

Корисна модель належить до області термометрії і може бути використана для вимірювання низьких температур в умовах впливу магнітних полів.

В останні роки спостерігається розширення області практичного застосування кремнієвих діодних термометрів [1]. Великий інтерес до діодних термометрів обумовлений їхніми перевагами перед термометрами опору та термопарами: більш висока чутливість у широкому діапазоні робочих температур, високий рівень вихідного сигналу, мала інерційність, зручність у використанні, конструктивна та технологічна сумісність із мікроелектронними засобами обробки інформації, дешевша вимірювальна апаратура. Кремнієві діодні термометри характеризуються найвищою стабільністю, відтворюваністю, надійною роботою в умовах теплових та механічних навантажень, низькими масою та тепловою інерцією, малими габаритними розмірами, низькою вартістю.

Створення кремнієвих діодних термометрів, здатних надійно функціонувати в умовах екстремальних впливів, є актуальним для ракетно-космічної техніки, теплової енергетики, атомної промисловості, кріоенергетики, фізики та техніки низьких температур. Особлива увага приділяється розробці просунутих кремнієвих діодних термометрів, які характеризуються високою точністю вимірювання, взаємозамінністю, низьким енергоспоживанням, малими розмірами та масою, здатністю ефективно працювати в умовах впливу магнітних полів у комбінації з режимами низьких температур, термоциклами, механічними ударами та вібраціями тощо.

Відомий мініатюрний діодний термометр виробництва фірми Scientific Instruments, Inc. (США) типу Si-435 [2] - аналог, призначений для вимірювання у діапазоні температур 1,5-400 К. Діодний термометр містить термочутливий елемент (ЧЕ), виконаний з р-п-структури кремнію, поміщений у плоский корпус, який має форму паралелепіпеда, з основою та кришкою, електричні контакти до термочутливого елемента та електричні виводи. Термометр-аналог працює наступним чином. Для вимірювання температури  $T_k$  в  $k$ -ій температурній точці через діодний термометр пропускають робочий струм  $I=10$  мкА у пропускну напрямку та вимірюють падіння напруги  $V_k$  на термометрі. Температуру визначають з виміряного значення  $V_k$  та стандартної кривої градування  $V(T)$  (Typical response curve 020-137). Аналіз приведених у каталозі фірми виробника даних показує, що при використанні цих термометрів для вимірювань в області гелієвих температур внаслідок протікання робочого струму  $I$  в ЧЕ виділяється теплова потужність  $P(T)=V(T) \times I \approx 20$  мкВт, а тепловий опір  $R$  між ЧЕ та середовищем вимірювання складає від кількох до десятків одиниць мК/мкВт. Тобто погрішності вимірювань температури  $\Delta T_f = P \times R$  можуть досягати кількох десятків-сотень мК. Таким чином, діодний термометр типу Si-435 - аналог не забезпечує високоточного вимірювання низьких температур, оскільки внаслідок протікання робочого струму  $I=10$  мкА саморозігрів ЧЕ призводить до зростання похибки виміру. За даними виробника, [2], при використанні цих термометрів в умовах впливу магнітних полів при  $T < 40$  К в магнітних полях вище ніж 0,1 Т виникає велика похибка вимірювання.

Таким чином, діодний термометр типу Si-435 - аналог не забезпечує високоточного вимірювання низьких температур в умовах впливу саморозігріву та магнітних полів.

