

Є.Ф. Венгер¹, А.С. Зенкін², Н.Л. Козелло², Б.П. Колодич¹, Н.М. Криницька^{1,2},
О.С. Кулик^{1,2}, В.Ф. Мітін¹, І.Ю. Неміш¹, В.В. Холевчук¹

Мініатюрні кремнієві діодні та германієві резистивні термометри для вимірювання низьких температур

¹Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України, м. Київ, Проспект Науки, 41, тел.(044)525-59-39,
E-mails: mitin@isp.kiev.ua; mitin@microsensor.com.ua

²Київський національний університет технологій та дизайну, м. Київ, вул. Немировича-Данченка, 2

Представлені результати розробки мініатюрних кремнієвих діодних і германієвих резистивних термометрів, призначених для вимірювання низьких температур (1 – 400 K). Проведені дослідження термометричних характеристик для партії термометрів у діапазоні температур 2,6 – 300 K. Вивчений вплив сильного магнітного поля (до 7,5 Tл) на покази термометрів при низьких температурах (1,8 – 4,2 K). Досліджена однорідність, взаємозамінність і стабільність термометричних характеристик термометрів. Встановлено, що магнітне поле мало впливає на термометричні характеристики термометрів опору, виготовлених на основі плівок Ge на GaAs, тому такі термометри можуть бути використані для вимірювання температури за наявності сильних магнітних полів. Кремнієві діодні термометри, навпаки, сильно чутливі до магнітного поля. Вони не рекомендовані для застосування при вимірюванні температури у магнітному полі.

Ключові слова: діодні сенсори температури, термометри опору, термометрія, низькі температури, кріогеніка.

Стаття постуила до редакції 15.01.2010; прийнята до друку 15.03.2010.

Вступ

Розвиток нових технологій і автоматизація виробничих процесів неможливі без використання датчиків різних фізичних величин: температури, деформації, тиску, індукції магнітного поля, світлового потоку і т. п. Температура є однією із фундаментальних характеристик термодинаміки та одним із найважливіших параметрів у різних технологічних процесах. У цій статті основна увага буде приділена низьким температурам, які у земних умовах можуть бути отримані тільки штучним чином. У наш час низькі температури все більше використовуються у науці і техніці, наприклад, надпровідні прискорювачі елементарних частинок, кріоелектроніка, термоядерна енергетика, ракетна та космічна техніка, кріомедицина та кріобіологія і т.п.

До найпоширеніших у наш час робочих засобів вимірювання температури належать термопары, термометри опору (металічні та напівпровідникові) і діодні сенсори температури. Огляд існуючих вимірювальних перетворювачів температури, зокрема, для вимірювання низьких температур можна знайти, наприклад, у монографії [1] та оглядових статтях [2 – 4]. Розглянемо коротко особливості резистивної та діодної термометрії.

Термометри опору. Незважаючи на значну

кількість наукових статей, присвячених розробці кріогенних термометрів опору, не так багато цих термометрів виготовляють серійно. У даний час для практичної кріогенної термометрії існують на ринку і широко використовуються напівпровідникові термометри опору, що виготовляються із композиційного вуглецю (1 – 420 K) [2, 5, 6], плівок оксинітриду цирконію [2, 4, 7], плівкового (0,03 – 500 K) [2, 8 – 10] і об'ємного германію (0,03 – 273 K) [2, 6, 11, 12], а також оксиду рутенію (0,03 – 30 K) [2, 4].

Напівпровідникові терморезистори, як правило, потребують індивідуального калібрування. Вони можуть здійснювати прецизійні вимірювання температури [12], істотно менш чутливі до магнітних полів [10, 11, 13, 14] (порівняно з діодами та термопарами) і мають хорошу радіаційну стійкість [10, 14, 15].

Діодні термометри. У діодних термометрах для вимірювання температури використовуються властивості *p-n*-переходу. Найбільш широко для перетворення температури у електричний сигнал використовується температурна залежність падіння напруги на *p-n*-переході, увімкненому у прямому (пропускному) напрямку. Зазвичай діодні термометри застосовують для вимірювання температури в інтервалі від 1 K до 500 K. Перші

роботи із вивчення можливості використання кремнієвих діодів як термометрів з'явилися близько п'ятдесяти років тому [16 – 18]. З того часу діодна термометрія широко використовується у різних галузях техніки.

