

Д. т. н. А. О. ДРУЖИНІН, к. т. н. І. Й. МАР'ЯМОВА, к. т. н. О. П. КУТРАКОВ

Україна, Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ СЕНСОРИ ДЕФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ ФОСФІДУ ГАЛІЮ

Проведено дослідження тензометричних характеристик ниткоподібних кристалів фосфіду галію р-типу провідності, легованих цинком. На основі цих кристалів створено сенсори деформації, працездатні в інтервалі деформацій $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ відн. од. і широкому діапазоні температур – від 20 до 550°C.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, фосфід галію, сенсори, деформація, температура.

З розвитком сучасних технологій і освоєнням нової продукції стають дедалі актуальнішими дослідження високотемпературних процесів. При цьому максимальна температура вимірюваного середовища може становити від 150 до 1500°C, а час впливу високотемпературного середовища – від секунд до десятків хвилин і кількох годин. Для сучасних сенсорів механічних величин характерним є застосування монокристалічного кремнію [1, 2], який серед інших матеріалів в найбільшій мірі узгоджується з існуючими мікроелектронними технологіями. У той же час для створення високотемпературних сенсорів механічних величин доцільно використовувати напівпровідникові матеріали з більшою, ніж у кремнію, шириною забороненої зони. Тому цілком закономірним є пошук інших напівпровідникових матеріалів і дослідження їхніх тензометричних властивостей [3, 4]. Зокрема, для створення високотемпературних тензорезистивних сенсорів механічних величин у деяких випадках використовується карбід кремнію [5], проте технологія отримання цього матеріалу досить складна, і тому предметом досліджень обрано кристали фосфіду галію як більш широкозонного напівпровідника.

З метою створення високотемпературних сенсорів деформації досліджувались тензометричні характеристики ниткоподібних кристалів (НК) GaP р-типу провідності з кристалографічною орієнтацією [111], яка співпадає з напрямком, в якому тензорезистивний ефект є максимальним для цього матеріалу. Ниткоподібні кристали фосфіду галію вирощувались методом газотранспортних реакцій у йодній системі. Як джере-

ло застосовувався полікристалічний фосфід галію, синтезований цим же методом з вихідних матеріалів. Для отримання ниткоподібних кристалів GaP температура зони випаровування становила 900–1050°C, а зони кристалізації – на 150–300°C нижче. Концентрація транспортного агента (йоду) не перевищувала 0,3 мг/см³, а швидкість при оптимальних умовах росту становила 50–100 мг/год. Вирощені кристали мають форму правильних три- чи шестиграних призм, витягнутих вздовж кристалографічного напрямку [111]. Провідність вирощених без спеціального легування НК GaP – електронна, для отримання кристалів з дірковою провідністю як легуюча домішка використовувався цинк.

Технологію створення омичних контактів до кристалів фосфіду галію і їхні властивості достатньо повно описано в [6], однак створення таких контактів до ниткоподібних кристалів має свою специфіку через їхню малу площу поперечного перерізу і умови роботи тензорезисторів. Тому було розроблено метод створення омичних контактів до НК GaP р-типу за допомогою срібної пасти, легованої цинком, з подальшим впливанням пасти у кристал за температури 650°C. Отримані таким чином контакти є омичними і мають низький опір, проте для роботи за високих температур (400–600°C) потребують надійного захисту, який створюється шляхом осадження щільних шарів нікелю на срібло. Також розроблено методику створення контактів шляхом електрохімічного осадження золота на торці НК. Струмовиводи із золотого мікродроту приєднуються до НК або точковим зварюванням з верх-

