ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 12, № 4 (2011) С. 1078-1084

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 12, № 4 (2011) P. 1078-1084

УДК 621.315.592

ISSN 1729-4428

А.О.Дружинін, І.Й. Мар'ямова, О.П. Кутраков, Н.С. Лях-Кагуй

Ниткоподібні кристали кремнію для сенсорної електроніки

Національний університет «Львівська політехніка», НДЦ «Кристал», вул. Котляревського,1, м. Львів,79013,e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Для розширення функціональних можливостей сенсорів механічних величин на основі НК кремнію, легованих бором, проведено комплексне дослідження деформаційно-стимульованих ефектів у цих кристалах у широкому інтервалі температур 4,2 – 300 К за наявності сильних магнітних полів і електронного опромінення. Виявлено особливості п'єзо- і магнетоопору за низьких температур у НК Si, сильнолегованих (вироджених) та з концентрацією бору поблизу переходу метал-діелектрик (ПМД). Встановлено радіаційну стійкість НК Si до дії опромінення високоенергетичними електронами. На основі НК кремнію з різним рівнем легування розроблено ряд низькотемпературних тензорезистивних сенсорів механічних величин.

Ключові слова: ниткоподібні кристали, кремній, п'єзоопір, магнетоопір, електронне опромінення, коефіцієнт тезочутливості, сенсор механічних величин, кріогенні температури.

Стаття поступила до редакції 25.05.2011; прийнята до друку 15.09.2011.

Вступ

Ниткоподібні кристали (НК) кремнію, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій, завдяки своїй структурній досконалості, морфології, механічним властивостям і тензочутливості, успішно застосовуються як чутливі елементи тензорезистивних сенсорів механічних величин різного призначення [1, 2]. Розвиток ряду галузей техніки, таких як авіаційна, ракетно-космічна та інші, вимагає постійного вдосконалення сенсорів, причому велика увага приділяється сенсорам механічних величин, працездатних в екстремальних умовах, зокрема, в області низьких температур, сильних магнітних полів та радіаційного опромінення.

Для розширення функціональних можливостей сенсорів механічних величин на основі НК кремнію необхідно провести комплексні дослідження деформаційно-стимульованих ефектів (п'єзоопору і магнетоопору) у цих кристалах у широкому інтервалі температур 4,2 – 300 К в магнітних полях і під дією електронного опромінення.

I. Об'єкт і методика досліджень

Об'єктом дослідження є НК Si, леговані бором, з кристалографічною орієнтацією <111>, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій. Досліджувались мікрокристали кремнію, сильнолеговані (вироджені) і з концентрацією бору, що відповідала як діелектричному, так і металевому боку переходу метал-діелектрик (ПМД), враховуючи, що концентрація бору на переході становить $N_c = 5 \times 10^{18}$ см$^{-3}$ [3]. У таблиці 1 наведено основні параметри досліджуваних НК кремнію.

Деформація досліджуваних НК за кріогенних температур створювалась двома способами. Згідно методики [4], деформація НК створювалась шляхом закріплення їх на спеціально підібрані підкладки з матеріалів із відмінним від кремнію коефіцієнтом термічного розширення (КТР) за рахунок термічної

Таблиця 1

Параметри досліджуваних НК кремнію

Позначення групи зразків	Концентрація бору, см$^{-3}$	Питомий опір ρ_{300K}, Ом×см	Ступінь наближення до ПМД
Si:B1	1×10^{19}	0,006	Область металевої провідності
Si:B2	7×10^{18}	0,008	Металева область ПМД
Si:B3	$5,5\times10^{18}$	0,010	На переході метал-діелектрик
Si:B4	3×10^{18}	0,013	Поблизу ПМД з діелектричного боку

деформації, яка діє на закріплений кристал. Використовувались два типи матеріалів підкладок: мідь та кварц, що забезпечували відповідно деформацію стиску ($\varepsilon = -3{,}8\times10^{-3}$ відн. од. за 4,2 К) та розтягу ($\varepsilon = 4{,}7\times10^{-4}$ відн. од. за 4,2 К). Термічну деформацію НК кремнію, закріплених на підкладках із різних матеріалів, за фіксованих температур в інтервалі 4,2 – 300 К розраховано в роботі [4].

Для експериментального моделювання роботи п'єзорезистивних сенсорів механічних на основі НК Si p-типу кристали закріплювались на пружному елементі (консольній балці). За допомогою спеціального пристрою консольна балка піддавалась деформації, а закріплені на ній досліджувані НК – деформації стиску або розтягу. Консольна балка виготовлялась з інварного сплаву 36Н, оскільки КТР інвару близький до КТР кремнію [5]. Пристрій з консольною балкою дозволяв створювати різні рівні деформації кристалів від 0 до $\pm 1{,}25\times10^{-3}$відн. од. [6].

