УДК 621.3.032

В. С. Волков, И. Н. Баринов

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДАТЧИКОВ ДАВЛЕНИЯ

V. S. Volkov, I. N. Barinov

OFFSET TEMPERATURE COMPENSATION OF HIGH TEMPERATURE SEMICONDUCTOR PRESSURE SENSORS

Аннотация. Описано использование терморезисторов с положительным и отрицательным ТКС для компенсации температурной погрешности высокотемпературных тензорезистивных датчиков в случае нелинейной температурной зависимости тензорезисторов.

A b s t r a c t. The article describes using thermistors with negative and positive temperature coefficient of resistance for offset temperature compensation in the case of strain gauge nonlinear temperature dependence.

Ключевые слова: высокотемпературный тензорезистивный датчик, температурный коэффициент сопротивления, нелинейная температурная зависимость.

K e y w o r d s: high-temperature strain gauge sensor, temperature coefficient of resistance, nonlinear temperature dependence.

Современные датчики давления, используемые в различных областях науки и техники, часто эксплуатируются в условиях воздействия высоких температур. Одними из наиболее широко применяемых являются датчики, содержащие полупроводниковый чувствительный элемент (ЧЭ), на котором с использованием МЭМС-технологий изготовлены полупроводниковые тензорезисторы [1]. Расширение температурного диапазона датчиков создает проблему снижения температурной погрешности. Изменение температуры ЧЭ в составе датчика вызывает изменение чувствительности тензорезисторов, поэтому разработка технических решений для компенсации температурной погрешности чувствительности является актуальной задачей.

Известные в литературе [1, 2] способы температурной компенсации чувствительности применимы для относительно узкого температурного диапазона, не превышающего 100 °C, так как в этом диапазоне зависимость сопротивления тензорезистора от температуры можно считать линейной [3], а также требуют дополнительной настройки после изготовления чувствительного элемента, заключающейся в расчете подстроечного резистора по результатам измерений сопротивлений тензорезисторов и определения их температурных характеристик. В диапазоне температур до 300 °C зависимость сопротивления от температуры для кремниевых тензорезисторов является нелинейной, при этом погрешность линейности достаточно существенна (рис. 1). По данной причине необходимо разрабатывать новые технические решения для осуществления температурной компенсации.



Рис. 1. Пример зависимости сопротивления тензорезистора от температуры

Тензорезисторы в составе ЧЭ объединены в мостовую измерительную схему (рис. 2).



Рис. 2. Мостовая измерительная схема

Выходной сигнал схемы описывается выражением

$$U_{\rm BMX} = U_{\rm fr} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}.$$
 (1)

Для упрощения расчета и изготовления ЧЭ номиналы тензорезисторов выбираются одинаковыми, при этом в схеме реализуется дифференциальное преобразование

$$R_1 = R_4 = R + \Delta R;$$

$$R_2 = R_3 = R - \Delta R,$$
(2)

где ΔR – приращение сопротивления тензорезисторов под действием измеряемого давления.

При соблюдении условий (2) выходной сигнал мостовой схемы может быть описан формулой

$$U_{\rm BMX} = -U_{\rm II} \frac{\Delta R}{R} \, .$$

Однако в реальных условиях из-за инструментальных погрешностей при изготовлении тензорезисторов они обладают некоторым разбросом параметров, который в ряде случаев может достигать 10 %. Разброс параметров приводит к неодинаковым температурным характеристикам тензорезисторов, что оказывает негативное влияние на величину температурной погрешности чувствительности.

Нелинейность температурной зависимости полупроводниковых тензорезисторов приводит к необходимости использования для ее описания нелинейной функции, например, полинома 2-й степени:

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2), \qquad (3)$$

где R_0 – номинал тензорезистора при нормальной температуре; α_1 – ТКС 1-го порядка [1/°С]; α_2 – ТКС 2-го порядка [1/°С²].

Зависимость сопротивления тензорезистора от деформации под воздействием измеряемого давления выражается формулой

$$R(P) = R_0(1+k\varepsilon), \qquad (4)$$

где k – коэффициент тензочувствительности; ε – относительная деформация тензорезистора.

Коэффициент тензочувствительности можно представить линейно зависящим от температуры:

$$k(T) = k_0 (1 + \gamma \Delta T), \qquad (5)$$

где ү – ТКЧ.

