

А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, Ю.М. Ховерко, С.М. Матвієнко

## Властивості шарів полікремнію на ізоляторі при криогенних температурах і в сильних магнітних полях

Національний університет "Львівська політехніка", НДЦ "Кристал",  
вул. Котляревського, 1, Львів, 79013, тел.(0322)721632, e-mail: [druzh@polynet.lviv.ua](mailto:druzh@polynet.lviv.ua)

Досліджено властивості шарів полікремнію на ізоляторі, нерекристалізованих та після лазерної рекристалізації, легованих бором, в температурному діапазоні 4,2÷300 К і в сильних магнітних полях. Вивчався вплив лазерної рекристалізації на температурну залежність опору полікремнію з різною концентрацією носіїв заряду при низьких температурах. Вимірювання магнітоопору шарів полікремнію проводились при криогенних температурах в магнітних полях до 14 Т. Показано можливість створення на основі шарів полікремнію на ізоляторі сенсорів температури і п'єзорезистивних сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах і в сильних магнітних полях.

**Ключові слова:** шари полікремнію на ізоляторі, лазерна рекристалізація, криогенні температури, магнітні поля, сенсори.

*Стаття постуила до редакції 18.11.04 ; прийнята до друку 12.04.05 .*

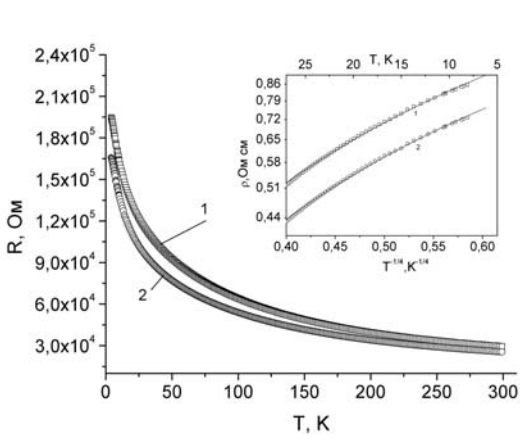
### I. Вступ

Для створення різноманітних мікроелектронних сенсорів широко використовуються структури типу кремній на ізоляторі (КНІ-структури), зокрема шари полікремнію на ізоляторі. Ці структури виявились перспективними для створення сенсорів, працездатних при підвищених температурах. В наших попередніх роботах [1,2] наведено результати дослідження електричних і п'єзорезистивних властивостей шарів полікремнію до і після лазерної рекристалізації з різною концентрацією носіїв заряду в кліматичному діапазоні температур та при підвищених температурах. Результатом цих досліджень стала розробка мікроелектронних п'єзорезистивних сенсорів механічних величин, зокрема сенсорів тиску, на основі рекристалізованих лазером шарів полікремнію (полі-Si) для роботи при підвищених температурах до +350°C [3,4].

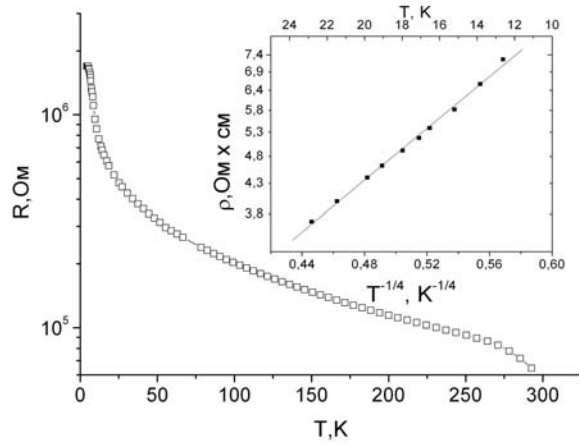
Не менш актуальною постає проблема створення сенсорів, працездатних в екстремальних умовах, а саме при низьких температурах і в сильних магнітних полях. Звідси витікає необхідність дослідження властивостей шарів полікремнію на ізоляторі при криогенних температурах, а також впливу магнітного поля на властивості цих структур.