Відомий мініатюрний діодний термометр виробництва фірми Cryogenic Control Systems, Inc.(США) типу S-950 [3] - аналог, призначений для вимірювання у діапазоні 1,4-400 К. Діодний термометр містить термочутливий елемент, виконаний з р-п-структури кремнію, поміщений у плоский корпус, який має форму паралелепіпеда, з основою та кришкою, електричні контакти до термочутливого елемента та електричні виводи. Термометр - аналог працює наступним чином. Для вимірювання температури  $T_k$  в  $k$ -ій температурній точці через діодний термометр пропускають робочий струм  $I=10$  мкА у пропускну напрямку та вимірюють падіння напруги  $V_k$  на термометрі. Температуру визначають з виміряного значення  $V_k$  та стандартної кривої градування  $V(T)$  (Standard Curve: Cryosop S950). Аналіз приведених у каталозі фірми виробника даних показує, що при використанні цих термометрів для вимірювання гелієвих температур внаслідок протікання робочого струму  $I$  в ЧЕ виділяється теплова потужність  $P(T)=V(T) \times I \approx 20$  мкВт, а тепловий опір  $r$  між ЧЕ та середовищем вимірювання досягає кількох або десятків одиниць мК/мкВт. Тобто, робочий струм 10 мкА призводить до погрішності температурних вимірювань  $\Delta T_f = P \times R$ , які можуть досягати кількох десятків-сотень мК. Таким чином, діодний термометр типу S-950 – аналог, не забезпечує високоточного вимірювання низьких температур, оскільки внаслідок протікання робочого струму  $I=10$  мкА має місце тепловий перегрів ЧЕ, що призводить до зниження похибки виміру. За даними виробника, при використанні цих термометрів в умовах впливу магнітних полів при  $T < 40$  К в магнітних полях вище ніж 0,1 Т виникає велика похибка вимірювання. Таким чином, діодний термометр типу S-950 – аналог, не забезпечує високоточного вимірювання низьких температур в умовах впливу саморозігріву та магнітних полів. Відомий мініатюрний кріогенний діодний термометр виробництва Omega Engineering, Inc. (США) типу CY7 [4]- аналог, призначений для вимірювання у діапазоні 1,4-500 К. Діодний термометр містить термочутливий елемент, виконаний з р-п-структури кремнію, поміщений у плоский корпус, який має форму паралелепіпеда, з основою та кришкою, електричні контакти до термочутливого елемента та електричні виводи. Термометр-аналог працює наступним чином. Для вимірювання температури  $T_k$  в  $k$ -ій температурній точці через діодний термометр пропускають робочий струм  $I=10$  мкА у пропускну

напрямку та вимірюють падіння напруги  $V_k$  на термометрі. Температуру визначають з виміряного значення  $V_k$  та стандартної кривої градування  $V(T)$  (Diodes Standard Curve #10 for CY7 Silicon Diodes). Аналіз приведених у каталозі фірми виробника даних показує, що при використанні цих термометрів для вимірювання гелієвих температур внаслідок протікання робочого струму  $I$  в ЧЕ виділяється теплова потужність  $P(T)=V(T) \times I \approx 20$  мкВт, а тепловий опір між ЧЕ та середовищем вимірювання досягає кількох або десятків одиниць мК/мкВт. Тобто, робочий струм 10 мкА призводить до погіршності температурних вимірювань  $\Delta T_j = P \times R$ , які можуть досягати кількох десятків-сотень мК. Таким чином, діодний термометр типу CY7 – аналог, не забезпечує високоточного вимірювання низьких температур, оскільки внаслідок протікання робочого струму  $I=10$  мкА саморозігрів ЧЕ призводить до зростання похибки виміру. За даними виробника, якщо цей тип кріогенних термометрів використовується для виміру низьких температур в умовах впливу магнітних полів, на показання термометрів суттєво впливає магнітне поле. З цієї причини виникає велика похибка вимірювання температури, яка обумовлена впливом магнітного поля, отже, точність виміру температури низька. Таким чином, діодний термометр типу CY7 – аналог, не призначений для вимірювання низьких температур в умовах впливу магнітного поля. За даними виробника, при використанні цих термометрів в умовах впливу магнітних полів при  $T < 40$  К в магнітних полях вище ніж 0,1 Т виникає велика похибка вимірювання.

Таким чином, діодний термометр типу CY7 – аналог, не забезпечує високоточного вимірювання низьких температур в умовах впливу саморозігріву та магнітних полів.

Відомий діодний термометр типу DT-670, виробництва фірми Lake Shore Cryotronics, Inc. (США) вибраний нами за найближчий аналог, описаний в [5]. Термометри типу DT-670 є взаємозамінними, стабільними та високоточними датчиками, призначеними для вимірювання в діапазоні 1,4-500 К. Діодний термометр - найближчий аналог, містить термочутливий елемент, виконаний з р-п-структури кремнію (перехід база-колектор у структурі кремнієвого транзистора), розміщений у плоский корпус, корпус має форму паралелепіпеду з основою та кришкою, електричні контакти до термочутливого елемента та електричні виводи. Термометр - найближчий аналог, працює наступним чином. Для вимірювання температури  $T_k$  в  $k$ -ій температурній точці через діодний термометр пропускають робочий струм  $I=10$  мкА у пропускну напрямку та вимірюють падіння напруги  $V_k$  на термометрі. Температуру  $T_k$  визначають з виміряного значення  $V_k$  та стандартної кривої градування  $V(T)$  (Standard Curve DT-670). Для забезпечення високої точності калібровка кріогенних діодних термометрів здійснюється у кріостаті в умовах відсутності впливу магнітного поля.

