ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 19, № 3 (2018) С. 246-253
DOI: 10.15330/pcss.19.3.246-253

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 19, № 3 (2018) P. 246-253

УДК: 621.315.592

ISSN 1729-4428

Ю.М. Ховерко, Н.О. Щербань

Електропровідність та магнетоопір мікроструктур кремнію за низьких температур в околі переходу метал-діелектрик

Національний університет «Львівська політехніка», м.Львів, вул Ст.Бандери, 12, 79013 khoverko@lp.edu.ua

Проведено комплексні дослідження мікрокристалів кремнію з питомим опором від ρ_{300K} = 0,025 Ом×см до ρ_{300K} = 0,007 Ом×см, легованих транспортною домішкою бору до концентрацій, що відповідають переходу метал-діелектрик та модифікованих домішкою перехідного металу нікелю за низьких температур до температури скрапленого гелію T = 4,2 K в магнітних полях до 14 Тл. Визначено особливості електрофізичних характеристик зразків за низьких температур в сильних магнітних полях до 14 Тл, що обумовлені впливом магнітної домішки в розбавлених магнетитиками напівпровідниках і запропоновано використання таких кристалів в сенсорах фізичних величин (температура, магнітне поле, деформація).

Ключові слова: стрибкова провідність; мікрокристал; від'ємний магнітоопір; спін; кріогенні температури.

Стаття поступила до редакції 29.08.2018; прийнята до друку 15.09.2018.

Вступ

Дослідження низькотемпературних характеристик легованих напівпровідникових мікрокристалів з концентрацією домішки в околі переходу метал-діелектрик (ПМД) на сьогодні достатньо широко вивчені [1, 2], оскільки, вони можуть дати інформацію про кінетичні ефекти в цих матеріалах, які можна використати для створення як високочутливих сенсорів фізичних величин, дієздатних за низьких температур, так і інших базових елементів твердотільної електроніки. Проте, вивчення впливу зовнішніх чинників на електрофізичні властивості класичних напівпровідників таких як кремній, германій з огляду на бурхливий розвиток сучасної магнітоелектроніки (спінтроніки) є недостатньо розвинутий [3, 4]. В той час як в спінтроніці численні досягнення було зроблено на основі досліджень властивостей металів [5], спінтроніка на базі напівпровідників все ще перебуває в стадії розробки [6]. Як відомо [7, 8], можливість об'єднання інформації про заряджені частинки та спінові ступені свободи, розбавлені магнетиками напівпровідники – перспективні нові матеріали в області спінтроніки [9, 10]. Окрім того відомо [11], що з пониженням температури, коли неможливими стають іонізаційні процеси, носії заряду в зоні провідності виморожуються, концентрація їх стає настільки малою, що домінуючий вклад в струмоперенесення починають вносити стрибки електронів безпосередньо по донорах (чи акцепторах) що відбувається за рахунок малого, але скінченного перекриття хвильових функцій сусідніх домішок. Такий процес струмоперенесення за рахунок стрибків носіїв заряду між різними локалізованими станами характеризує стрибкова провідність. Чисельні експериментальні факти і теоретичні докази переконливим чином доводять, що в слабо легованих і компенсованих напівпровідникових зразках за досить низьких температур стрибковий механізм провідності серед інших є єдиним механізмом, що забезпечує транспорт електронів [12, 13]. Причому основні характеристики стрибкового транспорту визначаються структурою домішкової зони, яка в свою чергу визначається як властивостями окремих домішкових центрів, так і законом електростатичної взаємодії між електронами і іонізованими домішковими центрами. Тому введення магнітної домішки у кристал, яка здатна поляризувати носії заряду навколо себе, дає можливість створити умови, за яких необхідно враховувати для прогнозування магнітоопору кристалів поляризаційну складову, що спричинена характером стрибкової провідності за низьких температур. Своєю чергою, у ниткоподібних кристалах спостерігались цікаві магнітні властивості, що пов'язані з можливим утворенням

суперпарамагнітних кластерів в кристалах субмікронного діаметра [14]. У зв'язку з цим, дослідження магнітоопору мікрокристалів кремнію, модифікованих домішкою перехідних металів з практичної точки зору цікаві насамперед тому, що магнітна відповідь цього матеріалу визначає можливість застосування мікрокристалів в сенсорах фізичних величин за впливу зовнішнього магнітного поля [15]. Крім того, такі дослідження дають можливість поглибити знання про магнетоопір та електропровідність кристалів [16], їх поведінку за різних умов, природу та взаємозв'язки цих ефектів тощо. І нарешті, в мікрокристалах має місце розмірна залежність магнітної сприйнятливості [17], що відрізняє їх від об'ємних зразків.

Отже, метою роботи є вивчення впливу магнітної домішки на рух носіїв заряду у мікрокристалах, легованих транспортною домішкою бору до концентрацій, що відповідають переходу метал-діелектрик за низьких температур до температури скрапленого гелію T = 4,2 К в магнітних полях до 14 Тл для розроблення сенсорів фізичних величин, працездатних за складних умов.

