

УДК 621.315.592

ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРІВ ПОЛІКРЕМНІЮ НА ІЗОЛЯТОРІ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ТЕПЛОВИХ І МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН (За матеріалами доповіді на конференції СЕМСТ-2)

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. Т. Когут, Ю. М. Ховерко

Національний університет "Львівська політехніка", НДЦ "Кристал",
вул.Котляревського, 1, Львів, 79013, тел.(032)2582397, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua

Анотація

ДОСЛІДЖЕННЯ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАРІВ ПОЛІКРЕМНІЮ НА ІЗОЛЯТОРІ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СЕНСОРІВ ТЕПЛОВИХ І МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

А. О. Дружинін, І. Й. Мар'ямова, І. Т. Когут, Ю. М. Ховерко

Досліджено властивості шарів полікремнію на ізоляторі, нерекристалізованих та після лазерної рекристалізації, легованих бором, в температурному діапазоні 4,2-300К і в сильних магнітних полях до 14Т. Проводились вимірювання температурної залежності опору нерекристалізованих і рекристалізованих шарів полікремнію з різною концентрацією носіїв від $3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ до $1,7 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$, п'єзоопору рекристалізованих шарів з концентрацією носіїв $4,8 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ і $1,7 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ в інтервалі температур 4,2-300К, а також магнітоопору всіх досліджуваних зразків при гелієвих температурах. Визначено концентрації носіїв заряду шарів полікремнію на ізоляторі, придатних для створення сенсорів температури і п'єзореzистивних сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах і в сильних магнітних полях.

Ключові слова: шари полікремнію на ізоляторі, лазерна рекристалізація, криогенні температури, п'єзоопір, магнітоопір, сенсори температури і механічних величин.

Summary

STUDY OF POLYSILICON-ON-INSULATOR LAYERS LOW-TEMPERATURE CHARACTERISTICS TO CREATE TEMPERATURE AND MECHANICAL SENSORS

A. A. Druzhinin, I. I. Maryamova, I. T. Kogut, Yu. N. Khoverko

The properties of boron doped polysilicon-on-insulator layers, unrecrystallized and after laser recrystallization, in the temperature range 4.2-300K and in high magnetic fields up to 14T were studied. Temperature dependencies of resistance for unrecrystallized and recrystallized polysilicon layers with different carrier concentration from $3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ до $1.7 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$, piezoresistance of recrystallized layers with carrier concentration $4.8 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ і $1.7 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ as well as the magnetoresistance of all studied layers at liquid helium temperatures were measured. There were determined carrier concentrations of polysilicon-on-insulator layers suitable to create on their basis the temperature sensors and piezoresistive mechanical sensors, operating at cryogenic temperatures and in high magnetic fields.

Key words: polysilicon-on-insulator layers, laser recrystallization, cryogenic temperatures, piezoresistance, magnetoresistance, temperature and mechanical sensors.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛОЕВ ПОЛИКРЕМНИЯ НА ИЗОЛЯТОРЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СЕНСОРОВ ТЕПЛОВЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

А. А. Дружинин, И. Й. Марьямова, И. Т. Когут, Ю. Н. Ховерко

Исследовано свойства слоев поликремния на изоляторе, нерекристаллизованных и после лазерной рекристаллизации, легированных бором, в температурном диапазоне 4,2-300К и в сильных магнитных полях до 14Т. Проводились измерения температурной зависимости сопротивления нерекристаллизованных и рекристаллизованных слоев поликремния с разной концентрацией носителей от $3 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ до $1,7 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$, пьезосопротивления рекристаллизованных слоев с концентрацией носителей $4,8 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ и $1,7 \cdot 10^{20} \text{см}^{-3}$ в интервале температур 4,2-300К, а также магнитосопротивления всех исследованных образцов при гелиевых температурах. Определены концентрации носителей заряда слоев поликремния на изоляторе, пригодных для создания сенсоров температуры и пьезорезистивных сенсоров механических величин, работоспособных при криогенных температурах и в сильных магнитных полях.

