

НАНОСЕНСОРИ (ФІЗИКА, МАТЕРІАЛИ, ТЕХНОЛОГІЯ)

NANOSENSORS (PHYSICS, MATERIALS, TECHNOLOGY)

УДК 621.315.592

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА НИТКОПОДІБНІ КРИСТАЛИ SI, SIGE ТА ШАРИ ПОЛІКРЕМНІЮ

*А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. П. Островський, Ю. М. Ховерко,
О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй*

НУ “Львівська політехніка”, НДЦ “Кристал”, вул. Котляревського, 1, м. Львів, 79013, Україна,
тел. (032)2582144, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА НИТКОПОДІБНІ КРИСТАЛИ SI, SIGE ТА ШАРИ ПОЛІКРЕМНІЮ

*А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. П. Островський, Ю. М. Ховерко,
О. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй*

Анотація. Проведено комплексне дослідження по впливу опромінення електронами з енергією $E=10$ MeV та різним флюенсом ($\Phi=1\times10^{16} - 1\times10^{18}$ ел/см²) на основні властивості легованих бором ниткоподібних кристалів (НК) кремнію, твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу та шарів полікремнію на ізоляторі, рекристалізованих лазером, з різною концентрацією носіїв у широкому інтервалі температур 4,2 — 300 К. Показано, що опромінення викликає зменшення провідності НК Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ та шарів полікремнію, особливо за криогенних температур. Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір та магнітоопір досліджених кристалів та шарів полікремнію. Вивчено також вплив одновісної деформації на провідність опромінених НК Si, вироджених та з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД), для яких розраховано коефіцієнт тензочутливості в інтервалі температур 4,2—300 К. Проведені дослідження дозволяють прогнозувати радіаційну стійкість сенсорів на основі досліджених НК Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ та сильно легованих шарів полікремнію до дії опромінення електронами з $E\leq10$ MeV і флюенсом $\Phi\leq1\times10^{17}$ ел/см².

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній, тверді розчини кремній-германій, шари полікремнію на ізоляторі, електронне опромінення, магнітоопір, коефіцієнт тензочутливості

STUDY OF ELECTRON IRRADIATION INFLUENCE ON SI, SIGE WHISKERS AND POLYSILICON LAYERS

*A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, I. P. Ostrovskii, Yu. M. Khoverko,
A. P. Kutrakov, N. S. Liakh-Kaguj*

Abstract. The effect of electron irradiation with energy $E=10$ MeV and different fluence ($\Phi=1\times10^{16} - 1\times10^{18}$ el/cm²) on main properties of boron doped silicon, p-type $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.03$) solid solutions whiskers and laser recrystallized polysilicon on insulator layers with different carrier concentration has been studied in the wide temperature range of 4.2 — 300 K. It was shown

that electron irradiation caused the decrease of Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers and poly-Si layers conductivity, especially at cryogenic temperatures. Correlation between the influence of electron irradiation on resistance and magnetoresistance of crystals and layers has been observed. The uniaxial strain effect on the conductivity of irradiated Si whiskers, degenerated and with boron concentration in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) was studied, the gauge factor for these crystals has been calculated in 4.2 — 300 K temperature range. These studies gave the possibility to predict the stability of sensors on the basis of investigated Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ whiskers and heavily doped poly-Si layers to high energy electron irradiation ($E \leq 10$ MeV) with fluence $\Phi \leq 1 \times 10^{17}$ el/cm².

Key words: whiskers, silicon, silicon-germanium solid solution, polysilicon on insulator layers, electron irradiation, magnetoresistance, gauge factor

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА НИТЕВИДНЫЕ КРИСТАЛЛЫ Si , SiGe И СЛОИ ПОЛИКРЕМНИЯ

*А. А. Дружинин, И. И. Марьямова, И. П. Островский, Ю. М. Ховерко,
А. П. Кутраков, Н. С. Лях-Кагуй*

Аннотация. Проведено комплексное исследование влияния облучения электронами с энергией $E=10$ MeV и разным флюэнсом ($\Phi=1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{18}$ ел/см²) на основные свойства легированных бором нитевидных кристаллов (НК) кремния, твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типа и слоев поликремния на изоляторе, рекристаллизованных лазером, с разной концентрацией носителей в широком интервале температур 4,2 — 300 К. Показано, что облучение вызывает уменьшение проводимости НК Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и слоев поликремния, особенно при криогенных температурах. Наблюдается корреляция между влиянием электронного облучения на сопротивление и магнитосопротивление исследуемых кристаллов и слоев поликремния. Изучено также влияние одноосной деформации на проводимость облученных НК Si, вырожденных и с концентрацией бора вблизи перехода металл-диэлектрик (ПМД), для которых рассчитано коэффициент тензочувствительности в интервале температур 4,2—300 К. Проведенные исследования дают возможность прогнозировать радиационную стойкость сенсоров на основе исследованных НК Si, $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ и сильно легированных слоев поликремния к действию облучения электронами с $E \leq 10$ MeV и флюэнсом $\Phi \leq 1 \times 10^{17}$ ел/см².

Ключевые слова: нитевидные кристаллы, кремний, твердые растворы кремний-германий, слои поликремния на изоляторе, электронное облучение, магнитосопротивление, коэффициент тензочувствительности

Вступ

Необхідність створення радіаційно стійких сенсорів зумовлена потребами різних галузей науки і техніки. Тому вивчення впливу електронного опромінення на ниткоподібні кристали (НК) кремнію, твердого розчину Si-Ge та шари полікремнію на ізоляторі (КНІ-структури), які використовуються як чутливі елементи сенсорів механічних і теплових величин [1—3], є актуальними як з точки зору розширення фізичних уявлень про дію радіації на основні параметри кристалів, так і для оцінки радіаційної стійкості сенсорів на їх основі.