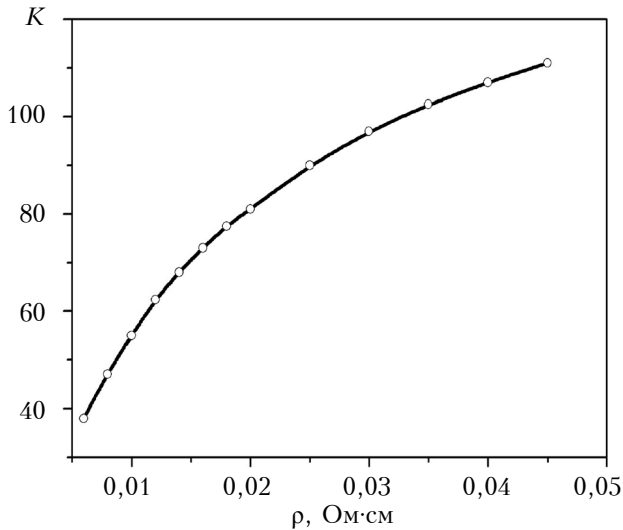


Рис. 1. Залежність коефіцієнта тензочутливості НК GaP *p*-типу від питомого опору при 20°C

нім шаром нікелю чи золота, або закріплюють-ся за допомогою срібної пасти.

Тензометричні характеристики НК GaP *p*-типу провідності досліджувались у широкому діапазоні температури (від 20 до 500°C) та деформації ($\epsilon = \pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ відн. од.). Проведені дослідження показали, що поздовжній коефіцієнт тензочутливості *K* для НК GaP *p*-типу з орієнтацією [111] збільшується зі зростанням питомого опору (рис. 1), тобто зі зменшенням ступеня легування напівпровідникового матеріалу. Коефіцієнт тензочутливості цих кристалів при 20°C достатньо великий, зокрема для НК з питомим опором 0,025–0,03 Ом·см величина *K* знаходиться в межах 90–95. Як видно з рис. 2, у діапазоні зміни ϵ від 0 до

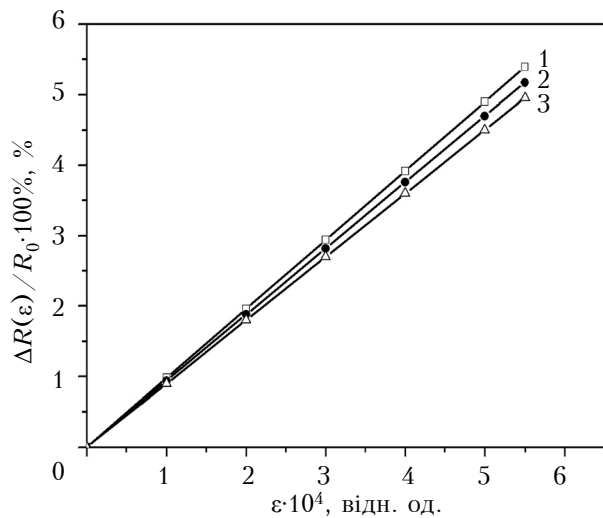


Рис. 2. Залежність відносної зміни опору від деформації розтягування для НК GaP *p*-типу з різним питомим опором (в Ом·см):

1 – 0,030; 2 – 0,025; 3 – 0,023

$5 \cdot 10^{-4}$ відн. од. для цих кристалів спостерігається лінійна залежність опору від деформації (точніше, відносної зміни опору $\Delta R(\epsilon)/R_0$, де $\Delta R(\epsilon) = R(\epsilon) - R_0$; R_0 – початковий опір НК).

Для створення високотемпературних сенсорів деформації найбільшу увагу було приділено дослідженню впливу температури на тензометричні характеристики НК GaP. На рис. 3 для незакріплених кристалів GaP *p*-типу з різним питомим опором наведено отримані температурні залежності відносної зміни опору $\Delta R(T)/R(20^\circ\text{C})$, де $\Delta R(T) = R(T) - R(20^\circ\text{C})$. У всій дослідженій області температури спостерігалась домішкова провідність. Поява мінімуму на температурній залежності відносної зміни опору для зразків з питомим опором $\rho = 0,01 - 0,08$ Ом·см зумовлена переходом від розсіювання носіїв струму на домішках до розсіювання на теплових коливаннях ґратки. Зазначимо, що характер отриманих температурних залежностей опору мікрокристалів GaP узгоджується з даними щодо температурної залежності електропровідності об'ємних монокристалів, легованих цинком [7].

