

ВІДГУК**офіційного опонента**

**доктора технічних наук, професора Політанського Леоніда Францовича,
завідувача кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича на
дисертаційну роботу Бойко Оксани Василівни на тему:
«Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах
твердотільної електроніки», представленій на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук
за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка**

Актуальність теми дисертації

Оцінка кількісних характеристик процесів виділення та поглинання тепла є однією із основних задач як наукових досліджень так і оптимізації технологічних процесів виробництва продукції різного призначення.

Проведення досліджень в різних галузях науки і техніки вимагає подальшої мініатюризації сенсорів термічного аналізу та проведення їх функціонального інтегрування, що передбачає поєднання декількох методів в єдиний комплекс, оскільки використання окремих термоаналітичних методів при дослідженні нових матеріалів не надає повної інформації про їх поведінку та властивості. Розвиток функціональних інтегрованих методів досліджень базується на поєднанні термічних, оптичних та механічних методів дослідження. Третім напрямком сенсоріки, що базується на структурах твердотільної електроніки є вирішення проблеми підвищення параметрів аналогового фронтенду сенсорів, що забезпечують взаємодію цифрової мережі Інтернет з фізичним світом.

Актуальність дисертаційних досліджень підтверджується також зв'язком роботи з науковими програмами та темами, що виконувались на кафедрі електронних приладів Національного університету «Львівська політехніка».

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертаційної роботи підтверджена узгодженням теоретичних і експериментальних результатів, а також використанням методів аналізу та синтезу електричних кіл. При оцінюванні ефективності математичного і імітаційного моделювання використовувалися статистичне опрацювання експериментальних досліджень та основні положення теорії похибок вимірювань. Для синтезу сенсорів термічного аналізу використовувалися математичне та імітаційне моделювання елементів сигнальних перетворювачів. Вище викладете дозволяє вважати, що положення дисертації є обґрунтованими, а отримані результати – достовірними.

Новизна наукових положень, повнота їх викладу в опублікованих працях

Наукове значення, структура і змістове наповнення дисертації як науково-практичного дослідження визначається сформованою на підставі визначеного автором предмету дослідження засобів термічного аналізу на базі мікро та оптоелектронних функціонально інтегрованих сенсорів теплових величин, що базується на структурах твердотільної електроніки.

У дисертаційній роботі автором розв'язана низка завдань, необхідних для досягнення поставленої мети:

1. Запропоновані та реалізовані нові методи побудови твердотільних мікроелектронних сенсорів термічного аналізу з функціональним інтегруванням процесу керованого нагріву досліджуваних об'єктів, вимірювання температури та зміни їх калориметричних, термомагнітних, термооптичних, термомеханічних та термоімпедансних характеристик.

2. Вперше запропонований метод SPISE дослідження та параметричного аналізу мікроелектронних сенсорів термічного аналізу на основі електротеплової аналогії, що на відміну від відомих враховує ефект акумуляції теплової енергії при фазових переходах досліджуваної речовини. Модельне представлення ефекту акумуляції базується на запропонованому автором функціональному компоненті SPISE моделювання сигналів в сенсорах термічного аналізу – Thermisar, що базується на логічних функціях керованих ключів.

3. Вперше на основі синтезу теплових годографів Ліссажу, які отримують співставленням амплітудно-фазових характеристик напруги (функціональний аналог температури) та струму (функціональний аналог теплового потоку), встановлено можливість підвищення інформативності, спрощення структурно-схемної реалізації та мінімізації енергоспоживання сенсорів термічного аналізу, що досягається підбором частоти прямокутних імпульсів розігріву за критерієм максимально можливої модуляції форми, нахилу та девіації годографа.

4. Вперше запропоновано критерії оцінки точності функціонування сенсорів різницевої температури на транзисторних каскадах та встановлені закономірності температурних характеристик, що уможливорює оптимізацію режимів їх роботи.

5. Набули подальшого розвитку методи формування інформативних сигналів в магнітотранзисторних перетворювачах функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу, що базуються на модуляції струму емітера та перемиканні режимів роботи р-п переходів магнітотранзисторної структури. Це дозволило реалізувати однокомпонентні термомагнітні сенсори з функцією

вимірювання магнітного поля, керованого «in-situ» нагрівання та вимірювання температури.