Вимірювання питомого опору та магнетоопору НК Si p-типу в широкому інтервалі температур та у магнітних полях проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (Вроцлав, Польща). Спеціальну вставку із зразками або пристрій з консольною балкою охолоджували до 4,2 К у гелієвому кріостаті. Стабілізований електричний струм у вимірювальній схемі задавався джерелом струму Keithley 224, електричну напругу на потенціальних контактах зразків та вихідний сигнал термопари Fe-Fe < Cu > вимірювали цифровими вольтметрами типу Keithley 199 з одночасним автоматичним записом показів приладів. Вимірювання магнетоопору в сильних магнітних полях з індукцією до 14 Тл проводили на біттерівському магніті за температури рідкого гелію.

Опромінення кристалів проводилось в Інституті електронної фізики НАНУ на імпульсному прискорювачі електронів типу мікротрон М-30 за кімнатної температури електронами з енергією E=10 МеВ і флюенсом $\Phi = 1\times10^{17} - 1\times10^{18}$ ел/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.

II. Деформаційно-стимульовані ефекти в НК Si<B> за низьких температур

Дослідження п'єзоопору НК кремнію p-типу.

В інтервалі температур 4,2 – 300 К досліджувались температурні залежності питомого опору НК Si з різною концентрацією бору, недеформованих та закріплених на підкладках. Коефіцієнт тензочутливості мікрокристалів за фіксованих температур визначався за формулою:

$$GF = \frac{[R(e) - R(e=0)]}{R(e=0)\cdot e}, \qquad (1)$$

де e - одновісна деформація кристалу, $R(e=0)$ і $R(e)$ - опір недеформованого та деформованого кристалу відповідно.

Результати вимірювань температурної залежності питомого опору НК Si з різним рівнем легування, недеформованих та деформованих, наведено на рис. 1, а температурні залежності коефіцієнта тензочутливості на - рис. 2. Для сильнолегованих НК Si:B1 у всьому температурному інтервалі 4,2 – 300 К спостерігається металевий характер провідності як для недеформованих, так і деформованих кристалів (рис. 1,а): величина коефіцієнту тензочутливості додатня і становить $GF_{4.2K} = 60$ при деформації

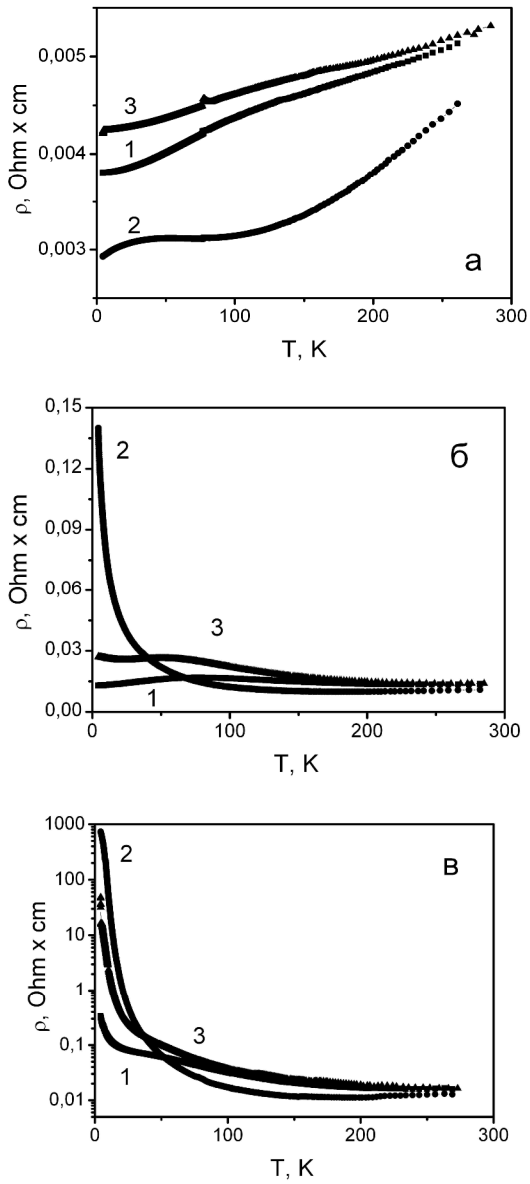


Рис. 1. Температурні залежності питомого опору НК Si:B1 (а), Si:B3 (б), Si:B4 (в): 1 – недеформований кристал, 2 – при деформації стиску, 3 – при деформації розтягу.