Варто відзначити, що напівпровідникові та резистивні термометри взаємодоповнюють одні одних на ринку термометрії. Порівняно з термометрами опору, діодні термометри мають як переваги, так і недоліки. Технологія виготовлення діодів і транзисторів дозволяє створювати діодні термометри з однорідними термометричними характеристиками (температурною залежністю напруги на переході у прямому напрямі при постійному струмі) та використовувати для партії приладів спільну (стандартну) калібрувальну залежність із задовільним для більшості споживачів допуском (до одного градуса). Таким чином, це усуває необхідність повного індивідуального калібрування кожного діодного термометра, а вимагає тільки їх перевірки у декількох температурних точках на відповідність до стандартного калібрування і у такий спосіб робить діодні термометри дешевшими та взаємозамінними.

Однак, відмітною рисою діодів є підвищений шум при малих струмах, у зв'язку з чим робочий струм діодів, як правило, не менший за 10 мкА. Це обмежує використання діодів для точного вимірювання температури при низьких температурах, оскільки відносно великий струм (10 мкА) при низьких температурах призводить до значного тепловиділення (саморозігріву) діода, а зменшення струму неухильно спричинює збільшення шумів та нестабільність *p-n*-переходу, що теж привносить значні похибки вимірювання температури. Це є значним недоліком для діодів, що обмежує їх використання для точного вимірювання низьких температур та потребує вирішення завдання з оптимізації вибору струму (для мінімізації шумів і тепловиділення) з метою мінімізації похибки вимірювання температури.

Крім того, як відомо, магнітні поля сильно впливають на характеристики кремнієвих діодів, роблячи їх практично непридатними для вимірювання температури за наявності магнітного поля. Діодні сенсори температури також поступаються термометрам опору у радіаційній стійкості. Тому діодні сенсори температури здебільшого використовуються для вимірювання не надто низьких температур, коли не вимагається висока точність вимірювань і відсутні магнітні поля, зате важлива взаємозамінність сенсорів та їх низька вартість.

Якщо не розглядати зразкові термометри, що використовуються у лабораторних умовах для калібрування інших термометрів, то основною тенденцією розвитку практичної кріогенної термометрії є мікромініатюризація термометрів, зменшення їх чутливості до магнітного поля і підвищення радіаційної стійкості. Це пов'язано із використанням таких термометрів у екстремальній електроніці, що працює при низьких та наднизьких

температурах, за умов впливу сильних магнітних полів та іонізуючого випромінювання, наприклад надпровідні магнітні системи різного призначення, ракетна та космічна техніка, ядерні та термоядерні енергетичні установки.

Дана робота присвячена розробці та дослідженню нових мініатюрних кремнієвих діодних і германієвих резистивних термометрів, призначених для вимірювання, перш за все, низьких температур. Робота охоплює дослідження термометричних характеристик у діапазоні температур 2,6 – 300 К, вивчення впливу магнітного поля на термометричні характеристики при низьких температурах, а також визначення довготермінової стабільності та однорідності параметрів сенсорів.

I. Конструктивне виконання і методика вимірювань

Діодний термометр

Діодний термометр, що досліджувався у даній роботі, є транзисторною структурою із кремнію розмірами (0,3×0,3×0,15) мм, вміщеною у герметичний немагнітний циліндричний корпус розміром Ø1,2 мм і товщиною 1,0 мм. Для зручності монтажу на плоскій поверхні цей циліндричний корпус може також розташовуватися на платі розмірами (2×2×0,15) мм. Зовнішній вигляд і конструкції корпусів подані на рис. 1.

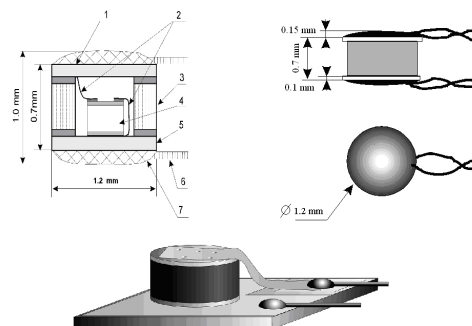


Рис. 1. Загальний вигляд і конструкція корпусу термометра: 1, 5 – мідні позолочені кришки корпусу; 2 – контактні виводи; 3 – металокерамічна втулка; 4 – термочутливий елемент; 6 – зовнішні контактні виводи; 7 – олов'яний припій.

