

Мікросистеми та фізична електроніка

УДК 621.315.592

Особливості приповерхневої провідності кремнієвих мікроструктур за низьких температур

Дружинін А. О., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-4854-3464](https://orcid.org/0000-0002-4854-3464)e-mail druzh@polynet.lviv.uaОстровський І. П., д.т.н. проф., ORCID [0000-0001-7867-7132](https://orcid.org/0000-0001-7867-7132)e-mail katerynaostrova@gmail.comХоверко Ю. М., д.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0002-7045-2729](https://orcid.org/0000-0002-7045-2729)e-mail khoverko@lp.edu.ua

Кучерепа Н. І.,

e-mail nazar.kucherepa@rambler.ru

Кафедра напівпровідникової електроніки

Національний університет «Львівська політехніка»

Львів, Україна

Реферат—Досліджено особливості перенесення носіїв заряду мікрочастин кремнію, легованих бором до концентрацій, які відповідають переходу метал-діелектрик, та нікелем, що знаходиться у приповерхневій області кристала. Досліджено намагніченість до 0,4 Тл та магнетоопір ниткоподібних мікрочастин кремнію під дією магнітних полів до 14 Тл за температури 4,2 К. Проведено детальний аналіз результатів теоретичних досліджень магнітних та магнітотранспортних властивостей Si<B, Ni>. Встановлено квадратичний характер залежності коефіцієнта від'ємного магнетоопору від намагніченості в мікрочастинках кремнію для інтервалу намагніченості більше 5×10^5 А/м, що відповідає стрибковій провідності носіїв заряду по двічі зайнятим домішковим станам. Натомість для малих М до 5×10^5 А/м порушується квадратична залежність магнетоопору від намагніченості, що пов'язано із стрибковим механізмом перенесення носіїв заряду по однозайнятим домішковим рівням. Встановлено, що введення магнітної домішки може вплинути на електромагнітні властивості кристала, пов'язані з транспортом носіїв заряду шляхом стрибкового тунелювання в приповерхневій зоні.

Бібл. 30, рис. 5, табл. 1.

Ключові слова — стрибова провідність; мікрочастинка; негативний магнетоопір; спін; криогенні температури

І. Вступ

Дослідження в області магнітоелектроніки інтенсивно розвиваються впродовж останніх років через унікальні потенційні можливості пристроїв, розроблених в цьому напрямку [1]. В той час як в спінтроніці чисельні досягнення були зроблені використовуючи метали [2], спінтроніка на базі напівпровідників все ще перебуває в стадії розробки. Було проведено значні теоретичні та експериментальні дослідження з метою вивчення спінової релаксації в напівпровідниках. Вивчено різноманітні сполуки типів A3-B5 і A2-B6 [3-5]. Автори статті [6] досліджували ферромагнетизм в Mn+Si нанодротах при кімнатній температурі. З іншого боку, у ниткоподібних кристалах спостерігаються цікаві магнітні властивості, пов'язані

з утворенням суперпарамагнітних кластерів субмікронного діаметра [7]. Відомо також, що в мікрочастинках має місце розмірна залежність магнітної сприйнятливості [8], відмінна від тої, що спостерігається в об'ємних зразках. В роботі [9] автори повідомляють про нові спін-залежні електронні властивості нанодротів H-Si.

Завдяки використанню залежності спіну частинки від кристалічних особливостей напівпровідника стає можливим створення умов, за яких магнітні домішки впливатимуть на рух носіїв заряду у кристалі. Попередні роботи [10] вказують на цікаві особливості, притаманні ниткоподібним кристалом кремнію, легованим до концентрацій поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД) та з введеними домішками магнітних матеріалів. Автори роботи [11] досліджували процес



вирощування і легування нанодротів, показуючи, що концентрація Ні досить висока на поверхні нанодротів, як і в об'ємних кристалах [12], де і реалізується приповерхнева провідність. Окрім цього, в роботі [12] під час низькотемпературних досліджень вперше спостерігався ефект від'ємного магнетоопору в суб-мікронних зразках на основі кремнію в слабких магнітних полях.

Беручи до уваги можливість об'єднання інформації про заряджені частинки та спінові ступені свободи, розбавлені магнетиками напівпровідники – перспективні нові матеріали в області спінтроники. У них проявляються сильні магнітотранспортні ефекти [13], в тому числі гігантський магнетоопір [14]. Багато експериментальних робіт було присвячено германію [15] та кремнію [16, 17].

Однак взаємозв'язок між магнітними та магнітотранспортними властивостями таких структур було мало досліджено, що є важливим під час розроблення сенсорів магнітного поля, спінових вентилів тощо.

Тому мета даної роботи полягала у вивченні намагніченості, магнетоопору та встановленні зв'язку між магнітними та магнітотранспортними властивостями ниткоподібних кристалів Si, легованих домішкою бору до концентрацій поблизу переходу “метал–діелектрик” та домішкою нікелю, за температури 4,2 К в магнітних полях до 14 Тл.

II. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Ниткоподібні кристали (НК) Si вирощували методом хімічних транспортних реакцій у закритій бромідній системі [18]. У кварцеву трубу було завантажено вихідний матеріал (кремній), ініціатор росту (золото), легуючу домішку (бор) і транспортуючий агент (бром). Температура зони випаровування та зони кристалізації становила відповідно 1000°C та 700-800°C.

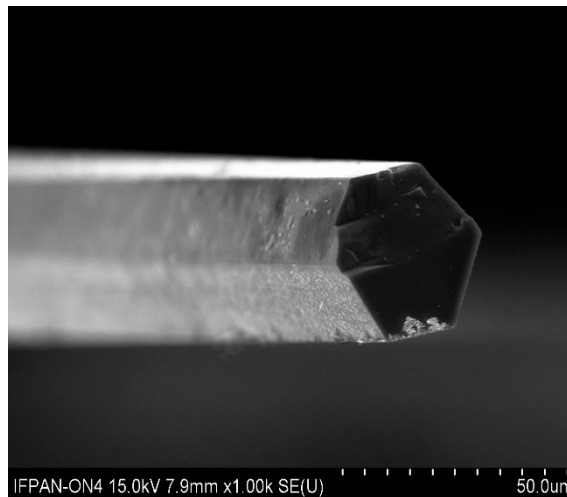


Рис. 1. SEM фотографія мікрокристалів кремнію.

Було проведено осадження півки нікелю на поверхню ниткоподібних мікрокристалів кремнію [12]. Передбачається, що відпал, який проводився в подальшому за температури 560° С, дозволив дифундувати атомам нікелю вглиб кристалу в конкретно заданих місцях, тим самим створюючи профільні зони домішки, які, з одного боку, дозволили утворити омичні контакти до товщі кристалу, а з іншого – зони, які можуть поляризувати навколишні домішки в товщі кристалу, що перебувають під впливом магнітного поля.

Для досліджень ниткоподібні кристали кремнію відбирали таким чином, щоб концентрація акцепторної домішки (бору) відповідала як діелектричному, так і металевому боку переходу “метал–діелектрик”, зважаючи на те, що для кремнію, легованого бором, критична концентрація переходу “метал–діелектрик” становить $N_c=5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. В табл. 1 наведено основні параметри досліджуваних ниткоподібних мікрокристалів кремнію.

Таблиця 1 ПАРАМЕТРИ ДОСЛІДЖУВАНИХ МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ

Концентрація бору, см^{-3}	Питомий опір ($T=300 \text{ K}$), Ом·см	Ступінь наближення до ПМД	Діаметр кристалів, мкм
1·10 ¹⁹	0,0055-0,006	Область металевої провідності	60-100
7·10 ¹⁸	0,008-0,009	Металева область ПМД	
5,5·10 ¹⁸	0,0095-0,011	Поблизу ПМД з металевого боку	
3·10 ¹⁸	0,013-0,0135	Поблизу ПМД з діелектричного боку	
8·10 ¹⁷	0,020-0,025	Діелектрична область ПМД	



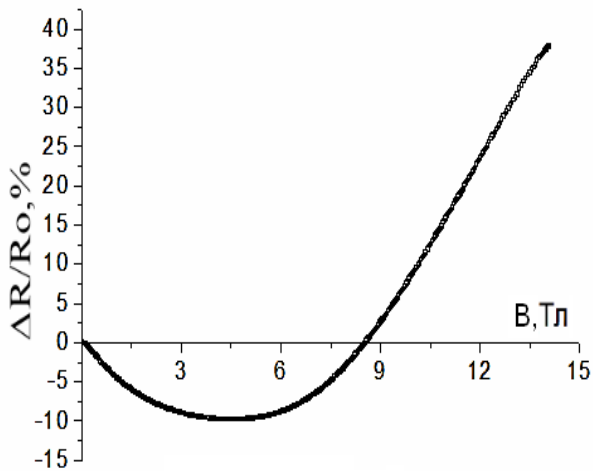


Рис. 2. Залежність магнетоопору легованих мікрокристалів кремнію з діелектричного боку переходу “метал-діелектрик” ($N_B < 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) від індукції магнітного поля за температури 4,2 К.

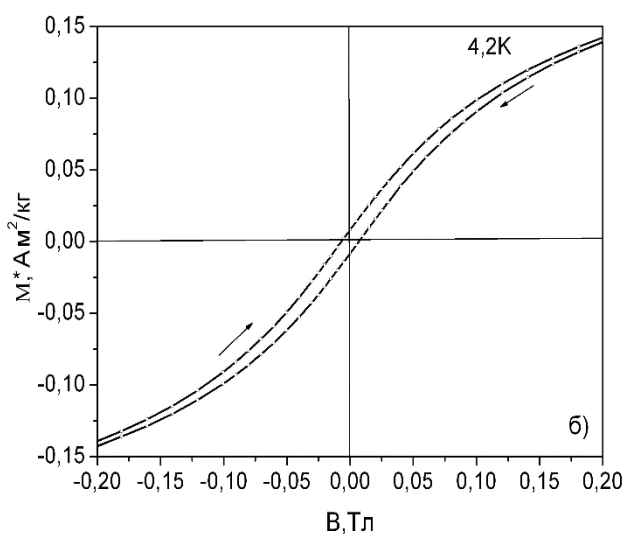
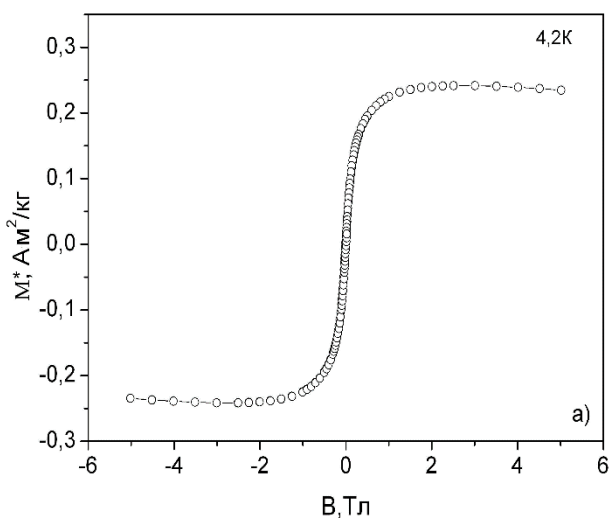


