



ВИКОРИСТАННЯ МІКРОКРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ, ЛЕГОВАНИХ БОРОМ ТА НІКЕЛЕМ, У СЕНСОРНІЙ ТЕХНІЦІ

А. Дружинін, І. Островський, Ю. Ховерко, Н. Лях-Кагуй

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Анатолій Дружинін (e-mail: anatolii.o.druzhinin@lpnu.ua)

(Подано 26 липня 2022)

Досліджено особливості перенесення носіїв заряду в мікрочастинках кремнію, легованих бором до концентрації, що відповідає переходу метал-діелектрик, а також модифікованих домішкою перехідного металу із незаповненою $3d^+$ оболонкою локального магнітного моменту. Досліджено магнітоопір мікрочастинків під дією магнітних полів до 14 Тл за криогенних температур. Детально проаналізовано результати досліджень магнітотранспортних властивостей кристалів. Встановлено, що низькотемпературний транспорт носіїв заряду у мікрочастинках кремнію зумовлений стрибковою поляризаційною провідністю. Відповідно до результатів досліджень намагніченості ниткоподібних кристалів Si <B, Ni> визначено концентрацію магнітних центрів, яка становить $4 \times 10^{17} \text{см}^{-3}$. Запропоновано використання мікрочастинків кремнію у сенсорах магнітного поля з магніторезистивним принципом дії.

Ключові слова: кремній; мікрочастинка; криогенні температури; нікель; поляризаційна стрибкова провідність; намагніченість; магнітоопір.

УДК 621.315.592

1. Вступ

Швидкий розвиток магнітоелектроніки сьогодні визначається такими перевагами гальвано-магнітних пристроїв, як можливість повної електричної розв'язки вхідних та вихідних каскадів щодо безконтактного перетворення на електричні сигнали малих механічних переміщень, детектування значень і напрямку індукції магнітного поля із високою локальністю, а також створення механічних комутаторів, які “не іскрять” у електричних колах, безконтактного вимірювання їх електричних струмів. Перевагою приладів спітроніки є їх висока швидкодія, яка може досягатися завдяки тому, що не потрібно перемішувати у просторі заряд та пов'язану із ним масу. Достатньо тільки розвернути спін у зворотному напрямку, щоб перемкнути стан [1–3].

Особливо значущими для сучасної магнітоелектроніки є нанотехнології, що дають змогу практично реалізувати нові досягнення у галузі нанофізики. Аспектами актуального і можливого практичного застосування мікрочастинків є ефект пам'яті форми, ефект Кондо, спіновий ефект Зеебека та магнетокалоричний ефект, надпровідність і квантово-спіновий ефект Холла, магнітна анізотропія, спінова калоритроніка, передавання спіново-оберткового моменту та інжекція спіно-поляризованих електронів, важкі ферміони, гігантський і тунельний магнітоопір, наявні у топологічних діелектриках, магнітних напівпровідниках і скомпенсованих ферромагнетиках.

2. Аналіз та постановка завдання

Як відомо, ниткоподібні кристали у зінтегрованій техніці посідають вагоме місце щодо виготовлення на їх основі пристроїв та приладів мікро- і наносистемної техніки [4–9]. Коли йдеться про виготовлення сенсорів для використання в області низьких температур, то необхідно враховувати, що електрофізичні властивості напівпровідників визначаються як ступенем легування, так і типом легуючої домішки [10], ступенем компенсації [11] і мірою наближення до переходу метал-діелектрик [12], що визначає їх застосування у мікросистемній техніці. Це викликає необхідність вивчення електропровідності напівпровідників, зумовленої впливом поведінки легуючої домішки від температури за сильної спін-орбітальної взаємодії. Інструментом для таких досліджень є вивчення магнітоопору ниткоподібних кристалів Si, легованих магнітною домішкою, що дає змогу вивчити характеристики їх провідності за криогенних температур і вплив різноманітних зовнішніх факторів на їх поведінку та дослідити умови легування ниткоподібних кристалів із метою створення на їх базі сенсорів, дієздатних у сильних магнітних полях.

Отже, метою роботи є встановлення закономірностей зміни характеристик мікрокристалів завдяки дослідженню магнітоопору за постійного і змінного струмів у широкому діапазоні температур, щоб оцінити параметри низькотемпературного транспортування носіїв заряду для застосування у пристроях та приладах мікро- і наносистемної техніки.