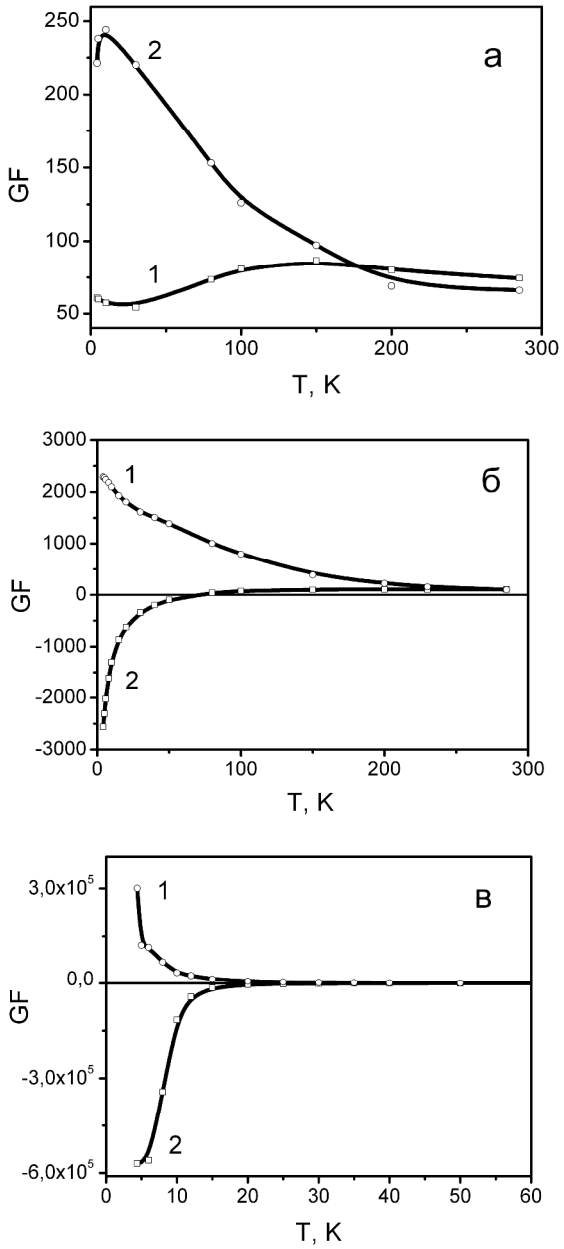


Рис. 2. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості НК Si:B1 (а), Si:B3 (б), Si:B4 (в): 1 – при деформації стиску, 2 – при деформації розтягу.

стиску (рис. 2,а), що вказує на те, що за кріогенних температур ці кристали мають класичний п'єзоопір.

При концентраціях бору поблизу ПМД у НК Si p-типу було виявлено характерні особливості п'єзорезистивного ефекту. Під впливом одновісної деформації стиску провідність НК Si:B3 за низьких температур змінює свій характер з металевого на напівпровідниковий, що приводить до зростання питомого опору (рис. 1,б), а коефіцієнт тензочутливості цих кристалів за низьких температур стає від'ємним і значно зростає за величиною: $GF_{4,2K} = -2600$ (рис. 2,б). Найбільш наочно поява некласичного п'єзоопору спостерігається в кристалах з концентрацією бору поблизу ПМД з діелектричного боку. Питомий опір кристалів Si:B4 під дією одновісної деформації стиску зростає на кілька порядків за кріогенних температур (рис. 1,в), а коефіцієнт тензочутливості за гелієвих температур досягає надзвичайно високих значень: $GF_{4.2K} = -5{,}7\times10^5$ (рис. 2,в), що свідчить про появу гігантського некласичного п'єзоопору, пов'язаного зі стрибковою провідністю [3, 7]. Це відкриває перспективи щодо створення на основі цих кристалів надчутливих сенсорів механічних величин, працездатних за температури рідкого гелію [8].

Магнетоопір НК Si за низьких температур.

Дослідження НК Si:B1 в сильних магнітних полях за температури рідкого гелію показали, що їх опір слабо змінюється під впливом магнітного поля, що зумовлено слабкою локалізацією носіїв заряду. Зміна значення опору цих кристалів не перевищує 1 % у магнітному полі з індукцією 4 Тл, що спостерігається як для недеформованих кристалів, так і при одновісній деформації стиску $\varepsilon = -3{,}8\times10^{-3}$ відн. од. за 4,2 К [9]. Такі кристали можна застосовувати для створення низькотемпературних сенсорів механічних величин, працездатних у сильних магнітних полях [10].