Рис. 3. Польова залежність приведені намагніченості M^* мікрокристалів кремнію, легованого нікелем, за температури 4,2 К в діапазоні полів: а) до 5 Тл, б) до 0,2 Тл.

Дослідження поведінки магнетоопору мікροструктур кремнію за температури 4,2 К під дією сильних (до 14 Тл) магнітних полів проводилися в Інституті низьких температур та структурних досліджень (м. Вроцлав, Польща). Досліджувані зразки розміщували на спеціальній вставці та поміщали в гелієвий кріостат типу ГКОП, де відбувалось їхнє охолодження до температури 4,2 К. До кімнатних температур 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 досліджуваних зразків. Електрична напруга на контактах зразків, вихідний сигнал термодари та сенсора магнітного поля вимірювали цифровими вольтметрами Keithley-199 та Keithley-2000 з точністю до 1 мкВ із одночасною автоматичною реєстрацією показів через паралельний порт персонального комп’ютера та їх візуалізацією на екрані монітора і записом масиву даних у файли. Похибка вимірювань залежностей магнетоопору не перевищувала 0,1 %. Для дослідження властивостей мікροструктур кремнію у магнітних полях до 14 Тл використано спеціальну методика, яка дозволяє проводити вимірювання магнетоопору за різних фіксованих температур в інтервалі від 4,2 до 300 К. Вимірювання польових залежностей магнетоопору проводили в інтервалі магнітних полів 0 – 14 Тл за температури 4,2 К. Магнітне поле створювали за 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.

Фіксовану температура вставки кріостату задавали за допомогою спеціальної системи регулювання температур кріостата. Як термочутливий елемент термодатчика використовували терморезистор, при цьому в кріостаті забезпечувалася стабілізація температури не гірше $0,5^\circ \text{C}$ протягом 20 хвилин.

Магнітну сприйнятливості зразків вимірювали, використовуючи SQUID [9] в магнітних полях до 0,4 Тл в діапазоні температур 4,2–300 К.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ ТА ЇХ АНАЛІЗ

На рис. 2 зображено відносну зміну магнетоопору в поперечному напрямку стосовно напрямку магнітного поля за температури 4,2 К.

Результати досліджень магнітних властивостей ниткоподібних мікрокристалів Si<B, Ni> зображено на рис. 3, а, б.

Гістерезис магнітної сприйнятливості з найбільшою коерцитивною силою присутній за температури скрапленого гелію, в тому ж інтервалі, де раніше [19] спостерігалось явище стрибкової зміни провідності. Аналізуючи результати досліджень магнітних властивостей ниткоподібних мікрокристалів кремнію, можна припустити, що існування гістерезису магнітного моменту відбувається внаслідок орієнтування всіх спінів по полю та утворення провідних каналів для руху носіїв заряду в приповерхневій області.



Петля гістерезису (рис. 3, б) вказує на присутність достатньої кількості магнітної домішки, що впливає на магніто-транспортні властивості кристала. Очевидно, що присутність магнітної домішки істотно впливає на локалізовані дірки, по яких реалізується стрибкова провідність. Підтверджено, що домінуючу роль у магніто-транспортних властивостях кристалів відіграє наявність магнітної домішки, оскільки її введення майже на порядок збільшило абсолютне значення магнетоопору. Варто відмітити, що температурна залежність питомого опору в таких зразках є дуже малою за різкої температурної залежності коефіцієнта магнетоопору [20]. Цей факт свідчить про те, що розсіювання приводить до від'ємного магнетоопору і не вносить вагомому вкладу до величини питомого опору ρ .

У даних зразках магнітні іони грають дуже важливу роль у розсіюванні провідних дірок, що показано теоретично [21], де питомий опір ρ n-Ge повинен зменшуватися у співвідношенні до квадрату намагніченості M магнітних іонів у слабкому магнітному полі:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim -M^2 \quad (1)$$

Таким чином магнетоопір $\Delta R/R_0$ описується як

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \lim_{B \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho B^2} \right) \quad (2),$$

де B – індукція магнітного поля, $\Delta R = R - R_0$, де R – опір кристалу в магнітному полі, R_0 – опір кристалу в нульовому магнітному полі.

