



УДК 629.7.067.8  
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-18



Open  
Access

RESEARCH  
ARTICLE

## Аналитический метод определения концентрации легирующей примеси

**Елизавета Анатольевна Рыблова**

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40  
Elizaveta.ryblova@mail.ru

**Аннотация.** Описывается аналитический метод, используемый для определения оптимальной концентрации легирующей примеси полупроводникового тензорезистивного датчика давления. В ходе исследования в программном пакете MathCAD был разработан алгоритм для вычисления значения концентрации, при которой минимизируется зависимость тензосопротивления от температуры. Главной задачей этой работы является нахождение численного значения концентрации легирующей примеси, которая позволяет снизить погрешность измерения выходного сигнала полупроводникового датчика давления.

**Ключевые слова:** концентрация примеси, полупроводниковый тензорезистивный датчик давления, температурная погрешность

**Для цитирования:** Рыблова Е. А. Аналитический метод определения концентрации легирующей примеси // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (1). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-18

## An analytical method for determining the concentration of an alloying impurity

**Elizaveta A. Ryblova**

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia  
Elizaveta.ryblova@mail.ru

**Abstract.** The article describes an analytical method used to determine the optimal concentration of an alloying impurity of a semiconductor strain-resistant pressure sensor. During the research, an algorithm was developed in the MathCAD software package to calculate the concentration value at which the dependence of strain resistance on temperature is minimized. The main task of this work is to find a numerical value of the dopant concentration, which reduces the measurement error of the output signal of a semiconductor pressure sensor.

**Keywords:** dopant concentration, semiconductor piezoresistive pressure sensor, temperature error

**For citation:** Ryblova E.A. An analytical method for determining the concentration of an alloying impurity. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(1):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-1-18

В настоящее время существует два основных подхода к компенсации температурной погрешности датчиков давления: схемотехнический и физико-технологический. Применение схемотехнического метода основано на введении схемы температурной компенсации выходного сигнала датчика давления, причем для каждого отдельного случая схемы могут отличаться. Наиболее универсальным методом является физико-технологический, который за счет введения примеси определенной концентрации позволяет снизить температурную погрешность.

В данной статье рассматривается физико-технологический метод компенсации температурной зависимости полупроводниковых тензодатчиков давления. Один из способов снижения ошибки, связанной с температурным составляющим полупроводниковых тензорезистивных датчиков давления, заключается в определении уровня легирующей примеси. В статье [1] описывается графический метод, основанный на модели Канда, для определения концентрации легирующей примеси. Полученное при помощи графического метода значение концентрации составляет  $5 \cdot 10^{-19} \text{ см}^{-3}$ . Однако графический



метод имеет высокую степень погрешности и дает только приблизительное значение концентрации легирующей примеси (бора), далее обозначенной как  $N$ .

Аналитический метод (метод расчета с помощью алгоритма) обладает более высокой точностью в сравнении с графическим методом. Поэтому для нахождения более точного значения  $N$  был использован аналитический метод (алгоритм расчета), представленный на рис. 1. Из предыдущего исследования уже известно, что минимальное значение мультипликативной составляющей температурной погрешности выходного сигнала соответствует минимальной зависимости тензорезистивного коэффициента  $P$  (далее – коэффициент  $P$ ) от температуры.

