

*Дружинін А. О., Павловський І. В.*

## ДЕФОРМАЦІЙНІ ЗАЛЕЖНОСТІ МАГНІТООПОРУ НИТКОПОДІБНИХ КРИСТАЛІВ КРЕМНІЮ В ОБЛАСТІ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ МЕТАЛ-ДІЕЛЕКТРИК

*Проведено дослідження електропровідності та поздовжнього магнітоопору легованих бором мікрористалів Si p-типу провідності в області фазового переходу метал–діелектрик (ПМД) при накладанні деформації стиску до  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  відн. од. за низьких температур. Для мікрористалів Si з концентрацією бору, що відповідає наближенню до ПМД з діелектричного боку, в яких за низьких температур під дією деформації стиску має місце стрибкова провідність, виявлено від'ємний магнітоопір, який за умови достатньо високих магнітних полів переходить у додатний.*

### Вступ

У багатьох теоретичних та експериментальних працях останніх років щодо дослідження магніторезистивного ефекту в легованих напівпровідниках за низьких температур показано, що причини виникнення цього ефекту суттєво відрізняються для металевого та діелектричного боку фазового переходу метал–діелектрик (ПМД) [1–5]. Проте увага експериментаторів та теоретиків до цього часу зосереджувалась в основному на дослідженні напівпровідників з електронним типом провідності, а напівпровідникам p-типу провідності уваги приділялось значно менше. Хоча у деяких роботах показано, що саме у Si та Ge p-типу провідності в області фазового переходу спостерігаються цікаві й неоднозначно пояснювані явища, зокрема гістерезис магнітоопору, від'ємний магнітоопір та інші [6–9]. З огляду на попередньо отримані нами результати [10], метою цієї роботи було встановлення характеру впливу деформації на величину магнітоопору мікрористалів Si p-типу провідності в області фазового переходу метал–діелектрик.

### Об'єкт та методика дослідження

Досліджувались ниткоподібні кристали Si p-типу провідності, вирощені методом хімічних газотранспортних реакцій у формі гексагональних призм з шириною грані 20–30 мкм, довжиною 4–6 мм із поздовжньою віссю в кристалографічному напрямку  $\langle 111 \rangle$ . Під час росту мікрористали легували введенням акцепторної домішки – бору. Глибокі домішкові рівні золота та платини, які вводились у процесі вирощування мікрористалів, забезпечували слабку ( $< 1\%$ ) компенсацію акцепторної домішки. Завдяки

структурній досконалості та великій механічній міцності такі мікрористали є ідеальним модельним матеріалом для дослідження деформаційно-стимульованих ефектів в напівпровідниках. Крім того, їх застосовують як чутливі елементи сенсорів механічних величин [11], оскільки саме це застосування дає змогу найкращим чином реалізувати переваги структурної досконалості та механічної міцності таких кристалів.

Було проведено дослідження впливу деформації на електропровідність кількох груп легованих бором мікрористалів Si p-типу з різним ступенем наближення до фазового переходу метал–діелектрик при накладанні магнітного поля. Вимірювання поздовжнього магнітоопору легованих мікрористалів Si p-типу в магнітному полі з індукцією до 14 Тл з часом розгортки по полю 1,75 Тл/хв за  $T = 4,2$  К проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур (м. Вроцлав, Польща). Одновісна деформація досліджуваних мікрористалів у кристалографічному напрямку  $\langle 111 \rangle$ , що закріплювались на консольних балках, здійснювалась за допомогою розробленого мініатюрного пристрою завдання деформації у діапазоні деформацій стиску  $\epsilon = 0 \div -4,59 \cdot 10^{-3}$  відн. од.

### Результати експерименту та їх обговорення

Було проведено дослідження температурної залежності питомого опору та магнітоопору легованих бором мікрористалів Si з  $\rho_{300K} = (6-17,9) \cdot 10^{-3}$  Ом·см як недеформованих, так і у разі деформації стиску. Як видно з рис. 1, температурна залежність питомого опору недеформованих НК Si p-типу з  $\rho_{300K} = 0,006$  Ом·см (крива 1), концентрація бору в яких відповідає металевій

області більш віддаленій від фазового переходу, є типowo металевою і монотонно зростає в інтервалі температур 4,2–300 К. Під дією деформації стиску  $\epsilon = -(3,03-4,15) \cdot 10^{-3}$  відн. од. за  $T = 4,2$  К величина питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,006$  Ом·см зменшується, проте характер температурної залежності таких зразків не змінюється (крива 2 на рис. 1).

