

## БІСПЕКТРАЛЬНИЙ ТЕЛЕВІЗІЙНИЙ ПРИБІР КОНТРОЛЮ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*М.О. Маркін, В.А. Порєв*

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр.  
Перемоги, 37, м. Київ, 01056, e-mail: nauka@naers.kpi.ua*

*Розглянуті методичні питання використання телевізійних засобів для вимірювання температури та особливості реалізації схем формування моноспектральних сигналів в мультиспектральних телевізійних пірометрах. Запропоноване нове технічне рішення біспектрального телевізійного пірометра, яке базується на використанні фізичної залежності пропускання фотонів в кремнії від довжини хвилі випромінювання.*

*Ключові слова: вимірювання температури, телевізійний пірометр, світлоелектричний перетворювач, моноспектральний сигнал, фотон, кремній, роздільна здатність.*

*Rассмотрены методические вопросы использования телевизионных средств измерения температуры и особенности реализации схем формирования моноспектральных сигналов в мультиспектральных телевизионных пирометрах. Предложено новое техническое решение биспектрального телевизионного пирометра, базирующееся на использовании физической зависимости пропускания фотонов в кремнии от длины волны излучателя.*

*Ключевые слова: измерение температуры, телевизионный пирометр, светоэлектрический преобразователь, моноспектральный сигнал, фотон, кремний, разрешающая способность.*

*The article deals with methodic questions concerning the usage of television measurement devices and the specifics of the implementation of the narrowband signal formation in the multiband television pyrometers. New technical solution has been proposed for the two-band television pyrometer, which is based on using the physical relation between photonic translucency of silicon and the source wavelength.*

*Keywords: measuring of temperature, televisional pyrometer, light-electric transformer, monospectral signal, photon, silicon, discriminability.*

Стан багатьох сучасних технологій не в останню чергу визначається науковим та технічним рівнем засобів контролю, значна частина яких базується на використанні оптичних методів, зокрема, оптичної пірометрії, оскільки температура є найважливішим параметром більшості технологічних процесів. Отже, задачі створення ефективних методів та технічних засобів оптичної пірометрії завжди залишатимуться актуальними.

Для контролю температурних режимів можливе застосування приладів з оптико-механічним розгортанням чи навіть одноелементних об'єктивних пірометрів. Але, якщо температурні поля мають складну форму, малі розміри, значні поверхневі градієнти і дуже динамічний характер, то їх ефективний контроль можливий тільки за умови формування і аналізу зображення температурного поля в реальному масштабі часу і з високим просторовим розрізненням. Найбільш повно цим вимогам відповідають телевізійні пірометри (ТП), які при контролі

температурних полів забезпечують вибірку тисяч точок в реальному масштабі часу з найвищим на сьогодні просторовим розрізненням [1]. Така властивість ТП створює умови для підвищення ефективності контролю, підвищення якості продукції в таких технологіях, як лазерна обробка, електронно-променева очистка та напilenня в вакуумній камері тощо.

Власне, виникнення і становлення телевізійної пірометрії значною мірою стимульоване зростанням питомої ваги високих технологій з одночасним підвищенням вимог до методології їх контролю.

Головними модулями ТП є оптична система, передавальна телевізійна камера, в склад якої входять світлоелектричний перетворювач (СЕР) і формувач сигналу, та комп'ютер. Оптична система формує зображення об'єкту в чутливій площині СЕР, який є упорядкованою матрицею великої кількості мікроперетворювачів, а концепція використання ТП базується на припущенні про їх незалежність та ідентичність.

Якщо СЕП визначає принципову можливість виконання певних функцій, то оптична система, в основному, забезпечує якісні показники функціонування. Зокрема, оптична система є спектральним фільтром певного діапазону та просторовим фільтром нижніх частот. Вибором характеристик оптичної системи встановлюється потрібне збільшення, спектральний діапазон, а також виконується узгодження динамічного діапазону СЕП з діапазоном змін вхідного сигналу.

Загальна методика використання телевізійних засобів для вимірювання геометричних, енергетичних та динамічних параметрів різних об'єктів полягає у формуванні телевізійного зображення об'єкту, перетворенні його в цифровий код та застосуванні алгоритмів обробки, які забезпечують визначення параметрів зображення.

