

PHYSICAL SENSORS

СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

УДК 621.315.592

МАЛОГАБАРИТНИЙ СЕЙСМОДАТЧИК НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, О. П. Кутраков, Р. М. Корецький

Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. Степана Бандери, 12, м. Львів, 79013, тел. (032)2582627,
e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

МАЛОГАБАРИТНИЙ СЕЙСМОДАТЧИК НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, О. П. Кутраков, Р. М. Корецький

Анотація. Запропонована конструкція сейсмодатчика, принцип дії якого базується на тензорезистивному ефекті у напівпровідниках. Розглянуто можливості застосування ниткоподібних кристалів кремнію р-типу, легованих бором, в якості чутливих елементів. Розроблений датчик призначений для вимірювання як статичних, так і динамічних деформацій у діапазоні частот 0 – 800 Гц. Серед переваг даного сейсмодатчика над аналогами є слабка залежність від магнітного поля, електронного опромінення і широка смуга досліджуваних сигналів.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, кремній, сейсмічний датчик (геофон), вібрація, акселерометр

SPACE-SAVING SEISMIC SENSOR BASED ON SILICON WHISKER

A. A. Druzhinin, O. P. Kutrakov, R. M. Koretsky

Abstract. The design of the seismic sensor the principle of action of which is based on tensor resistive effect is proposed. The possibilities of the use of p-type boron doped silicon whiskers as sensitive elements were examined. The developed sensor is designed to measure both static and dynamic strain

in the frequency range 0–800 Hz. It was shown that the advantages of this seismic sensor over the counterparts are a weak dependence on the magnetic field, electron irradiation and broad band signals.

Keywords: whisker, silicon, seismic sensor, vibration, accelerometer

МАЛОГАБАРИТНЫЙ СЕЙСМОДАТЧИК НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

А. А. Дружинин, А. П. Кутраков, Р. М. Корецкий

Анотация. Предложенная конструкция сейсмодатчика, принцип действия которого основан на тензорезистивном эффекте в полупроводниках. Рассмотрена возможность применения нитевидных кристаллов кремния р-типа, легированных бором, в качестве чувствительных элементов. Разработанный датчик предназначен для измерения как статических, так и динамических деформаций в диапазоне частот 0-800 Гц. Среди преимуществ данного сейсмодатчика над аналогами является слабая зависимость от магнитного поля, электронного облучения и широкая полоса исследуемых сигналов.

Ключевые слова: нитевидный кристалл, кремний, сейсмический датчик (геофон), вибрация, акселерометр

На сьогодні відомо багато різновидів конструкцій сейсмодатчиків, призначених для роботи в складі апаратури індустріального антисейсмічного захисту та високоточного визначення положення джерела сейсмічного сигналу в просторі. Проте варто зауважити, що вони не завжди відповідають вимогам, які ставляться до них, оскільки їм властиві суттєві недоліки. Зокрема, електромеханічні датчики, які діють за принципом маятника, мають не високу чутливість (зазвичай від 20 до 30 В/м/с) і обмежений з боку низьких частот робочий діапазон, який визначається власною частотою коливань інерційної маси на пружному підвісі. Найбільш поширені електромеханічні сейсмодатчики мають смугу, що починається з 10 Гц. Для її розширення в бік низьких частот доводиться використовувати велику інерційну масу і більш м'який підвіс, що збільшує габарити, масу і ймовірність виходу з ладу під час експлуатації [1, 2]. В той же час п'єзоелектричні сейсмодатчики, які складаються з інерційного елемента з'єданого з п'єзоелектричним перетворювачем, мають достатньо велику чутливість і динамічний діапазон вимірювань, але незадовільну чутливість і точність вимірювань низькочастотних коливань. Варто звернути увагу на зворотній п'єзоэффект, який присутній у всіх п'єзоперетворювачах, тобто система

може бути чутливою до електромагнітних завад. Значна чутливість зазначених датчиків до невимірюваних компонентів не дозволяє застосовувати їх в системах аварійного захисту реакторів [3].

