(R1(T) + R2(T)) \cdot (R3(T) + R4(T))}{R1(T) + R2(T) + R3(T) + R4(T)}. \quad (13)$$

Выходное напряжение мостовой схемы рассчитываем для двух случаев:

– при питании током:

$$U_{\text{вых}}(T) = I_0 \cdot \frac{R1(T) \cdot R4(T) - R2(T) \cdot R3(T)}{R1(T) + R2(T) + R3(T) + R4(T)}, \quad (14)$$

– при питании напряжением:

$$U_{\text{вых}}(T) = U_0 \cdot \frac{R1(T) \cdot R4(T) - R2(T) \cdot R3(T)}{(R1(T) + R2(T)) \cdot (R3(T) + R4(T))}. \quad (15)$$

6. Для обоих случаев строятся графики зависимости выходного сигнала от температуры (рис. 4, 5).

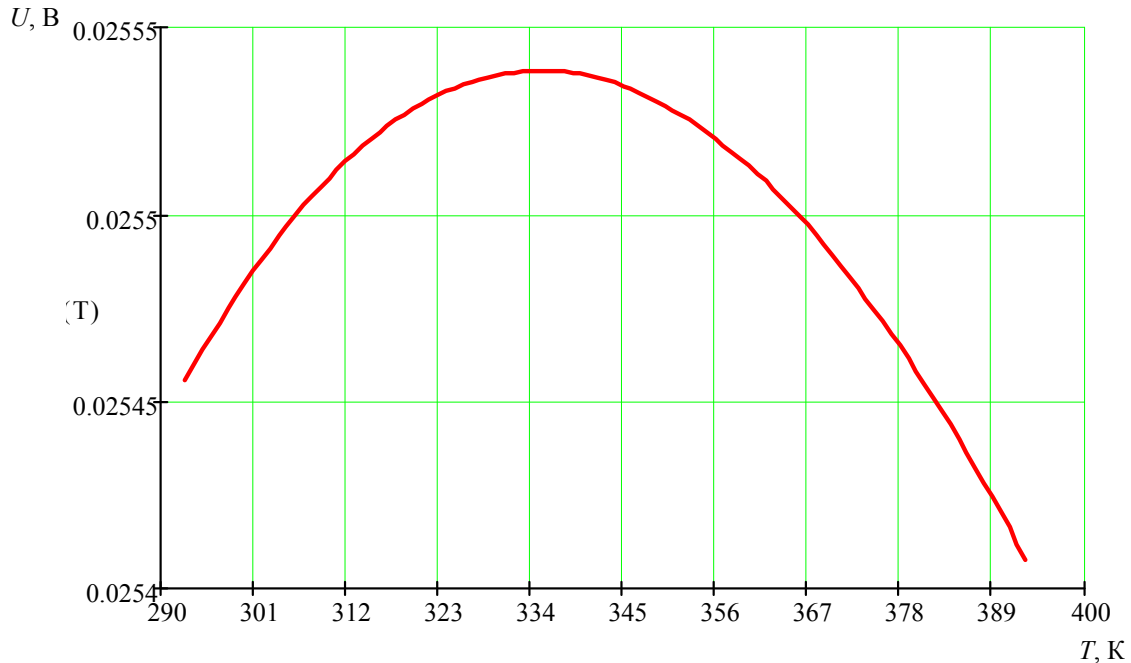


Рис. 4. Зависимость выходного напряжения мостовой схемы от температуры при питании напряжением