Ключевые слова: слои поликремния на изоляторе, лазерная рекристаллизация, криогенные температуры, пьезосопротивление, магнитосопротивление, сенсоры температуры и механических величин.

Вступ

Проблема створення мікроелектронних сенсорів механічних і теплових величин, працездатних в екстремальних умовах, а саме, при низьких температурах і в сильних магнітних полях, є актуальною для різних галузей науки і техніки (авіакосмічна техніка, кріоенергетика та ін.). Відомі мікроелектронні сенсорі механічних і теплових величин на основі полікремнію для кліматичного діапазону температур та для підвищених температур [1,2]. Наші попередні дослідження [3,4] показали можливість створення пьезорезистивних сенсорів механічних величин на основі рекристалізованих лазером шарів полікремнію на ізоляторі (КНІ-структури), працездатних при підвищених температурах до $+350^\circ\text{C}$. Результати перших досліджень шарів полікремнію на ізоляторі при низьких температурах наведено в роботі [5]. Але для того, щоб створити низькотемпературні сенсорі на основі цих структур, необхідно провести при криогенних температурах комплекс досліджень властивостей шарів полі-Si-на-ізоляторі з різною концентрацією носіїв до і після лазерної рекристалізації, а також оцінити вплив магнітного поля на ці характеристики.

Методика експерименту і об'єкт дослідження

Для дослідження використовувались тестові КНІ-структури з полікремнієвими резисторами р-типу провідності, леговані бором, нерекристалізовані і після лазерної рекристалізації. Легування полікремнію відбувалось методом іонної імплантації бору з різними дозами. Лазерна рекристалізація шарів полікремнію [6] проводилась шляхом сканування лазерного променя ($\lambda = 1,06 \text{ мкм}$) по поверхні пластин кремнію з орієнтацією (100), попередньо термічно окислених до товщини 1,0 мкм. Шари полі-Si товщиною 0,5 мкм осаджувались з газової фази в реакторі пониженого тиску при температурі 625°C . Для створення заданого температурного профілю в зоні термічного впливу випромінювання використовували комбіноване покриття з шарів SiO_2 та Si_3N_4 . В оптимальних умовах лазерної рекристалізації отримані шари полікремнію із розміром зерна до $20 \times 500 \text{ мкм}$. Концентрації носіїв заряду в зразках полі-Si до і після лазерної рекристалізації, згідно з результатами Холлівських вимірювань, становила відповідно $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ до і $7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$; $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ після лазерної рекристалізації.

Електропровідність шарів полікремнію досліджувалась в діапазоні температур 4,2...300 К, а вплив магнітного поля з індукцією до 14 Т — при гелієвих температурах з використанням біттерівського магніту. Для вимірювань зразки полі-Si закріплювались на спеціальній вставці, яка встановлювалась в гелієвому кріостаті. Температура вимірювалась за допомогою термопари Cu-Cu(Fe) з точністю $\sim 0,1^\circ\text{C}$. Стабілізований електричний струм через зразки задавався джерелом струму Keithley 224 в межах 1–100 мкА в залежності від опору зразка, електрична напруга на потенційних контактах зразків та вихідний сигнал термопари вимірювались цифровими вольтметрами типу Keithley 199 з точністю до 1 мкВ з одночасним автоматичним реєструванням показів приладів на комп'ютері. Всі вимірювання проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур, м.Вроцлав (Польща) в рамках міжнародної співпраці.

Експериментальна частина

Для оцінки можливості створення сенсорів механічних та теплових величин, працездатних при криогенних температурах, було проведено низькотемпературні дослідження електропровідності, п'єзоопору та магнітоопору шарів полікремнію-на-ізоляторі до і після лазерної рекристалізації з різною концентрацією носіїв заряду.

На рис.1 — 5 наведено одержані експериментально температурні залежності опору шарів полікремнію, нерекристалізованих і рекристалізованих лазером, з різною концентрацією носіїв. Слід відмітити, що для дрібнокристалічних (нерекристалізованих) шарів полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ спостерігається значна температурна залежність опору при криогенних температурах в інтервалі 4,2 — 77 К (рис.2) у порівнянні з цими ж зразками після лазерної рекристалізації (рис.3).

