

УДК 541.64+539.2

В.В. Ковальчук, д.ф.-м.н.
В.Д. Богун
А.М. Кліменко
В.Сухоруков

БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИЙ ФОТОПРИЙМАЧ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Одеський державний інститут вимірювальної техніки, lslvv@rambler.ru, odivt@mail.ru

У роботі проведено порівняльний аналіз характеристик та конструктивні особливості пірометрів, розраховані їх параметри, надано метрологічне забезпечення засобом безконтактного вимірювання температури.

Ключові слова: *пірометр, фотоприймач, температура, контроль.*

Вступ

Пірометри – безконтактні вимірювачі температури і сьогодні залишаються важливими елементами ланцюгів контролю та управління в різних галузях промисловості – металургійній, машинобудівній, електронній, хімічній, медико-біологічній [1-3]. Використання сучасної елементної бази, на рівні нанотехнологій [4], істотно розширило можливості цих приладів і дозволило наділити їх новими властивостями. Крім проведення вимірювань пірометри дозволяють обробити отриману інформацію і, навіть, здійснювати управління технологічним процесом. Завдяки нанотехнологіям [5], знизилася їх вага, зменшилися габарити, прилади стали більш зручними в експлуатації. Сьогодні цим приладам немає альтернативи у процесі визначення температурного поля не лише для тіл, що знаходяться у важкодоступних, або небезпечно розташованих місцях, а також і в наносистемах [6].

Постановка задачі

Саме означені вище особливості вказують на актуальність порушеної у статті теми та мети, що орієнтована на дослідження та визначення ефективних методів дистанційного контролю та вимірювання температури об'єкта нанометрового геометричного діапазону. Згідно до мети роботи вирішувалися наступні задачі: проаналізувати характеристики сучасних пірометрів, порівняти їх конструктивні особливості та сучасне метрологічне забезпечення.

Викладання основного матеріалу

Використання сучасної елементної бази істотно розширило можливості цих приладів і дозволило наділити їх новими властивостями – окрім виміру вони можуть тепер проводити обробку отриманої інформації і здійснювати складні дії з управління нанотехнологічним процесом [6]. Знизилася їх вага, зменшилися габарити, прилади стали простішими і зручнішими в експлуатації. Все це виявилось можливим завдяки вживанню в приладах нової елементної бази, що включає мікропроцесори на основі кластеризованих гетероструктур [7,8].

Випромінювальні властивості об'єкту визначаються властивостями матеріалу, чистотою обробки поверхні, кольором його поверхні. Типові значення випромінювальної здатності багатьох матеріалів відносно еталону [9-11], що дозволяє стати інфрачервоним термометрам надійними, зручними, а іноді і незамінними засобами вимірювання в широкому спектрі використання – від лабораторних експериментів в наукових дослідженнях і медичної практики до моніторингу і неруйнівного контролю параметрів виробничого процесу в реальному часі в різних галузях промисловості [12-14].

Отже, далі наведемо процедуру розрахунку параметрів багатоспектральних поляризаційно-чутливих фотоприймачів, що можуть бути використані для підвищення точності виміру температури підкладки (наприклад, з металу) в зоні взаємодії з лазерним випромінюванням в умовах екранування плазмовим факелом. Для цього пропонується поляризаційна фільтрація теплового випромінювання за допомогою багатоспектрального пірометра структурна схема якого наведена на рис.1.

Лазерне випромінювання 2, що генерується установкою 1 проходить через оптичну систему 3 і потрапляє в технологічну зону обробки металу 4 деталі 5, яка екранується плазмовим

факелом 6. Випромінювання поверхні металу і факела 7 прямує на вхід спектрального приладу 11, і далі розкладається на монохроматичні компоненти, які потрапляють на поляризаційно-чутливі фотоприймачі. У пристрої обробки, що складається з диспергуючого елементу 8, фотоприймачів 9, підкладки 12, пристрої обробки інформації 10, відбувається виділення спектральних складових випромінювання металу не менше чим трьох довжин хвиль, згідно з розробленим алгоритмом, відповідним математичній моделі:

$$\varphi_{Mi}(\lambda_i, T) = \varphi_{\Sigma i} \cdot \frac{P_{\Sigma i}}{P_M} \quad (1)$$