При використанні цих термометрів для вимірювання гелієвих температур внаслідок протікання робочого струму  $I$  в ЧЕ виділяється теплова потужність  $P(T)=V(T) \times I \approx 20$  мкВт, а тепловий опір між ЧЕ та середовищем вимірювання досягає кількох або десятків одиниць мК/мкВт. Тобто, робочий струм 10 мкА призводить до погіршності температурних вимірювань  $\Delta T_j = P \times R$ , які можуть досягати кількох десятків-сотень мК. В відомій роботі [6] експериментально показано, що при використанні робочого струму 10 мкА в діодних термометрах виробництва Lake Shore Cryotronics, Inc. саморозігрів ЧЕ при 4,2 К складає  $\sim 0,1$  К, а при 1 К  $\sim 0,8$  К. Тобто, обраний нами за найближчий аналог діодний термометр DT-670 не забезпечує високу точність вимірювання в діапазоні низьких температур, оскільки внаслідок протікання робочого струму  $I=10$  мкА саморозігрів ЧЕ призводить до зростання похибки виміру температури.

Згідно з [5], діодні термометри типу DT-670 можуть використовуватись в діапазоні 60-300 К в умовах впливу магнітного поля  $B$  до 5 Т. Однак при  $T < 60$  К, згідно з [5], магнітне поле суттєво впливає на показання діодних термометрів, В таблиці 1. представлені експериментальні дані [5], які демонструють вплив індукції магнітного поля  $B$  різної величини (1, 2, 3, 4, 5 Т) та різної орієнтації вектора індукції магнітного поля  $B$  відносно площини поверхні корпусу на відносну похибку  $\Delta T/T$  (%) вимірювання температури діодним термометром DT-670 при  $T=4,2$  К. Величина  $\Delta T/T$  (%) визначається з виразу  $\Delta T/T = (T_k - T_{kB})/T_k$ , де  $T_k$  та  $T_{kB}$  - значення температури в  $k$ -ж температурній точці, яке вимірюється діодним термометром, коли  $B=0$ , та в умовах впливу магнітного поля  $B$ , відповідно.

Аналіз даних Таблиці 1 дозволяє заключити, що при 4,2 К магнітне поле суттєво впливає на точність діодних термометрів DT-670, оскільки виникає велика похибка вимірювання температури  $\Delta T$ . Згідно з Таблицею 1, відносна похибка вимірювання температури  $\Delta T/T$  (%) термометра суттєво залежить від величини та орієнтації магнітного поля  $B$  відносно площини поверхні корпусу і дуже велика. Наприклад, при температурі 4,2 К, коли вектор індукції магнітного поля  $B$  паралельний плоскій поверхні корпусу термометра, відносна похибка вимірювання  $\Delta T/T$  (%) в умовах впливу магнітних полів 1 Т, 2 Т, 3 Т, 4 Т, 5 Т складає -200, -300, -350, -400, -500, відповідно, При цьому абсолютна похибка вимірювання температури  $\Delta T$  (в одиницях Кельвіна) при вказаних вище значеннях магнітного поля складає 8,4 К, 12 К, 12,25 К, 16,8 К та 21 К, відповідно. Якщо при температурі 4,2 К вектор індукції магнітного поля  $B$  перпендикулярний плоскій поверхні корпусу термометра, відносна похибка вимірювання  $\Delta T/T$  (%) в умовах впливу магнітного поля 1 Т, 2 Т, 3 Т, 4 Т, 5 Т складає -8, -9, -11, -15, -20, відповідно. А абсолютна похибка вимірювання температури  $\Delta T$  (в одиницях Кельвіна) для

вказаних вище значень магнітного поля складає 0,336 К, 0,378 К, 0,462 К, 0,63 К та 0,84 К, відповідно.

Тобто, вибраний нами за найближчий аналог діодний термометр не забезпечує високої точності вимірювання при температурах  $T < 60$  К в умовах впливу магнітного поля.