Сейсмодатчики, виконані за технологією МЕМС [4], забезпечують більш широку смугу реєстрованого сигналу, високу лінійність вимірювань, нечутливість до нахилів при установці, високу ідентичність. У той же час вони поки не досягли поширення насамперед через більш високу ціну і підвищений рівень власних шумів. Необхідно також відзначити, що виробництво сейсмодатчиків за технологією МЕМС вимагає використання дуже дорогого технологічного устаткування.

Зазначені обставини стимулюють розробку нових сейсмодатчиків з використанням напівпровідникових чутливих елементів, які в перспективі могли б замінити традиційні.

Ниткоподібні кристали (НК) кремнію, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій, завдяки своїй структурній досконалості, морфології, механічним властивостям і високій тензочутливості успішно застосовуються як чутливі елементи тензорезистивних сенсорів механічних величин різного призначення [5,6]. Тому метою роботи було створення малогабаритного сейсмодатчика на основі

тензорезисторів, виготовлених з НК кремнію р-типу провідності. Для цього проводилися дослідження електрофізичних і механічних властивостей ниткоподібних кристалів кремнію р-типу, легованих бором до концентрацій, що відповідають металевому і діелектричному боку переходу метал-діелектрик у широкому інтервалі температур і деформацій.

Проведені дослідження механічних властивостей НК кремнію показали, що вони володіють високою механічною міцністю, яка наближується до теоретичної межі даного матеріалу (вони витримують деформацію розтягу до 0,5-1% і більш 10^8 циклів знакозмінної деформації) [7]. Дослідження статичних градувальних характеристик тензорезисторів на основі НК Si р-типу провідності з різним питомим опором проводились у широкому діапазоні деформацій до $\pm 2,5 \times 10^{-3}$ відн. од. [8]. На рис. 1 наведено залежності відносної зміни опору тензорезисторів з різним питомим опором від деформації стиску і розтягу в діапазоні $\pm 5 \times 10^{-4}$ відн. од. Як видно з рисунку, у цьому діапазоні деформацій, для всіх досліджуваних тензорезисторів, нелінійність градувальних характеристик не перевищує 0,1 %. З підвищенням рівня деформації нелінійність градувальних характеристик тензорезисторів збільшується, окрім цього в разі деформації стиску нелінійність більша, ніж при деформації розтягу.

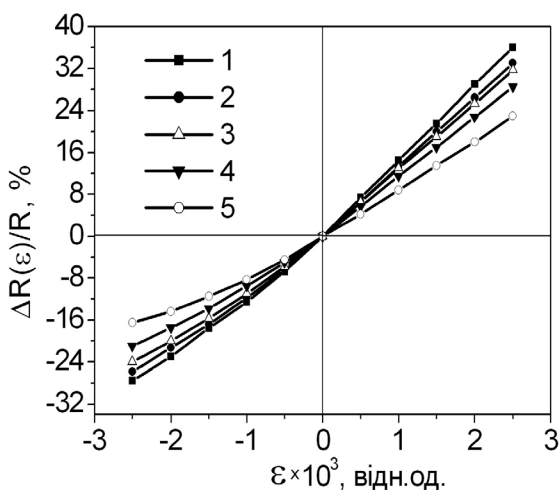


Рис. 1. Деформаційні характеристики тензорезисторів на основі НК Si з різним питомим опором: 1-0,07 Ом×см; 2-0,035 Ом×см; 3-0,02 Ом×см; 4 - 0,01 Ом×см; 5-0,004 Ом×см.

Використовуючи ці експериментальні дані, отримаємо залежність опору від деформації, що для тензорезисторів з питомим опором кремнію 0,02 Ом×см описується такою залежністю:

для $\varepsilon = \pm 1 \times 10^{-3}$ відн. од.

$$\frac{\Delta R(\varepsilon)}{R_0} = 118,5\varepsilon + 5500\varepsilon^2; \quad (1)$$

для $\varepsilon = \pm 2,5 \times 10^{-3}$ відн. од.

$$\frac{\Delta R(\varepsilon)}{R_0} = 113,5\varepsilon + 12200\varepsilon^2, \quad (2)$$

де R_0 – опір недеформованого кристала, $\Delta R(\varepsilon)$ – зміна опору кристала під дією деформації, ε – деформація.