Дослідження магнетоопору НК Si:B3, Si:B4, концентрація домішки в яких близька до критичної концентрації ПМД, за кріогенних температур показали наступне:

– для недеформованих кристалів характерна тенденція зростання значення зміни опору в сильних магнітних полях із зменшенням рівня легування

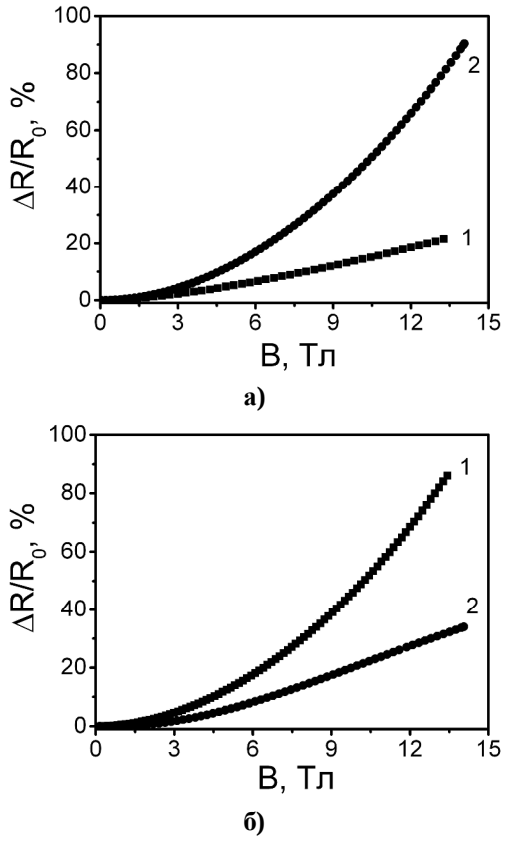


Рис. 3. Поперечний магнетоопір НК Si:B3 (а), Si:B4 (б) при T = 4,2 К: 1 – недеформований, 2 – при деформації стиску $\varepsilon = -3{,}8\times10^{-3}$ відн. од.

кристалів;

– при одновісній деформації стиску магнетоопір НК Si з концентрацією домішки з металевого боку ПМД суттєво збільшується в сильних магнітних полях (рис. 3,а), а для НК Si з концентрацією бору, що відповідає діелектричному боку ПМД, характерна протилежна картина – суттєве зменшення значення їх магнетоопору (рис. 3,б);

– для НК Si, концентрація бору в яких близька до ПМД з діелектричного боку, характерна поява від'ємного магнетоопору за 4,2 К у повздовжньому магнітному полі при деформації стиску, величина якого в області слабких полів із підвищенням рівня деформації немонотонно зменшується.

Вплив електронного опромінення на НК Si<B>.

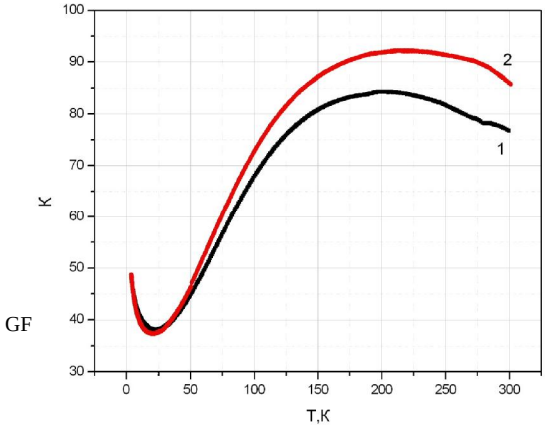
Проведено комплексні дослідження впливу електронного опромінення з енергією E = 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 1\times10^{17} - 1\times10^{18}$ ел/см^2 на НК кремнію з різним рівнем легування бором і відповідно різним ступенем наближення до ПМД [11]. Виявлено, що опромінення НК Si з питомим опором ρ_{300K} = 0,006 – 0,016 Ом×см електронами приводить до зростання опору кристалів у всьому дослідженому інтервалі температур 4,2 – 300 К, тобто спостерігалось зменшення низькотемпературної провідності кристалів за гелієвих температур. Необхідно зауважити, що опромінення високонергетичними електронами з флюенсом $\Phi = 1\times10^{17}$ ел/см^2 не приводить до суттєвих змін провідності кристалів, в той час як зростання флюенсу до 1×10^{18} ел/см^2 зумовлює значне зменшення провідності, особливо за низьких температур.