I. Деталі експерименту

Об'єктом досліджень були мікрокристали кремнію p-типу провідності, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій у формі ниткоподібних кристалів довжиною 2 ÷ 5 мм та діаметром 20 ÷ 60 мкм з кристалографічною орієнтацією <111>. Для одержання p-типу провідності кристали в процесі росту легували домішкою бору, завантажуючи в ампулу ангідрид бору (B_2O_3), а також золото і платину, як ініціатори росту ниткоподібних кристалів. Концентрація носіїв заряду в кристалах була в діапазоні від 2×10^{18} до 2×10^{19} $см^{-3}$, що охоплювала інтервал концентрацій ($5\times10^{18}см^{-3}$) в околі переходу метал-діелектрик (ПМД). Плівку нікелю наносили методом електролітичного хімічного осадження, а подальший відпал за T = 580°C шляхом низькотемпературної дифузії приводив до створення профільних зон домішки, які, з одного боку, дозволили утворити омічні контакти до товщі кристалу, а з іншого – зони, які можуть поляризувати навколишні домішки в товщі кристалу. Дослідження поведінки електропровідності як деформованих так і недеформованих зразків, магнетоопору (МО) мікро- та наноструктур кремнію за температур 4,2 – 300 К у сильних магнетних полях до 14 Тл проводили в Інституті низьких температур та структурних досліджень (м. Вроцлав, Польща). Досліджувані зразки розміщували на спеціальній вставці та поміщали у гелієвий кріостат типу ГКОП, де відбувалось їх охолодження до температури 4,2 К. До кімнатної температури зразки нагрівали за допомогою спеціальної вставки з нагрівачем із біфілярного дроту, намотаного на корпус вставки.

Стабілізований електричний струм 1 – 100 мкА у вимірювальній схемі задавався джерелом струму Keithley-224 залежно від опору досліджуваного зразка. Електричну напругу на контактах зразків, вихідний сигнал термопари та сенсора магнетного поля вимірювали цифровими вольтметрами Keithley-199 та Keithley-2000 з точністю до 1 мкВ з одночасною автоматичною реєстрацією показів через паралельний порт персонального комп'ютера та їх візуалізацією на екрані монітора і запису масиву даних у файли.

Для дослідження властивостей мікро- та наноструктур кремнію у магнетних полях до 14 Тл використано спеціальну методику, яка дозволяє проводити вимірювання магнетоопору за різних фіксованих температур в інтервалі від 4,2 до 300 К. Вимірювання польових залежностей МО проводили в інтервалі магнетних полів 0 – 14 Тл за фіксованих температур в інтервалі 4,2 – 300 К. Магнітне поле створювали з допомогою біттерівського магніта з індукцією до 14 Тл та часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв та 3,5 Тл/хв відповідно за температури скрапленого гелію та в інтервалі температур 4,2 - 77 К. Фіксовані температури вставки кріостату задаються з допомогою спеціальної системи регуляції температури кріостата. Ця система забезпечує поступове охолодження кріостата до прецизійно встановлених фіксованих температур. В якості термочутливого елемента термоконтроллера використовувався терморезистор. При цьому в кріостаті забезпечується стабілізація температури не гірше 0,5 °C впродовж 20 хвилин.

Усі напруги вимірюються з допомогою цифрових вольтметрів типу Keithley-199 з точністю не гірше 0,01 %. Струм через резистивну вітку задається від джерела струму Keithley-224 з точністю 0,1 %, що визначає похибку вимірювання опору.

II. Експериментальні результати досліджень

В основі роботи напівпровідникових сенсорів різноманітних фізичних величин, зокрема теплових та механічних, лежить температурна залежність електропровідності кристалів та її зміни під впливом зовнішніх чинників, наприклад деформацій. Коли йдеться про створення сенсорів для інтервалу низьких температур, то слід враховувати, що в цьому разі електрофізичні властивості напівпровідників визначатимуться ступенем легування і типом легуючої домішки, ступенем компенсації і мірою наближення до переходу метал-діелектрик. Це зумовлює необхідність вивчення впливу ступеня легування та температурної поведінки легуючої домішки на електропровідність напівпровідникових кристалів кремнію.

Для встановлення механізмів низькотемпературної провідності за дії магнетного поля для ниткоподібних кристалів кремнію p-типу провідності з концентрацією домішки бору, що відповідає як металевому, так і діелектричному боку ПМД, досліджувались температурні залежності опору та магнетоопору в інтервалі температури від 4,2 до 60 К в магнетних полях (0 ÷ 14) Тл. Дослідження температурної залежності опору та