Значна кількість сучасних методів безконтактного вимірювання температурних полів базується на законі Планка [2], який встановлює зв'язок між спектральною щільністю енергетичної світимості випромінювання і температурою  $T$  абсолютно чорного тіла (АЧТ).

Характеристики спектральної чутливості сучасних ПЗЗ - матриць перекривають ультрафіолетовий, видимий та ближній інфрачервоний діапазони, що дозволяє реалізувати методи вимірювання як яскравісної температури, так і температури спектрального відношення  $T_K$ , при якій відношення спектральних яскравостей тіла і АЧТ для двох довжин хвиль однакові.

Зауважимо, що температуру спектрального відношення інколи називають колірною, але таке поняття температури може бути застосоване тільки для видимої області спектра, оскільки поняття кольору пов'язане з суб'єктивним відчуттям оператора.

Проблеми біспектральної телевізійної пірометрії полягають в наступному.

Якщо  $L(\lambda_1, T)$  і  $L(\lambda_2, T)$  — спектральні яскравості тіла з температурою  $T$  для довжин хвиль  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , а  $L^0(\lambda_1, T_K)$  і  $L^0(\lambda_2, T_K)$  — спектральні яскравості АЧТ з температурою  $T_K$ , то визначення температури тіла забезпечується таким співвідношенням

$$\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)L(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)L(\lambda_2, T)} = \frac{L^0(\lambda_1, T)}{L^0(\lambda_2, T)} \quad (1)$$

Використавши формулу Планка, отримаємо, що

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_K} = \frac{\lambda_K}{C_2} \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}, \quad (2)$$

де  $\lambda_K = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$  - ефективна довжина хвилі біспектрального пірометра.

Формула (2) є математичною базою для реалізації біспектральної телевізійної пірометрії. Її аналіз показує, що при  $\varepsilon(\lambda_1, T) = \varepsilon(\lambda_2, T)$  маємо, що  $T = T_K$ , а в інших випадках істинна температура тіла може бути як більшою, так і меншою від температури спектрального відношення. Дійсно, нехай  $\lambda_2 > \lambda_1$ , тоді знак різниці  $T - T_K$  визначиться співвідношенням між  $\varepsilon(\lambda_1, T)$  і  $\varepsilon(\lambda_2, T)$ . При  $\varepsilon(\lambda_1, T) > \varepsilon(\lambda_2, T)$  матимемо  $T < T_K$ , а при  $\varepsilon(\lambda_1, T) < \varepsilon(\lambda_2, T)$   $T > T_K$ .

Похибка вимірювання температури спектрального відношення визначається не тільки співвідношенням між  $\varepsilon(\lambda_1, T)$  і  $\varepsilon(\lambda_2, T)$ , а ще й похибкою визначення ефективної довжини хвилі біспектрального пірометра  $\Delta \lambda_K$ .

В загальному випадку похибку вимірювання температури спектрального відношення  $\Delta T_K$  можна знайти за формулою

$$\Delta T_K = \frac{T_K^2}{C_2} \Delta \lambda_K \ln \frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)}. \quad (3)$$

Розрахунки за формулою (3) показують, що при високих температурах похибка вимірювання може становити десятки градусів, а це недопустимо в технологіях, де необхідно контролювати зміни температурного режиму на рівні 5К. Наприклад, на всіх технологічних етапах виробництва надчистого кремнію зниження температури на 5К від оптимального значення супроводжується суттєвим зменшенням виходу якісної продукції, а збільшення температури на 5К від оптимального значення веде до значного зростання енергозатрат (понад 3000 кВт • год/кг.).

При цьому треба також враховувати особливості телевізійних засобів вимірювання, пов'язані з тим, що значення  $\lambda_K$  можуть виявитися різними для різних ділянок СЕП. Отже, використання класичної біспектральної схеми в телевізійній пірометрії може виявитися неефективним, якщо зображення об'єкту займатиме більше 50% площі світлочутливої матриці, а це, в свою чергу, вимагає перегляду уявлень про механізм формування вимірювального сигналу.

В принципі, мультиспектральна пірометрія потенційно більше відповідає потребам контролю сучасних високотемпературних

технологій. Але основні проблеми мультиспектральної телевізійної пірометрії до цього часу не вирішені і навіть мало досліджені. В літературі відсутні систематизовані дані про методи та достовірні результати застосування мультиспектральних пірометрів для контролю температури. Окремі публікації з цієї тематики не підтверджені обґрунтуванням та дослідженнями технічних характеристик, зокрема, еквівалентної шуму різниці температур та ефективної довжини хвилі, просторової роздільної здатності тощо.