Лазерна рекристалізація призводить до збільшення середнього розміру зерна, що одночасно супроводжується зменшенням загальної площі поверхні границь зерен, на яких відбувається захоплення вільних носіїв заряду [7]. Крім цього, після лазерної рекристалізації зерна полікремнію мають форму, видовжену у напрямку сканування [6]. Це означає, що середній розмір зерна вздовж напрямку сканування є більший за середній розмір зерна поперек на-

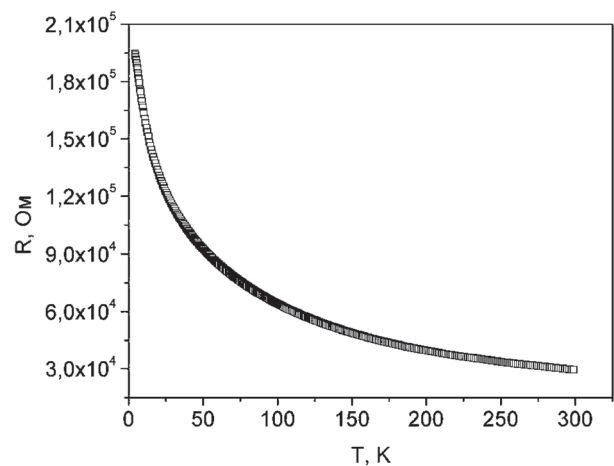


Рис. 1. Температурна залежність опору рекристалізованого полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} = 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

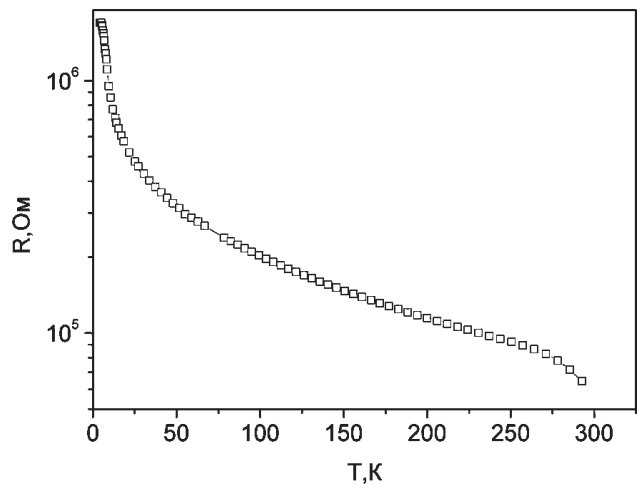


Рис. 2. Температурна залежність опору нерекристалізованого полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300\text{K}} = 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

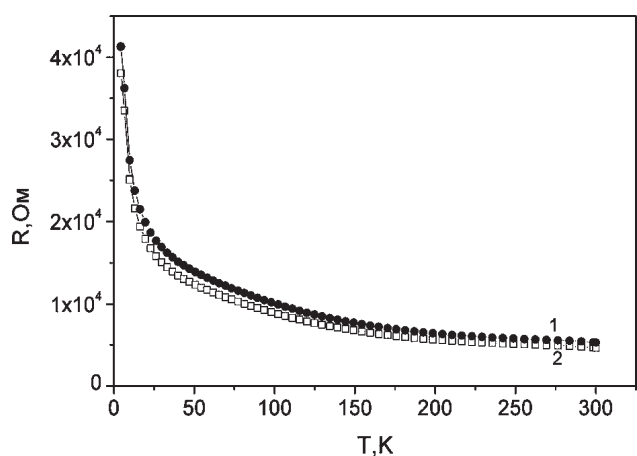


Рис. 3. Температурна залежність опору рекристалізованого полі-Si з $p_{300\text{K}} = 4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (1 і 2 — поперечний і поздовжній резистор по відношенню до лазерного сканування).