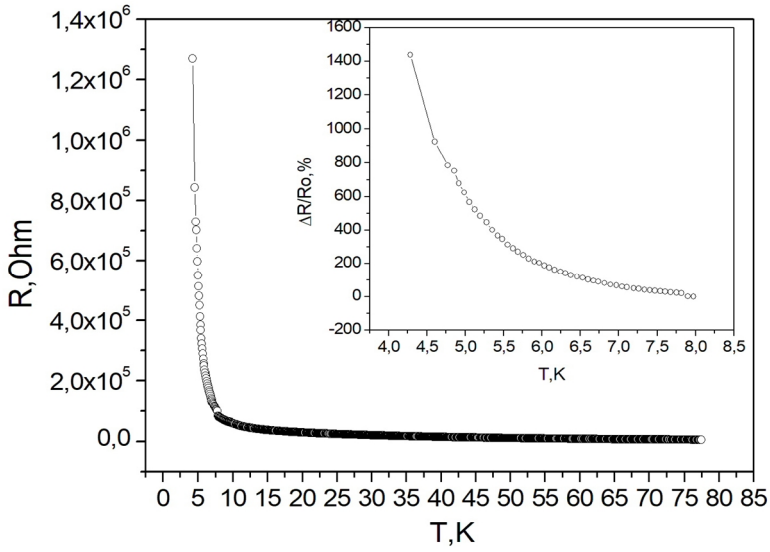

Рис. 1. Температурна залежність опору мікрокристалів Si (ρ_{300K} = 0,025 Ом×см) з домішкою бору з концентрацією легуючої домішки, що відповідає ПМД з діелектричного боку та модифікованих нікелем. На всатвці: відносна зміна опору мікрокристілів у вузькому діапазоні температур 4,2 - 9 К.

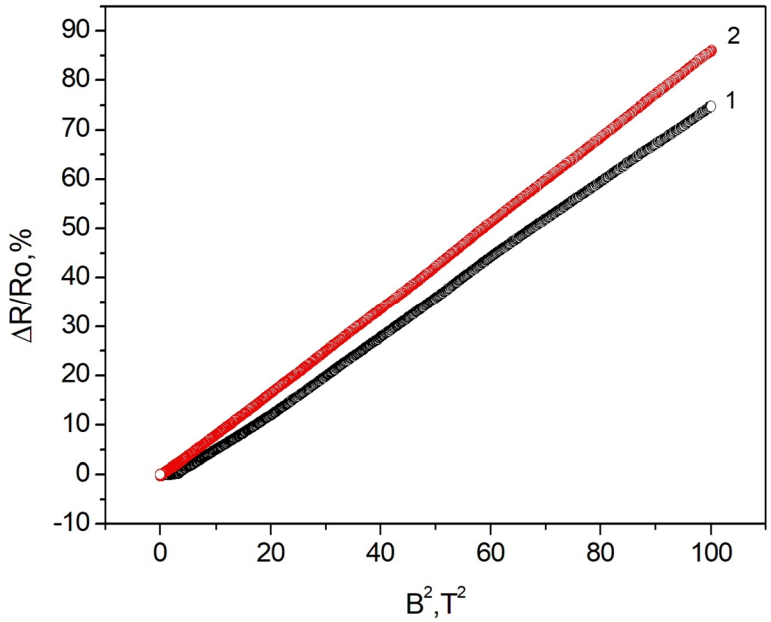

Рис. 2. Залежнітсть магнітоопору мікрокристалів Si (ρ_{300K} = 0,025 Ом×см)від індукції магнітного поля з домішкою нікелю та бору з концентрацією легуючої домішки, що відповідає ПМД з діелектричного боку за температури 4,2 К: 1 - в повздовжньому та 2 - в поперечному напрямках по відношенню до напрямку магнітного поля.

магнетоопору мікрокристалів кремнію з концентрацією легуючої домішки бору, що відповідає ПМД з діелектричного боку (ρ_{300K} = 0,025 Ом×см) зображено на рис. 1, 2.

Як видно з рис. 1, характер зміни опору в температурній області 20 – 80 К в цілому однаковий, натомість у низькотемпературному інтервалі 4,2 - 10 К у слабколегованих мікрокристалах спостерігається більш різка зміна опору. Значна залежність опору кристалів з рис. 1 спостерігається тільки до температури 10 К, що типово для діелектричного типу провідності. При зменшенні концентрації бору в кремнієвих зразках, тобто при віддаленні від ПМД в діелектричну область, чутливість кристалів до температури збільшується, що проявляється в збільшенні значення опору. Це можна використати для розроблення високочутливих сенсорів температури з терморезистивним принципом дії, або високочутливих термореле. Як видно з вставки до рис.1, відносна зміна опору кристалів змінюється на декілька порядків у вузькому діапазоні температур. Температурний коефіцієнт опору (ТКО) таких зразків сягає 300 %×$К^{-1}$. Поведінка магнітоопру (рис. 2.) мікрокристалів Si<B,Ni> за низьких температур відповідає класичній параболічній зміні як для об’ємного кремнію. Необхідно також зазначити, що вплив деформації спостерігається тільки в кристалах Si *p*-типу з концентрацією домішки, що відповідає наближенню до критичної концентрації переходу

метал–діелектрик і відсутній у НК Si *p*-типу з металевого боку переходу, тобто на вільних дірках. З іншого боку, він зменшується 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 [18]. Перший чинник свідчить про те, що для ефекту деформування носії заряду повинні 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 переходу метал-діелектрик

