

УДК 621.315.592

І.Й. Мар'ямова, І.П. Островський, Ю.М. Ховерко,
О.П. Кутраков, І.Т. Когут, Н.С. Лях-Кагуй
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра напівпровідникової електроніки

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА НИТКОПОДІБНІ КРИСТАЛИ КРЕМНІЮ І ТВЕРДОГО РОЗЧИНУ Si-Ge

© Мар'ямова І.Й., Островський І.П., Ховерко Ю.М., Кутраков О.П.,
Когут І.Т., Лях-Кагуй Н.С., 2011

I. Maryamova, I. Ostrovskii, Yu. Khoverko,
A. Kutrakov, I. Kogut, N. Liakh-Kaguy

INFLUENCE OF ELECTRON IRRADIATION ON SILICON AND Si-Ge SOLID SOLUTION WHISKERS

© Maryamova I., Ostrovskii I., Khoverko Yu., Kutrakov A., Kogut I., Liakh-Kaguy N., 2011

Досліджено вплив електронного опромінення на низькотемпературну провідність і магнетопір ниткоподібних кристалів (НК) кремнію і $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД). Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір і магнетопір кристалів за криогенних температур. Виконані вимірювання свідчать про радіаційну стійкість досліджених НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ до дії опромінення високоенергетичними електронами з флюенсом $\Phi \approx 1 \cdot 10^{17}$ ел/см².

Ключові слова: електронне опромінення, низькотемпературна провідність, магнетопір ниткоподібних кристалів (НК) кремнію і $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу.

Influence of electron irradiation on low temperature conductivity and magnetoresistance of p-type silicon and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) whiskers with boron concentration in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) have been studied. Correlation between influence of electron irradiation on crystal resistance and magnetoresistance at cryogenic temperatures was observed. These studies show the stability of investigated Si and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers to irradiation by high energy electrons with fluencies $\Phi \approx 1 \cdot 10^{17}$ el/cm².

Key words: electron irradiation, low-temperature conductivity, magnetoresistance of Si whiskers and $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ p-type.

Вступ

Дослідження впливу електронного опромінення на кристали кремнію та твердого розчину Si-Ge є актуальними як з погляду розширення фізичних уявлень про дію радіації на основні параметри кристалів, так і для оцінювання їх радіаційної стійкості для створення сенсорів на їх основі. Такі дослідження проводились, переважно, на високоомних монокристалах кремнію і германію [1, 2]. Нещодавно з'явилися роботи [3, 4], присвячені вивченню дії електронного опромінення на сильно леговані кристали Si р- та n-типу. Ця робота спрямована на дослідження впливу опромінення електронами високих енергій на провідність і магнетопір легованих НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ з концентрацією бору поблизу ПМД, які використовуються як чутливі елементи сенсорів фізичних величин, працездатних в складних умовах експлуатації (низькі температури та сильні магнітні поля).

Методика експерименту

Об'єктом досліджень були ниткоподібні монокристали кремнію і твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ р-типу провідності, які використовуються як чутливі елементи сенсорів фізичних величин [5, 6]. Для досліджень впливу високоенергетичного опромінення на провідність та магнетопір відбирали НК Si як сильнолеговані (вироджені) з питомим опором $\rho_{300\text{K}}=0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, так і з концентрацією бору поблизу ПМД з $\rho_{300\text{K}}=0,009-0,016 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ і НК твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу з $\rho_{300\text{K}}=0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Опромінення НК проводилось на імпульсному прискорювачі електронів типу мікротрон М-30 за кімнатної температури з енергією $E=10 \text{ МеВ}$ і різним флюенсом 1×10^{17} ; 5×10^{17} ; 8×10^{17} ; $1\times 10^{18} \text{ ел/см}^2$. З метою уникнення радіаційного нагрівання кристалів і підтримання кімнатної температури під час опромінення обдували кристали парами рідкого азоту.