Як відомо, можливі три варіанти ввімкнення транзистора в електричне коло з метою отримання діодної характеристики: а) використовується емітер і колектор, а база знаходиться у «підвішеному» стані (надалі будемо позначати таке ввімкнення транзистора Е–К); б) використовується емітер і колектор, а база з'єднана із колектором (Е–КБ); в) використовується база і колектор, а емітер знаходиться у «підвішеному» стані (Б–К). Нами були проведені дослідження температурної залежності напруги на *p-n*-переході, включеному у прямому

Таблиця 1

Розкид напруги ΔU та еквівалентне значення температури ΔT для партії транзисторів при двох варіантах ввімкнених: емітер–колектор (Е–К) та база–колектор (Б–К)

Тип ввімкнення транзистора	4,2 К		77,4 К		273,1 К	
	ΔU (мВ)	ΔT (К)	ΔU (мВ)	ΔT (К)	ΔU (мВ)	ΔT (К)
Е–К	± 90	± 5	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,75$	$\pm 0,3$
Б–К	± 12	$\pm 0,15$	± 1	$\pm 0,3$	± 7	$\pm 1,5$

(пропускному) напрямку при постійному струмі 10 мкА для цих трьох варіантів ввімкнення транзистора.

Термометр опору

Термометри опору виготовлялися із плівок германію, що осаджувалися методом термічного випаровування у вакуумі на підкладки із напівізолюючого арсеніду галію. Основні принципи та метод виготовлення плівок Ge на GaAs, які забезпечують необхідні електричні властивості для створення термометрів опору, викладені у [19]. Чутливі елементи цих термометрів, так само як і транзисторні структури, мали розміри (0,3×0,3×0,15) мм та вміщувалися у такі ж герметичні корпуси, подані на рис. 1. Було розроблено кілька моделей термометрів, що мають різні експлуатаційні характеристики і призначені для роботи у різних діапазонах температур. Ці моделі були позначені як TTR-x і оптимізовані для роботи у наступних діапазонах температур: TTR-D (0,03 – 300 К), TTR-G і TTR-L (0,3 – 400 К), TTR-A і TTR-B (1,0 – 400 К), TTR-2 (70 – 400 К) та TTR-3 (200 – 500 К) [8 – 10, 19]. У цій роботі були розроблені та досліджені нові термометри моделі TTR-M (1,5 – 450 К), які були спеціально оптимізовані для вимірювання температури за присутності сильних магнітних полів.

Методика вимірювань

Для досліджень використане спеціальне метрологічне обладнання, що призначене для калібрування криогенних сенсорів температури у діапазоні 2,6 – 300 К. Установка для калібрування термометрів забезпечувала стабільну і однорідну температуру із точністю $\pm 0,005$ К в процесі калібрування. Процес калібрування був повністю автоматичний. Точна температура визначалась для кожної точки. Як тільки температура стабілізувалась (із точністю $\pm 0,002$ К), через діод або резистор пропускався відповідний постійний струм і вимірювалося падіння напруги на ньому. Для резисторів вимірювання проводилися при двох напрямках струму, а потім усереднювалися. Дані вимірювань автоматично записувалися комп'ютером, який також керував системою зміни та стабілізації температури. Як зразковий термометр використовувався залізо-родієвий термометр опору, що відповідає міжнародній температурній шкалі ITS-90.

Вимірювання характеристик термометрів у магнітному полі проводилося у надпровідному магніті, що забезпечує індукцію магнітного поля $B = 0-7,5$ Тл при температурах 1,8 – 4,2 К.

Стабільність термометричних характеристик $R = f(T)$ і $U = f(T)$, відповідно для резисторів та діодів, вивчалася з використанням термостату [20], що забезпечує сталу температуру 0°C (273,15 К) із точністю відтворення та стабілізації не гіршою, ніж $\pm 0,005$ К.

