

DOI 10.36074/logos-06.02.2026.034

ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ НОВОГО ТИПУ ДЛЯ ТЕРМОМЕТРУ ОПОРУ

Лоскутов Костянтин В'ячеславович¹, Ковальчук Володимир Володимирович²

1. здобувач ступеня PhD

Південноукраїнський національний педагогічний університет ім. К. Д. Ушинського, УКРАЇНА

2. д-р. фіз.-мат. наук, професор

ПЗВО «Одеський технологічний університет «ШАГ»», УКРАЇНА

ORCID ID: 0000-0001-7460-8092

Вступ. Постановка задачі. Температурні, теплотехнічні вимірювання є вкрай важливими для реалізації безперервного виробничого контролю роботи будь-якого устаткування. Це особливо актуально при проведенні робіт з термічного аудиту приладів електронної техніки [1], які дозволяють провести дистанційний аналіз і моніторинг параметрів навколишнього середовища [2].

У роботі поставлена **мета** проведення досліджень статичних та динамічних характеристик сучасних приладів вимірювання температури, зокрема, модернізованих термометрів опору (ТО).

Для досягнення цієї мети було виокремлено наступні **задачі**. Перше. Визначити різноманіття вживаних сучасних засобів вимірювання температури. Це мотивує необхідність розробки нових типів первинних перетворювачів, приладів і інформаційно-вимірювальних систем, що задовольняють зростаючим вимогам точності, швидкодії, завадостійкості ТО. Друге. Провести технічну модернізацію ТО на напівпровідниковій базі з використанням елементів нового типу для досягнення високої чутливості. Третє. З'ясувати умови використання запропонованого нами ТО щодо розподілу температурних полів в реальних умовах.

Конструкція термометра опору. У діапазоні низьких і середніх температур застосовуються, головним чином, контактні методи виміру. На практиці це реалізується шляхом створення сучасних первинних перетворювачів у вигляді термоперетворювачів опору і термопар. Спектр останніх досить широкий: від термоелектричних, скляних, рідинних термометрів до напівпровідникових.

З нашої точки зору, використання плівкових гетеропереходів (ПГП), які включають чутливі елементи (ЧЕ) високого рівня, відкривають нові можливості

технології виготовлення ТО нового типу. Такий плівковий ЧЕ є не лише функціональним, але й економічно вигідним сенсорним датчиком. Однією з переваг такого ЧЕ є його неймовірно маленький геометричний розмір та маса.

Плівкові чутливі елементи (ЧЕ) типу «thin-film» можуть виготовлятися шляхом нанесення тонкого шару ПГП на підкладку. Нанесення шару (товщиною у 10^{-8} см.) досягається електровакуумним напилюванням [3]. Отриманий шар покривають епоксидним або скляним ізоляційним матеріалом. Технологія виготовлення такого елемента добре відпрацьована. Технологічний режим виготовлення плівок з глибокосубмікронними включеннями [4], до прикладу, у вигляді нанокластерної підсистеми – НКП), який можна використати як ЧЕ ТО [5].

ЧЕ з подібними елементами можна розташовувати у мініатюрні корпуси. Завдяки малим розмірам, плівкові ЧЕ можуть виготовлятися з підвищеним номінальним опором. Розроблені та виготовлені ЧЕ мали опір до 10 КОм. Один з прикладів ТО наведено на рисунку 1. У даній конструкції матеріалом для внутрішніх кінцівок служить мідь, що покрита нікелем (27%), шляхом холодного пресування, або корозійно-стійкий високотемпературний сплав. Для зовнішніх кінцівок використовується ізольована тефлоном багатожильна мідь із нікелевим покриттям. ЧЕ з внутрішніми кінцівками розміщується в циліндричній металевій трубці, тобто, безпосередньо у корпусі ТО і засипається дрібнодисперсним гігроскопічним порошком з оксиду алюмінію або магнію. Кінець трубки, в місці виходу провідників герметизується. Для надійної герметизації при високих температурах використовується спеціальна кришка з вбудованим переходом метал-скло, або кераміка-скло. Кінцівки дротів, попередньо впаяні в кришку, зварюються з кінцівками термометра, а кришка заварюється у корпус. Такий спосіб забезпечує повну герметизацію ТО і значно підвищує його довговічність та надійність. Матеріалом корпусу ТО служить латунь (для низьких і кімнатних температур), сталь 314, сталь 316, інконель 600. Найкращу корозійну стійкість забезпечує інконель 600.

