ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА
Т. 10, № 1 (2009) С. 236-239

PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLID STATE
V. 10, № 1 (2009) P. 236-239

УДК 621.315.592

ISSN 1729-4428

А.О. Дружинін[1], І.Й. Мар'ямова[1], Ю.М. Ховерко[1], І.Т. Когут[2]

Шари полікремнію на ізоляторі як чутливі елементи сенсорів кріогенних температур

[1]Національний університет "Львівська політехніка", НДЦ "Кристал"
вул. Котляревського,1,Львів 79013,Україна тел.:(032)258-23-97, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua
[2]Прикарпатський національний університет ім. В.Стефаника,
вул. Шевченка,57, м.Ів.-Франківськ, 76000, Україна

Досліджено вплив температури в діапазоні 4,2 – 300 К та магнітного поля з індукцією до 14 Тл на електричні властивості шарів полікремнію на ізоляторі, легованих бором, з метою оцінки можливості створення на їх основі мікроелектронних терморезистивних сенсорів низьких температур. Показано, що нерекристалізовані шари полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 2{,}4\times10^{18}$ см$^{-3}$, можуть використовуватись як чутливі елементи сенсорів, призначених для вимірювання кріогенних температур. Рекристалізовані лазером шари полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 7\times10^{17}$ см$^{-3}$ рекомендуються як чутливі елементи сенсорів кріогенних температур, працездатних в сильних магнітних полях.

Ключові слова: шари полікремнію, кріогенні температури, магнітні поля, сенсори температури.

Стаття поступила до редакції 25.07.08; прийнята до друку 15.12.08.

Вступ

Проблема створення мікроелектронних сенсорів теплових величин, працездатних в екстремальних умовах, а саме, при низьких температурах і в сильних магнітних полях, є актуальною для різних галузей науки і техніки. Однак відомі мікроелектронні терморезистивні сенсори на основі структур кремній на ізоляторі (КНІ-структур) не призначені для вимірювання кріогенних температур. Так, в роботі Обермайера [1] обговорюється можливість створення терморезистивного сенсора температури на основі полікремнію з різною концентрацією бора; наведено характеристики сенсора для вимірювання температури в діапазоні -40…+140 ^{o}C з чутливістю ~ -0,35%× град $^{-1}$. В роботі [2] описано мікроелектронні перетворювачі температури на основі структур кремній на сапфірі (КНС-структур) р-типу з концентраціями носіїв струму $3\times\cdot10^{17}$см$^{-3}$ і 6×10^{20}см$^{-3}$. КНС-структури з концентрацією p=3×10^{17}см$^{-3}$ мають монотонно зростаючу температурну залежність опору в діапазоні температур -70…+300 ^{o}C і постійне значення температурного коефіцієнту опору (ТКО) ~0,49%× град$^{-1}$ в діапазоні температур-50…+150°C. Для вимірювання температури в широкому діапазоні 4,2 -373 К розроблено мікроелектронні термодіодні сенсори на основі кремнію [3,4], зокрема, датчики ДСТ-1 в області температур поблизу температури рідкого гелію характеризуються підвищеною чутливістю до 180 мВ×град$^{-1}$ і мінімізованим впливом саморозігріву на точність вимірювання за рахунок малого робочого струму ~1 мкА.

Метою наших досліджень було створення чутливих мікроелектронних терморезистивних сенсорів на основі шарів полікремнію на ізоляторі, працездатних в екстремальних умовах, зокрема при кріогенних температурах до температури рідкого гелію, і в сильних магнітних полях.

I. Експериментальна частина.

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 [5] проводилась шляхом сканування лазерного променя (λ = 1,06 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 використовувалось комбіноване покриття з шарів SiO_2 та Si_3N_4.

