

## ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ БАГАТОФУНКЦІЙНОГО СЕНСОРА ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН НА ОСНОВІ Si<B, Ni>

Д. т. н. А. О. Дружинін<sup>1,2</sup>, д. т. н. Ю. М. Ховерко<sup>1,2</sup>, к. т. н. О. П. Кутраков<sup>1</sup>,  
к. т. н. Р. М. Корецький<sup>1</sup>, С. Ю. Яцухненко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний університет «Львівська політехніка», Україна;

<sup>2</sup>Міжнародна лабораторія сильних магнітних полів  
та низьких температур, м. Вроцлав, Польща  
druzh@polynet.lviv.ua

*Проведено комплексні дослідження електропровідності та п'єзоопору у широкому інтервалі температур (від 4,2 до 300 К) ниткоподібних кристалів Si p-типу з різним ступенем легування бором та домішкою нікелю. Виявлено, що найбільший прояв п'єзорезистивного ефекту спостерігається в околі концентрацій, що відповідають переходу «метал — діелектрик». Запропоновано чутливий до деформації малогабаритний елемент для багатофункційного сенсора механічних величин, працездатний в області температур 4,2—300 К.*

*Ключові слова: сенсор, п'єзорезистивний ефект, ниткоподібний кристал, кремній, домішки.*

Використання напівпровідникових сенсорів на основі п'єзорезистивного ефекту залишається найбільш поширеним засобом для перетворення механічних величин в електричний сигнал, завдяки високій чутливості та надійності конструкції [1, 2]. Для оцінки можливості створення багатофункційних сенсорів механічних величин (деформації та магнітного поля) для низьких температур на основі ниткоподібних кристалів Si, легованих домішками бору і нікелю, було проведено дослідження тензометричних характеристик таких кристалів.

Комплексні дослідження електропровідності та проводились п'єзоопору в широкому інтервалі температур — від 4,2 до 300 К — на кількох групах ниткоподібних кристалів Si p-типу з різним ступенем легування бором та введенням домішки нікелю методом термічної дифузії півки, осадженої на поверхні кристалу. Кристали для досліджень були вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій в формі ниткоподібних кристалів (НК) з кристалографічною орієнтацією <111> з концентрацією носіїв заряду, що відповідає близькості до переходу «метал — діелектрик» (ПМД). Деформація досліджуваних НК за криогенних температур створювалась згідно методики, описаної в [3]: НК закріплюються на спеціально підібраній мідній підкладці, і за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення кремнію і матеріалу підкладки при зміні температури виникає деформація.

В результаті досліджень було встановлено, що величина відносної зміни опору зразків НК  $(\Delta R - R_0)/R_0$  у діапазоні температур від 4,2 до 300 К досягає  $10^5$ , що дозволяє використовувати їх як низькоінерційні терморезистори.

Для сильно легованих НК Si (0,007 Ом·см) в усьому досліджуваному температурному інтервалі характерний типовий металевий хід температурної залежності питомого опору як для недеформованих, так і для деформованих мікрочисталів [4]. При криогенних температурах під дією одновісної деформації стиску питомий опір кристалів Si (0,012 Ом·см), що відповідає металевому типу провідності, поблизу ПМД зменшується в кілька разів (рис. 1), що свідчить про прояв неklasичного п'єзорезистивного ефекту. При зменшенні концентрації бору в кремнії, тобто при віддаленні від ПМД в діелектричну область, цей ефект зменшується. Це також підтверджується розрахованими з експериментальних даних температурними залежностями коефіцієнта тензочутливості для цих кристалів. Коефіцієнт тензочутливості зразків в області гелієвих температур досягає значення  $K_{4,2K} = 165$  при деформації стиску  $\epsilon = -5,29 \cdot 10^{-3}$  відн. од. (рис. 2). Домішка нікелю не бере участі в процесі транспорту носіїв заряду і не впливає суттєво на деформаційні характеристики зразків без зовнішнього магнітного поля.

