

виконання в перспективі не забезпечує подальшого підвищення їх метрологічних характеристик.

Доведено перспективність використання як ЧЕ термоперетворювачів серії ТПР/ТВР-2085 термоперетворювачів опору з металевих стекел.

Термоперетворювачі такого конструктивного виконання можна успішно застосовувати для вимірювання високих температур в агресивних середовищах, зокрема в хімічній промисловості та металургії.

1. *Вимірювання температури: теорія та практика* / Луцик Я.Т., Гук О.П., Лах О.І., Стадник Б.І. – Львів: Бескид Біт, 2006. – 560 с. 2. *Металлические стекла* / Под ред. Гилмана Дж.Дж. и Лими Х.Дж., США, 1978; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1984. – 264с. 3. *Енциклопедія термометрії* / Я.Т. Луцик, Л.К. Буняк, Ю.К. Рудавський, Б.І. Стадник. – Львів: Вид-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2003. – 428 с.

УДК 536.532

## КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРИ В УСТАНОВКАХ РЕАКТИВНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕРМОМЕТРА ВИПРОМІНЕННЯ

© Гоц Наталія<sup>1</sup>, Кривенчук Юрій<sup>2</sup>, 2011

Національний університет «Львівська політехніка»,  
<sup>1</sup>кафедра метрології, стандартизації та сертифікації,  
<sup>2</sup>кафедра інформаційно-вимірвальних технологій,  
 вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна  
 natana@lp.edu.ua, proffessional@meta.ua

*Процес виготовлення елементів мікроелектроніки на основі процесу іонно-плазмового напилення потребує неперервного контролю температури кремнієвої підкладки. Запропоновано використовувати для цього термометр випромінювання. Розглянуто особливості вимірювання температури підкладки термометром випромінювання у процесі іонно-плазмового напилення.*

*Процесс создания элементов микроэлектроники на основе процесса ионно-плазменного напыления требует непрерывного контроля температуры кремниевой подкладки. Предложено использовать для этого термометра излучения. Рассмотрены особенности измерения температуры подкладки термометром излучения в процессе ионно-плазменного напыления.*

*The process of creation of elements of microelectronics on the base of process of ion – plasma spraying process needs continuous control of lining temperature. In the article the use is offered for this thermometer of radiation. The features of measuring of temperature of lining of radiation thermometer are considered in the process of spraying process.*

**Актуальність.** Мікроелектронні сенсори фізичних величин та мікросхеми різних видів широко використовують у техніці та промисловості. Це транзистори, фотодіоди, фоторезистори, різні види мікросхем. Є два основні способи виготовлення цих елементів: складання за допомогою мікророботів та методом напилення. Перший спосіб ефективний, але занадто дорогий. Для нанесення тонких плівок найширше використовують метод іонно-плазмового напилення шарів тонких плівок на підкладку, роль якої відіграє кремній. Основною перевагою методу іонно-

плазмового розпилення є його низька інерційність – розпилення починається одразу після подавання напруги живлення, а після її припинення розпилення припиняється майже миттєво. Для забезпечення якості виготовлення елементів мікроелектроніки важливим є контроль параметрів процесу напилення тонкої плівки, а саме: контроль зміни товщини плівки, електричного опору плівки, адгезії, швидкості нанесення плівки, а також температури кремнієвої підкладки. Температура підкладки впливає на деякі параметри процесу напилення, що визначає якість напилення. Отже, вимірю-

вання температури в установках реактивного іонно-плазмового напилення є актуальним.

**Постановка задачі.** Для визначення методу вимірювання температури кремнієвої підкладки розглянемо особливості процесу реактивного іонно-плазмового напилення. Мішень із матеріалу, що розпилюють, бомбардується швидкими іонами газу. З її поверхні вибивають атоми, які осаджуються на кремнієву підкладку, розміщену на невеликій відстані до мішені. Як джерело іонів використовують плазму тліючого розряду, що виникає в атмосфері інертного газу. Склад плазми, енергія іонів і характер процесів взаємодії розпилюваної речовини з плазмою і матеріалом підкладки визначають властивості одержаних тонких діелектричних плівок. За допомогою методу іонно-плазмового розпилення одержують плівки того самого хімічного складу, що і матеріал, який використовують для розпилення [1].

