УДК 621.3.032

Б. В. Цыпин, А. В. Терехина, Д. В. Пена, А. А. Трофимов, В. С. Волков, И. Н. Баринов

КОМПЕНСАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ТЕНЗОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО АЛМАЗА ДЛЯ ДАТЧИКОВ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ¹

B. V. Tsypin, A. V. Terekhina, D. V. Pena, A. A. Trofimov, V. S. Volkov, I. N. Barinov

COMPENSATION OF THE TEMPERATURE DEPENDENCY FOR STRAIN GAUGE BASED ON POLYCRYSTALLINE DIAMOND FILMS FOR SENSORS OPERATED IN EXTREME CONDITIONS

Аннотация. Описано применение поликристаллических алмазных пленок для создания высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления. Рассмотрены способы аппроксимации температурной зависимости коэффициента тензочувствительности алмазной пленки полиномами различных порядков. Предложен способ компенсации температурной зависимости датчика, учитывающий разброс параметров тензорезисторов из поликристаллического алмаза.

A b s t r a c t. Application of polycrystalline diamond films for high-temperature semiconductor pressure sensors are described. The approximation of the gauge factor temperature dependence for diamond film by polynomials of various orders are described. The method of gauge factor temperature dependence's compensation taking into account the variation of parameters of the polycrystalline diamond strain gauges for sensing element is proposed.

Ключевые слова: пленка поликристаллического алмаза, чувствительный элемент, высокотемпературный датчик давления, температурная зависимость коэффициента тензочувствительности.

K e y w o r d s: polycrystalline diamond film, sensing element, high-temperature pressure sensor, temperature dependence of gauge factor.

Введение

Значительную часть измерений в современной технике составляют измерения давления, для реализации которых успешно используются тензорезистивные МЭМС-датчики. Основой для изготовления чувствительных элементов (ЧЭ) датчиков давления в большинстве случаев является кремний. Однако современные условия эксплуатации технических изделий предъявляют высокие требования к точности и надежности датчиков в условиях высоких температур

4

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки России (Соглашение № 14.В37.21.1647).

и ионизирующих излучений, что заставляет исследовать новые полупроводниковые материалы для изготовления ЧЭ датчиков [1, 2].

Для работы в условиях воздействия температуры до 500–600 °С одновременно с воздействием радиации используются датчики давления с ЧЭ и поликристаллического кремния, который слабовосприимчив к образованию радиационных дефектов, однако поликремний характеризуется низкой тензочувствительностью (20–30), что затрудняет изготовление датчиков для измерения малых давлений. Поэтому актуальной является задача поиска и исследования полупроводниковых материалов для производства ЧЭ датчиков, работоспособных в экстремальных условиях эксплуатации.

Одним из возможных решений данной проблемы является использование поликристаллических алмазных пленок (ПАП) для создания ЧЭ. ПАП характеризуются большой шириной запрещенной зоны, термической стабильностью при температуре до 600 °C и значением модуля Юнга, почти на порядок превышающим модуль Юнга для кремния [1]. Для того чтобы придать алмазной пленке электропроводность, алмаз легируют в процессе роста акцепторной примесью – бором, получая материал p-типа [3, 4].

Перспективность применения ПАП для изготовления ЧЭ тензорезистивных датчиков подтверждается высоким коэффициентом тензочувствительности алмаза (5–1000) [5]. Как и для кремния, для ПАП характерна значительная зависимость тензочувствительности от температуры.

Анализ температурной зависимости тензочувствительности алмазных пленок

Известна зависимость коэффициента тензочувствительности от температуры для поликристаллических алмазных пленок, характеристики которых приведены в табл. 1. Легированные бором поликристаллические алмазные пленки нанесены на кремниевые мембраны, покрытые слоем нелегированного алмаза [5].

