УДК 621.315.592 DOI: 10.15222/TKEA2017.3.24

Д. т. н. А. О. ДРУЖИНІН, д. т. н. Ю. М. ХОВЕРКО, к. т. н. О. П. КУТРАКОВ, к. т. н. Р. М. КОРЕЦЬКИЙ, С. Ю. ЯЦУХНЕНКО

Украина, Національний університет «Львівська політехніка»
E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ДВОФУНКЦІЙНОГО СЕНСОРА МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МІКРОКРИСТАЛІВ Si<B, Ni>

Проведено комплексні дослідження електропровідності та магнетоопору деформованих і недеформованих зразків ниткоподібних кристалів Si p-типу провідності з різним ступенем легування бором та домішкою нікелю у широкому інтервалі температур — від 4,2 до 300 К. Виявлено, що найбільший прояв п'єзорезистивного ефекту спостерігається в околі концентрацій, що відповідають переходу «метал — діелектрик». Дослідження магнетоопору кристалів проводились в інтервалі полів з індукцією до 14 Тл. Як чутливий елемент двофункційного сенсора деформації та магнітного поля запропоновано застосовувати ниткоподібні кристали кремнію з концентрацією домішки бору $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, працездатні в складних умовах експлуатації.

Ключові слова: сенсор, п'єзорезистивний ефект, ниткоподібний кристал, кремній, нікель, магнетоопір.

Розвиток сучасної науки і техніки висуває на перший план проблему створення мініатюрних високочутливих сенсорів механічних величин, працездатних в складних умовах, зокрема за низької температури та в сильних магнітних полях [1—4]. Низькотемпературні дослідження деформаційно-стимульованих ефектів (п'єзоопір, п'єзомагнетоопір) в легованих напівпровідниках поблизу переходу «метал — діелектрик» можуть дати інформацію про фізичні властивості таких матеріалів, яка може бути використана для створення на їх основі високочутливих сенсорів фізичних величин, працездатних за низьких температур [2, 3]. Дослідження електропровідності та п'єзоопору ниткоподібних кристалів кремнію **(НК)** в широкому інтервалі температури та деформації дає змогу визначити робочий інтервал температур сенсорів фізичних величин, зокрема механічних, створених на їх основі.

Для створення сенсорів тиску, деформацій тощо важливим параметром є коефіцієнт тензочутливості НК, що визначається зміною опору кристала внаслідок деформації. У випадку створення сенсорів для інтервалу низьких температур слід враховувати, що електрофізичні властивості напівпровідників визначаються ступенем легування і типом легуючої домішки, ступенем компенсації і мірою наближення до переходу «метал — діелектрик» [3]. Це зумовлює необхідність вивчення впливу ступеня легування та температурної поведінки легуючої домішки на електропровідність напівпровідникових кристалів кремнію та її зміни під впливом стиску чи розтягу кристалів [4]. З іншого боку дослідження магнетоопору легованих ниткоподібних кристалів Si дозволяє поглибити знання про характер їх провідності в області кріогенних температур, а також їх поведінку при різноманітних зовнішніх впливах, природу та взаємозв'язки цих ефектів і визначити умови легування кристалів для створення сенсорів, працездатних в сильних магнітних полях. Більше того, відомо, що розбавлені магнетики на основі напівпровідників, в які введено перехідні метали з незаповненою 3d-оболонкою, є перспективними матеріалами для магнітоелектроніки через можливість об'єднання інформації про заряд електрона і спінові ступені свободи [5—7]. В них сильніше проявляються магнетотранспортні ефекти, наявність від'ємного магнетоопору, гістерезису тощо. На основі цих структур можна запропонувати цілу низку сенсорів, перемикачів і невзаємних пристроїв вентилів-ізоляторів, MRAM-пам'ять. Принцип роботи таких пристроїв базується на перемиканні між запірним і провідним станами, що забезпечується зміною режиму від феромагнітного до антиферомагнітного — за рахунок впливу локального магнітного моменту орієнтація спінів транспортної домішки відбувається від односпрямованих до протилежно спрямованих спінів в локалізованому стані. Низька вартість і мале енергоспожи-

вання цих приладів забезпечують їх високу конкурентоспроможність.