Дослідження впливу електронного опромінення на низькотемпературну провідність легованих НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ проводилось в інтервалі температур 4,2–300 К і в магнітних полях з індукцією 0–14 Тл. Властивості кристалів вивчали до і після опромінення. Для дослідження низькотемпературної провідності кристали встановлювали у гелієвий кріостат, де відбувалось їх охолодження до температури 4,2 К. Досліджували вплив магнітного поля на властивості НК на біттерівському магніті з індукцією до 14 Тл та часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв в інтервалі температур 4,2–77 К. Стабілізований електричний струм в межах 1–100 мкА через кристал задавався джерелом струму Keithley 224 залежно від опору досліджуваного кристала. Температуру вимірювали за допомогою термопари Cu-CuFe. Електрична напруга на контактах кристалів, вихідний сигнал термопари та сенсора магнітного поля вимірювали цифровими вольтметрами типу Keithley 199 та Keithley 2000 з точністю до $1\times 10^{-6} \text{ В}$ з одночасною автоматичною реєстрацією показів.

Результати експериментальних досліджень

Досліджувався вплив високоенергетичного електронного опромінення на низькотемпературну провідність НК кремнію та твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ із різним рівнем легування бором і, відповідно, різним ступенем наближення до ПМД.

На рис. 1 наведено експериментально одержані типові залежності опору кристалів від температури в інтервалі 4,2–300 К при різних флюенсах для НК кремнію р-типу з питомим опором $\rho_{300\text{K}}=0,006-0,016 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з $\rho_{300\text{K}}=0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Як видно з наведених графіків, для сильно легованих (вироджених) НК кремнію та з концентрацією бору поблизу ПМД і твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $1\times 10^{17} \text{ ел/см}^2$ не спричиняє істотних змін опору кристалів у всьому дослідженому інтервалі температур 4,2–300 К, у той час як збільшення флюенсу до $1\times 10^{18} \text{ ел/см}^2$ зумовлює значне зростання опору НК, особливо за криогенних температур.

Одержані результати щодо зменшення низькотемпературної провідності НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з концентрацією бору поблизу ПМД внаслідок опромінення електронами можна пояснити ось чим. Під час опромінення кремнію, легованого бором, утворюються комплекс вакансія + бор, якому відповідає рівень $E_v+0,45 \text{ еВ}$, а також пара міжвузловий атом бора + бор заміщення, якому відповідає рівень $E_c-0,26 \text{ еВ}$ [1], тобто утворюються радіаційні дефекти (РД) з глибокими акцепторними рівнями і одночасно вводяться компенсуючі донорні РД, які зменшують концентрацію дірок. Під час опромінення електронами з енергією $E=10 \text{ МеВ}$ атомам кремнію передається енергія і створюється каскад зміщень. Отже, під час опромінення кристалів електронами з енергією $E=10 \text{ МеВ}$ створюється набір кластерів із різною кількістю зміщених атомів і, відповідно, різних розмірів [1].

Одержані експериментальні результати для НК кремнію добре узгоджуються з даними роботи [4], в якій наведено результати дослідження впливу електронного опромінення на провідність сильно легованого бором кремнію. У цій роботі після опромінення електронами експериментально спостерігалось зменшення провідності кремнію з одночасним зменшенням рухливості носіїв та зменшенням їх концентрації. Тому за аналогією зменшення провідності НК кремнію, легованого бором, після опромінення електронами можна пояснити як процесами розсіювання носіїв струму на вторинних радіаційних дефектах, яке приводить до зменшення рухливості носіїв, так і зменшенням концентрації носіїв.