Цей факт виходить з припущення, що серед домішки існує масив носіїв заряду з антиферомагнітною взаємодією, а від'ємний магнетоопір є результатом намагніченості даних носіїв і переходу системи у ферромагнітний стан. Припущення [21] вказують на те, що частина домішкових носіїв може володіти локалізованими магнітними моментами. Взаємодія між локалізованими моментами та дірками провідності і є причиною виникнення від'ємного магнетоопору, що добре погоджується з експериментом та результатами праць [12, 22, 23].

Беручи до уваги дані низькотемпературних досліджень магнетоопору, приведеної намагніченості та дані праці [22], було встановлено квадратичний характер зв'язку між від'ємним магнетоопором та об'ємною намагніченістю (рис. 4, вставка) в ниткоподібних мікрокристалах Si<B, Ni> за магнітних полів до 14 Тл за температури 4,2 К.

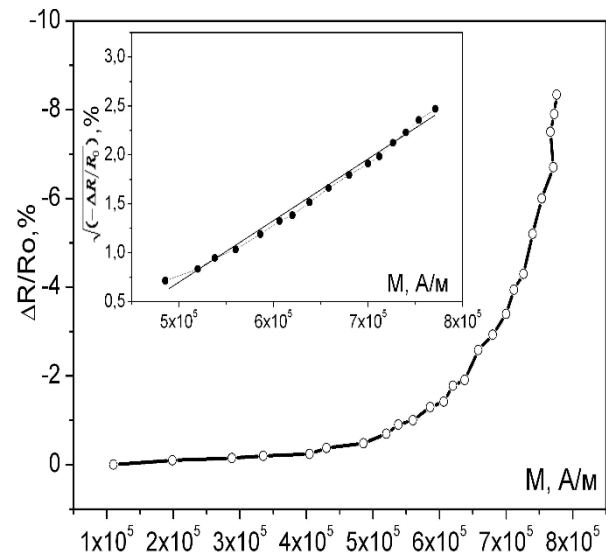


Рис. 4. Параболічна залежність від'ємного магнетоопору від об'ємної намагніченості M в ниткоподібних мікрокристалах Si<B, Ni>, $T=4,2$ К. На вставці: залежність від'ємного магнетоопору від об'ємної намагніченості як $\sqrt{(-\Delta R/R)}=f(M)$.

Для врахування поляризаційного механізму стрибкової провідності у мікрокристалах з концентрацією легуючої домішки поблизу ПМД було враховано магнітну домішку нікелю, яка здатна поляризувати носії заряду навколо себе.

Для значень об'ємної намагніченості M понад 5×10^5 А/м домінуючим механізмом перенесення носіїв заряду у мікрокристалах Si<B, Ni> є стрибки по двічі локалізованим домішкам, що є причиною поляризації носіїв в магнітному полі, а відтак квадратичної залежності магнетоопору від намагніченості (1). Натомість для малих M до 5×10^5 А/м всупереч відомому співвідношенню (1) порушується квадратична залежність магнетоопору від намагніченості (див. рис. 4), що, на нашу думку, пов'язано із стрибковим механізмом перенесення носіїв заряду по однозайнятим домішковим рівням.

Зазвичай питомий опір розраховується за узагальненим підходом Друде [24-26]. У стаціонарному випадку, який в даному випадку і розглядається, результати добре узгоджуються з формулою Зімана [27].

Під час впливу статичного та просторового однорідного зовнішнього магнітного поля (магнітна індукція B) електрони зі спінами вгору переміщуються на рівень вгору (спіни паралельні B), одночасно електрони зі спінами вниз (спін антипаралельний до B) пересуватимуться на нижчий енергетичний рівень. Тобто відбувається перерозподіл електронів, за рахунок чого електронів з напрямком спіна вниз виявиться більше, ніж електронів зі спінами, напрямленими вгору. Така ситуація призводить до результату, коли густина станів, ефективна маса, рівень Фермі, час транспортування та розподіл провідності є однаковими для обох груп електронів.

Введемо параметр спінової поляризації, s , який рівний нулю за відсутності зовнішнього магнітного поля та 1 при повній поляризації (всі електрони мають спіні, спрямований вниз):

$$S = \frac{n \downarrow - n \uparrow}{n} \quad (3)$$

Густина станів електронів n і хвильова функція Фермі k_0 для спіна електрона вгору та спіна вниз виглядатимуть:

$$\begin{aligned} n \uparrow &= \frac{1-S}{2} n \\ n \downarrow &= \frac{1+S}{2} n \\ k_0 \uparrow &= k_0 / a \\ k_0 \downarrow &= k_0 / b \\ a &= (1-S)^{-1/3} \\ b &= (1+S)^{-1/3} \end{aligned} \quad (4)$$

У цьому випадку питомий опір виражається співвідношенням:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{1}{n \uparrow e^2 \tau \uparrow / m^* \uparrow + n \downarrow e^2 \tau \downarrow / m^* \downarrow} = \\ &= \frac{1}{\frac{n \uparrow e^2 \tau \uparrow (1-\beta \uparrow)}{m} + \frac{n \downarrow e^2 \tau \downarrow (1-\beta \downarrow)}{m}} = (5) \\ &= \frac{m/e^2}{n \uparrow e^2 \tau \uparrow (1-\beta \uparrow) + n \downarrow e^2 \tau \downarrow (1-\beta \downarrow)} \end{aligned}$$

де e – заряд електрона, m – маса електрона, τ – час існування заряду, β – функція енергії взаємодії.