Водночас, постійно зростаючі вимоги до сенсорних пристроїв поставили ряд складних задач по забезпеченню високого класу точності, надійності, стабільності і підвищення ефективності виробництва. Центром уваги є автоматизація процесів вимірювання. Необхідним стали засоби вимірювань, придатні для одночасного збирання і обробки інформації про значення багатьох змінних в часі величин, які характеризують перебіги технологічних процесів і стани керованих об'єктів.

Метою даної роботи є оцінка можливості створення двофункційних сенсорів (деформації та магнітного поля) для умов роботи за низької температури на основі ниткоподібних кристалів Si, легованих домішками бору і нікелю.

Об'єкт та методика досліджень

Дослідження електропровідності та магнетоопору зразків проводились в інтервалі температур від 4,2 до 300 К на кількох групах ниткоподібних кристалів Si *p*-типу з різним ступенем легування бором та з домішкою нікелю (вводилась методом низькотемпературної, до 800°С, термічної дифузії з плівки, осадженої на поверхні кристалу [8]).

Зразки для досліджень були вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій в формі ниткоподібних кристалів з орієнтацією <111> з концентрацією носіїв заряду $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, що відповідає близькості до переходу «метал — діелектрик» **(ПМД)** [9, 10].

Під час проведення експериментів за кріогенних температур було використано оригінальну та просту в реалізації методику, запропоновану в [10]: мікрокристал Si закріплювався на підкладці за допомогою клею ВЛ-931 з температурою полімеризації +180°С, і одновісна деформація забезпечувалась внаслідок різниці коефіцієнтів термічного розширення матеріалів НК та підкладки **(рис. 1)**.

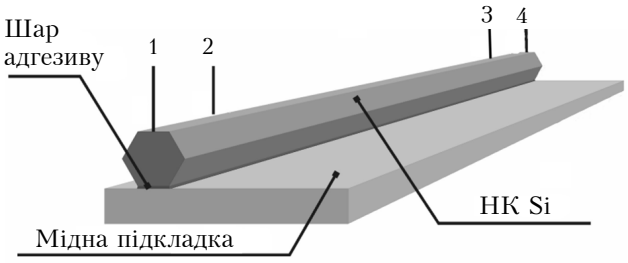

Рис. 1. Ілюстрація методу створення одновісної деформації мікрокристала:
1, 4 — струмові контакти; *2, 3* — потенціальні контакти

Для дослідження властивостей НК Si в магнітних полях до 14 Тл використано спеціальну методику, яка дозволяє вимірювати магнетоопір за різних фіксованих температур. Магнітне поле створювали з допомогою біттерівського магніту з індукцією до 14 Тл та часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв за температури рідкого гелію та 3,5 Тл/хв в інтервалі температур 4,2—77 К. Магнетоопір вимірювався протягом певного часу за поступового зменшення магнітного поля від 14 Тл до нуля. Дослідження проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур у м. Вроцлав, Польща.

Експериментальні результати та їх обговорення

На **рис. 2** зображено температурну залежність опору та магнетоопору мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору $N_B > 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, що відповідає металевому боку ПМД. Як видно, залежність питомого опору сильнолегованого мікрокристалу кремнію в усьому досліджуваному температурному інтервалі має типовий металевий характер.