II. Результати вимірювань та їх обговорення

Діодний термометр

Термометричні характеристики. На рис. 2

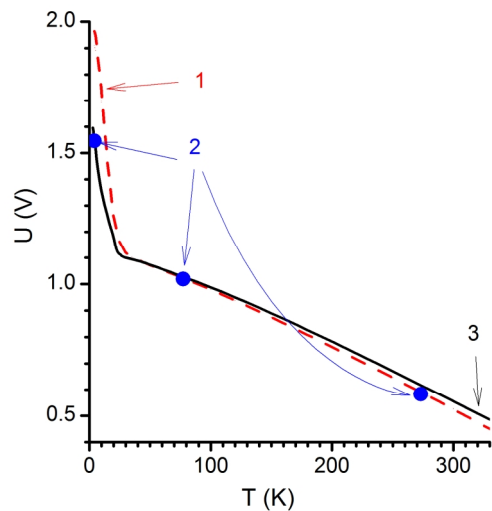


Рис. 2. Температурні залежності напруги на *p-n*-переході, що включений у пряму напрямку при постійному струмі 10 мкА для трьох варіантів ввімкнення транзистора у режимі діода: 1 – емітер–колектор; 2 – база–колектор, при цьому емітер з'єднаний із базою; 3 – база–колектор.

показані температурні залежності напруги $U = f(T)$ на *p-n*-переході в діапазоні температур 2,6 – 330 К. На рис. 3 подані температурні залежності термочутливості $S = dU/dT$ діода. Як видно з цих графіків, $U(T)$ є близькою до лінійної функції від температури у інтервалі температур $T \geq 30$ К. При

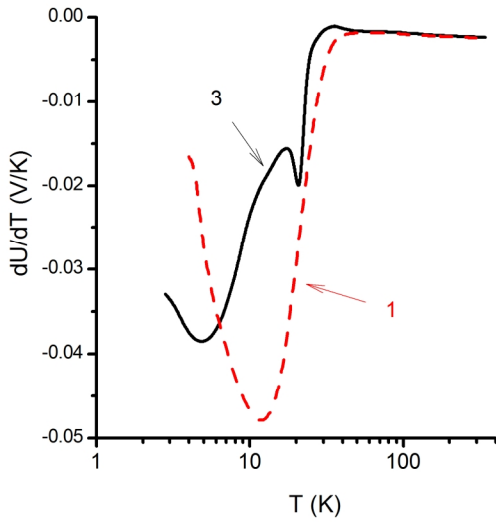


Рис. 3. Температурні залежності термочутливості $S = dU/dT$ p - n -переходу, ввімкненого у прямому напрямі при постійному струмі 10 мкА для двох варіантів ввімкнення транзистора у режимі діода: 1 – емітер–колектор; 3 – база–колектор.

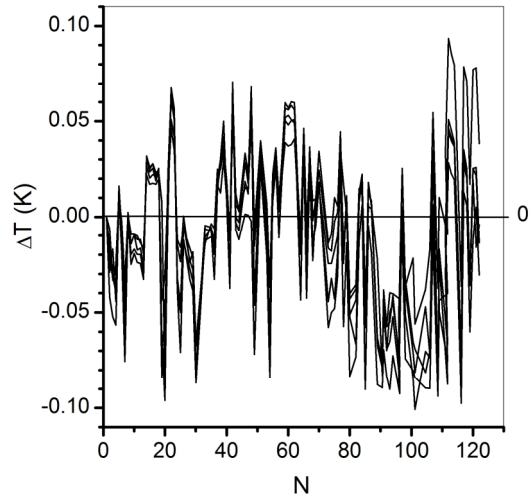


Рис. 5. Похибка вимірювання температури ΔT , пов'язана із флуктуаціями ΔU , для п'яти діодних термометрів при струмі 10 мкА і температурі 0°C ($273,15 \text{ K}$) залежно від кількості проведених вимірювань протягом 10 місяців.

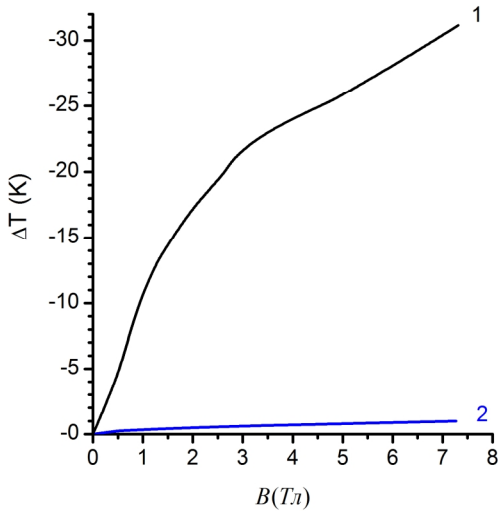


Рис. 4. Залежність похибки вимірювання температури ΔT від величини індукції магнітного поля B при температурі $4,2 \text{ K}$: 1 – $\vec{B} \perp \vec{j}$; 2 – $\vec{B} \parallel \vec{j}$.