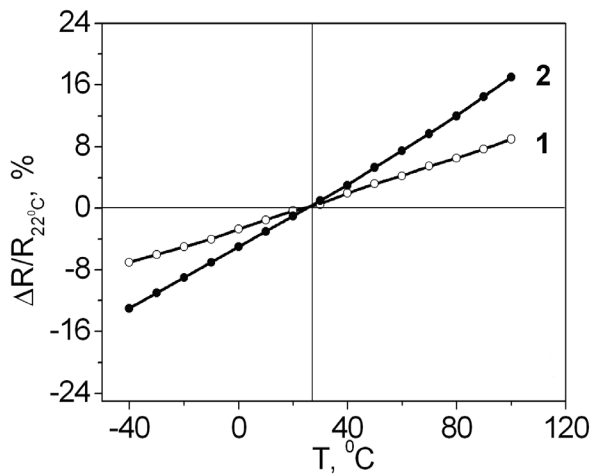
Отже, оскільки нелінійність градувальних характеристик тензорезисторів знижується зі зменшенням питомого опору кремнію, для тензорезисторів, дієздатних у широкому діапазоні деформацій, доцільно використовувати сильнолеговані бором НК кремнію, хоча в цьому разі зменшується їх тензочутливість. Окрім цього, оскільки тензорезистори на основі НК Si витримують великі пружні навантаження, їх можна використовувати для вимірювання значних деформацій до 1% із застосуванням відповідних схем лінеаризації вихідного сигналу.

Закріплення тензорезисторів на пружних елементах суттєво змінює їх температурні характеристики у порівнянні з незакріпленими. Різниця у температурних залежностях опору закріплених та вільних тензорезисторів зумовлена різницею термічних коефіцієнтів лінійного розширення (ТКЛР) матеріалу пружного елемента, кремнію та зв'язуючого матеріалу. Термічну деформацію ε_p , яка діє на закріпленний тензорезистор, можна оцінити за формулою [9]:

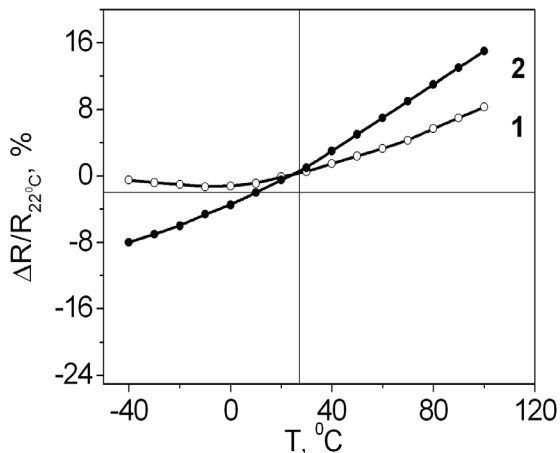
$$\varepsilon_t(T) = \gamma \int_{T_0}^T [\alpha_s(T) - \alpha_c(T)] dt, \quad (3)$$

де α_s і α_c – термічні коефіцієнти лінійного розширення кремнію і матеріалу пружного елемента, γ – коефіцієнт, який характеризує ефективність передачі деформації від пружного елемента до тензорезистора, а його значення залежить від геометрії тензорезистора та методів закріплення.

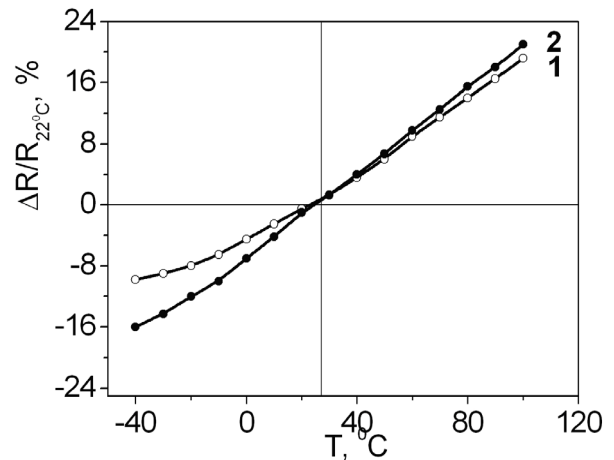
На рис. 2 наведено графіки відносної зміни опору тензорезисторів на основі НК Si p-типу з різним питомим опором від температури у діапазоні $-40 \div +100^\circ\text{C}$ для вільних (незакріплених) тензорезисторів та закріплених клеєм ВС-10Т на сталь. Як зрозуміло з наведених графіків, температурна залежність опору закріплених на сталі тензорезисторів суттєво відрізняється від аналогічної залежності для незакріплених тензорезисторів за рахунок термічної деформації ε_t .



