

УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. И. И. МАРЬЯМОВА

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ С ТЕНЗОРЕЗИСТОРАМИ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Проведены исследования, направленные на создание тензорезистивных датчиков давления на основе нитевидных кристаллов кремния, работоспособных при высоких температурах. Использование стеклоприпоя для крепления тензорезисторов на упругих элементах датчиков из коварового сплава позволило повысить диапазон рабочих температур датчиков. На основе предложенной тензомодульной конструкции разработаны датчики давления различной модификации.

Ключевые слова: кремний, тензорезистор, датчики давления, высокие температуры.

Развитие ряда областей техники, таких как авиационная, ракетно-космическая, химическая и др., выдвигает задачу создания датчиков давления, работоспособных при повышенных температурах. Большая часть существующих в настоящее время тензометрических полупроводниковых датчиков давления эксплуатируется при рабочей температуре не более 200°C из-за ограничений традиционных материалов, используемых для их изготовления [1]. Известные микроэлектронные датчики давления на основе технологии "кремний на диэлектрике" способны расширить рабочий диапазон приборов приблизительно до 450°C, однако это возможно либо на короткий промежуток времени, либо при использовании водяного охлаждения. Это связано с тем, что чувствительные элементы таких датчиков при высоких температурах имеют большую аддитивную погрешность из-за высоких механических напряжений, обусловленных различием температурных коэффициентов расширения слоев многослойной мембраны. Кроме того, чувствительные элементы микроэлектронных датчиков дав-

ления требуют применения сложного, дорогостоящего оборудования и имеют низкую надежность при ударных нагрузках и резких скачках измеряемого давления [2].

Целью настоящей работы является разработка высокотемпературных тензорезистивных датчиков давления специального назначения на основе новых конструкторско-технических решений.

В последнее время основным материалом для изготовления чувствительных элементов датчиков является кремний, что обусловлено его технологичностью, низкой стоимостью и работоспособностью в широком диапазоне температур [3–5]. Полупроводниковые тензорезисторы на основе нитевидных кристаллов (НК) кремния имеют высокую механическую прочность, приближающуюся к теоретическому пределу прочности данного материала (они выдерживают деформацию растяжения до 0,5–1% и свыше 10⁸ циклов знакопеременной деформации [6]). Разработанная технология создания омических контактов методом импульсной сварки платиновой микропроволоки с НК кремния обеспечи-

Таблица 1

Параметры тензорезисторов на основе НК p-Si с разным удельным сопротивлением

Параметр	Значения параметров для тензорезисторов с различным ρ	
	$\rho = 0,01 - 0,02$ Ом·см	$\rho = 0,005 - 0,006$ Ом·см
Коэффициент тензочувствительности при 20°C	100...150	80...100
Сопротивление при 20°C, Ом	100...400	100...120
Температурные коэффициенты в диапазоне 20...320°C, %·°C ⁻¹		
– сопротивления	+(0,12...0,17)	+(0,15...0,17)
– тензочувствительности	-0,20	-0,12

вадет надежную работу тензорезисторов в разных динамических режимах и при повышенных температурах (до 500°C), поскольку температура эвтектики Si – Pt составляет 830°C. Таким образом, возможность работы этих тензорезисторов при высоких температурах обеспечивается как свойствами самого кремния, в котором микропластичность наблюдается только при температурах выше 500°C, так и технологией изготовления тензорезисторов.

В процессе исследований нами были определены оптимальные уровни легирования НК кремния бором для изготовления тензорезисторов, пригодных для работы в различных температурных диапазонах. В табл. 1 приведены основные параметры тензорезисторов на основе НК p-Si с разным удельным сопротивлением ρ. Тензорезисторы на основе сильнолегированных НК кремния p-типа с ρ = 0,005 – 0,006 Ом·см обладают оптимальными характеристиками для создания на их основе высокотемпературных датчиков давления: линейной зависимостью сопротивления от температуры и минимальной зависимостью коэффициента тензочувствительности от температуры в диапазоне 20...350°C.

Для расширения температурного диапазона работы тензорезистивных датчиков механических величин на основе НК кремния в сторону высоких температур необходимо отказаться от известных высокотемпературных полимерных клеев и цементов, используемых для закрепления тензорезисторов на упругих элементах датчиков (мембранах, балках и др.) [7, 8] и перейти к принципиально новым методам крепления тензорезисторов, которые способны обеспечить их фиксацию при повышенных температурах. В результате проведенных исследований для этой цели был выбран стеклоприпой С51-1 с коэффициентом термического расширения (КТР), равным $4,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, близким к КТР кремния $(2,5 - 4,2) \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне температур от комнатной до 550°C. Температура размягчения стеклоприпоя С51-1 составляет 570°C. В качестве материала упругого элемента датчиков был выбран коваровый сплав 29НК, КТР которого равен $4,6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [9, 10], поскольку при этом создается соединение «кремний – стеклоприпой – ковар», согласованное по КТР. Следует также отметить, что технология изготовления вакуумплотных соединений на основе спая «ковар – стекло» используется в электронной промышленности при изготовлении электровакуумного оборудования.