температурах $T \leq 30 \text{ K}$, $U(T)$ різко зростає, причому при ввімкненні транзистора у режимі Е–К термочутливість діодного сенсора температури є вищою.

Дослідження показали, що схема ввімкнення транзистора дуже впливає на однорідність і взаємозамінність його термометричної характеристики. Нами були досліджені 123 транзистори, ввімкнені Е–К, та 2200 транзисторів, ввімкнених Б–К, при трьох температурах: $4,2 \text{ K}$, $77,4 \text{ K}$ і $273,1 \text{ K}$. Результати досліджень подані у

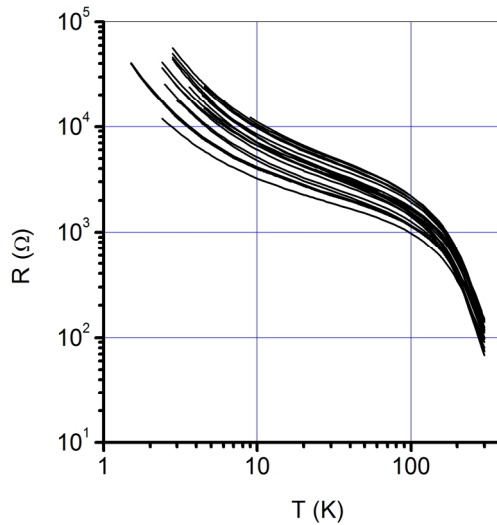


Рис. 6. Температурні залежності опору для партії термометрів на основі плівок Ge на GaAs, модель TTR-M.

таблиці 1. Як видно із таблиці, при низьких температурах (нижче $77,4 \text{ K}$) однорідність характеристик (тобто взаємозамінюваність діодів) краща при ввімкненні Б–К, а при температурах більших за $77,4 \text{ K}$ взаємозамінюваність діодів краща при ввімкненні в режимі Е–К. При $77,4 \text{ K}$ розкид значень напруги ΔU на діодних сенсорах при двох різних варіантах ввімкнення виявився практично однаковим.

Вплив магнітного поля. Нами проведені дослідження впливу магнітного поля для двох орієнтацій вектора індукції магнітного поля відносно

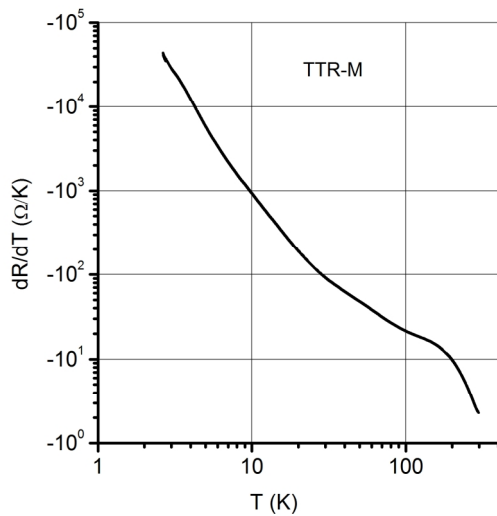


Рис. 7. Температурні залежності термочутливості $S = dR/dT$ для термометра опору моделі TTR-M.

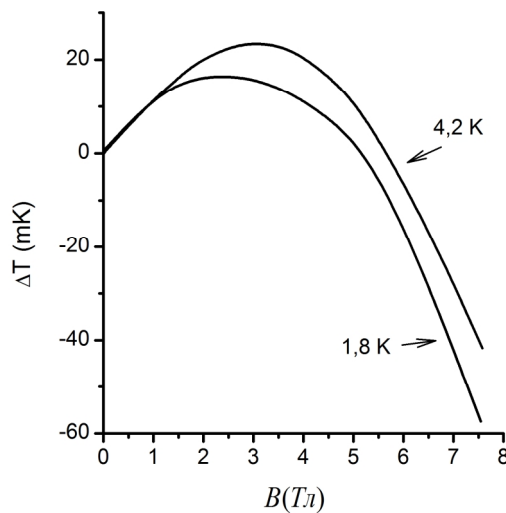


Рис. 8. Похибка вимірювання температури ΔT залежно від величини індукції магнітного поля B при двох температурах: 4,2 K і 1,8 K.