а



б



в

Рис. 2. Температурні залежності відносної зміни опору тензорезисторів на основі НК p-Si з різним питомим опором – незакріплених (1) і закріплених на сталі (2): а – $0,005 \text{ Ом}\times\text{см}$; б – $0,02 \text{ Ом}\times\text{см}$; в – $0,038 \text{ Ом}\times\text{см}$.

Необхідно відзначити, що закріплення на сталі покращує лінійність температурної залежності опору даних тензорезисторів. У закріплених Si тензорезисторів з $\rho=0,02 \text{ Ом}\times\text{см}$ мінімум на кривій температурної залежності опору зміщується в область більш низьких температур. У цьому ж температурному діапазоні кращу лінійність зміни опору від температури мають кремнієві тензорезистори з $\rho=0,005 \text{ Ом}\times\text{см}$. Температурний коефіцієнт опору в області додатних температур більший у тензорезисторів, закріплених на матеріалах, для яких ТКЛР більший за ТКЛР кремнію.

На температурний хід коефіцієнта тензочутливості кремнієвих тензорезисторів, який визначається як:

$$K = \frac{d\left(\frac{\Delta R(\varepsilon)}{R_0}\right)}{d\varepsilon}, \quad (4)$$

суттєво впливає концентрація домішки. На рис.3 наведено графіки зміни коефіцієнта тензочутливості тензорезисторів на основі НК p-Si з різним питомим опором, закріплених клеєм ВС-10Т на сталі, від температури у діапазоні $-40 \div +100^\circ\text{C}$.

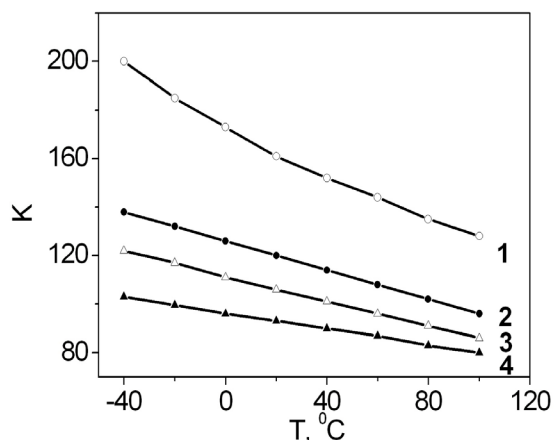


Рис. 3. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості закріплених на сталі тензорезисторів на основі НК р-Si з різними значеннями питомого опору: 1 – 0,13 Ом×см, 2 – 0,02 Ом×см, 3 – 0,01 Ом×см, 4 – 0,005 Ом×см.

Як зрозуміло з графіків, тензорезистори з більшим питомим опором кремнію характеризуються більш високими значеннями коефіцієнта тензочутливості, проте мають сильнішу залежність коефіцієнта тензочутливості від температури. В області температур $-40 \div +80^{\circ}\text{C}$ для тензорезисторів на основі НК р-Si з $\rho=0,005\text{--}0,02 \text{ Ом}\times\text{см}$ спостерігається майже лінійна залежність коефіцієнта тензочутливості від температури; у цьому діапазоні температур температурний коефіцієнт тензочутливості (ТКТЧ) постійний і дорівнює $\sim -0,18\% \times \text{град}^{-1}$ для $\rho = 0,02 \text{ Ом}\times\text{см}$. [10].

Для отримання достовірної інформації про динамічні характеристики тензорезисторів необхідно їх дослідити при знакозмінних деформаціях у різних частотних діапазонах. Для проведення динамічних досліджень в роботі [11] тензорезистори закріплювались лаком ВЛ-931 на спеціальних пружних елементах. Враховувалось, що за низьких частот пружний елемент працює у режимі вимушених коливань, а за високих частот використовується режим резонансних коливань.

