ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 11, № 3 (2010) С. 588-592

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 11, № 3 (2010) P. 588-592

УДК 621. 315.592

ISSN 1729-4428

А.О. Дружинін[1], І.Й. Мар'ямова[1], І.П. Островський[1], Ю.М. Ховерко[1], Н.С. Лях-Кагуй [1], В.Т. Маслюк[2], І.Г. Мегела[2]

# Вплив електронного опромінення на низькотемпературну провідність легованих ниткоподібних кристалів Si та Si-Ge

*[1]Національний університет "Львівська політехніка", НДЦ "Кристал",*
*вул. Котляревського,1, м.Львів,79013, тел. (032)2582144, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua*
*[2]Інституті електронної фізики НАН України, м. Ужгород*

Вивчено вплив електронного опромінення з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 1\cdot10^{17}$ ел/см$^2$ та $1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$ на низькотемпературну провідність і магнетоопір НК кремнію і $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) p-типу з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД). Показано, що опромінення викликає зменшення провідності досліджених кристалів, особливо при флюенсі $\Phi = 1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$. Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір та магнетоопір кристалів за гелієвих температур. Проведені дослідження дозволяють прогнозувати радіаційну стійкість сенсорів на основі досліджених кристалів Si та $Si_{1-x}Ge_x$ до дії опромінення високоенергетичними електронами (E = 10 МеВ) з флюенсом $\Phi \le 1\cdot10^{17}$ел/см$^2$.

**Ключові слова:** ниткоподібні кристали, кремній, тверді розчини кремній-германій, провідність, магнетоопір, електронне опромінення.

*Стаття поступила до редакції 03.03.2010; прийнята до друку 15.06.2010.*

## Вступ

Вивчення впливу електронного опромінення на монокристалічний кремній та твердий розчин Si-Ge є актуальними як з точки зору розширення фізичних уявлень про дію радіації на основні параметри кристалів (провідність, магнітоопір), так і для оцінки їх радіаційної стійкості для створення сенсорів на їх основі. Проте такі дослідження проводились, переважно, на високоомних монокристалах кремнію і германію [1, 2]. Не так давно з'явилися дослідження [3, 4], присвячені вивченню дії електронного опромінення на сильнолегований кремній p- та n-типу провідності. Дана робота спрямована на дослідження впливу опромінення електронами високих енергій на низькотемпературну провідність легованих ниткоподібних кристалів (НК) Si та $Si_{1-x}Ge_x$ з концентрацією домішки, яка відповідає області переходу метал-діелектрик (ПМД).

## I. Об'єкт і методика досліджень

Об'єктом дослідження були ниткоподібні монокристали кремнію і твердого розчину $Si_{1-x}Ge_x$ p-типу провідності, які використовуються як чутливі елементи сенсорів фізичних величин [5, 6]. Кристали вирощувались в закритій бромідній системі методом хімічних газотранспортних реакцій; у процесі росту відбувалось їх легування бором. Вирощені мікрокрокристали мали форму шестигранних призм з шириною грані 30 - 40 мкм і довжиною 3 - 5 мм.

Для досліджень впливу електронного опромінення на низькотемпературну провідність використовувались НК Si p-типу з концентрацією домішки (бору) поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД) з питомим опором $\rho_{300K}$ = 0,009 - 0,016 Ом·см і НК $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) p-типу з $\rho_{300K}$ = 0,018÷0,025 Ом·см.

Опромінення кристалів електронами високих енергій проводилось в Інституті електронної фізики НАН України на імпульсному прискорювачі електронів типу мікротрон М-30 за кімнатної температури електронами з енергією E = 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 1\cdot10^{17}$ та $1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$ за умови середньої густини струму 10 мкА/см$^2$. Для проведення експерименту кристали розміщували в контейнері, який встановлювався у фокусі електронного пучка. З метою уникнення радіаційного нагріву кристалів під час опромінення та підтримання кімнатної температури здійснювався обдув кристалів парами рідкого азоту. Для закріплення радіаційних дефектів у кристалах проводився ізотермічний відпал опромінених кристалів за температури 120 $^0$C впродовж двох годин.