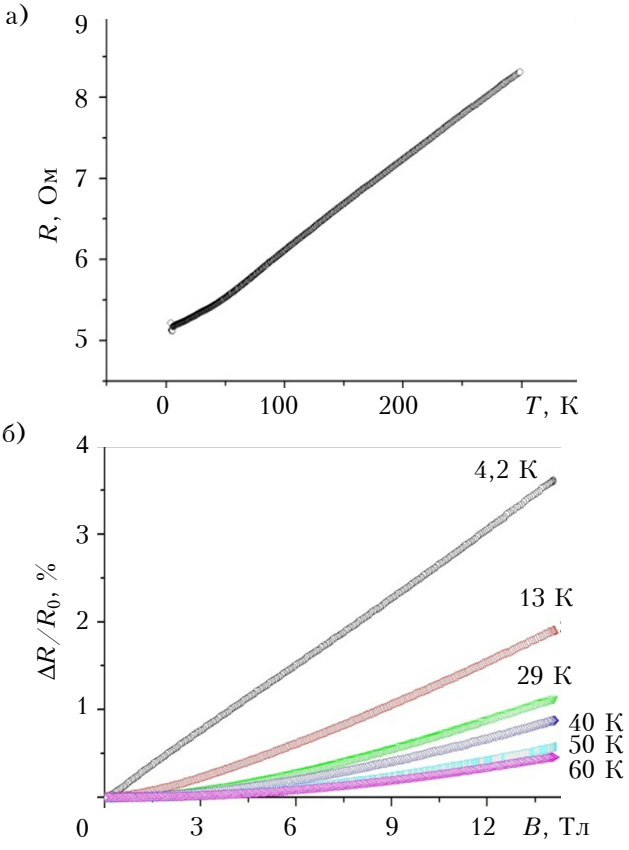

Рис. 2. Температурна залежність НК Si ($\rho_{300К}$ = 0,007 Ом·см) з домішкою нікелю та бору і концентрацією легуючої домішки, що відповідає металевому боку ПМД (*а*), а також польова залежність його магнетоопору для різних температур (*б*)

Суттєвого впливу деформації на характеристики таких мікрокристалів виявлено не було. Слабка залежність магнетоопору НК Si з металевим характером провідності, що зумовлена слабкою локалізацією носіїв заряду, матиме принципове значення при застосуванні таких мікрокристалів як чутливих елементів сенсорів теплових величин, працездатних в сильних магнітних полях. За температур рідкого гелію максимальний магнетоопір сягає не більше 4% в магнітних полях з індукцією до 14 Тл.

Результати дослідження температурної залежності опору та магнетоопору мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору, що відповідає діелектричному боку ПМД (ρ_{300K} = 0,025 Ом·см) зображено на **рис. 3**.

Необхідно зазначити, що вплив деформації спостерігається тільки в НК Si *p*-типу з концентрацією домішки, що відповідає наближенню до критичної концентрації ПМД, і відсутній у НК Si *p*-типу з металевого боку ПМД, тобто на вільних дірках. В той самий час, він зменшується

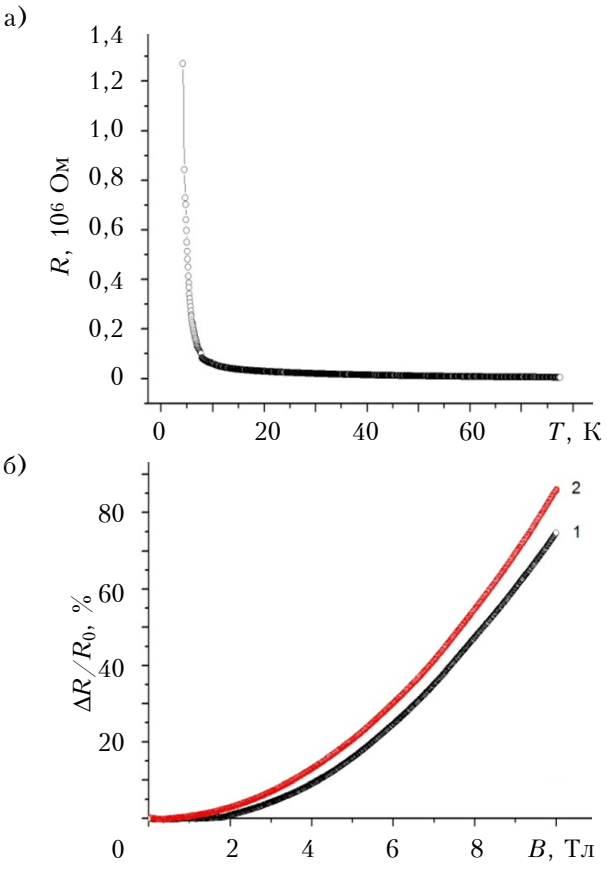

Рис. 3. Температурна залежність НК Si (ρ_{300K} = 0,025 Ом·см) з домішкою нікелю та бору з концентрацією легуючої домішки, що відповідає діелектричному боку ПМД (*а*), а також польова залежність його магнетоопору за температури 4,2 К в повздовжньому (*1*) та поперечному (*2*) напрямках по відношенню до напрямку магнітного поля (*б*)

для мікрокристалів Si з концентрацією бору, що відповідає діелектричному боку ПМД і глибокій діелектричній ділянці, тобто слабшає у разі переходу до кристалів зі зменшеним ансамблем локалізованих дірок. Перший чинник свідчить про те, що для отримання ефекту деформування носії заряду мають бути локалізовані. Другий чинник вказує на необхідність достатньої концентрації локалізованих магнітних диполів, тобто можливої деякої граничної взаємодії. При цьому кожній локалізованій дірці можна приписати магнітний дипольний момент, що взаємодіє з навколишніми носіями заряду і зовнішнім магнітним полем. Ці ефекти яскраво спостерігались під час дослідження мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору в околі ПМД ($N_B \approx 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$), що відповідає діелектричному боку ПМД.