Системи для іонно-плазмового розпилення називають трьохелектродними або тріодними. На рис. 1 показано схему установки для розпилення матеріалів у плазмі газового розряду низького тиску з штучним катодом. У верхній частині вакуумного ковпака поміщають анод, у нижній вольфрамовий катод. Третім електродом або зондом Ленгмюра слугує мішень, яку використовують як джерело напилюваного матеріалу. Підкладка є електродом, на поверхні якого конденсується розпилений матеріал. Піч слугує для підігріву підкладки. Перед підкладкою закріплено нерухомий екран, а поряд з мішенню – рухомий екран.

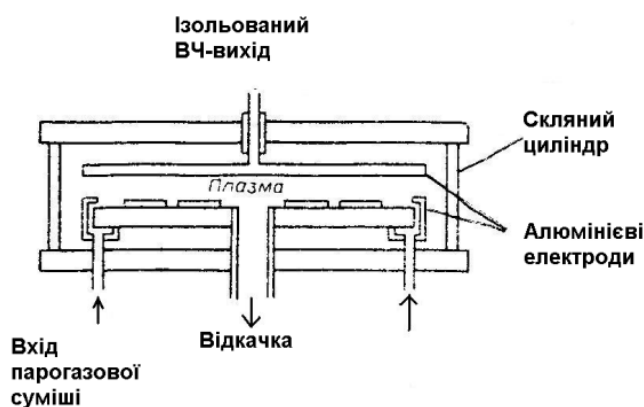


Рис. 1. Конструктивна схема установки іонно-плазмового напилення

Повітря в камері відкачують за допомогою дифузійного насоса до тиску  $1,3 \cdot 10^{-9}$  Па, підігрівають підкладку і подають струм розжарювання на катод. Катод розігрівають до температури, достатньої для одержання термоелектричного струму близько декількох ампер на квадратний сантиметр, а між розжареним катодом і анодом прикладають напругу. Після цього в камеру подають інертний газ під тиском до  $1,33 \cdot 10^{-1}$  Па. Запалювання розряду здійснюють за допомогою височастотного трансформатора Тесла, а якщо термоелектронний струм доволі великий, розряд виникає сам або при невеликому додатковому підвищенні анодної напруги. Після виникнення розряду розрядний струм сягає декількох ампер, а напруга на аноді падає до 60 – 90 В, тобто для розряду характерна спадна вольт-амперна характеристика. Позитивні іони, що виникають при розряді з низькою енергією, бомбардують підкладку, вибиваючи з її поверхні велику частину слабкоз'язаних забруднень внаслідок нагріву та «іонного травлення». Після цього на джерело розпилювального матеріалу (мішень) подається від'ємний потенціал. Додатні іони плазми бомбардують мішень з енергією, достатньою для розпилення атомів матеріалу мішені. За великих енергій іонів, що бомбардують, вибиті з мішені атоми рухаються в напрямку, перпендикулярному до її поверхні, та осідають на поверхні підкладки, розміщеної навпроти мішені. Рухомий екран дає змогу одночасно або попередньо очищати поверхню підкладки і мішені шляхом розпилення поверхневих забруднень. Якість очищення поверхні мішені й особливо підкладки є одним із важливих факторів у процесі утворення плівки із конденсуючого розпиленого матеріалу [1].