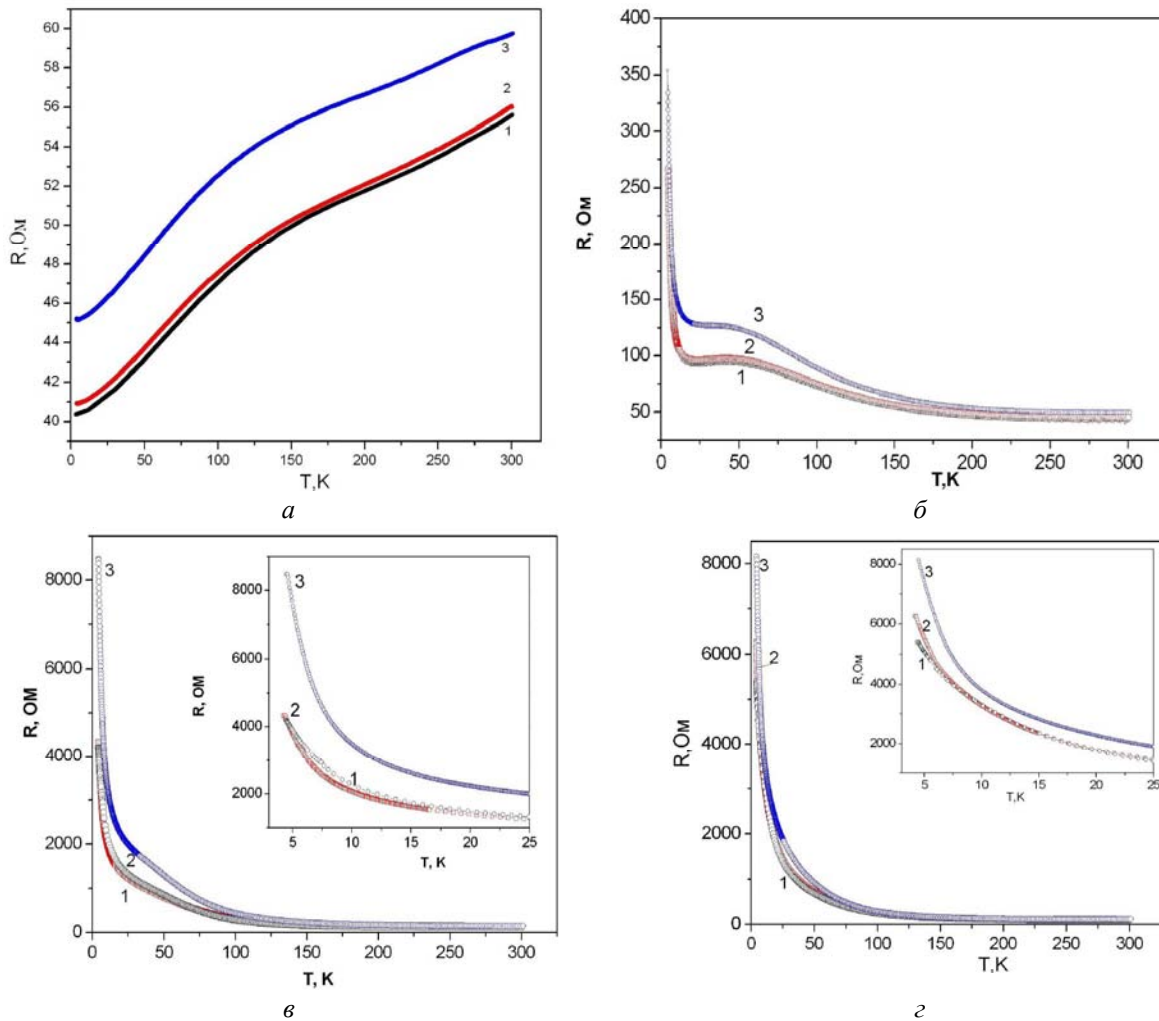


Рис. 1. Температурна залежність опору НК під час опромінення електронами з енергією $E=10\text{MeV}$ і флюенсом:

1 – $\Phi=0$; 2 – $\Phi=1 \cdot 10^{17} \text{ ел/см}^2$; 3 – $\Phi=1 \cdot 10^{18} \text{ ел/см}^2$ для Si з $\rho_{300\text{K}}$

$0,006 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – металевий хід провідності (а); $0,0104 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – безпосередньо на ПМД (б);

$0,0157 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – поблизу ПМД з діелектричного боку (в) та для $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ з $0,018 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ віддалено від ПМД у діелектричний бік (з)

Під час аналізу низькотемпературної провідності опромінених кристалів досліджувався також вплив електронного опромінення на стрибкову провідність цих кристалів. Енергії активації стрибкової провідності досліджених кристалів розраховували за формулою

$$s = \sum_{i=1}^3 s_i \exp\left(\frac{E_i}{kT}\right),$$

де E_1 – енергія термоіонізації основного домішкового стану (акцепторного); E_2 – енергія активації стрибкової провідності по двічі окупованих домішкових станах; E_3 – енергія активації стрибкової провідності з незалежними стрибками по парах домішкових центрів.