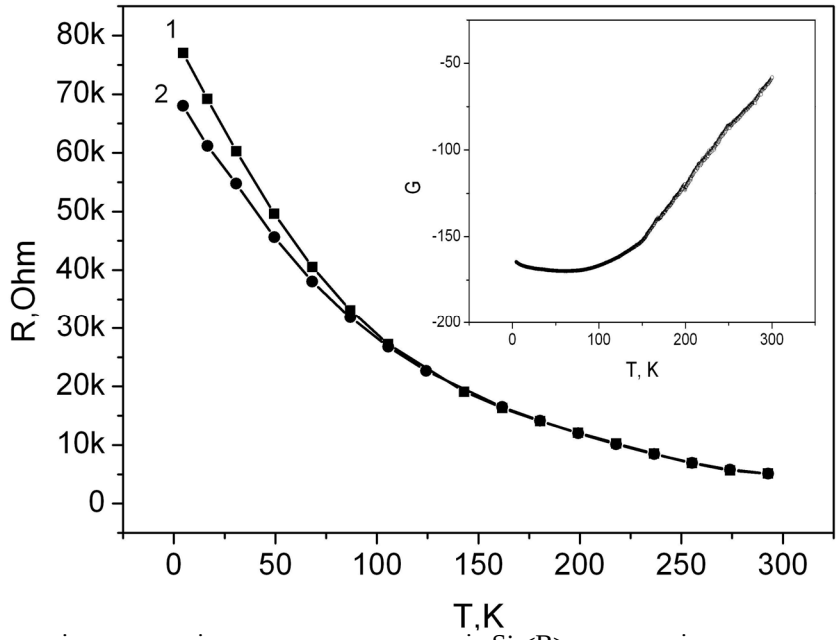

Рис. 3. Залежність опору від температури кристалів Si <B> для зразків з концентрацією бору $N_B = 5\times10^{18}$ см$^{-3}$, що відповідає близькості ПМД з діелектричного боку. Криві 1 та 2 відповідають результатам зразків з домішкою нікелю, та без магнітної домішки відповідно.
На вставці: температурна залежність коефіцієнта тензочутливості мікрокристалів.

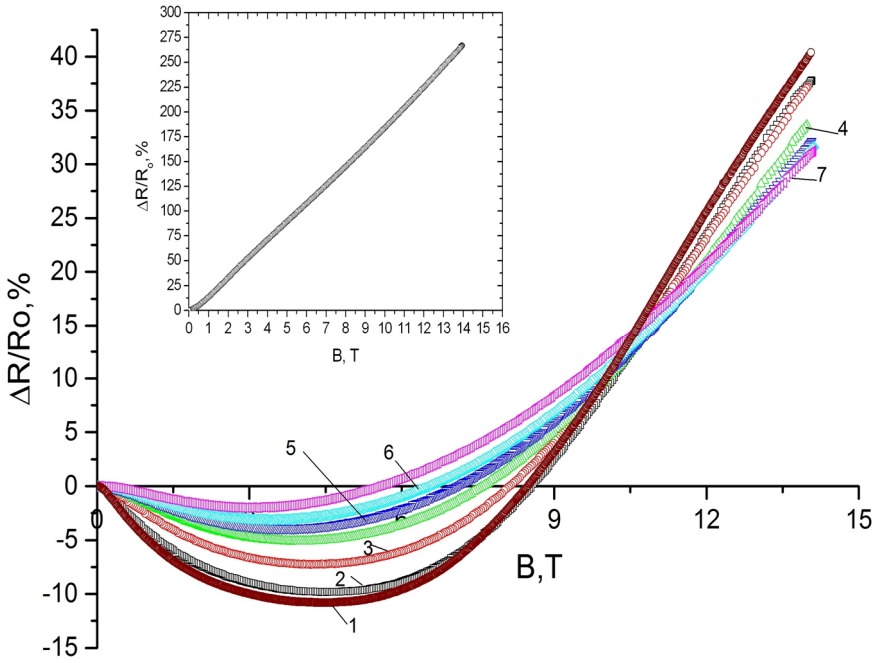

Рис. 4. Залежність магнітоопору мікрокристалів Si<B,Ni>(ρ_{300K} = 0,0123 Ω × cm) від індукції магнітного поля з концентрацією легуючої домішки бору $N_B = 5\times10^{18}$ см$^{-3}$, що відповідає близькості ПМД з діелектричного боку для різних температур:1 – 4,2 К, 2 – 13 К, 3 – 29 К, 4 - 40 К, 5 – 50 К, 6 – 60 К.
На вставці: залежність магнітоопору мікрокристалів кремнію від індукції магнітного поля з концентрацією легуючої домішки бору $N_B = 5{,}5\times10^{18}$ см$^{-3}$, що безпосередньо відповідає ПМД.

($N_B \approx 5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$), що відповідає близькості ПМД з діелектричного боку.