На кремниевый тензорезистор, закрепленный на упругом элементе датчика, действует термическая деформация, обусловленная различием КТР кремния и материала упругого элемента. Величина термической деформации рассчитывалась по формуле

$$\varepsilon_T(T) = \gamma \int_{T_0}^T [\alpha_s(T) - \alpha_c(T)] dt,$$

где α_s, α_c – температурные коэффициенты линейного расширения материалов упругого элемента и тензорезистора соответственно;

T_0 – температура полимеризации адгезива.

В приведенной формуле коэффициент γ характеризует эффективность передачи деформации от упругого элемента к тензорезистору. Для предложенного способа крепления тензорезистора установлено, что $\gamma=0,9$.

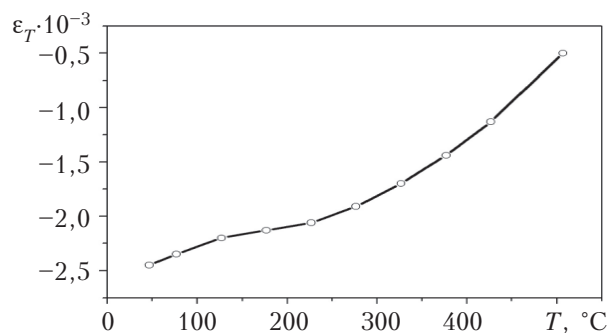


Рис. 1. Температурная зависимость термической деформации Si-тензорезистора, закрепленного стеклоприпоем на упругом элементе из ковара 29НК

Как видно из рис. 1, термическая деформация, действующая на кремниевый тензорезистор, уменьшается с повышением температуры, что обеспечивает минимальные термические напряжения и стабильность выходных характеристик датчиков при работе в диапазоне температур от комнатной до 350°C.

Среди многих конструкций датчиков давления наибольшую универсальность, на наш взгляд, имеет конструкция, в которой используется система «мембрана – шток – балка» (рис. 2). Преимуществами такой конструкции перед мембранной является более линейная деформационная характеристика упругого элемента, возможность уменьшения влияния температуры на полупроводниковые тензорезисторы, что позволяет уменьшить температурную погрешность датчика.

При создании датчиков давления использовалась разработанная нами конструкция датчика с универсальным тензомодулем – упруго-чувствительным элементом с закрепленными на нем тензорезисторами. Основу конструкции тензомодуля составляет кольцо с консольной балкой, по обе стороны которой закреплены два

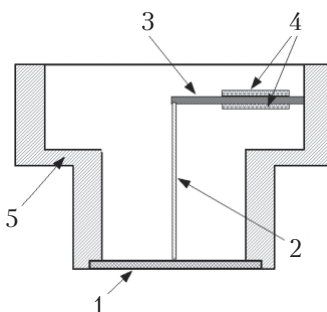


Рис. 2. Принципиальная конструкция датчика давления:

1 – мембрана; 2 – шток; 3 – балка; 4 – тензорезистор; 5 – корпус

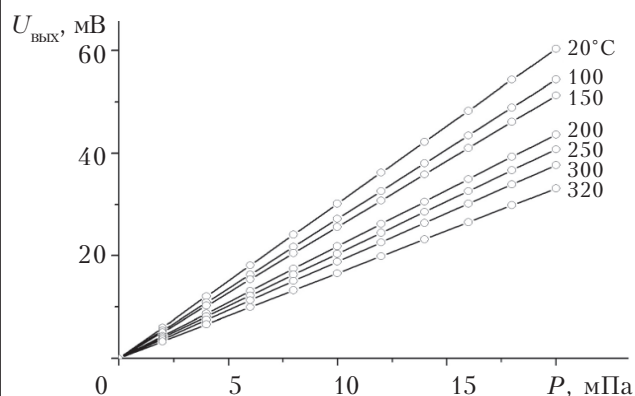


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала датчика с универсальным тензомодулем на основе Si-тензорезисторов от давления при различных температурах

тензорезистора. Специальная форма упругого элемента позволила уменьшить нелинейность выходного сигнала датчиков до 0,01%. Разработанный универсальный тензомодуль позволяет создавать на его основе датчики для различных диапазонов давления, изменяя только геометрические размеры мембраны.