У таблиці наведено значення енергій активації стрибкової провідності для деяких досліджених НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу, легованих бором.

Енергії активації низькотемпературної провідності НК Si та Si_{1-x}Ge_x p-типу

Матеріал	ρ_{300K} , Ом·см	Енергія активації, меВ			Електронне опромінення 10 МеВ
		E_3	E_2	E_1	
Si	0,0104	0,9 (4,5–6 К)	–	10,8 (60–100 К)	$\Phi=0$
		0,7 (4,5–20 К)	–	10,9 (75–200К)	$\Phi=1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$
Si	0,0157	0,4 (4,4–6 К)	0,81 (7,5–20 К)	17,5 (70–165 К)	$\Phi=0$
		0,3 (4,3–4,7 К)	0,85 (5,7–21К)	18,2 (82–208К)	$\Phi=1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$
Si _{1-x} Ge _x (x=0,03)	0,0180	0,3 (4,7–8 К)	1 (10–20 К)	25,6 (70–110 К)	$\Phi=0$
		0,31 (4,5–14 К)	1,15 (14–20К)	41,15 (20–75 К)	$\Phi=1 \times 10^{18} \text{ см}^{-2}$

У НК кремнію p-типу, легованих бором, з питомим опором $\rho_{300K} = 0,009 - 0,0114$ Ом·см було виявлено тільки енергію активації E_3 у температурному інтервалі 4,5–8 К, а в кристалах Si та Si_{1-x}Ge_x (x=0,03) з питомим опором $\rho_{300K} = 0,0157 - 0,025$ Ом·см, крім енергії E_3 , проявляється енергія активації E_2 в інтервалі температур 8–22 К. Як зрозуміло з наведеної таблиці, під впливом опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 1 \times 10^{18}$ ел/см² спостерігається тенденція до зменшення енергії активації стрибкової провідності E_3 і до незначного зростання енергії активації E_2 .

Вивчався також вплив опромінення електронами високих енергій (E=10 МеВ) із різним флюенсом на домішкову провідність легованих бором НК кремнію і Si_{1-x}Ge_x (x=0,03) p-типу за різних температур. На рис. 2 наведено залежності відносної зміни опору від флюенсу електронів для НК Si p-типу із різним рівнем легування бором і різним ступенем наближення до ПМД.