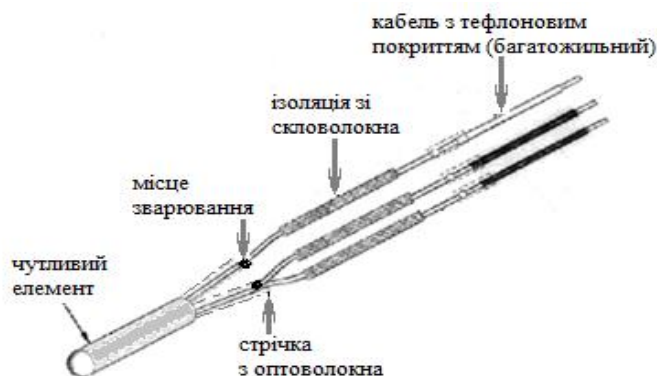


Рис. 1. Конструкція термометру опору з чутливим елементом

ABSCHNITT 18.

PHYSIKALISCH UND MATHEMATISCH

Щодо обрання довжина конструкції ТО, то тут має враховуватися необхідна глибина занурення ТО у об'єкт. Ця глибина занурення є важливим фактором, що впливає на похибку вимірювання температури об'єкта, яка виникає через теплові втрати від ЧЕ у навколишнє середовище.

Формування плівок ЧЕ. Для того, щоб позбавитися існуючих недоліків ТО, або ЧЕ, слід використати новітні технології, які забезпечують високу швидкість роботи приладу, низьку інерцію та високу роздільну здатність показників. Саме вирішення цього питання є мотивуючим фактором створення ТО нового покоління, де основним елементом є саме плівковий ЧЕ з глибоко субмікронною морфологічною структурою [6]. Підбір матеріалу і товщину плівок обирають з урахуванням потрібних, для проведення вимірювань, фізико-хімічних властивостей, або особливостей навколишнього середовища. Як правило, перевага віддається плівкам, що мають співрозмірну з підкладкою основного кристалу зонною структурою, відповідною радіаційною та температурною стійкістю. Перспективними є ПГП, що мають нанокластерну морфологію і сформовані на поверхні твердотільної речовини. Технологія виготовлення таких плівок, як складових ЧЕ ТО, або інших приладів електронної техніки - це комплекс складних технологічних процесів, одним з етапів якого є вимірювання її товщини та визначення її морфології – субмікронної структури. Нами досліджувалися процеси формування кластеризованих плівок кремнію, що були синтезовані з парової фази на підкладку монокристалічної Si- пластини. В якості підкладки використано Si-монокристали з площею 0,28 см², та товщиною у декілька мкм. Підкладка наносилася на поверхню срібних електродів кристалічного кварцу, який є основою пьезокварцового резонатора. Кристалічна структура плівкової кластеризованої структури у вигляді ПГП, відповідала сильно розмитій текстурі, що спостерігається за допомогою експериментів [7] і визначається, як нанокластерний растр Si [8].

Перспективним є застосування інтерференційного методу для контролю товщини тонких плівок і вимірювань їхньої швидкості травлення [8]. Тут оптична структурна схема інтерференційного методу, яка є оптимальною для автоматичного вимірювання швидкості травлення тонких плівок.

Досліджувані нами зразки ПГП синтезувалися методом відкритого випаровування порошку кремнію у вакуумі. Їх товщина контролювалася за допомогою мікроінтерферометра. Дослідження морфології плівки, тобто її субмікронної структури, проводилися за методом [7].

Процес формування ПГП проводився з використанням п'єзо - кварцевого датчика зі сталою частотою у 1,67 МГц/мм. Датчик підключався до стандартного приладу - кварцевого вимірювача товщини плівки (КВТП) [9], з

попередньо градуйованою шкалою (на c-Si). Градувальний графік будувався таким чином, щоб його можна було вжити для вимірювання малих товщин, що наносили на підкладку Si. Оперативний контроль товщини ПГП проводився методом кварцевого резонатора.

Принцип роботи КВТП базується на вимірюванні зсуву резонансної частоти кварцевого датчика в залежності від осадженого шару матеріала. Процедуру нанесення шару матеріалу на підкладку проводять на основі аналітичного співвідношення, що відповідає математичній моделі текстури плівки. Таким чином можна задавати складні, багат шарові плівки. Кожний шар характеризується конкретною товщиною і типом покриття, густиною матеріала, що напильють на поверхню. Виходячи з цих параметрів та відносної зміни частоти кварцевого датчика, розраховують товщину плівки. Маса нанесеного на одиницю поверхні кварца (Δm) і зміна частоти кварцевого резонатора (Δf) пов'язані співвідношенням:

$$\Delta m = \frac{m_g}{f_g} \Delta f$$

де m_g – маса кварцевої підкладки одиничної площі; f_g – резонансна частота.

