ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 4, № 4 (2003) С. 720-728

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 4, № 4 (2003) P. 720-728

УДК 621.315.592

ISSN 1729-4428

А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, О.П. Кутраков, І.В. Павловський

Вплив деформації на домішкову провідність ниткоподібних кристалів кремнію в області переходу метал-діелектрик

НУ "Львівська політехніка", НДЦ "Кристал",
вул. Котляревського, 1, Львів, 79013, тел. (0322) 721632, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Проведено дослідження впливу деформації на домішкову провідність ниткоподібних кристалів кремнію, легованих бором, в широкому діапазоні температур 1,7-300 К та магнітного поля з індукцією до 14 Тл. Встановлено, що особливості впливу деформації на зміну питомого опору ниткоподібних кристалів кремнію проявляються в області фазового переходу метал-діелектрик при гелієвих температурах як при накладанні магнітного поля, так і без нього. Також проаналізовано вплив деформації на зміну енергії активації домішкової провідності.

Ключові слова: ниткоподібний кристал, перехід метал-діелектрик, п'єзоопір, коефіцієнт тензочутливості, енергія активації, магнітоопір.

Стаття поступила до редакції 12.08.2003; прийнята до друку 23.10.2003.

I. Вступ

Незважаючи на велику кількість публікацій присвячених вивченню низькотемпературного транспорту носіїв заряду в легованих напівпровідниках, комплексні дослідження транспорту носіїв заряду в Si p-типу поблизу фазового переходу метал-діелектрик (ПМД) при сумісній дії деформації і магнітного поля не проводились. Хоча в цій області концентрацій домішки в класичних напівпровідниках p-типу найбільш яскраво проявляються особливості деформаційно-стимульованих ефектів, а саме гістерезис магнітоопору в p-Ge [1], зміна механізму виникнення аномального позитивного магнітоопору в p-Ge [2], гігантський п'єзоопір в Si і Ge p-типу [3–5]. Деформація і магнітне поле є саме тими зовнішніми чинниками, якими можна наближати і віддаляти досліджувані зразки до фазового переходу метал-діелектрик [3,6]. Щодо аномального позитивного магнітоопору в класичних напівпровідниках p-типу провідності з концентрацією домішки, що відповідає близькості до ПМД, то ще не має адекватного опису механізмів його виникнення [2]. Виходячи з цього, метою даної роботи було дослідження транспорту носіїв заряду в мікрокристалах Si p-типу поблизу ПМД в діапазоні температур 1,7-300 К при сумісній дії деформації та магнітного поля.

II. Об'єкт досліджень та методика експерименту

Проведено комплекс досліджень щодо вивчення впливу деформації на зміну питомого опору мікрокристалів кремнію, легованих бором, в діапазоні температур 1,7 ÷ 300 К та магнітного поля з індукцією B = 0 ÷ 14 Тл, метою яких було вивчення механізмів провідності в околі фазового переходу метал-діелектрик (ПМД). Мікрокристали Si, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій у формі ниткоподібних кристалів (НК) довжиною 2 ÷ 5 мм та діаметром 20 ÷ 60 мкм, завдяки своїй структурній досконалості, механічній міцності та мініатюрності, являють собою не тільки вдалий модельний матеріал для фізичних досліджень, але й перспективну елементну базу для створення сенсорів механічних величин [7,8].

Деформаційно-напружений стан досліджуваних НК при кріогенних температурах створювався двома способами, що дозволило розширити діапазон деформацій. Згідно методики, що описана в роботі [9], механічно-напружений стан НК створювався шляхом закріплення їх на спеціально підібрані підкладки з матеріалів з відмінним від кремнію коефіцієнтом термічного розширення (КТР). Для деформування НК Si було обрано три типи матеріалів підкладок: мідь, вольфрам та кварц, що забезпечували відповідно деформацію стиску ($\varepsilon = -3{,}8\times10^{-3}$ відн. од., $\varepsilon = -6{,}22\times10^{-4}$ відн. од. при T = 4,2 К) та розтягу ($\varepsilon = 4{,}7\times10^{-4}$ відн. од. при T = 4,2 К). Розраховані величини термічної

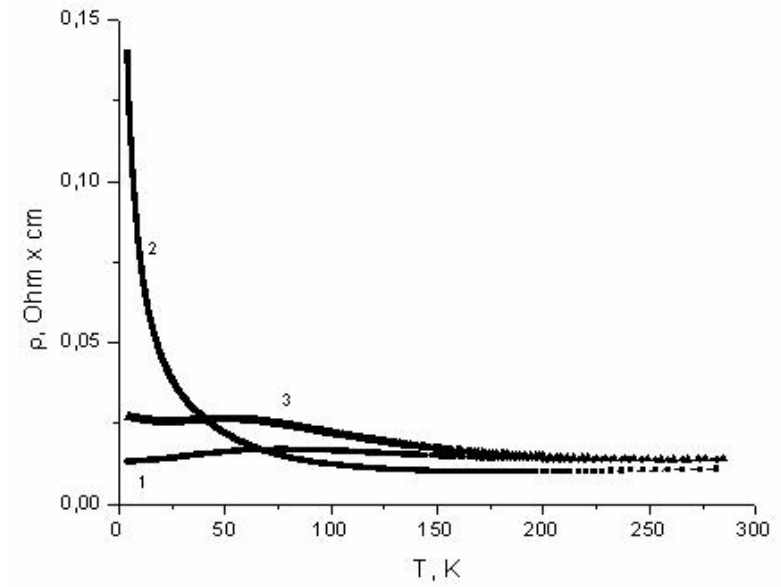

Рис. 1. Температурні залежності питомого опору НК Si з $N_B = 5{,}5\times10^{18}$ см$^{-3}$: вільного (1), на мідній підкладці (2), на кварцовій підкладці (3).