Результати експериментальних досліджень мікрокристалів Si<B,Ni> з концентрацією легуючої домішки бору $N_B = 5 \times 10^{18}$ за низьких температур відображено на рис. 3, 4. Очевидно (рис. 3), що присутність магнітної домішки істотно впливає на локалізовані дірки, по яких реалізується стрибкова провідність, своєю здатністю поляризувати навколишні носії заряду. Спостережений ефект, що проявляється за низьких температур, вказує на вплив домішки перехідного металу на транспорт носіїв заряду за температур нижче 100 К. Оскільки за низьких температур відбувається значне вимороження носіїв заряду, то одним із домінуючих механізмів провідності стає стрибкова провідність, яка напряму залежить від концентрації домішок в кристалі. Так, на рис. 3 зображено температурну залежність опору Si <B,Ni> НК для зразків з концентрацією бору $N_B = 5 \times 10^{18}$ см$^{-3}$, що відповідає близькості ПМД з діелектричного боку. Як видно з рис. 3, наявність нікелю вплинула на температурні залежності опору мікрокристалів, а саме, спостережено збільшення величини опору, в порівнянні з кристалами без металевої домішки. Локалізація атомів нікелю, як вільної домішки, або розміщення магнітного атома, як дефекту кристалічної ґратки кремнію (заміщення) вплинула на рух носіїв у кристалі і призвела до їх зменшення, утворюючи потенційні ями, або певні пастки для носіїв, внаслідок чого відбувається зміна в опорі кристалу. Експериментальні дослідження показали, що провідність мікрокристалів кремнію за низьких температур підлягає закону Мотта ($\ln\rho \sim T^{-1/4}$). Це підтверджує домінування стрибкової провідності за низьких температур [12, 15] як $R = R_O \exp\left(T_O / T\right)^{1/n}$, де $n = 1/3$ при $T < 10$ К; $n = 1/4$ при $T = 10 - 25$ К; T_o – температура Мотта. У наших дослідженнях, як і в теоретичних уявленнях [9, 12, 19] показано, що механізм зміни провідності задовольняє наступному співвідношенню: $\rho \propto \exp E_{hop}/kT$, де E_{hop} – енергія активації стрибкової провідності по локалізованим домішкам, T – температура спостереження [19].

Натомість, внаслідок введення магнітної домішки інтервал існування від'ємного магнетоопору суттєво розширився [15]. Перенесення дірок (у феромагнітному режимі) відбувається за допомогою найближчого сусіда шляхом стрибка носія заряду на незайняті місця локалізації. Це передбачає, що середня відстань між локалізованими дірками повинна бути більшою, ніж радіус локалізації дірок, тобто $\alpha_0^3 p << 1$, де α_0^3 представляє характеристику експонентного спаду хвильової функції дірки в локалізованих станах, p – ефективна концентрація дірок [13]. Можна припустити, що інтервал існування стрибкової провідності по двічі зайнятим станам, яку ми раніше анонсували в інтервалі існування від'ємного магнетоопору, суттєво збільшився.

Окрім того, від'ємний магнетоопір, як правило, спостерігається у зразках з концентрацією домішки близькою до критичної концентрації ПМД. Виявлений від'ємний магнітоопір в мікрокристалах з діелектричного боку ПМД (рис. 4) дозволяє зробити припущення, що як і в [20], в таких зразках поява від'ємного магнітоопору може бути спричинена підвищенням провідності діркових пар, утворених внаслідок феромагнітної обмінної взаємодії делокалізованих носіїв в процесі стрибкової провідності. Характерною особливістю ефекту від'ємного магнітоопору у досліджуваних зразках, як і в роботі [21], де досліджували магнітоопір сильнолегованого Ge *n*-типу, є відхилення від квадратичної залежності магнітоопору від магнітного поля в області відносно слабких полів (рис. 4). Автори [21] пояснювали ефект виникнення від'ємного магнітоопору утворенням «двійок» – двох станів зі спареними спінами, відносно близьких між собою і віддалених від інших, які існують поблизу рівня Фермі. Всередині такої «двійки» очевидним є виникнення сильної феромагнітної взаємодії, яка приводить до спарювання спінів, а відтак до збільшення провідності кристалів. Ефект від'ємного магнітоопору, пов'язується зі зміною густини станів поблизу рівня Фермі з магнітним полем. За однократної іонізації «двійки», її рівень за збільшення магнітного поля зміщується вверх. Частина рівнів зміщується вниз, а частина вверх, що приводить не тільки до зміщення рівня Фермі, а й до зміни густини станів в його околі.

З огляду використання виявлених ефектів у мікрокристалах Si<B,Ni> з концентрацією домішки бору, що відповідає близькості переходу метал-діелектрик під час розроблення сенсорів фізичних величин виявлено, що коефіцієнт тензочутливості для таких зразків в області гелієвих температур досягає значення $K_{4.2K} = -165$ при деформації стиску $\varepsilon = -5{,}29 \times 10^{-3}$ відн. од. (рис. 3, вставка). Натомість для розроблення сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії, що заснований на значному магніторезистивному ефекті і сягає до 250 % (рис. 4, вставка) слід використовувати мікрокристали Si<B,Ni> з концентрацією домішки бору, що безпосередньо відповідає переходу метал-діелектрик ($N_B = 5{,}5 \times 10^{18}$ см$^{-3}$).