Проведені дослідження характеристик закріплених тензорезисторів на основі НК кремнію р-типу під дією знакозмінної деформації різної амплітуди на фіксованих частотах до 3 кГц, показали, що у динамічному режимі

відхилення динамічного коефіцієнта тензочутливості від статичного не перевищує 5% і залежить від амплітуди деформації. На рис. 4. наведено результати досліджень статичних та динамічних характеристик тензорезисторів на частоті деформації 50 Гц. Як видно з рисунка статичні та динамічні характеристики тензорезисторів на основі НК Si практично збігаються на цій частоті.

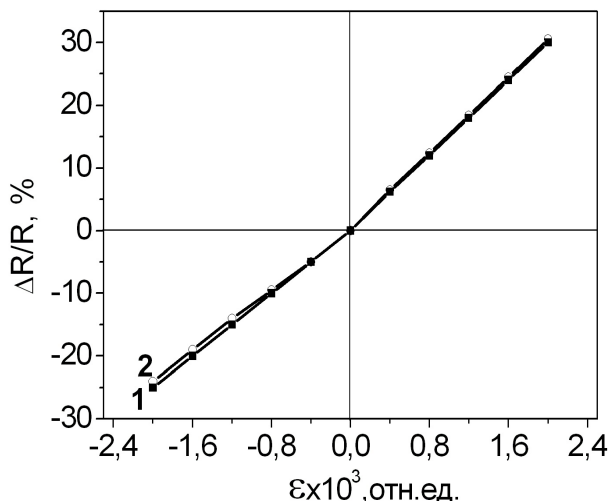


Рис. 4. Градувальні характеристики тензорезисторів на основі НК кремнію в статичному (крива 1) і динамічному (крива 2) режимі з частотою $f=50 \text{ Гц}$.

Для дослідження впливу довготривалої безперервної роботи на властивості тензорезисторів вивчалась залежність опору та коефіцієнта тензочутливості від кількості циклів навантаження при деформації $\varepsilon=1\times 10^{-3}$ відн. од. Результати вимірювань характеристик тензорезисторів при довготривалих навантаженнях з частотою деформації 50 Гц показали, що їх опір і коефіцієнт тензочутливості після 10^8 циклів практично не змінюються [11].

Вимоги, що пред'являються до конструкції пружних елементів вимірювальних перетворювачів сейсмічних коливань досить суперечливі. З одного боку, вони повинні забезпечувати досить високу чутливість перетворення, а з іншого – хороші динамічні властивості (ці дві характеристики перебувають у зворотній залежності). Високі значення коефіцієнта тензочутливості НК Si р-типу провідності дозволили створити на основі таких тензорезисторів

торів сейсмодатчик з чутливістю, достатньою для реєстрації слабких сигналів.

В основу розробленої конструкції сейсмодатчика з тензорезисторами на основі НК кремнію покладено кільцевий модуль (рис.5а) з трьома пружними елементами у вигляді балок рівного опору згину (1) із закріпленою в центрі інерційною масою (2). Така конструкція дозволяє отримати велику жорсткість в поперечному перерізі, тим самим мінімізувати чутливість датчика до бічних вібрацій. У датчику використано 6 тензорезисторів (3) на основі НК кремнію р-типу провідності з питомим опором 0,13 Ом×см, закріплених з обох сторін кожної балки і з'єднані послідовно, таким чином, що 3 з них зазнають деформацію стиску, а решта 3 – деформацію розтягу. Вибір тензорезисторів з таким питомим опором обумовлений оптимальним співвідношенням між достатньо великим коефіцієнтом тензочутливості і його температурною залежністю, яка компенсується електронними засобами. Тензорезистори з'єднані у мостову вимірювальну схему, вихідний сигнал з якої подається на блок підсилення.