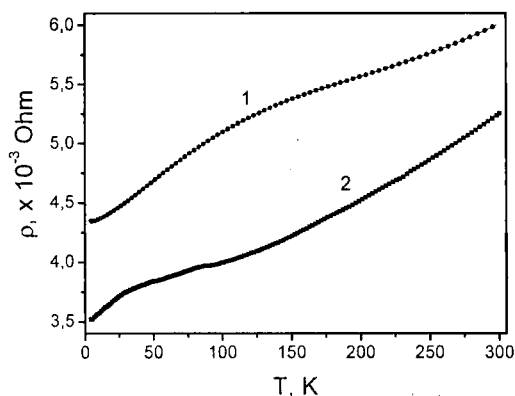


Рис. 1. Температурні залежності питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,006$  Ом·см: недеформованого (1) та в разі деформації стиску  $-2,28 \cdot 10^{-3}$  відн. од. (2) за  $T = 4,2$  К

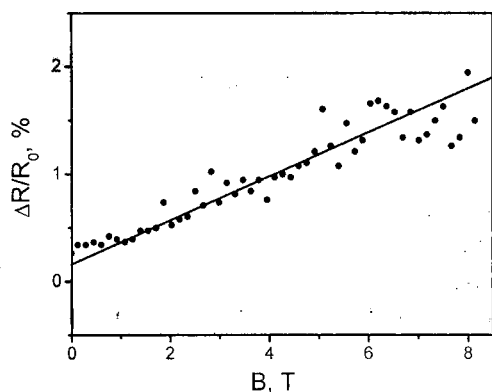


Рис. 2. Поздовжній магнітоопір НК Si з  $\rho_{300K} = 0,006$  Ом·см за  $T = 4,2$  К у разі деформації стиску  $-2,28 \cdot 10^{-3}$  відн. од.

Відносна зміна опору таких мікрокристалів при накладанні магнітного поля не перевищує 2% при індукції магнітного поля  $B = 8$  Тл (рис. 2). Відомо [2, 5], що основний внесок у магнітоопір напівпровідникових зразків, концентрація основної легуючої домішки в яких відповідає металевої області, що більш віддалена від фазового переходу, дає т. зв. механізм слабкої локалізації теорії квантових поправок, що приводить до неістотного зростання магнітоопору від індукції магнітного поля. Це, як правило, зумовлено впливом спин-орбітальної взаємодії на процеси слабкої локалізації у відносно слабких магнітних полях.

Попередні наші дослідження [12] показують, що для НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0098$  Ом·см, кон-

центрація бору в яких ще відповідає металевому боку ПМД, є характерною зміна механізму електропровідності за низьких температур під час накладання деформації. Як видно з рис. 3, в області низьких температур провідність таких мікрокристалів змінює характер з типowo металевого для недеформованих мікрокристалів (крива 1) на стрибковий для мікрокристалів при деформації стиску  $-3,81 \cdot 10^{-3}$  і  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  відн. од. (криві 2 і 3 відповідно).

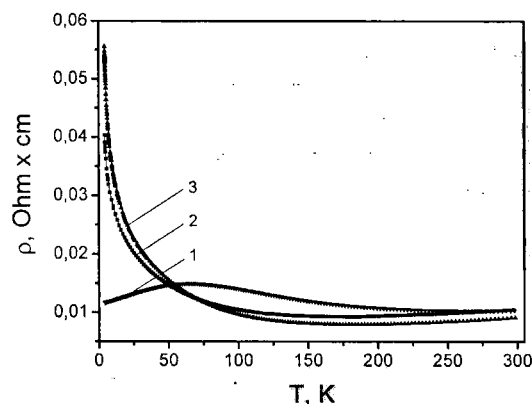


Рис. 3. Температурні залежності питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0098$  Ом·см: недеформованого (1) та у разі деформації стиску  $-3,81 \cdot 10^{-3}$  (2) і  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  (3) відн. од. за  $T = 4,2$  К