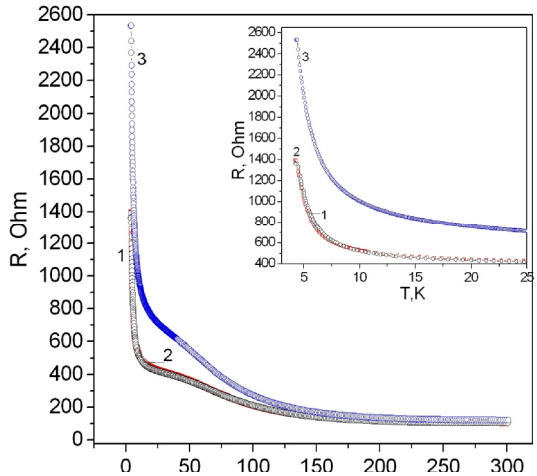
Вивчення впливу опромінення електронами на низькотемпературну, зокрема, стрибкову провідність легованих мікрокристалів Si та $Si_{1-x}Ge_x$ проводилось в інтервалі температур 4,2 - 300 К та в сильних магнітних полях з індукцією до 14 Тл у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща).

Досліджувані кристали, розміщені на спеціальній вставці, встановлювали в гелієвий кріостат, охолоджуваний парами, де спочатку відбувалось їх охолодження до температури рідкого гелію. Дослідження впливу магнетного поля на властивості мікрокристалів проводились 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 мікрокристала. Температура вимірювалась за допомогою термопари Cu - CuFe. Електрична напруга на контактах кристалів, вихідний сигнал термопари та сенсора магнітного поля вимірювались цифровими вольтметрами типу Keithley 199 та Keithley 2000 з точністю до $1\cdot10^{-6}$ В з одночасною автоматичною реєстрацією показів приладів через паралельний порт персонального комп'ютера та їх візуалізацією на екрані монітора.

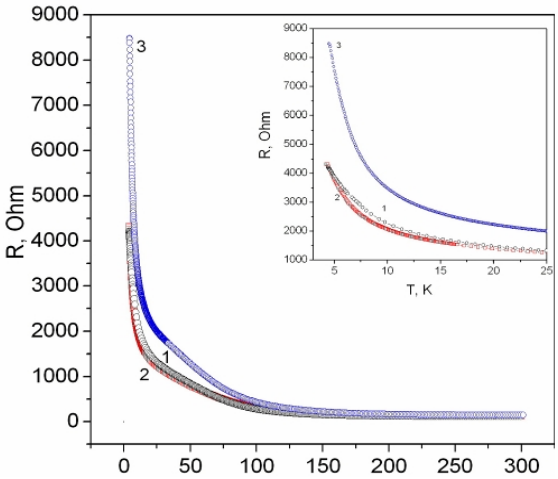
## II. Результати експериментальних досліджень

В результаті проведених досліджень виявлено, що опромінення НК кремнію з концентрацією бору поблизу ПМД з питомим опором $\rho_{300K}$ = 0,009 – 0,016 Ом·см і НК $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) з $\rho_{300K}$ = 0,018 ÷ 0,025 Ом·см електронами з енергією 10 МеВ приводить до зростання опору кристалів у всьому дослідженому інтервалі температур 4,2 – 300 К. Таким чином, спостерігалось зменшення низькотемпературної провідності досліджених кристалів за гелієвих температур. Слід зауважити, що опромінення за кімнатної температури високоенергетичними електронами з флюенсом $\Phi = 1\cdot10^{17}$ ел/см$^2$ не приводить до суттєвих змін (в межах 1–2 %) величини провідності кристалів, в той час як опромінення з флюенсом $\Phi = 1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$ зумовлює значне зменшення провідності, особливо в області низьких температур.

