

УДК 621.315.592

А.О. Дружинін, О.М. Лавитська, І.Й. Мар'ямова, Ю.М. Ховерко
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 Науково-дослідний центр “Кристал”

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШАРІВ ПОЛІ-Si ДЛЯ СТВОРЕННЯ НА ЇХ ОСНОВІ СЕНСОРІВ, ПРАЦЕЗДАТНИХ ПРИ КРІОГЕННИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© Дружинін А.О., Лавитська О.М., Мар'ямова І.Й., Ховерко Ю.М., 2002

A.O. Druzhinin, E.N. Lavitska, I.I. Maryamova, Yu.M. Khoverko

STUDIES OF POLY-Si LAYERS FOR CRYOGENIC SENSORS DEVELOPMENT

© Druzhinin A.O., Lavitska E.N., Maryamova I.I., Khoverko Yu.M., 2002

Експериментально досліджено властивості зразків полікристалічного кремнію р-типу провідності на діелектричних підкладках в температурному діапазоні 4,2–300 К і магнітних полях 0–14 Тл, а також вплив деформації на опір та температурний коефіцієнт опору. Вимірювання проводились на тестових структурах з рекристалізованими і нерекристалізованими полікремнієвими резисторами. Показано, що найкращу чутливість до деформації і оптимальний температурний коефіцієнт опору для застосування в п'єзорезистивних сенсорах механічних величин мають рекристалізовані шари полі-Si, леговані бором до концентрацій $>1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Одночасно такі структури є найбільш стабільними до впливу сильних магнітних полів до 14 Тл. Тестові структури з порівняно слабколегованими нерекристалізованими полікремнієвими резисторами мають високий температурний коефіцієнт опору, який монотонно змінюється в діапазоні 4,2–300 К, і можуть бути рекомендовані для використання як високочутливі терморезистори.

The electrical properties of p-type polycrystalline silicon on dielectric substrates were studied experimentally in the range 4,2–300 K and in magnetic fields 0–14 T, as well as the strain influence on their resistance and temperature coefficient of resistance. The measurements were carried out on the test structures containing as-deposited fine-grained poly-Si and after microzone laser recrystallization. It was shown that the recrystallized test structures doped by boron up to concentrations $>1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ possess the highest strain sensitivity combined with the best temperature coefficient of resistance for sensor application. At the same time such structures are the most stable in high magnetic field up to 14 T. The structures containing relatively slightly doped polysilicon resistors have a high temperature coefficient of resistance that is monotonous in the range 4,2–300 K. They may be recommended for application as high-sensitive thermoresistors.

Вступ. Створення нових типів сенсорів, працездатних в широких температурних діапазонах, у т. ч. в криогенному діапазоні, набуває особливого значення в умовах розвитку високих технологій. Перспективною елементною базою сенсорів є шари полікристалічного кремнію на ізолюючих підкладках (у вигляді КНІ-структур), використання яких закладено в

основу розробки серійноздатної технології виготовлення мікроелектронних сенсорів фізичних величин. У попередніх роботах авторів [1, 2] наведено результати досліджень властивостей цього матеріалу в кліматичному діапазоні температур та при підвищених температурах, а також описано п'єзорезистивні сенсори механічних величин, які були розроблені для роботи у згаданих температурних діапазонах. Використання мікрозонної лазерної рекристалізації дозволяє підвищити чутливість шарів полі-Si до деформації, підвищити їх температурну стабільність і, відповідно, значно покращити вихідні характеристики п'єзорезистивних сенсорів на їх основі. Метою даних досліджень стало вивчення можливості застосування даного матеріалу в п'єзорезистивних сенсорах механічних величин, працездатних при криогенних температурах аж до температури рідкого гелію 4,2 К.

Теоретичні основи. Полікристалічний кремній є набором малих монокристалічних зерен, з'єднаних границями зерен (ГЗ), 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, зважаючи на модель [3] для полікремнія р-типу, легованого бором, була розроблена програма для числового розрахунку електричних і п'єзорезистивних властивостей шарів полі-Si з різним розміром зерна. В полі-Si передбачався як основний механізм переносу носіїв надбар'єрний перенос носіїв заряду в комбінації з дифузією через границі зерен і дрейфом носіїв заряду через кристаліти [4]. Числові розрахунки здійснювались на основі припущення про часткове збіднення зерна.

