

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, професора,
завідувача кафедри радіотехніки

Вінницького національного технічного університету

Осадчука Олександра Володимировича

на дисертаційну роботу

Бойко Оксани Василівни**«ФУНКЦІОНАЛЬНО-ІНТЕГРОВАНІ СЕНСОРИ ТЕРМІЧНОГО АНАЛІЗУ НА
СТРУКТУРАХ ТВЕРДОТІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ»,**поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка**Актуальність теми дисертації**

Базовим трендом, що визначає подальший розвиток мікроелектронних сенсорів на основі компонентної бази твердотільної електроніки, зокрема сенсорів термічного аналізу, є розширення функціональності та їх конструктивно-технологічна сумісність з базисом сучасних твердотільних (кремнієвих) інтегральних схем та відповідність новітній концепції Lab-on-Chip, яка передбачає реалізацію сенсорів хімічного та біохімічного аналізу на основі напівпровідникових чипів.

Мікроелектронні сенсори термічного аналізу є ефективним засобом дослідження органічних і неорганічних речовин. Вони використовуються в різних галузях для контролю якості сировини, напівфабрикатів і готової продукції. При створенні нових матеріалів і технологій їх виробництва важливо знати і контролювати всі структурні і фазові перетворення, які можуть відбуватися з матеріалом за тих чи інших умов. На сьогодні не існує єдиного універсального методу, який би давав таку можливість. Найчастіше для дослідження структурних і фазових перетворень при нагріванні та охолодженні використовують диференційний термічний аналіз та диференційну скануючу калориметрію. Використання кількох методів дозволяє не лише кількісно визначати теплові ефекти та відповідні їм температурні показники, але і порівнювати результати термічного аналізу зі зміною механічних, магнітних, оптичних та інших властивостей зразка. При цьому забезпечується можливість порівняння отриманих результатів за однакових умов проведення експерименту, підготовки зразків, усунувши вплив неоднорідності матеріалу.

За останній час методи термічного аналізу знаходять широке використання в медико-біологічних дослідженнях. З їх допомогою проводять якісний та кількісний аналіз фармацевтичних засобів, білків, кісткової тканини, м'язів тощо. Нажаль, існуючі пристрої не в повній мірі відповідають вимогам біомедичної сенсоріки. Особливістю останньої є можливість досліджувати мікрооб'єкти, в тому числі на клітинному рівні, а відтак ставиться задача мінімізації допустимої маси досліджуваної речовини, підвищення роздільної здатності вимірювання, а також, відповідність вимогам сучасної біомедичної мікроелектроніки.

Відтак, у роботі формулюється та вирішується актуальна науково-прикладна проблема побудови, моделювання та дослідження функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на базисі компонентів твердотільної мікроелектроніки та багатофункціональних сигнальних перетворювачів, які забезпечують можливість проведення "in situ" досліджень на основі поєднання термічних і нетермічних методів.

Загальна оцінка роботи

Дисертацію присвячено дослідженню, удосконаленню та розробці сенсорів термічного аналізу на компонентах твердотільної електроніки - терморезистивних, термоелектричних та транзисторних структурах, а також можливостям їх реалізації на органічних світловипромінювальних, рідкокристалічних та фоточутливих елементах.

Дисертація складається зі анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел (263 найменування) та додатків. Робота викладена на 280 сторінках основного тексту, включає 266 рисунків та 10 таблиць. Загальний обсяг роботи складає 351 сторінку.

Розділи добре структуровані, наприкінці кожного з них наведено висновки.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, зв'язок роботи з науковими програмами, сформульовано мету та основні завдання, які розв'язувалися при виконанні роботи. Висвітлено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок автора, публікації та апробацію результатів дисертаційних досліджень.

Перший розділ присвячено огляду літературних даних, що стосуються термоаналітичних методів дослідження та методів побудови сенсорів термічного аналізу. Розглянуто основні напрямки реалізації сенсорних пристроїв. Конкретизована проблема та сформульована мета структурно-параметричної модифікації мікроелектронних сигнальних перетворювачів сенсорів термічного аналізу у відповідності до концепцій Lab on Chip та Інтернет речей (Internet of Things).