Закріплення кристалів GaP на матеріалах, коефіцієнт термічного розширення яких більший, ніж у фосфіду галію ($\alpha = 5,7 \cdot 10^{-6}$ 1/°C), наприклад на сталі, зумовлює виникнення термічної деформації $\epsilon_T < 0$, яка призводить до зменшення опору кристалів у порівнянні з вільними кристалами, а також до зростання температурної залежності опору. Температурний коефіцієнт опору НК GaP *p*-типу з питомим опором 0,03 Ом·см, закріплених на сталевій балці, становить приблизно +0,25%/°C у температурному діапазоні від 200 до 400°C.

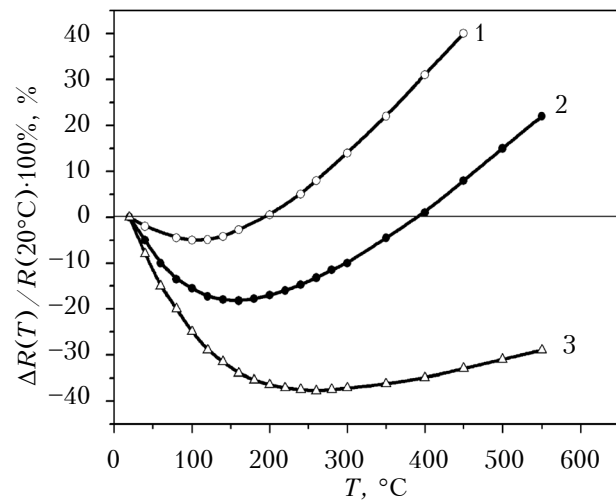


Рис. 3. Залежність відносної зміни опору від температури для НК GaP *p*-типу з різним питомим опором (в Ом·см):

1 – 0,01; 2 – 0,04; 3 – 0,08

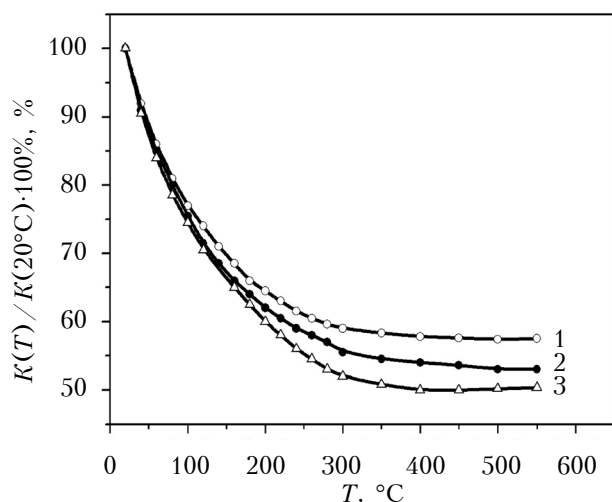


Рис. 4. Температурна залежність відносної величини коефіцієнта тензочутливості НК GaP *p*-типу з різним питомим опором (в Ом·см):
1 – 0,030; 2 – 0,025; 3 – 0,023

На величину коефіцієнта тензочутливості кристалів фосфіду галію досить істотно впливає температура навколишнього середовища. Проведені дослідження показали, що для закріплених кристалів GaP *p*-типу з $\rho = 0,01 - 0,03$ Ом·см коефіцієнт тензочутливості помітно зменшується з підвищенням температури від 20 до 300°C і майже не змінюється в інтервалі 300–550°C (рис. 4), де температурний коефіцієнт тензочутливості не перевищує $-0,03\%/^{\circ}\text{C}$. Величина коефіцієнта тензочутливості НК GaP *p*-типу в області температур від 300 до 500°C для цих кристалів дорівнює 40–50.

На рис. 5 наведено градуювальні характеристики розроблених сенсорів деформації в діапазоні температур 20–550°C. Слід зазначити, що у всьому досліджуваному діапазоні температур сенсори на основі НК GaP *p*-типу з питомим опором з 0,003–0,03 Ом·см мають лінійну залежність опору від деформації стискування та розтягування в області $\pm 5 \cdot 10^{-4}$ відн. од.