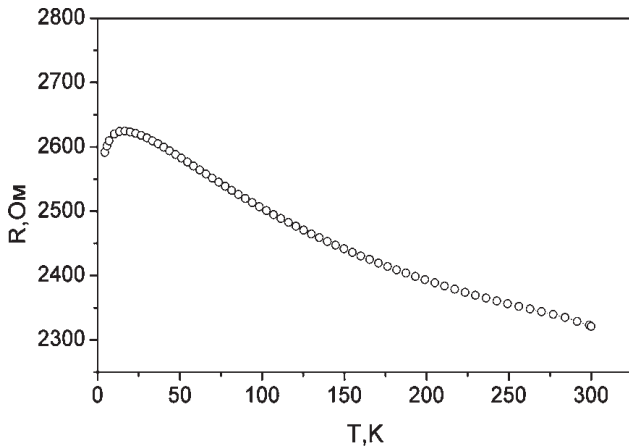


Рис. 4. Температурна залежність опору нерекристалізованого полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300K} = 3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$.

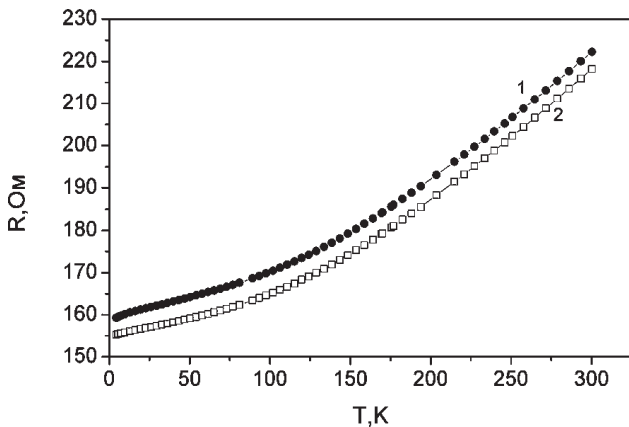


Рис. 5. Температурна залежність опору рекристалізованого полі-Si з $p_{300K} = 1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ (1 і 2 — поперечний і поздовжній резистор по відношенню до лазерного сканування).

прямку сканування, що відповідає більшому значенню опору поперечних полі-Si резисторів у тестових зразках, що і спостерігається на графіках рис.3 і рис.5. Крім того, лазерна рекристалізація, завдяки збільшенню розмірів зерна і зменшенню вкладу границь зерен, призводить до зменшення опору полікремнію у порівнянні з вихідним нерекристалізованим полікремнієм, що яскраво ілюструється наведеними графіками.

Порівнюючи температурні залежності опору досліджених шарів полікремнію, можна визначити, що найбільш сильною температурною залежністю опору характеризуються нерекристалізовані шари полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (в діапазоні 4,2–50K їх $\text{TKO} \approx 9\% \cdot \text{K}^{-1}$) та рекристалізовані лазером шари полі-Si з $p_{300K} \approx 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (в діапазоні

4,2–50K їх $\text{TKO} \approx 2,4\% \cdot \text{K}^{-1}$). Такі шари полі-Si можна рекомендувати як чутливі елементи сенсорів для вимірювання низьких температур до температури рідкого гелію включно.