Таблица 1

Сопротивление пленки, Ом	Толщина мембраны.	Процентное соотношение бора к углероду в жилкой	Толщина слоя нелегированного	Толщина легированной бором
	МКМ	фазе, 10 ⁻⁶	алмаза, мкм	алмазной пленки, мкм
1720	22	5792	10	2
5270	35	1448	10	3
75200	15	5792	10	3

Свойства образцов поликристаллической алмазной пленки

Зависимость коэффициентов тензочувствительности пленки в диапазоне температур от 25 до 500 °С представлена на рис. 1 [5].



Рис. 1. Зависимость тензочувствительности алмазной пленки от температуры: *К*1 – для образца 1; *К*2 – для образца 2; *К*3 – для образца 3 (см. табл. 1)

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Из анализа рис. 1 видно, что образец 3 характеризуется высоким коэффициентом тензочувствительности при нормальных условиях (более 130), тогда как образцы 1 и 2 характеризуются значением коэффициента тензочувствительности порядка 10, что близко к тензочувствительности поликремния. Однако при увеличении температуры до 300 °C тензочувствительность образца 3 резко уменьшается и переходит в область отрицательных значений.

Таким образом, для изготовления ЧЭ тензорезистивного датчика, эксплуатирующегося в широком диапазоне температур, целесообразно использовать ПАП, соответствующие по своим электрофизическим характеристикам образцу 1, так как его тензочувствительность практически не зависит от температуры в диапазоне до 350 °C, что упрощает схему построения температурной компенсации. При эксплуатации датчика в диапазоне температур до 500 °C также целесообразно использовать ПАП, соответствующие образцу 1, для которого зависимость тензочувствительности от температуры может быть представлена в виде полиномиальной или кусочно-линейной аппроксимации.

На рис. 2 представлены результаты аппроксимации температурной зависимости коэффициента тензочувствительности образца 1 полиномами.



Рис. 2. Аппроксимация температурной зависимости коэффициента тензочувствительности образца 1 полиномами: f1(t) – линейная аппроксимация; f2(t) – квадратичная зависимость; f3(t) – кубическая зависимость; f4(t) – полином 4-й степени; f5(t) – полином 5-й степени

Из рис. 2 видно, что максимальное совпадение аналитической функции с экспериментальными данными дает аппроксимация полиномом 5-й степени, так как при аппроксимации полиномами низших порядков наблюдается уход аналитической зависимости в область отрицательных значений коэффициента тензочувствительности, что существенно усложняет обработку и компенсацию измерительного сигнала с заданной точностью.

Схемотехнический метод температурной компенсации тензочувствительности

Представляет интерес оценка возможности использования схемотехнических методов температурной компенсации погрешности тензочувствительности как наиболее отработанных для традиционных полупроводниковых материалов [6].

Аналитическая зависимость полинома 5-й степени (см. рис. 2) выражается формулой

$$k(T) = 1,004 + 0,534T - 8,128 \cdot 10^{-3}T^{2} + 5,025 \cdot 10^{-5}T^{3} - 1,371 \cdot 10^{-7}T^{4} + 1,361 \cdot 10^{-10}T^{5}.$$
 (1)

Выходной сигнал полной мостовой схемы описывается выражением

$$U_{\rm BMX} = U_{\rm fr} \frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}.$$
 (2)

Зависимость сопротивления тензорезисторов из ПАП от температуры предполагается линейной [7]:

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha \Delta T), \qquad (3)$$

где R_0 – номинал тензорезистора при нормальной температуре; α – ТКС.

Зависимость сопротивления тензорезистора от деформации под воздействием измеряемого давления выражается формулой

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

где k(T) – коэффициент тензочувствительности, определяемый выражением (1); ε – относительная деформация тензорезистора.

Подставив выражения (1) и (3) в (4), получим зависимость сопротивления тензорезистора от температуры и деформации вследствие измеряемого давления:

$$R(P,T) = R_0(1 + \alpha \Delta T) \pm R_0 k(T)\varepsilon, \qquad (5)$$

где знак «+» соответствует тензорезисторам R_1 и R_4 , а знак «-» – тензорезисторам R_2 и R_3 (см. выражение (2)).

Ввиду значительной сложности аналитического выражения выходного сигнала (2) с учетом (5) было проведено имитационное моделирование мостовой схемы, состоящей из ПАП-тензорезисторов, в программе MathCAD.