### II. Методика експерименту і об'єкт дослідження

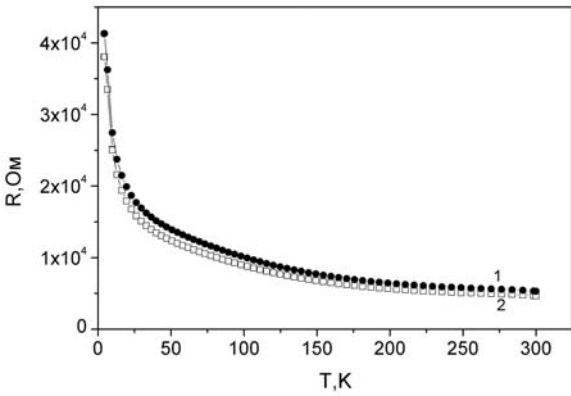
Для дослідження використовувались тестові КНІ-структури з полікремнієвими резисторами до і після лазерної рекристалізації. Вимірювання електропровідності та магнітоопору проводились на шарах полікремнію, легованих бором з концентрацією носіїв  $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  і  $3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  до рекристалізації і відповідно  $7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ;  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  і  $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  після лазерної рекристалізації. Електропровідність шарів полікремнію досліджувалась в широкому діапазоні температур 4,2...300 К, а вплив магнітного поля з індукцією до 14 Т вивчався при низьких температурах з використанням біттерівського магніту. Для вимірювань дослідні зразки закріплювались на спеціальній вставці, яка встановлювалась в гелієвому криостаті. Спад напруги вимірювався на потенційних зондах за допомогою цифрового вольтметра Keithley 199 при постійному струмі через зразок, що задавався джерелом струму Keithley 224. Температура вимірювалась за допомогою термопари Cu-Cu(Fe), вихідний сигнал з якої реєструвався цифровим вольтметром Keithley 196. Одночасно проводився автоматичний запис вимірюваних параметрів з їх візуалізацією на комп'ютері. Всі вимірювання проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і



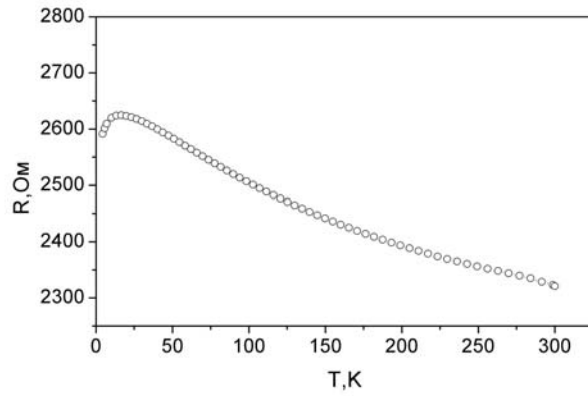
**Рис. 1.** Температурна залежність опору рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією вільних носіїв  $p_{300K} = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ : 1 -  $\rho_{300K} = 0,128 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , 2 -  $\rho_{300K} = 0,116 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ .



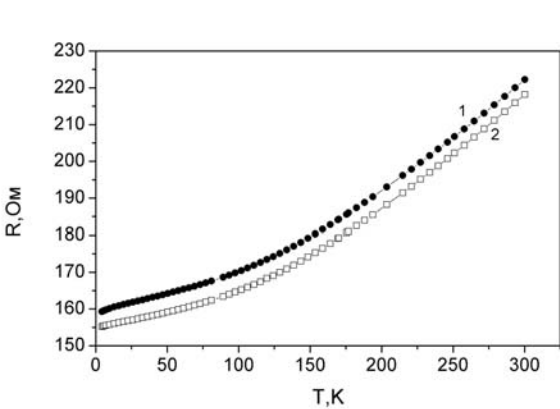
**Рис. 2.** Температурна залежність опору нерекристалізованого полікремнію з концентрацією вільних носіїв заряду  $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .



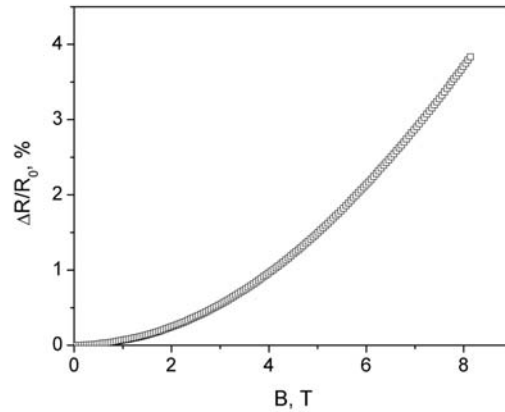
**Рис. 3.** Температурна залежність опору рекристалізованих лазером полі-Si резисторів з концентрацією вільних носіїв заряду  $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  (1 – поперечний, 2 – поздовжній резистор по відношенню до напрямку лазерного сканування).



**Рис. 4.** Температурна залежність опору нерекристалізованого полі-Si з концентрацією вільних носіїв заряду  $p_{300K} = 3,9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .



**Рис. 5.** Температурна залежність опору рекристалізованих полі-Si резисторів з  $p_{300K} = 1,7 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  (1 і 2 – поперечний і поздовжній резистор по відношенню до лазерного сканування).



**Рис. 6.** Поперечний магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією вільних носіїв заряду  $p_{300K} = 7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ .

низьких температур, м. Вроцлав (Польща) в рамках міжнародної співпраці.

### III. Електропровідність шарів полікремнію при криогенних температурах

Як відомо, полікремній містить набір дрібних монокристалічних зерен, з'єднаних відповідними границями зерен, які, в свою чергу, складаються з розупорядкованих атомів. В рамках моделі вловлювачів носіїв заряду в легованому матеріалі рухомі носії захоплюються енергетичними станами на границях зерен. В результаті такого захоплення на границях зерен виникають як області просторового заряду, збіднені носіями, так і потенціальні бар'єри на границях зерен. У наближенні часткового збіднення зерна, виходячи із моделі [5] для полікремнію р-типу, легованого бором, була розроблена програма для чисельного розрахунку електричних і п'єзорезистивних властивостей шарів полі-Si з різним розміром зерна. В полі-Si передбачався як основний механізм переносу – надбар'єрний перенос носіїв заряду в комбінації з дифузійною через границі зерен і дрейфом носіїв заряду через кристаліти [6]. Чисельні розрахунки здійснювались на основі припущення про часткове збіднення зерна.

З іншого боку, характер електропровідності полікристалічного матеріалу дуже подібний до електропровідності неупорядкованих напівпровідників [7]. В залежності від середнього розміру зерна, рівня легування та інших факторів домінуючим стає той чи інший механізм переносу носіїв заряду – від надбар'єрного механізму до протікання електронів по станах вловлювачів на границях зерен. В загальному випадку ефективна електропровідність може бути записана наступним виразом:

$$\sigma_{ef} = \sigma_g + \sigma_b (h/r_0), \quad (1)$$

де  $\sigma_g$  і  $\sigma_b$  – електропровідність по зернах і надбар'єрна провідність відповідно;  $h$  – ширина границі зерен;  $r_0$  – ефективний розмір зерна.

Якщо зерно є повністю або майже повністю збіднено носіями, то першим доданком формули (1) можна нехтувати,  $\sigma_g \rightarrow 0$ , і електропровідність здійснюється за рахунок переносу носіїв по локалізованих станах на границях зерен. Така електропровідність може бути реалізована при низькому рівні легування і малих розмірах зерен незалежно від температури спостереження.

При криогенних температурах, коли очікується значне виморожування носіїв заряду, кількість носіїв в об'ємі зерна стає дуже малою, за винятком випадку високого рівня легування (металевий тип електропровідності). В такому випадку за основний механізм переносу треба розглядати квантовий механізм переносу носіїв заряду по станах на границях зерен. Різниця у висоті бар'єрів на границях

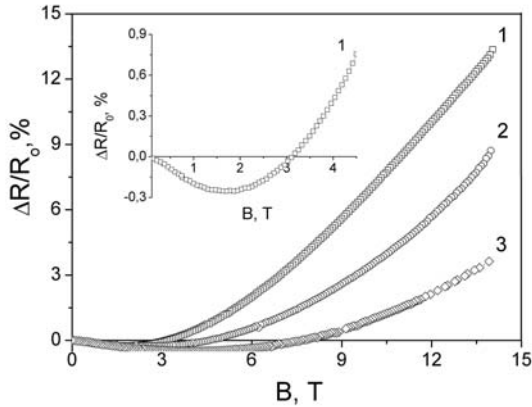
зерен призводить до випадкового потенціального рельєфу, зумовленого викривленням енергетичних зон біля границь зерен. Тому така система повинна розглядатись як дуже сильно легований і компенсований напівпровідник, де стани на границях зерен відіграють роль компенсуючих домішок. Чим нижче температура, тим більший внесок в електричні властивості квантового механізму переносу, і його можна описати за допомогою теорії протікання носіїв заряду [8].