Об'єкт і методика досліджень

Об'єктами дослідження були:

- ниткоподібні кристали (НК) кремнію р-типу провідності, сильно леговані бором ($\rho_{300\text{K}}=0,006$ Ом×см) та з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД) з питомим опором $\rho_{300\text{K}}=0,009 - 0,0157$ Ом×см та НК твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) р-типу, леговані бором з $\rho_{300\text{K}}=0,018 - 0,025$ Ом×см, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій у закритій бромідній системі, з кристалографічною орієнтацією [111];
- шари полікремнію на ізоляторі, рекристалізовані лазером, з різною концентрацією

носіїв: з проміжним рівнем легування бором ($4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) та сильно леговані ($1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Проведено комплекс досліджень із впливу опромінення високоенергетичними електронами з енергією $E=10 \text{ MeV}$ та різним флюенсом на основні властивості легованих кристалів і шарів полікремнію в широкому інтервалі температур $4,2 - 300 \text{ K}$.

Основні напрямки проведених досліджень:

- вплив електронного опромінення на низькотемпературну провідність легованих НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ р-типу з концентрацією домішки (бору) поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД);

- вплив електронного опромінення на магнітоопір легованих НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ р-типу за кріогенних температур;

- вплив деформації на низькотемпературну провідність легованих НК кремнію р-типу, опромінених електронами високих енергій;

- вплив електронного опромінення на властивості шарів полікремнію на ізоляторі, рекристалізованих лазером.

Опромінення електронами високих енергій проводилось в Інституті електронної фізики НАН України на імпульсному прискорювачі електронів мікротрон М-30 за кімнатної температури електронами з енергією $E=10 \text{ MeV}$ і флюенсом $\Phi = 1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{18} \text{ ел/см}^2$. Для проведення експерименту зразки розміщували в контейнері, який встановлювався у фокусі електронного пучка. З метою уникнення радіаційного нагріву зразків під час опромінення та підтримання кімнатної температури здійснювався їх обдув парами рідкого азоту. Для закріплення радіаційних дефектів проводився ізотермічний відпал опромінених кристалів за температури 120°C впродовж двох годин.

Вивчення впливу опромінення електронами на низькотемпературну провідність легованих мікрокристалів Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ проводилось в інтервалі температур $4,2 - 300 \text{ K}$ та в сильних магнітних полях з індукцією до 14 Тл у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща). Дослідження низькотемпературної провідності та магнітоопору здійснювались за методикою, описаною в роботі [4].

Експериментальні результати

НК кремнію і твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$

Одержані експериментально типові залежності опору від температури в інтервалі $4,2 - 300 \text{ K}$ при опроміненні високоенергетичними електронами з різним флюенсом для НК кремнію р-типу з питомим опором $\rho_{300\text{K}}=0,006 \text{ Ом}\times\text{см}$ (вироджених), $\rho_{300\text{K}} = 0,0104 \text{ Ом}\times\text{см}$ (поблизу ПМД), $\rho_{300\text{K}} = 0,0157 \text{ Ом}\times\text{см}$ (віддалено від ПМД у діелектричний бік), а також для НК твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з $\rho_{300\text{K}} = 0,018 \text{ Ом}\times\text{см}$ наведено на рис. 1.

В результаті проведених досліджень виявлено, що опромінення НК кремнію з питомим опором $\rho_{300\text{K}}=0,006 - 0,0157 \text{ Ом}\times\text{см}$ і НК $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з $\rho_{300\text{K}}=0,018 \div 0,025 \text{ Ом}\times\text{см}$ електронами з енергією 10 MeV призводить до зростання опору кристалів у всьому дослідженому інтервалі температур $4,2 - 300 \text{ K}$.

Одержані результати щодо збільшення опору, тобто зменшення низькотемпературної провідності легованих бором мікрокристалів Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) внаслідок опромінення електронами можна пояснити наступним. При опроміненні кремнію, легованого бором, утворюються, зокрема, комплекс вакансія + бор, якому відповідає рівень $E_v+0,45\text{eV}$, а також пара міжвузельний атом бора + бор заміщення, якому відповідає рівень $E_c - 0,26 \text{ eV}$ [5], тобто утворюються радіаційні дефекти (РД) з глибокими акцепторними рівнями і одночасно вводяться компенсуючі донорні РД, які зменшують концентрацію дірок. Отже, зменшення провідності НК кремнію та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$), легованих бором, після опромінення електронами високих енергій зумовлено як процесами розсіювання носіїв струму на вторинних радіаційних дефектах, яке призводить до зменшення рухливості носіїв, так і зменшенням концентрації носіїв за рахунок утворення радіаційних дефектів.

Одержані експериментальні результати для НК кремнію добре узгоджуються з даними роботи [6], в якій наведено результати дослідження впливу електронного опромінення на провідність сильно легованого кремнію р-типу.

На рис. 2 наведено одержані залежності відносної зміни опору опромінених НК кремнію з різним питомим опором від флюенсу електронів з енергією 10 MeV за різних температур.