Тензорезисторы имеют номинальное сопротивление 500 Ом и характеризуются разбросом ТКС. Параметры схемы представлены в табл. 2, напряжение питания моста $U_{\pi} = 6$ B, максимальное давление соответствует деформации $\varepsilon = 5 \cdot 10^{-4}$.

Таблица 2

	Номинальное сопротивление тензорезистора, Ом	ТКС, 1/°С
R_1	500	$-4,53 \cdot 10^{-4}$
R_2	500	$-4,57 \cdot 10^{-4}$
R_3	500	$-4,55 \cdot 10^{-4}$
R_4	500	$-4,58 \cdot 10^{-4}$

Параметры моделируемой схемы

Результаты моделирования при максимальном давлении представлены на рис. 3. Как видно из рисунка, выходное напряжение изменяется от значения порядка 40 мВ при нормальной температуре до величины порядка 800 мВ при 500 °C, при этом внешний вид зависимости повторяет кривую на рис. 2.



Рис. 3. Зависимость выходного напряжения мостовой схемы при максимальном давлении от температуры

Очевидно, что необходима линеаризация полученной зависимости. Для этой цели предполагается использовать измерительный усилитель с температурно-зависимым коэффициен-

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

том усиления [8]. Как известно, для компенсации нелинейности можно использовать масштабный преобразователь с обратной функцией преобразования, однако нахождение обратной функции для полинома 5-й степени – весьма трудоемкий процесс [9]. Поэтому в первом приближении была использована модель измерительного усилителя, реализующего зависимость

вида $F = \frac{k_u}{k(T)}$, где k_u – коэффициент усиления по напряжению. Такая схема может быть реа-

лизована на основе неинвертирующего включения операционного усилителя, одним из резисторов которого является ПАП-тензорезистор с температурной зависимостью тензочувствительности, характеризуемой выражением (1).

При задании величины $k_u = 10$ выходной сигнал усилителя примет вид, показанный на рис. 4.



Рис. 4. Температурная зависимость напряжения на выходе усилителя

Из рис. 4 видно, что зависимость гораздо ближе к линейной, чем выходной сигнал мостовой схемы. Максимум нелинейности, соответствующий температуре порядка 370 °C, соответствует точке перегиба (см. рис. 3), с которой начинается резкое возрастание коэффициента тензочувствительности.

Дальнейшее снижение температурной зависимости может быть достигнуто путем включения на выходе схемы устройства с температурной характеристикой, линейно уменьшающейся при увеличении температуры. В качестве величины, обладающей такой зависимостью, может служить сопротивление мостовой схемы $R_{\rm M}$, определяемое по формуле

$$R_{\rm M} = \frac{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$
 (6)

Сопротивление мостовой схемы линейно уменьшается при увеличении температуры, так как ТКС тензорезисторов отрицателен (см. табл. 2).

Данная зависимость может быть получена либо напрямую с измерительного моста при питании током, либо в случае питания напряжением с дополнительного моста, тензорезисторы которого аналогичны тензорезисторам мостовой схемы.

Таким образом, выходной сигнал измерительного моста после окончательной линеаризации будет описываться формулой

$$U_{\text{комп}} = U_{\text{вых}} \frac{k_u}{k(T)} \cdot \frac{R_{\text{M}}(T)}{R_{\text{M}_0}},\tag{7}$$

где $U_{\text{комп}}$ – выходное напряжение после температурной компенсации; $R_{\text{м0}}$ – сопротивление мостовой схемы при нормальной температуре (равное сопротивлению одного тензорезистора, т.е. в данном случае 500 Ом).



Рис. 5. Температурная зависимость выходного сигнала после окончательной температурной компенсации

250

ΔT

300

350

400

450

200

0.03

100

150

Выводы

Несмотря на нелинейность, из рис. 5 видно, что максимальное значение абсолютной погрешности нелинейности не превышает 1 мВ, что составляет величину порядка 3 % во всем температурном диапазоне (25–500 °C), или порядка 0,007 %/°C, что позволяет сделать вывод об эффективности предложенного метода компенсации температурной погрешности тензочувствительности. Задачами дальнейших исследований в данном направлении являются разработка схемы формирования заданных температурно-зависимых сигналов (см. выражение (7)) и исследование влияния разброса номиналов тензорезисторов на эффективность температурной компенсации.