Для проведения стендовых испытаний авиационных двигателей в статическом и динамическом режимах необходимы датчики давления, которые удовлетворяли бы специфическим требованиям: малые габариты при достаточно высокой чувствительности к измеряемому давлению при повышенных температурах в широком частотном диапазоне. Были разработаны миниатюрные высокотемпературные датчики давления [11, 12] с диаметром воспринимающей мембраны 3,8 мм. Толщина мембраны датчика давления, работающего в диапазоне 0...300 кПа, составляет 60 мкм, а в диапазоне 0...20 МПа — 250 мкм. Все элементы датчиков давления выполнены из коварового сплава 29НК и соединены между собой при помощи лазерной сварки, что обеспечивает высокую жесткость и герметичность конструкции. Типичные градуировочные характеристики разработанных датчиков в диапазоне температур 20...320°C приведены на рис. 3. Здесь видно, что выходные характеристики датчиков имеют линейную зависимость во всем температурном диапазоне и достаточно высокий уровень выходного сигнала без дополнительного его усиления. Благодаря высокой тензочувствитель-



Рис. 4. Высокотемпературные датчики давления тензомодульной конструкции на основе НК кремния

Таблица 2
Основные характеристики разработанных миниатюрных высокотемпературных датчиков давления

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых давлений	от 0...300 кПа до 0...20 МПа
Диапазон рабочих температур	-60...+350°C
Выходной сигнал при 20°C	30–60 мВ
Температурный коэффициент выходного сигнала, не более	-0,14%·°C ⁻¹
Собственная частота	17–40 кГц
Основная погрешность	0,1–0,25%
Размеры: диаметр мембраны высота датчиков	3,8–9 мм 2–10 мм

ности тензорезисторов на основе НК Si *p*-типа удалось значительно повысить собственную частоту датчиков давления и уменьшить их габариты.

На рис. 4 представлено фото разработанных высокотемпературных датчиков давления, а в табл. 2 приведены их основные параметры.

Для диагностики двигателей внутреннего сгорания необходимо проводить измерения давления газов непосредственно в камере сгорания, где температура достигает 800°C. Верхняя граница температурного диапазона работы датчиков с кремниевыми тензорезисторами ограничена температурой, при которой появляется микропластичность кремния. Для таких условий была предложена конструкция, которая предусматривает охлаждение датчика жидкостью [13]. Конструкция и внешний вид разработанного датчика показаны на рис. 5. Его упругий элемент изготовлен в виде двух цилиндров, жестко соединенных нижним и верхним основаниями, что позволяет получить деформацию с разным знаком. Корпус датчика имеет канал для прохождения охлаждающей жидкости. Конструкция упругого элемента позволяет полностью защитить тензорезисторы от охлаждающей жидкости.

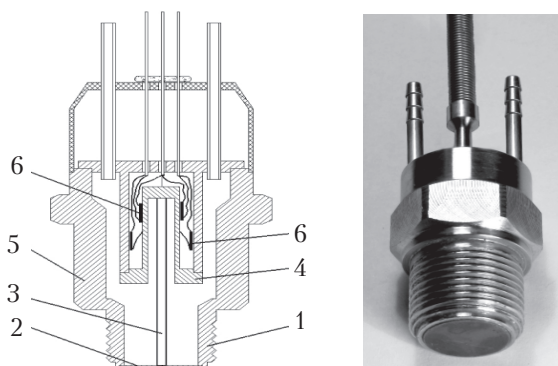


Рис. 5. Конструкция и внешний вид высокотемпературного датчика с внешним охлаждением с кремниевыми тензорезисторами:
1 — штуцер; 2 — мембрана; 3 — штуок; 4 — упругий элемент; 5 — корпус; 6 — тензорезисторы