Подставив выражения (3) и (5) в формулу (4), получим зависимость сопротивления тензорезистора от температуры и деформации вследствие измеряемого давления:

$$R(P,T) = R_0 (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T^2) \pm R_0 k_0 \varepsilon (1 + \gamma \Delta T), \qquad (6)$$

где знак «+» соответствует тензорезисторам R_1 и R_4 , а знак «-» – тензорезисторам R_2 и R_3 .

В программе MathCAD было проведено моделирование мостовой схемы, тензорезисторы которой имеют номинальное сопротивление 500 Ом и характеризуются разбросом параметров, показанным на рис. 3. Параметры схемы представлены в табл. 1, напряжение питания моста $U_{\rm n} = 6$ В.



Рис. 3. Температурные зависимости сопротивлений тензорезисторов

Таблица 1

| Номинальное сопротивление тензорезистора, Ом | | ТКС 1-го порядка α_1 , 1/°С, | ТКС 2-го порядка α_2 , 1/°С ² |
|---|-----|-------------------------------------|---|
| R_1 | 510 | $-4,839 \cdot 10^{-6}$ | $-2,22 \cdot 10^{-6}$ |
| R_2 | 505 | $-1,166 \cdot 10^{-5}$ | $-2,1 \cdot 10^{-6}$ |
| R_3 | 491 | $-6,348 \cdot 10^{-6}$ | $-1,9 \cdot 10^{-6}$ |
| R_4 | 508 | $-1,196 \cdot 10^{-5}$ | $-2 \cdot 10^{-6}$ |

Параметры моделируемой схемы

Выходной сигнал мостовой измерительной схемы, рассчитанный по формулам (1)–(6) при максимальном давлении и изменении температуры до 300 °C, представлен на рис. 4.



Рис. 4. Выходной сигнал мостовой измерительной схемы

Из рис. 4 видно, что при увеличении температуры выходной сигнал мостовой схемы нелинейно возрастает от 216 до 248 мВ, что составляет погрешность порядка 15 %. Следовательно, необходимо принять специальные меры для температурной компенсации чувствительности мостовой схемы.

Наиболее простым способом температурной компенсации является последовательное включение терморезистора в цепь питания мостовой схемы (рис. 5).



Рис. 5. Включение терморезистора в мостовую схему для компенсации температурной погрешности чувствительности

Представляет интерес использование в качестве термозависимого резистора сопротивления, выполняемого по тому же технологическому процессу, что и тензорезисторы, и имеющего аналогичную температурную характеристику (рис. 6).



Рис. 6. Температурная зависимость сопротивления терморезистора

В этом случае часть схемы, содержащую источник питания U_{n} и терморезистор R_{t} , можно представить в виде эквивалентного генератора напряжения, управляемого температурой, напряжение на выходе которого U_{n1} будет определяться формулой

$$U_{\rm n1} = -U_{\rm n} \frac{R_{\rm M}}{R_{\rm M} + R_t}, \tag{7}$$

где *R*_м – сопротивление мостовой схемы, определяемое выражением

$$R_{\rm M} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4};$$

R_t – сопротивление терморезистора, зависимость которого от температуры также целесообразно описать полиномом 2-го порядка:

$$R_t(T) = R_{t0}(1 + \beta_1 \Delta T + \beta_2 \Delta T^2),$$

где β_1 и β_2 – ТКС терморезистора 1-го и 2-го порядков соответственно.

Температурную погрешность чувствительности мостовой схемы δT можно численно оценить как изменение максимального выходного сигнала схемы, вызванное изменением температуры при максимальном давлении, отнесенное к минимальному выходному сигналу при нормальной температуре и максимальном давлении. При использовании данной схемы происходит снижение чувствительности измерительного преобразования, которое можно оценить как отношение выходного сигнала при максимальном давлении к начальному выходному сигналу при нормальной температуре.

Результаты моделирования схемы в программе MathCAD по формуле (1), в которой напряжение питания определяется по формуле (7), при использовании терморезисторов различного номинала представлены в табл. 2 (столбец 2).