деформації НК кремнію, що закріплені на підкладках з різних матеріалів, при різних температурах наведені в [10].

Інший тип експерименту передбачав створення деформаційно-напруженого стану закріпленням НК Si p-типу на мініатюрній консольній балці. За допомогою спеціального пристрою консольна балка піддавалась деформації згину, а закріплені на ній досліджувані зразки НК Si p-типу – деформації стиску та розтягу в залежності від місця розташування на балці. Мікрокристали, наклеєні на верхній стороні балки, піддавались деформації розтягу, а наклеєні з нижньої сторони – деформації стиску. В зв'язку з тим, що КТР інвару близький до КТР кремнію консольну балку було виготовлено з інвару. Пристрій з консольною балкою з інвару дозволяв створювати шість рівнів деформації від 0 до $1{,}26\times10^{-3}$ відн. од. як деформації стиску, так і розтягу.

Вимірювання питомого опору та магнітоопору НК Si p-типу як вільних, так і деформованих, в широкому діапазоні температур та магнітних полів проводили в Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (Вроцлав, Польща). Вільні та закріплені на підкладках зразки були розміщені на спеціальній вставці. Вставку з зразками та пристроєм з мініатюрною консольною балкою охолоджували до 1,7 К у гелієвому кріостаті. Для нагрівання зразків до кімнатної температури застосовували спеціальну вставку з нагрівачем з біфілярного дроту, намотаного на корпус вставки. Стабілізований електричний струм у вимірювальній схемі задавався джерелом струму Keithley 224, електричну напругу на потенціальних контактах зразків та вихідний сигнал сенсора температури вимірювали цифровими вольтметрами типу Keithley 199 та Keithley 196 з одночасним автоматичним реєструванням показів приладів. Вимірювання магнітоопору в сильних магнітних полях з індукцією до 14 Тл проводили на біттерівському магніті при температурі рідкого гелію.

III. Результати досліджень та їх обговорення

Проведено вимірювання температурної залежності питомого опору ниткоподібних кристалів кремнію, легованих бором, в діапазоні температур 1,7 ÷ 300 К. НК Si підбирались таким чином, щоб концентрація основного домішкового рівня відповідала як діелектричному, так і металевому боку переходу метал-діелектрик. Враховуючи, що для кремнію, легованого бором, критична концентрація ПМД відповідає концентрації домішки $N_c = 5\times10^{18}$ см$^{-3}$ [6], то зразки з $N_B = 5{,}5\times10^{18}$ см$^{-3}$ відповідають металевому боку ПМД, а зразки з $N_B = 3\times10^{18}$ см$^{-3}$ – діелектричному боку ПМД.

Особливості п'єзорезистивного ефекту в НК Si p-типу проявлялися в області концентрацій домішки, що відповідає близькості до ПМД. В металевих та діелектричних зразках далеких від фазового переходу метал-діелектрик особливостей п'єзорезистивного ефекту не спостерігалось [4,5].

Найближчими до ПМД з металевого боку фазового переходу є зразки $N_B = 5{,}5\times10^{18}$см$^{-3}$. Металевий хід вільного кристала (крива 1 на рис. 1) під впливом деформації розтягу з боку кварцової підкладки стає ближчим до типової напівпровідникової температурної залежності ρ(T) з характерним негативним значенням ТКО (крива 3 на рис. 1). Високий рівень деформації стиску з боку мідної підкладки (крива 2 на рис. 1) виводить зразок з "критичної" області та надає йому типової

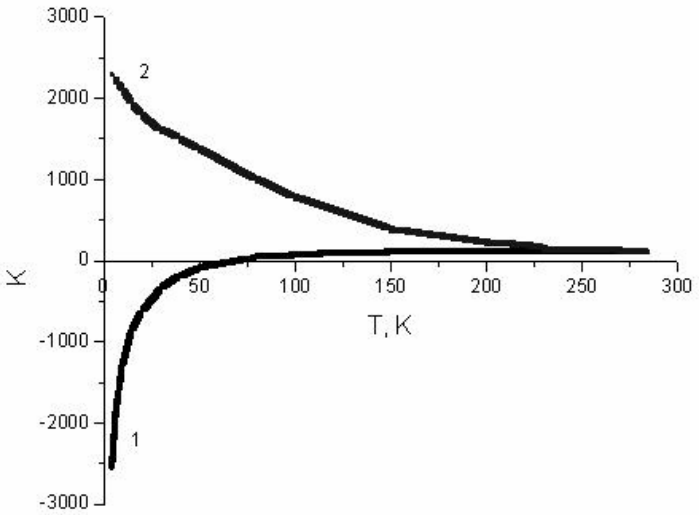

Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості НК Si з партії з $N_B = 5{,}5\times10^{18}$ см$^{-3}$ для деформації стиску (1) та розтягу (2).