Вирощені НК GaP можна безпосередньо використовувати як чутливі елементи тензорезисторів, оскільки вони мають необхідні для цього розміри, а їхня поверхня не потребує додаткової механічної обробки. Розроблена технологія створення високотемпературних напівпровідникових тензорезисторів на основі НК GaP *p*-типу методом газотранспортних реакцій характеризується достатньою простотою, відсутністю трудомістких технологічних операцій і достатньо великим відсотком використання напівпровідникового матеріалу, причому як вихідний матеріал використовується полікристалічний фосфід галію, синтезований з відповідних складових. Ніякі інші технологічні методи не можуть за-

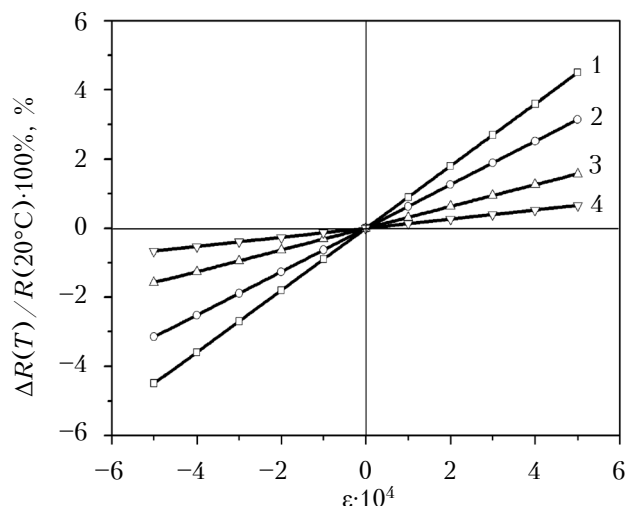


Рис. 5. Градуювальні характеристики сенсорів деформації на основі НК GaP *p*-типу за різних температур (в °C):
1 – 20; 2 – 100; 3 – 300; 4 – 550

Основні параметри розроблених сенсорів на основі НК GaP *p*-типу провідності

Параметр	Значення
Розміри, мкм: – ширина грані – товщина – довжина	20–40 20–40 4–10
Питомий опір, Ом·см	0,02–0,03
Опір при 20°C, Ом	150–600
Температурний коефіцієнт опору, $\%/^{\circ}\text{C}$	+ (0,15–0,17)
Коефіцієнт тензочутливості при 20°C	+ (80–95)
Температурний коефіцієнт тензочутливості, $\%/^{\circ}\text{C}$	– (0,02–0,03)
Робочий діапазон температур, °C	20–550
Максимальна відносна деформація, %	0,5–0,8

безпечити таку високу структурну досконалість чутливих елементів тензорезисторів, а отже, і їхню високу механічну міцність.

Основні характеристики розроблених тензорезисторів на основі НК GaP *p*-типу наведені у таблиці.

Отже, за своїми тензометричними характеристиками за підвищених температур, механічними властивостями та розмірами НК GaP *p*-типу провідності з орієнтацією [111] є придатними для створення високотемпературних сенсорів деформації. Проведені вимірювання показали можливість роботи сенсорів на осно-

ві НК GaP у статичних та динамічних режимах при циклічній деформації. Вони витримують не менше ніж 10^8 циклів знакозмінної деформації $\epsilon = \pm 5 \cdot 10^{-4}$ відн. од. без руйнування і зміни характеристик.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Козин С. А., Федулов А.В., Пауткин В.Е., Баринов И.Н. Микроэлектронные датчики физических величин на основе МЭМС-технологии // Компоненты и технологии. — 2010. — № 1. — С. 24–27.
2. Дружинін 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.
3. Шварц Ю.М. Фізичні основи напівпровідникових приладів екстремальної електроніки / Дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. — Київ: ІНФ ім. В. Є. Лашкарьова, 2004.