На рис. 1. наведено експериментальні температурні залежності опору полі-Si резисторів, рекристалізованих лазером з повздовжнім напрямком сканування, з концентрацією носіїв заряду  $p_{300K} \approx 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Як видно з вставки до рис. 1, для таких шарів полі-Si в діапазоні температур  $8 \div 25 \text{ K}$  температурний хід питомого опору зразків наближено описується законом Мотта ( $\ln \rho \sim T^{-1/4}$ ), що вказує на стрибковий характер провідності в цих зразках при низьких температурах.

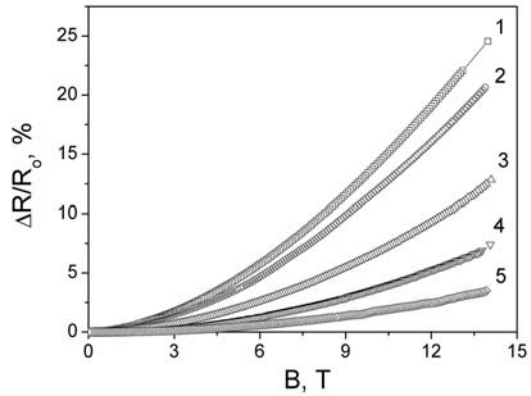
Для дрібнокристалічних (нерекристалізованих) шарів полікремнію з проміжним рівнем легування ( $p_{300K} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) спостерігається більш сильна температурна залежність опору при криогенних температурах в інтервалі  $4,2 - 77 \text{ K}$  (рис. 2), а в області температур від  $4,2$  до  $25 \text{ K}$  спостерігається також стрибова провідність. На рис. 3. наведено температурну залежність опору цих зразків після лазерної рекристалізації. Лазерна рекристалізація призводить до збільшення середнього розміру зерна, що одночасно супроводжується зменшенням загальної площі поверхні границь зерен, на яких відбувається захоплення вільних носіїв заряду. Крім цього, після лазерної рекристалізації зерна полікремнію мають форму, видовжену у напрямку сканування. Це означає, що середній розмір зерна вздовж напрямку сканування є більший за середній розмір зерна поперек напрямку сканування, що відповідає більшому значенню опору (і питомого опору) поперечних полі-Si резисторів у тестових зразках, що і спостерігається на графіках рис. 3. Крім того, лазерна рекристалізація, завдяки збільшенню розмірів зерна і зменшенню вкладу границь зерен, призводить до зменшення питомого опору полікремнію у порівнянні з вихідним нерекристалізованим полікремнієм, що яскраво ілюструється рис. 2 і 3.

Для сильнолегованих дрібнокристалічних зразків полікремнію з концентрацією носіїв  $p_{300K} \approx 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  характерний змішаний тип провідності при низьких температурах (рис. 4). Після лазерної рекристалізації цих зразків змінюється характер їх провідності в діапазоні температур  $4,2 \dots 300 \text{ K}$  з напівпровідникового на металевий внаслідок збільшення концентрації носіїв заряду майже на порядок, яка становить  $p_{300K} \approx 1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  (рис. 5).