Для сильнолегованих мікрокристалів кремнію (рис. 5, 6) в усьому досліджуваному температурному інтервалі характерний типовий металевий хід температурної залежності питомого опору, як для недеформованих, так і для деформованих кристалів. Суттєвий вплив деформації на характеристики мікрокристалів не помічено. Слабка залежність магнітоопору мікрокристалів 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 складних умовах експлуатації, зокрема в сильних магнітних полях. За температур скрапленого гелію максимальний магнітоопір сягає не більше 4 % в магнітних полях з індукцією до 14 Тл.

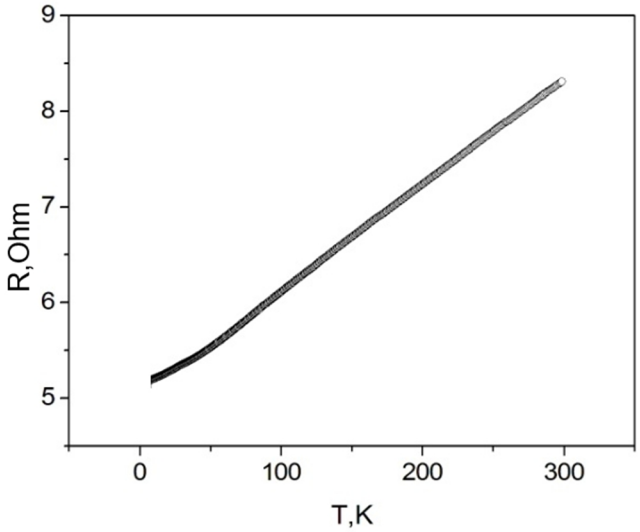

Рис. 5. Температурна залежність опору мікрокристалів кремнію Si (ρ_{300K} = 0,007 Ом×см) з домішкою нікелю та бору з концентрацією легуючої домішки, що відповідає ПМД з металевого боку

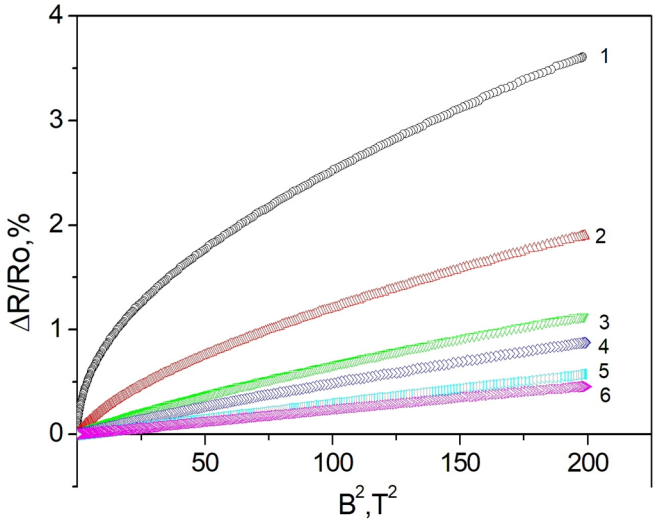

Рис. 6. Польова залежність магнітоопору мікрокристалів Si (ρ_{300K} = 0,007 Ом×см) з домішкою нікелю та бору з концентрацією легуючої домішки бору, що відповідає ПМД з металевого боку ПМД для різних температур:1 - 4.2 К, 2 – 13 К, 3 – 29 К, 4 - 40 К, 5 – 50 К, 6 – 60 К.

III. Використання (application)

Розвиток нових галузей науки і техніки на сучасному етапі (ракетно-космічна і авіаційна техніка, кріогенна техніка, кріоенергетика та ін.) висуває на перший план проблему створення мініатюрних високочутливих сенсорів механічних, теплових, магнітних величини, працездатних за низьких температур. Розглянемо вирішення цієї проблеми на прикладі створення сенсорів магнітних величин. На сьогодні значна увага приділяється гетероструктурам, що складаються з почергово нанесених магнітних (напівмагнітних) та немагнітних матеріалів. За прикладання зовнішнього магнітного поля електрони в цій області поляризуються та відбувається інжекція в немагнітну область. В результаті у немагнітному прошарку з'являється спін-поляризований канал для транспорту носіїв зарядів. Отримані залежності магнітоопору такого чутливого елемента не є лінійними, а магнітне насичення структури відбувається за магнітного поля 3 – 4 Тл, після чого сенсор має слабку магнітну залежність.

Використання мікрокристалів Si<B,Ni> дозволяє створювати високоточні чутливі елементи мікроелектронного сенсора, що здатні працювати в умовах температури рідкого гелію за умови дії сильних магнітних полів до 14 Тл з можливістю інтеграції чутливих елементів зі схемами обробки інформації та низьку вартість.