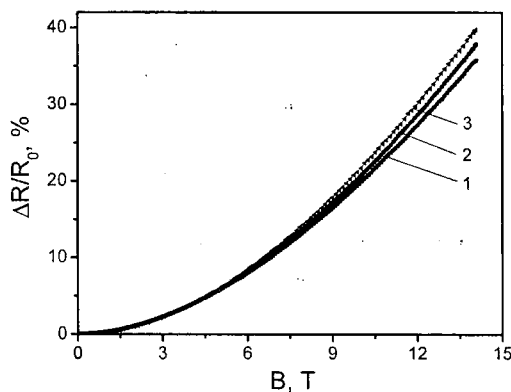


Рис. 4. Поздовжній магнітоопір НК Si з  $\rho_{300K} = 0,0098$  Ом·см за  $T = 4,2$  К у разі деформації стиску  $-3,81 \cdot 10^{-3}$  (1),  $-4,41 \cdot 10^{-3}$  (2) і  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  (3) відн. од.

Величина питомого опору таких мікрокристалів у разі деформації стиску  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  відн. од. за  $T = 4,2$  К зростає у  $\sim 5$  разів порівняно з величиною питомого опору недеформованих мікрокристалів. Польова залежність магнітоопору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0098$  Ом·см має квадратичний характер, а з підвищенням рівня деформації стиску від  $-3,81 \cdot 10^{-3}$  до  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  відн. од. спостерігається помітне зростання величини магнітоопору таких мікрокристалів (рис. 4).

Для мікрокристалів Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0104$  Ом·см, концентрація бору в яких є найближчою серед досліджуваних зразків до т. зв. критичної

концентрації  $N_c$  фазового переходу з металевого боку, також характерною за низьких температур є зміна механізму електропровідності з типово металевої для недеформованих мікрокристалів (крива 1 на рис. 5) на стрибкову для мікрокристалів у разі деформації стиску в інтервалі  $-(1,63 \pm 2,28) \cdot 10^{-3}$  відн. од. (криві 2–4 на рис. 5). Величина магнітоопору таких мікрокристалів зростає з полем за квадратичним законом від 23,7 % у разі деформації стиску  $\epsilon = -1,63 \cdot 10^{-3}$  відн. од. до 36,1 % при  $\epsilon = -2,28 \cdot 10^{-3}$  відн. од. за  $T = 4,2$  К (рис. 6). Для магнітоопору напівпровідникових зразків із концентрацією основної легуючої домішки, що відповідає металевому боку ПМД та близькості до фазового переходу з металевого боку, характерним є механізм слабкої локалізації теорії квантових поправок. Проте

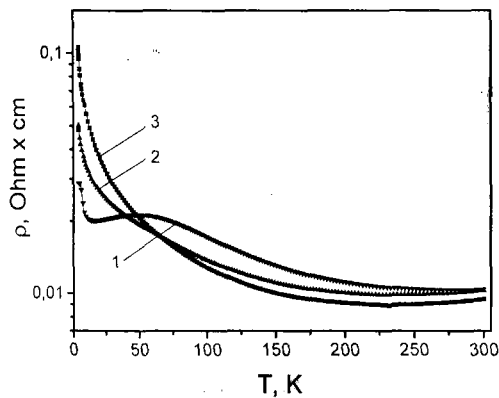


Рис. 5. Температурні залежності питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0104$  Ом·см: недеформованого (1),  $-1,63 \cdot 10^{-3}$  (2),  $-2,28 \cdot 10^{-3}$  (3) відн. од. за  $T = 4,2$  К

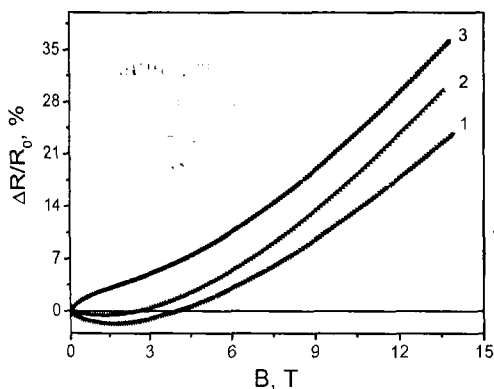


Рис. 6. Поздовжній магнітоопір НК Si з  $\rho_{300K} = 0,0104$  Ом·см за  $T = 4,2$  К у разі деформації стиску  $-1,63 \cdot 10^{-3}$  (1),  $-1,98 \cdot 10^{-3}$  (2),  $-2,28 \cdot 10^{-3}$  (3) відн. од.