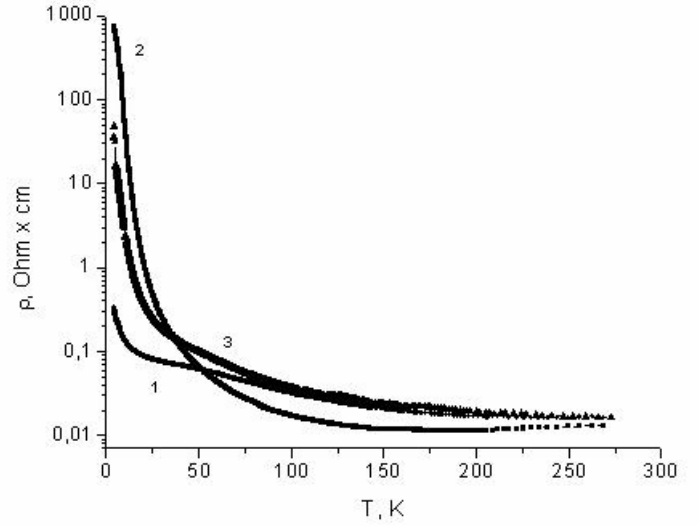

Рис. 3. Температурні залежності питомого опору НК Si з $N_B = 3\times10^{18}$ см$^{-3}$: вільного (1), на мідній підкладці (2), на кварцовій підкладці (3).

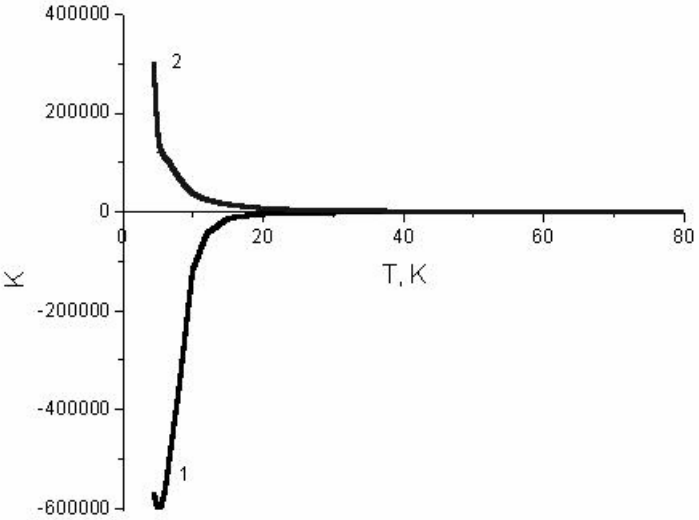

Рис. 4. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості НК Si з $N_B = 3\times10^{18}$ см$^{-3}$ для деформації стиску (1) та розтягу (2).

Таблиця.

Значення енергії активації E_3 і E_2 для НК p-Si з концентрацією бору в області фазового переходу метал-діелектрик.

Тип зразка	Енергія активації, меВ (діапазон температур)		
	$N_B = 5{,}5\times10^{18}$ см$^{-3}$	$N_B = 3\times10^{18}$ см$^{-3}$	$N_B = 8\times10^{17}$ см$^{-3}$
Вільний (незакріплений)	–	E_3 = 0,589 (4,4–5,8 К)	E_3 = 0,750 (4,4–6,1 К)
На мідній підкладці	E_3 = 0,330 (4,5 – 7 К)	E_3 = 0,443 (4,4–6 К)	E_3 = 0,015 (4,4–6,9 К)
	–	E_2 = 6,452 (10–22,7 К)	–
На кварцовій підкладці	–	E_3 = 0,099 (4,5–5,4 К)	E_3 = 0,198 (4,4–5,8 К)
	–	E_2 = 3,279 (8–26,6 К)	–

напівпровідникової залежності ρ(T). Коефіцієнт тензочутливості для цих зразків в області гелієвих температур досягає значення $K \approx 2{,}3\times10^3$ для деформації розтягу і $K \approx -2{,}6\times10^3$ для деформації стиску (рис. 2).

Температурні залежності питомого опору зразків з $N_B = 3\times10^{18}$ см$^{-3}$ у всьому температурному діапазоні мають типову напівпровідникову залежність ρ(T) і відповідають близькості до ПМД з діелектричного боку переходу (рис. 3). Деформація з боку підкладок надзвичайно ефективно впливає на питомий опір кристалів в області кріогенних температур. Навіть порівняно невелика деформація розтягу $\varepsilon = +4{,}7\times10^{-4}$ відн. од. збільшує питомий опір зразка в області гелієвих температур, більше як в 100 разів, а деформація стиску $\varepsilon = -3{,}8\times10^{-3}$ відн. од. призводить до зростання питомого опору НК приблизно в 12000 разів. Такий п'єзоопір є гігантським. Значення коефіцієнта тензочутливості для цих зразків в області гелієвих температур становлять $K \approx -6\times10^5$ для деформації стиску і $K \approx 3\times10^5$ для деформації розтягу (рис. 4). Такі гігантські значення коефіцієнта тензочутливості в області гелієвих температур досягаються за рахунок зміни механізму п'єзоопору на "некласичний", який зумовлений електропровідністю по локалізованих або частково локалізованих станах носіїв заряду.