3. Методика експерименту

Відомо [9, 11], що струмоперенесення реалізується у тонкому приповерхневому шарі кристала. В цьому випадку оцінка профілю розподілу домішки нікелю набуває важливого значення, оскільки прямо впливає на технологічні параметри формування структури кристала, а відтак, і на електрофізичні параметри кристалів. Розрахунок кількісного профілю домішки нікелю з температурою відбувався згідно із співвідношенням [13, 14]:

$$N = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-x^2/4Dt}, \quad (1)$$

де Q – загальна кількість нікелю, тобто доза легування [11]; t – час дифузії; D – коефіцієнт дифузії домішки нікелю за заданої температури. Розподіл домішки нікелю, який визначається часом дифузії в приповерхневу область кристала, є гауссівським. Домішку нікелю впроваджували за рахунок низькотемпературної дифузії (до 800 °C), попередньо осадивши плівку нікелю на вирощений кристал методом електрохімічного нанесення. Суть методу полягає у зануренні торців кристала у водний розчин електроліту, головним компонентом якого є солі або інші розчинні сполуки – металопокриття.

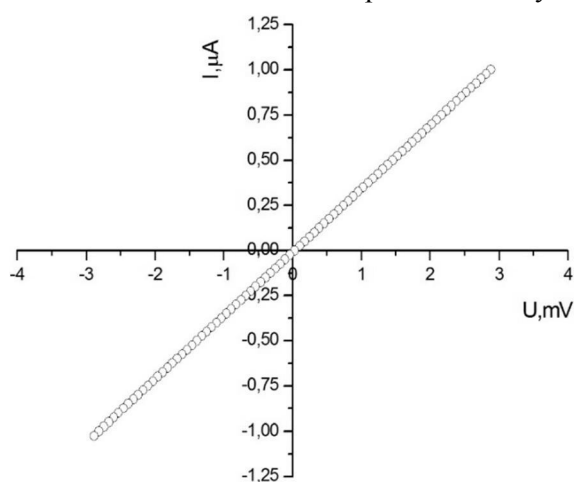


Рис. 1. Вольт-амперні характеристики мікрокристалів Si (B, Ni) за температури рідкого гелію

Таким методом легко контролювати загальну кількість металу, тобто дозу легування для подальших процесів дифузії, урахувавши, що вся кількість нікелю, розчиненого в електроліті, осідає на поверхні кристала. Окрім того, можна припустити, що відпал, здійснений надалі за $T = 560$ °С, дав змогу атомам нікелю дифундувати в глибину кристала у заданих місцях, створивши профільні зони цієї домішки, що дало можливість створити омичні контакти в товщині кристала. Крім цього, ці зони в магнітному полі можуть поляризувати носії заряду довкола. Як результат дослідження на рис. 1 наведено вольт-амперні характеристики кристалів Si (B, Ni) за температури 4,2 К.

Процеси дифузії відбувались за стандартними технологічними умовами, які передбачали різний час дифузії нікелю в товщу кристала (30 хв, 15 хв, 5 хв).

Завдяки оже-спектроскопії контролювали параметри дифузії, що передбачала витравлення поверхневого Ag⁺ шару і поетапний аналіз вмісту домішки нікелю. На рис. 2 подано результати описаних експериментальних досліджень (крива 1).

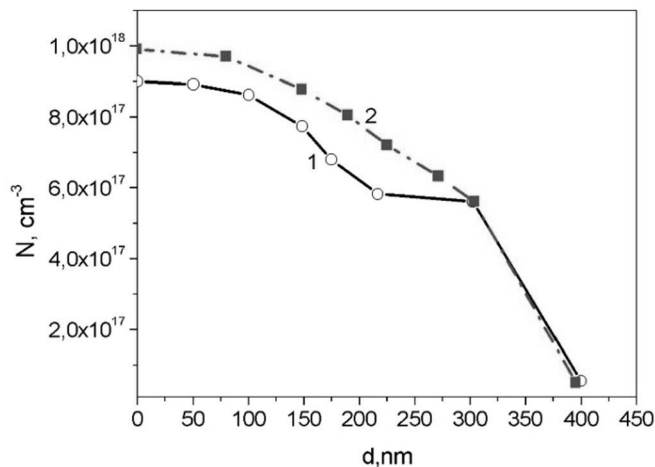


Рис. 2. Розподіл домішки Ni з глибиною у товщині кристала кремнію:
1 – результати експериментальних даних, 2 – теоретичні оцінки

Крива 2 рис. 2 відображає залежність від глибини введеної у товщу кристала кількості домішки нікелю відповідно до попередніх теоретичних оцінок. Як бачимо, досягнуто непоганої збіжності для глибин понад 150 нм.

4. Результати досліджень магнітотранспортних характеристик мікрочисталів Si (B, Ni) за низьких температур

Результати магнітотранспортних досліджень магнітоопору кристалів Si <B,Ni> вказують на те, що домінує внесок магнітної домішки у низькотемпературні характеристики зразків. Це проявляється в особливостях від'ємного та аномального позитивного магнітоопору кристалів із концентрацією легуючої домішки $N_B = 5 \times 10^{18}$ см⁻³ (рис. 3) [15].