Вираження питомого опору через поляризаційну складову у співвідношенні (6) дозволяє враховувати вплив спінової поляризації на опір кристалу, а саме на магнетоопір. Використовуючи методику, описану в роботі [28], можна отримати теоретичний розрахунок магнетоопору, враховуючи лінійну залежність індукції магнітного поля B від спінової поляризації s за співвідношенням:

$$B = \frac{A(n)^{2/3}}{m_{de} \left(\frac{\chi}{\chi_0} \right)} s, \quad (6)$$

де χ і χ_0 – магнітна сприйнятливості для феромагнітного та антиферомагнітного режимів впорядкування відповідно, n – концентрація носіїв заряду, $A = 2.099879 \times 10^{-11}$ [Тл·м²], m_{de} – густина станів ефективної маси для Фермі-орбіталей $m_{de} = 0.322$.

З результатів, отриманих розрахунками (5, 6), стає можливим прогнозування магнетоопору кристалів, з врахуванням поляризаційних ефектів, які виражатимуться через намагніченість кристалу.

Експериментальні результати дослідження магнетоопору разом з теоретичними передбаченнями для мікрокристалів кремнію з концентрацією домішок бору $N_B = 5 \times 10^{18}$ см⁻³, що безпосередньо відповідає ПМД, показані на рис. 5.

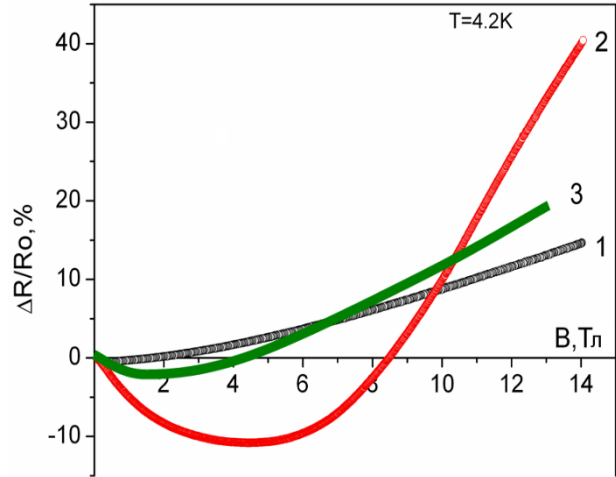


Рис. 5. Залежність магнетоопору ниткоподібних мікрокристалів Si<B, Ni> від індукції магнітного поля, $T=4,2$ K: 1 – крива, що відповідає магнетоопору кристалів без магнітної домішки, 2 – крива, що відповідає магнетоопору кристалів з магнітною домішкою, 3 – теоретична крива, що відповідає магнетоопору кристалів з магнітною домішкою

Результати досліджень кремнію р-типу, легованого бором та нікелем, дозволяють зробити декілька суджень та практичних рекомендацій [29, 30]: 1) дослідження магнітотранспортних характеристик мікрокристалів кремнію, легованих бором та нікелем за низьких температур, можна проводити, використовуючи значно ширший інструментарій, зважаючи на встановлені закономірності квадратичного характеру зв'язку між від'ємним магнетоопором та намагніченістю; 2) коефіцієнт пропорційності між магнетоопором та намагніченістю кристалів зростає, якщо зростає домішкова концентрація, наближаючись до переходу метал-діелектрик, а температура стає нижчою; 3) результати низькотемпературних властивостей мікрокристалів кремнію, легованих бором та нікелем, можуть лягти в основу розроблення надчутливих сенсорів магнітного поля з резистивним принципом дії, в т.ч. багатофункційних.

ВИСНОВКИ

Отже, в результаті низькотемпературних досліджень магнітних та магнітотранспортних властивостей мікрокристалів кремнію, легованих домішками бору та нікелю, було визначено квадратичний характер залежності від'ємного магнетоопору від намагніченості в ниткоподібних мікрокристалічних зразках Si<B, Ni> для значень об'ємної намагніченості M понад 5×10^5 А/м, що пов'язано зі стрибками по двічі



локалізованим домішкाम. Натомість для малих M до 5×10^5 А/м порушується квадратична залежність магнетопору від намагніченості, що, на нашу думку, пов'язано із стрибковим механізмом перенесення носіїв заряду по однозайнятим домішковим рівням. Максимальна величина від'ємного магнетопору для досліджуваних ниткоподібних зразків Si<B, Ni> становить порядку 10%, що відповідає намагніченості зразка, рівній $6,53 \cdot 10^5$ А/м. Встановлено, що основою низькотемпературного переносу носіїв заряду для мікрокристалів кремнію, легованих домішкою бору, до концентрації, відповідної переходу метал-діелектрика та магнітної домішки, є поляризаційна стрибкова провідність.