Відомо [5], що для полікристалічного матеріалу електропровідність дуже подібна до електропровідності неупорядкованих напівпровідників. Залежно 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). У загальному випадку ефективна електропровідність може бути записана як

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

де σ_g і σ_b – електропровідність по зернах і надбар'єрна провідність; h – ширина границі зерен; r_o – ефективний розмір зерна.

Якщо розмір зерна є повністю або майже повністю збіднений носіями заряду, 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, кількість носіїв в об'ємі зерна стає дуже малою, за винятком випадку дуже високого рівня легування (металевий тип електропровідності). Тому як основний механізм переносу треба розглядати квантовий механізм переносу носіїв заряду 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. Тому ця 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 [6].

Експериментальні результати. Для використання полі-Si резисторів при криогенних температурах були проведені експериментальні вимірювання опору полі-Si зразків в діапазоні температур 4,2–300 К. На рис. 1 і 2 показані залежності $R = f(T)$ для вихідних дрібнозернистих зразків КНІ-структур, легованих бором. З рис. 1 (вставка) видно, що в температурному діапазоні 10–25 К питомий опір порівняно слаболегованого зразка підлягає закону Мотта ($\ln \rho \sim T^{-1/4}$). Це підтверджує домінуючий характер стрибкової провідності при низьких температурах. У випадку проміжного рівня легування (рис. 2), електропровідність має поведінку, яка є проміжною між стрибковою провідністю і провідністю металевого типу.

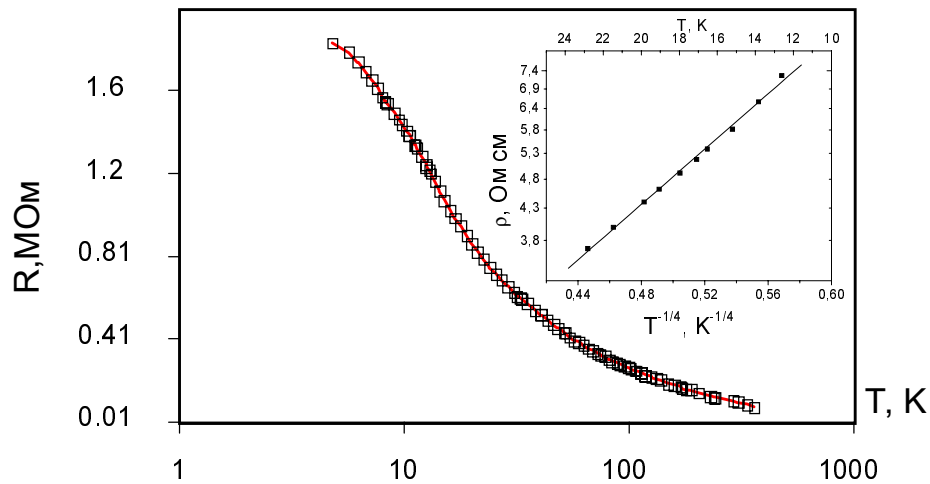


Рис. 1. Температурна залежність опору нерекристалізованого полі-Si зразка з концентрацією вільних носіїв заряду $p_{300\text{K}} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$

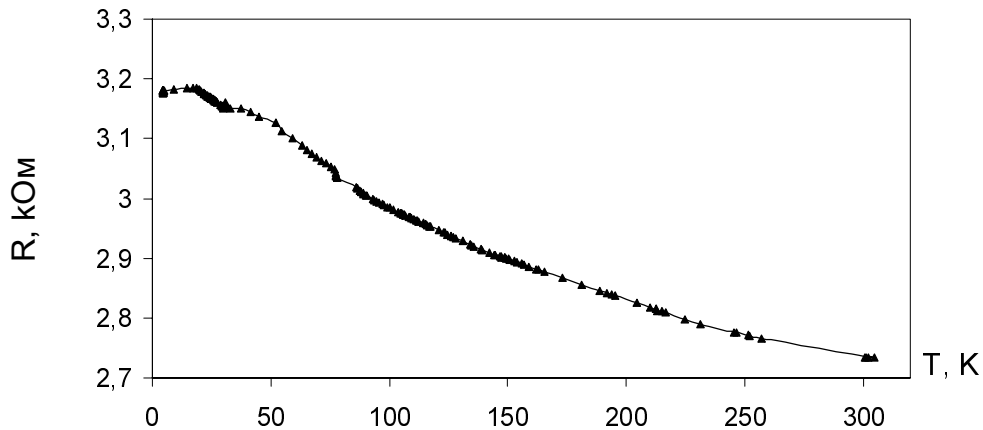


Рис. 2. Температурна залежність опору нерекристалізованого полі-Si зразка з концентрацією вільних носіїв заряду $p_{300\text{K}} = 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$