На **рис. 4** зображено температурну залежність опору мікрокристалів Si з питомим опором за температури 300 К ρ_{300K} = 0,012 Ом·см, що відповідає діелектричному типу провідності поблизу ПМД. Як видно, за кріогенних температур під дією одновісної деформації стиску питомий опір цих кристалів зменшується в декілька разів, що свідчить про прояв некласичного 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 для цих зразків в області гелієвих температур досягає значення $K_{4.2K}$ = 165 за деформації стиску $\varepsilon = -5{,}29 \cdot 10^{-3}$ відн. од. Виявлено також вплив деформування на

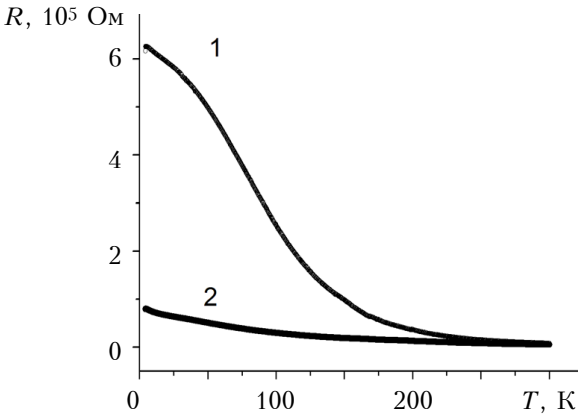

Рис. 4. Температурні залежності питомого опору недеформованого (*1*) та деформованого стисканням (*2*) НК Si (ρ_{300K} = 0,012 Ом·см)

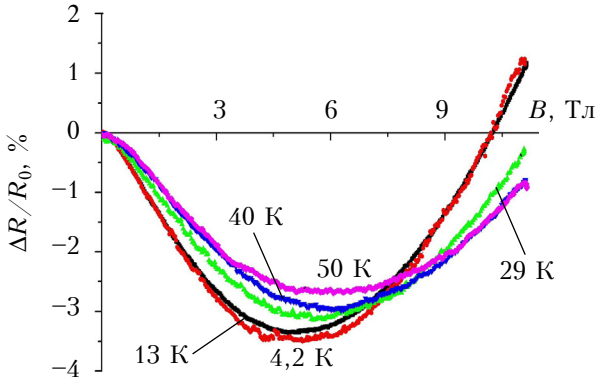

Рис. 5. Польова залежність поздовжнього магнетоопору деформованих стиском НК Si<B, Ni>, легованих до концентрації $N_B < 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, за кріогенних температур

магнетоопір цих зразків (**рис. 5**), коли його значення зменшилось майже у 3 рази в порівнянні з недеформованими зразками [6, 11].

З огляду на високу тензочутливість кристалів кремнію із $\rho_{300K} = 0{,}012$ Ом·см, для них було розраховано температурну залежність коефіцієнта тензочутливості, зображену на **рис. 6**.

Наведені результати досліджень тензометричних характеристик НК Si<B, Ni> дозволяють прогнозувати можливість створення на основі цих кристалів чутливого сенсора механічних величин, працездатного в інтервалі температур від гелієвих до кімнатної. При використанні НК Si як чутливих елементів п'єзорезистивних сенсорів розрахована величина вихідного сигналу за $T = 4{,}2$ К становить приблизно 100 мВ при застосуванні мостової схеми з двома активними чутливими елементами.

Враховуючи дані роботи [11], як чутливий елемент магнітного поля можна використати недеформовані зразки ниткоподібних кристалів Si *p*-типу, легованих бором та домішкою нікелю, концентрація бору в яких знаходиться у безпосередній близькості до діелектричного боку переходу «метал — діелектрик». Принцип роботи таких приладів заснований на значному маг-