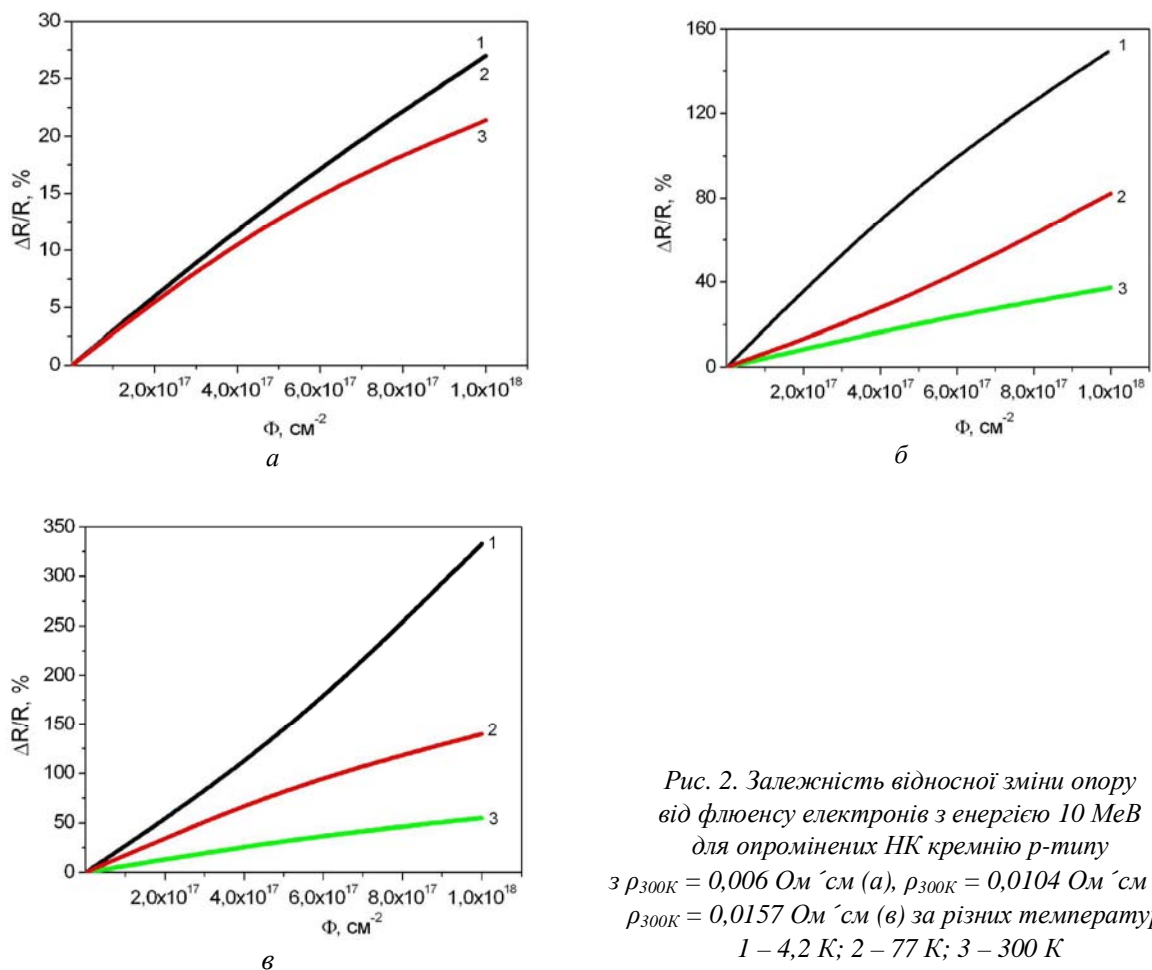


Рис. 2. Залежність відносної зміни опору від флюенсу електронів з енергією 10 МеВ для опромінених НК кремнію p-типу з $\rho_{300K} = 0,006$ Ом·см (а), $\rho_{300K} = 0,0104$ Ом·см (б), $\rho_{300K} = 0,0157$ Ом·см (в) за різних температур: 1 – 4,2 К; 2 – 77 К; 3 – 300 К

Встановлено такі особливості зміни провідності досліджуваних НК кремнію та $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ р-типу під впливом електронного опромінення:

- найменші зміни опору опроміненних кристалів у всьому інтервалі температур 4,2–300 К спостерігались для сильно легованих НК Si з $\rho_{300\text{K}} = 0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$;
- зі збільшенням питомого опору кристалів (зменшенням концентрації легуючої домішки – бору) збільшується вплив опромінення на провідність кристалів у всьому досліджуваному інтервалі температур;
- найбільші зміни провідності (опору) досліджуваних кристалів з концентрацією бору поблизу ПМД під впливом опромінення відбуваються за низьких температур, особливо за температури рідкого гелію.

Варто зауважити, що опромінення за кімнатної температури високоенергетичними електронами з флюенсом $\Phi=1 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$ не приводить до істотних змін величини опору кристалів, що можна використати для створення радіаційностійких сенсорів на основі цих НК.

