

УДК 621.315.592

Д. т. н. А. А. ДРУЖИНИН, к. т. н. А. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Н. С. ЛЯХ-КАГУЙ, А. М. ВУЙЦИК

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДВУХФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ-ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Представлена конструкция датчика давления-температуры на основе нитевидных кристаллов кремния p -типа, легированных бором, с удельным сопротивлением $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, который работоспособен в интервале температур от -100 до $+200^\circ\text{C}$ и в диапазоне давлений от 0 до 20 МПа . Датчик предназначен для широкой области применений.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний, датчик, температура, давление.

К современным датчикам физических величин предъявляется целый ряд требований: многофункциональность, миниатюрность, высокая точность преобразования, стабильность и др., которые могут быть достигнуты с помощью новых структурных и схемотехнических решений [1–3]. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время интенсивно разрабатываются совмещенные датчики давления и температуры [4–6]. Потребность в таких датчиках значительна, т. к. $60–70\%$ от общего объема измерений приходится на измерение давления и температуры. Известные многофункциональные датчики, которые позволяют одновременно получать информацию о нескольких измеряемых параметрах, таких как температура, деформация, давление, магнитное поле и др., создаются по сложным микроэлектронным технологиям, требующим специальных материалов и оборудования [7]. Поэтому существует потребность в создании более простой технологии изготовления многофункциональных датчиков, отвечающих всем современным требованиям к первичным преобразователям.

В основу разработанного двухфункционального датчика давления-температуры была положена зависимость сопротивления полупроводниковых кристаллов, в частности кристаллов кремния, не только от деформации, но и от температуры. С этой целью проводились исследования электрофизических и механических свойств нитевидных кристаллов (НК) кремния p -типа, легированных бором, с различным удельным сопротивлением ρ в широком интервале температур и деформаций [8, 9]. Анализ результатов исследований показал, что тензорезисторы на основе НК кремния с $\rho=0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ обладают оптимальными для создания на их основе двухфункциональных датчиков давления-температуры характеристиками: линейной зависимостью сопро-

тивления от температуры и минимальной зависимостью коэффициента тензочувствительности от температуры. На основании этого нами была предложена мембранная конструкция двухфункционального датчика давления-температуры. Основой конструкции является мембрана с двумя закрепленными на ней тензорезисторами на основе НК кремния p -типа с удельным сопротивлением $0,005 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, включенными в измерительную схему. В режиме реального времени схема обеспечивает раздельное непрерывное преобразование избыточного давления и измеренной температуры в унифицированные токовые электрические выходные сигналы ($4–20 \text{ мА}$ постоянного тока).

Конструкция разработанного датчика показана на **рис. 1**. Измеряемое давление воспринимается мембраной 1, на которой закреплены тензорезисторы 2 и 3. Под действием давления мембрана деформируется, и эта деформация передается тензорезисторам. Место закрепления тензорезисторов выбрано таким образом, что один из них испытывает деформацию растяжения, а другой — сжатия. Под воздействием давления

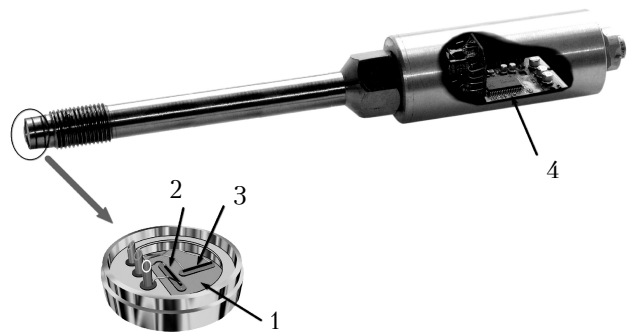


Рис. 1. Датчик давления-температуры: 1 — мембрана; 2, 3 — тензорезисторы; 4 — информационно-измерительная система

и температуры тензорезисторы изменяют свое сопротивление пропорционально деформации и температуре:

$$R1=R1_0+\Delta R1_{\varepsilon}+\Delta R1_t, \quad (1)$$

$$R2=R2_0-\Delta R2_{\varepsilon}+\Delta R2_t, \quad (2)$$

где $R1_0$, $R2_0$ — номинальное сопротивление тензорезисторов;

$\Delta R1_{\varepsilon,t}$, $\Delta R2_{\varepsilon,t}$ — изменение сопротивления тензорезисторов от давления (индекс ε) и от температуры (индекс t) соответственно.

