

УДК 621.307.13

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТЕЛЕВІЗІЙНИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ЗОНИ ПЛАВКИ

© Порєв Г. В., 2002

НТУУ "Київський політехнічний інститут"

Обґрунтовано, що методика компенсації нерівномірності чутливості світлоелектричного перетворювача шляхом формування тривимірної матриці вагових коефіцієнтів дозволяє підвищити точність визначення амплітуди сигналу, а в підсумку — точність вимірювання температури. Для визначення ефективної довжини хвилі запропоновано формулу, яка враховує особливості світлосигнальної характеристики телевізійного пірометра, що дозволяє виключити складову похибки вимірювання температури, пов'язану із похибкою визначення ефективної довжини хвилі.

Зонна плавка як один з методів перекристалізації речовини знаходить сьогодні широке застосування в наукових дослідженнях, в технології очищення кристалів, металів, напівпровідників, органічних речовин та при створенні матеріалів з заданим розподілом домішок. Зонна плавка може проводитись як в тиглі (контейнері), так і безтигельним методом. Матеріали з температурою плавлення T_{II} більшою 1500 К (наприклад, для кремнію $T_{II}=1685$ К) допускають тільки безтигельну зонну плавку (БЗП), оскільки в рідкій фазі вони хімічно активні.

Найбільшого поширення серед методів БЗП набув метод плаваючої зони з електронно-променевим нагрівом [1, 2]. В даній технології в силу певних специфічних особливостей (скачкоподібні зміни яскравості зони плавки (ЗП) велика роль впливу випромінювання електроду та забруднення ілюмінатора, поступово-обертальний рух зразка) та з огляду на постійний ріст вимог до чистоти кристалічних, зокрема напівпровідникових матеріалів, надзвичайної ваги набуває проблема контролю високотемпературного поля. Свого часу автор методу зонної плавки Пфанн В. відзначив, що "головною перешкодою на шляху досягнення досконалої кристалічної будови при зонній плавці треба вважати незадовільний контроль температури" [1].

На сьогодні зонна плавка сформувалась в потужну і розгалужену галузь виробництва матеріалів з заданими властивостями. Безперервно розвивається теоретична база, вдосконалюється технологія, розширюється сфера застосування, зростає обсяг виробництва, але актуальною і до цього часу залишається проблема виявлення закономірностей формування температурного поля і проблема його контролю. Головною причиною такого положення є, з одного боку, особливості технології зонної плавки,

які виключають можливість використання найбільш точних контактних технічних засобів вимірювання температури, з другого — швидкому впровадженню пірометрів випромінювання перешкоджає відсутність закінченої теорії формування поля яскравості (температурного поля поверхні ЗП) та ефективних методик контролю.

Важливий крок в цьому напрямку зроблений в [3], де обґрунтовано висновок, що серед усіх технічних засобів, які можуть бути використані для вимірювання параметрів зони плавки, повністю адекватними задачі є телевізійні пірометри (ТП), які в змозі одночасно забезпечити найвищі серед усіх інших засобів показники щодо просторового розрізнення, формату та часу формування виборки. Вдосконалена методологія використання телевізійних засобів для дослідження оптичних полів та розробка спеціалізованого апаратно-програмного комплексу дозволили, в основному, вирішити проблему контролю параметрів зони плавки.

Але деякі важливі питання застосування телевізійних засобів не знайшли відображення в [3] і не вирішені до цього часу, що негативно позначається на точності вимірювання температури ЗП, а в підсумку стримує розвиток технології електронно-променевої БЗП. Це, зокрема, низька ефективність методики компенсації нерівномірності чутливості світлоелектричного перетворювача (СЕП) та пов'язані з цим похибки визначення ефективної довжини хвилі (ЕДХ), що є джерелом похибок вимірювання температури.

Неідентичність властивостей елементів розкладу, що утворюють СЕП, з точки зору перетворення освітленості в електричний сигнал, визначається поняттям "нерівномірність чутливості" і визначається в межах поля зображення чи певної його діля-

нки оцінюється такою формулою:

$$H = \frac{\Delta A}{2\bar{A}}, \quad (1)$$

де ΔA — різниця між мінімальним A_{min} і максимальним A_{max} значеннями, \bar{A} — середнє значення сигналу при постійній освітленості.

Для оцінки впливу нерівномірності чутливості на точність вимірювання температури ЗП скористаємося результатами роботи [3], де спеціально для технології ЕПЗП розроблений метод, за яким визначення температури проводиться у відповідності з формулою

$$T = C_2 / \lambda_e [\ln B - \ln A]^{-1}. \quad (2)$$

де A — поточне значення сигналу, λ_e — ефективна довжина хвилі, $C_2=14400$ мкм·К, B — апаратна константа, що враховує коефіцієнт випромінювальної здатності, параметри оптичної схеми, СЕП, АЦП, і визначається при відомому значенні температури T_1 , наприклад, при температурі кристалізації кремнію $T_1=1685$ К.