Істотною перевагою процесу іонно-плазмового напилення є його універсальність, оскільки можна регулювати швидкість, час та матеріал напилення плівки на кремнієву підкладку. Розпилювати можна як чисті напівпровідникові матеріали (кремній та інші), так і напівпровідникові сполуки (наприклад, сульфід кадмію). Для розпилення непровідникових матеріалів, феритів і діелектриків потрібно застосовувати височастотні електричні поля. Напруга у такому разі прикладається до металеві пластилини, яка розміщена за нерухою мішенню. Для забезпечення якості елементів мікроелектроніки важливим є контроль параметрів процесу напилення тонкої плівки, а саме: контроль зміни товщини плівки; контроль електричного опору плівки; контроль адгезії; контроль швидкості нанесення плівки; контроль температури підкладки.

Як зазначено вище, важливим є контроль температури кремнієвої підкладки, адже від неї залежать всі інші контрольовані параметри. Наприклад, у разі зростання температури до критичної межі напilenня може відбуватися практично миттєво. Тому в статті поставлено завдання – визначити метод вимірювання температури підкладки в процесі реактивного іонно-плазмового напilenня, який би дав змогу контролювати температурний режим цього технологічного процесу.

**Виклад основного матеріалу.** Найчастіше температуру кремнієвої підкладки вимірюють з використанням термоперетворювача, що обертається разом з обертальним тілом. Для передавання сигналу від термоперетворювача до вторинного приладу застосовують повзункові контакти. Але повзункові контакти мають нестабільний опір між кільцями та щітками й можуть бути джерелом паразитних термо-ЕРС. До того ж цей метод має високу інерційність та не надає інформації про температурне поле пластини.

Тому в установках іонно-плазмового напilenня для вимірювання температури кремнієвої підкладки доцільно використовувати безконтактний метод вимірювання температури за випроміненням, що визначається його перевагами: дистанційність виконання вимірювань, що дає змогу не вносити спотворень у температурне поле кремнієвої підкладки, можливість вимірювання температури рухомого об'єкта, що перебуває під електричним потенціалом в агресивному середовищі; широкий температурний діапазон вимірювання — від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+100000^{\circ}\text{C}$ ; висока роздільна здатність – до  $0,01\text{ мм}$ ; висока чутливість до  $-$  до  $0,01^{\circ}\text{C}$ ; висока швидкодія – до  $10^{-6}\text{ с}$  [2]. Використання термометра випромінення може давати інформацію не тільки про точкову температуру поверхні кремнієвої пластини, але й про її розподіл по поверхні.

Ці особливості й визначають доцільність застосування цього методу вимірювання температури за випроміненням для контролю температурного режиму процесу іонно-плазмового напilenня.

Безконтактний метод вимірювання температури за випроміненням оснований на реєстрації електромагнітного випромінення у видимій або інфрачервоній області спектра. Випромінення об'єкта, в цьому випадку кремнієвої пластини, зумовлене переходом внутрішньої теплової енергії тіла в променеву, що пов'язано з коливним і обертотвим рухом атомів і

молекул, коливаннями вузлів решітки, електронними переходами всередині об'єкта. Температура кремнієвої пластини пов'язана зі спектральним потоком випромінення  $R(\lambda, T)$  за законом Планка згідно з формулою 1 [3]:

$$R(\lambda, T) = \int_0^{\infty} C_1 \cdot I^{-5} \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} dI, \quad (1)$$

де  $C_1=3,7417749 \cdot 10^{-16}\text{ Вт}\cdot\text{м}^2$ ;  $C_2=0,01438769\text{ м}\cdot\text{К}$  [4];  $\lambda$  – довжина хвилі випромінення;  $T$  – температура об'єкта.

Ми пропонуємо конструктивну схему вимірювання температури кремнієвої підкладки термометром випромінення, яка зображена на рис. 2. Вимірюють температуру двома термометрами випромінення, які крізь оглядове віконце візують нижню поверхню кремнієвих пластин, на верхню поверхню яких в цей час напilenють тонкі шари потрібних матеріалів. Температуру пластини вимірюють термометром випромінення, інформація подається на запам'ятовувальний пристрій, котрий дає змогу не тільки фіксувати значення температури в часі, а й контролювати її зміну та сигналізувати про її перевищення, реєструвати результати.