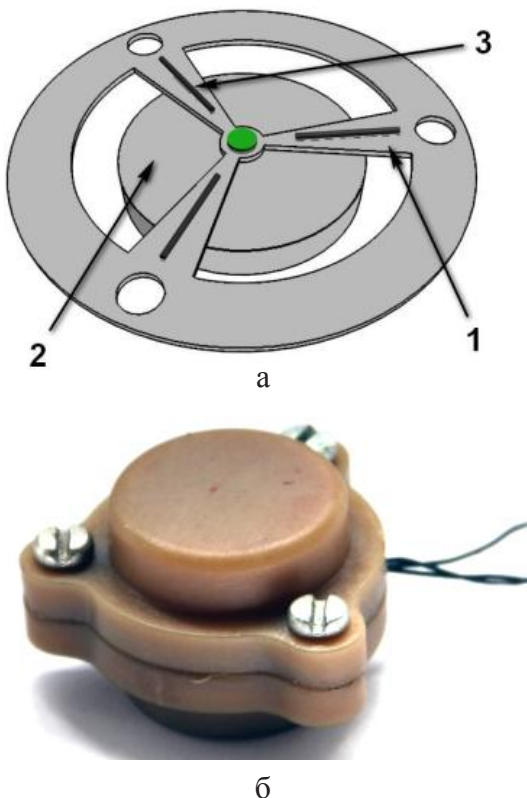


Рис. 5. Конструкція пружного елемента (а) та зовнішній вигляд сейсмодатчика (б). 1– балка рівного опору згину; 2 – інерційна маса; 3 – тензорезистор.

Виходячи з теоретичної моделі, запропонованої авторами [12, 13] та власними експериментальними дослідженнями були вибрані такі розміри основних елементів конструкції датчика: довжина балки – 3,5 мм, товщина 0,1 мм. Кільцевий елемент і корпус датчика виготовлено зі сплаву 36Н, який характеризується низьким лінійним коефіцієнтом теплового розширення в інтервалі кліматичних температур.

Зовнішній вигляд сейсмодатчика з тензорезисторами на основі НК Si наведено на рис. 5 б. Для ілюстрації здатності датчика реєструвати слабкі сигнали на рис. 6 наведено сигнал від вібрацій, які викликає людина проходячи біля датчика на відстані 3 м.

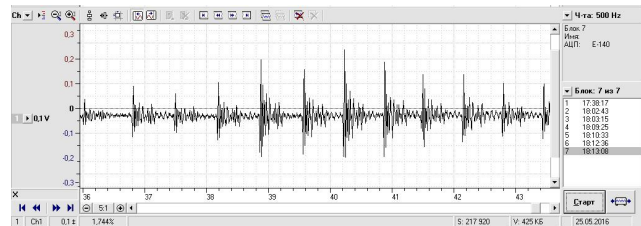


Рис. 6. Сигнал сейсмодатчика з тензорезисторами на основі НК кремнію, зареєстрований при проходженні людини на відстані 3 м.

У таблиці 1 наведені основні характеристики розробленого сейсмодатчика у порівнянні з аналогічним датчиком фірми Colybris, виготовленого за МЕМС технологією.

Отже, проведені експерименти показали, що створені сейсмодатчики з використанням тензорезисторів на основі НК кремнію р-типу провідності, за основними параметрами не поступаються зарубіжним аналогам. Крім того, розроблені сейсмодатчики дозволяють вимірювати як постійну, так і динамічну складові деформації, що дає можливість проводити градування датчика в статичному режимі. Серед переваг застосування даних кристалів в якості чутливих елементів сейсмодатчика слід віднести слабку залежність їх характеристик від магнітного поля (до 14 Тл) і електронного опромінення [14, 15]. Слід зазначити, що сейсмодатчик SI-Flex SF 3000L працює в магнітних полях до 6 Тл.

Порівняльні характеристики сейсмодатчиків

Параметр	SI-Flex SF 3000L Colybris	Датчик на основі НК кремнію
Діапазон вимірюваних сигналів, g	±3	±1,2
Коефіцієнт перетворення, В/g	1,2	6
Частотний діапазон, Гц	0 - 1000	0 - 800
Динамічний діапазон (в смузі 100 Гц), дБ	120	100
Температурний діапазон, °С	-40 +85	-60 +100
Нелінійність, %	±0,1	±0,15
Напруга живлення, В	6 - 15	6 - 15
Вага, г	450	32 г

В даний час продовжуються дослідження і розробка нових конструкцій чутливих елементів датчиків, від конфігурації яких залежать такі параметри: лінійність, частотний діапазон.