В оптимальних умовах лазерної рекристалізації отримано шари полікремнію із розміром зерна до

20×500 мкм. Концентрації носіїв заряду в зразках полі-Si до і після лазерної рекристалізації, згідно з результатами Холлівських вимірювань, становила від 7×10^{17} до $1{,}7\times10^{20}$ см$^{-3}$. Електропровідність шарів полікремнію досліджувалась в інтервалі температур 4,2–300 К, а вплив магнітного поля з індукцією до 14 Тл – при гелієвих температурах з використанням біттерівського магніту. Для вимірювань зразки полі–Si закріплялись на спеціальній вставці, яка встановлювалась у гелієвому кріостаті. Температура вимірювалась за допомогою термопари Cu-Cu(Fe) з точністю ~0,1°С. 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. Вимірювання проводились у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур, м. Вроцлав (Польща) в рамках угоди про міжнародну співпрацю.

Згідно наших попередніх досліджень [6] було встановлено, що найбільш сильною температурною залежністю електропровідності в області низьких температур характеризуються нерекристалізовані шари полі-Si з концентрацією носіїв $p_{300K}\approx2{,}4\times10^{18}$см$^{-3}$ та рекристалізовані лазером шари полі-Si з $p_{300K}\approx7\times10^{17}$см$^{-3}$. Тому для створення сенсорів температури наші дослідження були зосереджені на цих структурах.

На рис. 1. наведено температурну залежність опору нерекристалізованого полікремнієвого резистора з концентрацією носіїв $2{,}4\times10^{18}$см$^{-3}$.

Для цих зразків у діапазоні 4,2-50 К температурний коефіцієнт опору значний і становить ТКО ≈ -9%×К$^{-1}$, що дає можливість використати такі шари полікремнію для створення чутливих мікроелектронних сенсорів, придатних для вимірювання кріогенних температур.

Температурна залежність опору

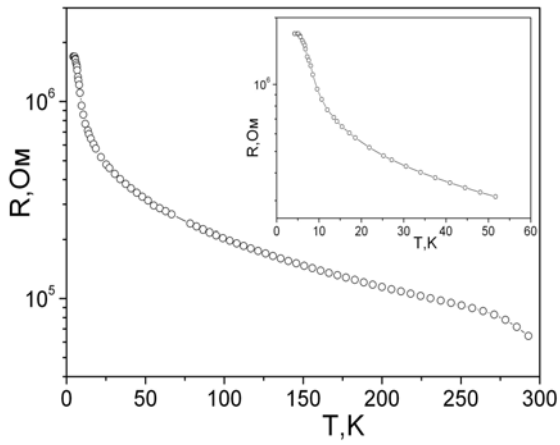

Рис. 1. Температурна залежність опору нерекристалізованого полі-Si з концентрацією носіїв p_{300K} =$2{,}4\times10^{18}$ см$^{-3}$.

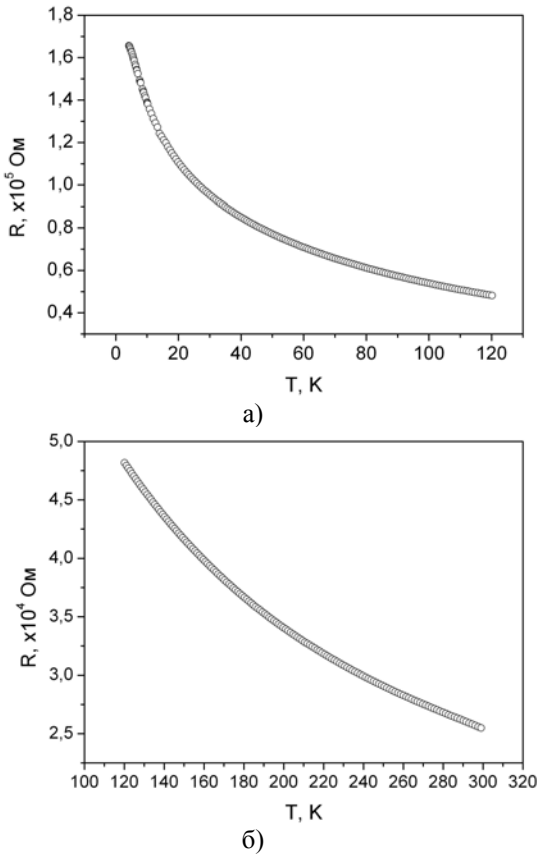

Рис. 2. Температурна залежність опору рекристалізованого полі-Si з концентрацією носіїв p_{300K}=7×10^{17}см$^{-3}$ для різних діапазонів температур: а) 4,2-120К, б) 120-300К.

рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв після рекристалізації, яка дорівнює 7×10^{17}см$^{-3}$, ілюструється рис. 2.

Для цих зразків температурний коефіцієнт опору визначався для різних температурних діапазонів і дорівнював відповідно: ТКО ≈ -2,4 %×К$^{-1}$ у діапазоні 4,2-50 К; ТКО≈-2,08 %×К$^{-1}$ у діапазоні 4,2-120 К і ТКО≈ -0,49 %×К$^{-1}$ у діапазоні 120-300 К.

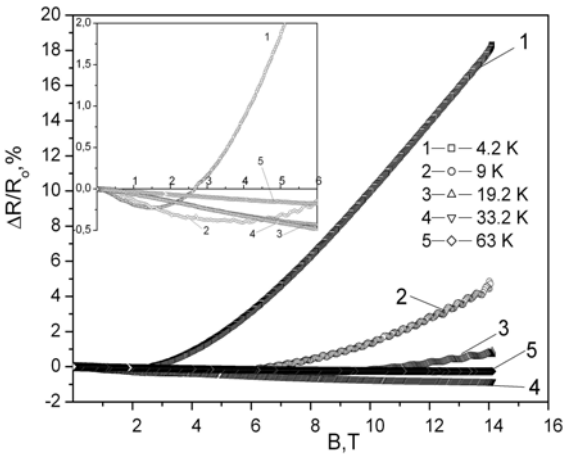

Рис. 3. Поперечний магнітоопір нерекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв заряду p_{300K}= $2{,}4\times10^{18}$ см$^{-3}$ при різних температурах.

Для оцінки можливості застосування низькотемпературних сенсорів теплових величин на основі шарів полікремнію в сильних магнітних полях проводились вимірювання магнітоопору цих шарів при кріогенних температурах до 4,2 К. Одержані експериментально результати вимірювання магнітоопору досліджуваних шарів полі-Si наведено на рис. 3 і 4.

Як видно з рис 3., залежність опору нерекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв p_{300K} = 2,4×10^{18} см$^{-3}$ від індукції магнітного поля при низьких температурах має складний характер. Так, в цих зразках у всьому досліджуваному діапазоні температур 4,2 - 63 К спостерігається від'ємний магнітоопір, який в інтервалі температур 4,2 - 33 К збільшується за величиною, а з підвищенням температури до 70 К зменшується за величиною, але проявляється у всьому досліджуваному діапазоні магнітних полів до 14 Тл. При температурі рідкого гелію магнітоопір цих шарів полі-Si в полях до 1,5 Т зменшується, а потім починає зростати, і при індукції 14 Тл їх опір збільшується приблизно на 18 % від свого значення при відсутності магнітного поля. Тому сенсори кріогенних температур на основі цих шарів полі –Si не придатні для роботи в магнітному полі.

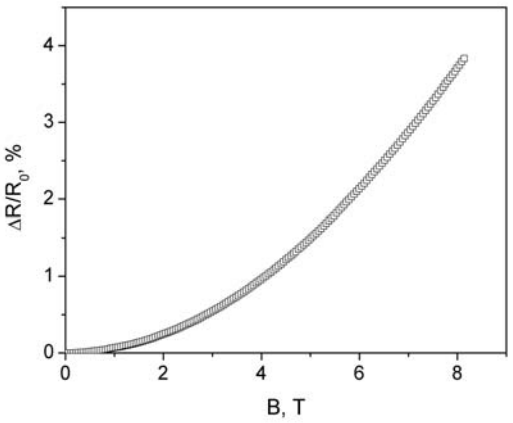

Рис. 4. Поперечний магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв заряду p_{300K}=7×10^{17} см$^{-3}$.