Проведені дослідження ниткоподібних мікрокристалів Si<B, Ni> вказують на їх перспективність у використанні в якості чутливих елементів сенсорів магнітного поля. Встановлення параболічного зв'язку магнетопору з намагніченістю в ниткоподібних мікрокристалах Si<B, Ni> також дозволяє розширити сферу застосування розбавлених магнетиків на основі кремнію. В перспективі дані матеріали можуть бути використані при розробці надчутливих сенсорів магнітного поля тощо.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] A. Fert, "The present and the future of spintronics", *Thin Solid Films*, Vol.517, pp.2-5, 2008. DOI: [10.1016/j.tsf.2008.08.172](https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.08.172)
- [2] I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma, "Spintronics: Fundamentals and applications", *Rev. Mod. Phys.* Vol.76, p.323, 2004. DOI: [10.1103/RevModPhys.76.323](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.76.323)
- [3] M. W. Wu, J. H. Jiang, and M. Q. Weng, "Spin dynamics in semiconductors", *Physics Reports* 493, pp.61-236, 2010. DOI: [10.1016/j.physrep.2010.04.002](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.04.002)
- [4] A. Kamra, B. Ghosh and T. K. Ghosh, "Spin relaxation due to electron-electron magnetic interaction in high Lande g-factor semiconductors", *J. Appl. Phys.* 108, p. 054505, 2010. DOI: [10.1063/1.3481063](https://doi.org/10.1063/1.3481063)
- [5] D. Sanchez, C. Gould, G. Schmidt and L. W. Molenkamp, "Spin-Polarized Transport in II-VI Magnetic Resonant-Tunneling Devices", *IEEE Trans. Electron Devices* 54, 2007, pp. 984 – 990. DOI: [TED.2007.894373](https://doi.org/10.1109/63.548373)
- [6] H. W. Wu, C. J. Tsai, and L. J. Chen, "Room temperature ferromagnetism in Mn²⁺-implanted Si nanowires", *Appl. Phys. Lett.* 90, p. 043121, 2007. DOI: [10.1063/1.2432273](https://doi.org/10.1063/1.2432273)
- [7] A. A. Druzhinin, I. P. Ostrovskii, Yu. M. Khoverko, Iu. R. Kogut, S. I. Nichkalo, J. K. Warchulska, "Magnetic susceptibility of doped Si nanowhiskers", *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol.12, pp.8690–8693, 2012. DOI: [10.1166/jnn.2012.6804](https://doi.org/10.1166/jnn.2012.6804)
- [8] A. A. Druzhinin, I. P. Ostrovskii, Yu. M. Khoverko, K. Rogacki et al, "Magnetic susceptibility and magnetoresistance of neutron-irradiated doped Si whiskers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 393, pp.310–315, 2015. DOI: [10.1016/j.jmmm.2015.05.073](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.05.073)
- [9] Durgun E., D. Cakir, N. Akman, and S. Ciraci, "Half-metallic silicon nanowires: First-Principles Calculations", *Phys. Rev. Lett.* 99(25), p. 256806, 2007. DOI: [10.1103/PhysRevLett.99.256806](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.256806)
- [10] Anatoly Druzhinin, Igor Ostrovskii, Yuriy Khoverko, Sergiy Yatsukhnenko, "Magnetic properties of doped Si<B,Ni> whiskers for spintronics", *Journal of Nano Research*, Vol. 39, pp. 43–54, 2016. DOI: [10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.39.43)
- [11] Liang Wei-Hua, Ding Xue-Cheng, Chu Li-Zhi, Deng Ze-Chao, Guo Jian-Xin, Wu Zhuan-Hua, Wang Ying-Long, "First-principles study of electronic and optical properties of Ni-doped silicon nanowires", *Acta Phys. Sin.*, Vol. 59, Issue (11): 8071-8077, 2010. URL: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2010/V59/I11/8071>
- [12] Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Chernetskiy M., "Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity", *Nanoscale Research Letters*, Vol. 12:78, pp.1-7, 2017. DOI: [10.1186/s11671-017-1855-9](https://doi.org/10.1186/s11671-017-1855-9)
- [13] D. Ferrand, J. Cibert, A. Wasiela, C. Bourgognon, S. Tatarenko, G. Fishman, T. Andrearczyk, J. Jaroszyski, S. Kole'snik, T. Dietl, et al., "Carrier-induced ferromagnetism in p-Zn1-xMnxTe", *Phys. Rev. B* 63, p. 085201, 2001. DOI: [10.1103/PhysRevB.63.085201](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.63.085201)
- [14] H. Ohno, H. Munekata, T. Penney, S. von Moln'ar, and L. L. Chang, "Magnetotransport properties of p-type (In,Mn)As diluted magnetic III-V semiconductors", *Phys. Rev. Lett.* 68, pp.2664-2667, 1992. DOI: [10.1103/PhysRevLett.68.2664](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.2664)
- [15] S. Patibandla, S. Pramanik, S. Bandyopadhyay and G. C. Tepper, "Spin relaxation in a germanium nanowire", *J. Appl. Phys.* 100, p. 044303, 2006. DOI: [10.1063/1.2230012](https://doi.org/10.1063/1.2230012)
- [16] C. Tahan, R. Joynt, "Rashba spin-orbit coupling and spin relaxation in silicon quantum wells", *Phys. Rev. B* 71, p. 075315, 2005. DOI: [10.1103/PhysRevB.71.075315](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.075315)
- [17] Saroj P. Dash, Sandeep Sharma, Ram S. Patel, Michel P. de Jong & Ron Jansen, "Electrical creation of spin polarization in silicon at room temperature", *Nature* 462, pp. 491–494, 2009. DOI: [10.1038/nature08570](https://doi.org/10.1038/nature08570)
- [18] Druzhinin, I. Ostrovskii, Y. Khoverko, R. Koretskii, "Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 40, pp. 766–771, 2015. DOI: [10.1016/j.mssp.2015.07.015](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.07.015)
- [19] A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, S. Nichkalo, R. Koretskyy, Iu. Kogut, "Variable-range hopping conductance in Si whiskers", *Phys. Status Solidi A* Vol. 211, №2, pp.504–508, 2014. DOI: [10.1002/pssa.201300162](https://doi.org/10.1002/pssa.201300162)
- [20] Druzhinin A.A., I.P. Ostrovskii, Yu.M. Khoverko, N.S. Liakh-Kaguj and Iu.R. Kogut, "Strain effect on magnetoresistance of SiGe solid solution whiskers at low temperatures", *Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 14, № 1, pp.18–22, 2011. DOI: [10.1016/j.mssp.2010.12.012](https://doi.org/10.1016/j.mssp.2010.12.012)
- [21] Toyozawa Y. "Theory of Localized Spins and Negative Magnetoresistance in the Metallic Impurity Conduction", *J. Phys. Soc. Japan* 17, p.986-1004, 1962. DOI: [10.1143/JPSJ.17.986](https://doi.org/10.1143/JPSJ.17.986)
- [22] Sasaki W., "Negative Magnetoresistance in the Impurity Conduction of n-type Germanium," *Journal of Physical Society of Japan*, Vol.30, p.825-833, 1965. DOI: [10.1143/JPSJ.20.825](https://doi.org/10.1143/JPSJ.20.825)
- [23] Matsubara T. and Y. Toyozawa Theory of Impurity Band Conduction in Semiconductors: An Approach to Random Lattice Problem, *Prog. Theoret. Phys.* 26, p. 739, 1961. DOI: [10.1143/PTP.26.739](https://doi.org/10.1143/PTP.26.739)
- [24] B. E. Sernelius, and M. Morling, in "Shallow Impurities in Semiconductors" 1988, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 95, edited by B. Monemar (IOP, Bristol, 1989), p. 555.
- [25] B. E. Sernelius, "Generalized Drude approach to the conductivity relaxation time due to electron-hole collisions in optically excited semiconductors", *Phys.Rev.*B40, p.12438, 1989. DOI: [10.1103/PhysRevB.40.12438](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.40.12438)
- [26] B. E. Sernelius, "Intraband relaxation time in highly excited semiconductors", *Phys.Rev.*B43, p.7136, 1991.