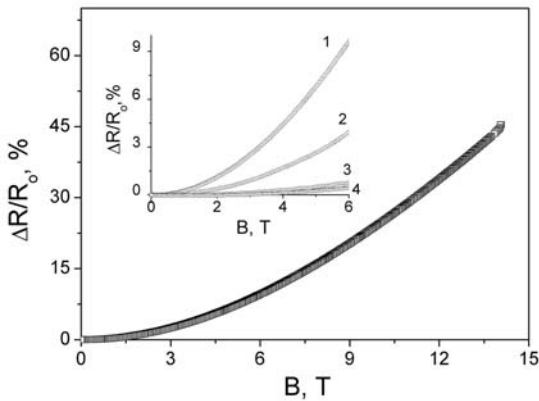
Порівнюючи температурні залежності опору досліджених шарів полікремнію, можна відзначити, що найбільш сильною температурною залежністю опору характеризуються рекристалізовані шари з



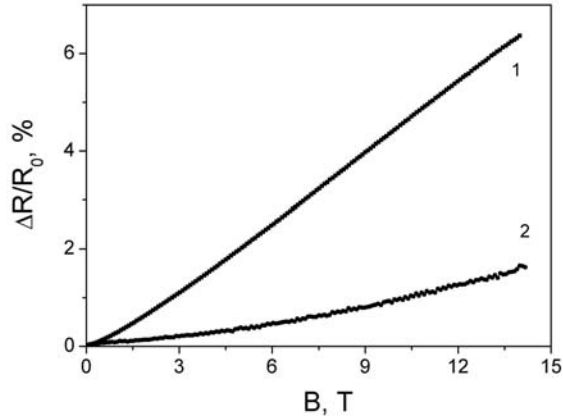
**Рис. 7.** Поперечний магнітоопір нерекристалізованих шарів полікремнію з  $p_{300K}=2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при різних температурах: 1 – 4,2 К, 2 – 6,8 К, 3 – 9,7 К.



**Рис. 8.** Поперечний магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з  $p_{300K}=4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при різних температурах: 1 – 4,2 К, 2 – 5,3 К, 3 – 6,8 К, 4 – 9,6 К, 5 – 20,2 К.



**Рис. 9.** Поперечний магнітоопір для деформованих рекристалізованих шарів полікремнію з  $p_{300K}=4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при  $T=4,2$  К; на вставці: при різних температурах: 1 – 4,2 К, 2 – 6,7 К, 3 – 14 К, 4 – 20 К.



**Рис. 10.** Поперечний магнітоопір сильнолегованих шарів полікремнію при  $T=4,2$  К: 1 – нерекристалізованих з  $p_{300K}=3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , 2 – рекристалізованих з  $p_{300K}=1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ .

концентрацією носіїв  $p_{300K} \approx 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  і дрібнозернисті шари з  $p_{300K} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Такі полі-Si резистори можна рекомендувати для створення на їх основі мініатюрних сенсорів для вимірювання низьких температур до температури рідкого гелію включно.

Найбільш температурно стабільними виявились полі-Si шари, які мають найбільшу концентрацію вільних носіїв заряду (рис. 5). Цей результат у поєднанні з теоретичним передбаченням п'єзорезистивних властивостей полікремнію [2,6] дає можливість сподіватись на можливість створення на основі рекристалізованих лазером полі-Si резисторів з концентрацією носіїв  $p_{300K} \geq 1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  п'єзорезистивних сенсорів механічних величин для роботи в широкому діапазоні низьких температур. З іншого боку, для створення більш чутливих сенсорів

механічних величин для гелієвих температур доцільно використовувати рекристалізовані лазером шари полі-Si з концентрацією носіїв заряду  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  [9].

#### IV. Магнітоопір шарів полікремнію при кріогенних температурах

При дослідженні властивостей шарів полікремнію в сильних магнітних полях вимірювався поперечний магнітоопір при кріогенних температурах до температури рідкого гелію.

На рис. 6. наведено поперечний магнітоопір рекристалізованих лазером шарів полі кремнію з концентрацією носіїв  $p_{300K} \approx 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  при 4,2 К. Магнітоопір цих шарів додатній, а зміна опору під

впливом магнітного поля до 8 Т є слабкою. Враховуючи більш сильну температурну залежність опору таких зразків при низьких температурах і слабкий вплив магнітного поля на властивості опору можна рекомендувати такі полі-Si резистори для створення на їх основі мініатюрних сенсорів для вимірювання криогенних температур в сильних магнітних полях.