Для оцінки можливості створення сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах, на основі шарів полікремнію на ізоляторі проводились дослідження п'єзоопору рекристалізованих шарів полікремнію в діапазоні температур 4,2–300 K. Для цього зразки полікремнію закріплювались на консольних балках, які піддавались деформації за допомогою спеціального пристрою. Балки зі зразками встановлювались у гелієвому кріостаті. Експериментально вимірювались температурні залежності опору вільних (недеформованих) та деформованих зразків полікремнію у вказаному температурному діапазоні. З одержаних характеристик розраховувались значення коефіцієнта тензочутливості цих зразків для різних температур. Результати проведених низькотемпературних досліджень п'єзоопору рекристалізованих шарів полікремнію наведено на рис.6, з якого видно, що найбільш чутливими до деформації виявились рекристалізовані лазером шари полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (рис.6,а). Їх коефіцієнт тензочутливості при 4,2 K досягає значень $K_{4,2K} \geq 300$, але вони характеризуються достатньо сильною температурною залежністю коефіцієнта тензочутливості (в діапазоні 4,2–77 K температурний коефіцієнт тензочутливості (ТКТЧ) $\approx -1,1\% \cdot \text{K}^{-1}$). На відміну від них сильно леговані рекристалізовані шари полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ мають на порядок менші значення коефіцієнта тензочутливості при низьких температурах (рис.6,б), але вони мають слабку температурну залежність коефіцієнта тензочутливості (ТКТЧ $\approx -0,2\% \cdot \text{K}^{-1}$ в діапазоні 4,2–77 K).

Таким чином, для створення сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах до 4,2 K, найбільш придатні рекристалізовані лазером шари полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Для вимірювання механічних величин у більш широкому діапазоні температур 4,2–300 K можна використовувати сильно леговані шари полі-Si з $p_{300K} \approx 1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Необхідно видзначити, що ці зразки мають найменшу температурну залежність опору в широкому діапазоні температур серед досліджених зразків (рис.5).

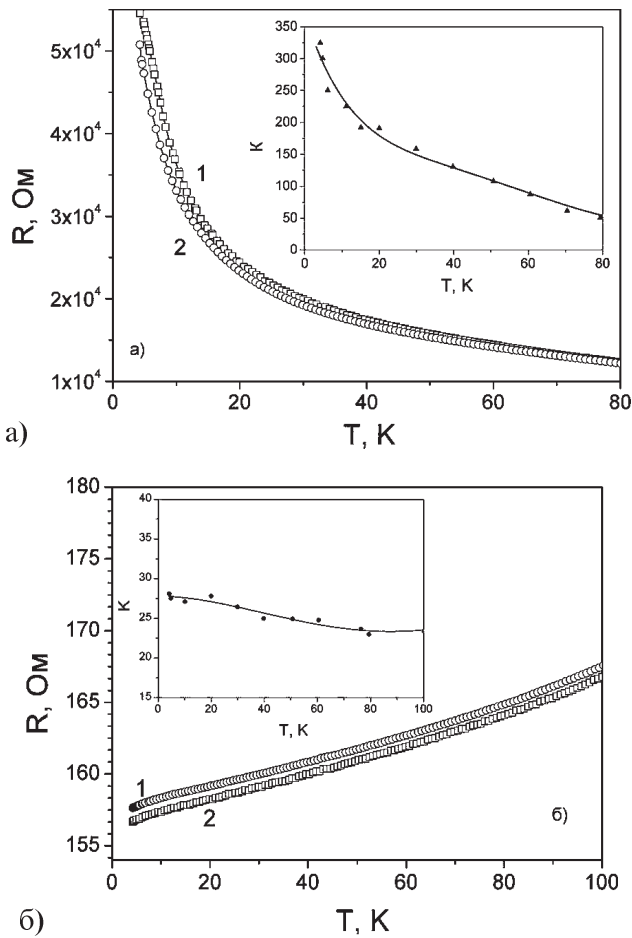


Рис.6. Температурні залежності опору рекристалізованих лазером шарів полі-Si з концентрацією носіїв p_{300K} : (а)– $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (б)– $1,7 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ для деформованих (1) і недеформованих (2) зразків; на вставках — температурні залежності коефіцієнта тензочутливості цих зразків.

Для оцінки можливості застосування низькотемпературних сенсорів механічних і теплових величин на основі шарів полікремнію в сильних магнітних полях проводились вимірювання поперечного магнітоопору цих шарів при криогенних температурах до 4,2 К [8]. Одержані експериментально результати вимірювання магнітоопору досліджених шарів полікремнію з різною концентрацією носіїв наведено на рис.7-9.