Детальніше вивчення стрибка магнітоопору показало, що в ниткоподібних кристалах спостерігається гістерезис магнітоопору. Гістерезис проявляється в інтервалі низьких температур, де відзначається стрибова провідність у домішковій зоні [10, 16]. Очевидно, гістерезис магнітоопору пов'язаний із внеском у провідність носіїв заряду, локалізованих на домішці.

Явище гістерезису магнітоопору спостерігали в інтервалі слабких магнітних полів і гелієвих температур для мікрочисталів Si з $\rho_{300\text{K}} = 0,0095$ Ом×см за гелієвих температур (рис. 4).

Наведені особливості зумовлені поляризаційними процесами у тонких областях мікрочистала на поверхні, де наявні домішки перехідних металів. Низькотемпературне транспортування носіїв заряду пов'язане із процесами поляризації, що підтверджують результати досліджень намагніченості ниткоподібних кристалів Si<B, Ni>.

Для нанокристалів кремнію результати дослідження магнітних властивостей методом Фарадея [12] наведено на рис. 3.

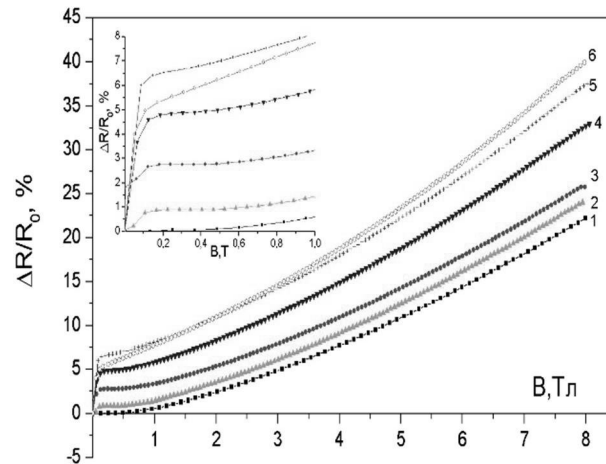


Рис. 3. Зміна магнітоопору легованих мікрокристалів кремнію за різних температур (К): 1,7 (1); 4,2 (2); 13 (3); 29 (4); 42 (5); 56 (6)

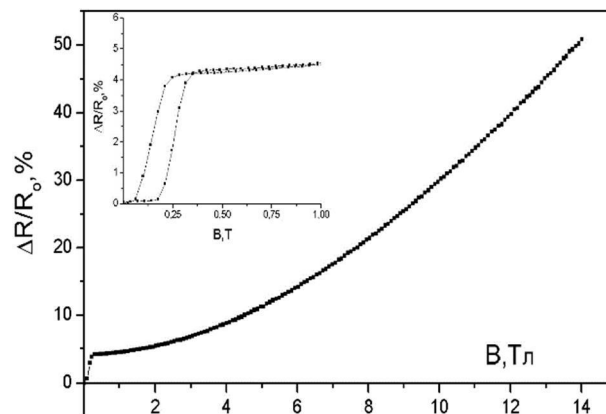


Рис. 4. Гістерезис магнітоопору ниткоподібних кристалів кремнію за гелієвих температур

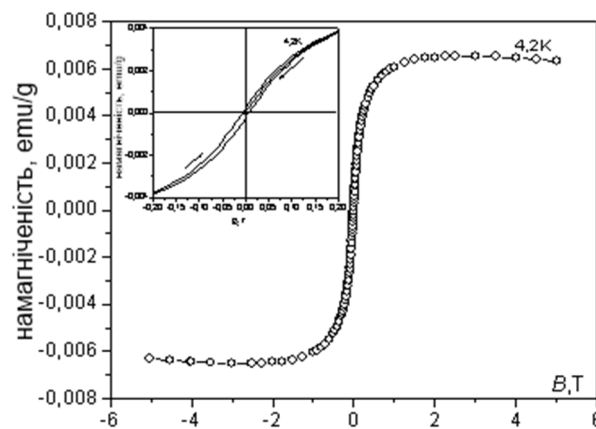


Рис. 5. Намагніченість мікрокристалів Si<B, Ni> із концентрацією легуючої домішки $NB = 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Вставка: гістерезис їх намагніченості за $T = 4,2 \text{ K}$

Із рис. 5 видно, що у полях до 6 Тл відбувається стрибкоподібна зміна поздовжнього магнітного моменту, а у магнітних полях до 0,5 Тл спостерігається гістерезис намагніченості, зумовлений переорієнтацією спінів носіїв за полем у разі зміни знака, що проявляється незбігом зворотної та прямої гілок намагніченості (рис. 5, вставка).

5. Обговорення результатів досліджень

Детальний аналіз процесів, які відбуваються в області низьких температур, виконали автори [10, 12]. В умовах стрибкової провідності магнітотранспортні властивості кристалів істотно змінюються через внесення домішок перехідних металів, бо такі домішки не беруть участь у струмоперенесенні [16, 17]. Варто оцінити кількості такої домішки, вважаючи її пастковими центрами за умов змінного струму.