6. Вперше запропоновано систему моніторингу температури з рознесенням в просторі точок вимірювання на основі рідкокристалічних полімер-диспергованих первинних перетворювачів, що забезпечується використанням рідкокристалічних матеріалів з різними температурними залежностями максимуму селективного відбивання, що уможливорює використання одного оптичного каналу для вимірювання температури.

7. Вперше синтезовано структуру функціонально-інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, яка на відміну від відомих поєднує джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання.

Практичне значення одержаних результатів

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень наступні практичні результати:

1. Розроблено практичні рекомендації щодо реалізації сигнальних перетворювачів функціонально-інтегрованих сенсорів термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки, що відповідають критеріям та вимогам мікроелектронних пристроїв Інтернету речей: однополярне низьковольтне живлення (3 – 5 В), мінімальне енергоспоживання (10^{-5} – 10^{-2} Вт), функціонування в широкому діапазоні входних та вихідних напруг (rail-to-rail режими роботи), універсальність та стабільність функціонування при зміні зовнішніх впливів.

2. Розроблено функціонально-інтегрований термомагнітний сенсор на базі інтегральних структур латеральних магнітотранзисторів з розщепленим колектором, що забезпечує інтегрування в єдиній структурі трьох функцій – вимірювання магнітного поля, керованого нагріву та вимірювання температури. Запропоноване рішення забезпечує подальшу мініатюризацію сенсорів та уможливорює проведення «in-situ» вимірювань однокомпонентним функціонально-інтегрованим сенсором. Запропоновано схемне рішення щодо переходу від двополярних сигналів в магнітотранзисторних сенсорах до ефективнішого однополярного вихідного сигналу, що забезпечує високу енергоефективність сучасних сенсорних пристроїв з низьковольтним однополярним живленням, зокрема Інтернету Речей. Реалізація сигнального перетворювача здійснена на базі модуля CY8CKIT-059 PSoC 5LP Prototyping Kit.

3. Розроблено сигнальний перетворювач функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу ємнісного типу, що характеризується високими значеннями роздільної здатності вимірювання температури (не гірше $0,001^{\circ}\text{C}$) та електричної ємності (не гірше 10^{-16} Ф), що забезпечує можливість вимірювання

температурної деформації досліджуваного об'єкта. Пріоритетними областями застосування таких функціонально інтегрованих сенсорів є термомеханічний, дилатометричний та термогравіметричний аналіз. Сигнальний перетворювач ємнісного типу базується на високопрецизійному 24-бітному конвертері AD7747 (24-Bit Capacitance-to-Digital Converter) компанії Analog Devices.

4. Вдосконалено вимірювальні терморезистивні перетворювачі типу ЕП4701АС і ЕП4703АС, що виготовляються ПрАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні», м. Львів, шляхом лінеаризації функції перетворення.

5. Запропонований метод і схемотехнічні рішення компенсації впливу температури вільних кінців термоелектричних перетворювачів на основі плівкової технології використано при модернізації термоелектричних перетворювачів ЕП4700АС і ЕП4702АС в ПрАТ «СКБ мікроелектроніки в приладобудуванні» та в схемах компенсації температурної зміни електрорушійної сили нормальних термостатованих елементів типу Х488/1-4 (ПрАТ "Мікроприлад").

6. Запропоновано конструктивні рішення функціонально інтегрованого сенсора температури на основі органічних світловипромінювальних та фоточутливих матеріалів, де в одній структурі об'єднано джерело випромінювання, оптично-активне середовище та детектор випромінювання. Структури такого типу можуть бути використані як самостійний сенсор температури або як елемент сенсора термічного аналізу для вимірювання температури досліджуваного та опорного зразків. Це уможливило проведення високоточного вимірювання різниці температури у вузькому діапазоні, що є особливо актуальним при проведенні медико-біологічних досліджень.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Обґрунтованість та вірогідність викладених у дисертації наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджуються використанням апробованого, математичного апарату, методів моделювання та виконання розрахунків; кореляцією результатів моделювання та експериментальних досліджень, їх узгодженістю з існуючими результатами та порівняльним аналізом результатів дисертаційних досліджень із даними літературних джерел.