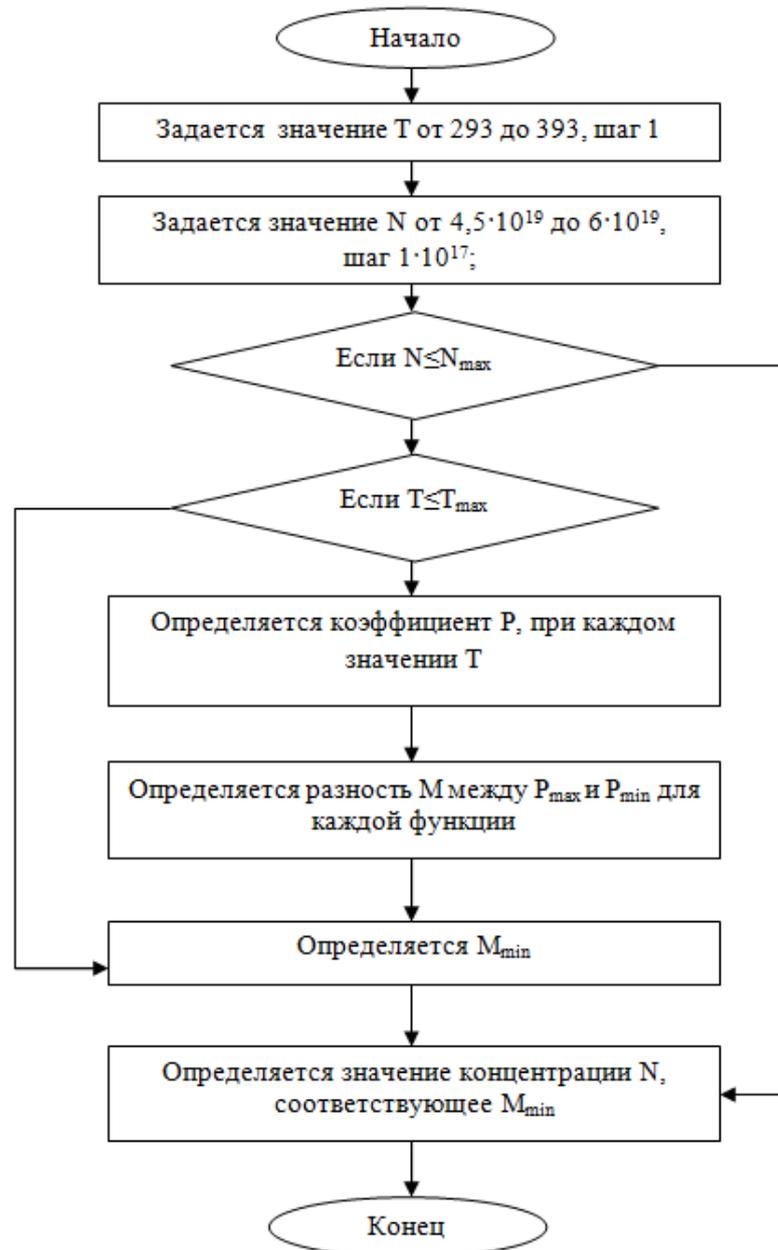


Рис. 1. Методика определения значения  $N$ , позволяющей минимизировать температурную зависимость выходного сигнала

1. Задается массив значений температуры  $T$  и массив значений  $N$ .
2. Задается условие: если  $N \leq N_{\max}$ , то значение температуры  $T$  равно минимально заданному значению  $T_{\min}$ .
3. Задается условие: если  $T \leq T_{\max}$ , то для всех заданных значений температуры рассчитывается коэффициент  $P$  по следующей формуле:



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

4. После определения коэффициента  $P$  был получен набор значений. Далее для каждой функции коэффициента  $P$  рассчитывается разница между максимальным  $P_{\max}$  и минимальным  $P_{\min} - M$ . Определяется минимальное значение  $M_{\min}$  и соответствующее ему значение  $N$ .

5. В результате расчета получили  $N = 5,13 \cdot 10^{19}$ , при этом значении концентрации температурная зависимость минимальна.

Для оценки температурной составляющей погрешности выходного сигнала был создан алгоритм, представленный блок-схемой на рис. 2.