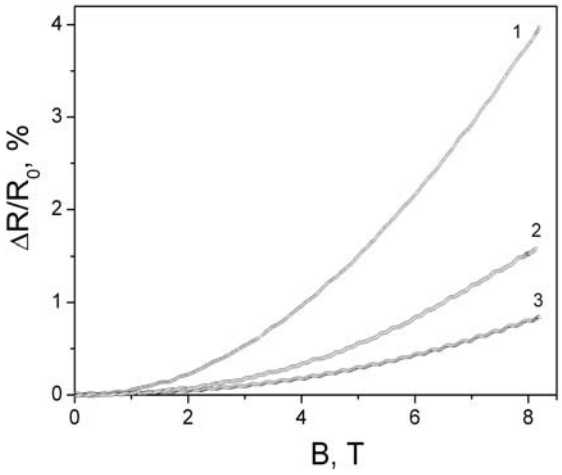

Рис. 5. Поздовжній магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв заряду p_{300K}=7×10^{17} см$^{-3}$ при різних температурах: 1 – 4,2 К, 2 – 8,6 К, 3 – 11,7 К.

Зовсім інший характер має магнітоопір рекристалізованих шарів полікремнію з концентрацією носіїв p_{300K}≈7×10^{17} см$^{-3}$ (рис. 4). Для цих зразків спостерігався монотонний характер зміни магнітоопору під впливом магнітного поля: у всьому досліджуваному діапазоні 0-8 Тл спостерігався тільки позитивний магнітоопір. З підвищенням температури магнітоопір суттєво зменшується (рис. 5).

Беручи до уваги сильну температурну залежність опору таких зразків при низьких температурах (рис. 2) і слабкий вплив магнітного поля, можна рекомендувати такі полі-Si шари для створення сенсорів кріогенних температур, працездатних в сильних магнітних полях до 6 Тл, оскільки зміна опору під впливом магнітного поля не перевищує 1,5 %.

В діапазоні температур 4,2-300 К проведено градуювання тестового зразка полі-Si резистора з концентрацією вільних носіїв заряду p_{300K} ≈ 7×10^{17} см$^{-3}$, що піддавався лазерній обробці, як чутливого елемента сенсора температури (рис. 6).

Характеристика такого чутливого елемента сенсора описується за експоненційним законом в широкому інтервалі температур 4,2 – 300 К:

$$T = A_1 \times \exp(-R/t_1) + A_2 \times \exp(-R/t_2) + A_3 \times \exp(-R/t_3) + y_0 , \quad (1)$$

де y_0=1,92, A_1=282,80, t_1=24986,87, A_2=261,63, t_2=38590,40, A_3=2470,46, t_3=6889,68.

Для перевірки працездатності розробленого мікроелектронного сенсора температури на основі шарів полікремнію його було використано у Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів та низьких температур під час низькотемпературних досліджень напівпровідникових мікрокристалів. Покази, які реєструвались розробленим сенсором температури, додатково перевірялись за допомогою

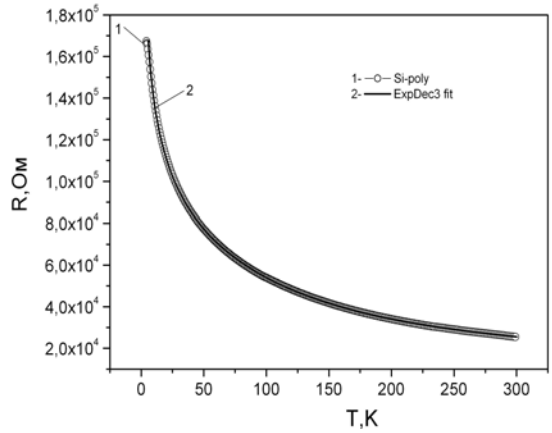

Рис. 6. Градуювальна характеристика рекристалізованого полі-Si резистора з p_{300K}=7×10^{17}см$^{-3}$ як чутливого елемента сенсора температури:1-експеримент, 2- апроксимація.