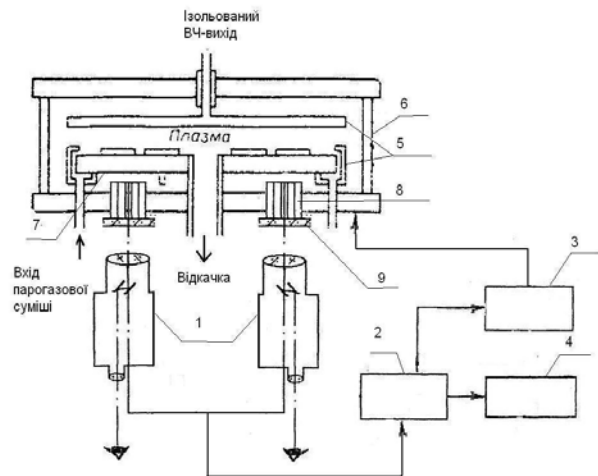


Рис. 2. Схема вимірювання температури кремнієвої підкладки в реакторі іонно-плазмового напilenня з використанням термометрів випромінення: 1 – термометр випромінення; 2 – вторинний перетворювач; 3 – система управління установкою; 4 – портативний комп'ютер; 5 – алюмінієві електроди; 6 – скляний циліндр; 7 – підкладка під зразки; 8 – набір тонкостінних трубок; 9 – оглядове вікно

Розглянемо особливості процесу вимірювання температури термометром випромінення в установці

іонно-плазмового напilenня. Кремнієва підкладка в процесі напilenня може нагріватися до  $200 \div 900$  °С. Це зумовлює доцільність вимірювання температури в інфрачервоному спектральному діапазоні  $3 \div 5$  або  $8 \div 14$  мкм, тобто робочий спектральний діапазон засобу вимірювання  $\lambda_1 \div \lambda_2$  має належати до цієї спектральної області. Потік випромінювання у спектральному інтервалі  $R_{si}(I, T)$  характеризує вираз (2)

$$R_{si}(I, T) = \int_{I_1}^{I_2} R(I, T) \cdot dI \quad (2)$$

На потік випромінювання, що надходить на приймач, впливатимуть такі фактори: випромінювальна здатність поверхні пластини та пропускання проміжного середовища, яке складається з шару повітря та матеріалу оглядового вікна, що відображено виразом (3)

$$R_{si}(I, T) = \int_{I_1}^{I_2} e(I, T) R_0(I, T) t(I, T) \cdot dI + \int_{I_1}^{I_2} R_B(I, T) t(I, T) \cdot dI \quad (3)$$

де  $e(I, T)$  – коефіцієнт випромінювання поверхні кремнієвої пластини;  $t(I, T)$  – коефіцієнт пропускання проміжного середовища;  $R_B(I, T)$  – потік фонового випромінювання.

Розглянемо докладніше характер впливу цих чинників під час вимірювання температури за випромінюванням в установці іонно-плазмового напilenня.

Кремній є частково прозорим матеріалом в інфрачервоному діапазоні спектра. Його коефіцієнт випромінювання може сягати приблизно 0,67 і практично не залежить від зміни температури. Тому під час вимірювання температури термометром випромінювання для збільшення випромінювальної здатності кремнієвої пластини доцільно покривати її зовнішню сторону шаром оптично непрозорого матеріалу з високим значенням коефіцієнта випромінювання [5].