У стрибкоподібній провідності можна виділити різні характерні діапазони частот. За край низьких і низьких частот провідність практично стала, як і діапазон частот, за якого провідність зростає із частотою. Також є діапазон, коли у височастотній ділянці провідність насичується і починає зменшуватись до нуля зі збільшенням частоти. На кінцевому етапі провідність виражається формулою Поллака [18]:

$$\sigma_{ac}(\omega) = \frac{1}{3} \pi e^2 k T [N(E_F)]^2 \alpha^{-5} \omega \left[\ln\left(\frac{v_{ph}}{\omega}\right) \right]^4, \quad (2)$$

де e – заряд електрона; $N(E_F)$ – густина станів на рівні Фермі; v_{ph} – фононна частота; σ , ω , T – дані взято за результатами вимірювань на змінному струмі [19]; α – стала спаду хвильової функції локалізованого носія (розрахована на підставі вимірювань на постійному струмі [20]).

Відповідно до експериментальних даних частотної залежності провідності кристалів Si(B, Ni) [19] оцінимо, якою є середня довжина стрибка R :

$$R = \frac{1}{2\alpha} \ln\left(\frac{v_{ph}}{\omega}\right). \quad (3)$$

Використовуючи частотну залежність провідності напівпровідника та отримані експериментальні результати для кристалів Si р-типу провідності, ми розрахували середню довжину стрибка та концентрацію акцепторної домішки у кристалах. Ці розрахунки, необхідні для оцінки глибини пасткових центрів у околі рівня Фермі, виконано за даними імпедансної спектроскопії відповідно до співвідношення:

$$\Delta E = \frac{3}{2} \pi R^3 N_F. \quad (4)$$

За експериментальними даними намагніченості можна розрахувати концентрацію домішки нікелю (рис. 5), врахувавши, що насичення намагніченості використано для оцінювання концентрації магнітних домішок за виразом:

$$M_s = g \mu_B N^{Ni}, \quad (5)$$

де g – g -фактор Ланде, що приблизно дорівнює 2,0 для кремнієвих кристалів [20]; μ_B – магнетон Бора; N^{Ni} – концентрація магнітних домішок.

Враховуючи дані намагніченості мікрочисталів Si (рис. 3), оцінили вміст магнітної домішки $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Отримано хорошу відповідність між даними імпедансу та намагніченості. Аналіз результатів дослідження дав змогу визначити ефективну глибину поверхневого шару мікрочисталів кремнію, де спостерігається транспорт носіїв заряду. Врахувавши дифузійний профіль (рис. 2) та значення концентрації домішки нікелю завдяки вимірюванню імпедансу [22], а також за намагніченістю мікрочисталів, одержали ефективну глибину прошарку близько 300 нм [12].

Результати дослідження низькотемпературних характеристик для мікрочисталів Si, легуваних домішками бору і нікелю за температури 4,2 К, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

***Розраховані параметри досліджуваних кристалів [10, 11, 19, 20]**

| $\rho_{300\text{ K}},$ $\Omega \times \text{см}$ | $N(E_F),$ $\text{eB} \times \text{см}^{-3}$ | R_{hop} нм | N^{Ni} см^{-3} | E_{Ni} меВ | $a_{\text{DC}},$ нм | $a_{\text{AC}},$ нм | $E_{\text{DC}},$ меВ | $E_{\text{AC}},$ меВ |
|---|--|------------------------|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0,0125 | $9,8 \times 10^{17}$ | 5,8–6,5 | 4×10^{17} | 210 | 5,8 | 18 | 1,16 | 2,6 |

* $\rho_{300\text{ K}}$ – питомий опір Si-зразка; $N(E_F)$ – густина станів на рівні Фермі; R_{hop} – довжина стрибка носіїв; N^{Ni} – кількість пасткових центрів; E_{Ni} – глибина залягання домішки Ni; a – радіус локалізації носіїв за постійного і змінного струмів, відповідно; E_{DC} – енергія активації носіїв, оцінена за експериментальними даними за постійного струму; E_{AC} – енергія активації носіїв, оцінена за експериментальними даними за змінного струму.

6. Розроблення низькотемпературних сенсорів магнітного поля із магніторезистивним принципом дії на основі мікрокристалів Si<B, Ni >

Чутливий елемент, створений на базі анізотропних магніторезисторів, відомий як чутливий елемент магнітного сенсора, який, зазвичай, осаджений пермалосом (чи іншим сплавом перехідних металів) на пластині кремнію, що утворюють міст Уітстона. Використавши ефект анізотропного магнітоопору, забезпечують умову, коли феромагнетик-плівка поводить себе як єдиний домен, що за дії зовнішнього магнітного поля обертається навколо своєї осі. Магніточутливу плівку наносять під потрібним кутом до напрямку поширення струму, що дає змогу фіксувати зміни зовнішнього магнітного поля за рахунок принципу різниці кута між прикладеним полем і кутом нанесеної плівки. Потрібно врахувати, що за такої побудови конструкції зміни у вимірювальних параметрах будуть інерційнішими порівняно із сенсорами, створеними на основі одного кристала. За підвищення магнітного поля відбувається намагнічення плівки і спін-орбітальне розсіювання електронів, яке приведе до збільшення опору кристала. Описаний чутливий елемент може виміряти значення магнітного поля у прямому та зворотному напрямках, але він чутливий до деформаційних та температурних напружень [21].