де $\varphi_{Mi}(\lambda_i, T)$ – спектральна густина власного випромінювання металу, що відповідає i -й довжині хвилі спектру випромінювання λ_i ; $\varphi_{\Sigma i}$ – спектральна густина випромінювання із зони обробки; P_M – міра поляризації власного випромінювання металу – визначається за відомими показниками заломлення і поглинання в робочому діапазоні температур; $P_{\Sigma i}$ – міра поляризації випромінювання із зони обробки:

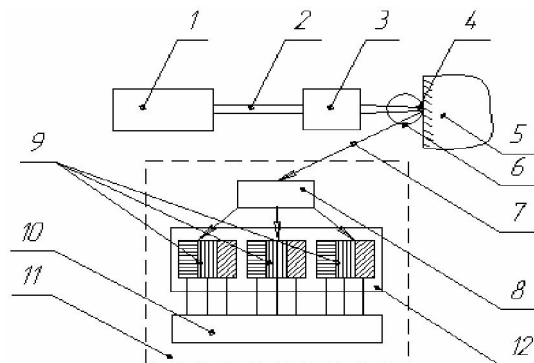


Рис.1. Структурна схема багатоспектрального пірометра.

$$P_M = \frac{\sqrt{2 \cdot \varphi_{45}^2 \cdot \varphi_0^2 + 2 \cdot \varphi_{45}^2 \cdot \varphi_{90}^2 + 4 \cdot \varphi_0 \cdot \varphi_{90} \cdot (\varphi_0 \cdot \varphi_{90} - \varphi_0 \cdot \varphi_{45} - \varphi_{90} \cdot \varphi_{45})}}{\varphi_{45} \cdot (\varphi_0 + \varphi_{90})}, \quad (2)$$

де φ_{90} , φ_{45} , φ_0 , - спектральна густина випромінювання із зони обробки, площа поляризації яких орієнтована відносно нерухомої системи координат поляризаційно-чутливого фотоприймача відповідно на кути 90° , 45° , 0° . Геометричний розмір клину розраховують за заданими розмірами площини фотоприймача та діапазоном довжин хвиль з урахуванням обмежень.

Проведені дослідження довели, що температура матеріалу в зоні обробки знаходиться у межах $700 - 1400^\circ\text{C}$, що відповідає максимальній довжині хвилі випромінювання в діапазоні $2 - 3,7$ мкм, яка належить смузі прозорості певних матеріалів. Виготовлення поляризаційно-чутливих фотоприймачів на одній підкладці є складним нанотехнологічним завданням вирішення якого ґрунтується на врахуванні квантово-розмірних ефектів [5].

Технологічна конструкція фотоприймача повинна містити підкладку, три фоточутливі майданчики, перед кожною з яких встановлений плівковий поляризатор, причому площа щодо проведення аналізу поляризаторів орієнтована під кутом 45° один до одного. Використовуючи такий фотоприймач, можна визначити міру лінійної поляризації випромінювання, з невідомою орієнтацією площини поляризації випромінювання. Конструктивна схема такого пристрою фотоприймача наведена на рис.2.

На підкладці 1, що виконана, наприклад, з Ge завтовшки $0,8$ мм, вирізують паралельно один до одного з кроком $0,6$ мм чотири пази 2 шириною $0,3$ мм. На бічні та лицьові поверхні пазів 2 хімічним дорогою наносять шар міді 5, що екранує чутливий елемент від випромінювання, що проходить через сусідні поляризатори. У пази вклеюються епоксидним компаундом 3 фоточутливі елементи 4, при цьому фоточутливі майданчики утворюють лінійку. На фоточутливі елементи, до виступів підкладки 1 приклеюються епоксидним компаундом поляризатори 6, плоскість аналізу яких орієнтована під кутом 0° , 90° , 45° , або 0° , 90° , 45° відносно лінійки. Використання трьох елементного фотоприймача з поляризаторами, встановленими під кутом 0° , 90° , 45° відносно чутливих майданчиків, дозволяє визначити міру та азимут поляризації. Проведені дослідження показують можливість створення трьохспектрального поляризаційно-чутливого пірометра на одному кристалі фоточутливого шару. Поляризаційна фільтрація виключає вплив випромінювання плазмового факела на точність розрахунку реальної температури. Оптимізовані параметри фотоприймача багатоспектрального пірометра для розкладання власного теплового випромінювання матеріалу по спектру.

Проаналізуємо проблеми щодо використання безконтактних методів виміру температури у рефрені нанометрології.