Коефіцієнт випромінювання характеризує не конкретну речовину або матеріал, а стан та властивості лише тонкого шару поверхні об'єкта в цих умовах у разі вимірюванні певними засобами вимірювання. Тому використовується експериментальне визначення коефіцієнта випромінювання досліджуваної поверхні безпосередньо перед вимірюванням температури пірометром. Є декілька методів експериментального визначення коефіцієнта випромінювання поверхні об'єктів: метод чорного тіла, метод плями, метод

пірометра, спектроболометричний метод, метод підсвітки, метод вимірювання в поляризованому світлі, метод оптичних сталей, метод поглинання, тестові методи. Стінки камери іонно-плазмового напilenня вкриті шаром тефлону, значення коефіцієнт випромінювання якого прямує до 1. Для зменшення впливу на результат вимірювання значення коефіцієнта випромінювання доцільно використовувати різні методи вимірювання температури за випромінюванням, зокрема методи спектрального відношення.

Фонове випромінювання можна розділити на внутрішнє фонове випромінювання камери та зовнішнє випромінювання сторонніх джерел поза межами камери.

За цих умов потік фонового випромінювання досліджуваного об'єкта дорівнюватиме:

$$R_B(I, T) = R_{Вен}(I, T) + R_{Взог}(I, T) \quad (4)$$

Внутрішнє фонове випромінювання складатиметься з багатократно відбитого випромінювання джерела випромінювання іонно-плазмового напilenня від стінок камери:

$$R_{Вен}(I, T) = (1 - e(I, T)) \cdot (1 - e_{B1}(I, T)) (1 - e_{B2}(I, T)) \cdot \dots \cdot (1 - e_{Bn}(I, T)) R_{Вен}(I, T) \quad (5)$$

Оскільки стінки камери іонно-плазмового напilenня вкриті шаром тефлону, коефіцієнт випромінювання якого прямує до 1, можна вважати, що ефективний коефіцієнт випромінювання при багатократному відбиванні випромінювання прямуватиме до 1, що робить мінімальним вплив багатократних відбивань випромінювання на сигнал [6].

Зовнішнє фонове випромінювання може надходити на приймач випромінювання, відбиваючись від кремнієвої пластини:

$$R_{Взог}(I, T) = (1 - e(I, T)) \cdot R_{Взог}(I, T) \quad (6)$$

До того ж камера є закритим об'ємом, який наближено можна вважати абсолютно чорним тілом, що робить мінімальним вплив зовнішнього фонового випромінювання від сторонніх об'єктів на результат вимірювання температури. Зважаючи на це, вплив різних видів фонового випромінювання – як внутрішнього, так і зовнішнього на результати вимірювання є незначним, тому ним можна знехтувати.

На проходження випромінювання від зовнішньої поверхні кремнієвої пластини крізь оглядове вікно до приймача випромінювання можуть впливати такі фактори згідно з виразом (7):

- випромінювання поглинається газами та матеріалом оглядового вікна, що утворюють проміжне середовище;

• випромінення послаблюється внаслідок розсіювання на частинках, молекулах та аерозолях, наявних у проміжному середовищі;

• проміжне середовище додає власне випромінення.

$$t(I, T) = f(t_{noz}(I, T), t_{poz}(I, T), t_{cep}(I, T)), \quad (7)$$

де  $t_{noz}(I, T)$  – коефіцієнт поглинання проміжного середовища;  $t_{poz}(I, T)$  – коефіцієнт розсіювання проміжного середовища;  $t_{cep}(I, T)$  – коефіцієнт випромінення проміжного середовища.

Більшість видів скла, яке використовується в оглядових вікнах, не пропускають інфрачервоне випромінення з довжиною хвилі більше за 2,7 мкм внаслідок сильного поглинання випромінення іонами  $OH^-$ . Скло на основі плавненого кварцу добре пропускає випромінення з довжинами хвиль до 5 мкм. Деякі спеціальні види скла значно прозоріші в довгохвильовій інфрачервоній області. До них належать [5]:

- скло на основі алюмінату натрію;
- кераміка IRTRNAN, отримана гарячим пресуванням на основі  $MgF_2, ZnS, CaF_2, ZnSe, MgO, CdTe$ ;
- халькогенідне скло, що містить важкі елементи, такі як миш'як, сурма, талій, селен, телур, скло на основі  $As_2S_2$ , скло на основі окису германію.