Чутливі елементи сенсорів магнітного поля, створені на основі ефекту анізотропного магнітоопору, мають кілька переваг порівняно із сенсорами інших типів: точність статичних вимірювань висока, а значення споживаної потужності невелике, низька собівартість виготовлення і простота їх конструкції. У такі конструкції можуть бути вбудовані додаткові елементи, стабілізаційні ланки і схеми АЦП, що дасть змогу підвищити ефективність використання приладу.

Варто зауважити, що використання мостової схеми як чутливого елемента ускладнить калібрування сенсора, виникне необхідність розрахунку констант поправок до кожного магніторезистора. Крім цього, щоб усунути термічні напруження, необхідно буде використати схеми термостабілізації. Для застосування за високих температур доводиться застосовувати підсилювачі. За температури рідкого гелію магнітоопір чутливого елемента мало залежить від індукції магнітного поля, що не дає змоги забезпечити стабільності параметрів, а, відповідно, і точності вимірювання магнітного поля за низьких температур [22].

Гетероструктури, які складаються із почергово нанесених магнітних, напівмагнітних і немагнітних матеріалів, перспективніші щодо конструктивно-технологічного принципу дії. Найпростіший приклад такої структури – це напівмагнітний матеріал, який містить перший контакт, потім немагнітний прошарок, далі магнітний матеріал і другий контакт. Спіни електронів у області першого контакту не мають чіткого спрямування за відсутності магнітного поля, однак за дії зовнішнього магнітного поля електрони поляризуються у цій області й відбувається інжекція у немагнітну область. Як результат, у немагнітному прошарку з'явиться спінполяризований канал для перенесення носіїв зарядів, що зафіксується на другому контакті. Використання цієї методики з метою вимірювання значення магнітного поля за температури 4,2 К дало можливість отримати чутливість зміни опору 120 % у полях до 4 Тл [23].

Однак застосування цієї конструкції чутливого елемента сенсора магнітного поля потребує виконання складних технологічних умов, щоб створити інтегровані гетероструктури. Залежності магнітоопору для чутливого елемента, які ми отримали, нелінійні, а за індукції магнітного поля 3–4 Тл відбувається магнітне насичення структури, після чого спостерігається слабка магнітна залежність сенсора.

Найвдаліше технічне рішення – використання чутливого елемента мікроелектронного сенсора з метою вимірювання значення індукції магнітного поля на базі ниткоподібних мікрочисталів кремнію, легованих під час росту домішкою перехідних металів (нікелем). Це реалізується додаванням їх в ампулу під час росту кристалів, відповідно до методу пара – рідина – кристал (ПРК). Крім транспортної домішки бору, додають також домішки нікелю (перехідних металів), що формують напівмагнітний шар, який і є областю поляризації носіїв заряду, що впливатиме на їх транспорт за дії зовнішнього магнітного поля [24].

Однак у зв'язку із неконтрольованістю входження домішки у кристал одержати точні значення рівня легування доволі важко, що впливатиме на вихідні характеристики створеного чутливого елемента мікроелектронного сенсора магнітного поля, рівень легування якого відповідає інтервалу $(4-5) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

На рис. 6 наведено вихідну характеристику за температури 4,2 К чутливого елемента мікроелектронного сенсора, створеного на базі ниткоподібного кристала кремнію, легованого до рівня $(4-5) \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ поблизу переходу метал-діелектрик із діелектричного боку, призначеного для вимірювання магнітного поля до 14 Тл. Оскільки концентрація легуючої домішки бору відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик, це зумовлює виникнення від'ємного магнітоопору, який впливає на вихідні характеристики мікроелектронного сенсора (рис. 6). На особливу увагу заслуговує використання мікроелектронного сенсора для вимірювання магнітного поля за криогенних температур, зокрема, аж до температури рідкого гелію.