З метою зменшення впливу збурюючих чинників, можна запропонувати безконтактний вимір температури не в точці нагріву, а на деякій відстані r від неї, а потім отриманий результат перераховувати в дійсну температуру нагріву. При цьому можна уникнути проблем, пов'язаних з неоднозначною залежністю температури від яскравості, оскільки в точці вимірювання коефіцієнт випромінювання досить стабільний внаслідок відносно невисокої температури. Принцип дії «зміщеного вимірювача» температури представлений у роботі [15].

На експериментальній установці було проведено дослідження радіометричного контролю температури в широкому діапазоні температур при локальній електроннопроменевої дії на цирконієві матеріали. Відзначимо, що у порівняно низьких температурах ($T < 600^\circ\text{C}$) свідчення піроелектричного ІЧ радіометра $U_{\text{пир}}$ при $3 < l < 30$ мм слабо залежать від відстані l до місця нагріву. Враховуючи добре згашування видимого випромінювання фотоприймачем ПМ-4, можна передбачити, що залежність характеристик $U_{\text{пир}} = f(T)$ при високих температурах від відстані до місця нагріву ($l < 12$ мм) обумовлено в основному двома чинниками: суттєвим градієнтом температур поблизу точки нагріву і дифракційним внеском діафрагмованої оптики, що виявляється поза основною зоною діаграми спрямованості.

При малих відстанях l між точкою нагріву і точкою виміру температури погрішність db має відємну величину і зростає зі зменшенням відстані (за абсолютною величиною) до $1,5 \div 2\%$. Оскільки зі зменшенням відстані l через дифракційні бічні пелюстки приймається випромінювання від областей об'єкту набагато «холодніших», аніж об'єкт в геометрооптичному полі зору. При великих відстанях l між точкою нагріву і точкою виміру температури погрішність db прямує до нуля, оскільки з видаленням від точки нагріву різниця яскравості поля зору і фону зменшується (внаслідок зменшення модуля градієнта температури).

Таким чином, враховуючи ці особливості локального нагріву, складну залежність випромінювальної здатності від температури, а також неідеальність направлених властивостей оптики, доцільно зміщувати точку виміру температури пірометром на відстань $\Delta l \geq R$, де R – радіус поля зору прилада в площині об'єкту з урахуванням дифракційного внеску.

Для використовуваного піроелектричного радіометра залежність відгуку від температури набуває монотонного і передбаченого вигляду при $R \gg 6$ мм (що збігається з радіусом поля зору, отриманому при оптичному тестуванні діафрагмованої оптики пірометра).

Наведемо методику обчислень потенційної точності вимірювання температури, оцінювання реальної чутливості піроелектричного приймача, визначивши джерела інструментальних похибок діафрагмованого піроелектричного ІЧ радіометра і обґрунтуємо способи їх зменшення. Теоретично можна довести, що потенціальна чутливість піроелектричних датчиків є дуже високою, і за їх допомогою можна вимірювати температури з точністю $\Delta T_{\text{min}} \approx 3 \cdot 10^{-7} \text{ K}$. Використання в пірометрі підсилювального пристрою, що має власні шуми, погіршує його реальну чутливість. Це пов'язано з недостатньо високою чутливістю піродатчиків.

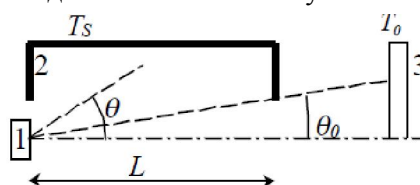


Рис 3. Ілюстрація впливу температури оптичної системи на відгук приймача

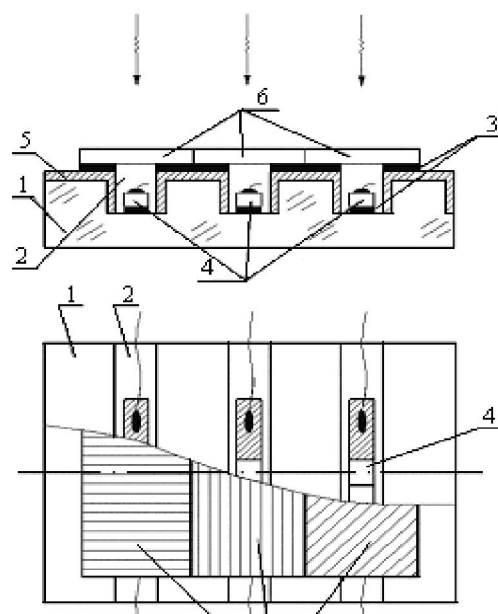


Рис 2. Конструктивна схема фотоприймального пристрою

Похибку, яку вносить часткова невизначеність температури стінок оптичної системи (рис.3) можна оцінити за співвідношенням:

$$\Omega_0 = 2\pi \cdot \int_0^{\theta_0} \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot d\theta = \pi \sin^2 \theta_0, \quad \Omega_S = 2\pi \cdot \int_{\theta_0}^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta \cdot d\theta = \pi \cdot \cos^2 \theta_0 \quad (3)$$