Визначено також вплив електронного опромінення на коефіцієнт тензочутливості цих кристалів в інтервалі температур 4,2 – 300 К. На рис. 4 наведено температурні залежності коефіцієнта тензочутливості для сильнолегованих кристалів та з концентрацією бору, що відповідає близькості до ПМД. Виявлено наступні особливості поведінки коефіцієнта тензочутливості за низьких температур:

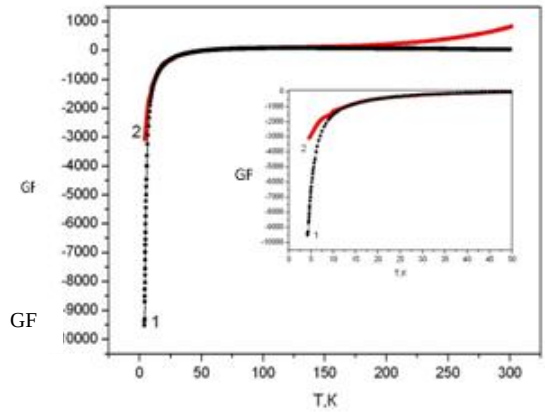
– для сильнолегованих бором НК Si p-типу з ρ_{300K} = 0,006 Ом×см, в яких спостерігається класичний п'єзоопір, опромінення електронами з енергією 10 МеВ і флюенсом $\Phi = 4\times10^{17}$ ел/см^2 не приводить до зміни коефіцієнта тензочутливості цих кристалів за температури рідкого гелію (рис. 4,а);

– для НК Si, легованих бором до концентрацій, поблизу ПМД, з ρ_{300K} = 0,0104 – 0,0114 Ом×см опромінення електронами (E = 10 МеВ, $\Phi = 4\times10^{17}$ ел/см^2) значно зменшує їх коефіцієнт тензочутливості $K_{4,2K}$, при цьому в опромінених кристалах зберігаються достатньо високі його значення, характерні для некласичного п'єзоопору (рис. 4,б).

За результатами проведених досліджень виявлено стійкість НК кремнію з певним ступенем легування бором до дії опромінення електронами високих енергій, що відкриває перспективи створення на основі таких кристалів



а)



б)

Рис. 4. Температурні залежності коефіцієнта тензочутливості НК p-Si(B) з питомим опором: а) ρ_{300K} = 0,006 Ом×см; б) ρ_{300K} = 0,0104 Ом×см, неопроміненого (1) та опроміненого (2) електронами з E = 10 МеВ і $\Phi = 4\times10^{17}$ел/см^2

радіаційностійких п'єзорезистивних сенсорів механічних величин, працездатних за низьких температур.

III. Низькотемпературні сенсори механічних величин

Для оцінки можливості створення п'єзорезистивних сенсорів механічних величин на основі НК Si для низьких температур проводилось експериментальне моделювання роботи сенсорів. З цією метою досліджувались тензометричні характеристики НК Si з різним рівнем легування бором, закріплених на пружних елементах. Експериментально визначались температурні залежності опору НК Si на пружних елементах (балках) з інварного сплаву при різних рівнях деформації балки, з яких розраховувались залежності відносної зміни опору кристалів від деформації балки за фіксованих температур 4,2 К, 77 К, 300 К і температурні залежності коефіцієнта тензочутливості.