На рис. 3, 4 показано температурну залежність опору експериментальних зразків, що на рис. 1, 2, але після лазерної рекристалізації. Лазерна рекристалізація призводить до збільшення середнього розміру зерна. Це одночасно веде до зменшення загальної площі поверхні границь зерен, на яких відбувається захоплення вільних носіїв заряду. Після лазерної рекристалізації зерна полікристалічного кремнію 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 (питомого опору) поперечних тензорезисторів у тестових зразках (рис. 3, 4).

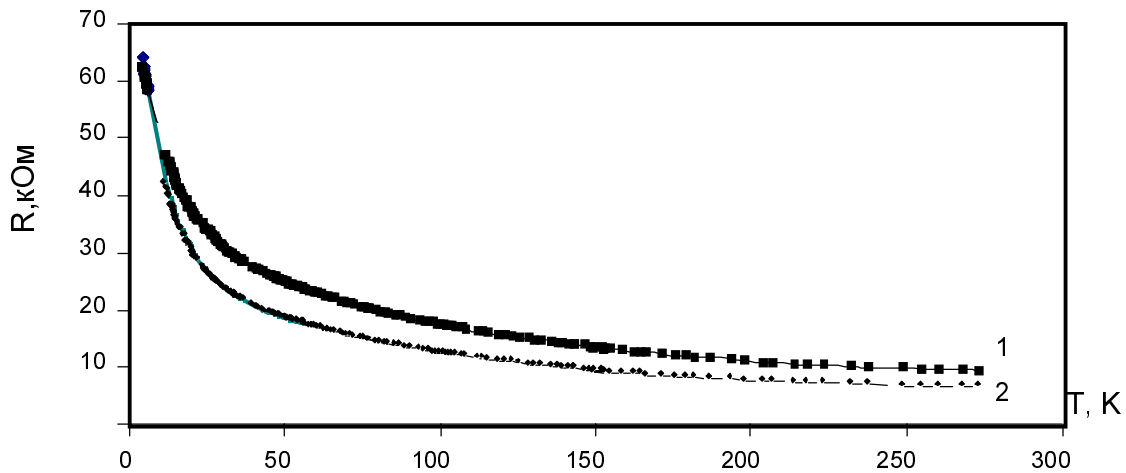


Рис. 3. Температурна залежність опору рекристалізованих лазером полі-Si резисторів з $p_{300\text{K}} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$:
1 – поперечний, 2 – поздовжній резистор відносно напрямку лазерного сканування