Таблиця 1

Відносна похибка  $\Delta T/T$  (%) вимірювання температури 4,2 К діодними термометрами DT-670 виробництва фірми Lake Shore Cryotronics, Inc. (США) - найближчого аналога - при різних значеннях величини та орієнтації індукції магнітного поля В відносно пласкої поверхні корпусу. Робочий струм діодного термометра 10 мкА.

| Вектор індукції магнітного поля В паралельний площині поверхні корпусу термометра |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| В, Т                                                                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $\Delta T/T$ (%)                                                                  | -200 | -300 | -350 | -400 | -500 |
| Вектор індукції магнітного поля В перпендикулярний площині корпусу термометра     |      |      |      |      |      |
| В, Т                                                                              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
| $\Delta T/T$ (%)                                                                  | -8   | -9   | -11  | -15  | -20  |

Задача корисної моделі полягає в розробці нового кремнієвого діодного термометра для вимірювання низьких температур в умовах впливу магнітних полів, який забезпечує можливість для більш точних вимірювань за рахунок стійкості термометра до впливу саморозігріву та магнітного поля.

Поставлена задача вирішується тим, що в діодному термометрі для вимірювання низьких температур в умовах впливу магнітних полів, що містить термочутливий елемент, виконаний з р-п-структури кремнію, поміщений у плоский корпус, який має форму паралелепіпеда, з основою та кришкою, електричні контакти до термочутливого елемента та електричні виводи, згідно з корисною моделлю, термочутливий елемент виконаний з  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структури кремнію, в якій  $p^{++}$ -область емітера створена дифузією фосфору з концентрацією  $N_p \approx 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $p^{+}$ -область бази створена дифузією бору з концентрацією  $N_b \approx 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , висока стійкість термометра до впливу саморозігріву та магнітного поля досягається, якщо  $\ln(V(T)/I) = f(T^{1/4})$ , де  $T$ ,  $I$  та  $V$  - температура, прямий робочий струм та падіння прямої напруги на  $p^{++}$ - $p^{+}$  структури кремнію, відповідно.

Розглянемо більш детально діодний термометр, що заявляється. Термочутливим елементом термометра служить мініатюрний кремнієвий чип, виконаний з  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структури кремнію. Чип має електричні контакти, виконані з алюмінію. Чип з розмірами  $400 \times 400 \times 200 \text{ мкм}^3$  поміщений у керамічний плоский корпус, що має форму паралелепіпеда з розмірами  $1 \times 2 \times 3 \text{ мм}^3$ . Електричні виводи виконані з немагнітного сплаву. Виводи мають довжину 18 мм.

Нами запропоновано та експериментально доведено, що вказані відмінні ознаки, а саме, чутливий елемент, виконаний з  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структури кремнію,  $p^{++}$ -область емітера створена дифузією фосфору з концентрацією  $N_p \approx 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $p^{+}$ -область бази створена дифузією бору з концентрацією  $N_b \approx 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , є необхідними для створення діодного термометра, що заявляється. Дійсно, при виконанні зазначених ознак через високий рівень легування домішкою фосфору з концентрацією  $N_p \approx 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$  опір  $p^{++}$  - області емітера дуже низький, тому нечутливий до температури та магнітного поля. Опір  $p^{++}$ -області емітера значно менший у порівнянні з опором  $p^{++}$ - $p^{+}$ -переходу кремнію та опором  $p^{+}$ -області бази, яка створена дифузією бору з концентрацією  $N_b \approx 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Тому при протіканні постійного прямого струму  $I$  через  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структуру кремнію напруга  $V$  падає на  $p^{++}$ - $p^{+}$ -переході та  $p^{+}$ -області бази, які визначають температурну чутливість  $\alpha = dV/dT$  та стійкість термометра до впливу магнітного поля. При виконанні зазначених ознак (вказані високі рівні легування домішок фосфору бору в емітері та бору в базі) товщина області об'ємного заряду для  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структури кремнію дорівнює  $d \approx 5 \times 10^{-6} \text{ см}$ .

Нами експериментально встановлено, що в області низьких температур стійкість діодного термометра до впливу саморозігріву та магнітного поля досягається, якщо взаємозв'язок між робочим струмом, падінням прямої напруги на  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структурі кремнію (з вказаними відмінними ознаками) та температурі визначається виразом  $\ln(V(T)/I) = f(T^{1/4})$ , де  $V(T)$  - падіння прямої напруги на  $p^{++}$ - $p^{+}$ -структурі кремнію при температурі  $T$  та струмі  $I$ , відповідно.