Тензометричні характеристики НК Si:B1 у

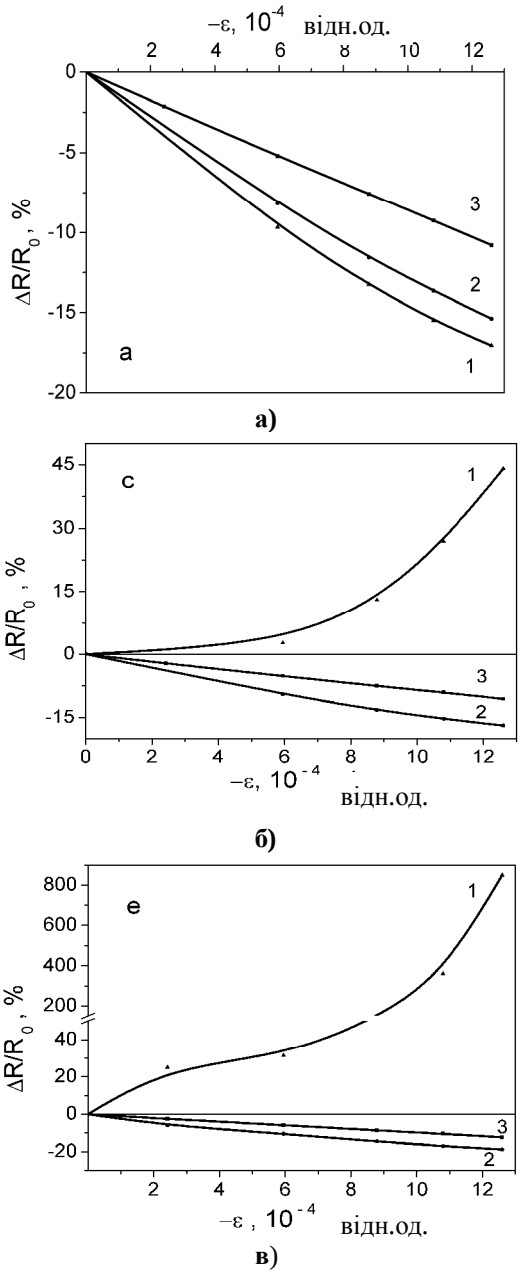


Рис. 5. Тензометричні характеристики НК p-Si(B) з різним питомим опором (а - Si:B1; б - Si:B3; в – Si:B4) на інварній балці при деформації стиску за різних температур: 1 – 4,2 К, 2 – 77 К, 3 – 300 К.

всьому інтервалі температур 4,2 – 300 К мають характер, типовий для класичного п'єзопору в кремнії р-типу (рис. 5,а). Для кристалів Si:B3 і Si:B4 в інтервалі температур 77 – 300 К спостерігався класичний п'єзоопір (криві 2 і 3 на рис. 5,б та 5,в), а за гелієвих температур тензометричні характеристики суттєво відрізняються (криві 1 на рис. 5,б, і 5,в): відбувається стрімке зростання опору кристалів під дією деформації. Коефіцієнт тензочутливості для НК Si:B3 дорівнює $GF_{4.2K} \geq 900$ при $\varepsilon = 1\times10^{-3}$ відн. од., а при деформації стиску стає від'ємним – $GF_{4.2K} = -320$; для кристалів Si:B4 коефіцієнт тензочутливості досягає значень $GF_{4.2K} = 6{,}4\times10^{3}$ при $\varepsilon = 1\times10^{-3}$ відн. од. та $GF_{4.2K} \geq -1\times10^{4}$ при $\varepsilon = -1\times10^{-3}$ відн. од.

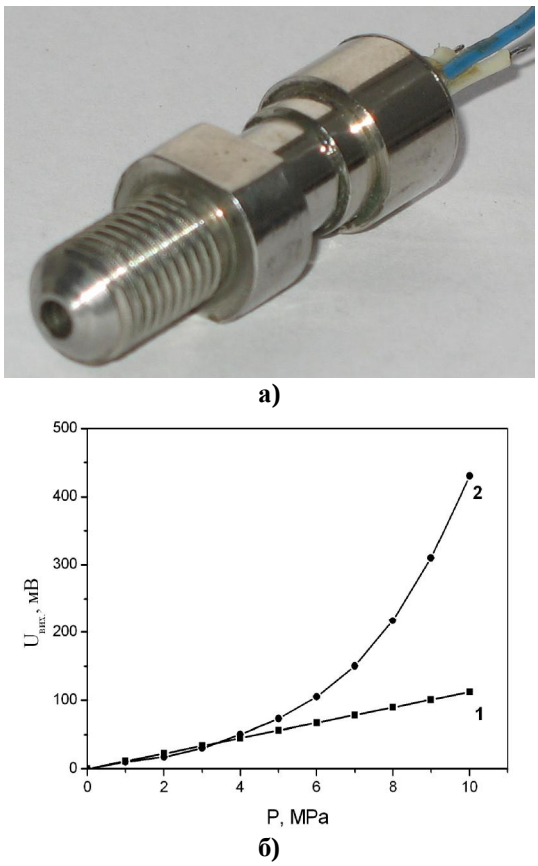
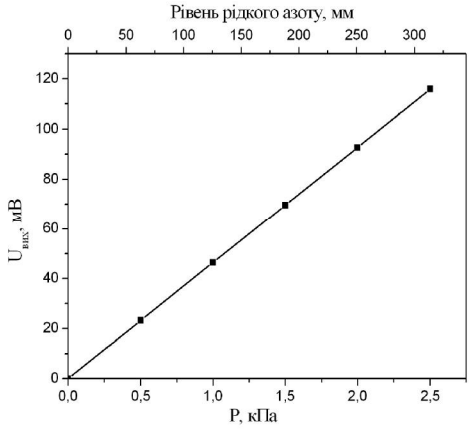


Рис. 6. Зовнішній вигляд (а) та вихідні характеристики (б) сенсора тиску рідкого гелію: 1 – мостова схема з двома активними тензорезисторами на основі НК Si:B1, 2 – схема з одним активним тензорезистором на основі НК Si:B4.