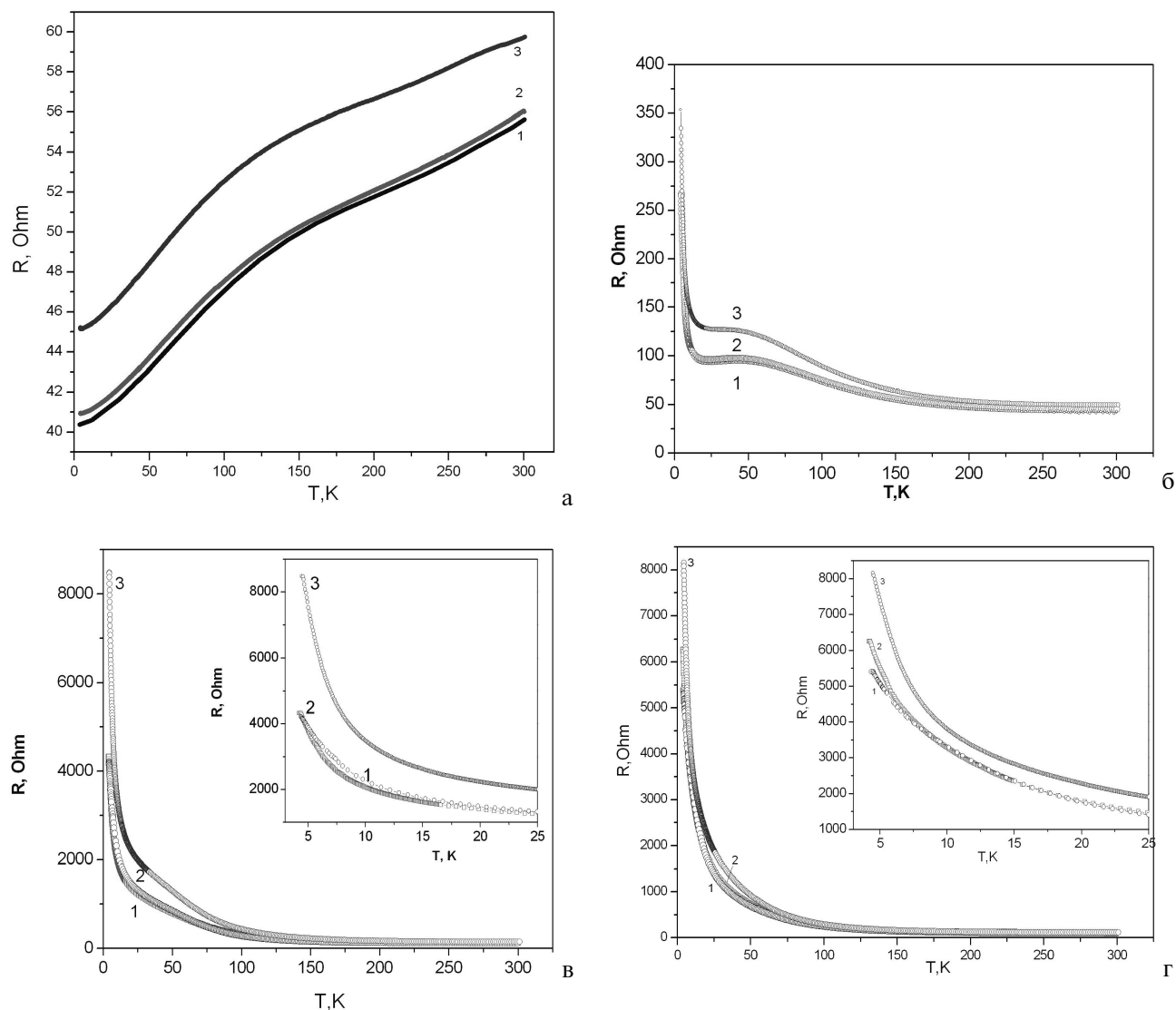


Рис. 1. Температурна залежність опору НК Si p-типу (а, б, в) і $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (г) з різним питомим опором $\rho_{300\text{K}}$: а) $0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; б) $0,0104 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; в) $0,0157 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; г) $0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, опромінених електронами ($E=10 \text{ MeV}$) з флюенсом: 1 — $\Phi=0$; 2 — $\Phi=1 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$; 3 — $\Phi=5 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$.

Встановлено наступні особливості зміни провідності (опору) досліджуваних мікрокристалів кремнію та $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ p-типу під впливом електронного опромінення:

- найменші зміни опору опромінених кристалів у всьому інтервалі температур $4,2 - 300 \text{ K}$ спостерігались для сильно легованих (вироджених) НК Si з питомим опором $\rho_{300\text{K}} = 0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$;

- зі збільшенням питомого опору кристалів (зменшенням концентрації легувочної домішки — бору) збільшується вплив опромінення на провідність (опір) 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 призводить до суттєвих змін величини провідності (опору) кристалів, що може бути використано для створення радіаційно стійких сенсорів на основі цих мікрокристалів.