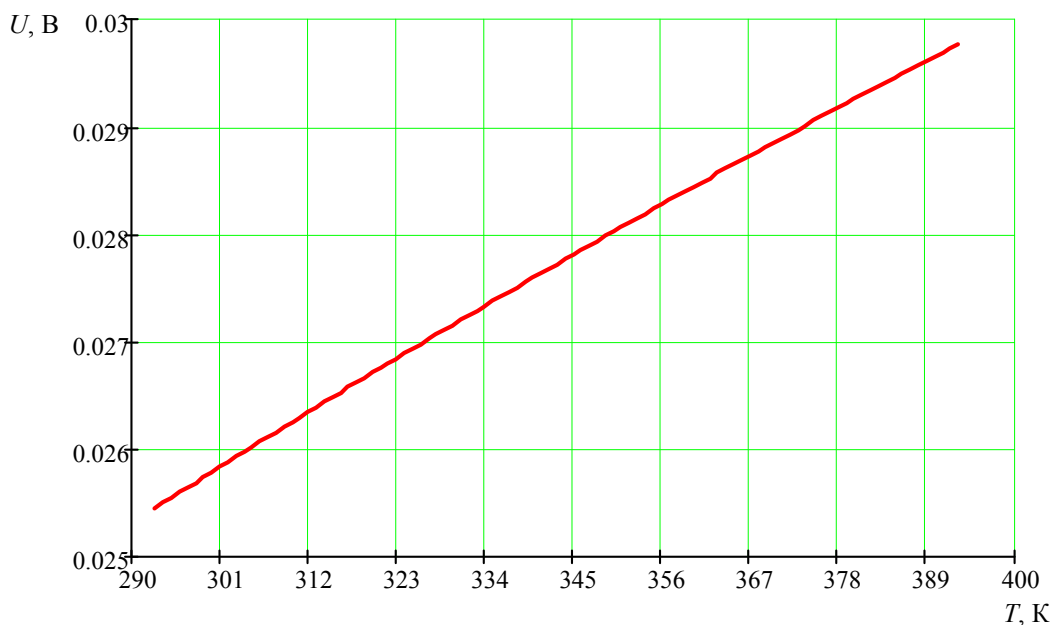


Рис. 5. Зависимость выходного напряжения мостовой схемы от температуры при питании током

7. Рассчитывается температурный коэффициент ухода чувствительности:

$$\alpha_s = \frac{U_{\text{max}(T_{\text{max}})} - U_{\text{max}(T_{\text{min}})}}{U_{\text{max}(T_0)} \cdot \Delta T} \cdot 100 \%, \quad (16)$$

где $U_{\max(T_{\max})}$ – выходной сигнал мостовой схемы при максимальном давлении и максимальной температуре, B ; $U_{\max(T_{\min})}$ – выходной сигнал мостовой схемы при максимальном давлении и минимальной температуре, B ; $U_{\max(T_0)}$ – выходной сигнал мостовой схемы при максимальном давлении и номинальной температуре, B ; ΔT – разность температур, К.

Числовое значение температурного коэффициента ухода чувствительности при питании напряжением $\alpha_s = -1,892 \cdot 10^{-3} \text{ \%}/^\circ\text{C}$, при питании током $\alpha_s = 0,169 \cdot \text{\%/}^\circ\text{C}$.

В ходе исследования приближенно было найдено графическим способом значение концентрации легирующей примеси, при котором температурная зависимость коэффициента тензочувствительности является минимальной, также были рассчитаны значения сопротивлений тензорезисторов, выходной сигнал мостовой и температурный коэффициент ухода чувствительности схемы при питании током и напряжением. Результаты моделирования показали, что при заданных номиналах тензорезисторов и параметрах питания при одинаковой чувствительности схема, питаемая напряжением, характеризуется на два порядка меньшей температурной погрешностью тензочувствительности, чем схема, питаемая напряжением.

Дальнейшей задачей исследования является определение оптимальной концентрации легирующей примеси по критериям минимальной температурной погрешности и максимальной чувствительности аналитическим методом.

Библиографический список

1. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
2. Распопов, В. Я. Микромеханические приборы : учеб. пособие / В. Я. Распопов. – М. : Машиностроение, 2007. – 400 с.
3. 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.
4. Баринов, И. Н. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологий / С. А. Козин, А. В. Федулов, В. Е. Пауткин, И. Н. Баринов // Компоненты и технологии. – 2010. – № 1. – С. 24–27.
5. Баринов, И. Н. Оптимизация чувствительного элемента датчика давления с поликремниевыми тензорезисторами / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2013. – № 2. – С. 1–5.
6. Баринов, И. Н. Обеспечение долговременной стабильности параметров высокотемпературных полупроводниковых тензорезистивных датчиков абсолютного давления / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы. – 2012. – № 9. – С. 29–35.
7. Волков, В. С. Компенсация температурной погрешности чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 1 (3). – С. 30–36.
8. Волков, В. С. Использование системы Simulink при имитационном моделировании высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. – 2011. – № 7. – С. 50–54.
9. Kanda, Y. A Graphical Representation of the Piezoresistance Coefficients in Silicon / Y. Kanda // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1982. – ED-29. – P. 64–70.
10. Фандеев, В. П. Модели, методы и алгоритмы оптимизации диагностирования приборов : учеб. пособие / В. П. Фандеев, В. С. Волков. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2007. – 76 с.

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, доцент,
кафедра приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: distorsion@rambler.ru

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Рыблова Елизавета Анатольевна

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: distorsion@rambler.ru

Ryblova Elizaveta Anatol'evna

student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.3.032

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.