Оскільки приймач є приймачем повного випромінювання, то потужність теплового випромінювання, що приймається від об'єкту і стінки, відповідно рівні:

$$P_0 = A\varepsilon\Omega_0 T_0^4, \quad P_S = A\varepsilon_S\Omega_S T_S^4. \quad A = const, \quad (4)$$

де ε – коефіцієнт випромінювання об'єкту, ε_S – коефіцієнт випромінювання стінки. При вимірах відгук приймача визначається сумарною прийнятою енергією, тобто $P_0 + P_S$.

Причому розрізнити дію цих два доданків не можна, оскільки і те, і інше однакове промодульовано. Якщо T_0 постійно, то при зміні температури стінки T_S маємо дію на приймач $P_0 + (P_S + \Delta P_S)$, що помилково інтерпретується радіометром як $(P_0 + \Delta P_0) + P_S$, де $\Delta P_0 = \Delta P_S$. Абсолютна зміна виміряного значення T_{OI} температури об'єкту рівно (за умови $T_0 = const$).

$$\Delta T_{OI} = \Delta T_S \frac{\Delta T_0}{\Delta T_S} = \Delta T_S \frac{\Delta T_0}{\Delta T_S} \cdot \frac{\Delta P_S}{\Delta P_0} \rightarrow \frac{\frac{dP_S}{dT_S} \Delta T_S}{\frac{dP_0}{dT_0}}. \quad (5)$$

Відповідно, відносна погрішність δT_{OI} , обумовлена дрейфом T_S , з урахуванням (5) дорівнює:

$$\delta T_{OI} = \frac{\Delta T_{OI}}{T_0} = \frac{\frac{dP_S}{dT_S} \Delta T_S}{\frac{dP_0}{dT_0} \cdot T_0} = \frac{4A\varepsilon_S\Omega_S T_S^3}{4A\varepsilon\Omega_0 T_0^3} \cdot \frac{\Delta T_S}{T_0} = \cot \theta_0 \frac{\varepsilon_S T_S^3 \Delta T_S}{\varepsilon T_0^4} \quad (6)$$

З рівняння (6) видно, що похибка є близькою до нуля без якої-небудь компенсації в наступних випадках: 1) $\theta_0 \rightarrow \pi/2$. Діафрагмованої оптичної системи немає, об'єкт займає весь напівпростір перед приймачем; 2) $\varepsilon_S \rightarrow 0$. Коефіцієнт віддзеркалення внутрішньої поверхні оптичної системи дорівнює 1; 3) $T_S \rightarrow 0$. Оптична система охолоджена до абсолютного нуля; 4) $\Delta T_S \rightarrow 0$. Оптична система термостатована; 5) $\varepsilon T_0^4 \gg (\cot^2 \theta_0 \varepsilon_S T_S^3 \Delta T_S)$. Температура об'єкту досить велика. Випадки 1 і 2 неприйнятні для дистанційних вимірів, 3 і 4 – володіють високою складністю реалізації, 5 – має місце лише за певних умов.

Нестабільність швидкості обертання об'єкта виявляється як у вигляді повільних відходів частоти з характерним часом $t > 1$ сек., так і короткочасних відхилень миттєвої частоти від середнього значення. Відповідні нестабільності приводять до появи як систематичної помилки, що спотворює середнє значення виміряної температури, так і випадкової помилки, що збільшує дисперсію. Аналіз показує, що повільні відходи частоти при частотах модуляції $F = 10 \div 20$ Гц дають помилку в одиниці відсотків, що зменшується при збільшенні постійною часу τ_0 . Проте при певному співвідношенні між частотою модуляції F і постійною часу τ_0 систематична помилка може бути усунена.

Під короткочасною частотною нестабільністю розуміємо випадкові флуктуації частоти обертання механічного модулятора, що приводять до тимчасового розузгодження сигналу і опорних імпульсів, що подаються на синхронний детектор (рис.4).

Характерний час таких флуктуацій істотно менше часу усереднювання 1 сек.