напрямку струму p - n -переходу ($\vec{B} \parallel \vec{j}$ і $\vec{B} \perp \vec{j}$, де \vec{j} – вектор густини струму через p - n -перехід). Вплив магнітного поля призводить до зміщення термометричної характеристики $U = f(T)$, яке зумовлене ефектом магнітоопору. Результати досліджень подано на рис. 4, де показана похибка у вимірюванні температури ΔT (пов'язана зі зміною термометричної характеристики діода в магнітному полі) як функція величини індукції магнітного поля B при температурі рідкого гелію (4,2 K). Як видно із рисунку, спостерігається сильна анізотропія магнітоопору для p - n -переходу залежно від його орієнтації щодо напрямку магнітного поля, яка призводить до анізотропії зсуву калібрування діода і, значить, виникнення похибки у вимірюванні температури у магнітному полі на ΔT . Для

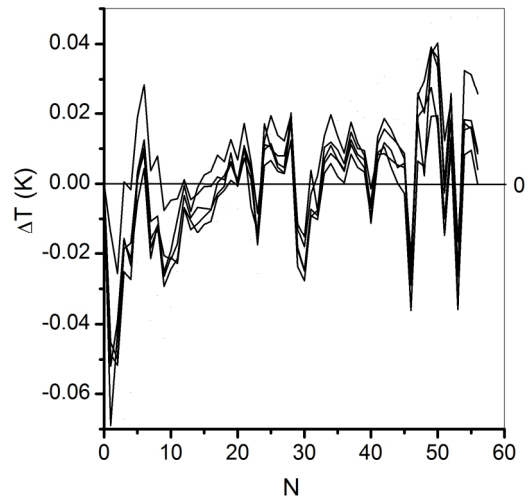


Рис. 9. Похибка вимірювання температури ΔT , пов'язана із флуктуаціями ΔR , для шести термометрів опору при струмі 200 мкА і температурі 0°C (273,15 K) залежно від кількості проведених вимірювань протягом 4,5 місяців.

досліджених зразків при температурі 4,2 K у магнітному полі 7,5 Tl ΔT становить -32 K і -1 K для орієнтації $\vec{B} \perp \vec{j}$ і $\vec{B} \parallel \vec{j}$, відповідно. Отже, магнітне поле чинить сильний вплив на електричні характеристики кремнієвих діодів.

Стабільність термометричної характеристики.

Стабільність характеристик діодних термометрів визначалася при температурі 0°C (273,15 K) для п'яти зразків при струмі 10 мкА і 100 мкА. Вимірювання проводилися протягом 10 місяців. Кількість вимірювань протягом дослідження становила 122. Результати вимірювань подані на рис. 5. Як видно із рисунку, еквівалентна величина ΔT , пов'язана із флуктуаціями ΔU , не перевищує $\pm 0,1$ K. При струмі через діод 100 мкА були отримані аналогічні результати.

Термометр опору

Термометричні характеристики.

На рис. 6 подані температурні залежності опору для партії нових термометрів моделі TTR-M, спеціально розроблених для вимірювання температури за присутності сильних магнітних полів. Термометри були взяті із масиву сенсорів, виготовлених із однієї пластини Ge-GaAs. Цей рисунок демонструє неоднорідність $R = f(T)$ характеристик термометрів, виготовлених із однієї пластини. Зазвичай із однієї пластини Ge-GaAs можна виготовити біля 1500 штук термометрів із заданими характеристиками. На рис. 7 подана типова температурна залежність термочутливості $S = dR/dT$ для терморезистора моделі TTR-M.

Вплив магнітного поля. Магнітне поле в резисторах також призводить до зміщення

термометричної характеристики $R = f(T)$, яке зумовлене ефектом магнітоопору. На рис. 8, наведена похибка вимірювання температури ΔT залежно від величини індукції магнітного поля B при двох температурах: 4,2 K і 1,8 K. Термометри були орієнтовані так, щоб вектор індукції магнітного поля B був паралельний до нормалі n до площини термочутливої плівки Ge ($B \parallel n$). Як видно із рисунку, у магнітному полі до 7,5 Tл ΔT не перевищує $-0,055$ K і $-0,04$ K при температурах 1,8 K і 4,2 K, відповідно. Легко побачити, що магнітне поле істотно менше впливає на покази германієвого резистивного термометра у порівнянні із кремнієвим діодним термометром.