Зазначене співвідношення в сукупності з описаними вище ознаками корисної моделі (вказані високі рівні легування домішок фосфору бору в емітері та бору в базі) забезпечують створення нового кремнієвого діодного термометра, стійкого до впливу саморозігріву та магнітного поля у діапазоні низьких температур, включаючи гелієві температури.

Таким чином, сукупність, відомих і відмінних конструктивних ознак діодного термометра, що заявляється, а саме:

- термочутливий елемент, виконаний з р-п-структури кремнію, поміщений у плоский корпус, який має форму паралелепіпеда, з основою та кришкою, електричні контакти до термочутливого елемента

та електричні виводи;

- $n^{++}$ -область емітера створена дифузією фосфору з концентрацією  $N_P \approx 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ;
  - $p^+$  - область бази створена дифузією бору з концентрацією  $N_B \approx 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ;
  - $\ln(V(T)/I) = f(T^{1/4})$ , де  $T$ ,  $I$  та  $V$  - температура, прямий робочий струм та падіння прямої напруги на  $n^{++}$ - $p^+$ -структури кремнію, відповідно,
- забезпечують створення нового кремнієвого діодного термометра, який характеризується стійкістю до впливу саморозігріву та магнітного поля у діапазоні низьких температур, включаючи гелієві температури.

Приклад.

Для експериментальної перевірки роботи термометра, що заявляється, вибраний діодний датчик температури (далі - датчик). Датчик містить термочутливий елемент (чип), виконаний з  $n^{++}$ - $p^+$ -структури кремнію, в якій  $n^{++}$ - область емітера створена дифузією фосфору з концентрацією  $N_P \approx 3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,  $p^+$  - область бази створена дифузією бору з концентрацією  $N_B \approx 4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При температурі вимірювання  $T$  взаємозв'язок між робочим струмом, падінням прямої напруги на  $n^{++}$ - $p^+$ -структурі кремнію та температурі визначається виразом  $\ln(V(T)/I) = f(T^{1/4})$ , де  $V(T)$  - падіння прямої напруги на  $n^{++}$ - $p^+$ -структури кремнію при температурі  $T$  та струмі  $I$ , відповідно.

Чип виготовлено на промисловій базі мікроелектроніки. Чип має електричні контакти, виконані з алюмінію. Чип з розмірами  $400 \times 400 \times 200 \text{ мкм}^3$  поміщений у керамічний плоский корпус. Корпус має форму паралелепіпеда з розмірами  $1 \times 2 \times 3 \text{ мм}^3$ . Кришка корпусу та електричні виводи виконані з немагнітного сплаву. Виводи мають довжину 18 мм.

Вимірювання виконані на обладнанні Міжнародної лабораторії низьких температур і сильних магнітних полів у Вроцлаві (Польща) з використанням гелієвого кріостату і надпровідного магніту виробництва фірми Oxford Instruments. Магніт з гелієвим кріостатом дозволяє проводити вимірювання в стаціонарних магнітних полях до 14 Т в діапазоні температур від 1,5 К до 350 К. Для автоматизованих вимірювань використовувалися джерело струму Current Source Keithley 224, вольтметр Multimeter Keithley (Model 2000 та Model 2001), температурний контролер - 340 Temperature Controller виробництва фірми Lake Shore Cryotronics, Inc. Точність підтримки робочого струму була не гірше  $\pm 0.05 \%$ . Точність вимірювання падіння напруги не гірше  $\pm 0.5 \text{ мкВ}$ .

Похибка контролю температури з використанням термометра Сегпох не перевищувала  $\pm 0.03 \text{ К}$ . Похибка контролю величини індукції магнітного поля з використанням датчика Холла на основі  $\text{InSb}$  не перевищувала  $\pm 0.1 \text{ Т}$ .

Розглянемо більш детально пристрій, що заявляється.

На фіг. 1 представлена термометрична характеристика  $V(T)$  діодного термометра, що заявляється, виміряна в діапазоні 2-350 К при робочому струмі 1 мкА. На фіг. 2 представлена температурна чутливість  $dV/dT$  діодного термометра, що заявляється, розрахована за даними вимірювань  $V(T)$  в діапазоні 2-350 К при робочому струмі 1 мкА.