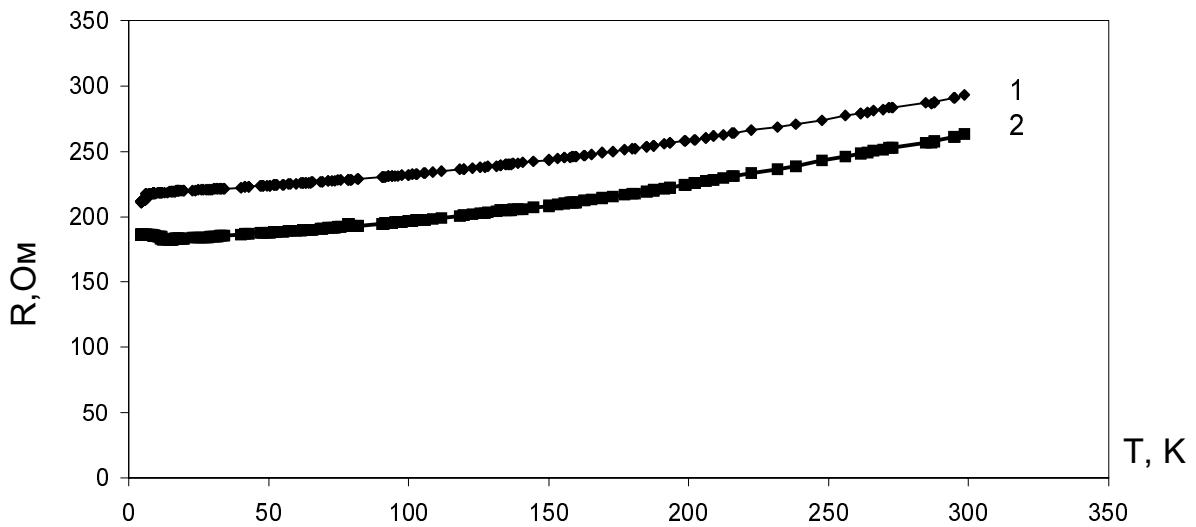


Рис. 4. Температурна залежність опору рекристалізованих полі-Si резисторів з $p_{300\text{K}} = 1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$:
1 і 2 – відповідно, поперечний і поздовжній резистор відносно лазерного сканування

Порівнюючи рис. 4 з рис. 1–3, можна зробити висновок, що полі-Si резистори, які мають найбільшу концентрацію вільних носіїв заряду, характеризуються найменшим температурним коефіцієнтом опору (ТКО); інші зразки дають значні зміни опору в інтервалі 4,2–300 К. Цей результат у поєднанні з теоретичним передбаченням п'єзорезистивних властивостей полі-Si [4, 7] дає можливість сподіватись на роботу резисторів на основі сильнолегованого полі-Si як п'єзорезистивних елементів при криогенних температурах. Сильнолеговані зразки полі-Si

мають лінійні вольт-амперні характеристики. В той же час певна нелінійність спостерігається в зразках з середнім рівнем легування при 4,2 К і лишається значною навіть після лазерної рекристалізації [8].

Для моделювання роботи п'єзорезистивних сенсорів з полікремнієвими тензорезисторами в широкому діапазоні температур 4,2–300 К використано методику, яку було розроблено для дослідження характеристик напівпровідникових мікрокристалів і яка довела свою ефективність [9]. Дана методика передбачає використання термічної деформації, яка виникає при закріпленні досліджуваного зразка на підкладці внаслідок різниці температурних коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів зразка і підкладки. Експериментальна перевірка на зразках полі-Si показала, що в умовах криогенних температур забезпечується часова стабільність досліджуваних зразків і добра відтворюваність результатів.

Графіки на рис. 5 і 6 містять експериментальні дані температурних залежностей опору шарів полікремнію – вільних та закріплених на підкладках з міді.

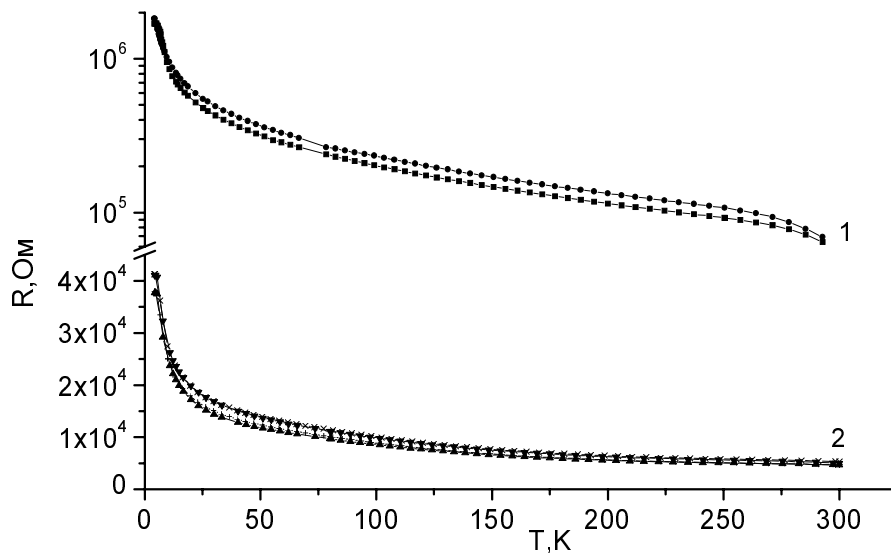


Рис. 5. Температурні залежності опору зразків полікремнію з початковою концентрацією вільних носіїв заряду $p_{300K} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (вільних та деформованих закріпленням на мідній підкладці) до (1) і після (2) лазерної рекристалізації