Стабільність термометричної характеристики.

Стабільність характеристик термометрів опору визначалася при температурі 0°C (273,15 K) для шести зразків при струмі 200 мкА. Було проведено 57 вимірювань протягом 4,5 місяців. Результати вимірювань подані на рис. 9. Як видно із рисунку, еквівалентна величина ΔT , пов'язана із флуктуаціями ΔR , не перевищує $\pm 0,04$ K.

Висновки

Розроблені нові мініатюрні кремнієві діодні та германієві резистивні термометри на основі гетероструктури Ge-GaAs, призначені для вимірювання низьких температур (1 – 400 K). Проведені комплексні дослідження їх термометричних характеристик, які охоплювали дослідження однорідності характеристик для партії зразків, вплив магнітного поля на покази термометрів і стабільність характеристик при багаторазових вимірюваннях протягом тривалого періоду. Виявлено, що однорідність характеристик діодного сенсора температури залежить від типу ввімкнення

транзистора. При низьких температурах розкид напруги ΔU для партії діодів менший при ввімкненні в режимі Б–К, а при температурах більше 77,4 K – при ввімкненні Е–К. При 77,4 K розкид напруги ΔU на діодних сенсорах при двох різних варіантах ввімкнення виявився практично однаковим. Встановлено, що магнітне поле чинить невеликий вплив на характеристики термометрів опору, виготовлених на основі плівок Ge на GaAs, тому такі термометри можуть використовуватися для вимірювання температури за умов впливу сильних магнітних полів. Діодні термометри не рекомендовані для вимірювання температури у магнітному полі. Стабільність показів при температурі 0°C (273,15 K) краща $\pm 0,1^\circ\text{K}$ і $\pm 0,04^\circ\text{K}$, відповідно, для діодних і резистивних термометрів. Організовано малосерійне виробництво термометрів [21].

Венгер Є.Ф. – член-кор. НАНУ, д.ф.-м.н., професор, зав. відділом ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ;
Зенкін А.С. – д.т.н., професор, зав. кафедрою КНУТД;
Козелло Н.Л. – к.т.н., доцент КНУТД;
Колодич Б.П. – провідний інженер ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ;
Криницька Н.М. – інженер ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, магістр КНУТД;
Кулик О.С. – інженер ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, магістр КНУТД;
Мітін В.Ф. – к.ф.-м.н., старший науковий співробітник ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ;
Неміш І.Ю. – к.т.н., старший науковий співробітник ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ;
Холєвчук В.В. – науковий співробітник ІФН ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ.

- [1] М.П. Орлова, О.Ф. Погорелова, С.А. Улыбин. *Низкотемпературная термометрия*. Энергоатомиздат, Москва, 280 с. (1987).
- [2] L.G. Rubin. Cryogenic thermometry: a review of progress since 1982 // *Cryogenics*, **37**(7), pp. 341–356 (1997).
- [3] P.R.N. Childs, J.R. Greenwood, and C.A. Long. Review of temperature measurement // *Rev. Sci. Instrum.*, **71**(8), pp. 2959-2978 (2000).
- [4] C.J Yeager, S.S Courts. A review of cryogenic thermometry and common temperature sensors // *IEEE Sens J*, **1**(4), pp. 352–360 (2001).
- [5] Y.P. Filippov, T.I. Smirnova. Operation of the TVO temperature sensors in the range from 4.2 K up to 425 K // *Cryogenics*, **44**(10), pp. 735-739 (2004).
- [6] W. Schoepe, K. Uhlig, K. Neumaier. Carbon and germanium resistors in the variable-range hopping regime for thermometry below 1 K // *Cryogenics*, **29**(4), (1989), pp. 467-468 (1989).
- [7] S. Scott Courts and Philip R. Swinehart. Review of Cernox (zirconium oxy-nitride) thin-film resistance temperature sensors // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, **7**, pp.393-398 (2003).
- [8] V.F. Mitin. Resistance thermometers based on the germanium films // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, **2**(1), pp. 115-123 (1999).
- [9] N.S. Boltovets, V.K. Dugaev, V.V. Kholevchuk, P.C. McDonald, V.F. Mitin, I.Yu. Nemish, F. Pavese, I. Peroni, P.V. Sorokin, E.A. Soloviev, E.F. Venger. New Generation of Resistance Thermometers Based on Ge Films on GaAs Substrates // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, **7**, pp. 399-404 (2003).