У другому розділі розглянуто можливості вдосконалення сигнальних перетворювачів терморезистивних та термоелектричних сенсорів, що використовуються при термічному аналізі для забезпечення керованого нагріву та вимірювання температури. Запропоновано методи компенсації впливу опорів ліній зв'язку, лінеаризації функції перетворення терморезистивних сенсорів, а також підвищення їх швидкодії.

У третьому розділі розглянуто принципи реалізації функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на транзисторних структурах. Показано, що ефективна реалізація таких сенсорів передбачає використання імпульсних циклічних режимів керування транзисторними структурами первинного перетворювача. Запропоновано принципи функціонування та проведено параметричний аналіз кіл керування, які забезпечують керований нагрів та вимірювання температури. Розглянуто питання рівномірності розподілу струмів та проаналізовано температурні залежності широкого ряду

транзисторних структур: біполярних та польових транзисторів, зокрема, мікропотужних інтегральних транзисторах та потужних транзисторах із зустрічно-смуговою топологією, мультитранзисторних матрицях, складених транзисторних структурах.

У четвертому розділі розроблено методику математичного SPICE моделювання та дослідження структур сенсорів термічного аналізу, новизною якої є можливість параметричного аналізу вимірювальних кіл з врахуванням ефекту акумуляції теплової енергії. Розроблено новий функціональний SPICE компонент – Thermicar на керованих ключах типу S(V-Switch), який може інтегруватися в електротеплові моделі вищого рівня, зокрема, SPICE схеми заміщення сенсорів термічного аналізу. Логічна функція перемикачів та перехідна характеристика вихідного кола цих ключів відображають реальні процеси накопичення, зберігання та вивільнення теплової енергії в структурі вимірювального перетворювача в процесах фазового переходу досліджуваної речовини.

П'ятий розділ присвячено аналізу температурних характеристик сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах. Показано, що нелінійність функції перетворення залежить від таких параметрів транзисторів, як коефіцієнт підсилення струму, опір областей інтегральної структури, напруги Ерлі тощо. Запропонований метод оптимізації режиму роботи сенсора різницевої температури, що передбачає розрахунок сімейств залежностей абсолютної похибки вимірювання різницевої температури при зміні в певному діапазоні параметрів елементної бази, їх режимів роботи та температури.

У шостому розділі наведено результати досліджень та особливості реалізації оптичного сенсора температури на основі рідкокристалічних матеріалів. Показано доцільність використання полімердиспергованих рідких кристалів (ПДРК) з різними спектральними характеристиками, що дозволило реалізувати можливість вимірювання температури в різних точках з використанням одного оптоволоконного тракту. Поєднання ПДРК, світловипромінювальних та фоточутливих шарів дозволило розробити функціонально-інтегрований сенсор температури, в структурі якого об'єднано джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання.

У сьомому розділі представлено результати практичної реалізації функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу. Зокрема розроблено функціонально-інтегрований термомагнітний сенсор на структурах латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором, що дозволило поєднати в єдиній інтегральній структурі три функції – вимірювання магнітного поля, керований нагрів і вимірювання температури, а також забезпечило подальшу мініатюризацію сенсора. Для забезпечення високої роздільної здатності вимірювання різницевої температури та швидкодії процесу вимірювання запропоновано рішення, що базується на сигнальному перетворювачі різницевої температури з функцією аналогового високоточного швидкодіючого інтегрування різниці температур в певному часовому

джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор

інтервалі. Розроблено функціонально-інтегрований сенсор ємнісного типу, що забезпечує керований нагрів об'єктів дослідження і дозволяє проводити як вимірювання різницевої, так і механічних зміщень та деформацій.

У висновках наведено основні результати проведених досліджень.

Найважливіші наукові результати та їх новизна

У роботі розроблено комплекс нових підходів до побудови функціонально інтегрованих мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі структур твердотільної електроніки. Новизною цих підходів є використання єдиної мікроелектронної структури перетворювача для реалізації трьох функцій: керованого нагріву досліджуваного зразка відповідно до заданого алгоритму модуляції теплового потоку; вимірювання температури чи різниці температур між досліджуваним та опорним зразками; вимірювання зміни калориметричних, термомагнітних, термооптичних та термомеханічних характеристик досліджуваного зразка в процесі модуляції його температури.

Основними науковими результатами роботи є:

1. Метод модельного SPICE дослідження мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі електротеплової аналогії, що на відміну від відомих, враховує ефект акумуляції теплової енергії при фазових переходах досліджуваної речовини. Теплова енергія при фазових переходах заміщається формальними моделями на основі R_0C_0 кіл та логічних функцій перемикання режимів роботи цих кіл.

