

## ВІДЗИВ

офіційного опонента на дисертаційну роботу  
**Крайовського Володимира Ярославовича**  
**«Розвиток фізичних умов термометрії із застосуванням нових чутливих елементів термоперетворювачів»,**

подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка)

Температурні вимірювання є одними із найбільш поширених видів вимірювання. За оцінками експертів вони складають біля 30% від загального вимірювального об'єма. Характерною особливістю термометрії є необхідність вимірювань найвищої точності, на рівні еталонних, оскільки тільки це гарантує якість як відповідних процесів і виробів.

Напівпровідникові термоперетворювачі є дуже перспективними термоелементами, зважаючи на їх чутливість, швидкодію та компактність. Разом з тим, цілий ряд фізичних процесів все ще не вивчений і тому дисертаційна робота Крайовського В.Я. присвячена розгляду фізичних основ термоперетворювачів є актуальною.

Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків, списку використаної літератури та п'яти додатків.

В першому розділі автор розглядає проблему розширення динамічного діапазона напівпровідникових термоперетворювачів. Оскільки результати моделювання кінетичних характеристик чутливих елементів суттєво відрізняється від результатів експериментальних вимірювань, дисертантом запропонований метод ітераційного моделювання, який дозволяє поєднувати моделювання з урахуванням результатів температурних залежностей.

Цілком зрозуміло, що проблема розширення температурного діапазона не може бути вирішена без розуміння фізичних основ напівпровідникових чутливих елементів, яке досягається через математичне моделювання і експериментальні дослідження.

В другому розділі проведені теоретичні та експериментальні дослідження енергетичних та кінетичних характеристик чутливих елементів термоперетворювачів.

Використовуючи варіаційний метод Рітца рівняння Шредінгера було переведено в алгебраїчну задачу на власні значення та власні функції. Програмний підхід використано для візуалізації електронної густини, а також функції локалізації електрона. Експериментально досліджені температурні залежності опору та коефіцієнта термо-ерс. Широко використані сучасні

експериментальні засоби: дифрактометри, електронні мікроскопи. У третьому розділі розглянуто механізм формування структури чутливих елементів термоперетворювачів.

Запропонована дисертантом феноменологічна модель електронної структури пояснює механізм утворення фундаментального енергетичного параметра напівпровідникового термометричного матеріалу – ширини забороненої зони. Це дає змогу моделювати та отримувати чутливі елементи термоперетворювачів з наперед заданими властивостями; пояснює стабільність енергетичних та кінетичних характеристик новітніх термометричних матеріалів.

У четвертому розділі проведено моделювання та експериментальні дослідження новітніх термометричних матеріалів, отриманих легуванням атомами Tm, Yr, Er, Lu та Ru.

Саме комплексні дослідження структурних, енергетичних, кінетичних та магнітних характеристик чутливих елементів дали змогу встановити умови, за яких кінетичні характеристики чутливих елементів дали змогу встановити умови, за яких кінетичні характеристики чутливих елементів є прогнозованими та стабільним до температурних та часових змін.

Були отримані термоелектричні перетворювачі з високою чутливістю і забезпечують стабільні характеристики за температур 4,2÷1300 К.

Показання, що після 25 термоциклів значення температури, отримані з вимірювань опору та термо-ерс чутливих елементів перетворювачів, є стабільними у межах  $\pm 0,05$  К ( $\pm 0,06$ К).

У п'ятому розділі представлено результати моделювання та експериментальні дослідження лінійки чутливих елементів перетворювачів із застосуванням новітніх термометричних матеріалів, отриманих легуванням атомами Dy, Y, Co, Cu та Ga. При цьому встановлені умови, за яких їхні кінетичні характеристики є прогнозованими та стабільними до температурних та часових змін. Отримані чутливі елементи термоперетворювачів новітніх термометричних матеріалів мають високу чутливість. Температурний коефіцієнт опору (ТКО) чутливих елементів термометрів опору є більш від ТКО металів однак поступається ТКО напівпровідникових термометрів, які, втім, не можуть забезпечити однозначні та стабільні термометричні характеристики у діапазоні:  $T=4,2\div 1300$ К. Після 21 циклу значення температур отримані з вимірювань опору та термо-ерс чутливих елементів є стабільними у межах  $\pm 0,02$  ( $\pm 0,03$ ).