Оскільки з камери відкачане повітря, то коефіцієнт пропускання проміжного середовища залежатиме лише від поглинання випромінення склом оглядового вікна та можливим забрудненням оглядового вікна, яке може накопичуватися на внутрішній та зовнішній сторонах за певний проміжок часу в процесі напилення. Поглинення випромінення цими видами скла є сталим у зазначеній спектральній області.

Оскільки основними чинниками, які впливають на потік випромінення від кремнієвої пластини до термометра випромінення, є коефіцієнт випромінення та коефіцієнт поглинання проміжного середовища, які мультиплікативно впливають на основний сигнал, то для вимірювання температури доцільно використовувати метод спектрального відношення сигналів у двох близьких за спектром спектральних каналах [7]. У цьому випадку умовна та термодинамічна температура визначатимуться відповідно до формул

$$T_k^{-1} = -\frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{S_2(I_2, T)}{S_1(I_1, T)}, \quad (8)$$

$$T^{-1} = T_k^{-1} - \frac{L}{C_2} \cdot \ln \frac{e_2(I_2, T) \cdot t_2(I_2, T)}{e_1(I_1, T) \cdot t_1(I_1, T)}, \quad (9)$$

де  $L = \frac{I_1 \cdot I_2}{I_2 - I_1}$  – еквівалентна довжина хвилі методу

спектрального відношення.

Незалежно від практичної реалізації двоканального термометра випромінення сигнал відповідного каналу пірометра можна описати формулою [8]:

$$S_i(I_i, T) = q_i \cdot \int_{I_{li}}^{I_{hi}} \frac{e_i(I, T) \cdot t_i(I, T) \cdot t_{Fi}(I) \cdot R_i(I, T) \cdot C_1}{I_i^5 \cdot \left[ \exp\left(\frac{C_2}{I \cdot T}\right) - 1 \right]} dI + S_{Di}(T_P) + S_{Ni}, \quad (10)$$

де  $i$  – номер спектрального каналу пірометра;  $q_i$  – стала, що залежить від конструкції пірометра, зокрема від параметрів оптичної системи, електронного тракту та чутливості приймача випромінення;  $e(I)$  – спектральний коефіцієнт випромінення поверхні досліджуваного об'єкта, значення якого близьке до 1;  $t(I, T)$  – коефіцієнт пропускання оглядового вікна;  $t_{Fi}(I)$  – коефіцієнт пропускання оптичного фільтра;  $R_i(I)$  – спектральна чутливість приймача випромінення та оптичної системи;  $S_{Di}(T_P)$  – сигнал, пропорційний до власного випромінення зовнішньої поверхні кремнієвої пластини;  $S_N$  – сигнал, пропорційний до значення шумів приймача випромінення та електронного тракту;  $T_P$  – температури пірометра.

Отже, як показує дослідження особливостей вимірювання температури за випроміненням у процесі іонно-плазмового напилення, основним буде вплив на результат вимірювання такого впливного фактора, як пропускання випромінення проміжним середовищем, а точніше, поглинальних властивостей матеріалу оглядового вікна. Тому доцільно використовувати метод спектрального відношення та термометр випромінення з двома спектральними каналами. Вплив інших факторів, таких як коефіцієнт випромінення поверхні та фонове випромінення, може бути нехтовно малим. Це уможливило високоточне вимірювання температури з використанням термометра випромінення, що дасть змогу покращити процес іонно-плазмового напилення під час створення елементів мікроелектроніки.