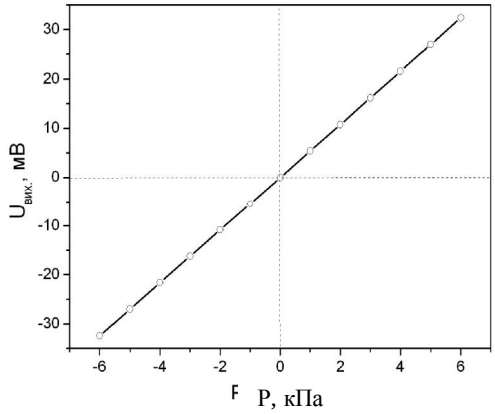
При використанні сильнолегованих НК Si:B1 (з класичним п'єзоопором) створено сенсори механічних величин, працездатні в широкому інтервалі температур від температури рідкого гелію до кімнатної. Для збільшення чутливості сенсорів механічних величин в області гелієвих температур доцільно використовувати НК Si:B4 з концентрацією бору поблизу ПМД з діелектричного боку.

Для вимірювання тиску рідкого гелію у циркуляційних системах охолодження магніту в установці ТОКАМАК розроблено сенсор тиску на діапазон 0…10 МПа (рис. 6) [2]. Сенсор розроблявся у двох модифікаціях. Для роботи в інтервалі температур 4,2 – 300 К використовувались НК Si:B1, з'єднані у мостову схему, а для роботи за температури рідкого гелію - НК Si:B4. Як видно з наведених градуювальник характеристик розробленого сенсора (рис. 6,б), використання НК Si:B4, які мають некласичний п'єзоопір за низьких температур, дозволяє значно підвищити чутливість сенсора тиску рідкого гелію. Вихідний сигнал у цьому випадку становить 470 мВ (крива 2 на рис. 6,б) без підсилення при струмі 100 мкА через тензорезистор.



а) **б)**

Рис. 7. Зовнішній вигляд (а) та градуювальна характеристика (б) сенсора тиску – рівня рідкого азоту



а) **б)**

Рис. 8. Зовнішній вигляд (а) сенсора перепаду тисків кріогенних рідин та його градуювальна характеристика при 77К (б).

Для вимірювання тиску рідкого азоту у діапазоні 0…2,5 кПа розроблено сенсор на основі НК Si:B1. Зовнішній вигляд та градуювальна характеристика такого сенсора наведено на рис. 7. Чутливість розробленого сенсора тиску становить 46 мВ/кПа при живленні постійним струмом 10мА. Розроблений сенсор тиску можна також використовувати для вимірювання рівня рідкого азоту; його чутливість становить 4мВ/мм.

Для вимірювання малих перепадів тиску ($\pm 6\times 10^{-3}$ Па) кріогенних рідин (рідкого азоту та рідкого кисню) на фоні великого статичного тиску було розроблено спеціальний сенсор. Оскільки сенсор встановлювався у перегородку баків з кріогенними рідинами, щоб уникнути спотворень під час вимірювань, товщина сенсора повинна була співпадати з товщиною перегородки, яка не перевищувала 3 мм. Розміри розробленого сенсора становили: висота – 3 мм, діаметр – 27 мм. На рис. 8 наведено зовнішній вигляд розробленого сенсора та його градуювальну характеристику для рідкого азоту. Як видно з рис. 8,б, розроблений сенсор забезпечує лінійність градуювальної характеристики у всьому діапазоні вимірюваних перепадів тиску рідкого азоту $\Delta P = \pm 6\times 10^{3}$ Па.

Висновки

Для розширення функціональних можливостей сенсорів механічних величин проведено комплексне дослідження деформаційно-стимульованих ефектів у НК кремнію, легованих бором, у широкому інтервалі температур 4,2 – 300 К за наявності сильних магнітних полів і електронного опромінення.

В НК кремнію з концентрацією бору, яка відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик, за низьких температур поблизу температури рідкого гелію виявлено гігантський некласичний п’єзоопір: коефіцієнт тензочутливості таких кристалів при одновісній деформації стиску становить $K = -6\times 10^{5}$ при 4,2 К, що відкриває перспективи створення низькотемпературних надчутливих сенсорів механічних величин.

Дослідження впливу деформації на НК Si в сильних магнітних полях до 14 Тл показали, що вироджені кристали відрізняються малим магнетоопором і можуть використовуватись як чутливі елементи сенсорів механічних величин, працездатних за низьких температур і в сильних магнітних полях.