Список використаної літератури

[1]. A. A. Egorov. *Sistematika, principy raboty i oblasti primenenija datchikov // Zhurnal radioelektroniki*, 3, pp. 1-22 (2009) (in Russian).

[2]. A. S. No.1260894 SSSR, MKI3 G 01V 1/16. *Sejsmodatchik / M. S. Hlystunov. – opubl. 30.09.86, Vjull. No. 36 (in Russian).*

[3]. A. S. No.397868 SSSR, MKI3 G 01V 1/16. *Trehkomponentnyj p'ezoelektricheskij sejsmometr / V. M. Fremd. – opubl. 17.09.1973, Vjull. No. 37 (in Russian).*

[4]. B. Homeijer, D. Lazaroff, D. Milligan, R. Alley, J. Wu, M. Szepesi, B. Bicknell, Z. Zhang, R. G. Walmsley, P. G. Hartwell *Hewlett Packard's seismic grade MEMS accelerometer // Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). 2011 IEEE 24th International Conference. Cancun, Mexico, January 23-27, pp. 385-388 (2011).*

[5]. A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, E. N. Lavitskaja, A. P. Kuttrakov, Ju. M. Pankov. *Poluprovodnikovye*

sensory mehanicheskikh velichin na osnove mikrokristallov kremnija dlja jekstremal'nyh uslovij // Mikroelektronnaja tehnika, 9, pp. 3-8 (2001) (in Ukrainian).

[6]. A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, E. N. Lavitskaja, A. P. Kuttrakov, Ju. M. Pankov. *Ot poluprovodnikovyh tenzo-rezistorov k mikroelektronnym datchikam // Datchiki i sistemy*, 6, pp. 2-7 (2001) (in Russian).

[7]. I. Maryamova M. Tykhan, A. Kuttrakov et al. *Semiconductor mechanical sensors for advers and dynamic conditions // XIV IMEKO World Congress, Finland, IX(A), pp. 99-103 (1997).*

[8]. A. O. Druzhynin, I. I. Maryamova, O. P. Kuttrakov, I. V. Pavlovskiyi. *Vplyv deformatsii na domishkovu providnist nytkopodibnykh krystaliv kremniuu v oblasti perekhodu metal-dielektryk // Fyzyka i khimiiia tverdoho tila*, 4(4), pp. 720-728 (2003) (in ukrainian).

[9]. A. O. Druzhynin, I. I. Maryamova, O. P. Kuttrakov, N. S. Liakh-Kahui. *Nytkopodibni krystaly kremniuu dlia sensornoi elektroniky // Fyzyka i khimiiia tverdoho tila*, 12(4), s. 1078-1084 (2011) (in Ukrainian).

[10]. A. O. Druzhynin, I. I. Maryamova, O. P. Kuttrakov, N. S. Liakh-Kahui.

- Tenzorezystyvni sensory tysku na osnovi nytkopodibnykh krystaliv kremniiu // Sens. elektron. mikrosist. tehnol., 3(9), pp. 16–24 (2012) (*in Ukrainian*).
- [11]. O. P. Kuttrakov. Tenzorezystyvni davachi tysku na osnovi nytkopodibnykh krystaliv kremniiu dlia shyrokooho diapazonu temperatur i chastot. [Tekst]: dys. kand. tekhn. nauk: 05.27.01 Nats. un-t „Lvivska politekhnika” L., pp.150 (2012) (*in Ukrainian*).
- [12]. I. V. Andreev. Spravochnik po raschetu sobstvennykh kolebanij uprugih sistem. OGIZ, M. 224 p. (1946) (*in Russian*).
- [13]. L. E. Andreeva. Uprugie jelementy priborov Mashiz, M. 456 p. (1962) (*in Russian*).
- [14]. A. O. Druzhynin, I. I. Maryamova, I. P. Ostrovskiy, Yu. M. Khoverko, N. S. Liakh-Kahui. Vplyv oprominennia na strybkovu providnist nytkopodibnykh krystaliv Si ta SiGe // Tezy dopov. IV Ukr. nauk. konfer. z fizyky napivprovidnykiv (UNKFN-4), 15–19 veresnia, Zaporizhzhia, 1, pp. 192–193. (2011) (*in Ukrainian*).
- [15]. A. O. Druzhynin, I. P. Ostrovskiy, I. R. Kohut. Nytkopodibni krystaly kremniiu, hermaniiu ta yikhnikh tverdykh rozchyniv u sensornii elektronitsi Monohrafiia, Lviv: Vydavnytstvo Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”, 200p. (2010) (*in Ukrainian*).