в області низьких температур під дією деформації стиску провідність НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0098$  Ом·см та  $\rho_{300K} = 0,0104$  Ом·см стає стрибковою, і тому для опису магнітоопору таких мікрокристалів характернішим буде механізм деформації хвильових функцій домішкових центрів під дією магнітного поля.

Під дією деформації стиску  $-2,58 \cdot 10^{-3}$  відн. од. за  $T = 4,2$  К величина питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0136$  Ом·см, концентрація бору в яких відповідає діелектричному боку ПМД, зростає на 3 порядки порівняно з недеформованим мікрокристалом (рис. 7). Провідність мікрокристалів Si з таким рівнем легування бором за низьких температур є стрибковою з енергією активації  $\epsilon_3 \sim 0,4$  меВ. За  $T = 4,2$  К для мікрокристалів Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0136$  Ом·см виявлено від'ємний магнітоопір, величина якого в області слабких магнітних полів з підвищенням рівня деформації стиску немонотонно зменшується (рис. 8). Під час зростання величини індукції магнітного поля від'ємний магнітоопір переходить у позитивний. Варто зауважити, що значення показника  $n$  степеневого закону зміни

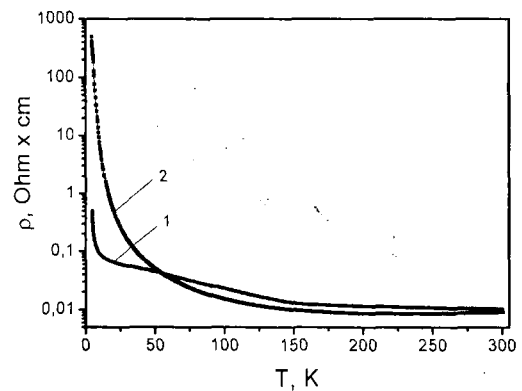


Рис. 7. Температурні залежності питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0136$  Ом·см: недеформованого (1),  $-2,58 \cdot 10^{-3}$  (2) відн. од. за  $T = 4,2$  К

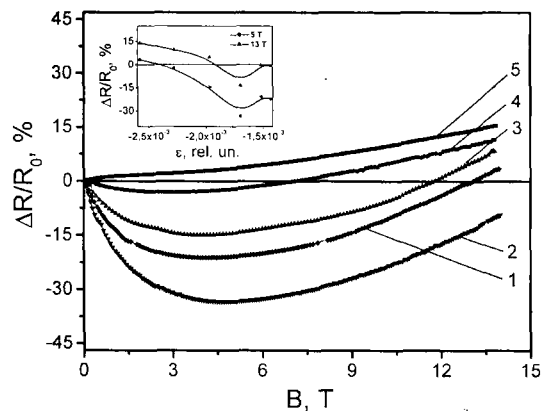


Рис. 8. Поздовжній магнітоопір НК Si з  $\rho_{300K} = 0,0136$  Ом·см за  $T = 4,2$  К у разі деформації стиску  $-1,44 \cdot 10^{-3}$  (1),  $-1,7 \cdot 10^{-3}$  (2),  $-1,97 \cdot 10^{-3}$  (3),  $-2,28 \cdot 10^{-3}$  (4),  $-2,58 \cdot 10^{-3}$  (5) відн. од. На вставці деформаційні залежності магнітоопору

польової залежності магнітоопору таких мікрокристалів  $DR(B)/R(0) = B^n$  в області слабких магнітних полів із ростом рівня деформації стиску змінюється з  $n = 4$  на  $n = 2$ . У сильних магнітних полях магнітоопір з полем змінюється за лінійним законом. Такий неоднозначний характер

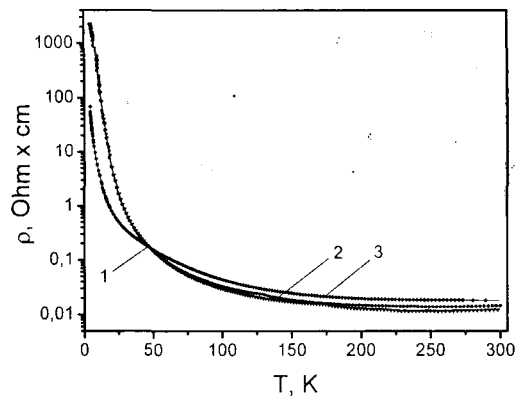


Рис. 9. Температурні залежності питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0179$  Ом·см: недеформованого (1),  $-3,03 \cdot 10^{-3}$  (2) і  $-4,37 \cdot 10^{-3}$  (3) відн. од. за  $T = 4,2$  К