В результаті проведених досліджень впливу магнітного поля встановлено, що запропонований чутливий елемент мікроелектронного сенсора володіє надвисокою чутливістю до магнітного поля (рис. 4, вставка), а простота конструкції забезпечує малу інерційність і водночас високу швидкодію.

На рис. 7 зображено фотографію загального вигляду сенсора, а на рис. 8 – вихідну характеристику сенсора.

Градуювальні характеристики сенсора

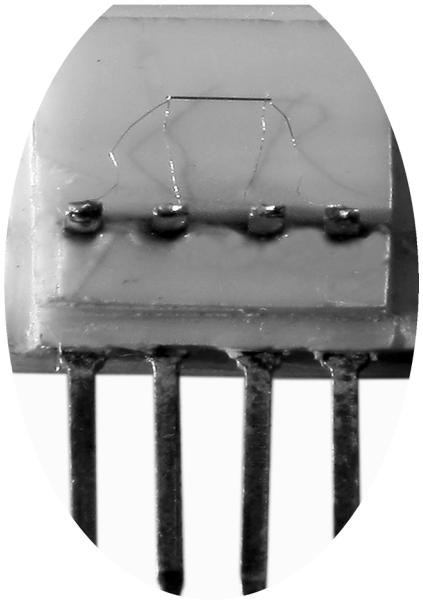

Рис. 7. Загальний вигляд сенсора магнітного поля з магніторезистивним принципом дії.

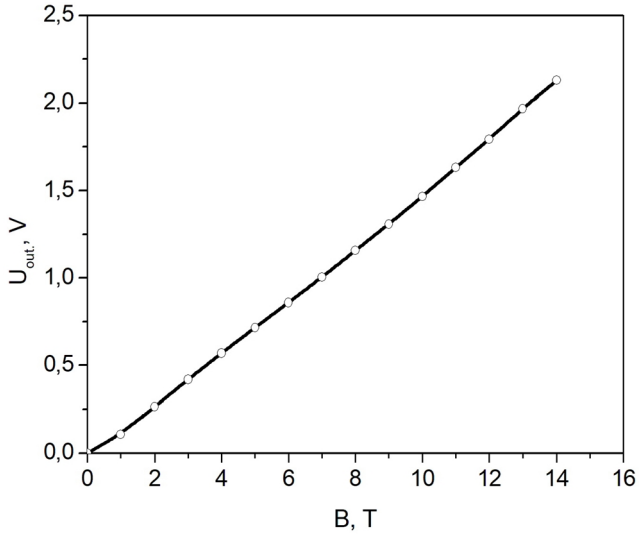

Рис. 8. Вихідний сигнал сенсора магнітного поля з магніторезистивним принципом дії.

Таблиця 1

Градуювальна характеристика сенсора магнітного поля на основі легованих бором і модифікованих нікелем мікрокристалів кремнію

B, T	0	2	4	6	8	10	12	14
$U_{вих.}$, B	0	0,26	0,56	0,85	1,15	1,46	1,79	2,12

B, T	0	2	4	6	8	10	12	14
δ, %	1,9	0,04	0,06	-0,67	-1,03	-0,84	0,24	1,61

δ – відносна похибка

магнітного поля з магніторезистивним принципом дії зведена у таблиці 1.

Сенсор на базі запропонованого чутливого елемента функціонує наступним чином. При подачі напруги на контакти кристалу між ними протікатиме початковий струм. Прикладання зовнішнього магнітного поля впливатиме на поляризацію носіїв заряду у приповерхневому шарі кристала, в результаті чого відбуватиметься зміна провідності у кристалі. Працездатність такого сенсора обмежується діапазоном кріогенних температур (до температури скрапленого гелію 4,2 К) від величини магнітного поля до 14 Тл з чутливістю 5 мТл.

Висновки

В результаті проведених досліджень мікрокристалів кремнію, легованих транспортною домішкою бору до концентрацій, що відповідають переходу метал-діелектрик та модифікованих нікелем визначено особливості електрофізичних характеристик зразків за низьких температур в сильних магнітних полях до 14 Тл. Виявлено, що для розроблення високочутливих сенсорів температури з терморезистивним принципом дії, або високочутливих термореле, слід використовувати мікрокристали Si<B,Ni> з питомим опором r_{300K} = 0,025 Ом×см, що відповідає діелектричній області переходу метал-діелектрик. Відносна зміна опору кристалів змінюється на декілька порядків за температур скрапленого гелію (4,2 К). Температурний коефіцієнт опору таких зразків сягає 300 %×$К^{-1}$. Для розроблення сенсорів механічних величин запропоновано використовувати зразки мікрокристалів кремнію з питомим опором r_{300K} = 0,012 Ом×см. Коефіцієнт тензочутливості для таких зразків в області гелієвих температур досягає значення $K_{4,2K}$ = -165 при деформації стиску ε = $–5{,}29\times10^{-3}$ відн. од. Слабка залежність магнітоопору НК Si з питомим опором r_{300K} = 0.007 Ом×см та металевим характером провідності, що зумовлена слабкою локалізацією носіїв заряду, матиме принципове значення при застосуванні таких мікрокристалів як чутливих елементів сенсорів теплових величин, працездатних в складних умовах експлуатації, зокрема в сильних магнітних полях. За температур скрапленого гелію максимальний магнітоопір сягає не більше 4 % в магнітних полях з індукцією до 14 Тл. Натомість для розроблення сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії, що заснований на значному магніторезистивному ефекті і сягає до 250 % слід використовувати мікрокристали Si<B,Ni> з концентрацією домішки бору, що безпосередньо відповідає переходу метал-діелектрик (N_B =