Отже, на сьогодні проблема полягає не стільки в забезпеченні мультиспектрального контролю високотемпературних технологій за допомогою телевізійних засобів, скільки в аналізі та вирішенні нових проблем, які при цьому виникають. Однією з таких проблем є практична реалізація схеми формування кількох (найчастіше, двох) моноспектральних сигналів.

Введення схеми формування двох моноспектральних сигналів в склад оптичної системи пірометра дозволяє реалізувати метод біспектральної пірометрії, який порівняно з методом моноспектральної пірометрії характеризується більшою точністю вимірювання температури. Традиційні схеми формування моноспектральних сигналів за допомогою світлоподільних елементів у вигляді призм або дихроїчних пластин, які дозволяють розділити єдиний потік на спектральні компоненти, зараз використовуються дуже рідко, оскільки вимагають окремих СЕП, що значно збільшує габарити приладу.

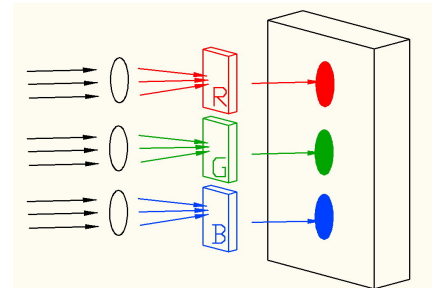
Подібні схеми формування моноспектральних сигналів, в яких спектральні компоненти потоку спрямовуються на окремі ділянки СЕП, також не набули поширення.

Найчастіше реалізується метод єдиного СЕП, в якому кожний елемент розкладу зображення утворений певною просторовою комбінацією сусідніх піксел, спектральна характеристика кожного з яких формується окремим світлофільтром з мікролінзою (рис.1).

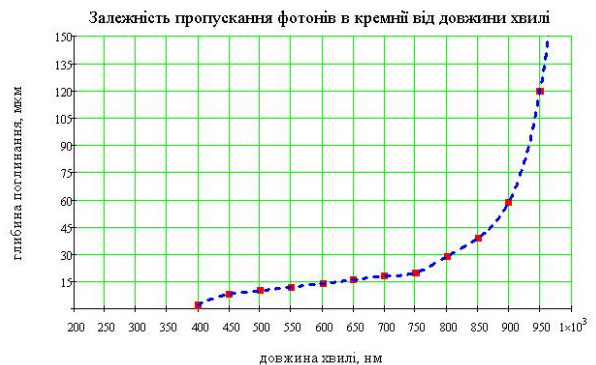
Таке рішення, крім очевидного виграшу в габаритах, має безумовні переваги в метрологічному аспекті, оскільки дозволяє формувати всі необхідні спектральні компоненти за допомогою одного СЕП. Але при цьому суттєво зменшується просторова роздільна здатність приладу.

Аналіз схемних рішень новітніх розробок СЕП, зокрема, тришарових ПЗЗ-матриць, призначених для кольорового телебачення, дозволив нам запропонувати нове технічне рішення біспектрального телевізійного пірометра, яке базується на використанні

фізичної залежності пропускання фотонів в кремнії від довжини хвилі випромінювання (рис. 2).



**Рисунок 1 – Схема формування моноспектральних сигналів комбінацією сусідніх піксел**



**Рисунок 2 – Залежність пропускання фотонів в кремнії від довжини хвилі**

Будова тришарової матриці показана на рис. 3. Кожний із трьох шарів матриці є МДН-конденсатором (метал-діелектрик-напівпровідник), принцип роботи якого базується на послідовному виконанні операцій генерації та накопичення заряду з наступним перенесенням заряду. Фактично це означає, що тришарова матриця одночасно формує три різних сигнали в межах кожного пікселя. Отже, просторова роздільна здатність тришарової матриці збільшується практично втричі за рахунок зменшення лінійного розміру елемента розкладу зображення.

Мультиспектральний телевізійний пірометр з тришаровою матрицею [3] складається із розташованих на одній оптичній осі передавальної телевізійної камери 3, до якої входять світлоелектричний перетворювач на основі тришарової матриці 4, формувач сигналу 5 та пристрій введення відеосигналу 6 в комп'ютер 7 (рис.4). Досліджуваний об'єкт 1 розташовується на одній оптичній осі з

об'єктивом 2, задня фокальна площина якого суміщена з чутливою площиною світло-електричного перетворювача 4.