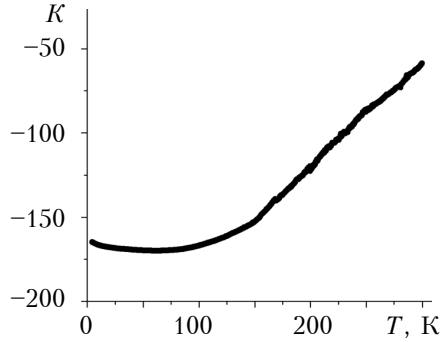

Рис. 6. Температурна залежність коефіцієнта тензочутливості деформованих стиском НК Si<B, Ni> ($\rho_{300K} = 0{,}012$ Ом·см)

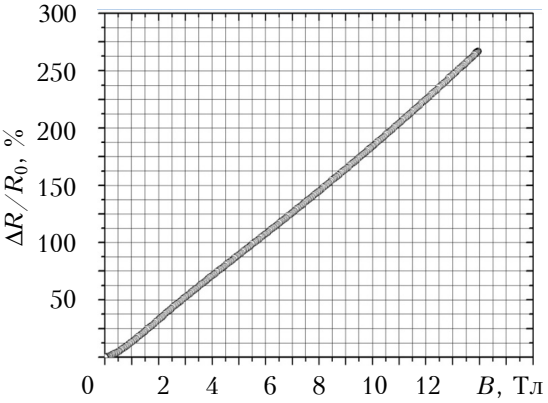

Рис. 7. Градуювальна характеристика магнітної складової чутливого елементу сенсора магнітного поля та деформації

неторезистивному ефекті, який проявляється в залежності магнетоопору від індукції магнітного поля, досягаючи 250% при 14 Тл (**рис. 7**).

Двофункційний сенсор магнітного поля та деформації на основі НК Si<B, Ni> може містити чутливий елемент з двох однакових кристалів, розташованих взаємно перпендикулярно. Один кристал вимірює деформацію і не реагує на магнітне поле, оскільки його повздовжній магнетоопір близький до нуля в широкому інтервалі магнітних полів — до 11 Тл (рис. 6). Невелику зміну магнетоопору можна компенсувати апаратними, чи програмними засобами. Інший кристал чутливий до магнітного поля.

Висновки

Дослідження електрофізичних властивостей деформованих та недеформованих ниткоподібних кристалів Si *p*-типу з різним ступенем легування бором та домішкою нікелю у широкому інтервалі температур (4,2 — 300 К) та в сильних магнітних полях (до 14 Тл) показало, що для застосування у двофункційному сенсорі магнітного поля та деформації придатними є мікрокристали Si<B, Ni> з концентрацією домішки бору $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$, що відповідає переходу «метал — діелектрик» у кремнії. Виявлено, що як магнітну складову чутливого елементу двофункційного сенсора необхідно використовувати мікрокристали кремнію, концентрація бору в яких знаходиться у безпосередній близькості до переходу «метал — діелектрик». Принцип роботи такого чутливого елемента заснований на значному магнеторезистивному ефекті, який проявляється в залежності магнетоопору від індукції магнітного поля, досягаючи 250% при 14 Тл за гелієвих температур. Водночас, деформаційна складова двофункційного сенсора містить мікрокристали кремнію з $\rho_{300K} = 0{,}012$ Ом·см, концентрація бору в яких відповідає діелектричному боку переходу «метал — діелектрик».

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 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.

2. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу.— Луцьк: Надстир'я, 2000.

3. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures // Materials Science in Semiconductor Processing.— 2015.— Vol. 40.— P. 766—771. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015

4. Дружинин А. А., Островский И. П., Когут Ю. Р. Нитевидные кристаллы кремния, германия и их твердых растворов в сенсорной электронике.— Львов: Изд. НУ "Львівська політехніка", 2010.

5. Ferrand D., Cibert J., Wasiela A. et al. Hysteresis in the magneto-transport of manganese-doped germanium: evidence for carrier-mediated ferromagnetism // Phys. Rev.B.— 2001.— Vol. 63.— P. 085201.

6. Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I. et al. Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity // Nanoscale Research Letters.— 2017.— Vol. 12(78).— P. 1—7. https://doi.org/10.1186/s11671-017-1855-9

7. Morresi L., Pinto N., Ficcadenti M. et al. Magnetic and transport polaron percolation in diluted GeMn films // Materials Science and Engineering B.— 2006.— N 126.— P. 197— 201. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.09.025

8. Nasriddinov S. S. Investigation of temperature sensors based on Si <P, Ni> // Journal of nano- and electronic physics.— 2015.— Vol. 7, № 3.— P. 03037-5.

9. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD // Phys. Stat. Sol. (C).— 2004.— Vol. 1, N 2.— P. 333—336. https://doi.org/10.1002/pssc.200303948

10. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. et al. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // Crystal Research and Technology.— 2002.— Vol. 37, № 2-3.— P. 243—257. https://doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L

11. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Yatsukhnenko S. Magnetic properties of doped Si<B, Ni> whiskers for spintronics // Journal of Nano Research.— Vol. 39.— P. 43—54. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43

Дата надходження рукопису до редакції 22.05 2017 р.

А. А. ДРУЖИНИН, Ю. Н. ХОВЕРКО, А. П. КУТРАКОВ, Р. Н. КОРЕЦКИЙ, С. Ю. ЯЦУХНЕНКО

Украина, Национальный университет «Львовская политехника»

E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДВУХФУНКЦИОНАЛЬНОГО СЕНСОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ДЕФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ МИКРОКРИСТАЛЛОВ Si <B, Ni>

Проведены комплексные исследования электропроводимости и магнетосопротивления деформированных и недеформированных образцов нитевидных кристаллов (НК) Si p-типа с разной степенью легирования бором и примесью никеля в широком интервале температур (от 4,2 до 300 К) и при полях с индукцией до 14 Тл. Установлено, что наибольшее проявление пьезорезистивного эффекта наблюдается в окрестности концентраций, соответствующих переходу «металл — диэлектрик».

Образцы для исследований были выращены методом химических газотранспортных реакций в форме НК с кристаллографической ориентацией <111> с концентрацией носителей заряда, соответствующей близости к переходу «металл — диэлектрик» ($5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$), и введением примеси никеля методом низкотемпературной (до 800°С) термической диффузии из осажденной на поверхности кристалла пленки. Для создания одноосной деформации микрокристаллы Si закреплялись на подложках с отличающимся от кристалла коэффициентом термического расширения.

Для сильнолегированных микрокристаллов кремния (с концентрацией примеси бора более $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$), как недеформированных, так и деформированных, температурная зависимость удельного сопротивления имеет типичный металлический характер. Существенного влияния деформации на характеристики таких микрокристаллов не обнаружено. При гелиевых температурах максимальное магнетосопротивление составляет не более 4% в магнитных полях с индукцией до 14 Тл.

При криогенных температурах под действием одноосной деформации сжатия удельное сопротивление кристаллов Si (ρ_{300K} = 0,012 Ом·см, что соответствует диэлектрическому типу проводимости вблизи ПМД) уменьшается в несколько раз. При уменьшении концентрации бора в кремнии, то есть при удалении от ПМД в диэлектрическую область, этот эффект уменьшается. Это также подтверждается рассчитанными из экспериментальных данных температурными зависимостями коэффициента тензочувствительности для этих образцов в области гелиевых температур, который достигает значения $K_{4.2K}$ = 165 при деформации сжатия $\varepsilon = -5{,}29 \cdot 10^{-3}$ отн. ед. Выявлено также влияние деформирования на магнетосопротивление этих образцов, когда его значение уменьшилось почти в 3 раза.

В качестве чувствительного элемента магнитного поля можно использовать деформированные образцы нитевидных кристаллов Si p-типа, легированные бором и примесью никеля, концентрация бора в которых находится в непосредственной близости к переходу «металл — диэлектрик» с диэлектрической стороны ПМД. В зависимости магнетосопротивления от индукции магнитного поля таких кристаллов проявляется значительный магниторезистивний эффект, достигающий 250% при 14 Тл.

Ключевые слова: сенсор, пьезорезистивный эффект, нитевидный кристалл, кремний, никель, магнетосопротивление.

DOI: 10.15222/TKEA2017.3.24
UDC 621.315.592

A. A. DRUZHININ, Yu. M. KHOVERKO, A. P. KUTRAKOV, R. M. KORETSKII , S. Yu. YATSUKHNENKO

Lviv Polytechnic National University, Ukraine, Lviv
druzh@polynet.lviv.ua

TWO-FUNCTIONAL SENSOR OF MAGNETIC FIELD AND DEFORMATION BASED ON Si <B, Ni> MICROCRYSTALS

This research investigates complex studies of electrical conductivity and magnetoresistance of both strain and non-strain samples of p-type Si whiskers with different degrees of doping with boron and nickel in a wide temperature range from 4.2 to 300 K. It is established that the greatest manifestation of the piezoresistive effect is observed in the vicinity of concentrations which correspond to the metal-insulator transition. Investigation of the magnetoresistance of crystals was carried out in the range of fields with induction up to 14 T. Whiskers of silicon with a doping concentration of boron of $5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3} can be used as a sensitive element for two-functional deformation and magnetic field sensors in difficult operating conditions.