Флуктуаційна помилка, викликана короткочасною нестабільністю швидкістю обертання модулятора, залежить як від відносної нестабільності σ/Θ , так і від величини різниці $T_1 - T_0$. Це обставина при великій величині різниці $T_1 - T_0$ пред'являє вельми жорсткі вимоги до стабільності швидкості обертання модулятора.

Запропоновано компенсувати цю погрішність за допомогою ланцюгів, що коректують. Обчислюючи коефіцієнт частотної чутливості піродатчика і ланцюгу, що коректує, знаходимо, що відносна залежність всього ланцюга матиме вигляд:

$$\Psi_D = \frac{1}{|k_0|} \cdot \frac{d|k_1|}{d\omega} = \frac{1}{\omega} - \frac{2\omega^2\tau^3}{1+(\omega\tau)^2}, \quad (7)$$

$$\Psi_0 = \frac{1}{|k_0|} \cdot \frac{d|k_0|}{d\omega} = \frac{2\omega\tau_0}{1+(\omega\tau_0)^2}, \quad (8)$$

де $k_1(\omega)$ - частотний коефіцієнт передачі піродатчика; $k_0(\omega)$ - частотний коефіцієнт передачі коректуючої ланцюга; $\tau(\omega)$ - постійна часу піродатчика, $\tau_0(\omega)$ - постійна часу ланцюга.

Необхідна частотна компенсація буде забезпечена якщо $\psi = 0$, тобто: $\Psi_D + \Psi_0 = 0$ (9)

Отже, виходячи з умови (2.9) постійна часу компенсуючого ланцюга буде дорівнювати:

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{\Psi_D}{2\omega - \Psi_D\omega^2}}, \quad (10)$$

Як було відмічено вищим, нестабільність частоти модуляції і флуктуації фази можуть привести до погрешностей виміру температури в одиниці відсотків. Для зменшення погрешності, пов'язаної з установкою і нестабільністю частоти модуляції, запропоновано використовувати автоматичну систему управління швидкістю обертання електродвигуна (рис.5)

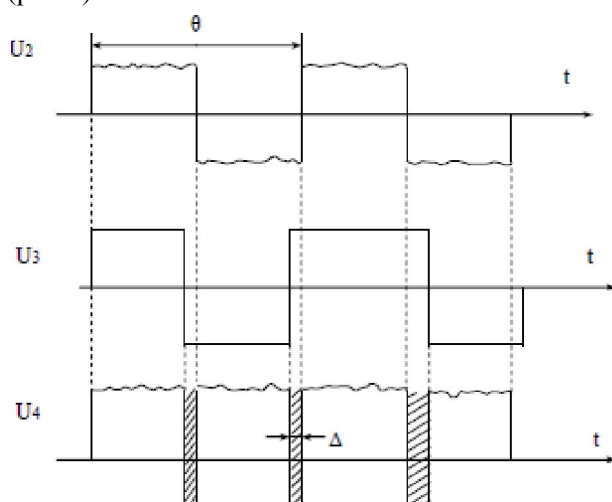


Рис 4. Механізм виникнення випадкової помилки

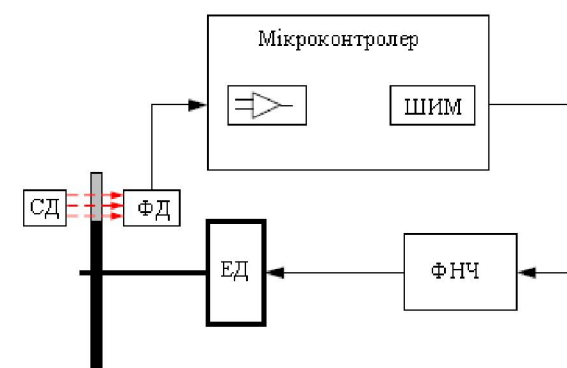


Рис 5. Схема автоматичного регулювання частоти модуляції

Запропоновано усунення помилки, пов'язаної з неправильною установкою фази опорного вагання і її флуктуаціями, шляхом мікропроцесорної обробки. Програмна реалізація дозволяє виробляти необхідну тимчасову затримку між фронтом імпульсу модулюючого вагання і моментом старту синхронного детектування сигналу.

АЧТ розроблене на базі печі МТП-2МР, що випускається на підприємстві, укомплектоване еталонною термопарою ППО 1 розряду, термостатом холодних кінців, блоком управління БУ-1М з вбудованим регулятором температури.