термопари Cu–Cu(Fe) з точністю ~0,1°C за стандартною методикою.

Висновки.

В результаті проведених досліджень показано, що нерекристалізовані шари полікремнію з концентрацією носіїв p_{300K}≈2,4×10^{18}см$^{-3}$, завдяки сильній температурній залежності опору при низьких температурах, можуть використовуватись як чутливі елементи мікроелектронних терморезистивних сенсорів, призначених для вимірювання кріогенних температур. Температурний коефіцієнт опору таких сенсорів становить ~ -9%×К$^{-1}$ у діапазоні температур 4,2 – 50 К.

Рекристалізовані лазером шари полікремнію з концентрацією носіїв $p_{300K} \approx 7\times10^{17}$ см$^{-3}$ можна рекомендувати як чутливі елементи сенсорів кріогенних температур, працездатних в сильних магнітних полях до 6 Тл, з температурним коефіцієнтом опору ~ -2,4 %×К$^{-1}$ у діапазоні температур 4,2–50 К і -2,08 %×К$^{-1}$ у діапазоні температур 4,2–120 К.

[1] E. Obermeier, P. Kopystinsky. Polysilicon as a material for microelectronic applications. // *Sensors and Actuators*, **30A,** pp.149-155 (1992.).

[2] Н.Н Суханова., В.И Суханов., В.В.Хасиков, А.Я.Юровския. Полупроводниковые термопреобразователи с расширенным диапазоном рабочих температур// *Датчики и системы*, (7-8), с.49-52 (1999).

[3] Ю.М.Шварц, М.М.Шварц, А.Н.Иващенко и др. Новое поколение микроэлектронных кремниевых термодатчиков// *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, (3), с.59-61 (2003).

[4] Ю.М Шварц., М.М.Шварц. Микроэлектронные термодиодные сенсоры и их применение в экстремальной электронике// Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. (СЕМСТ-1). Тези доповідей, Одеса «Астропринт», с.42-43 (2004).

[5] A.A.Druzhinin, V.G.Kostur, I.T.Kogut et al. Microzone laser recrystallized polysilicon layers on insulator. // In *Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices*. Eds. J.P. Collinge, et al., pp. 101-105, Kluwer Academic Publ., Netherlands (1995).

[6] А.О. Дружинін, І.Й. Мар'ямова, Ю.М. Ховерко, С.М. Матвієнко. Властивості шарів полікремнію на ізоляторі при кріогенних температурах і в сильних магнітних полях. // *Фізика і хімія твердого тіла*, **6** (2), С. 241-246 (2005).

A.A. Druzhinin[1], I.I. Maryamova[1], Yu.M. Khoverko[1], I.T. Kogut[2]

Polysilicon-on-Insulator Layers as Active Elements of Cryogenic Temperature Sensors

[1]Lviv Polytechnic National University, Sci.-Research Center "Crystal",
Kotlyarevsky Str.,1, Lviv,79013, Ukraine tel.(0322)721632, e-mail: druzh@polynet.lviv.ua
[2]V.Stefanyk National Precarpatian University 57, Shevchenko Str., Ivano-Frankivsk, 76000, Ukraine

The effect of temperature in 4,2-300 K range and magnetic field with induction up to 14 T on the electrical properties of boron doped polysilicon-on-insulator layers was studied to evaluate the possibility to develop microelectronic thermoresistive sensors on their basis. It was shown that non-recrystallized polysilicon layers with carrier concentration p_{300K}=2.4×10^{18} cm^{-3} could be used as active elements of sensors to measure cryogenic temperatures. Laser recrystallized polysilicon layers with carrier concentracion p_{300K}=7×10^{17} cm^{-3} are recommended as active elements of cryogenic temperature sensors operating at high magnetic fields.

Key words: polysilicon layers, cryogenic temperatures, magnetic fields, temperature sensors.