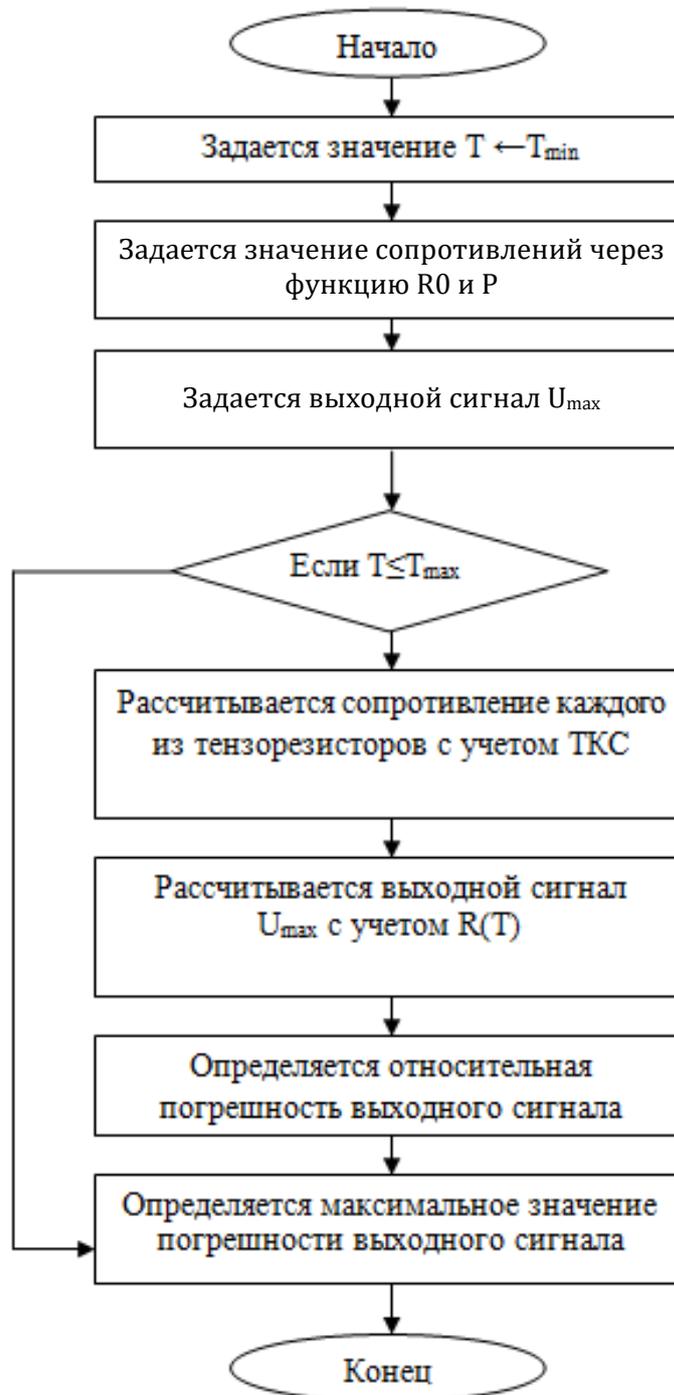


Рис. 2. Алгоритм определения максимальной погрешности выходного сигнала



1. Задается минимальное значение температуры  $T_{\min} = 293 \text{ K}$  и сопротивления тензорезисторов мостовой схемы (2)–(5):

$$R_1 = R_0 \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T_{\min}) \right); \quad (2)$$

$$R_2 = R_0 \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T_{\min}) \right); \quad (3)$$

$$R_3 = R_0 \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T_{\min}) \right); \quad (4)$$

$$R_4 = R_0 \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T_{\min}) \right). \quad (5)$$

2. Рассчитывается выходное напряжение мостовой схемы по формуле (6):

$$U_{\max} = U_p \cdot \frac{R_1 \cdot R_4 - R_2 \cdot R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}. \quad (6)$$

3. Задается условие: если  $T \leq T_{\max}$ , то выполняется переход к следующему шагу алгоритма.

4. Значения сопротивлений с учетом температурного коэффициента сопротивления (ТКС) определяются по формулам (7–10):

$$R_1(T) = R_0 (1 + \alpha(T_{\max} - T)) \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T) \right); \quad (7)$$

$$R_2(T) = R_0 (1 + \alpha(T_{\max} - T)) \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T) \right); \quad (8)$$

$$R_3(T) = R_0 (1 + \alpha(T_{\max} - T)) \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T) \right); \quad (9)$$

$$R_4(T) = R_0 (1 + \alpha(T_{\max} - T)) \left( 1 + \frac{\pi 44}{2} \cdot \sigma \cdot P(T) \right). \quad (10)$$

5. После определения сопротивления каждого из тензорезисторов, используя формулу (11), определяется значение выходного напряжения мостовой схемы:

$$U_{\max} = U_p \cdot \frac{R_1(T) \cdot R_4(T) - R_2(T) \cdot R_3(T)}{(R_1(T) + R_2(T)) \cdot (R_3(T) + R_4(T))}. \quad (11)$$

6. Для каждого случая вычисляется относительная погрешность выходного сигнала с использованием формулы (12), а результаты записываются в виде массива значений относительной погрешности  $\delta$ .

$$\delta = \left| \frac{U_i - U_{\max}}{U_{\max}} \right| \cdot 100 \%. \quad (12)$$

7. Максимальное значение погрешности выходного сигнала получается равным 0,41 %.

Таким образом, из проведенного исследования видно, что при введении концентрации легирующей примеси  $N = 5,13 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  максимальная температурная погрешность выходного сигнала не превышает 1 %, что является очень хорошим показателем. Однако при значении концентрации легирующей примеси  $N = 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , найденной аналитическим методом, получился тоже неплохой результат – около 2 %.

За счет определения концентрации легирующей примеси можно уменьшить погрешность температуры в выходном сигнале полупроводникового тензорезистивного датчика давления. Следует



отметить, что применение физико-технологического метода позволяет добиться результата без дополнительных схемотехнических решений и является универсальным. Результаты, полученные с помощью графического и аналитического методов, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Методы определения концентрации	Значение $N$	Температурная погрешность выходного сигнала
Графический метод	$5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	2,14 %
Аналитический метод (алгоритм)	$5,13 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$	0,41 %

Исследование показало, что значения концентрации примеси, полученные с использованием графического и аналитического методов, различаются на  $0,13 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . При этом температурная погрешность выходного сигнала при значении концентрации  $5,13 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  значительно ниже, чем при значении  $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

### Список литературы

1. Волков В. С., Рыблова Е. А. Определение концентрации легирующей примеси, обеспечивающей минимизацию температурной погрешности // Актуальные проблемы физической и функциональной электроники : материалы 22-й Всерос. молодежной науч. школы-семинара. Ульяновск, 2019. С. 268–271.

### References

1. Volkov V.S., Ryblova E.A. Determination of the concentration of an alloying impurity that minimizes the temperature error. *Aktual'nye problemy fizicheskoy i funkcional'noj jelektroniki: materialy 22-j Vseros. molodezhnoj nauch. shkoly-seminara = Actual problems of physical and functional electronics : materials of the 22nd Allround. youth science. seminar schools.* Ul'janovsk, 2019:268–271. (In Russ.)

Поступила в редакцию / Received 11.03.2024

Принята к публикации / Accepted 11.04.2024