2. Новий функціональний SPICE компонент Thermicap (термікап), що описує фазовий перехід досліджуваної сенсором речовини з використанням керованих ключів типу S(V-Switch), які використовують логічні функції «якщо ... то, інакше ...» та напруги функціональних джерел електротеплової аналогії: V_{TH} – напруга (еквівалент температури активної ділянки первинного перетворювача сенсора термічного аналізу); V_{TM} – напруга джерела, яке специфікує поріг перемикання (еквівалент температури фазового переходу); V_{CM} – напруга на конденсаторі C_M , заряд якого є функціональним аналогом накопиченої енергії фазового переходу; V_{DT} – напруга джерела, яке специфікує гістерезис перемикання.

3. Запропоновані підходи підвищення інформативності, спрощення структурно-схемної реалізації та мінімізації енергоспоживання сенсорів термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки, що базуються на синтезі теплових годографів Ліссажу з вибором частоти прямокутних імпульсів розігріву за критерієм максимально можливої модуляції форми, нахилу та девіації годографа.

4. Встановлені закономірності температурних характеристик сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах, що уможливають оптимізацію режиму їх роботи. Запропоновано критерії оцінки точності функціонування сенсорів різницевої температури на диференціальних каскадах біполярних транзисторів та метод оптимізації їх режиму роботи. Показано, що при значенні опорної напруги базових кіл транзисторів

диференціального каскаду в діапазоні від 1,2 В до 1,3 В похибка лінійної апроксимації функції вимірювального перетворення транзисторних сенсорів різницевої температури не перевищує $0,04^{\circ}\text{C}$ в діапазоні $0-100^{\circ}\text{C}$.

5. Показано, що при номінальній температурі $t_{NOM} \approx 50^{\circ}\text{C}$ похибка лінійної апроксимації сенсорів різницевої температури на диференціальних каскадах біполярних транзисторів не перевищує значення $0,025^{\circ}\text{C}$ і практично не залежить від опорної напруги. Натомість при відхиленні значення температури від номінального похибка лінійної апроксимації зростає і має виражену залежність від опорної напруги. Так, при граничних значеннях абсолютної температури $t_{MIN} = 0^{\circ}\text{C}$ та $t_{MAX} = 100^{\circ}\text{C}$ максимальне значення модуля похибки лінійної апроксимації при $U_{REF} = 1.0 \text{ В}$ збільшується до $0,3^{\circ}\text{C}$. Значення опорної напруги U_{REF} , при якому похибка апроксимації практично перестає залежати від абсолютної температури, знаходиться в діапазоні від 1,2 В до 1,3 В.

6. Встановлені закономірності реалізації магнітотранзисторних перетворювачів функціонально-інтегрованих сенсорів термомагнітного аналізу, що забезпечують формування інформативного сигналу індукції вимірюваного поля, контрольований нагрів структури з визначенням кількості теплової енергії, що виділяється в структурі під час нагріву, та вимірювання температури структури магнітотранзистора. Перевагою побудови сенсорів термомагнітного аналізу на основі структур магнітотранзисторів є мультипараметричність їх режимів роботи, зокрема, на основі модуляції напруг зміщення р-п переходів, струмів емітера та дрейфового поля в базовій області.

7. Теоретично обґрунтовано шляхи компенсації нелінійності функції перетворення та впливу опорів ліній зв'язку терморезистивних сенсорів, а також запропоновано методи покращення їх динамічних характеристик, що підвищило ефективність їх використання в сенсорах термічного аналізу при контролі технологічних процесів на місці експлуатації.

8. Вперше запропоновано оптичні системи моніторингу температури, які включають як пристрої для розподіленого вимірювання температури з використанням оптоволоконних мереж, так і функціонально-інтегровані системи на основі органічних світловипромінювальних, термо та фоточутливих структур.