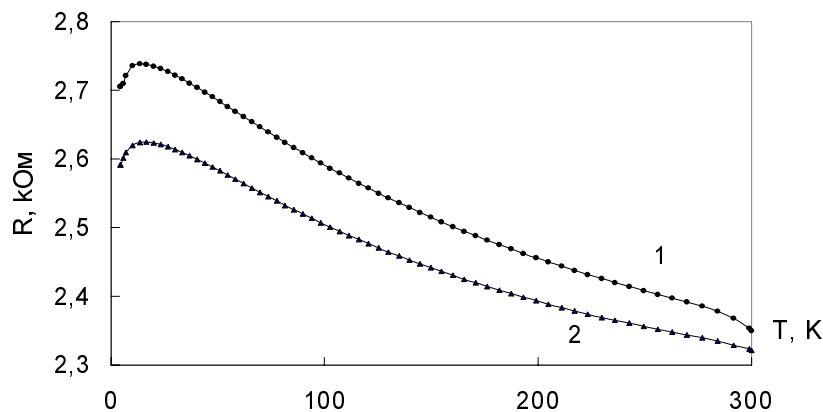


Рис. 6. Температурні залежності опору зразків нерекристалізованого полікремнію з початковою концентрацією вільних носіїв заряду $p_{300K} = 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (вільних (2) та деформованих (1) закріпленням на мідній підкладці)

Результати експериментальних досліджень підтверджують очікування: найкращі характеристики для застосування в п'єзорезистивних сенсорах мають сильнолеговані шари полікремнію, які піддавались лазерній обробці зі скануванням вздовж вісі резисторів. Для менш легованих шарів полікремнію спостерігається немонотонна залежність опору від деформації (рис. 5), а сканування в поперечному напрямку не забезпечує ефективного збільшення розміру зерен вздовж осі резистора, і, відповідно, такі резистори є слабкочутливими до деформації (рис. 7).

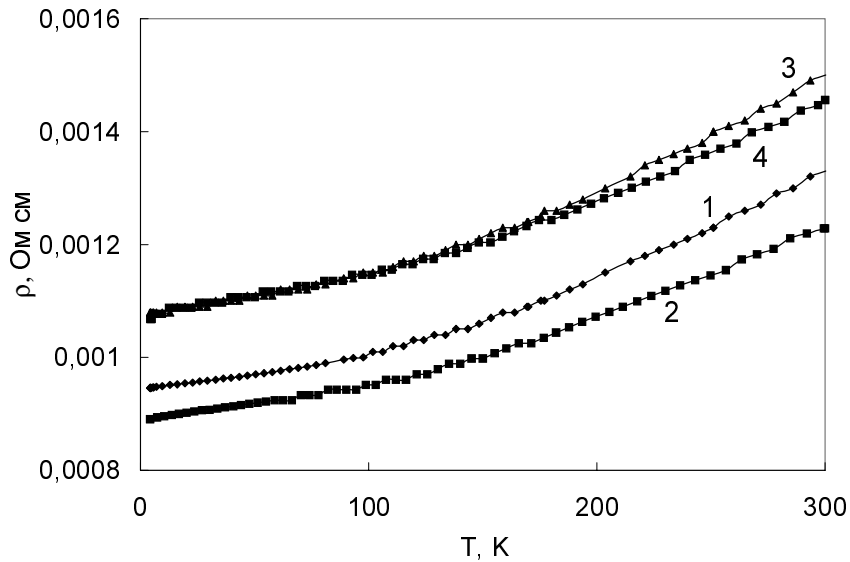


Рис. 7. Температурні залежності питомого опору зразків рекристалізованого полікремнію з початковою концентрацією вільних носіїв заряду $p_{300K} = 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (після рекристалізації $p_{300K} = 1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) – вільних (1, 3) та деформованих закріпленням на мідній підкладці (2, 4). Показано поздовжній (1, 2) та поперечний (3, 4) питомий опір відносно лазерного сканування

Сказане підтверджується графіком відносної зміни питомого опору шарів полікремнію під дією деформації, наведеним на рис. 8.