На рис. 7 показано поперечний магнітоопір нерекристалізованих шарів з концентрацією носіїв  $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при різних температурах в діапазоні 4,2-10 К. В таких зразках, в яких концентрація електрично активної домішки (бору) відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик, спостерігався від'ємний магнітоопір у порівняно слабких магнітних полях. Поява від'ємного магнітоопору пояснюється особливостями транспорту носіїв заряду, зумовлених потенціальними бар'єрами на границях зерен в полікристалічному матеріалі. В сильних магнітних полях магнітоопір цих зразків стає додатній і збільшується зі зниженням температури, досягаючи максимальної величини при температурі 4,2 К (рис. 7, крива 1).

У рекристалізованому лазером полікремнії, який за своїми властивостями наближається до монокристалічного кремнію, спостерігався тільки додатній магнітоопір. Поперечний магнітоопір рекристалізованих полікремнієвих шарів з середнім рівнем легування в інтервалі температур 4,2-20,2 К наведено на рис. 8. Порівнюючи рис. 7 і 8, видно, що для полікремнію з середнім рівнем легування магнітоопір рекристалізованих лазером шарів більший, ніж для нерекристалізованих зразків.

Для опису характеру магнітоопору слаболегованих зразків полікремнію з напівпровідниковим ходом провідності використовувалась модель, згідно якої позитивний магнітоопір пояснюється деформацією хвильових функцій локалізованих дірок за рахунок магнітного поля [10]. Однак необхідно відзначити, що для напівпровідників з концентрацією домішки поблизу ПМД немає адекватного пояснення механізму магнітоопору.

Магнітоопір деформованих (одновісна деформація стиску) шарів полікремнію, які піддавались лазерній рекристалізації, при криогенних температурах показано на рис. 9. Із порівняння рис. 8 і рис. 9 видно, що магнітоопір деформованого полікремнію більший, ніж для недеформованого з концентрацією носіїв  $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . В нерекристалізованому полікремнії з  $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  деформація зразка значно менше впливає на його магнітоопір.

Сильно леговані шари полікремнію мають менший магнітоопір, ніж зразки з середнім рівнем легування. Після лазерної рекристалізації магнітоопір сильно легованого полікремнію значно зменшується у порівнянні з магнітоопором нерекристалізованих шарів (рис. 10). В останньому випадку зміна опору полікремнію в магнітному полі до 14 Т не перевищує

1% (рис. 10, крива 2).

В сильнолегованих зразках полікремнію з металевим типом провідності додатній магнітоопір можна пояснити слабкою локалізацією дірок у відповідності з теорією квантових поправок Альтшулера-Аронова [10]. В сильно легованому полікремнії, як нерекристалізованому, так і лазерно рекристалізованому, вплив одновісної деформації на магнітоопір не істотний. Тому можна сподіватись, що розроблені на основі таких шарів sensori механічних величин будуть працездатними в сильних магнітних полях при криогенних температурах.

## V. Висновки

На основі досліджень температурної залежності електропровідності шарів полікремнію на ізоляторі при низьких температурах встановлено стрибковий характер провідності в інтервалі температур 4,2...25 К для рекристалізованих лазером шарів полі-Si з концентрацією носіїв  $p_{300K} = 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  і нерекристалізованих шарів з концентрацією  $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Завдяки сильній температурній залежності опору таких шарів в інтервалі температур 4,2...77 К, вони можуть бути рекомендовані як чутливі елементи сенсорів криогенних температур, а sensori температури на основі рекристалізованих шарів полі-Si з  $p_{300K} = 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$  придатні для роботи в сильних магнітних полях.

При вимірюванні поперечного магнітоопору в нерекристалізованих шарах полікремнію з концентрацією носіїв  $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , в яких концентрація бору відповідає діелектричному боку переходу метал-діелектрик, спостерігається від'ємний магнітоопір у порівняно слабких магнітних полях при гелієвих температурах. Для всіх рекристалізованих шарів полі-Si спостерігався тільки додатній поперечний магнітоопір в полях до 14 Т, що пояснюється деформацією хвильових функцій локалізованих дірок за рахунок магнітного поля. Сильно леговані рекристалізовані шари полі-Si ( $p_{300K} = 1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ) найбільш стабільні до дії магнітного поля, при 4,2 К їх опір змінюється в межах 1% при полях до 14 Т. Такий полікремній може бути рекомендований для створення п'езорезистивних сенсорів механічних величин, дієздатних при криогенних температурах і в сильних магнітних полях, в той час як для більш чутливих сенсорів механічних величин для криогенних температур найбільш придатні шари рекристалізованого полікремнію з проміжним рівнем легування ( $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ).