Зазначені вище дані добре ілюструються одержаними експериментальними результатами щодо впливу електронного опромінення на температурну залежність опору досліджених кристалів. На рис. 1 – 2 представлено типові залежності опору від температури в інтервалі 4,2 – 300 К при різних рівнях опромінення високоенергетичними електронами для НК кремнію р-типу з питомим опором $\rho_{300K}$ = 0,0114 Ом·см (безпосередньо на переході метал-діелектрик) і з $\rho_{300K}$ = 0,0157 Ом·см (діелектрична сторона ПМД), а також для НК твердого розчину $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) з




а)




б)

**Рис. 1.** Температурна залежність опору НК Si р-типу з $\rho_{300K}$ = 0,0114 Ом·см (а) і 0,0157 Ом·см(б) при опроміненні електронами з E = 10 МеВ і флюенсом: 1 – Ф = 0; 2 – $\Phi = 1\cdot10^{17}$ ел/см$^2$; 3 – $\Phi = 1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$.

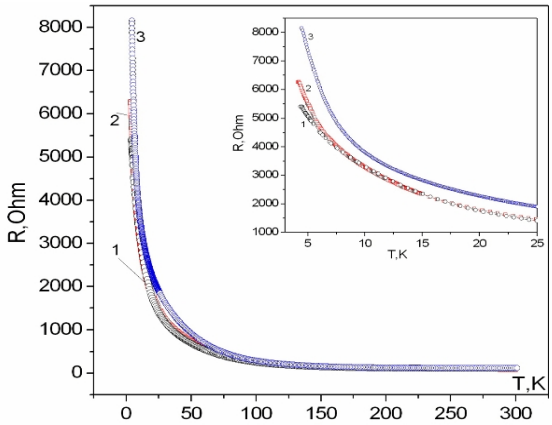



**Рис. 2.** Температурна залежність опору НК $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) р-типу з $\rho_{300K}$ = 0,018 Ом·см при опроміненні електронами з E = 10 МеВ і флюенсом: 1 – Ф = 0; 2 – $\Phi = 1\cdot10^{17}$ел/см$^2$; 3 – $\Phi = 1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$.

$\rho_{300K}$ = 0,018 Ом·см. Одержані результати щодо збільшення опору, тобто зменшення низькотемпературної провідності мікрокристалів Si та $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) з концентрацією домішки поблизу ПМД внаслідок опромінення електронами можна пояснити наступним. При опроміненні кремнію, легованого бором, утворюються, зокрема, комплекс вакансія + бор, якому відповідає рівень $E_v$ + 0,45еВ, а також пара міжвузельний атом бора + бор заміщення, якому відповідає рівень $E_c$ - 0,26 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 Е = 10МеВ атомам кремнію у лобовому зіткненні (максимальна передана енергія) передається енергія 8,5 КеВ. Атом кремнію з такою енергією створює каскад зміщень. Передана електроном атому енергія при зіткненні залежить від прицільного параметра і змінюється від порогової (пара Френкеля) до максимальної. Таким чином, при опроміненні кремнію електронами з енергією Е = 10 МеВ створюється набір кластерів з різним числом зміщених атомів і, відповідно, різних розмірів [1]. Отже, зменшення провідності НК кремнію, легованого бором, після опромінення електронами високих енергій зумовлено як процесами розсіювання носіїв струму на вторинних радіаційних дефектах, яке приводить до зменшення рухливості носіїв, так і зменшенням концентрації носіїв.

Одержані експериментальні результати для НК кремнію добре узгоджуються з даними роботи [4], в якій наведено результати дослідження впливу електронного опромінення на провідність сильнолегованого кремнію р-типу.

Під час аналізу низькотемпературної провідності досліджених мікрокристалів, які піддавались впливу електронного опромінення, значна увага приділялась вивченню стрибкової провідності, яка проявляється в області температур, близьких до температури рідкого гелію. За формулою:

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

де $E_1$ - енергія термоіонізації основного домішкового стану (акцепторного);

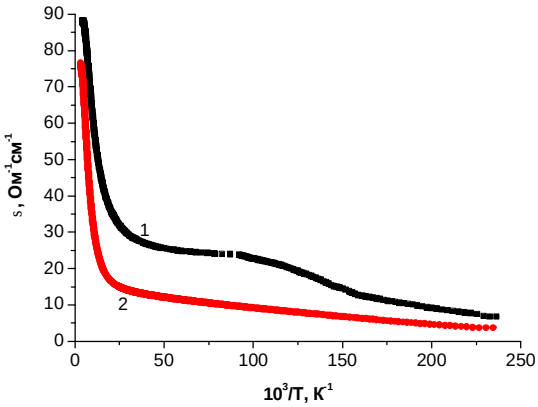
$E_2$ - енергія активації стрибкової провідності по двічі окупованих домішкових станах;