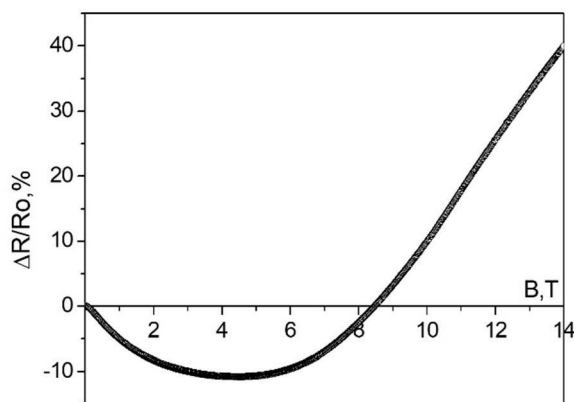


Рис. 6. Вихідна характеристика чутливого елемента сенсора магнітного поля за температури 4,2 К

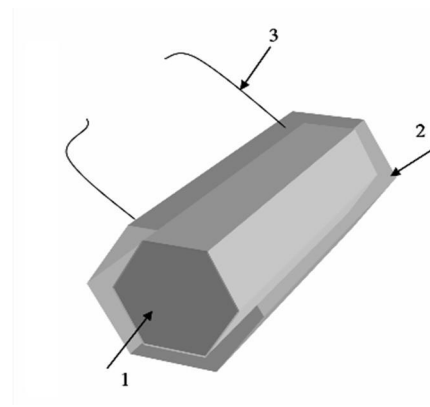


Рис. 7. Конструкція чутливого елемента сенсора магнітного поля (схема): 1 – ядро кристала, 2 – нанопориста оболонка, 3 – струмовиводи

Створюючи чутливий елемент сенсора магнітного поля на основі мікрочисталів кремнію, їх легують домішкою бору до концентрації $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, відповідно до методу пара – рідина – кристал. Далі відбувається утворення магнітного прошарку під час електрохімічного осадження на поверхню кристала півки нікелю і його подальшої низькотемпературної дифузії вглиб кристала. Щоб зафіксувати зміну магнітного поля, чутливим елементом мікроелектронного сенсора реєструють зміну значення струму між першим і другим контактами, які розміщені на торцях мікрочистала відповідно до конструкції. Зі збільшенням величини магнітного поля опір кристала зростає лінійно. Зауважимо, що навіть за незначної зміни індукції магнітного поля опір кристала істотно змінюється. Вирощування кристалів кремнію методом ПРК дає змогу створити високоточні чутливі елементи сенсора магнітного поля, що дієздатні за температури рідкого гелію та в сильних

магнітних полях до 14 Тл. Можлива також інтеграція чутливих елементів мікроелектронних сенсорів зі схемами опрацювання інформації, їх вартість низька.

У результаті дослідження впливу магнітного поля виявлено, що запропоновані чутливі елементи мікроелектронних сенсорів характеризуються високою чутливістю до магнітного поля, малу інерційність і високу швидкодію забезпечує простота їх конструкції. На рис. 7 схематично зображено конструкцію чутливого елемента сенсора магнітного поля, створеного на основі мікрочастини кремнію з концентрацією легуючої домішки в околі переходу метал – діелектрик $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, а на рис. 8 наведено його вихідну характеристику за температури 4,2 К.

Чутливий елемент сенсора магнітного поля складається із мікрочастини кремнію (1), двох омичних контактів (3) на торцях частини кристала. Запропонований мікроелектронний сенсор на основі цього чутливого елемента працює так. Між контактами (3) частини кристала протікає початковий струм, коли на них подається напруга. Прикладене зовнішнє магнітне поле впливатиме на поляризацію поверхневого шару нікелю (2), як результат, відбудеться зміна провідності в мікрочастині (1). Завдяки вдосконаленню, реалізованому в корисній моделі, уможливилось підвищення верхньої межі лінійного опору залежно від значення індукції магнітного поля в інтервалі 0–14 Тл і досягнення відносної зміни магнітоопору 260 % (рис. 8), яке відповідає значенню чутливості близько 18 %/Тл.

Отже, використання технології ПРК для вирощування мікрочастин кремнію із концентрацією легуючої домішки бору $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ та подальшим електрохімічним нанесенням напівмагнітного прошарку нікелю дало змогу істотно підвищити чутливість і розширити діапазон вимірювання магнітних полів за температури рідкого гелію.

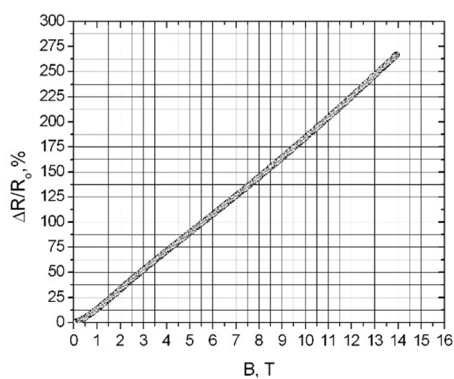


Рис. 8. Вихідна характеристика за температури 4,2 К мікроелектронного сенсора магнітного поля, створеного на основі мікрочастини кремнію, з концентрацією легуючої домішки в околі переходу метал – діелектрик $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$



Рис. 9. Вигляд мікроелектронного сенсора для вимірювання магнітного поля із магніторезистивним принципом дії