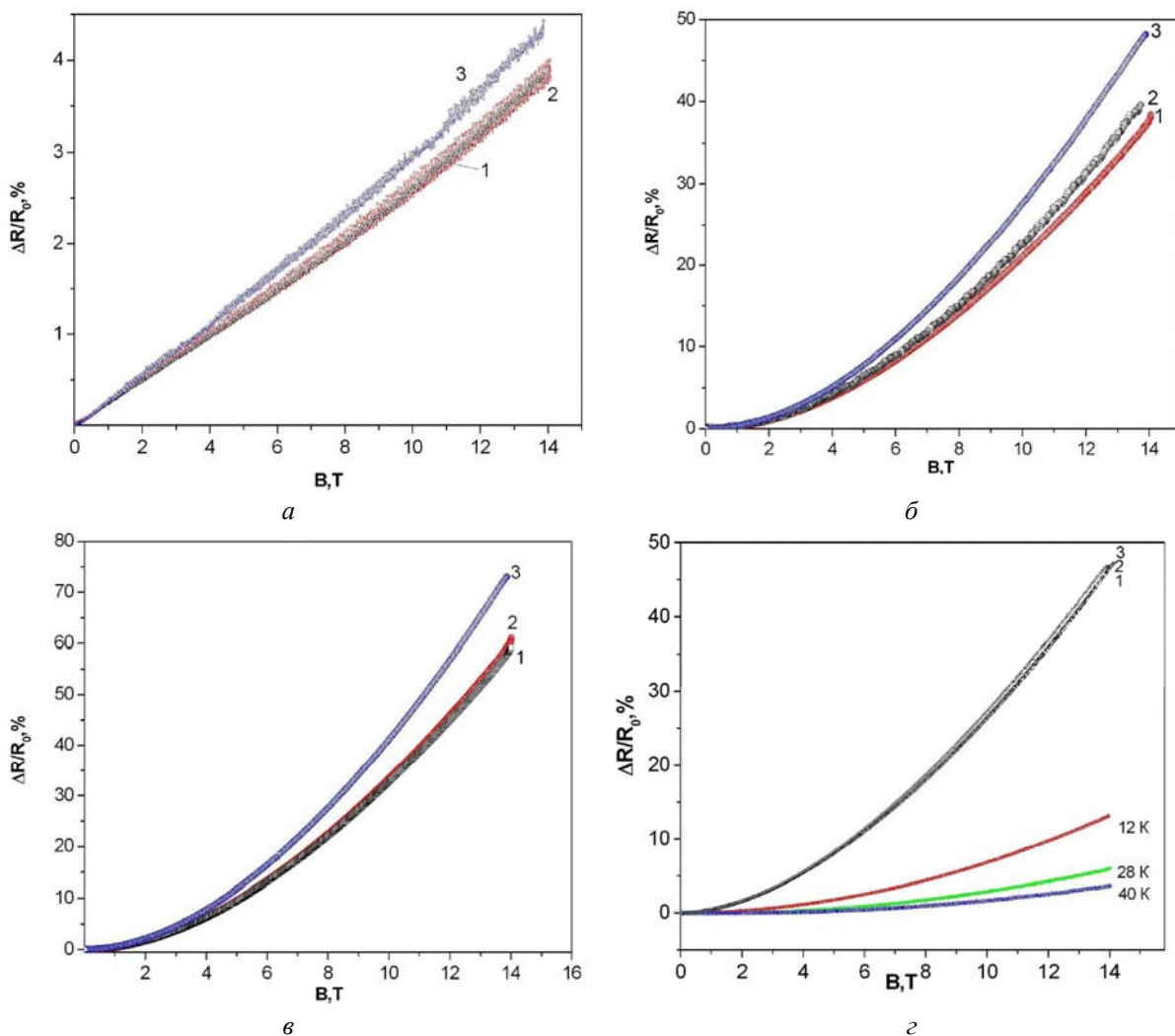


Рис. 3. Магнетоопір за 4,2 К (криві 1–3) для НК Si з $\rho_{300\text{K}}$: 0,006 Ом·см (а); 0,0104 Ом·см (б); 0,0157 Ом·см (в) та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з 0,018 Ом·см (г) при опроміненні електронами з $E=10 \text{ MeV}$ і флюенсом: 1 – $\Phi=0$; 2 – $\Phi=1 \cdot 10^{17} \text{ ел/см}^2$; 3 – $\Phi=1 \cdot 10^{18} \text{ ел/см}^2$

Проводились також дослідження впливу електронного опромінення на магнетоопір НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу провідності, легованих бором, за температури рідкого гелію. Типові експериментальні залежності для досліджених кристалів наведено на рис. 3. Як видно з наведених

графіків, магнетопір цих кристалів збільшується після опромінення. Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір і магнетопір кристалів за низьких температур: одночасно зі збільшенням опору за низьких температур після опромінення зростає і їх магнетопір. При флюенсі $\Phi=1 \times 10^{17}$ ел/см² магнетопір опромінених кристалів змінюється дуже слабо порівняно з неопроміненими кристалами, а при $\Phi=1 \times 10^{18}$ ел/см² спостерігаються помітні зміни величини магнетопору за температури рідкого гелію.