Для рекристалізованих шарів з $p_{300K} = 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ зміна опору під впливом магнітного поля до 8Т є порівняно слабкою. Враховуючи сильну температурну залежність опору таких зразків при низьких температурах (рис.1) і слабкий вплив магнітного поля, можна рекомендувати такі полі-Si шари для створення сенсорів криогенних температур, праце-

здатних в сильних магнітних полях до 6Т, де зміна опору під впливом магнітного поля не перевищує 1,5 %. Для зразків нерекристалізованого полікремнію з $p_{300K} = 2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ також спостерігається порівняно невеликий магнітоопір при гелієвих температурах в полях до 6Т (рис.7). Необхідно відзначити, що в цих зразках спостерігався від'ємний магнітоопір у порівняно слабких магнітних полях. В сильних магнітних полях магнітоопір цих зразків стає додатний і збільшується зі зниженням температури, досягаючи максимальної величини при 4,2 К (рис. 7, крива 1). Порівнюючи рис. 7 і 8 (крива 1), видно, що для цих зразків магнітоопір рекристалізованих лазером шарів полікремнію більший, ніж для нерекристалізованих.

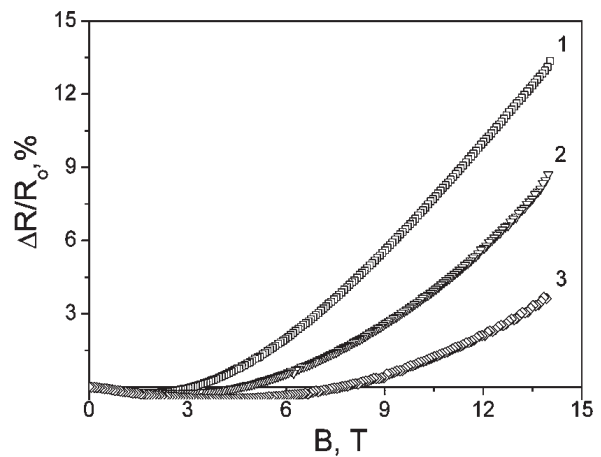


Рис.7. Поперечний магнітоопір нерекристалізованих шарів полікремнію з $p_{300K} = 2,4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при різних температурах: 1–4,2 К, 2 — 6,8 К, 3– 9,7 К.

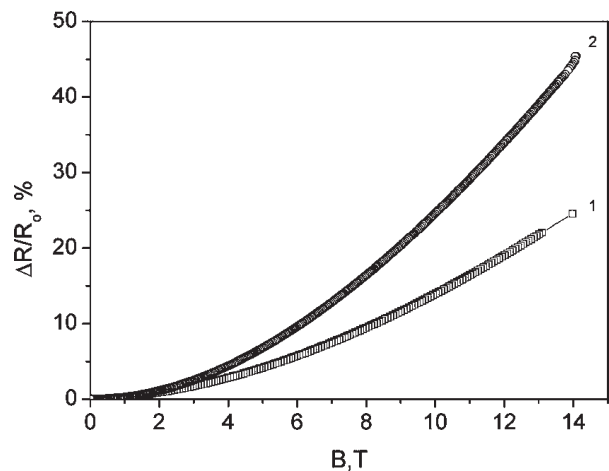


Рис. 8. Поперечний магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з $p_{300K} = 4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при 4,2 К, недеформованих (1) і деформованих (2).

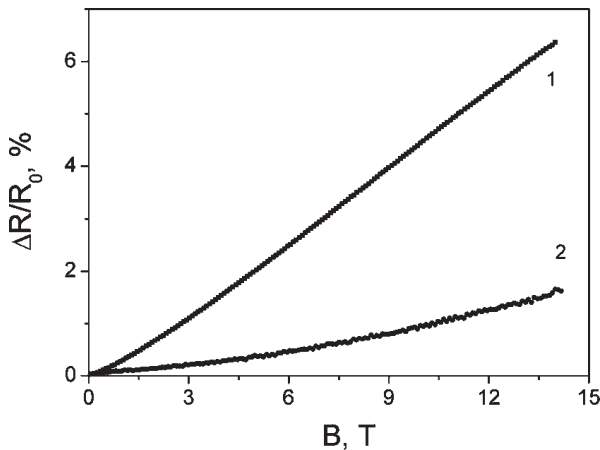


Рис. 9. Поперечний магнітоопір сильнолегованих шарів полікремнію при $T=4,2$ К:
 1 — нерекристалізованих з $p_{300K}=3,9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$,
 2 — рекристалізованих з $p_{300K}=1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$.