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

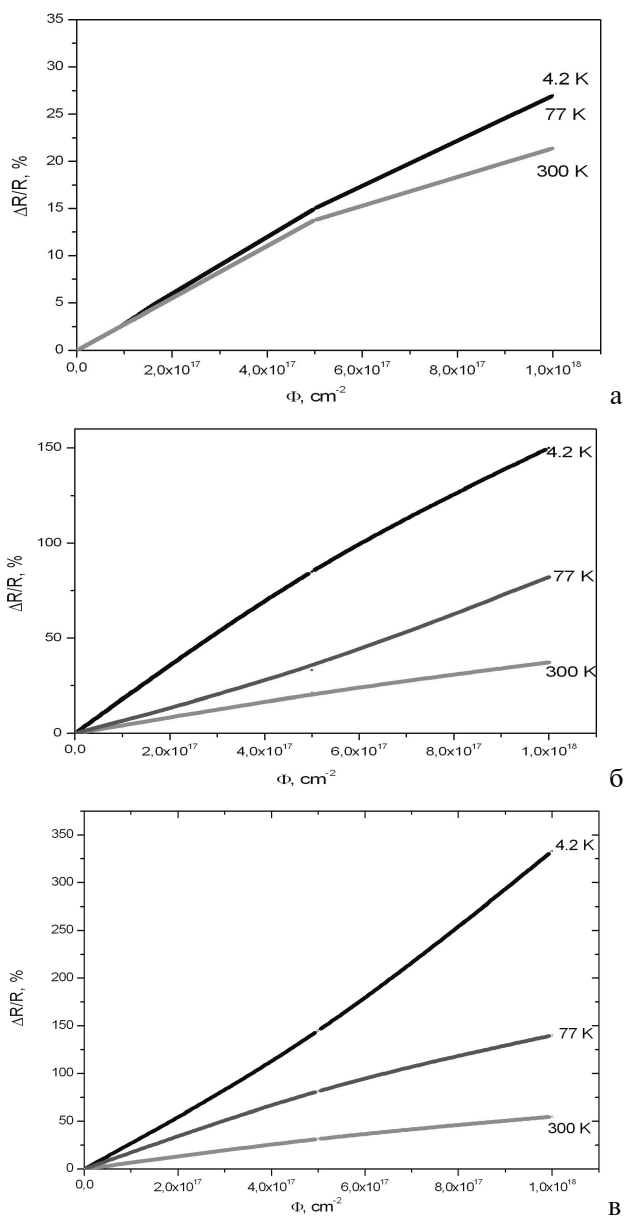


Рис. 2. Залежність відносної зміни опору кристалів від флюенсу електронів з енергією 10 МеВ для НК Si p-типу з різним питомим опором ρ_{300K} : а) 0,006 Ом·см; б) 0,0104 Ом·см; в) 0,0157 Ом·см.

Як видно з наведених графіків, магнітоопір цих кристалів збільшується після опромінення (рис. 3). Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на опір та магнітоопір кристалів за низьких температур: одночасно зі збільшенням опору мікрокристалів за низьких температур після опромінення зростає і їх магнітоопір. При флюенсі $\Phi = 1 \times 10^{17}$ ел/см² магнітоопір опромінених кристалів змінюється дуже слабо у порівнянні з неопроміненими зразками, а при $\Phi = 5 \times 10^{17}$ ел/см² спостерігаються помітні зміни величини магнітоопору за температури рідкого гелію.

Для дослідження впливу деформації на опір опромінених електронами НК Si p-типу використовувалась розроблена в лабораторії методика створення одновісної деформації кристалів за рахунок різниці коефіцієнтів термічного розширення (КТР) кристалів кремнію і матеріалу підкладки, на якій закріплювались зразки [7].

Термічна деформація кристалів розраховувалась за формулою:

$$\varepsilon_t(T) = \gamma \int_{T_0}^T [\alpha_c(T) - \alpha_s(T)] dt, \quad (1)$$

де α_c і α_s — температурні коефіцієнти лінійного розширення кристалу та підкладки;

γ — коефіцієнт, що характеризує ефективність передачі деформації від підкладки до кристала.

У цьому експерименті використовувались мідні підкладки, які дозволяли створити одновісну деформацію стиску НК Si у кристалографічному напрямку [111]. За формулою (1) розраховувалась величина одновісної деформації, яка діє на НК кремнію, закріпленій на мідній підкладці, в інтервалі температур 4,2 — 300 К. За температури 4,2 К ця деформація з врахуванням коефіцієнта $\gamma = 0,8$ становить $\varepsilon = -4,35 \times 10^{-3}$ відн.од.

З одержаних експериментальних даних в інтервалі температур 4,2 — 300 К розраховувався коефіцієнт тензочутливості для опромінених і неопромінених кристалів за формулою (2):

$$K(T) = \frac{\Delta R_T(\varepsilon) / R_{\varepsilon=0}(T)}{\varepsilon(T)}, \quad (2)$$

де $\Delta R_T(\varepsilon)$ — зміна опору кристала під дією деформації за температури T ;

$R_{\varepsilon=0}(T)$ — значення опору недеформованого кристала за температури T ;

$\varepsilon(T)$ — одновісна деформація, яка діє на кристал, за температури T .

$\Delta R_T(\varepsilon)$ та $R_{\varepsilon=0}(T)$ визначались з експериментальних даних, а $\varepsilon(T)$ розраховувалась за формулою (1).

Для сильно легованих НК Si p-типу з питомим опором $\rho_{300K} = 0,006$ Ом·см у всьому інтервалі температур 4,2 — 300 К спостерігався класичний п'єзоопір, при якому опір кристалів зменшується за одновісної деформації стиску.