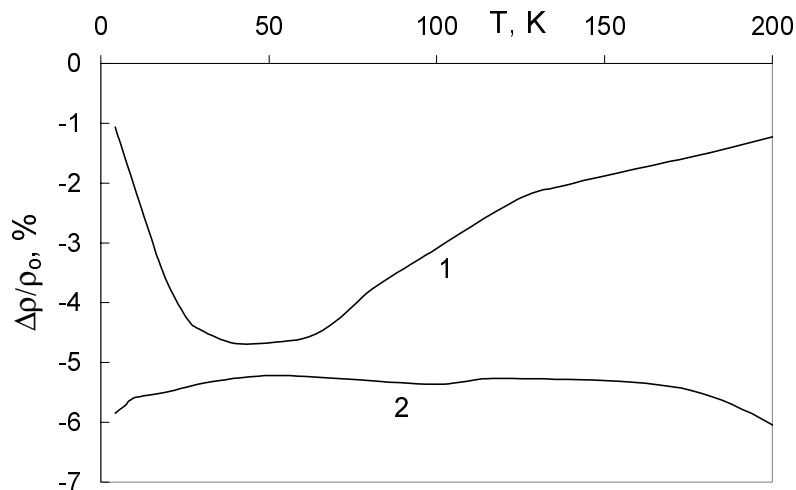


Рис. 8. Температурні залежності відносної зміни питомого опору рекристалізованих полі-Si резисторів під дією деформації для $p_{300K} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (1) і $p_{300K} = 1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (2)

З метою дослідження стабільності полікремнієвих резисторів у сильних магнітних полях при криогенних температурах проведено вимірювання магнітоопору тестових структур при 4,2 К. На рис. 9 і 10 наведено результати цих вимірювань.

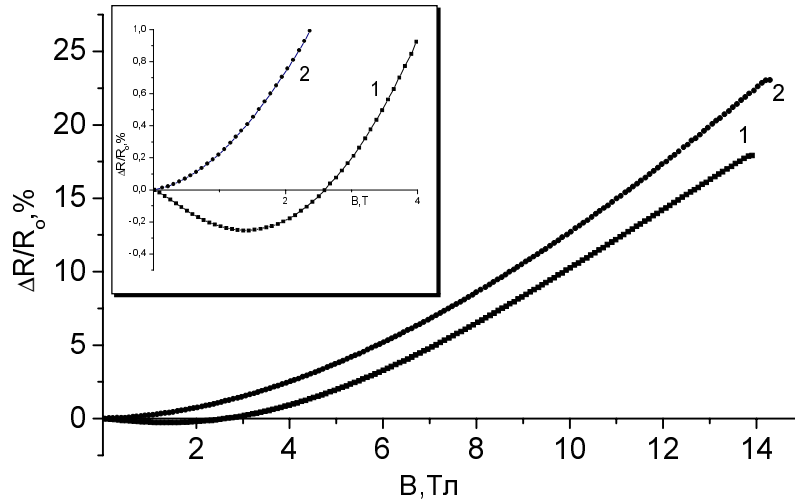


Рис. 9. Вплив поздовжнього магнітного поля на опір полі-Si резистора з концентрацією вільних носіїв заряду в нерекристалізованих зразках $p_{300\text{K}} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$:
1 – до лазерної рекристалізації, 2 – після лазерної рекристалізації

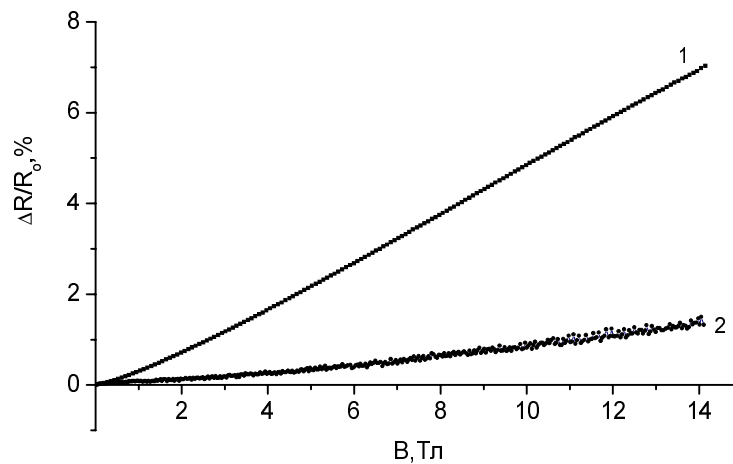


Рис. 10. Вплив поздовжнього магнітного поля на опір полі-Si резистора з концентрацією вільних носіїв заряду в нерекристалізованих зразках $p_{300\text{K}} = 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$:
1 – до лазерної рекристалізації, 2 – після лазерної рекристалізації