Стаття надійшла до редакції 06.06.2016 р.

UDC 621.315.592

SPACE-SAVING SEISMIC SENSOR BASED ON SILICON WHISKER

A. A. Druzhinin, O. P. Kuttrakov, R. M. Koretskiy

National University «Lviv Polytechnic»

Summary

Researches due to the directed on creating of seismic sensor based on filamentary silicon crystal, were conducted, because modern counterparts have a number of essential shortcomings, in particular inability of the sensors calibration by indirect methods, limited frequency measurement range and unsatisfactory stability to electromagnetic interferences. Necessary impurity concentration was found as a result of the studies of electrophysical and deformation characteristics of p-type boron doped silicon whiskers with different resistivity in the wide temperature and deformation ranges to get an optimal correlation between the gauge coefficient and its temperature dependence for creation the miniature seismic sensor. Gauge coefficient consists 100 – 140 at the temperature of 20 ° C. Temperature coefficient of resistance reaches about +(0.08 – 0.12) % grade⁻¹.

Studies of strain gauge characteristics based on silicon whisker in the frequency interval to 20 kHz shown that deviation gauge coefficient is less than 5 % of its value for the static mode in the dynamic mode (at deformation level 2×10^{-3} rel. un.), allowing the sensor calibration without special vibration stands. The strain gauges stand 10^8 cycles of alternating deformation without visible change of its parameters.

Designed construction of seismic sensor with strain gauges based on silicon whisker is fit for acceleration measuring to 3g with frequency about 800 Hz. The converting coefficient of the sensor consists 5 B/g. Seismic sensor on the base of silicon whiskers allows to measure vibrations in the conditions of high magnetic fields (up to 14 T) and electron irradiation with energy to 10 MeV.

Keywords: whisker, silicon, seismic sensor, vibration, accelerometer

МАЛОГАБАРИТНИЙ СЕЙСМОДАТЧИК НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

А. О. Дружинін, О. П. Кутраков, Р. М. Корецький

Національний університет “Львівська політехніка”

Реферат

Проведено дослідження, спрямовані на створення сейсмодатчика на основі ниткоподібних кристалів кремнію, оскільки сучасні аналоги володіють рядом суттєвих недоліків, зокрема, неможливість калібрування датчиків непрямими методами, обмежений частотний діапазон вимірювань і незадовільна стійкість до електромагнітних завад. В результаті проведених досліджень електрофізичних і деформаційних характеристик ниткоподібного кремнію р-типу, легованих бором, з різним питомим опором в широкому інтервалі температур і деформацій визначено необхідний рівень концентрації легуючої домішки для отримання оптимального співвідношення значення коефіцієнта тензочутливості і його температурної залежності для створення малогабаритного сейсмодатчика. При температурі 20°C їх коефіцієнт тензочутливості становить 100–140, а температурний коефіцієнт опору близький до $+ (0,08-0,12)\% \cdot \text{град}^{-1}$.

Дослідження характеристик тензорезисторів на основі ниткоподібних кристалів кремнію в інтервалі частот до 20 кГц показали, що відхилення коефіцієнта тензочутливості в динамічному режимі не перевищує 5% (при деформацій 2×10^{-3} відн.од.) від його значення для статичного режиму, що дозволяє проводити калібрування датчика без використання спеціальних вібростендів. Окрім цього, тензорезистори витримують 10^8 циклів знакозмінної деформації без помітної зміни їх параметрів.

Розроблена конструкція сейсмодатчика з тензорезисторами на основі НК кремнію придатна для вимірювання прискорення до 3g з частотою до 800 Гц. Коефіцієнт перетворення такого датчика становить 5 В/g. Сейсмодатчик на основі НК кремнію дозволяє проводити вимірювання вібрацій в умовах сильних магнітних полів (до 14 Тл) і електронного опромінення з енергією до 10 МеВ.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, кремній, сейсмічний датчик (геофон), вібрація, акселерометр