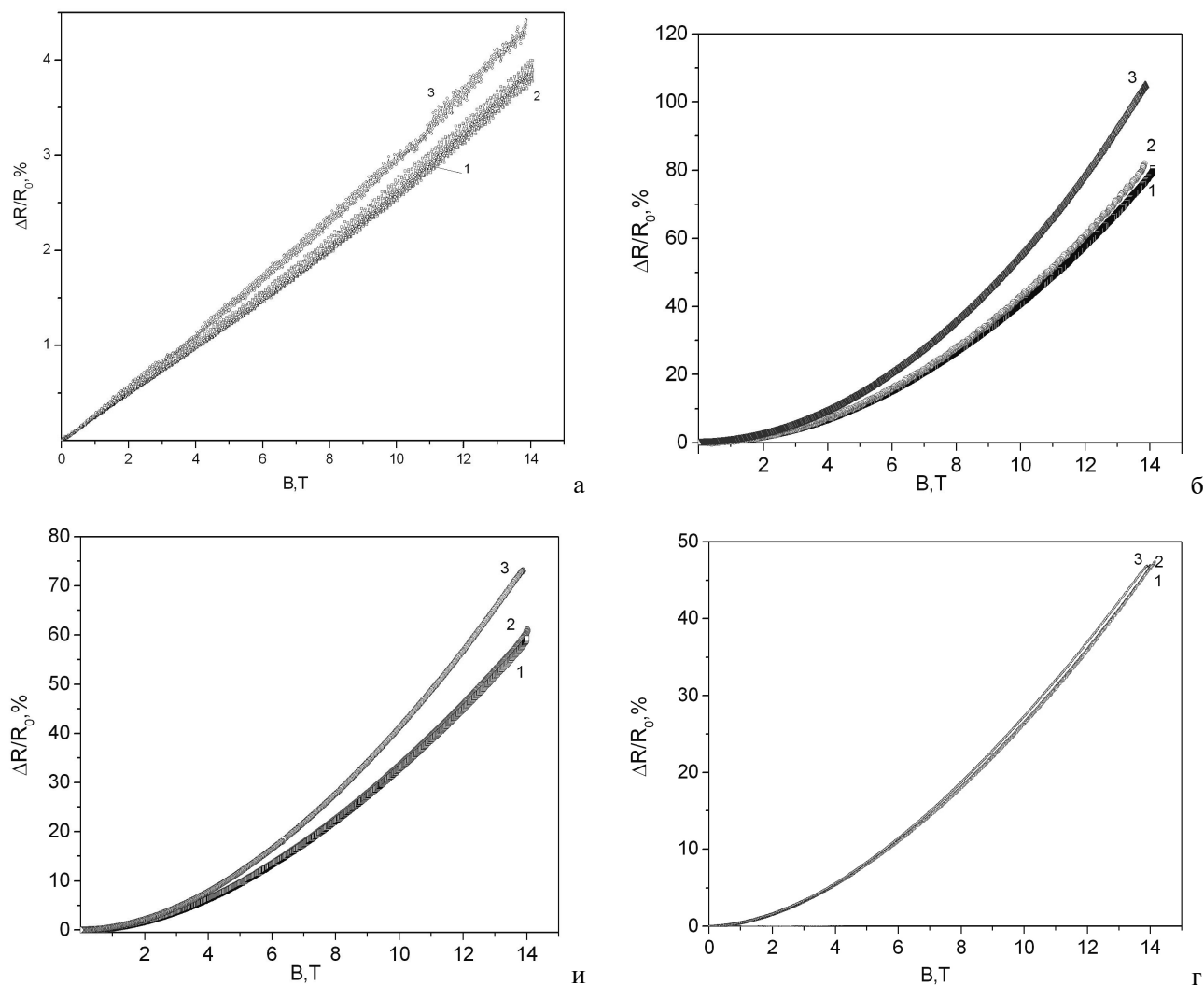


Рис. 3. Магнітоопір НК Si p-типу (а, б, в) і $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ (г) з різним питомим опором ρ_{300K} : а) $0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; б) $0,0104 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; в) $0,0157 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; г) $0,018 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, опромінених електронами ($E=10 \text{ MeV}$) з флюенсом: 1 — $\Phi=0$; 2 — $\Phi=1 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$; 3 — $\Phi=5 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$.

Для всіх досліджених НК кремнію p-типу, легованих бором, з питомим опором $\rho_{300K}=0,0104 - 0,0157 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, як опромінених, так і неопромінених при гелієвих температурах спостерігався неklasичний п'єзоопір, який характеризується значним зростанням величини опору кристалів (на кілька порядків на переході метал-діелектрик) при деформації стиску.

На рис. 4 наведено одержані температурні залежності коефіцієнта тензочутливості легованих НК кремнію p-типу з різним питомим опором до і після опромінення для деяких досліджених кристалів, сильно легованих (вироджених) та з концентрацією бору поблизу ПМД.

Виявлено наступні особливості поведінки коефіцієнта тензочутливості за низьких температур для досліджених кристалів:

— для сильнолегованих бором (вироджених) НК кремнію p-типу з питомим опором $\rho_{300K}=0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, в яких спостерігається класичний п'єзоопір, опромінення електронами з енергією 10 MeV і флюенсом $\Phi=5 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$ не призводить до зміни коефіцієнта тензочутливості цих кристалів за температури рідкого гелію, що може бути використано для створення радіаційностійких сенсорів механічних величин на основі цих кристалів;

— для НК кремнію p-типу, легованих бором до концентрацій, що відповідають безпосередній близькості до переходу метал-діелектрик, з питомим опором $\rho_{300K}=0,0104 - 0,0114 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ опромінення високоенергетичними електронами ($E=10 \text{ MeV}$, $\Phi=5 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$) значно зменшує їх коефіцієнт тензочутливості $K_{4,2K}$, при цьому в опромінених кристалах зберіга-

ються достатньо високі значення коефіцієнта тензочутливості, характерні для неklasичного п'єзоопору [8], особливо для кристалів кремнію з концентрацією бору поблизу ПМД з діелектричного боку (рис 4, в).