**Дружинін А.О.** – д.т.н., професор кафедри напівпровідникової електроніки, завідувачий лабораторією сенсорної електроніки НДЦ;

**Мар'ямова І.І.** – к.т.н., с.н.с., провідний науковий співробітник НДЦ;

**Оверко Ю.М.** – к.т.н., старший науковий співробітник НДЦ;

**Матвієнко С.М.** – аспірант кафедри  
напівпровідникової електроніки.

- [1] V.A. Voronin, A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova et al. Laser-recrystallized polysilicon layers in sensors // *Sensors and Actuators*, **30A**, pp. 143-147 (1992).
- [2] A. Druzhinin, I. Maryamova, E. Lavitska, et al. Laser recrystallized polysilicon layers for sensor application: electrical and piezoresistive characterization. In *Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices*, Eds. P.L.F. Hemment et al., pp. 127-135, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht (2000).
- [3] V.A. Voronin, I.I. Maryamova, A.A. Druzhinin, et al. SOI pressure sensors based on laser recrystallized polysilicon. In *Phys. and Tech. Probl. of SOI Struct. and Devices*, Eds. J.P. Collinge et al., pp. 281-286, Kluwer Acad. Publ., Netherlands (1995).
- [4] A. Druzhinin, E. Lavitska, I. Maryamova, et al. Electrical and piezoresistive characterization of laser-recrystallized polysilicon layers in SOI-structures // *Electron Technology*, **32**(1/2), pp. 146-150 (1999).
- [5] N.C.-C.Lu, L. Gerzberg and C.-Y. Lu. Modeling and optimization of monolithic polycrystalline silicon resistors // *IEEE Trans. Electron Devices*, **ED-28**, pp. 818-830 (1981).
- [6] E.N. Lavitskaya, A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, Y.L. Deshchinsky. Grain boundary effect on the conductivity and piezoresistance of the polycrystalline silicon layers // *Functional Materials*, **3**(1), pp. 58-61 (1996).
- [7] В.Г. Кобка, Р.П. Комиренко, Ю.В. Конюшин и др. Об электропроводности поликристаллических полупроводников // *ФТТ*, **16**, сс. 2176-2178 (1982).
- [8] В.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. *Электронные свойства легированных полупроводников*. Наука, М. 416 с. (1979).
- [9] A. Druzhinin, I. Maryamova, I. Kogut et al. Polysilicon-on-insulator layers at cryogenic temperatures and high magnetic fields. In *Science and Technology of Semiconductor-On-Insulator Structures and Devices Operating in a Harsh Environment*, Eds.D. Flandre et al., pp. 297-302. Kluwer Acad. Publ., Netherlands (2005).
- [10] Б.Л. Альтшулер, А.Г. Аронов, А.И. Ларкин, Д.Е. Хмельницкий. Об аномальном магнитосопротивлении в полупроводниках // *Журн. exper. и теор. физики*, **81**(2), сс. 768-783 (1981).

A.A. Druzhinin, I.I. Maryamova, Yu.M. Khoverko, S.M. Matvienko

## **The Properties of Polysilicon-on-Insulator Layers at Cryogenic Temperatures and High Magnetic Fields**

*Lviv Polytechnic National University, Sci.-Research Center "Crystal",  
1, Kotlyarevsky Str., Lviv, 79013, tel.(0322)721632, e-mail: [druzh@polynet.lviv.ua](mailto:druzh@polynet.lviv.ua)*

The properties of boron doped polysilicon-on-insulator layers, unrecrystallized and after laser recrystallization, were investigated in the temperature range 4.2÷300 K and high magnetic fields. The effect of laser recrystallization on the temperature dependence of resistance for polysilicon layers with different carrier concentration at low temperatures was studied. Magnetoresistance of poly-Si layers was measured in magnetic fields up to 14 T at cryogenic temperatures. The possibility to develop temperature sensors and piezoresistive mechanical sensors based on poly-Si on insulator layers operating at cryogenic temperatures and high magnetic fields was shown.