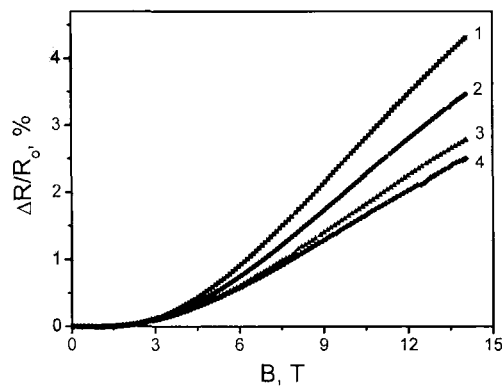


Рис. 10. Поздовжній магнітоопір НК Si з  $\rho_{300K} = 0,0179$  Ом·см за  $T = 4,2$  К у разі деформації стиску  $-3,03 \cdot 10^{-3}$  (1),  $-3,42 \cdot 10^{-3}$  (2),  $-3,81 \cdot 10^{-3}$  (3),  $-4,37 \cdot 10^{-3}$  (4) відн. од. На вставці деформаційна залежність магнітоопору

польової залежності магнітоопору від деформації та появу від'ємного магнітоопору мікрочасталів із діелектричного боку ПМД у слабких магнітних полях під дією деформації можна пов'язати зі зміною енергетичної структури валентної зони та перерозподілом легких та важких дірок по підзонах валентної зони.

Як і слід було очікувати, під дією деформації стиску в інтервалі  $-(3,03 \div 4,37) \cdot 10^{-3}$  відн. од. за низьких температур відбувається збільшення величини питомого опору НК Si  $p$ -типу з  $\rho_{300K} = 0,0179$  Ом·см, концентрація бору в яких відповідає глибокій діелектричній області, більше ніж на порядок порівняно з недеформованим зразком (рис. 9). Провідність мікрочасталів з таким рівнем легування бору за низьких температур має стрибковий характер і не змінюється під дією деформації. Магнітоопір таких мікрочасталів з полем змінюється за квадратичним законом,

проте з ростом рівня деформації стиску від  $-3,03 \cdot 10^{-3}$  до  $-4,37 \cdot 10^{-3}$  відн. од. спостерігається зменшення величини магнітоопору з 4,3 до 2,5 % у разі індукції магнітного поля  $B = 14$  Тл (рис. 10). Позитивний магнітоопір зразків, що характеризуються стрибковою провідністю в області низьких температур, можна описати одним із кількох відомих механізмів [2, 5], що враховують, зокрема, деформацію хвильових функцій домішкових центрів під дією магнітного поля, квантову інтерференцію хвильових функцій, механізм звування домішкової зони в магнітному полі.

### Висновки

Досліджено температурні залежності питомого опору в інтервалі температур  $4,2 \div 300$  К та поздовжнього магнітоопору в магнітних полях з індукцією до 14 Тл за температури рідкого гелію мікрочасталів Si  $p$ -типу з концентрацією бору, що відповідала як металевому, так і діелектричному боку фазового переходу метал-діелектрик, при накладанні деформації стиску до  $-4,59 \cdot 10^{-3}$  відн. од.

Встановлено, що магнітоопір досліджуваних мікрочасталів Si  $p$ -типу є додатним і з полем змінюється за квадратичним законом, за винятком мікрочасталів Si, концентрація бору в яких відповідає діелектричному боку ПМД, їх магнітоопір є від'ємним і з ростом величини індукції магнітного поля переходить у додатний. Щодо характеру впливу деформації на величину магнітоопору, то з ростом рівня деформації стиску відбувається зростання величини магнітоопору мікрочасталів Si  $p$ -типу з концентрацією бору, що відповідає металевому боку фазового переходу та безпосередній близькості до ПМД; з діелектричного боку ПМД деформаційні залежності магнітоопору мають нелінійний характер, а для зразків з концентрацією, що відповідає глибокій діелектричній області, характерне зменшення величини магнітоопору з ростом рівня деформації стиску.

З'ясовано, що магнітоопір мікрочасталів з металевим типом провідності та з металевому боку фазового переходу визначається слабкою локалізацією носіїв заряду згідно з теорією квантових поправок, а магнітоопір мікрочасталів з діелектричного боку ПМД, для яких характерна низькотемпературна стрибкова електропровідність, визначається деформацією хвильових функцій домішкових центрів внаслідок дії магнітного поля.