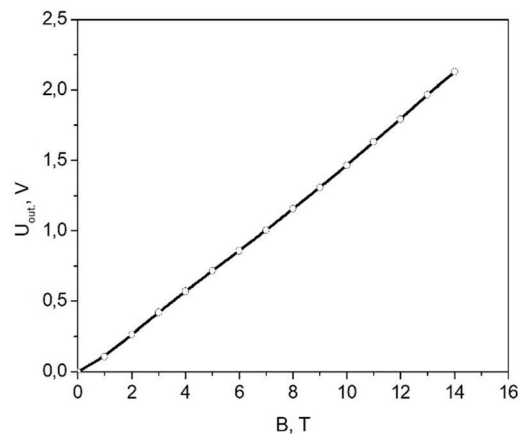


Рис. 10. Уніфікована вихідна характеристика мікроелектронного сенсора для вимірювання магнітного поля

Використання кристалів кремнію, легованих домішками бору та нікелю, дає змогу створити високоточні чутливі елементи сенсорів для вимірювання магнітного поля, дієздатні за температури рідкого гелію та в полях до 14 Тл, із можливістю їх інтеграції зі схемою оброблення інформації та забезпечити їх низьку вартість. У результаті дослідження впливу магнітних полів встановлено, що у запропонованих чутливих елементів мікроелектронних сенсорів надзвичайно висока чутливість до магнітного поля (рис. 8), а малу інерційність і високу швидкодію забезпечує простота їх конструкції [25]. На рис. 9 наведено фотографію вигляду мікроелектронного сенсора для вимірювання магнітного поля із магніторезистивним принципом дії, а на рис. 10 – уніфіковану вихідну характеристику цього сенсора. Дієздатність таких сенсорів обмежується інтервалом криогенних температур (температурою рідкого гелію) та магнітними полями до 14 Тл із чутливістю близько 5 мТл.

Висновки

За результатами досліджень магнітоопору та намагніченості мікрокристалів кремнію, легованих домішкою бору до концентрацій в околі переходу метал – діелектрик та модифікованих домішкою перехідного металу нікелю, виявлено, що низькотемпературний транспорт носіїв заряду для таких кристалів оснований на стрибковій поляризаційній провідності. Результати дослідження намагніченості мікрокристалів Si<B, Ni> дали змогу оцінити концентрацію магнітних домішок, що дорівнює $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Запропоновано елементи мікросистемної техніки у вигляді сенсорів магнітного поля з магніторезистивним принципом дії, працездатних за низьких температур у магнітних полях до 14 Тл.

Список використаних джерел

- [1] Puja Dey, Jitendra Nath Roy (2021). *Spintronics: Fundamentals and Applications*, Sprin. Nature, 273 p.
- [2] Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Prejbeanu I.-L., Diény B., Pirro P., Hillebrands B. (2020), *Review on spintronics: Principles and device applications*, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 509, 166711.
- [3] Jansen R. (2012), *Silicon spintronics*, *Nature Materials*, Vol. 11, pp. 400–408.
- [4] Peng K.Q., Zhu J. (2003), *Simultaneous gold deposition and formation of silicon nanowire arrays*, *Journal of electroanalytical chemistry*, Vol. 558, pp. 35–39.
- [5] Vazquez M., Chiriac H., Zhukov A., Panina L. and Uchiyama T. (2011), “On the state-of-the-art in magnetic microwires and expected trends for scientific and techn. studies”, *Phys. Stat. Sol.*, Vol. A208, pp. 493–501.
- [6] Vazquez M. (2007), “Advanced magnetic microwires”. *Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*, ed. H. Kronmüller and S. S. K. Parkin (Wiley, West Sussex, England, 2007), Vol. 4, pp. 2193–221.
- [7] Zhukov A. and V. Zhukova (2009), “Magnetic Properties and Applications of Ferromagnetic Microwires with Amorphous and Nanocrystalline Structure” (Nova Sc. Pub., Inc., Hauppauge, NY), Vol. 162, p. 11788.
- [8] Olivera J., Gonzalez M., Fuente J. V., Varga R., Zhukov A. and Anaya J. J. (2014), “An Embedded Stress Sensor for Concrete SHM Based on Amorphous Ferromagnetic Microwires,” *Sensors*, Vol. 14, pp. 19963–78.
- [9] Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoferko Y., Koretskii R. (2015), *Strain-induced effects in p-type Si whiskers at low temperatures // Materials Science in Semiconductor Processing*, Vol. 40, pp. 766–77.
- [10] Druzhinin Anatoly, Ostrovskii Igor, Khoferko Yuriy, Yatsukhnenko Sergij (2016), “Magnetic properties of doped Si<B,Ni> whiskers for spintronics”, *Journal of Nano Research*, Vol. 39, pp. 43–54.
- [11] Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoferko Yu., Chernetskiy M. (2017), “Nanoscale conductive channels in silicon whiskers with nickel impurity”, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 12:78, pp. 1–7.
- [12] Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoferko Yu., Shcherban N., Lukianchenko A. (2019), *Spin-related phenomena in nanoscale Si <B, Ni> whiskers // Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 473, pp. 331–334.
- [13] Maojin D., Zhaoyang C., Yanwei F., Junhua W., Mingde T., Xiuyun C., “NTC and electrical properties of nickel and gold doped n-type silicon material”, *Journal of Semiconductors*, Vol. 30(8) pp. 083007-1–083007-4.
- [14] Liang Wei-Hua, Ding Xue-Cheng, Chu Li-Zhi, Deng Ze-Chao, Guo Jian-Xin, Wu Zhuan-Hua, Wang Ying-Long (2010), “First-principles study of electronic and optical properties of Ni-doped silicon nanowires”, *Acta Phys. Sin.*, Vol. 59, Is. (11): 8071–8077.