Диференціюючи формулу (2) та переходячи до скінчених різниць, можна знайти похибку визначення температури ΔT , яка обумовлюється нерівномірністю чутливості матриці

$$\Delta T = T \Delta A / (A [\ln B - \ln A]). \quad (3)$$

У відповідності з (1) $\Delta A=2\Delta H$. Отже

$$\Delta T = 2TH / [\ln B - \ln A]. \quad (4)$$

Найчастіше для компенсації нерівномірності чутливості матричних СЕП використовується метод програмової корекції [4], який полягає в тому, що при еталонній освітленості формують двовимірну матрицю значень сигналів A_{ij}^0 , визначають максимальне значення сигналу A_{max}^0 і утворюють матрицю вагових коефіцієнтів

$$C_{ij} = A_{max}^0 / A_{ij}^0. \quad (5)$$

Надалі сигнал з елемента розкладу визначається за формулою

$$A_{ij}^* = C_{ij} A_{ij}, \quad (6)$$

де A_{ij} — виміряне значення.

Корекція нерівномірності чутливості дозволяє знизити нерівномірність до значення $H' < H$.

Значення допустимої нерівномірності чутливості H' , при якій похибка вимірювання температури не перевищує ΔT , знайдемо за слідуною формулою

$$H' = \Delta T [\ln B - \ln A] / (2T). \quad (7)$$

Наприклад, умова $\Delta T < 5^\circ$ виконується при $H \leq 0,01$.

Якщо залежність вихідного сигналу окремого пікселя (групи піксел) від освітленості інтерпретувати як світлосигнальну характеристику, то в такому випадку нерівномірність чутливості означатиме відмінності в світлосигнальних характеристиках окре-

мих піксел (групи піксел). При цьому світлосигнальні характеристики піксел $(i; j)$ та $(p; k)$ можуть мати неоднакові ділянки лінійності або різні кути нахилу дотичних для одного і того ж значення освітленості, внаслідок чого вказаний метод корекції буде малоефективним. Дійсно, якщо кути нахилу різні, а компенсуюча матриця сформована при освітленості $E_1 < E_2$, то при $E_{ij} = E_{pk} \approx E_2$ отримаємо для сигналів $A_{pk}(E_2) > A_{ij}(E_2)$. Навпаки, якщо компенсуюча матриця сформована при освітленості E_2 , то при $E_{ij} = E_{pk} \approx E_1$ отримаємо $A_{ij}(E_1) > A_{pk}(E_1)$.

З цього випливає, що формування компенсуючої матриці необхідно провадити не для одного значення освітленості, а для сукупності значень E_1, E_2, \dots, E_k в діапазоні, який відповідає умовам роботи ТП. Тобто в загальному випадку треба формувати тривимірну матрицю вагових коефіцієнтів в робочому діапазоні ТП шляхом знаходження середніх значень сигналів всіх піксел при кожному значенні E_k .

Використання такої методики дозволяє, поперше, визначити в межах всього растра групи піксел з однаковим діапазоном лінійності. При цьому тангенс кутів нахилу прямих можуть бути різними. По-друге, можна визначити освітленість, починаючи з якої порушується лінійність перетворення хоча б для одної ділянки СЕП.

Враховуючи сучасні можливості обчислювальної техніки нескладно виконати таку процедуру для кожного пікселя в межах робочого діапазону освітленості.

Зважаючи на ту обставину, що процес вимірювання температури поверхні ЗП характеризується порівняно вузьким діапазоном змін освітленості мішені СЕП ($E_{min}=0,72E_{max}$), формування компенсуючої матриці можна обмежити значеннями $E_1=E_{min}$, $E_2=E_{max}$.

Поняття ефективної довжини хвилі широко використовується в теорії і практиці пірометрії, де визначається, як умовне значення довжини хвилі λ_e монохроматичного випромінювання, дія якого на СЕП з точки зору формування сигналу еквівалентна дії реального випромінювання [5].

Практично ЕДХ обчислюють по значенню сигналів $A(\lambda_e, T)$, сформованих в спектральному діапазоні $\lambda_1 \dots \lambda_2$ при температурі T_1 і T_2 [5]

$$\lambda_e = C_2 [T_1^{-1} - T_2^{-1}] / (\ln A(\lambda_e, T_2) - \ln A(\lambda_e, T_1)). \quad (8)$$

В загальному випадку пірометричний сигнал, сформований пікселом ij , визначиться так:

$$A_{ij}(\lambda_e, T) = k_n E(\lambda_e, T), \quad (9)$$

де k_n — тангенс кута нахилу світлосигнальної характеристики, $E(\lambda_e, T)$ — освітленість пікселя.