Цікавим результатом є те, що в нерекристалізованих полі-Si резисторах, для яких концентрація електрично активних домішок відповідає діелектричній стороні переходу метал-діелектрик у кремнії, спостерігається явище негативного магнітоопору в порівняно слабких магнітних полях, який при збільшенні напруженості магнітного поля переходить в позитивний магнітоопір (рис. 9, крива 1). В зразках, рекристалізованих лазерним опроміненням, властивості яких наближаються до властивостей монокристалічних зразків, спостерігався тільки позитивний магнітоопір (рис. 9 і 10, криві 2). Це дозволяє трактувати появу

негативного магнітоопору в полі-Si резисторах особливостями електронного переносу, пов'язаного з потенціальними бар'єрами на границях зерен в полікристалічному матеріалі. В сильнолегованих бором зразках полі-Si ($\rho_{300\text{K}} = 3,7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$) після лазерної рекристалізації магнітоопір є низьким, порівняно з нерекристалізованим полікремнієм (рис. 10), і зміна опору в магнітному полі до 14 Тл не перевищує 1 %.

Висновки. На основі досліджень температурної залежності електропровідності нерекристалізованих полікремнієвих шарів на діелектричних підкладках встановлено домінуючий характер стрибкової провідності при низьких температурах в інтервалі від 10 до 25 К. Дослідження питомого опору та впливу на нього деформації дозволяють рекомендувати для застосування в п'єзорезистивних сенсорах механічних величин резистори на основі сильнолегованого полі-Si ($\rho_{300\text{K}} > 1 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$) після лазерної рекристалізації, яка ефективно збільшує середній розмір зерна у напрямку поздовжньої вісі резистора; для таких резисторів чутливість опору до деформації слабо залежить від температури. Одночасно такі структури є найбільш стабільними до впливу сильних магнітних полів.

Нерекристалізований полікремній з середнім рівнем легування має сильну температурну залежність опору і може бути рекомендований як терморезистор для застосування в широкому температурному діапазоні 4,2–300 К.

1. Voronin V.A., Druzhinin A.A., Maryamova I.I. et al. // *Sensors and Actuators*. – 1992. – 30A. – P. 143–147.

2. Дружинін А.О., Лавитська О.М., Мар'ямова І.Й., Панков Ю.М., Ховерко Ю.М. // *Вісн. НУ "Львівська політехніка"*. – 2000. – № 393. – С. 7–11.

3. Lu, N.C.-C., Gerzberg, L. and Lu, C.-Y. // *IEEE Trans. Electron Devices*. – 1981. – ED-28. – P. 818–830.

4. Лавитська О.М. // *Вісн. ДУ "Львівська політехніка"*. – 1998. – № 325. – С. 92–97.

5. Кобка В.Г., Комирєнко Р.П., Конюшин Ю.В. и др. // *Физика твердого тела*. – 1982. – 16. – С. 2176–2178.

6. Шкловский В.И., Эфрос А.Л. *Электронные свойства легированных полупроводников*. – М., 1979. – 416 с.

7. Druzhinin A., Maryamova I., Lavitska E., Pankov Y. and Kogut I. In P.L.F.Hemmett et al. (eds.), *Perspectives, Science and Technologies for Novel Silicon on Insulator Devices*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. – 2000. – P. 127–135.

8. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I. Abstracts NATO Advanced Research Workshop "Progress in Semiconductor-on-Insulator Structures and Devices Operating at Extreme Conditions", Kyiv, Ukraine 15-20 Oct. 2000. – Kyiv, 2000. – P. 73–74.

9. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Oszwaldowski M., Berus T., Kunert H. // *Cryst. Res. Technol.* – 2002. – 37, № 2–3. – P. 243–257.