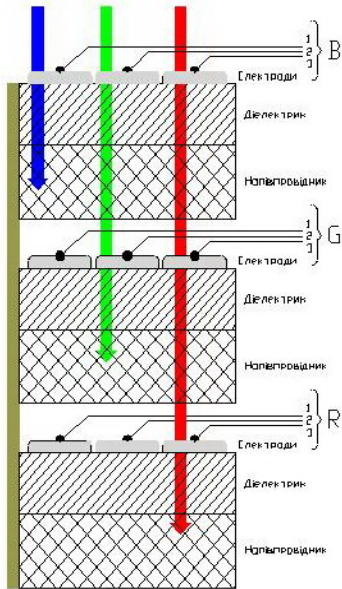


Рисунок 3 – Будова тришарової матриці

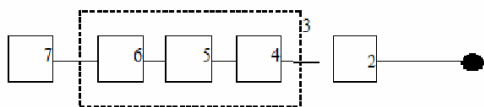


Рисунок 4 – Структурна схема мультиспектрального телевізійного пірметра з тришаровою матрицею

Прилад працює наступним чином. Сигнал від об'єкту 1 проходить до об'єктиву 2, розташованого на одній оптичній осі з передавальною телевізійною камерою 3. Об'єktiv 2 формує вторинне зображення у чутливій площині світло-електричного перетворювача 4, який будується на основі тришарової матриці, що призначена для розділення випромінювання на окремі спектральні діапазони, тобто надає можливість аналізувати випромінювання об'єкту 1 у трьох різних спектральних діапазонах – червоному, зеленому, синьому ( $\Delta\lambda_R$ ,  $\Delta\lambda_G$ ,  $\Delta\lambda_B$ ). Для ділення на складові RGB використовуються дисперсні властивості кремнію. Синя частина спектра поглинається верхнім шаром (товщина 0,2 мкм), зелена середнім (товщина 0,4 мкм) і червона нижнім (більше 2 мкм). Товщина кожного шару обрана за результатами експериментальних досліджень по глибині проникнення квантів відповідного спектрального діапазону в

кремній. Шари, у яких відбувається фотоефект, розділені додатковими тонкими зонами низьколегованого кремнію і мають окремі виводи сигналу. Таким чином, формуючи за допомогою об'єктиву одне зображення на СЕП, отримуємо одночасно три спектри вхідного сигналу.

Дане рішення дозволяє отримати на мішені СЕП три зображення одного і того ж об'єкта в різних ділянках спектральної характеристики і використати отримані сигнали для формування спектрального відношення, тобто реалізувати мультиспектральний пірметр на єдиному перетворювачі.

Крім вже відзначених вище метрологічних переваг таке рішення перспективне також в плані підвищення просторової роздільної здатності біспектрального телевізійного пірметра.

## ВИСНОВКИ

Телевізійні пірметри, які забезпечують виборку тисяч точок в реальному масштабі часу з найвищим на сьогодні просторовим розрізненням, є ефективним засобом контролю динамічних температурних полів складної форми.

Запропоноване технічне рішення, яке базується на використанні фізичної залежності пропускання фотонів в кремнії від довжини хвилі випромінювання, дозволяє підвищити просторову роздільну здатність біспектрального телевізійного пірметра.

Адекватна реалізація потенційних переваг біспектрального телевізійного пірметра забезпечить створення ефективної методології контролю температури в технологіях отримання сучасних надійних і довговічних матеріалів із заданими властивостями.

1. Порев В.А. Телевизионный пирометр / В.А. Порев // Приборы и техника эксперимента – 2002. – №1. – С.150. 2. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет.—М.: Наука, 1982.—296 С. 3. Патент України на корисну модель № 44655 МПК (2006) H04N 7/00. Мультиспектральний телевізійний пірметр на основі тришарової матриці // Маркін М.О., Маркіна О.М., Порев В.А. ; заявник НТУУ "КПІ"; опубл. 12.10.2009. Бюл № 19/2009.

Поступила в редакцію 17.11.2009р.

Рекомендував до друку докт. техн. наук, проф. Кісіль І.С.