Изменения значений сопротивления тензорезисторов от температуры и давления преобразуются информационно-измерительной системой 4 по каналам измерения давления и температуры в унифицированные токовые электрические выходные сигналы. Расположение тензорезисторов непосредственно на мембране обеспечивает минимальную инерционность измерения температуры. Изменяя толщину мембраны, можно в широком диапазоне изменять верхний предел измерения давления.

На **рис. 2** представлены графики температурной зависимости относительного изменения сопротивления свободного тензорезистора и закрепленного на мембране. Как видно из рисунка, температурный коэффициент сопротивления закрепленного тензорезистора больше, чем свободного, и равен $+0,2\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$. Кроме того, закрепление тензорезистора приводит к уменьшению нелинейности зависимости его сопротивления от температуры. Такое различие температурных зависимостей обусловлено тем, что коэффициенты линейного расширения связующего материала, материалов мембраны и чувствительного элемента тензорезистора различны [10].

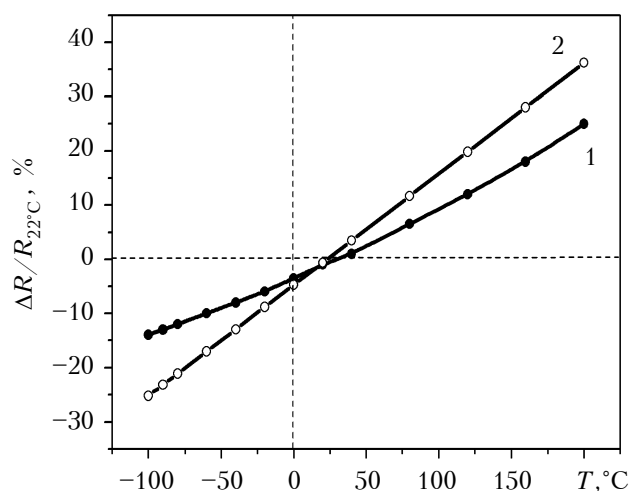


Рис. 2. Температурная зависимость относительного изменения сопротивления свободного тензорезистора (1) и закрепленного на мембране (2)

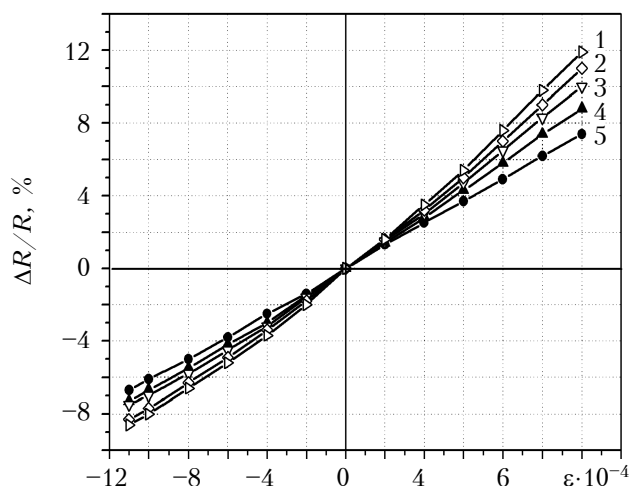


Рис. 3. Деформационные характеристики тензорезистора на основе НК Si с $\rho=0,005$ Ом·см при температуре -100°C (1); -50°C (2); $+20^\circ\text{C}$ (3); $+100^\circ\text{C}$ (4); $+200^\circ\text{C}$ (5)