$5{,}5\times10^{18}$ $см^{-3}$). Працездатність такого сенсора реалізується в інтервалі кріогенних температур (до температури скрапленого гелію 4,2 К) від величини магнітного поля до 14 Тл з чутливістю 5 мТл.

Ховерко Ю.М. - д.т.н., с.н.с.
Щербань Н.О. - аспірант.

[1] A.A. Barlian, S.J. Park, V. Mukundan, B.L. Pruitt, Sens Actuators A. 134, 77 (2007).
[2] A. Druzhinin, I. Maryamova, E. Lavitska, Y. Pankov, Sensors and Actuators: A. Physical, 68(1-3), 229 (1998).
[3] A. Fert, Thin Solid Films 517, 2 (2008).
[4] I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, Rev. Mod. Phys. 76, 323 (2004).
[5] D. Sanchez, C. Gould, G. Schmidt and L.W. Molenkamp, IEEE Trans. Electron Devices 54, 984 (2007).
[6] H.W. Wu, C.J. Tsai, and L.J. Chen, Appl. Phys. Let. 90, 043121 (2007).
[7] E. Durgun, D. Cakir, N. Akman, and S. Ciraci, Phys. Rev. Lett. 99(25), 25680 (2007).
[8] A. Kamra, B. Ghosh and T.K. Ghosh, J. Appl. Phys. 108, 054505 (2010).
[9] A. Kaminski, S. Das Sarma, Phys. Rev. B 68, 235210 (2003).
[10] A. Kaminski, S. Das Sarma, Phys. Rev. Lett. 88 247202 (2002),
[11] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, S. Nichkalo, R. Koretskyy, Iu. Kogut, Phys. Status Solidi A 211(2), 504 (2014).
[12] S. Yatsukhnenko, A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, M. Chernetskiy, Nanoscale Research Letters 12(78), 1 (2017).
[13] Liang Wei-Hua, Ding Xue-Cheng, Chu Li-Zhi, Deng Ze-Chao, Guo Jian-Xin, Wu Zhuan-Hua, Wang Ying-Long, Acta Phys. Sin. 59(11), 8071 (2010).
[14] A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, Iu.R. Kogut, S.I. Nichkalo, J.K. Warchulska, Journal of Nanoscience and Nanotechnology 12, 8690 (2012).
[15] Anatoly Druzhinin, Igor Ostrovskii, Yuriy Khoverko, Sergij Yatsukhnenko, Journal of Nano Research 39, 43 (2016).
[16] A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, N.S. Liakh-Kaguj and Iu.R. Kogut, Materials Science in Semiconductor Processing 14(1), 18 (2011).
[17] A.A. Druzhinin, I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, K. Rogacki et al, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 393, 310 (2015).
[18] A.A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, R. Koretskii, Materials Science in Semiconductor Processing 40, 766 (2015).
[19] S. Das Sarma, E.H. Hwang, A. Kaminski, Phys. Rev. B 67, 155201 (2003).
[20] Antonio Ferreira da Silva, Alexandre Levine and Zahra Sadre Momtaz, Henri Boudinovm, Bo E. Sernelius, Physical Review B 91, 214414 (2015).
[21] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек, ФТП 34(7), 774 (2000).

Yu.M. Khoverko, N.O. Shcherban

Electrical Conductivity and Magnetoresistance of Silicon Microstructures in The Vicinity to Metal-Insulator Transition

National University "Lviv Polytechnic", Lviv, st. Bandery str., 12, 79013 khoverko@lp.edu.ua

Complex research of silicon microcrystals with specific resistance from ρ_{300K} = 0.025 Ohm × cm to ρ_{300K} = 0.007 Ohm × cm doped with boron transport impurity to concentrations corresponding to the transition of metal-dielectric and modified transition metal nickel nickel at low temperatures to the temperature of liquefied helium T = 4.2 K in magnetic fields up to 14 Tl. The features of electrophysical characteristics of samples at low temperatures in strong magnetic fields up to 14 Tl are determined due to the influence of a magnetic impurity in semiconductor-diluted magnetism and the use of such crystals in sensors of physical quantities (temperature, magnetic field, deformation) is proposed.

Key words: jump conductivity; microcrystal; negative magnetic resistor; spin; cryogenic temperatures.