Microwires for research were grown by chemical transport reactions with the crystallographic orientation <111> and with the concentration of charge carriers, which corresponds to the vicinity of metal-insulator transition ($5 \cdot 10^{18}$ $см^{-3}$). The nickel doping was conducted by the low-temperature diffusion from the precipitated film on the surface of the crystal. The uniaxial strain of Si microcrystals was carried out by fixing them on substrates with the different coefficient of thermal.

The metallic-type temperature dependence on the resistivity is typical for heavily doped silicon microcrystals (with the bor concenctation >$5 \cdot 10^{18}$ cm^{-3}) for both deformed and non deformed samples. Significant influence of the deformation on characteristics of microcrystals wasn't found. The maximum magnetoresistance of such samples doesn't exceed 4% in magnetic fields with induction of 14 T at the temperature of liquefied helium.

The resistivity of Si crystals with ρ_{300K} = 0.012 Ohm·cm (which corresponds to the dielectric side of MIT) is reduced in several times at the the temperature of liquefied helium and under the uniaxial deformation. Decreasing of boron concentration reduces this effect. This is also confirmed by the calculation of the experimental data temperature dependence of gauge factor for these samples in helium temperatures. The gauge factor is $K_{4.2K}$=165 at the compressive strain $\varepsilon = -5.29 \cdot 10^{-3}$ RVUs. It is also found that the deformation of these samples has significant impact on characteristics of the magnetoresistance and the value of the magnetoresistance decreased almost in 3 times.

The undeformed samples of Si p-type microwire doped with nickel and boron concentration in the vicinity of dielectric side to MIT can be used as the sensing element of magnetic field. The significant magnetic field dependence on magnetoresistance is observed in such crystals wich can reach a value of 250% at 14 T.

Keywords: sensor, piezoresistive effect, whisker crystal, silicon, nickel, magnetoresistance.

REFERENCES

1. 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, pp. 77-87.

2. Baranskii P. I., Fedosov A. V., Gaidar G. P. [*Physical properties of Si and Ge crystals in the fields of effective external influence*]. Lutsk: Nadstyrja; 2000 (Ukr)

3. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Koretskii R. Strain-induced effects in *p*-type Si whiskers at low temperatures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, vol. 40, pp. 766-771. https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015

4. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Kohut Yu.R. [*Nytkopodibni krystaly kremniiu, germaniiu ta yihnih tverdyh rozchyniv u sensornii elektronitsi*]. Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2010, 200 p. (Ukr)

5. Ferrand D. Cibert J., Wasiela A., Bourgognon C., Tatarenko S., Fishman G., Andrearczyk T., Jaroszyski J., Kolesnik S., Dietl T. et al. Hysteresis in the magneto-transport of manganese-doped germanium: evidence for carrier-mediated ferromagnetism. *Phys. Rev.B*, 2001, vol. 63, pp. 085201.

6. Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Chernetskiy M. Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity. *Nanoscale Research Letters*, 2017, vol. 12(78), pp. 1-7. https://doi.org/10.1186/s11671-017-1855-9

7. Morresi L., Pinto N., Ficcadenti M., Murri R., D'Orazio F., Lucari F. Magnetic and transport polaron percolation in diluted GeMn films. *Materials Science and Engineering B*, 2006, vol. 126, pp. 197-201. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2005.09.025

8. Nasriddinov S. S. Investigation of Temperature Sensors Based on Si <P, Ni>. *Journal of nano- and electronic physics*, 2015, vol. 7, no 3, pp. 03037-5.

9. Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P. Investigation of Si-Ge whiskers growth by CVD. *Phys. Stat. Sol. (C),* 2004, vol. 1, no. 2, pp. 333-336. https://doi.org/10.1002/pssc.200303948

10. 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, no. 2-3, pp. 243-257. https://doi.org/10.1002/1521-4079(200202)37:2/3<243::AID-CRAT243>3.0.CO;2-L

11. Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Y., Yatsukhnenko S. Magnetic properties of doped Si<B,Ni> whiskers for spintronics. *Journal of Nano Research*, vol. 39, pp. 43-54. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43