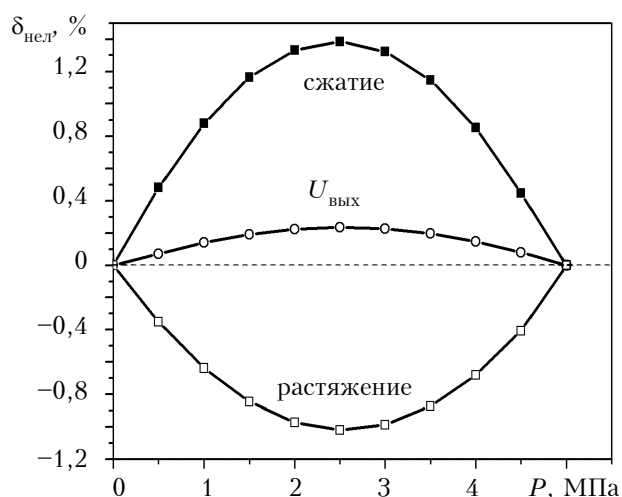


Рис. 4. Зависимость нелинейности характеристик датчика на основе НК Si и измерительной схемы от давления на мембрану

На **рис. 3** представлены типичные градуировочные характеристики тензорезисторов на основе НК кремния, полученные при деформации сжатия и растяжения при разных температурах. Как следует из рисунка, деформационные характеристики практически линейны до уровня деформации порядка $1 \cdot 10^{-3}$. Различие в наклоне кривых, полученных при сжатии и при растяжении, обусловлено термической деформацией, возникающей при закреплении тензорезистора на упругом элементе.

При включении двух тензорезисторов (RT_1 — для восприятия деформации растяжения, RT_2 — деформации сжатия) в полумостовую измерительную схему, зависимость напряжения $U_{\text{вых}}$, снимаемого с измерительной диагонали, от при-

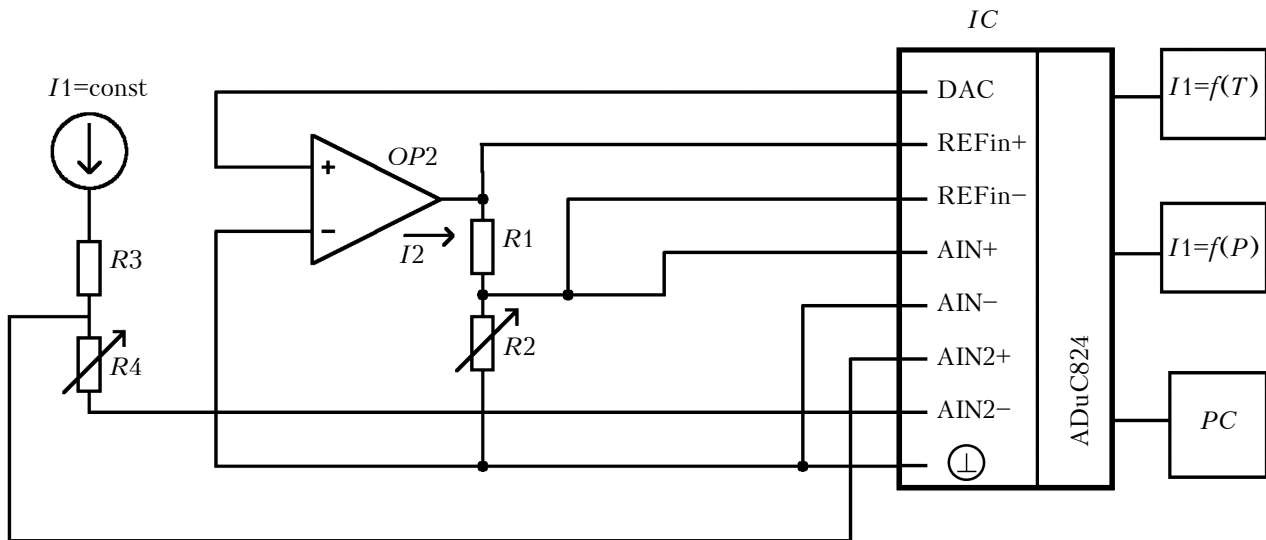


Рис. 5. Структурная схема информационно-измерительной системы

ращения их сопротивлений ΔR имеет нелинейный характер:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{п}}}{2} \left(\frac{\Delta R}{R + \frac{\Delta R}{2}} \right), \quad (3)$$

где $U_{\text{п}}$ — напряжение питания мостовой схемы.