Як показали експериментальні дослідження [5,10] подальше збільшення питомого опору досліджуваних зразків не призводить до зростання ефективності впливу деформації на питомий опір, а навпаки – цей ефект суттєво зменшується. Типовий напівпровідниковий хід вільного зразка якісно не змінюється з ростом рівня деформації і кількісно порівняно слабо залежить від деформації в порівнянні з зразками з $N_B = 3\times10^{18}$ см$^{-3}$. Немонотонний характер залежності K(T) для слабо легованих НК Si свідчить про те, що для таких мікрокристалів область домінування "некласичного" п'єзоопору є значно вужчою і при наближенні до температури рідкого гелію цей ефект майже зникає.

Як відомо [6], при кріогенних температурах питомий опір легованих напівпровідників ρ може бути записаний як сума трьох доданків з відповідними енергіями активації E_i:

$$\rho^{-1} = \sum_{i=1}^{3} \rho_i^{-1} \exp(-E_i / kT), \qquad (1)$$

де E_1 – енергія активації основного домішкового стану (акцепторного або донорного), E_3 – енергія активації стрибкової провідності з незалежними (некорельованими) стрибками по парах домішкових центрів, E_2 – енергія активації домішкової провідності по двічі окупованих домішкових станах (по A^+-зоні для напівпровідників, легованих акцепторними домішками).

Дослідження температурної залежності електропровідності НК Si дозволяють визначити значення енергії активації. Значення енергії активації E_3 і E_2 у відповідних температурних діапазонах для зразків з концентрацією бору $5{,}5\times10^{18}$, 3×10^{18}, 8×10^{17} см$^{-3}$ наведено в таблиці.

Як видно з таблиці деформація зразків з слабким та проміжним рівнем легування призводить до зменшення енергії активації E_3 та звуження температурного діапазону її дії, що пояснюється зростанням впливу кореляційних ефектів. Порівняння даних для зразків, закріплених на підкладках, свідчить про те, що енергія активації E_2 зростає зі збільшенням рівня деформації. Отримані експериментальні дані для енергій активацій E_3 і E_2 для зразків НК Si p-типу добре узгоджуються з даними роботи [6].

На інварній балці досліджувались НК Si p-типу з концентрацією бору $1{,}1\times10^{19}$ см$^{-3}$ (ρ = 0,005 Ом×см) з металевим типом провідності, а також з концентраціями бору $5{,}2\times10^{18}$ см$^{-3}$ (ρ = 0,01 Ом×см) і 4×10^{18} см$^{-3}$ (ρ = 0,02 Ом×см), що відповідають металевому і діелектричному боку ПМД. В цій роботі ми наводимо результати вимірювань питомого опору цих зразків при деформації стиску.

Дослідження НК Si закріплених на інварній балці, показали, що в сильно легованих кристалах з ρ = 0,005 Ом×см в досліджуваному діапазоні температур 4,2-300 К спостерігається класичний

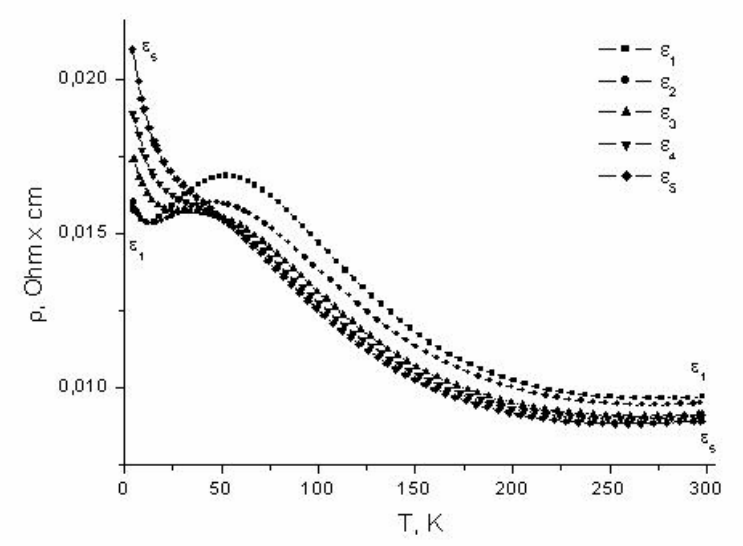

Рис. 5. Температурні залежності питомого опору зразка НК p-Si з $N_B = 5{,}2\times10^{18}$ см$^{-3}$, закріпленого на балці при деформації стиску: $\varepsilon_1 = -2{,}42\times10^{-4}$, $\varepsilon_2 = -5{,}95\times10^{-4}$, $\varepsilon_3 = -8{,}79\times10^{-4}$, $\varepsilon_4 = -1{,}08\times10^{-3}$, $\varepsilon_5 = -1{,}26\times10^{-3}$ відн. од.