У шостому розділі розглянуті результати моделювання та експериментальні дослідження термоперетворювачів із застосуванням новітніх термоелектричних матеріалів, отриманих легуванням атомами Se, V,

Rh та Ga. Представлено результати дослідження чутливих елементів термометричних матеріалів на  $ZrNi_{1-x}Rh_xSn$ .

В результативному плані відмітимо найбільш суттєві результати, одержані в дисертації.

Розроблена концепція моделювання та отримання чутливих елементів засобів вимірювання температури на основі новітніх термометричних матеріалів.

Впровадження даного методу дає можливість підвищити ефективність моделювання термометричних характеристик чутливих елементів.

Запропонована феноменологічна модель електронної структури термоперетворювача, яка пояснює механізм утворення фундаментального енергетичного параметра- ширини забороненої зони.

Встановлені функції перетворення чутливих елементів на основі новітніх термометричних матеріалів у температурному діапазоні  $4,2 \div 1300K$  з покращеними метрологічними характеристиками.

Розвинута методика отримання лінійки термічно стабільних чутливих елементів електрорезистивних термометрів з новітніх термометричних матеріалів, які мають високу точність і широкий динамічний діапазон вимірювань.

Використання сучасних методів теоретичної та експериментальної фізики, комп'ютерного моделювання структури та характеристик чутливих елементів термоперетворювачів, а також високоточних засобів вимірювання в поєднанні з вимірюваннями у провідних наукових центрах свідчать про достовірність одержаних результатів дисертаційного дослідження.

Результати дисертаційної роботи широко висвітлені в публікаціях у міжнародних та вітчизняних періодичних фахових виданнях, з яких 6 статей індексується Web of Science (ESCI), 9 – Scopus, 10 – Copernicus. Основні положення та результати роботи обговорено на профільних наукових конференціях.

Наукові праці Крайовського В.Я. добре відомі спеціалістам як у Україні, так і за кордоном. Він користується авторитетом в наукових колах.

До недоліків дисертаційної роботи необхідно віднести наступне:

1. Незрозуміло чому нижня границя температурного діапазона розроблених чутливих елементів термоперетворювачів обмежується величиною 4,2 К. Вимірювання температури в області менше 4,2 К є важливим і нетривіальними.
2. В дисертації не приділено достатній увазі дослідженню відтворюваності характеристик напівпровідникових термоперетворювачів, що є актуальним.

3. Використовуючи теоретичні методи дослідження, дисертант не вказує на їх точність і можливості відхилення від реальної фізичної ситуації, тобто ступінь наближення.

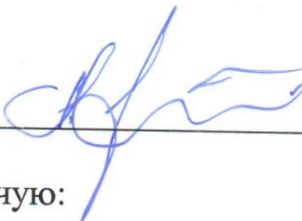
4. В роботі проводиться оцінка похибок вимірювання, хоча більш сучасний підхід полягає у визначенні бюджету невизначеностей.

5. При викладанні матеріалу в тексті трапляються нечіткі формулювання. Так, наприклад, на сторінці 63 пункт 4 сформульований таким чином «Результати досліджень . . . не відповідають результатам експериментальних досліджень». Використовується застарілий термін «термопара» замість термоелектричний перетворювач. Є окремі описки і помилки.

Проте незважаючи на вказані недоліки, за рівнем одержаних результатів і їх важливістю для практичного використання дисертаційна робота Крайовського Володимира Ярославовича «Розвиток фізичних умов термометрії із застосуванням нових чутливих елементів термоперетворювачів» відповідає вимогам пунктів 9, 10, 12 - 14 «Порядку присудження наукових ступенів щодо докторських дисертацій, затверджених постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013р.» №567 (зі змінами), діючих на сьогодні пунктам наказів Міністерства освіти і науки, молоді і спорту України, «Про опублікування результатів дисертації на здобуття ступеней доктора і кандидата наук від 17.10.2012 р., №1112 і від 03.12.2013 р. №1380, а її автор Крайовський В.Я. заслуговує на присудження йому ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.04 - прилади та методи вимірювання теплових величин (152 – метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка).

### **Офіційний опонент**

**головний науковий співробітник  
Національного наукового центру  
«Інститут метрології»  
Мінекономрозвитку України,  
лауреат державної премії України  
в галузі науки та техніки,  
доктор технічних наук, професор**



**Л.А. Назаренко**

Підпис професора Назаренка Л.А. засвідчую:

**Учений секретар  
Національного наукового центру  
«Інститут метрології»  
Мінекономрозвитку України,  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник**



**В.В. Скляров**