$E_3$ - енергія активації стрибкової провідності з незалежними (некорельованими) стрибками по парах домішкових центрів;

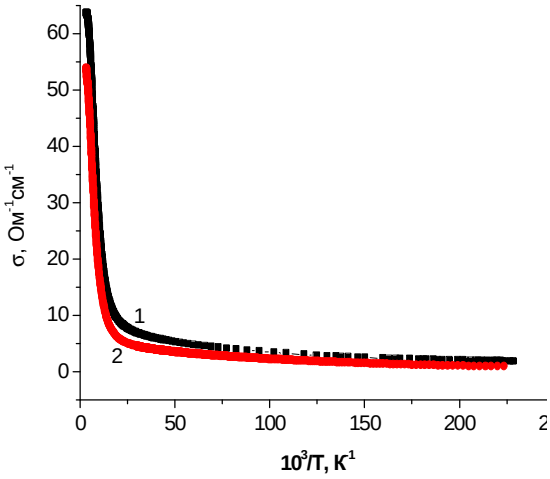
Для всіх досліджених кристалів були розраховані енергії активації стрибкової провідності.

На рис. 3 наведено типові температурні залежності провідності НК Si р-типу з концентрацією бору поблизу ПМД до і після опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом Ф = $1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$, з яких розраховувались енергії активації стрибкової провідності.

У мікрокристалах кремнію р-типу, легованих бором, з питомим опором $\rho_{300K}$ = 0,009 - 0,0114 Ом·см було виявлено тільки енергію активації $E_3$ в




а)




б)

**Рис. 3.** Температурна залежність провідності НК Si р-типу з $\rho_{300K}$ = 0,0114 Ом·см (а) і 0,0157 Ом·см (б) при опроміненні електронами з Е = 10 МеВ і флюенсом: 1 – Ф = 0; 2 – Ф = $1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$.

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. У таблиці наведено значення енергій активації стрибкової провідності для деяких досліджених мікрокристалів Si та $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) р-типу, легованих бором.

Як зрозуміло з наведеної таблиці, під впливом опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом Ф = $1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$ спостерігається тенденція до зменшення енергії активації стрибкової провідності $E_3$ і до незначного зростання енергії активації $E_2$.

Проводились також дослідження впливу електронного опромінення на магнетоопір НК Si та $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) р-типу провідності, легованих бором, за температури рідкого гелію. Типові експериментальні залежності для досліджених кристалів наведено на рис. 4 - 5.

**Таблиця**

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

| Матеріал | $\rho_{300K}$, Ом см | **Енергія активації, меВ** | | | Електронне опромінення 10 МеВ |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **$E_3$** | **$E_2$** | **$E_1$** | |
| ***Si*** | 0,0114 | 0,9 (4,5-6 К) | - | 10,8 (60-100 К) | Ф=0 |
| | | 0,7 (4,5-20 К) | - | 10,9 (75-200К) | $Ф=1\times10^{18}$см$^{-2}$ |
| | 0,0157 | 0,4 (4,4-6 К) | 0,81 (7,5-20 К) | 17,5 (70-165 К) | Ф=0 |
| | | 0,3(4,3–4,7 К) | 0,85 (5,7-21К) | 18,2 (82-208К) | $Ф=1\times10^{18}$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) | Ф=0 |
| | | 0,31 (4,5-14 К) | 1,15 (14-20К) | 41,15 (20-75 К) | $Ф=1\times10^{18}$см$^{-2}$ |

Як видно з наведених графіків, магнетоопір цих кристалів збільшується після опромінення. Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір та магнетоопір кристалів за низьких температур: одночасно зі збільшенням опору мікркристалів при низьких температурах після опромінення зростає і їх магнетоопір (рис.1 - 4; рис. 2 - 5).