4. Анотин Е.А. Высокотемпературные приборы на основе фосфида галлия: эпитаксиальная технология, концепция легирования, электрические свойства / Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. — Санкт-Петербург: ФТИ им. А.И. Иоффе РАН, 2009.

5. Михайлов П. Г. Исследования по созданию высокотемпературных сенсорных элементов и структур // Микросистемная техника. — 2004. — № 8. — С. 38–44.

6. Дружинін А.О., Мар'ямова І.Й., Кутраков О.П. Датчики механічних величин на основі ниткоподібних кристалів кремнію, германію та сполук A_3B_5 . — Львів: Вид. Львівська політехніка, 2015. — 232 с.

7. Радауцан С.И., Максимов Ю.И., Негрескул В. В., Пышкин С.Л. Фосфид галлия. — Кишинев: Ин-т прикл. физики, 1969.

Дата надходження рукопису
до редакції 30.05 2019 р.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.26
УДК 625.315.592

А. О. ДРУЖИНИН, И. И. МАРЬЯМОВА, А. П. КУТРАКОВ

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДАТЧИКИ ДЕФОРМАЦИИ
НА ОСНОВЕ НИТЕВИДНЫХ КРИСТАЛЛОВ ФОСФИДА ГАЛЛИЯ

Проведено дослідження тензометричних характеристик нитевидних кристаллов фосфида галлія р-типа провідності, легированих цинком. На основі цих кристаллов створено датчики деформації, здатні працювати в інтервалі деформацій $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ відн. од. у широкому діапазоні температур від 20 до 550°C.

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, фосфид галлия, сенсор, деформация, температура.

DOI: 10.15222/TKEA2019.3-4.26
UDC 625.315.592

A. O. DRUZHININ, I. I. MARYAMOVA, O. P. KUTRAKOV

Ukraine, Lviv Polytechnic National University
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

HIGH TEMPERATURE STRAIN SENSORS BASED
ON GALLIUM PHOSPHIDE WHISKERS

The paper presents a study of tensoresistive characteristics of p-type GaP whiskers with [111] crystallographic orientation coinciding with the direction of the maximal piezoresistive effect for this material. The authors present a newly-developed technology of creating the ohmic contacts to GaP crystals that allows using these crystals at high temperatures (400–600°C). Tensoresistive characteristics of p-type GaP whiskers were studied in the strain range of $\pm 1,2 \cdot 10^{-3}$ rel. un. These studies show that the gauge factor for these crystals at 20°C is rather large. Thus, for p-type GaP crystals with a resistivity of 0.025–0.03 $\Omega \cdot \text{cm}$, the gage factor is in the range of 90–95.

The study of tensoresistive properties shows that in the temperature range of 20–300°C for p-type GaP crystals with the resistivity of 0,01–0,03 $\Omega \cdot \text{cm}$, the gage factor decreases as the temperature rises, but in the temperature range of 300–550°C for this crystals, very slight temperature dependence of the gage factor was observed. In this temperature range, the temperature coefficient of gage factor is no more than $-0,03\% / ^\circ\text{C}$. In the temperature range of 300–500°C, the value of gage factor is high (40–50). It could be noticed that in the entire investigated temperature range, the strain sensors based on p-type GaP whiskers have the linear resistance vs. strain dependence in the strain range of $\pm 5,0 \cdot 10^{-4}$ rel. un. The developed strain sensors based on p-type GaP whiskers have high mechanical strength at the static and dynamic strain (more than 10^8 cycles), which makes them operable in dynamic mode.

Keywords: whiskers, gallium phosphide, sensor, deformation, temperature.