Для експериментального підтвердження досягнення задачі, на рішення якої направлено заявлену корисну модель (полягає в розробці нового кремнієвого діодного термометра для вимірювання низьких температур в умовах впливу магнітних полів, який забезпечує можливість для більш точних вимірювань за рахунок стійкості термометра до впливу саморозігріву та магнітного поля), вимірювання проводили в наступній послідовності.

Датчик розміщували на метрологічній вставці. Вставку поміщали в гелієвий кріостат, хвостовик якого з датчиком знаходиться під впливом поля магніту. Після заливки в кріостат кріогенних рідин (рідкий азот, гелій) підключали автоматизовану систему підтримки температури в кріостаті і забезпечували зниження температури вставки з розташованим на ній датчиком до температури, близької до температури кипіння рідкого гелію.

Спочатку проводили градування датчика в діапазоні 1,5-350 К за відсутності впливу магнітного поля. Через датчик пропускали прямий електричний струм ("плюс" на області бази, "мінус" на області емітера датчика) величиною  $I = 1 \text{ мкА}$  та в діапазоні 1,5-350 К виміряли температурну залежність падіння напруги  $V(T, I)$  (термометричні характеристики датчика) (фіг. 1), з якої визначали температурну чутливість  $dV(T, I)/dT$  (фіг. 2).

Аналіз даних, представлених на фіг. 1 та фіг. 2, показав, що в діапазоні 2-11 К має різке зростання  $V(T, I)$ . При цьому взаємозв'язок між робочим струмом  $I$ , падінням прямої напруги  $V$  на  $n^{++}$ - $p^+$  структурі кремнію та температурі визначається виразом  $\ln(V(T)/I) = f(T^{1/4})$ , де  $V(T)$  - падіння прямої напруги на  $n^{++}$ - $p^+$  структури кремнію при температурі  $T$  та струмі  $I$ , відповідно.

Вимірювання температури в присутності магнітного поля проводили в наступній послідовності. Датчик розміщували на вставці кріостата таким чином, щоб напрямок струму, що проходить через датчик, був перпендикулярним або паралельним магнітному полю, створюваному надпровідним магнітом. Вставку з датчиком розміщали в гелієвому кріостаті, хвостовик якого з датчиком знаходиться під впливом магнітного поля. Після заливки в кріостат кріогенних рідин (рідкий азот, гелій) підключали автоматизовану систему підтримки температури кріостата, і забезпечували зниження температури

вставки з розташованим на ній датчиком до температури, близької температурі кипіння рідкого гелію, а саме,  $T_1=4,2$  К. Через датчик пропускали прямий електричний струм величиною  $I_1=1$  мкА і вимірювали падіння напруги  $V_1(T_1, I_1)$ . Після чого датчик розміщували в магнітному полі з величиною індукції  $B_i$ , де  $i=1, 2, 3, 4, 5$  ( $B_1=1$  Т,  $B_2=2$  Т,  $B_3=3$  Т,  $B_4=4$  Т,  $B_5=5$  Т), орієнтуючи його в напрямку, перпендикулярному або паралельному площині поверхні корпусу термометра, і вимірювали падіння напруги на датчику  $V_1(T_1, I_1, B_i)$ . Температурну поправку  $\Delta T_1$  на вплив зміни магнітного поля (від 0 до  $B_i$ ) обчислювали із формули:

$$\Delta T_1 = V_1(T_1, I_1, B_i) - V_1(T_1, I_1) / \alpha(T_1, I_1),$$

де  $\alpha(T_1, I_1)$  - температурна чутливість датчика при температурі  $T_1=4,2$  К,  $I_1=1$  мкА, коли  $B=0$ .

Результати експериментального підтвердження досягнення задачі корисної моделі представлені в Таблиці 2.