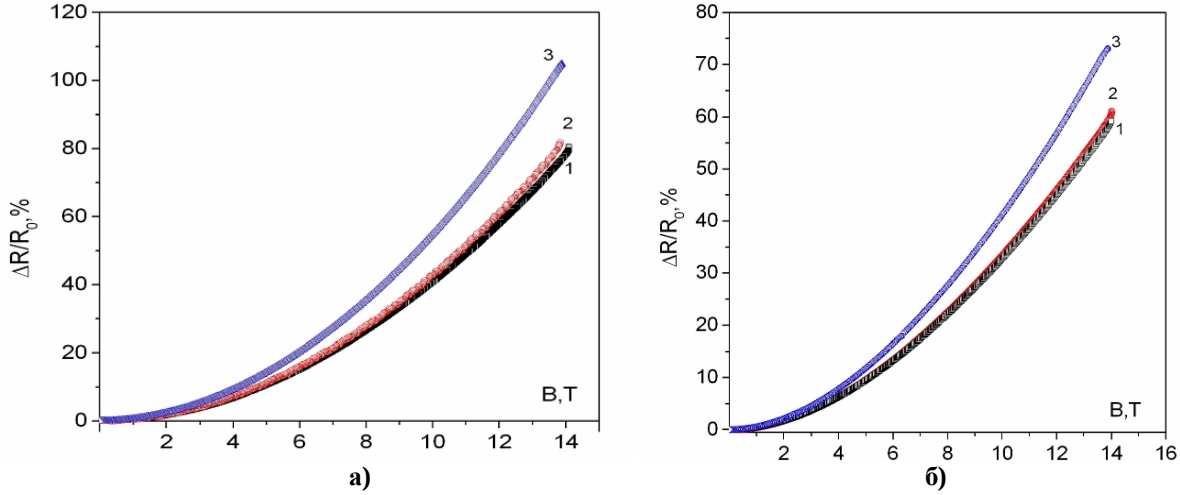



**Рис. 4.** Магнетоопір НК Si р-типу з $\rho_{300K}$ = 0,0114 Ом·см (а) і 0,0157 Ом·см(б) за 4,2 К при опроміненні електронами з Е = 10 МеВ і флюенсом: 1 – Ф = 0; 2 – Ф = $1\cdot10^{17}$ел/см$^2$; 3 – Ф = $1\cdot10^{18}$ел/см$^2$.

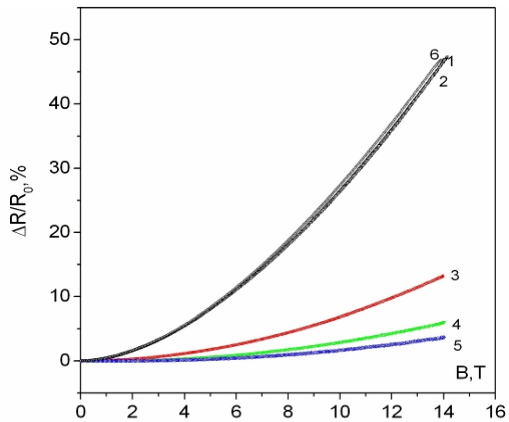



**Рис. 5.** Магнетоопір НК $Si_{1-x}Ge_x$ (x=0,03) р-типу з $\rho_{300K}$ = 0,018 Ом×см при опроміненні електронами з Е = 10 МеВ і флюенсом: Ф = 0 за Т = 4,2 К (1); Ф = $1\cdot10^{17}$ел/см$^2$ за Т = 4,2 К(2); 12,5 К(3); 28 К(4); 40 К(5); Ф = $1\cdot10^{18}$ел/см$^2$ за Т = 4,2 К (6).

При флюенсі Ф = $1\cdot10^{17}$ ел/см$^2$ магнетоопір опромінених кристалів змінюється дуже слабо у порівнянні з неопроміненими зразками, а при Ф = $1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$ спостерігаються помітні зміни величини магнетоопору за температури рідкого гелію (рис. 4 - 5). Під час підвищення температури вимірювання від 4,2 К до 40 К магнетоопір опромінених кристалів зменшується.