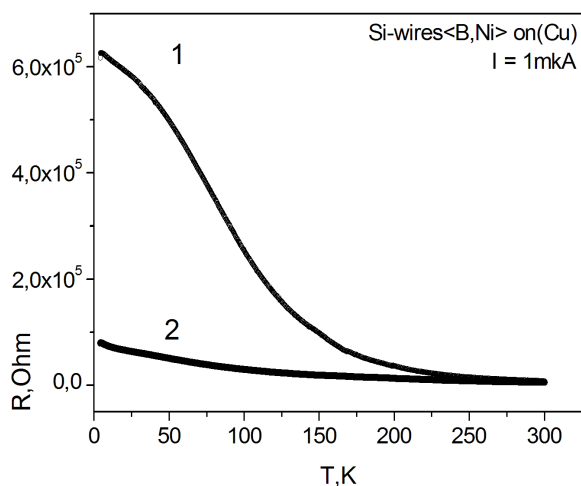


Рис. 1. Температурні залежності опору НК Si (0,012 Ом·см) недеформованого (1) та при деформації стиску на мідній підкладці (2)

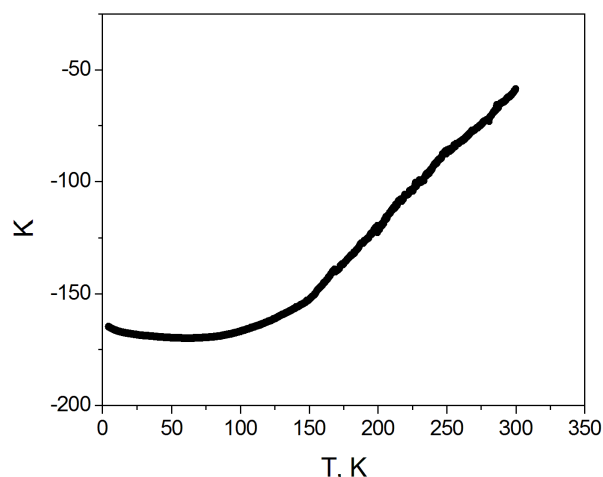


Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості НК Si (0,012 Ом·см) при деформації стиску

Наведені результати досліджень тензометричних характеристик НК Si дозволяють прогнозувати можливість створення на основі цих кристалів чутливого сенсора механічних величин, працездатного в широкому інтервалі температур — від 4,2 до 300 К. При використанні НК Si як чутливих елементів п'єзореzистивних сенсорів розрахована величина вихідного сигналу при температурі 4,2 К становить близько 100 мВ при застосуванні мостової схеми з двома активними чутливими елементами. Окрім цього, слід зазначити, що домішка нікелю впливає на магніторезистивні характеристики, що було досліджено в попередніх роботах [1, 3]. Такі особливості НК Si, легованих нікелем і бором з концентрацією поблизу ПМД, дозволяють прогнозувати створення двохфункційного сенсора для вимірювання магнітного поля і деформації, що підвищує ефективність використання мікрокристалів.

#### ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoferko Y., Yatsukhnenko S. Magnetic properties of doped Si<B,Ni> whiskers for spintronics // Journal of Nano Research.— Vol. 39.— P. 43–54.
2. Barlian A.A., Park S.J., Mukundan V., Pruitt B.L. Design and characterization of microfabricated piezoresistive floating element-based shear stress sensors // Sens. Actuators, A.— 2007.— Vol. 134.— P. 77–87.
3. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M., Berus T., Kunert H. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // Crystal Research and Technology.— 2002.— Vol. 37, N 2-3.— P. 243–257.
4. Matsuda K. Strain-dependent hole masses and piezoresistive properties of silicon // 10<sup>th</sup> International Workshop on Computational Electronics, “IWCE-10”.— 2004.— P. 173–174.

A. O. Druzhinin, Yu. M. Khoferko, O. P. Kutrakov, R. M. Koretsky, S. Yu. Yatsukhnenko  
**Sensitive element of multifunctional sensor of mechanical quantities based on Si<B, Ni>**

*The complex studying of electrical conductivity and piezoresistance was conducted in a wide temperature range from 4.2 to 300 K. The greatest manifestation of the piezoresistive effect was observed in samples with concentrations which correspond the vicinity of the “metal — insulator” transition. The compact sensitive element of strain sensor was offered for multifunctional sensor of mechanical quantities which is able to work in a wide teperature range (4.2—300 K)*

*Keywords: sensor, piezoresistance effect, whisker, silicon, impurities.*