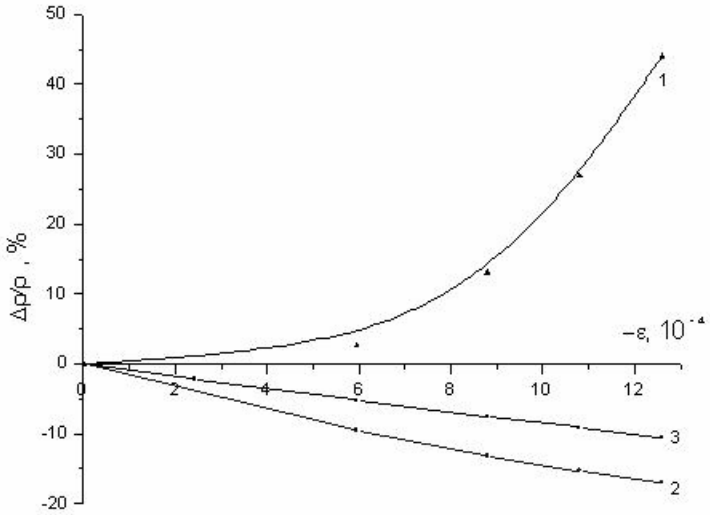

Рис. 6. Деформаційні залежності зміни питомого опору зразка НК p-Si з $N_B = 5{,}2\times10^{18}$ см$^{-3}$ при деформації стиску для різних температур: 4,2 К (крива 1), 77 К (крива 2), 300 К (крива 3).

(сміттівський) п'єзорезистивний ефект: при деформації розтягу опір кристалів збільшується, а при деформації стиску зменшується. Коефіцієнт тензочутливості цих зразків позитивний і при 4,2 К він становить К = 135 при $\varepsilon = -1{,}26\times10^{-3}$ відн. од. Деформаційні залежності зміни питомого опору цих зразків при різних температурах є лінійними і монотонними.

Зовсім інші деформаційні залежності виявлені в НК p-Si з концентрацією домішок, що відповідає близькості до ПМД з металевого боку (рис. 5, 6). В цих кристалах при температурі рідкого гелію спостерігається некласичний п'єзорезистивний ефект: при деформації стиску опір кристалів зростає (рис. 5). Так, для НК p-Si з $\rho = 0{,}01$ Ом×см, закріплених на інварній балці $K_{4,2\,K} = -285$ при деформації стиску $\varepsilon = -1{,}26\times10^{-3}$ відн. од. Встановлено, що деформація зразків НК p-Si з $\rho = 0{,}01$ Ом×см призводить до збільшення енергії активації стрибкової провідності E_3 від 0,0019 до 0,041 меВ.

Найбільш сильно у цьому типі експерименту п'єзорезистивний ефект проявлявся в НК p-Si з рівнем легування, що відповідає діелектричному боку ПМД. Як видно з рис. 7 деформація стиску в області гелієвих температур призводить до зростання питомого опору кристалів приблизно в 10 разів, при цьому коефіцієнт тензочутливості становить $K_{4,2\,K} = -6740$ при $\varepsilon = -1{,}26\times10^{-3}$ відн. од.

В цих зразках в області гелієвих температур п'єзорезистивний ефект має "некласичний" механізм виникнення. Енергії активації E_3 і E_2 для цих зразків з збільшенням рівня деформації стиску також зростають: від 0,37 до 1,50 і від 0,39 до 1,50 меВ відповідно.

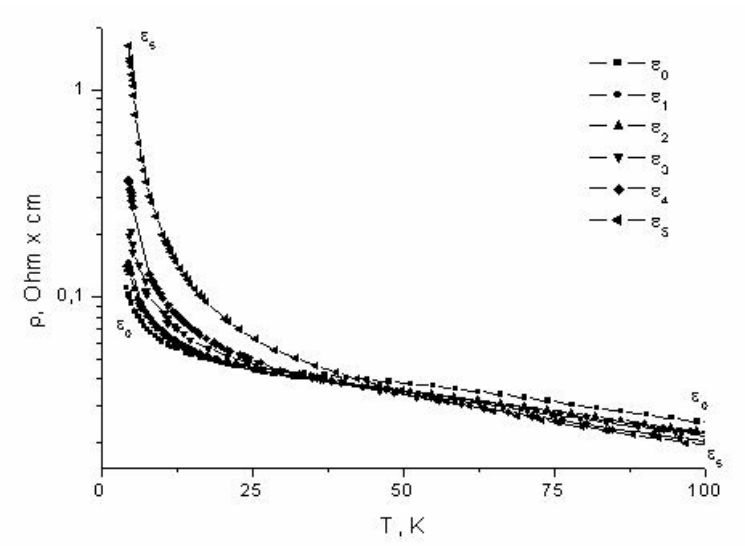

Рис. 7. Температурні залежності питомого опору зразка НК p-Si з з $N_B = 4\times10^{18}$ см$^{-3}$, закріпленого на балці при деформації стиску: $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon_1 = -2{,}42\times10^{-4}$, $\varepsilon_2 = -5{,}95\times10^{-4}$, $\varepsilon_3 = -8{,}79\times10^{-4}$, $\varepsilon_4 = -1{,}08\times10^{-3}$, $\varepsilon_5 = -1{,}26\times10^{-3}$ відн. од.