REFERENCES

1. Kozin, S. A., Fedulov A.V., Pautkin V.Ye., Barinov I.N. [Microelectronic sensors of physical quantities based on MEMS technology]. *Components & Technologies*, 2010, no. 1, pp. 24–27. (Rus)
2. Druzhinin A., Maryamova I., Kutrakov A., Liakh-Kaguy N. Silicon whiskers for sensor electronics. *Physics and Chemistry of Solid State*, 2011, vol. 12, no. 4, pp. 1078–1084. (Ukr)
3. Shvarts Yu.M. *Fizychni osnovy napivprovidnykovykh prykladiv ekstremal'noyi elektroniky*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Physical basics of semiconductor devices of extreme electronics. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Kyiv, V.Ye. Lashkaryov ISP, 2004. (Ukr)
4. Anyutin E.A. *Vysokotemperaturnyye pribory na osnove fosfida galliya: epitaksial'naya tekhnologiya, kontseptsiya legirovaniya, elektricheskiye svoystva*. Diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Gallium phosphide-based high-temperature devices: epitaxial technology, alloying concept, electrical properties. Dr. phys. and math. sci. diss.]. St Petersburg, Ioffe Institute, 2009.
5. Mikhailov P.G. [Research on the creation of high-temperature sensor elements and structures]. *Microsystem Technology*, 2004, no. 8, pp. 38–44. (Rus)
6. Druzhinin A.O., Mar'yamova I.Y., Kutrakov O.P. *Datchyky mekhanichnykh velychyn na osnovi nytkopodibnykh krystaliv kremniyu, hermaniyu ta spoluk A_3B_5* [Sensors of mechanical quantities based on whiskers of silicon, germanium and A_3B_5 compounds]. Lviv, Publishing house Lviv Polytechnic, 2015, 232 p. (Ukr)
7. Radautsan S.I., Maksimov YU.I., Negreskul V. V., Pyshkin S.L. *Fosfid galliya* [Gallium phosphide]. Chisinau, Institute of Applied Physics, 1969, 123 p. (Rus)

Опис статті для цитування:

Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П. Високотемпературні сенсори деформації на основі ниткоподібних кристалів фосфиду галію. *Технологія і конструювання в електронній апаратурі*, 2019, № 3-4, с.26–30. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.3-4.26>

Cite the article as:

Druzhinin A. A., Maryamova I. I., Kutrakov A. P. High temperature strain sensors based on gallium phosphide whiskers, *Tekhnologiya i Konstruirovaniye v Elektronnoy Apparature*, 2019, no. 3-4, pp. 26-30. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2019.3-4.26>

В. П. Зайков, В. І. Мещеряков, Ю. І. Журавльов. Прогнозування показників надійності термоелектричних охолоджуючих пристроїв. Книга 4. Динаміка функціонування однокаскадних ТЕП: монографія.— Одеса: Політехперіодика, 2019. (рос. мовою)

Книгу присвячено дослідженню основних параметрів, показників надійності та динаміки функціонування термоелектричних охолоджуючих пристроїв (ТЕП) в процесі їх виходу на стаціонарний режим роботи в різних струмових режимах роботи. Запропоновано динамічну модель функціонування охолоджуючого термоелемента, що враховує масу і теплоємність об'єкта охолодження та конструктивних і технологічних елементів (КТЕ). Показано, як впливає теплоємність і маса КТЕ на час виходу пристрою на стаціонарний режим роботи. Також досліджено динаміку функціонування ТЕП з заданою кількістю термоелементів з урахуванням конструктивних і технологічних елементів. Розглянуто побудову ТЕП з заданим часом виходу на стаціонарний режим роботи. Досліджено вплив на характеристики ТЕП параметричних факторів, таких як середньооб'ємна температура гілки термоелемента, ефективність вихідних термоелектричних матеріалів, комбінація параметрів вихідних матеріалів при їхній однаковій ефективності. Розглянуто динаміку процесу виходу на стаціонарний режим роботи ТЕП з фіксованою геометрією гілок термоелементів за заданого теплового навантаження та перепада температури. Отримано співвідношення для оцінки температури теплопоглинаючого спаю в процесі виходу ТЕП на стаціонарний режим. Крім цього, проведено оцінку впливу на динаміку функціонування ТЕП тепловідводної здатності радіатора.

Призначено для інженерів, науковців, а також студентів відповідних спеціальностей, що займаються питаннями надійності елементів електроніки і в цілому РЕА, а також розробкою і проектуванням термоелектричних пристроїв.