1. M. Sarachik, D. Simonian, S. Kravchenko. Magnetoconductance of Metallic Si:P near the MIT // Phys. Stat. Sol. B. – Vol. 205. – № 183. – 1998. – P. 183–185.  
2. Вейнгер А. И., Забродский А. Г., Тиснек Т. В. Магнето-

сопротивление компенсированного Ge:As на сверхвысоких частотах в области фазового перехода металл-диэлектрик // ФТП. – 2000. – Т. 34. – Вып. 7. – С. 774–782.  
3. Баранський П. І., Федосов А. В., Гайдар Г. П. Фізичні

- властивості кристалів кремнію і германію в полях ефективного зовнішнього впливу,- Луцьк: Надстир'я.- 2000.- 280 с
4. *A. Fujimolo, H. Kobori, T. Ohya, S. Ishida, K. Satoh, T. Kusaka, Y. Kakehi.* Crossover from positive to negative magnetoresistance by the rise of electron temperature for Si:Sb in the variable-range hopping regime // *Physica B.*- № 324.-2002.-Р. 1-8.
  5. *Вейнгер А. 77., Забродский А. Г., Тиснек Т. В.* СВЧ магнитосопротивление компенсированного p-Ge:Ga в области фазового перехода изолятор-металл // *ФТП.*- 2002.- Т. 36.- Вып. 7.- С. 826-835.
  6. *Андреев А. Г., Егоров С. В., Забродский А. Г., Парфеньев Р. В., Черняев А. В.* Гистерезис магнитосопротивления нейтронно-легированного Ge в области прыжкового транспорта по состоянию кулоновской щели // *ФТП.*- 2000.- Т. 34.- Вып. 7.- С. 796-802.
  7. *Егоров С. В., Забродский А. Г., Парфеньев Р. В.* О природе гистерезиса низкотемпературного прыжкового магнитосопротивления вблизи перехода металл-изолятор в компенсированном Ge:Ga // *ФТП.*- 2004.- Т. 38.- Вып. 2.-С. 197-201.
  - i. *Дружинин А. О., Павловський І. В.* Гістерезисний ефект мапіітоопору в ниткоподібних кристалах кремнію р-типу провідності при низьких температурах: II Українська наук, конференція з фізики напівпровідників: Матеріали конференції.- Чернівці: Рута.- 2004.- Т. 1.- С. 72-73.
  9. *Бахадырханов М. К., Самтарое О. Э., Илнеев Х. М., Аюгов К. С, Умайер Т.* Отрицательное магнитосопротивление в кремнии, легированном бором и марганцем, стимулированное электрическим полем и светом // *ФТП.*- 2005,- Т. 39,- Вып. 7,- С. 823-825.
  10. *Дружинин А. О., Мар'ямова І. І., Павловський І. В.* Магнітоопір деформованих ниткоподібних кристалів кремнію при криогенних температурах: II Українська наук, конференція з фізики напівпровідників: Матеріали конференції.- Чернівці: Рута, 2004.- Т. 2.- С. 149-150.
  11. */. Maryamova, A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Gortynska, Y. Yatzuk.* Low temperature semiconductor mechanical sensors // *Sensors and Actuators,- Vol. A85.- № 1-3.- 2000,- Р. 153-157.*
  12. *Дружинин А. О., Мар'ямова І. Й., Кутраков О. 77., Павловський І. В.* Вплив деформації на домішкову провідність ниткоподібних кристалів кремнію в області переходу метал-діелектрик // *Фізика і хімія твердого тіла.*- 2003,- Т. 4.- № 4.- С 720-728.

*A. Druzhinin, I. Pavlovskyu*

## STRAIN DEPENDENCE OF MAGNETORESISTANCE SILICON WHISKERS NEAR METAL-INSULATOR TRANSITION

*Conductivity and longitudinal magnetoresistance in boron doped Si whiskers p-type conductivity near metal-insulator transition (MIT) during compression strain to  $-4.59 \cdot 10^{-3}$  rel. un. were investigated at cryogenic temperatures. For Si whiskers with boron concentration from dielectric side of MIT, in which at low temperatures under action of compression strain hopping conductivity will be realized, it is observed negative magnetoresistance, which at the enough high magnetic fields passes in positive.*