Практична цінність роботи

Практична цінність роботи Бойко О.В. полягає у розробленні нових структурно-схемних рішень сенсорів термічного аналізу, зокрема функціонально-інтегрованого термомагнітного сенсора, високочутливого сенсора з функцією аналогового інтегрування, функціонально-інтегрованого сенсора ємнісного типу, а також функціонально-інтегрованого оптичного сенсора температури, які дозволили об'єднати декілька методів досліджень в одному пристрої. Запропоновані автором підходи SPICE моделювання можуть підвищити ефективність дослідження та параметричної оптимізації сенсорів термічного аналізу, перевагою яких є врахування ефекту акумуляції теплової

енергії при фазових переходах досліджуваної речовини. Практична значущість роботи підтверджена численними актами впровадження.

Обґрунтованість і достовірність одержаних наукових результатів та висновків

Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій підтверджується використанням сучасних апробованих програмних засобів та коректних методів моделювання, аналізу та експериментальних досліджень, використанням сучасної елементної бази, відповідністю результатів моделювання та отриманих експериментальних даних.

Основні результати дисертації опубліковані у провідних закордонних періодичних виданнях та фахових виданнях України, вони пройшли апробацію на профільних наукових конференціях та семінарах міжнародного рівня. Публікації автора у наукових журналах та наукових матеріалах конференцій, відображають суть виконаних досліджень та представлених в дисертації результатів.

Оцінка мови, стилю та оформлення дисертації та автореферату

Текст дисертації викладено на достатньо високому професійному рівні. Оформлення та стиль викладення матеріалів дисертації та автореферату, загалом, відповідає загальноприйнятому для наукових робіт та відповідає вимогам МОН України.

У авторефераті викладена основна суть проведених досліджень і отриманих результатів, по структурі відповідає вимогам МОН України і достатньо повно відображає дисертаційну роботу.

Зауваження щодо дисертації

1. Автор дисертації в ряді тверджень некоректно використовує поняття «точність» вимірювань – зокрема: «При цьому забезпечується точність вимірювання до $0,01^{\circ}\text{C}$ » (п.10 висновків) та «Таким чином, дводіпазонний терморезистивний сенсор температури забезпечує лінеаризацію функції перетворення з точністю $0,01\%$ в діапазоні $0 - 800^{\circ}\text{C}$.» (с.91). Натомість, в цих твердженнях більш коректно вживати термін – похибка вимірювань.
2. Занадто детально описано синтаксис програмного продукту MicroCap при дослідженні відносної температури (ст.204-205).
3. При проведенні модельних досліджень сенсора термічного аналізу з аналоговим інтегруванням вихідна напруга перетворювача різницевої температури імітується імпульсом трапецеєвидної форми. Чому обрано саме таку форму імпульсу, чи відповідає вона реальній?
4. Термін «розмиття» щодо годографа фігур Ліссажу (зокрема п. 7 висновків) не є точним та науково обґрунтованим. Більш точним терміном є «модуляція годографа інформативним сигналом».

5. У п. 13 висновків автор формулює «інтегрування різниці температур». Більш коректно вживати формулювання «інтегрування інформативних сигналів різниці температур».
6. На рис.2.15 не правильно вказано під'єднання інвертуючих та неінвертуючих входів операційного підсилювача АОЗ.
7. Автором не вказано яким саме чином була отримана модель для моделювання оптичних властивостей первинного перетворювача сенсора на основі полімердиспергованих рідких кристалів.

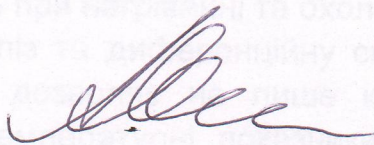
Вважаю, що вказані недоліки не впливають на якість дисертаційної роботи в цілому, і принципово не знижують основні позитивні риси роботи, достовірність роботи, їх наукову та практичну цінність.

Висновки

Дисертація "Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки" загалом представляє закінчене наукове дослідження, яке містить суттєві наукові та практичні результати. Робота виконана на високому науковому рівні із застосуванням сучасних експериментальних методів і повністю відповідає вимогам щодо докторських дисертацій (пп. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 656 від 19.08.2015, № 1159 від 30.12.2015, № 567 від 27.07.2016), а її автор Бойко Оксана Василівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Офіційний опонент:

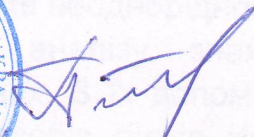
доктор технічних наук, професор,
завідувача кафедри радіотехніки
Вінницького національного
технічного університету


Осадчук Олександр Володимирович

Підпис проф. Осадчука О.В. засвідчую:

Вчений секретар
Вінницького національного
технічного університету




Осадчук Олександр Олександрович