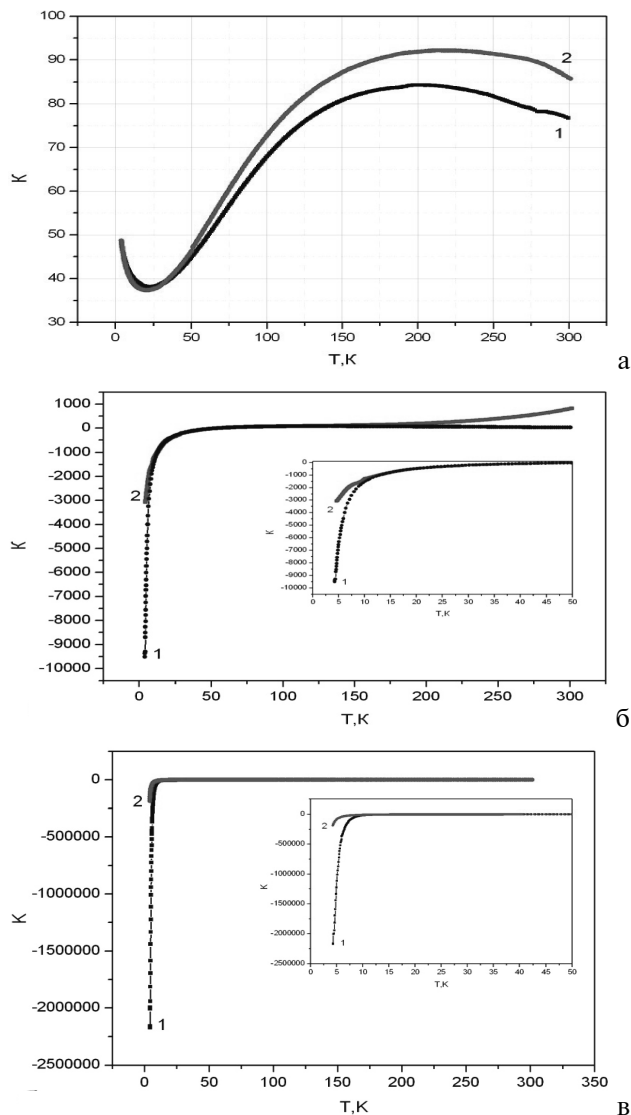


Рис. 4. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості НК p-Si(B) з різним питомим опором ρ_{300K} : а) $0,006 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; б) $0,0104 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; в) $0,0114 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, неопромінених (1) і опромінених (2) електронами з $E=10 \text{ MeV}$ і $\Phi=5 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$.

Шари полікремнію на ізоляторі

Дослідження провідності шарів полікремнію до і після опромінення проводилось у широкому інтервалі температур $4,2 - 300 \text{ K}$. На рис. 5 наведено результати вимірювання температурної залежності опору рекристалізованих лазером шарів полікремнію з концентраціями носіїв $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ до і після опромінення.

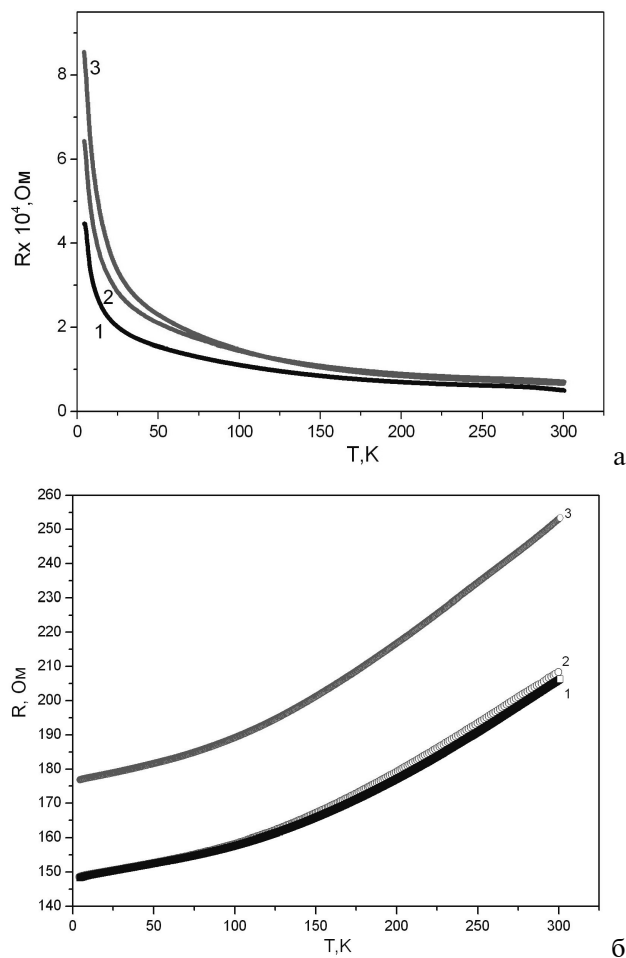


Рис. 5. Температурна залежність опору шарів полікремнію з $p_{300K}=4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (а) і $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (б) до (1) і після опромінення електронами з $E=10 \text{ MeV}$ і $\Phi=1 \times 10^{16} \text{ ел/см}^2$ (2); $\Phi=1 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$ (3)

На рис. 6 наведено зміну опору рекристалізованих шарів полікремнію з різною концентрацією носіїв заряду ($4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ і $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) для різних температур у залежності від флюенсу електронів з енергією 10 MeV .

Як видно з наведених графіків (рис. 5), опір шарів полікремнію зростає після опромінення електронами високих енергій. Найбільш помітно ця тенденція проявляється у зразках з концентрацією носіїв $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис. 6,а), в той час як для сильно легованих зразків вона значно менша (рис. 6,б).