- [15] Druzhinin A. A., Ostrovskii I. P., Khoverko Yu. M., Rogacki K. et al. (2015), "Magnetic susceptibility and magnetoresistance of neutron-irradiated doped Si whiskers", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 393, pp. 310–315.
- [16] Pertermann E., Lutz J., Felsl H. P., Basler T., Schulze H.-J. and Niedernostheide F.-J., "Detection of Deep Energy Levels in Semiconductors Using Frequency-Resolved Impedance Spectroscopy", *International Seminar On Power Semiconductors, At Prague, Vol.: 12*.
- [17] Liang Wei-Hua, Ding Xue-Cheng, Chu Li-Zhi, Deng Ze-Chao, Guo Jian-Xin, Wu Zhuan-Hua, Wang Ying-Long (2010), "First-principles study of electronic and optical properties of Ni-doped silicon nanowires", *Acta Phys. Sin.*, Vol. 59, Is. (11): 8071-8077.
- [18] Pollak M., Geballe T. H. (1961), *Phys. Rev.* 122, 1742.
- [19] Yatsukhnenko S., Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Koretskiy R., "Impedance of boron and nickel doped silicon whiskers", *Journal of Molecular Crystal and Liquid Crystal*, Vol. 661, Is. 1, pp. 12–19.
- [20] Druzhinin A., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Nichkalo S., Koretskiy R., Kogut Iu. (2014), "Variable-range hopping conductance in Si whiskers", *Phys. Status Solidi A*, Vol. 211, No. 2, pp. 504–508.
- [21] Howard Mason (2003), "Basic Introduction to the use of Magnetoresistive Sensors"; pp. 1–20, *Application Note 37, Is. 1, Zetex Semiconductors*.
- [22] Michael J. Haji-Sheik (2008), *Commercial Magnetic Sensors (Hall and Anisotropic Magnetoresistors). Sensors*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 23–43.
- [23] Schmidt G., Molenkamp L. (2004). *Semiconductor element having a semi-magnetic contact. US Patent App. Pub. US 2004/0113188 A1. Jun. 17.*
- [24] Патент на корисну модель № 120820 Україна, МПК H01L 29/82. Чутливий елемент мікроелектронного сенсора для вимірювання магнітного поля / Дружинін А. О., Ховерко Ю. М., Яцухненко С. Ю.; Національний університет "Львівська політехніка" – № и 201702800; заявл. 27.03.2017, опублік. 27.11.2017, Бюл. № 22. 4 с.
- [25] Ховерко Ю. М., Щербань Н. О. Патент України № 135822 від 25.07.2019. Чутливий елемент мікроелектронного сенсора для вимірювання магнітного поля. Заявка на видачу патента U201812880 від 18.01.2019. Бюл. № 14. 4 с.

USING OF MICROCRYSTALS OF SILICON DOPED WITH BORON AND NICKEL IN SENSOR TECHNIQUES

A. Druzhinin, I. Ostrovskii, Yu. Hoverko, N. Liakh-Kaguy

¹ Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

The paper is devoted to study of the charge carrier transfer characteristics in the silicon microcrystals doped by boron to concentrations corresponding to the metal-dielectric transition, as well as modified by a transition metal admixture with an unfilled 3d+ shell of the local magnetic moment. The magnetoresistance of microcrystals under the magnetic field action to 14 T at the cryogenic temperatures was studied. A detailed analysis of the results of studies of magneto-transport properties of crystals was carried out. It was found that the low-temperature transport of charge carriers for silicon microcrystals is based on hopping polarization conduction. Based on the results of the magnetization study of Si <B, Ni> crystals, the concentration of magnetic centers was determined, which is $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. The use of silicon microcrystals in magnetic field sensors with the magnetoresistive principle of operation is proposed

Key words: silicon; microcrystal; cryogenic temperatures; nickel; polarization hopping conductivity; magnetization; magnetoresistance.