Список литературы

- Баринов, И. Н. Высокотемпературные датчики давления на основе поликристаллического алмаза. Состояние разработок и тенденции развития / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Датчики и системы: методы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Датчики и системы – 2012) : тр. Междунар. науч.-техн. конф. с элементами науч. школы для молодых ученых (г. Пенза, 22–26 октября 2012 г.) / под ред. Е. А. Ломтева, А. Г. Дмитриенко. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – С. 91–93.
- Баринов, И. Н. Высокотемпературные полупроводниковые датчики давления с повышенной временной стабильностью / И. Н. Баринов, В. С. Волков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2011. – № 8. – С. 51–55.
- 3. CVD Diamond for Electronic Devices and Sensors // John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- 4. Ральченко, В. CVD-алмазы. Применение в электронике / В. Ральченко, В. Конов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2007. – № 4. – С. 58–67.
- Yamamoto, A. Evaluation of diamond gauge factor up to 500 °C / A. Yamamoto, N. Norio, T. Takahiro // Western Industrial Research Institute of Hiroshima Prefecture, 2-10-1 Agaminami Kure 737-0004, Japan.
- 6. Волков, В. С. Использование системы Simulink при имитационном моделировании высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления / В. С. Волков, И. Н. Баринов // Приборы. 2011. № 7. С. 50–55.
- Kulha, P. Piezoresistive Sensor for Strain Measurement on Turbine Blade with Wireless Telemetry Data Acquisition International / P. Kulha, M. Husak // Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'11) Las Palmas de Gran Canaria (Spain), 13th to 15th April, 2010.
- 8. Виглеб, Г. Датчики. Устройство и применение / Г. Виглеб. М. : Мир, 1989. 280 с.
- Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – Киев : Вища школа, 1985. – 432 с.

Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль

Цыпин Борис Вульфович

доктор технических наук, профессор, кафедра информационно-измерительной техники, Пензенский государственный университет E-mail: cypin@yandex.ru

Терехина Анастасия Валерьевна

аспирант, Пензенский государственный университет E-mail: anastacia.terekhina @gmail.com

Пена Дмитрий Владимирович

аспирант, Пензенский государственный университет E-mail: distorsion@rambler.ru

Трофимов Алексей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, кафедра информационно-измерительной техники, Пензенский государственный университет E-mail: distorsion@rambler.ru

Волков Вадим Сергеевич

кандидат технических наук, доцент, кафедра приборостроения, Пензенский государственный университет E-mail: distorsion@rambler.ru

Баринов Илья Николаевич

кандидат технических наук, доцент, кафедра информационно-измерительной техники, Пензенский государственный университет E-mail: mzungu@inbox.ru

Tsypin Boris Vul'fovich

doctor of technical sciences, professor, sub-department of information and measuring technique, Penza State University

Terekhina Anastasiya Valer'evna

postgraduate student, Penza State University

Pena Dmitriy Vladimirovich

postgraduate student, Penza State University

Trofimov Aleksey Anatol'evich

doctor of technical sciences, associate professor, sub-department of information and measuring technique, Penza State University

Volkov Vadim Sergeevich

candidate of technical sciences, associate professor, sub-department of instrument making, Penza State University

Barinov Il'ya Nikolaevich

candidate of technical sciences, associate professor, sub-department of information and measuring technique, Penza State University

УДК 621.3.032

Цыпин, Б. В.

Компенсация температурной зависимости тензорезисторов на основе пленок поликристаллического алмаза для датчиков физических величин, эксплуатирующихся в экстремальных условиях / Б. В. Цыпин, А. В. Терехина, Д. В. Пена, А. А. Трофимов, В. С. Волков, И. Н. Баринов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 2(4). – С. 44–50.