АЧТ-45/100/10 зареєстрований в Державному реєстрі засобів вимірювань під №23395-02. Технічні характеристики підтверджені в ході Державних випробувань (Сертифікат про затвердження типу засобів вимірювань RU.E.32.010.A № 12885).

Таблиця 1

Звірення еталонного пірометра ПД4-06 з температурною лампою СІ 10-300 і МЧТ-2/900/2800

Випромінювач	Свідчення пірометра ПД4-06 °C
Температурною лампою СІ 10-300	1201
МЧТ-2/900/2800	1199

Кут конічної порожнини і положення вставки щодо торців печі розраховані так, щоб забезпечити необхідну випромінювальну здатність і мінімальний градієнт температури по поверхні конуса. Ефективна випромінювальна здатність і геометрія випромінювача були розраховані у ВНІОФІ методом математичного моделювання на основі методу Монте-Карло за програмою STEEP3.

Для передачі одиниці температури розроблений і сертифікований еталонний пірометр ПД4-06, діапазону температур 800—2500 °С з погрішністю 0, МЧТ-2/900/2800 — випромінювач у вигляді малого чорного тіла, особливість моделі малі габарити і мале енергоспоживання. МЧТ призначений для калібрування пірометрів випромінювання і інших оптичних спектральних приладів в області температури 900—2800 °С. На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено і організовано виробництво еталонного устаткування, що забезпечує відтворення одиниці температури на основі МТП-90, відповідно до Державної перевірочної схеми для засобів вимірювання температури ГОСТ 8.558-93 частина 3. Радіаційні термометри в діапазоні температур від мінус 40 °С до 2500 °С.

Висновки

Результати дослідження систематизуються у такий спосіб: 1. Проведено порівняльний аналіз характеристик пірометрів; 2. Розглянуто різновиди та конструктивні особливості пірометрів; 3. Розраховані параметри пірометрів; 4. Надано метрологічне забезпечення засобом безконтактного вимірювання температури.

➤ Завдяки таким приладам процедуру вимірювання температури можна проводити у важкодоступних місцях, а контроль температури такими приладами, дозволяє вивести безпеку технологічних процесів на рівень стабільної.

➤ Отримана інформація, в першу чергу, надає уявлення про застосування на практиці запропонованих розрахункових схем та процедури проведення метрологічних процедур.

Список літературних джерел

1. Джемисон Ж. Э. Физика и техника инфракрасного излучения. – М.: Мир, 1999. – 312 с.
2. Афонин А.В. Инфракрасная термография в энергетике/ А.В.Афонин, Р.К.Ньюпорт, В.С.Поляков, С.С.Сергеев. – С.-Петербург: ЛОГОС, –2000. – С.14-21.
3. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. – М.: Наука, 2002.- 221 с.
4. Ковальчук В.В. Нанометрологія та властивості нанокластерів // Метрологія та прилади. - 2010. - №2 (22).-С.37-41.
5. Ковальчук В.В. Кластерная модификация полупроводниковых гетероструктур.- К.: «Хай-Тек Пресс», 2007.- 304 с.
6. Ковальчук В.В. Принципи дослідження апаратурного забезпечення нановимірювань // Метрологія та прилади. - 2010. - №4(24).-С.49-59
7. Коломиец Л.В., Ковальчук В.В., Грабовский О.В., Бороденко О.В. Кластеризация в микроэлектронных технологиях // Вісник інженерної академії України.-№3-4.-2009.-С.76-78
8. Костюковский С.Р. Пирометры (бесконтактные измерители температуры) / С.Р. Костюковский., В.В.Грачев, А.В.Грачева, А.И. Виноградов // К.: Диполь - 2004. - №2. - С. 37 – 38.
9. Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок аттестации поверителей средств измерений. – М.: Стандарт, 1999. - 55 с.
10. ГОСТ Р 8.619—2006 «Приборы тепловизионные измерительные».
11. ДСТУ 8.558-93 частина три «Радіаційні термометри».
12. Бажанов С.А. ИК диагностика электрооборудования.-М.: Просвещение, 2009. – 214 с.
13. Неразрушающий контроль: Справочник, т.5/под ред. чл.-корр. РАН В.В. Клюева.- М.: Машиностроение, 2004. – 457 с.
14. Волков С.С., Никоненко В.Н. Метрологическое обеспечение неконтактных средств измерения температуры // Метрология. – 2006. – №2. – С.15-17.
15. Ковальчук В.В. Поляризаційно-чутливі пірометричні системи і нанометрологія // Метрологія та прилади. - 2011. - №2.-С.39-45.