Зростання температури вимірювання від 4,2 до 40 К приводить до зменшення абсолютної величини магнетопору, що проілюстровано на рис. 3,г для опромінених НК твердого розчину Si_{1-x}Ge_x (x=0,03) р-типу. Виявлені зміни магнетопору можна пояснити особливостями стрибкової провідності носіїв у домішковій зоні за низьких температур. Під час опромінення в кристалах створюються нейтральні дефекти, які не роблять прямий внесок у провідність, а впливають на густину станів у домішковій зоні, зокрема приводять до делокалізації енергетичних рівнів. Заповнення делокалізованих станів зумовлює утворення діркових пар внаслідок антиферромагнетної обмінної взаємодії магнетних моментів носіїв [7].

Висновки

Проведено комплексні дослідження впливу електронного опромінення на низькотемпературну провідність і магнетопір НК кремнію і твердого розчину Si_{1-x}Ge_x (x=0,03), легованих бором до концентрації поблизу ПМД, які використовуються як чутливі елементи сенсорів механічних і теплових величин, працездатних в складних умовах експлуатації.

Опромінення електронами з енергією E=10 МеВ і флюенсом $\Phi=1 \times 10^{17}$ ел/см² не приводить до істотних змін опору досліджених кристалів, тоді як збільшення флюенса електронів до $\Phi=1 \times 10^{18}$ ел/см² спричиняє значні зміни опору. Зменшення провідності НК Si та Si_{1-x}Ge_x з концентрацією бору поблизу ПМД після опромінення електронами високих енергій можна пояснити як процесами розсіювання носіїв на вторинних радіаційних дефектах, що приводить до зменшення їх рухливості, так і зменшенням концентрації носіїв заряду.

Для НК кремнію і Si_{1-x}Ge_x, легованих бором спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір і магнетопір за низьких температур, а саме, зі збільшенням опору кристалів після опромінення зростає і їх магнетопір. Опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi=1 \times 10^{18}$ ел/см² зумовлює значні зміни величини магнетопору за температури 4,2 К.

Проведені дослідження створюють перспективи створення терморезистивних та тензорезистивних сенсорів на основі НК кремнію і твердого розчину Si_{1-x}Ge_x (x=0,03) р-типу з концентрацією бору поблизу ПМД, стійких до дії опромінення електронами високих енергій (E=10 МеВ) з флюенсом $\Phi \leq 1 \times 10^{17}$ ел/см², працездатних за криогенних температур.

1. Конозенко И.Д., Семенюк А.К., Хиврич В.И. Радиационные эффекты в кремнии. – К.: Наукова думка, 1974. – 199 с.
2. Вавилов В.С., Кекелидзе Н.П., Смирнов Л.С. Действие излучений на полупроводники. – М.: Наука, 1988. – 192 с.
3. Emtsev V.V., Ehrhart P., Poloskin D. S., Dedek U. Electron irradiation of heavily doped silicon: group-III impurity ion pairs // *Physica B: Condensed Matter*. – 1999. – Vol. 273–274. – P. 287–290.
4. Emtsev V.V., Ehrhart P., Poloskin D.S., Emtsev K.V. Comparative studies of defect production in heavily doped silicon under fast electron irradiation at different temperatures // *J Mater Sci: Mater Electron*. – 2007. – Vol. 18, N 7. – P. 711–714.
5. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E., Gortinska I., Yatzuk Y. Low temperature semiconductor mechanical sensors // *Sensors and Actuators*. – 2000. – A 85. – P. 153–157.
6. Дружинин А.А., Марьямова И.И., Лавитская Е.Н., Кутраков А.П., Панков Ю.М. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // *Микросистемная техника*. – 2001. – Т. 9. – С. 3–8.
7. Трофимов И.Е., Денин А.И., Мурзин В.П. Магнитосопротивление по D зоне. – М.: ФИАН, 1989. – 15 с.