DOI: [10.1103/PhysRevB.43.7136](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.43.7136)

[27] J. M. Ziman, "A theory of the electrical properties of liquid metals. I: The monovalent metals", *Philos. Mag.* 6, p.1013, 1961. DOI: [10.1080/14786436108243361](https://doi.org/10.1080/14786436108243361)

[28] Antonio Ferreira da Silva, Alexandre Levine and Zahra Sadre Momtaz, Henri Boudinovm, Bo E. Sernelius, "Magnetoresistance of doped silicon", *Physical Review B* 91, p.214414, 2015. DOI: [10.1103/PhysRevB.91.214414](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.214414)

[29] A. O. Druzhynin, Yu. M. Khoverko, O. P. Kutrakov, R. M. Koretskyi, S. Yu. Yatsukhnenko "Sensitive element of a two-function magnetic field sensor and microcrystal deformation
Надійшла до редакції 10 травня 2018 р.

Si<B, Ni>" [Chytluvuj element dvofunkcijного sensora magnitного polya ta deformacii na osnovi mikrokrystaliv Si<B,Ni>], *Technology and design in electronic equipment*, no. 3, p. 24–29, 2017. DOI: [10.15222/TKEA2017.3.24](https://doi.org/10.15222/TKEA2017.3.24)

[30] Yatsukhnenko S., A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko, R. Koreckii, "Impedance of boron and nickel doped silicon whiskers", *Journal of Molecular Crystal and Liquid Crystal* 661(1), p.12-19, 2018. DOI: [10.1080/15421406.2018.1460233](https://doi.org/10.1080/15421406.2018.1460233)

УДК 621.315.592

Особенности поверхностной проводимости кремниевых микроструктур при низких температурах