Таблиця 2

Відносна похибка  $\Delta T/T(\%)$  вимірювання температури 4,2 К діодним термометром, що заявляється, при різних значеннях величини та орієнтації індукції  $B$  магнітного поля відносно плоскої поверхні корпусу. Робочий струм діодного термометра 1 мкА.

| Вектор індукції магнітного поля $B$ паралельний площині поверхні корпусу термометра |     |      |    |    |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|----|----|----|
| $B, \text{Т}$                                                                       | 1   | 2    | 3  | 4  | 5  |
| $\Delta T/T (\%)$                                                                   | 0.2 | -0.2 | -1 | -2 | -4 |
| Вектор індукції магнітного поля $B$ перпендикулярний площині корпусу термометра     |     |      |    |    |    |
| $B, \text{Т}$                                                                       | 1   | 2    | 3  | 4  | 5  |
| $\Delta T/T (\%)$                                                                   | 0.2 | -0.2 | -1 | -2 | -4 |

Якщо вектор індукції магнітного поля  $B$  паралельний або перпендикулярний площині корпусу термометра при температурі 4,2 К відносна похибка вимірювання температури  $\Delta T/T (\%)$  в умовах впливу магнітних полів 1 Т, 2 Т, 3 Т, 4 Т, 5 Т складає 0,2; -0,2; -1; -2; -4, відповідно. А абсолютна похибка вимірювання температури  $\Delta T$  (в одиницях Кельвіна) для вказаних вище значень магнітного поля складає 0,008 К; -0,008 К; -0,04 К; -0,08 К; -0,16 К, відповідно. Представлені експериментальні дані дозволяють зробити висновок, що при низьких температурах (4,2 К) магнітне поле до 4 Т практично не впливає на точність вимірювання температури діодним термометром. Магнітне поле 5 Т впливає на точність вимірювання температури діодним термометром, однак його величина дуже мала та складає -0,16 К.

Таким чином, сукупність відомих і відмінних конструктивних ознак діодного термометра, що заявляється, забезпечує створення нового криогенного кремнієвого діодного термометра, стійкого до впливу саморозігріву та магнітного поля у діапазоні низьких температур, включаючи гелієві температури.

#### ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ:

1. M. Mansoor, I. Haneef, S. Akhtar, A. De Luca, and F. Udrea, Silicon diode temperature sensors-A review of applications.//Sensors and Actuators A Physical. - 2015. - Vol. 232. - P. 63-74, doi:10.1016/j.sna.2015.04.022.
2. <https://scientificinstruments.jp-webs.com/product/model-si-435/>
3. <https://www.cryocon.com/S900ProdFolder.php>.
4. <https://mx.omega.com/temperature/pdf/CY7.pdf>.
5. [www.lakeshore.com/docs/default-source/product-downloads/catalog/lstc\\_dt670\\_l.pdf](http://www.lakeshore.com/docs/default-source/product-downloads/catalog/lstc_dt670_l.pdf) (найближчий аналог).
6. B.C. Dodrill, J.K. Krause, P.R. Swinehart, V. Wang, Performance characteristics of silicon diode cryogenic temperature sensors, //Applications of Cryogenic Technology. - 1991. - Vol. 10, - P. 85-107, doi: 10.1007/978-1-4757-9232-4\_8.

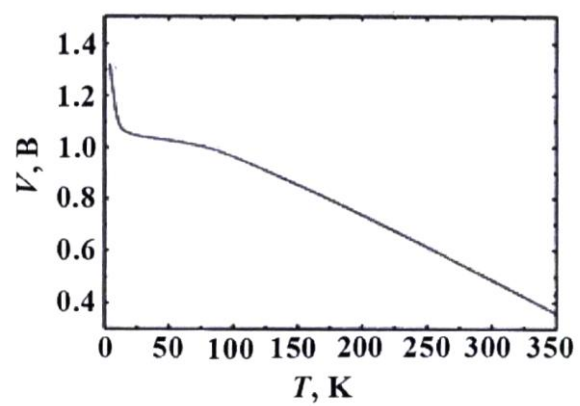


Fig. 1

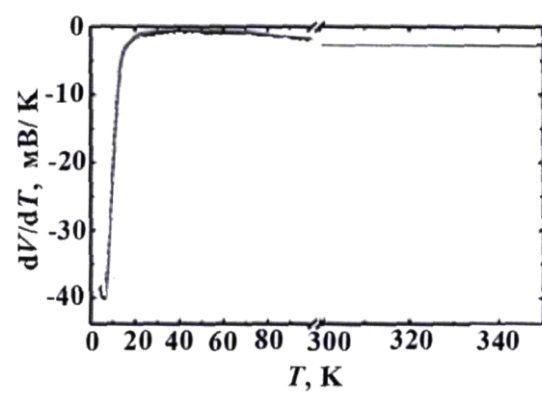


Fig. 2