Чутливість метода кварцевого резонатора є досить високою. Так, для кристала з резонансною частотою $f = 5$ МГц, масою $m_g = 100$ мг чутливість дорівнює величині $0,02$ мкг/Гц. Тобто реєструючи відхід частоти кварцевого резонатора на 1 Гц, можна контролювати збільшення маси плівки у соті долі мікрограма. Слід зауважити, що кварцовий резонатор чутливий до зміни температури. Щоб врахувати відхід резонансної частоти при зміні температури, у наших вимірюваннях використано кварцові резонатори, що були відібрані за результатами вимірювань температурної залежності резонансної частоти. Було проведено тестування понад 40 резонаторів марки РК170 и РК171 з частотою власного резонанса у $5 \dots 10$ МГц. Найбільш типові залежності $f(T)$ наведені на рисунку 2. Як видно з цього графіка температурна крива 1 характеризується слабкою залежністю частоти від температури. Таку графічну залежність мали приблизно п'ять відсотків резонаторів. Приблизно 75% резонаторів характеризувалися спадаючою залежністю (крива 2 на рис.2). Між іншим, були виокремлені і відбраковані приблизно двадцять відсотків резонаторів, які характеризувалися ломаними лініями (3) з яскраво визначеним екстремумом.

На рисунку 3 представлена кінетика частоти резонанса кварцевого кристалла після проведення напильнення плівки. Дрейф частоти після нанесення покриття обумовлений адсорбцією остаточної Si – пари, який

ABSCHNITT 18.

PHYSIKALISCH UND MATHEMATISCH

формує свіженанесений шар кремнію. Використовуючи кристали зі слабкою температурною залежністю (крива 1 рис. 2) точність у зміні відходу частоти від резонансного значення $\Delta f_{\text{нам}}$ вдавалося довести до 1 Гц.

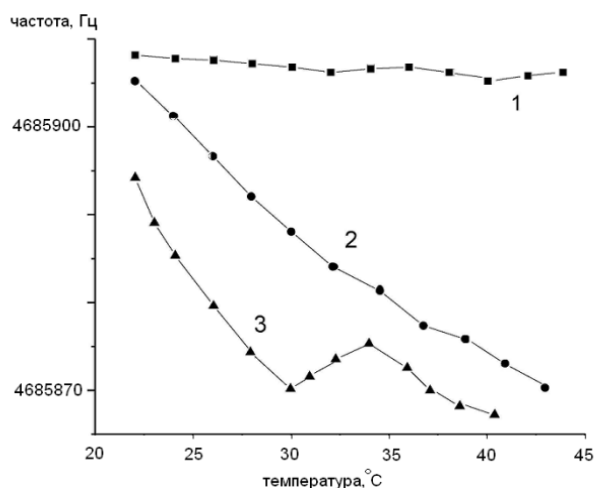


Рис. 2. Температурні залежності частоти кварцового резонатора від температури

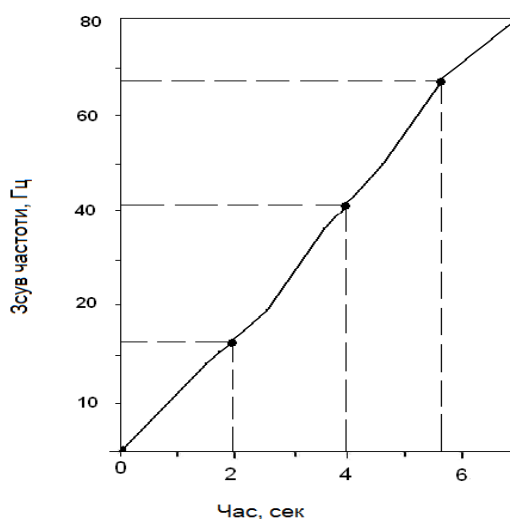


Рис. 3. Кінетичні криві синтезу плівок на поверхню кремнію, що отримані за допомогою п'єзо резонансного датчика

Похибка метода обумовлена точністю, яка відповідала відходу від резонансної частоти Δf і точністю у визначенні маси кристалу m_g . У нашому випадку похибка вимірювання товщини покриття відповідала 5%.

Метод кварцового резонатора дозволяє впроваджувати на практиці методику виготовлення плівок з контрольованою і наперед заданою товщиною. У таблиці 1 наведено результати вимірювання товщини плівки методом кварцового резонатора.