Таблица 2

Результаты моделирования мостовой схемы с использованием для температурной компенсации терморезисторов с различными характеристиками

| Сопротивление терморезистора <i>R_t</i> , Ом | Снижение температурной погрешности чувствительности $\frac{\delta T - \delta T_{\kappa}}{\delta T}$, % (терморезистор с отрицательной температурной характеристикой) | Снижение температурной погрешности чувствительности $\frac{\delta T - \delta T_{\rm k}}{\delta T}$, % (терморезистор с положительной температурной характеристикой) | Снижение чувствительности измерительной $\frac{S-S_{\kappa}}{S}$, % |
|--|---|--|---|
| 250 | 2,09 | 39,4 | 33,00 |
| 300 | 2,35 | 44,1 | 37,169 |
| 350 | 2,58 | 29,78 | 40,85 |
| 400 | 2,785 | 16,39 | 44,123 |
| 450 | 2,968 | 3,68 | 47,052 |
| 500 | 3,13 | -2,02 | 49,69 |
| 550 | 3,282 | -21,67 | 52,078 |
| 600 | 3,418 | -14,52 | 54,249 |
| 650 | 3,542 | -11,84 | 56,232 |
| 700 | 3,655 | -17,27 | 58,05 |
| 750 | 3,759 | -23,32 | 59,023 |

Начальный выходной сигнал схемы, вызванный разбросом параметров тензорезисторов (см. табл. 1), рассчитанный в программе MathCAD по формуле (1) с учетом выражения (6), составляет $U_0 = 0,066$ В. Температурная погрешность чувствительности без компенсации, рассчитанная на основе формулы (1) с учетом выражения (6) в диапазоне изменения температур, равном 300 °C, составляет 14,55 %.

Из анализа результатов моделирования следует, что использование терморезистора, обладающего характеристикой, показанной на рис. 6, позволяет снизить температурную погрешность чувствительности незначительно, при этом чувствительность к измеряемой величине уменьшается более чем в 1,5 раза.

В связи с этим рассмотрим использование в качестве терморезистора сопротивления, температурная зависимость которого имеет обратный знак по сравнению с терморезистором, характеристика которого представлена на рис. 6 (рис. 7). Такая температурная характеристика для кремниевого терморезистора может быть получена изменением концентрации легирующей примеси [2].



Рис. 7. Температурная характеристика для кремниевого терморезистора

Результаты моделирования схемы с использованием данного терморезистора представлены в табл. 2 (столбец 3). Из анализа результатов моделирования следует, что использование терморезистора с температурной характеристикой, противоположной температурной характеристике тензорезисторов измерительного моста, позволяет произвести более эффективную термокомпенсацию чувствительности при использовании терморезистора номиналом от 0,5 до 0,6 номинала тензорезисторов.

При этом температурная погрешность чувствительности снижается на величину порядка 40 %, тогда как чувствительность к измеряемой величине снижается на треть. При этом температурная зависимость выходного сигнала мостовой схемы не является монотонной, а имеет экстремум на участке, приблизительно соответствующем середине температурного диапазона (рис. 8).



Рис. 8. Температурная зависимость выходного сигнала при максимальном давлении тензомоста без компенсации (кривая *1*) и тензомоста с подключенным терморезистором с положительной температурной характеристикой (кривая *2*)

Результаты моделирования схемы с терморезистором, характеристика которого представлена на рис. 7, приведены в табл. 2 (столбец 3). Из анализа результатов видно, что, ис-

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

пользуя терморезистор, номинал которого составляет 250–300 Ом, можно снизить температурную погрешность чувствительности на величину порядка 40 %, при этом чувствительность к измеряемому давлению снижается не более чем на треть.

Таким образом, применение терморезисторов позволяет снизить температурную погрешность чувствительности высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления за счет выбора температурной характеристики терморезистора на этапе проектирования и изготовления.

Список литературы

- 1. Ваганов, В. И. Интегральные тензопреобразователи / В. И. Ваганов. М. : Энергоатомиздат, 1983. – 136 с.
- Мокров, Е. А. Полупроводниковые пьезочувствительные элементы микроэлектронных датчиков давлений. Основы проектирования и разработки : учеб. пособие / Е. А. Мокров, И. Н. Баринов, П. Н. Цибизов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2009. – 104 с.
- Гридчин, В. А. Физика микросистем : учеб. пособие : в 2 ч. / В. А. Гридчин, В. П. Драгунов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – 16 с.

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт физических измерений E-mail: distorsion@rambler.ru

Баринов Илья Николаевич

кандидат технических наук, начальник отдела, Научно-исследовательский институт физических измерений E-mail: mzungu@inbox.ru

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, senior stuff scientist, Research Institute of Physical Measurements

Barinov Il'ya Nikolaevich

candidate of technical sciences, head of department, Research Institute of Physical Measurements

УДК 621.3.032

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.