Повнота викладу результатів досліджень у опублікованих працях

Усі наукові положення повністю викладені в наукових працях, опублікованих в одній монографії; фахових виданнях України (15 статей) та у 7 статтях, що входять до науково-періодичних видань інших держав та видань включених до міжнародних наукометричних баз Scopus Web of Science і п'яти патентах України

Аналіз публікацій засвідчує, що вони відображають зміст усіх розділів дисертаційної роботи та їх працях, що опубліковані в збірниках тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Недоліки та зауваження щодо роботи

1. В роботі не розглянуто питання впливу теплового опору сенсора на різницю температур сенсора та досліджуваного середовища.
2. Не зрозуміло чим обґрунтований вибір номінальної температури $t_{\text{НОМ}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Чому саме при відхиленнях значень температури рівних $+5^\circ\text{C}$ та -5°C значення похибки апроксимації дорівнює нулю. Доцільно було б дослідити поведінку цієї похибки в досліджуваному діапазоні $0 \dots 100^\circ\text{C}$.
3. Виникає питання яким чином здійснювати вимірювання в діапазоні від'ємних значень температур.
4. Приведені на рис.3.11 (с.134) дисертаційної роботи залежності спаду напруги від температури є лінійними, тому значення dV/dt не повинно залежати від температури при всіх значеннях струмів емітера.
5. Приведені на рис.3.14 а) залежності $I(V_E)$ від I_{CONTR} є лінійними, а отже значення передавальної функції $K_I = I(V_E)/I(I_{\text{CONTR}})$ є тангенсом кута нахилу прямолінійних залежностей і не залежить від I_{CONTR} . Теж саме стосується залежностей, наведених на рис.3.15, 3.16. (стор.137-138).
6. На стор. 143 (рис.3.23) зазначена залежність потужності розігріву транзистора $P(Q1)$ та опорного резистора $P(R)$ від опорної напруги. Більш коректним буде не потужність розігріву, а розсіювана потужність.
7. Стор.162 (рис.4.9; 4.10) не зрозуміло, в яких одиницях приведені значення по осі абсцис.
8. Із дисертації не зрозуміло, що значить термін абсолютна температура.
9. У табл.4.3 (стор. 176 дисертації) зазначені значення опору ключів у відкритому стані 10^{12} Ом, а в закритому 1 Ом, що очевидно можна вважати опискою.
10. У роботі мають місце окремі граматичні та стилістичні помилки.

Загальна оцінка дисертаційної роботи

Подана до захисту дисертаційна робота Бойко Оксани Василівни «Функціонально-інтегровані сенсори термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук є завершеною науково-дослідною роботою, що виконана на високому науковому рівні.

В роботі отримані нові науково-технічні результати, що вирішують актуальну і важливу науково-прикладну задачу розроблення функціонально інтегрованих сенсорів термічного аналізу.

В роботі проведений ґрунтовний аналіз методів термічного аналізу. Пошукувачем вдало застосоване сучасне програмне забезпечення при моделюванні процесів що протікають у функціонально інтегрованих сенсорах термічного аналізу на структурах твердотільної електроніки.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог науково-технічних текстів, матеріали дисертації викладені логічно та послідовно. Незначні граматичні та стилістичні помилки в цілому не псують загального позитивного враження про роботу.

Текст автореферату і висновки повністю відображають зміст та результати досліджень, що наведені в дисертації. Основні результати роботи відображені в опублікованих наукових працях автора.

За актуальністю, новизною, практичною значимістю, обсягом і рівнем публікацій дисертація відповідає вимогам чинного положення про “Про порядок присудження наукових ступенів”, затвердженим Кабінетом Міністрів України (постанова № 567 від 24.07.2013 року), а її автор Бойко Оксана Василівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

Офіційний опонент

завідувач кафедри
радіотехніки та інформаційної безпеки
Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича,
д. т. н., професор

 Політанський Л. Ф.

Підписи Політанського Л. Ф.

засвідчую

Учений секретар

Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича





Якубовська Н. О.