Для високих рівнів легування шарів полікремнію за криогенних температур, коли очікується значне виморожування носіїв, кількість носіїв в об'ємі зерна стає дуже малою. Тому як основний механізм переносу носіїв заряду треба розглядати квантовий перенос носіїв по станах на границях зерен. Різниця у висоті бар'єрів на границях зерен приводить до випадкового

потенціального рельєфу, зумовленого викривленням енергетичних зон біля границь зерен. Опромінення полікремнію високоенергетичними електронами призводить до ще більшого розкиду рельєф-потенціалу (незважаючи на рекристалізацію шару полікремнію в КНІ-структурі) по поверхні полікристалічного шару. Тому ця система повинна розглядатись як дуже сильно легований і компенсований напівпровідник, де стани на границях зерен відіграють роль компенсуючих домішок. Чим нижча температура, тим більший внесок в електричні властивості квантового механізму переносу і його можна описати за допомогою теорії протікання носіїв заряду [9].

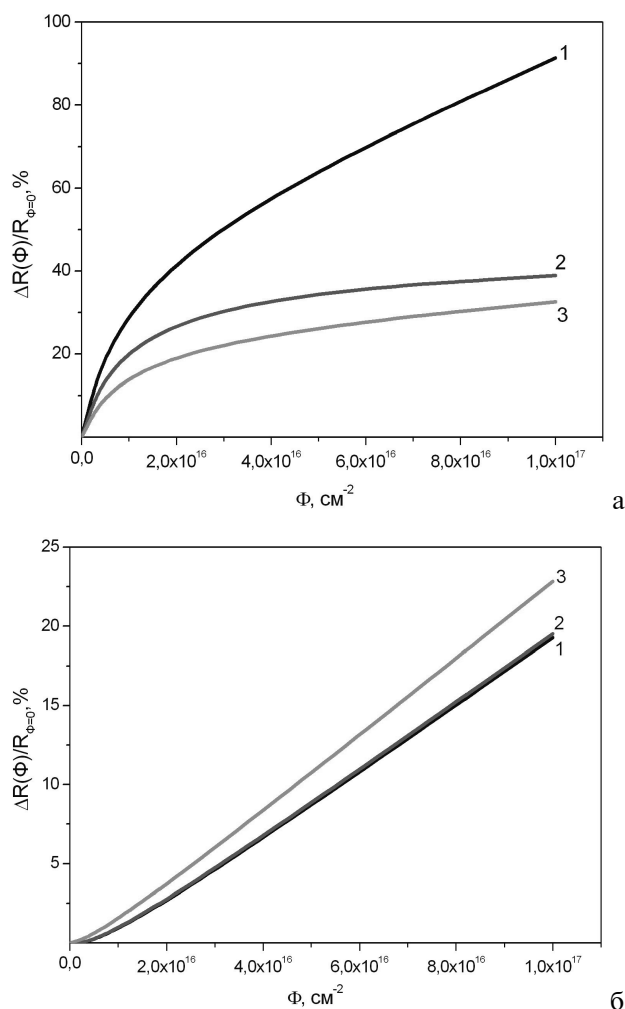


Рис. 6. Залежність відносної зміни опору рекристалізованих шарів полікремнію від флюенсу електронів з $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (а) і $1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (б): 1 — 4,2 К, 2 — 77 К, 3 — 300 К.

Досліджувався також вплив електронного опромінення на поперечний магнітоопір цих зразків полікремнію в сильних магнітних по-

лях до 14 Тл за температури рідкого гелію. Результати вимірювань магнітоопору наведено на рис. 7.

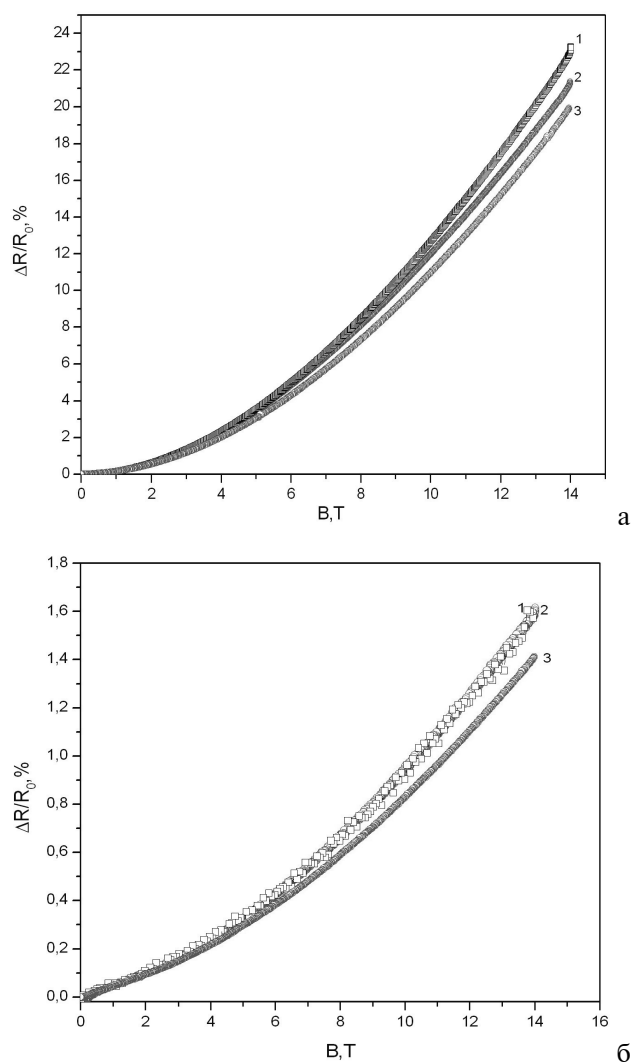


Рис. 7. Поперечний магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ (а) і $1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (б) до (1) і після опромінення електронами з $E = 10 \text{ MeV}$ і $\Phi = 1 \times 10^{16} \text{ ел/см}^2$ (2); $\Phi = 1 \times 10^{17} \text{ ел/см}^2$ (3).