Дружинин А. А., д.т.н. проф., ORCID [0000-0002-4854-3464](https://orcid.org/0000-0002-4854-3464)

e-mail druzh@polynet.lviv.ua

Островский И. П., д.т.н. проф., ORCID [0000-0001-7867-7132](https://orcid.org/0000-0001-7867-7132)

e-mail katerynaostrova@gmail.com

Ховерко Ю. Н., д.т.н. с.н.с., ORCID [0000-0002-7045-2729](https://orcid.org/0000-0002-7045-2729)

e-mail khoverko@lp.edu.ua

Кучерепа Н. И.,

e-mail nazar.kucherepa@rambler.ru

Кафедра полупроводниковой электроники

Национальный университет «Львівська політехніка»

Львов, Украина

Реферат—Исследованы особенности переноса носителей заряда микрокристаллов кремния, легированных бором до концентраций, которые соответствуют переходу металл-диэлектрик, и никелем, что находится в приповерхностной области кристалла. Исследована намагниченность до 0,4 Тл и магнетосопротивление нитевидных микрокристаллов кремния под воздействием магнитных полей до 14 Тл при температуре 4,2 К. Проведен детальный анализ результатов теоретических исследований магнитных и магнитотранспортных свойств Si <B, Ni>. Установлен квадратичный характер зависимости коэффициента отрицательного магнетосопротивления от намагниченности в микрокристаллах кремния для интервала намагниченности больше 5×10^5 А/м, что соответствует прыжковой проводимости носителей заряда по дважды занятым примесным состояниям. Вместе с тем для малых М до 5×10^5 А/м нарушается квадратичная зависимость магнетосопротивления от намагниченности, что связано с прыжковым механизмом переноса носителей заряда по однозаятым примесным уровням. Установлено, что введение магнитной примеси может повлиять на электромагнитные свойства кристалла, связанные с транспортом носителей заряда путем прыжкового туннелирования в приповерхностной зоне.

Библ. 30, рис. 5, табл. 1.

Ключевые слова — прыжковая проводимость; микрокристалл; отрицательное магнетосопротивление; спин; криогенные температуры

UDC 621.315.592



Features of the Surface Conductivity of Silicon Microstructures at Low Temperatures

A. A. Druzhinin, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0002-4854-3464](https://orcid.org/0000-0002-4854-3464)

e-mail druzh@polynet.lviv.ua

I. P. Ostrovskii, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0001-7867-7132](https://orcid.org/0000-0001-7867-7132)

e-mail katerynaostrova@gmail.com

Yu. N. Khoverko, Dr.Sc.(Eng.) Senior Research Fellow, ORCID [0000-0002-7045-2729](https://orcid.org/0000-0002-7045-2729)

e-mail khoverko@lp.edu.ua

N. I. Kucherepa,

e-mail nazar.kucherepa@rambler.ru

Department of Semiconductor electronics

Lviv Polytechnic National University

Lviv, Ukraine

Abstract—Research in the field of magnetoelectronics opens up the possibility of creating sensitive sensors of a magnetic field based on deluted semiconductors. On the other hand, the performance of devices in difficult operating conditions, namely at cryogenic temperatures, including the temperatures of liquefied helium, is no less difficult and an important problem. In this work, considerable attention is paid to establishing the relationship between magnetic and magneto-transport properties of silicon microcrystals doped by boron to concentrations in the vicinity of the metal-dielectric phase transition, which is important in the development of magnetic field sensors, spin valves, etc. The peculiarities of transferring charge carriers of silicon microcrystals to doped boron to concentrations corresponding to the transition of metal-dielectric and nickel, located in the near-surface area of the crystal, are investigated. The magnetization of up to 0,4 T and the magnetoresistance of filamentous microcrystals of silicon under the action of magnetic fields up to 14 T for temperatures of 4.2 K were studied. A detailed analysis of the results of theoretical studies of magnetic and magnetic transport properties Si <B, Ni> was carried out. The quadratic nature of the dependence of the negative magnetoresistance on the magnetization in silicon microcrystals is established for the magnetization exceeding $5 \cdot 10^5$ A / m. However, for small M up to $5 \cdot 10^5$ A/m, the quadratic dependence of the magnetoresistance on the magnetization is violated, which is connected with the hopping mechanism of carrier transport over one occupied impurity levels. The coefficient of proportionality between the magnetoresistance and the magnetization of the crystals increases if the impurity concentration increases, approaching the transition of the metal-dielectric, and the temperature becomes lower. The maximum value of the negative magnetoresistance coefficient for the investigated filamentary samples Si <B, Ni> is about 10%, corresponding to the magnetization of the sample, equal to $6.53 \cdot 10^5$ A/m. It was established that the basis of the low-temperature transfer of charge carriers for silicon microcrystals doped by a boron impurity to the concentration corresponding to the transition of a metal dielectric and a magnetic impurity is the polarization hopping conductivity. The large magnitudes of the negative magnetoresistance correspond to the hopping conductivity of charge carriers by twice occupied admixture states. It was established that the introduction of a magnetic impurity could affect the electromagnetic properties of the crystal associated with the transport of charge carriers by hopping tunneling in the near-surface zone. The results of low-temperature properties of silicon microcrystals doped with boron and nickel can form the basis of the development of sensitive sensors of a magnetic field with a thermoresistive principle of operation, including multifunctional sensors.

Ref. 30, fig. 5, tabl. 1.

Keywords — hopping conductance; whiskers; negative magnetoresistance; spin; cryogenic temperatures