- [10] V.F. Mitin, P.C. McDonald, F. Pavese, N.S. Boltovets, V.V. Kholevchuk, I.Yu. Nemish, V.V. Basanets, V.K. Dugaev, P.V. Sorokin, R.V. Konakova, E.F. Venger, E.V. Mitin. Ge-on-GaAs film resistance thermometers for cryogenic applications // *Cryogenics*, **47**(9-10), pp. 474-482 (2007).
- [11] L.I. Zarubin, I.Y. Nemish, A. Szmyrka-Grzebyk. Germanium resistance thermometers with low magnetoresistance // *Cryogenics*, **30**(6), pp. 533-538, (1990).
- [12] S. Scott Courts and C. Joseph Yeager. Long-term stability of germanium resistance thermometers // *Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry*, **7**, pp. 405-410 (2003).
- [13] Yu.P. Filippov, V.G. Shabratov. Measurement of helium temperatures by TVO-sensors under magnetic fields // *Cryogenics*, **42**(2), pp. 127-131 (2002).
- [14] Yu.P. Filippov, V.V. Golicov, E.N. Kulagin, V.G. Shabratov. Effects of high intensity cryogenic irradiation and magnetic field on temperature sensors // *Advances in Cryogenic Engineering*, **43**, pp. 773-780 (1998).
- [15] Yu.P. Filippov, V.M. Miklayev, and A.K. Sukhanova. Irradiation of cryogenic temperature sensors by gamma dose of 1 MGy // *Rev. Sci. Instrum.* **78**(4), 043502 (2007).
- [16] A.G. McNamara. Semiconductor Diodes and Transistors as Electrical Thermometers // *Rev. Sci. Instrum.* **33**(3), pp. 330-333 (1962).
- [17] J. Unsworth, A.C. Rose-Innes. Silicon pn-Junctions as Low Temperature Thermometers // *Cryogenics* **6**(4), pp. 239-240 (1966).
- [18] И.Б. Фогельсон. *Транзисторные термодатчики*. Советское радио, Москва, 129 с. (1972).
- [19] V.F. Mitin, Yu.A. Tkhorik, E.F. Venger. All-purpose technology of physical sensors on the base of Ge/GaAs heterostructures // *Microelectronics Journal*, **28**(6-7), pp.617-625 (1997).
- [20] Hart 9101 Zero Point <<http://www.hartscientific.com/products/9101.htm>>.
- [21] ТОВ «Мікросенсор», м. Київ <<http://www.microsensor.com.ua>>.

E.F. Venger¹, A.S. Zenkin², N.L. Kozello², B.P. Kolodych¹, N.M. Krynytska^{1,2},
O.S. Kulyk^{1,2}, V.F. Mitin¹, I.Yu. Nemish¹, V.V. Kholevchuk¹

Miniature Silicon Diode and Germanium Resistive Thermometers for Measurement of Low Temperature

¹V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics, NAS Ukraine, 41 Prospect Nauky, Kyiv, Ukraine; tel. (044) 525-59-39, E-mails: mitin@isp.kiev.ua; mitin@microsensor.com.ua

²Kyiv National University of Technologies and Design, Nemirovich-Danchenko Street, 2 Kyiv, Ukraine

We present results on development of miniature silicon diode and germanium resistive thermometers that are intended for measurement of low temperatures (1 K to 400 K). Investigation of thermometric characteristics for batch of thermometers in the 2.6 K to 300 K temperature rang was carried out. Behaviour of thermometers in high magnetic field (up to 7.5 T) was studied at low temperatures (1.8 K and 4.2 K). Nonuniformity, interchangeably and stability of thermometric characteristics of thermometers was investigated. It was found that magnetic field weakly influences on thermometric characteristics of resistance thermometers made of Ge films on GaAs, therefore they can be used for measurement of temperature under high magnetic fields. Contrary, silicon diode thermometers are high sensitive to the magnetic field. They are not recommended for application when temperature measurement in magnetic field.