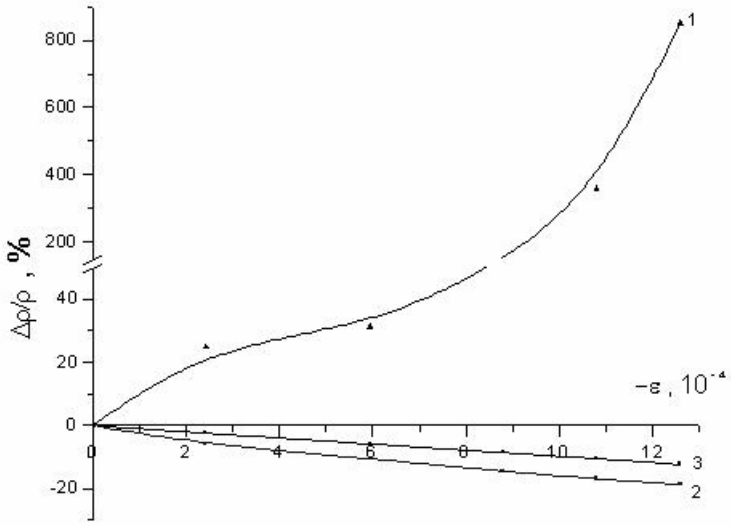

Рис. 8. Деформаційні залежності зміни питомого опору зразка НК p-Si з $N_B = 4\times10^{18}$ см$^{-3}$ при деформації стиску для різних температур: 4,2 К (крива 1), 77 К (крива 2), 300 К (крива 3).

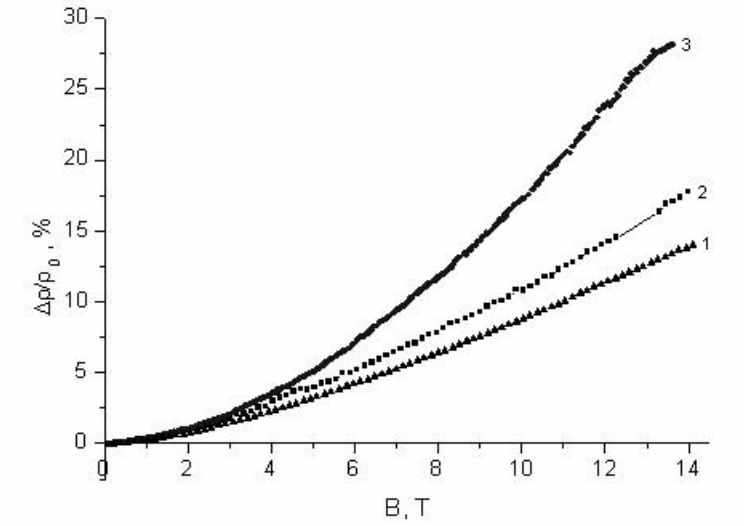

Рис. 9. Магнітоопір НК Si з ρ = 0,01 Ом×см при T = 4,2 К: 1 – вільний, 2 – на підкладці з вольфраму, 3 – на підкладці з кварцу.

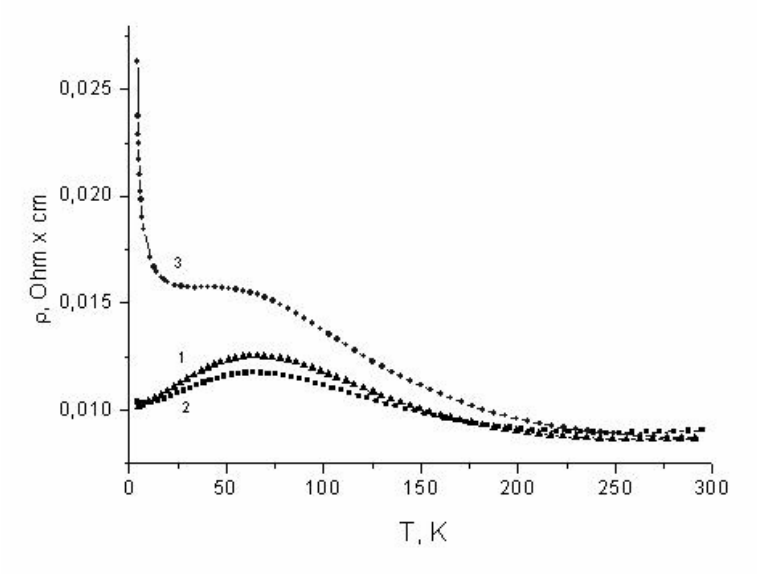

Рис. 10. Температурні залежності питомого опору НК Si з ρ = 0,01 Ом×см: 1 – вільний, 2 – на підкладці з вольфраму, 3 – на підкладці з кварцу.

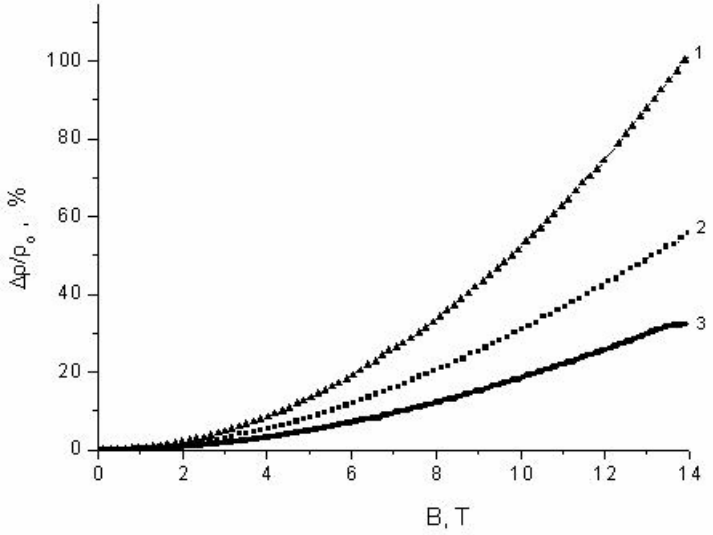

Рис. 11. Магнітоопір НК Si з ρ = 0,02 Ом×см при T = 4,2 K: 1 – вільний, 2 – на підкладці з вольфраму, 3 – на підкладці з кварцу.