Характеристики датчика исследовались в диапазоне давлений $(0...4) \cdot 10^5$ Па и температур от 20 до 400°C (без внешнего охлаждения) и до 900°C с охлаждением. Градуировочные характеристики датчика линейны во всем исследованном диапазоне температур и давлений. Величина выходного сигнала разработанного датчика при температуре 400°C (около 50 мВ) достаточна для его регистрации без усиления, а температурный коэффициент выходного сигнала датчика не превышает $0,17\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ в диапазоне температур 20...400°C. С повышением температуры возрастает чувствительность датчика, что связано с уменьшением модуля упругости и, соответственно, с уменьшением жесткости всей упругой системы датчика. Погрешность датчика в диапазоне температур 20...900°C составляет $\pm 0,5\%$, а дополнительная температурная погрешность датчика давления меньше, чем $0,03\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Таким образом, на основе проведенных исследований и конструкторских разработок были созданы высокотемпературные датчики давления различной модификации с тензорезисторами на основе сильнолегированных НК кремния р-типа. Предложенная тензомодульная конструкция датчиков давления благодаря своей универсальности обеспечивает возможность работы датчиков в разных диапазонах давления для исследования статических и динамических процессов в жидкостях и газах. Разработанные датчики нашли применение в различных отраслях промышленности, таких как авиационная, моторостроение, нефтедобывающая и другие.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Гуревич О. С., Буряченко А. Г., Ранченко Г. С. Перспективы развития датчиков давления для авиационных и общепромышленных ГТД // Авиационно-космическая техника и технология. — 2007. — № 10. — С. 137–141. [Gurevich O. S., Buryachenko A. G., Ranchenko G. S. // Aviatsonno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2007. N 10. P. 137]
2. Мокров Е. А., Баринов И. Н. Разработка высокотемпературных полупроводниковых датчиков давления // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. — 2009. — № 1. — С. 23–27. [Mokrov E. A., Barinov I. N. // Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2009. N 1. P. 23]
3. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. [Vaganov V. I. Integral'nye tenzopreobrazovateli. Moskva: Energoatomizdat, 1983]
4. Агеев О. А., Мамиконова В. М., Петров В. В. и др. Микроэлектронные преобразователи неэлектрических величин. — Таганрог: ТРТУ, 2000. [Ageev O. A., Mamikonova V. M., Petrov V. V. i dr. Mikroelektronnye preobrazovateli neelektricheskikh velichin. Taganrog TRTU, 2000]
5. Лепих Я. И., Гордиенко Ю. О., Дружинин А. О. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordienko Yu. O., Druzhinin A. O. та ін. Stvorennya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinnya dlya intelektual'nikh sistem. Odesa: Astroprint, 2010]
6. Maryamova I., Tykhan M., Kutrakov A. et al. Semiconductor mechanical sensors for adverse and dynamic conditions // XIV IMEKO World Congress. — Finland, Tampere, 1997. — Vol. IXA. — P. 99–103.
7. Петрова А. П. Термостойкие клеи. — Москва: Химия, 1977. [Petrova A. P. Termostoikiye klei. Moskva: Khimiya, 1977]

8. Клокова Н. П. Тензорезисторы. — Москва: Машиностроение, 1990. [Klokoval N. P. Tenzorezistory. Moskva: Mashinostroenie, 1990]

9. Молотилев В. В. Прецизионные сплавы. Справочник. — Москва: Металлургия, 1974. [Molotilov V. V. Pretsizionnye splavy. Spravochnik. Moskva: Metallurgiya, 1974]

10. Новикова С. И. Тепловое расширение твердых тел. — Москва: Наука, 1974. [Novikova S. I. Teplovoe rasshirenie tverdykh tel. Moskva: Nauka, 1974]

11. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника. — 2001. — № 9. — С. 3–8. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Lavitskaya E. N. i dr. // Mikrosistemnaya tekhnika. 2001. N 9. P. 3]

12. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Лавитская Е. Н. и др. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // Датчики и системы. — 2001. — № 6. — С. 2–7. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Lavitskaya E. N. i dr. // Datchiki i sistemy. 2001. N 6. P. 2]

13. Дружинин А. О., Кутраков О. П., Марьямова И. И. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію для широкого діапазону температур // Вісник НУ «Львівська політехніка». Електроніка. — 2011. — № 7–8. — С. 64–71. [Druzhinin A. O., Kutrakov O. P., Mar'yamova I. I. // Visnik NU "L'viv'ska politekhnika". Elektronika. 2011. N 708. P. 64]

*Дата поступления рукописи
в редакцию 07.06 2012 г.*

Druzhinin A. A., Kutrakov A. P., Maryamova I. I.
High-temperature pressure sensors with strain gauges based on silicon whiskers.

Key words: silicon, strain gauge, pressure sensor, high temperature.

Studies aimed at the creating of piezoresistive pressure sensors based on silicon whiskers, operating at high temperatures were carried out. Using the glass adhesive for strain gauges mounting on spring elements of covar alloy gave the possibility to elevate the sensor's operating temperature range. Several modifications of pressure sensors based on the proposed strain-unit design were developed.

Ukraine, Lviv National University «Lviv Polytechnic».

Дружинин А. О., Марьямова И. И., Кутраков О. П.
Високотемпературні датчики тиску з тензорезисторами на основі ниткоподібних кристалів кремнію.

Ключові слова: кремній, тензорезистор, датчики тиску, високі температури.

Проведено дослідження, спрямовані на створення тензорезистивних датчиків тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію, працездатних при високих температурах. Використання склоприпою для кріплення тензорезисторів на пружних елементах датчиків з коварового сплаву дозволило підвищити діапазон робочих температур датчиків. На основі запропонованої тензомодульної конструкції розроблено датчики тиску різної модифікації.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».