Із рис. 8 видно, що магнітоопір рекристалізованого полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300K}=4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, який піддавався деформації стиску ($\epsilon = -2,1 \times 10^{-4}$ відн.од.) більший, ніж для недеформованого.

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 нерекристалізованими шарами (рис. 9). В цьому випадку зміна опору полікремнію в магнітному полі до 14 Т не перевищує 1% (рис. 9, крива 2). Необхідно відзначити, що в рекристалізованому лазером полікремнії, який за своїми властивостями наближається до монокристалічного кремнію, спостерігався тільки додатний магнітоопір.

Висновки

Враховуючи сильну температурну залежність опору нерекристалізованих шарів полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 2,4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ (в діапазоні 4,2–50К їх $\text{TKO} \approx 9\% \cdot \text{K}^{-1}$) та рекристалізованих лазером шарів полі-Si з $p_{300K} \approx 7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (в діапазоні 4,2–50К їх $\text{TKO} \approx 2,4 \text{ \%} \cdot \text{K}^{-1}$), їх можна рекомендувати як чутливі елементи сенсорів для вимірювання низьких температур до температури рідкого гелію включно. Для роботи в сильних магнітних полях при гелієвих температурах найбільш придатні рекристалізовані лазером шари полі-Si з $p_{300K}=7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для створення сенсорів температури на їх основі.

Сильно леговані рекристалізовані шари полі-Si ($p_{300K}=1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$) найбільш стабільні до дії магнітного поля при 4,2К. Такий полікремній може бути рекомендований для створення п'єзрезистивних сенсорів механічних величин, працездатних при криогенних температурах і в сильних магнітних полях, в той час як для більш чутливих сенсорів механічних величин для криогенних температур до 4,2К найбільш придатні шари рекристалізованого лазером полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300K}=4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Література

1. French P.J., Evans A.G. Piezoresistance in polysilicon and its application to strain gauges// Solid State Electronics. — 1989. — Vol.32, No.1. — P.1–10.
2. Obermeier E., Kopystinsky P. Polysilicon as a material for microelectronic applications// Sensors and Actuators, 1992.—Vol.30A.— P.149–155.
3. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Voronin V. Mechanical sensors based on laser-recrystallized SOI structures//Sensors and Actuators A.Physical.—A61.—1997.—P.400-404.
4. Druzhinin A., Maryamova I., Lavitska E., 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., Kluwer Acad. Publ.—Dordrecht.—2000.— P.127-135.
5. Druzhinin A., Lavitska E., Maryamova I., Khoferko Y. Laser recrystallized SOI layers for sensor applications at cryogenic temperatures. F. Balestra et al. (eds.) Progress in SOI structures and Devices Operating at Extreme Conditions. Kluwer Acad. Publishers. Printed in the Netherlands.— 2002. — P. 233 — 237.
6. Druzhinin A.A., Kostur V.G., Kogut I.T., Pankevich I.M., Deschinsky Y.L. Microzone laser recrystallized polysilicon layers on insulator // Phys. and Tech. Probl. of SOI Struct. and Devices. J.P.Collinge et al. (eds.) NATO ASI Series. Kluwer Acad. Publishers, Netherlands.— 1995.— P.101–105.
7. Кобка В.Г., Комирєнко Р.П., Конюшин Ю.В. и др. Об электропроводности поликристаллических полупроводников // Физика твердого тела. — 1982. — Т.16. — С.2176–2178.
8. Druzhinin A., Maryamova I., Kogut I. 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. Kluwer Acad. Publ.—Netherlands.—2005.—P. 297-302.