1. Минайчев В.Е. Нанесение пленок в вакууме. – М.: Высш. шк., 1989. – 110 с. 2. Гоц Н. Моделирование похибок вимірювання температури методами двоканальної термометрії випромінення // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», «Комп'ютерні науки та

інформаційні технології». – Львів, 2011. – № 694. – С. 205–211. 3. Гордов А.Н. Основы пирометрии. – М.: Металлургия, 1971. – 446 с. 4. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – С. 79. 5. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. – М.: Мир, 1988. – 399 с. 6. Ранцевич В.Б. Пирометрия при посторонних источниках излучения. – Минск: Наука

и техника, 1988. – 152 с. 7. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 1982. – 296 с. 8. Гоц Н., Пянтковски Т. Дослідження впливу приймача випромінювання на точність вимірювання температури за випромінюванням багатоспектральними методами // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка», «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – Львів, 2010. – № 686. – С.290–296.

УДК 621.3; 536.53

## КОРИГУВАННЯ ПОХИБОК ДІОДНИХ ЦИФРОВИХ ТЕРМОМЕТРІВ

Яцук Юрій<sup>1</sup>, Тимчук Олександр<sup>2</sup>, 2011

Національний університет «Львівська політехніка»,

<sup>1</sup>кафедра комп'ютеризованих систем автоматички, jürgen.jazuk@gmail.com,

<sup>2</sup>кафедра метрології, стандартизації та сертифікації, saigex.ua@gmail.com

*Проаналізовано джерела похибок, змодельовано їх залежності від декількох найважливіших параметрів генератора струмів та запропоновано способи коригування похибок цифрових діодних термометрів із кодово змінюваними значеннями вимірювальних струмів.*

*Проанализированы факторы погрешностей, смоделированы их зависимости от нескольких наиболее важных параметров генератора токов и предложены пути коррекции погрешностей цифровых диодных термометров с изменяемыми кодом значениями измерительных токов.*

*The digital diode thermometer error factors and error modelling results as multiarguments function are provide in this paper. The some ways of digital diode thermometer errors correction are discussed also.*

**Аналіз останніх публікацій.** Відомі переваги діодних сенсорів температури (ДСТ) щораз ширше використовують, зокрема в цифрових термометрах (ЦТ), які можуть бути вбудовуваними або ж автономними. Завдяки методу зміни вимірювальних струмів забезпечується їхня висока точність, взаємозамінність і стабільність, що відкриває перспективи для побудови прецизійних ЦТ [1–6]. Однак на практиці досягти взаємозамінності ДСТ, кращої від  $\pm 0,5$  К, доволі складно через трудомістку процедуру адитивного та мультиплікативного підстроювання реальної функції перетворення вторинного приладу [2–7].

**Завдання досліджень.** Основною метою цієї статті є аналіз можливостей коригування похибок цифрових термометрів для роботи з діодними сенсорами.

**Аналіз похибок діодних цифрових термометрів.** Відомо, що з використанням трьох значень  $I_1, I_2, I_3$

( $I_1 < I_2 < I_3$ ) вимірювальних струмів, що протікають через ДСТ, код  $N_X$  результату вимірювання можна знайти як [1–3, 5]

$$N_x = N_1 - N_2 - N_3 = k_{ADC} \left[ (2I_1 - I_2 - I_3) R_L + (kT_x / q) \ln(I_1^2 / I_2 I_3) \right], \quad (1)$$

де  $N_1, N_2, N_3$  – коди проміжних результатів перетворення сигналів з ДСТ, отриманих під час пропускання через нього струмів  $I_1, I_2, I_3$  відповідно;  $k_{ADC}$  – коефіцієнт перетворення спаду напруги на ДСТ на цифровий код;  $R_L$  – опори бази, виводів бази та емітера та з'єднувальних дродів;  $q$  – заряд електрона;  $k$  – стала Больцмана.

З метою незалежності результатів вимірювання від значення опору  $R_L$  треба виконати умову  $2I_1 - I_2 - I_3 = 0$ . Під час опрацювання цифрових кодів, пропорційних до спадів напруги  $U_i$  на ДСТ  $N_X = k_{ADC} (2U_1 - U_2 - U_3)$ , найдоцільніше вибрати час перетворення напруги  $U_1$  удвічі більшим від часів