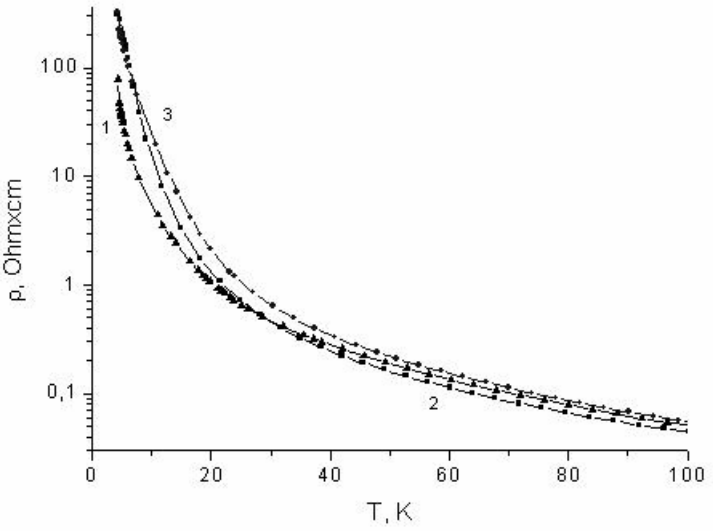

Рис. 12. Температурні залежності питомого опору НК Si з ρ = 0,02 Ом×см: 1 – вільний, 2 – на підкладці з вольфраму, 3 – на підкладці з кварцу.

Проведено вимірювання поперечного магнітоопору зразків НК p-Si з концентрацією бору 1×10^{19} см$^{-3}$ ($\rho = 0{,}005$ Ом×см), що мають типовий металевий хід провідності, і з концентраціями бору $5{,}2\times10^{18}$ см$^{-3}$ ($\rho = 0{,}01$ Ом×см) і 2×10^{18} см$^{-3}$ ($\rho = 0{,}02$ Ом×см), що відповідають металевому боку ПМД і діелектричному боку ПМД. На рис. 9, 11 наведено польові залежності магнітоопору зразків з різним ступенем легування для трьох рівнів деформації при температурі рідкого гелію, на рис. 10, 12 приведено температурні залежності питомого опору цих зразків.

Як видно з рис. 10 металевий хід температурної залежності питомого опору вільного зразка НК p-Si з $N_B = 5{,}2\times10^{18}$ см$^{-3}$ під дією деформації стиску з боку вольфрамової підкладки майже не змінюється, а під дією деформації розтягу з боку кварцової підкладки набуває в області гелієвих температур напівпровідникового ходу (крива 3). Зразки НК p-Si з $N_B = 2\times10^{18}$ см$^{-3}$ як вільні, так і закріплені на підкладках з кварцу та вольфраму мають типовий напівпровідниковий хід температурної залежності питомого опору в усьому діапазоні досліджуваних температур (рис. 12).

Як видно з рис. 9, 11 в широкій області магнітних полів магнітоопір досліджуваних зразків описується квадратичною залежністю від індукції магнітного поля типу

$$\Delta R/R(B) = MB^2 . \qquad (2)$$

Така залежність справедлива для будь якого механізму виникнення ефекту магнітоопору. Для виявлення механізмів виникнення магнітоопору необхідно дослідити залежності від магнітного поля в сильних магнітних полях, а також розглянути температурні залежності магнітоопору.

На основі аналізу експериментальних даних було виявлено наступні особливості впливу деформації на величину магнітоопору:

– для зразків, концентрація основної легуючої домішки в яких відповідає діелектричному та металевому боку ПМД, спостерігається зменшення величини магнітоопору з ростом величини деформації;

– для зразків, концентрація основної легуючої домішки в яких відповідає близькості до ПМД з металевого боку, спостерігається збільшення величини магнітоопору з ростом величини деформації, при чому в області гелієвих температур під дією деформації відбувається зміна механізму на некласичний, який спричинений електропровідністю по локалізованих станах носіїв заряду.

Таку поведінку магнітоопору в залежності від деформації можна пояснити, вияснивши механізми виникнення магнітоопору в недеформованих (вільних) зразках в залежності від рівня легування. Як відомо [2], в діелектричних зразках далеко від фазового переходу метал-діелектрик виникнення аномального позитивного магнітоопору пояснюється деформацією хвильових функцій локалізованих носіїв заряду магнітним полем. Ця теорія передбачає надлінійну залежність опору від магнітного поля в області високих магнітних полів, що і спостерігається в наших зразках. Виникнення аномального позитивного магнітоопору в сильно легованих зразках пояснюється проявом режиму слабкої локалізації, при цьому спостерігається збільшення магнітоопору в магнітному полі, що обумовлено впливом спін-орбітальної взаємодії на процеси слабкої локалізації у відносно слабких полях.