В результаті вивчення впливу опромінення

високоенергетичними електронами на леговані НК кремнію показано, що НК Si з концентрацією бору поблизу ПМД можна використовувати як чутливі елементи сенсорів механічних величин, стійких до дії електронного опромінення з енергією E = 10 МеВ і флюенсом $\Phi \leq 1\times10^{17}$ ел/см^2, а на основі вироджених мікрокристалів можна створити тензорезистивні сенсори, стійкі до дії електронного опромінення з E = 10 МеВ і флюенсом $\Phi \leq 4\times10^{17}$ ел/см^2.

Завдяки проведеному експериментальному моделюванню роботи сенсорів на основі НК кремнію з різним рівнем легування бором, розроблено різноманітні низькотемпературні тензорезистивні сенсори тиску кріогенних рідин (рідкого азоту та рідкого гелію), перепаду тиску кріогенних рідин, сенсори рівня рідкого азоту та ін.

Дружинін А.О. - доктор технічних наук, професор, завідуючий кафедри напівпровідникової електроніки Національного університету "Львівська політехніка";
Мар'ямова І.Й. - кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Науково-дослідного центра "Кристал";
Кутраков О.П. - старший науковий співробітник Науково-дослідного центру "Кристал";
Лях-Кагуй Н.С. - кандидат технічних наук, науковий співробітник Науково-дослідного центра "Кристал".

[1] 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) .
[2] А.А. Дружинин, И.И. Марьямова, Е.Н. Лавитская, А.П. Кутраков, Ю.М. Панков. От полупроводниковых тензорезисторов к микроэлектронным датчикам // *Датчики и системы*, **№6**, сс. 2-7 (2001).
[3] J.A. Chrobochek, R.H. Pollak, H.F. Staunton. Impurity conduction in silicon and effect of uniaxial compression on p-type silicon // ***Philosophical Magazine B.***, **50(**1), pp. 113-156 (1984).
[4] A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Maryamova, M. Oszwaldowski, T. Berus, H. Kunert. Studies of piezoresistance and piezomagnetoresistance in Si whiskers at cryogenic temperatures // ***Crystal Research and Technology***, **37**(2-3), pp.243-257 (2002).
[5] С.И. Новикова. *Тепловое расширение твердых тел.* Наука, М. 294 с. (1974).
[6] A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, O.P. Kutrakov, I.V. Pavlovskyy. Silicon microcrystals with high piezoresistance at cryogenic temperatures for sensors application // ***Sensor Electronics and Microsystem Technologies***, **№1**, pp.69-77 (2004).
[7] В.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников.* Наука, М. 416 с. (1979).
[8] А.О. Дружинін, І.Й Мар'ямова, О.П. Кутраков, І.В. Павловський. *Патент України 5217*. Чутливий елемент сенсора механічних величин для температури рідкого гелію. Заявл. 04.08.2004, Опубл. 15.02.2005, Бюл.№2, сс. 2.
[9] А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, І.В. Павловський. Магнітоопір деформованих ниткоподібних кристалів кремнію при кріогенних температурах. // *2-га Українська наукова конференція з фізики напівпровідників. Матеріали конференції.* Чернівці: Рута, **2, сс**. 149–150 (2004).
[10] А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, І.В. Павловський. *Патент України 5217*. Чутливий елемент сенсора механічних величин для роботи при температурі рідкого гелію в сильних магнітних полях. Заявл.29.06.2005, Опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12, сс. 3.
[11] А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, І.П. Островський, О.П. Кутраков, Н.С. Лях-Кагуй, В.Г. Маслюк, І.Г. Мегела Вплив електронного опромінення на низькотемпературну провідність легованих ниткоподібних кристалів Si та Si-Ge // *Фізика і хімія твердого тіла*, **11**(3), сс. 588–592 (2010).

A. Druzhinin, I. Maryamova, A. Kutrakov, N. Liakh-Kaguy

Silicon Whiskers for Sensor Electronics

Lviv Polytechnic National University, Sci.-Research Center "Crystal"
1, Kotlyarevsky Str., Lviv, 79013, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua.

To extend the functional possibilities of mechanical sensors based on boron doped silicon whiskers complex studies of strain induced effects in these crystals in the wide temperature range 4,2 – 300 K at high magnetic fields and under electron irradiation were carried out. The peculiarities of piezo- and magnetoresistance of Si whiskers, heavily boron doped (degenerate) and with boron concentration in the vicinity of metal-insulator transition (MIT) were determined. The stability of Si whiskers to irradiation by high energy electrons was shown. The set of low temperature piezoresistive mechanical sensors based on silicon whiskers with different doping level was developed.

Key words: whiskers, silicon, piezoresistance, magnetoresistance, electron irradiation, gauge factor, mechanical sensor, cryogenic temperatures.