Таблиця 1

Порівняння результатів вимірювання товщини плівки кремнію

Номер зразка	Δf кварца, Гц	Товщина плівки за даними кварца, мкм
1	80	1,034
2	105	1,368
3	120	1,519
4	136	1,748
5	156	2,006
6	200	2,584
7	320	4,134

Перспективи та висновки. Створений нами ЧЕ був використаний для проведення вимірювань температури у теплообміннику ТО. Практична реалізація запропонованої у роботі технології, дозволяє виокремити особливості отримання надчутливих елементів на плівковий кластеризованій основі. А саме. По-перше. Пружні властивості напиленої речовини відрізняються від пружних характеристик підкладинки. По-друге. Густина напиленої речовини є меншою за густину цієї ж речовини у масивному зразку. Третє. Зсув частоти резонансу обумовлений не лише масою нанесеного шару, але й напругою, що виникає на границі розділу підкладка-плівковий матеріал.

Вказані вище особливості дозволяють врахувати обмеження методу і використовувати його, власне, як метод неруйнівного контролю поверхні твердого тіла з нанокластерною морфологією [10]. Більше того, для цього методу має враховуватися стандарт загально-технічних вимог до використання такого програмованого приладу, яким є КВТП. Цей прилад може бути використаний для реалізації сучасної технології формування на поверхні твердотільної матриці плівкового шару з наперед заданим нанокластерним растром колоїдної дисперсності. З метою порівняння експериментальних і теоретичних даних, розробивши математичну модель, на основі якої будуть підібрані ефективні програмні засоби, у подальшому планується отримання розподілу температури у реальному об'єкті за заданими граничними умовами.



ABSCHNITT 18.

PHYSIKALISCH UND MATHEMATISCH

Отже, у роботі запропонована фізична модель ЧЕ на основі ПГП для ТО. Була проведена перевірка адекватності цієї моделі поставленій фізичній задачі. Спосіб нанесення тонкого плівкового шару, що утворює, власне, ЧЕ ТО, дозволяє провести вимірювання товщини нанесеного у вакуумі покриття з точністю до 0,1 нм. Цей метод відкриває нові можливості щодо проведення: а) контролю товщини матеріалу у процесі нанесення у вакуумі плівкової структури заданої морфології на поверхню напівпровідника; б) вимірювання зсуву резонансної частоти кварцового кристалу при зміні її маси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

- [1] Wu K.C. (2021). Power Electronic System Design. *Ed. Elsevier*. 405 p. Посилання: eBook ISBN: 9780323885430
- [2] Бондар О.І., Тафтай В.В., Фінін Г.С., Шевченко Р.Ю. (2022). Сучасні технології моніторингу довкілля: на прикладі Київської агломерації. ДЕАПОУ Житомир: Рута. 394 с. Посилання: <https://repository.knuba.edu.ua/handle/123456789/11486>
- [3] Гасій О. Б. (2018). Розвиток технології вакуумного йонно-плазмового напилення та напрями її вдосконалення Науковий вісник НЛТУ України. 28 (10). 85-91. DOI: <https://doi.org/10.15421/40281018>
- [4] Guo J., Yu B., Chen L. (2015) Nondestructive nanofabrication on Si(100) surface by tribochemistry-induced selective etching. *Sci. Rep.* 5. 16472. DOI: 10.1038/srep1647
- [5] Ковальчук В.В. (2022) Study on Heterophotocell Based on Super-line Photoventil Effect Research Trends and Challenges in Physical Science (7). 26–33. <https://doi.org/10.9734/bpi/rtcps/v7/15319D>
- [6] Kovalchuk V., Popriaha D. (2025). Optical Properties of the Semiconductor Nanoclusters. *Technium: Romanian J. Appl. Sciences and Technology*. 28. 35–42. <https://doi.org/10.47577/technium.v28i.12625>
- [7] Buckwell M., Wing H.Ng., Hudziak S., Mehonic A., Lanza M., Kenyon A.J. (2019). Improving the consistency of nanoscale etching for atomic force microscopy tomography applications. *Front matter: mechanics of materials*. 6. 203-205. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00203>.
- [8] Іваницький В. П., Рубіш В. М., Тарнай А. А., Чичура І. І., Рубіш В. В., Далекорей А. В., Мешко Р. О., Рябошук М. М., Цигика В. В. (2024). Автоматизація вимірювань швидкості хімічного травлення тонких плівок *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 26 (2). 81-91. DOI: <https://doi.org/10.35681/1560-9189.2024.26.2.316977>
- [9] Ковальчук В.В., Панченко А.А., Сербов Н.Г. (2015). Вимірювальна система визначення геометричних параметрів нанокластерної підсистеми речовини. *Метрологія та прилади*. 53(3). 57-62 ISSN 2307-2180 <http://www.metpriladi.com/>
- [10] Kovalchuk V., Popriaha D. (2025). Formation of a nanocluster subsystem of a film heterotransfer *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*. 23 (3). 58-64 DOI: <https://doi.org/10.18524/1815-7459.2025.3.339805>