Збільшення величини магнітоопору з ростом величини деформації в зразках з концентрацією, що відповідає близькості до ПМД, може бути пов’язана зі зміною механізму електропровідності в області гелієвих температур, що здійснюється по локалізованих станах носіїв заряду.

IV. Висновки

Виявлено гігантський п’єзопір в деформованих НК Si p-типу провідності з концентрацією домішки (бору), що відповідає близькості до ПМД з діелектричного боку. При температурі рідкого гелію деформація надзвичайно ефективно впливає на зміну питомого опору НК p-Si в області фазового переходу метал-діелектрик (ПМД), зокрема питомий опір у порівнянні з недеформованим зразком зростає в 12000 разів, а коефіцієнт тензочутливості становить 6×10^5 при деформації стиску $\varepsilon = -3{,}8\times10^{-3}$ відн. од. Такі гігантські значення п’єзоопору зумовлені електропровідністю по локалізованих станах носіїв заряду.

Дослідження п’єзорезистивних властивостей НК Si на консольній балці з інвару дозволили відслідкувати вплив деформації стиску і розтягу на питомий опір кристалів, розрахувати деформаційні залежності коефіцієнта тензочутливості і енергій активації E_3 і E_2, а також визначити при якому рівні деформації і температурі спостерігається фазовий перехід метал-діелектрик.

Виявлено нетипове зростання магнітоопору зі збільшенням деформації для кристалів з концентрацією домішки, що відповідає близькості до ПМД з металевого боку, зроблено спробу пояснити це явище на основі андерсонівської локалізації.

Дружинін А.О. – д.т.н., професор кафедри напівпровідникової електроніки, завідуючий лабораторією сенсорної електроніки НДЦ “Кристал”;
Мар’ямова І.Й. - к.т.н., с.н.с., провідний науковий співробітник НДЦ “Кристал”;
Кутраков О.П. – с.н.с. НДЦ “Кристал”;
Павловський І.В. – інженер НДЦ “Кристал” НУ “Львівська політехніка”.

[1] А.Г. Андреев, С.В. Егоров, А.Г. Забродский, Р.В. Парфеньев, А.В. Черняев. Гистерезис магнитосопротивления нейтронно-легированого Ge в области прыжкового транспорта по состоянию щели // *ФТП*, **34**(7), сс. 796-802 (2000).
[2] А.И. Вейнгер, А.Г. Забродский, Т.В. Тиснек. СВЧ магнитосопротивление компенсированного p-Ge:Ga в области фазового перехода изолятор-металл // *ФТП*, **36**(7), сс. 826-835 (2002).
[3] В.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников.* Наука, М. (1979).
[4] A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Maryamova, T. Palewski and A. Kutrakov. Semiconductor microcrystals with ultra-high sensitivity to mechanical strain at cryogenic temperatures // *J. Phys. IV France*, **12**, Pr. 3-79 – 3-82 (2002).
[5] A. Druzhinin, I. Hortynska, I. Maryamova, E. Lavitska, M. Oszwaldowski. Investigation of free and strained germanium whiskers at cryogenic temperatures // *Proc. of SPIE*, **4413**, pp. 143-147 (2001).
[6] J.A. Chroboczek, F.H. Pollak, H.F. Staunton. Impurity conduction in silicon and effect of unixial compression on p-type silicon // *Phil. Mag. B*, **50**(1), pp. 113-156 (1984).
[7] I. Maryamova, A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Gortynska, Y. Yatzuk. Low temperature semiconductor mechanical sensors // *Sensors and Actuators*, **A85**, pp. 153-157 (2000).
[8] А.А. Дружинин, И.И. Марьямова, Е.Н. Лавитская, А.П. Кутраков, Ю.М. Панков Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // *Микросистемная техника*, **9**, сс. 3-8 (2001).
[9] A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Maryamova, M. Oszwaldowski, T. Berus, H. Kunert. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // *Cryst. Res. Technol.*, **37**(2-3), pp. 243-257 (2002).
[10] H.-W. Kunert, E. Lavitska. Stresses and strains in anisotropic cubic ultra-thin overlayers // *Cryst. Res. Technol.*, **36**(8-10), pp. 1045-1057 (2001).

A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, O.P. Kutrakov, I.V. Pavlovsky

The Effect of Strain on the Impurity Conductivity of Silicon Whiskers in the Range of Metal-Insulator Transition

National University "Lvivska politechnika", Sci.-Research Center "Crystal",
1, Kotlyarevsky Str., Lviv, Ukraine, 79013, Tel.: +38 (0322) 721632, E-mail: druzh@polynet.lviv.ua

The effect of strain on the impurity conductivity of boron doped silicon whiskers in the wide temperature range 1.7-300 K and in the magnetic field up to 14 T was studied. It was shown that the peculiarities of strain-induced changes of resistivity of silicon whiskers reveal them self in the region of metal-insulator transition at liquid helium temperatures as in the presence of magnetic field and in the absence of magnetic field. The effect of strain on the changes of activation energies for impurity conductivity was analyzed also.