Спостерігається кореляція між впливом електронного опромінення на провідність і магнітоопір шарів полікремнію за низьких температур. Зменшення рухливості носіїв заряду в опромінених зразках у порівнянні з неопроміненими призводить, відповідно, до зменшення провідності, тобто збільшення опору (рис. 5) та зменшення магнітоопору (рис. 7.) шарів полікремнію внаслідок опромінення високоенергетичними електронами.

Таким чином, найбільш радіаційно стійкі є сильно леговані шари полікремнію з концентрацією носіїв $1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ при електронному

опроміненні з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi \leq 10^{16}$ ел/см², за таких умов їх магнітоопір залишається малим і слабо змінюється, що може бути використано для створення сенсорів, стійких до дії електронного опромінення, зокрема, сенсорів механічних величин, працездатних у сильних магнітних полях за криогенних температур.

Висновки

Опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 1 \times 10^{17}$ ел/см² призводить до незначних змін опору легованих бором НК кремнію з питомим опором $\rho_{300\text{K}} = 0,006 - 0,0157$ Ом×см і твердого розчину $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0,03$) з $\rho_{300\text{K}} = 0,018$ Ом×см, тоді як опромінення з флюенсом $\Phi = 1 \times 10^{18}$ ел/см² викликає значні зміни (збільшення) опору цих кристалів за низьких температур.

Виявлено кореляцію між впливом електронного опромінення на опір та магнітоопір НК кремнію та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ за низьких температур: при збільшенні флюенса відбувається збільшення як величини опору кристалів, так і їх магнітоопору.

Для сильно легованих бором (вироджених) НК Si p-типу з $\rho_{300\text{K}} = 0,006$ Ом×см, в яких спостерігається класичний п'єзоопір, опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 5 \times 10^{17}$ ел/см² не призводить до зміни коефіцієнта тензочутливості цих кристалів за температури рідкого гелію, що відкриває можливості для створення на їх основі радіаційностійких сенсорів механічних величин.

В НК кремнію з концентрацією бору поблизу ПМД опромінення високоенергетичними електронами ($E=10$ МеВ, $\Phi = 1 \times 10^{18}$ ел/см²) призводить до зменшення коефіцієнта тензочутливості при $T=4,2$ К, однак зберігаються високі значення тензочутливості, характерні для некласичного п'єзопору.

Проведені дослідження впливу електронного опромінення на леговані бором НК Si та $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ p-типу дозволяють прогнозувати радіаційну стійкість сенсорів фізичних величин на основі цих мікрокристалів до дії опромінення високоенергетичними електронами ($E \leq 10$ МеВ) з дозою $\Phi \leq 1 \times 10^{17}$ ел/см².

Встановлено значну залежність опору рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв $4,8 \times 10^{18}$ см⁻³ від опромінення ви-

сокоенергетичними електронами ($E=10$ МеВ) з флюенсом $1 \times 10^{16} - 1 \times 10^{17}$ ел/см². Сильно леговані шари полікремнію ($1,7 \times 10^{20}$ см⁻³) проявляють більшу радіаційну стійкість, що дозволяє створити на їх основі радіаційностійкі мікроелектронні сенсори.

Виявлено кореляцію між впливом електронного опромінення на провідність і магнітоопір шарів полікремнію за низьких температур. В сильнолегованих шарах полікремнію ($p_{300\text{K}} = 1,7 \times 10^{20}$ см⁻³), опромінених електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом 10^{16} ел/см², магнітоопір залишається низьким, що може використовуватись при створенні мікроелектронних сенсорів механічних величин, дієздатних в умовах сильних магнітних полів, електронного опромінення та криогенних температур.

Результати проведених досліджень можуть бути використані для розробки радіаційностійких сенсорів, працездатних в екстремальних умовах експлуатації (сильні магнітні поля, низькі температури) для застосування в різних галузях науки і техніки, зокрема, в авіакосмічній і криогенній техніці, криоенергетиці та ін.

Список літератури

1. Дружинин А. А., Мар'ямова І. Й., Лавитская Е. Н., Кутраков А. П., Панков Ю. М. Полупроводниковые сенсоры механических величин на основе микрокристаллов кремния для экстремальных условий // Микросистемная техника. — 2001. — № 9. С. 3—8.
2. Maryamova I., Druzhinin A., Lavitska E., Gortinska I., Yatzuk Y. Low temperature semiconductor mechanical sensors // Sensors and Actuators. — 2000. — Vol. A 85. — P. 153 -157.
3. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Когут І. Т., Ховерко Ю. М. Сенсори фізичних величин на основі структур "кремній на ізоляторі" з рекристалізованим шаром полікремнію // Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2008. — № 4. С. 17—26.
4. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Павловський І. В. Вплив деформації на домішкову провідність ниткоподібних кристалів кремнію в області переходу метал-діелектрик // Фізика і хімія твердого тіла. — 2003. — Т4, № 4. С. 720—728.
5. Конозенко І. Д., Семенюк А. К., Хиврич В. І. Радиационные эффекты в кремнии. — Київ: Наукова думка, 1974. — 199 с.
6. 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, N7. — P. 711—714.
7. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldovski M., Berus T., Kunert H. W. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // *Crystal Research and Technology*. — 2002 — Vol. 37, N 2—3. — P. 243—257.
 8. Дружинін А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. П., Павловський І. В. Фізичні основи створення сенсорів механічних величин для низьких температур на основі мікрокристалів кремнію // *Сенсорна електроніка та мікросистемні технології*. — 2006. — № 3. С. 5—13.
 9. Шкловский В. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. — М.: Наука, 1979. — 416 с.