## Висновки

Показано, що низькотемпературна провідність НК Si р-типу з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик ($\rho_{300K}$ = 0,009 – 0,016 Ом×см) і НК $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) р-типу `($\rho_{300K}$ = 0,018÷0,025 Ом×см) зменшується після опромінення високоенергетичними електронами з енергією Е = 10 МеВ у залежності від флюенсу. Для флюенсу Ф = $1\cdot10^{17}$ ел/см$^2$ провідність мікрокристалів змінюється дуже мало (в межах 1-2 %), тоді як

опромінення з флюенсом $\Phi = 1\times10^{18}$ ел/см$^2$ викликає значне зменшення провідності, зокрема, стрибкової, за низьких температур. Зменшення провідності досліджених кристалів після опромінення електронами високих енергій зумовлено як процесами розсіювання носіїв заряду на вторинних радіаційних дефектах, так і зменшенням концентрації носіїв.

Для цих же кристалів спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір та магнетоопір за гелієвих температур, а саме, зі збільшенням опору мікрокристалів за низьких температур після опромінення зростає і їх магнетоопір. Під час опромінення електронами з енергією 10 МеВ і $\Phi = 1\cdot10^{18}$ ел/см$^2$ спостерігаються помітні зміни величини магнетоопору при 4,2 К. При підвищенні температури вимірювання (до 40 К) магнетоопір опромінених кристалів зменшується.

Проведені дослідження дозволяють прогнозувати радіаційну стійкість сенсорів фізичних величин на основі кремнію р-типу з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик та легованих кристалів твердих розчинів $Si_{1-x}Ge_x$ (x = 0,03) р-типу провідності до дії опромінення високоенергетичними електронами (E = 10 МеВ) з флюенсом $\Phi \le 1\cdot10^{17}$ ел/см$^2$.


[1] И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные эффекты в кремнии*. Наукова думка, Київ. 199 с. (1974).

[2] В.С. Вавилов, Н.П. Кекелидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники*. Наука, М. 192 с. (1988).

[3] V.V. Emtsev, P. Ehrhart, D. S. Poloskin, U. Dedek. Electron irradiation of heavily doped silicon: group-III impurity ion pairs // *Physica B: Condensed Matter*., **273-274**, pp. 287-290. (1999).

[4] V.V. Emtsev, P. Ehrhart, D. S. Poloskin, K. V. Emtsev. Comparitive studies of defect production in heavily doped silicon under fast electron irradiation at different temperatures // *J Mater Sci: Mater Electron.*, **18(**7), pp. 711-714. (2007).

[5] I. Maryamova, A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Gortinska, Y. Yatzuk. Low temperature semiconductor mechanical sensors // *Sensors and Actuators*, **A 85**, pp. 153-157 (2000).

[6] 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).



A.A. Druzhinin[1], I.I. Maryamova[1], I.P. Ostrovskii[1], Yu.M. Khoverko[1], N.S. Liakh-Kaguj[1], V.T. Masluk[2], I.G. Megela[2]


# Influence of Electron Irradiation on The Low Temperature Conductivity of Doped Si and Si-Ge Whiskers


*[1]Lviv Polytechnic National University, Sci.-Research Center "Crystal"*
*1, Kotlyarevsky Str., Lviv, 79013, Ukraine, Tel. (032)2582144, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua.*
*[2]Institute of Electron Physics NAS of Ukraine, Uzhgorod, Ukraine*



Influence of electron irradiation with energy 10 MeV and fluence $\Phi=1\times10^{17}$ and $1\times10^{18}$ el/cm$^2$ on low temperature conductivity and magnetoresistance of p-type silicon and $Si_{1-x}Ge_x$ (x=0,03) whiskers with boron concentration in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) have been studied. It was shown that electron irradiation caused the decrease of crystal conductivity, especially at the fluence $\Phi=1\times10^{18}$ el/cm$^2$. Correlation between influence of electron irradiation on crystal resistance and magnetoresistance at helium temperatures was observed. These studies gave the possibility to predict stability of sensors on the basis of investigated Si and $Si_{1-x}Ge_x$ crystals to irradiation by high energy electrons (E=10 MeV) with fluence $\Phi\le1\times10^{17}$ el/cm$^2$.



**Key words:** whiskers, silicon, silicon-germanium solid solution, conductivity, magnetoresistance, electron irradiation.