В качестве примера на **рис. 4** приведена зависимость относительной нелинейности $\delta_{\text{нел}}$ характеристик одного из разработанных датчиков от давления. Как видно из рисунка, нелинейность этой зависимости относительно прямой линии, соединяющей крайние точки, достаточно велика: она составляет около 1,4...1,5% при деформации сжатия и -1,0...-1,1% при деформации растяжения.

При включении тензорезисторов RT_1 и RT_2 в неуравновешенную мостовую схему первого вида симметрии [11] обеспечивается относительно малая нелинейность выходной характеристики датчика давления (кривая $U_{\text{вых}}$ на **рис. 4**) — порядка 0,24%, что вполне достаточно для большинства технологических измерений [12], но при решении целого ряда прикладных задач необходимы датчики с более высокими метрологическими характеристиками.

Для увеличения точности и коррекции погрешностей преобразования в разработанном датчике используется микроконвертор ADuC824 [13], который включает аналоговые и цифровые блоки, а также микропроцессор на базе ядра 8052, с помощью которого осуществляется вторичная обработка сигнала. В системе используется отдельный управляемый источник тока, построенный на базе цифро-аналогового преобразователя, который является частью микроконтроллера (**рис. 5**). Раздельное питание двух тензорезисторов позволяет устранить аддитивную погрешность смещения нуля, возникающую при отклонении от номинала сопротивлений тензо-

резисторов. Большое влияние на точность измерения давления оказывает температурная погрешность, вызванная изменением температурных коэффициентов тензочувствительности и сопротивления. Предложенная схема позволяет осуществить гибкую программно-аппаратную термокомпенсацию канала измерения давления путем контроля температуры и введения поправочных коэффициентов.

Технические характеристики разработанного датчика представлены в **таблице**. Его стабильность, чувствительность и диапазон измерения достаточно удовлетворительны. Благодаря своей конструктивной простоте и функциональной завершенности он выгодно отличается от аналогичных датчиков давления, изготовленных с применением сложных микроэлектронных технологий, а наличие в нем канала изме-

Основные технические характеристики датчика давления-температуры

Параметр	Значение параметра
Верхние пределы измерения, МПа	от 0,1 до 20
Пределы погрешности канала измерения давления, %	$\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$
Температурный дрейф начального сигнала, $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	$\pm 0,03$
Температура измеряемой среды, $^\circ\text{C}$	-100...+200
Пределы погрешности канала температуры, $^\circ\text{C}$	0,5...1,5
Постоянная времени канала температуры (зависит от диапазона измеряемого давления), с	12

рения температуры позволяет значительно повысить информативность процесса измерения. Разработанный двухфункциональный датчик давления-температуры может использоваться в различных областях — в моторостроении, авиационной, нефтедобывающей и других отраслях промышленности.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Войтович І. Д., Корсунський В. М. Інтелектуальні сенсори. — Київ: Інститут кібернетики НАН України, 2007. [Voitovich I. D., Korsunskii V. M. Intelktual'ni sensori. Kiyiv: Institut kibernetiki NAN Ukrayini, 2007]
2. Леніх Я. І., Гордієнко Ю. О., Дзядевич С. В. та ін. Створення мікроелектронних датчиків нового покоління для інтелектуальних систем. — Одеса: Астропринт, 2010. [Lepikh Ya. I., Gordiyenko Yu. O., Dzyadevich S. V. ta in. Stvorenniya mikroelektronnikh datchikiv novogo pokolinnya dlya intelektual'nikh sistem. Odesa: Astroprint, 2010]
3. Вуйцик В., Голяка Р., Каліта В. та ін. Аналогова мікросхемотехніка вимірювальних та сенсорних пристроїв. — Львів: ДУ «Львівська політехніка», 1999. [Vuitsik V., Golyaka R., Kalita V. ta in. Analogova mikroskhemotekhnika vimiryuvail'nikh ta sensornikh pristroyiv. — L'viv: DU «L'viv's'ka politekhnika», 1999]
4. Harrop P., Das R. // Active RFID and Sensor Networks 2007-2017 // www.idtechex.com/products/en/view.asp?publicationid=ib6.
5. Белозубов Е. М., Белозубова Н. Е., Васильев В. А. Повышение устойчивости датчиков к внешним воздействиям факторам // Современная техника и технологии. — Ноябрь, 2011 [Belozubov E. M., Belozubova N. E., Vasil'ev V. A. // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. Noyabr', 2011]
6. <http://www.mems-issys.com>
7. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П., Павловский И. В. О возможности создания высокочувствительных пьезорезистивных сенсоров механических величин для криогенных температур // Датчики и системы. — 2005. — № 7. — С. 17—21. [Druzhinin A. A., Mar'yamova I. I., Kuttrakov A. P., Pavlovskii I. V. // Datchiki i sistemy. 2005. N 7. P. 17]
8. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки // Фізика і хімія твердого тіла. — 2011. — Т. 12, № 4. — С. 1078—1084. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Fizika i khimiya tverdogo tila. 2011. Vol. 12, N 4. P. 1078]
9. Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С. Тензорезистивні сенсори тиску на основі ниткоподібних кристалів кремнію // Сенсорна електроніка та мікросистемні технології. — 2012. — Т. 3, № 9 (3). — С. 16—24. [Druzhinin A. O., Mar'yamova I. I., Kuttrakov O. P., Lyakh-Kagui N. S. // Sensorna elektronika ta mikrosistemni tekhnologiyi. 2012. Vol. 3, N 9 (3). P. 16]
10. Дружинин А. А., Марьямова И. И., Кутраков А. П. 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., Kuttrakov A. P. i dr. // Mikrosistemnaya tekhnika. 2001. N 9. P. 3]
11. Воробьев С. А. Электрические измерения неэлектрических величин. Вып. 2. Основы теории и расчета неуравновешенных мостовых схем с датчиками сопротивления. — Свердловск: УПИ им. С. М. Кирова, 1975. [Vorob'ev S. A. Elektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin. Vyp. 2. Osnovy teorii i rascheta neuravnovesennykh mostovykh skhem s datchikami soprotivleniya. Sverdlovsk: UPI im. S. M. Kirova, 1975]
12. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. — Москва: Энергоатомиздат, 1983. [Vaganov V. I. Integral'nye tenzopreobrazovateli. Moskva: Energoatomizdat, 1983]
13. http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADUC824.pdf

Дата поступления рукописи
в редакцию 27.05 2013 г.

Druzhinin A. A., Kuttrakov A. P., Liakh-Kaguy N. S., Vuitsyk A. M. **Dual-function pressure-temperature sensor based on silicon whiskers.**

Keywords: whiskers, silicon, sensor, temperature, pressure.

The article presents the design of a pressure-temperature sensor based on p-type silicon whiskers, doped with boron, with a resistivity of 0,005 Ohm·cm. The sensor is operable in a temperature range from –100 to +200°C and at pressures from 0 to 20 MPa. The sensor is designed for a wide range of applications.

Ukraine, Lviv Polytechnic National University.

Дружинин А. О., Кутраков О. П., Лях-Кагуй Н. С., Вуйцик А. М. **Двофункціональний датчик тиску-температури на основі нитковидних кристалів кремнію.**

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній, датчик, температура, тиск.

Представлено конструкцію датчика тиску-температури на основі ниткоподібних кристалів кремнію p-типу, легованих бором, з питомим опором 0,005 Ом·см, який є працездатним в інтервалі температури від –100 до +200°C і в діапазоні тиску від 0 до 20 МПа. Датчик призначений для широкої області застосувань.

Україна, Національний університет «Львівська політехніка».