Отже, формулу (8) можна переписати так:

$$\lambda_e = C_2 \left[T_1^{-1} - T_2^{-1} \right] / \ln \frac{E(\lambda_e, T_2)}{E(\lambda_e, T_1)}. \quad (10)$$

Якщо світлосигнальна характеристика одного і того ж пікселя може бути представлена сукупністю сусідніх лінійних ділянок, то для двох близьких значень освітленості, які не належать одній і тій же ділянці, можна записати

$$A_{ij1}(\lambda_e, T_1) = k_{n1} E(\lambda_e, T_1), \quad (11)$$

$$A_{ij2}(\lambda_e, T_2) = k_{n2} E(\lambda_e, T_2). \quad (12)$$

де k_{n1}, k_{n2} — тангенси кутів нахилу сусідніх ділянок світлосигнальної характеристики.

Використавши (11) і (12) в (8), отримаємо

$$\lambda'_e = C_2 \left[T_1^{-1} - T_2^{-1} \right] / \left(\ln \frac{k_{n2}}{k_{n1}} + \ln \frac{E(\lambda_e, T_2)}{E(\lambda_e, T_1)} \right), \quad (13)$$

В робочому діапазоні світлосигнальної характеристики $k_{n1} > k_{n2} > k_{n3} > \dots$, тому очевидно, що використання формули (8) приводить до похибки, яку можна визначити слідуючим чином

$$\lambda_e - \lambda'_e = \Delta\lambda = \lambda_e / \left(1 + \ln \frac{E(\lambda_e, T_2)}{E(\lambda_e, T_1)} / \ln \frac{k_{n2}}{k_{n1}} \right). \quad (14)$$

Скориставшись формулою Планка та відомим співвідношенням, що пов'язує освітленість в площині зображення з яскравістю спряженої поверхні в предметній площині [6], перепишемо (14) у вигляді більш придатному для аналізу

$$\Delta\lambda = \lambda_e / \left[1 + \frac{C_2}{\lambda_e} \cdot \frac{\Delta T}{T_1^2} / \ln \frac{k_{n2}}{k_{n1}} \right], \quad (15)$$

де $\Delta T = T_2 - T_1$.

Розглядаємо ЕДХ в діапазоні 0,65...1,05 мкм, який відповідає діапазону характеристик сучасних ТП на ПЗЗ, а при розрахунках використаємо $T=1685$ К і $\Delta T=15$ К, що узгоджується із загальною методикою, яка передбачає визначення ЕДХ в тому ж діапазоні температур, в якому проводиться вимірювання. Світлосигнальну характеристику задамо в точках, які визначені відношенням тангенсів кутів нахилу світлосигнальної характеристики до осі абсцис в діапазоні від 50° до $52^\circ 30'$.

З рис. 1, побудованого у відповідності з (15) та з врахуванням зроблених застережень, видно, що при використанні формули (8) похибка визначення ЕДХ може мати значення в діапазоні 0,1...0,6 мкм. Нагадаємо, що при визначенні ЕДХ допускається похибка не більше 0,01 мкм [5].

Вказаної похибки можна уникнути, врахувавши реальний характер світлосигнальної характеристики. Використавши (11) і (12) в (10), отримаємо, що

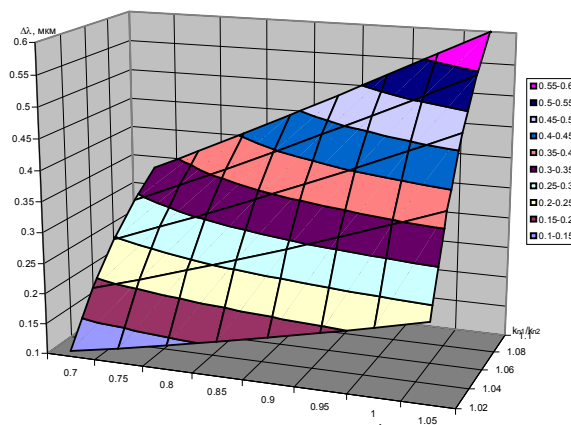


Рис. 1. Похибка визначення ЕДХ

$$\lambda_e = \frac{C_2 \left[T_1^{-1} - T_2^{-1} \right]}{\ln A(\lambda_e, T_2) - \ln A(\lambda_e, T_1) + \ln \frac{k_{n1}}{k_{n2}}}. \quad (11)$$

Формула (11) дозволяє визначити ЕДХ за пірометричними сигналами, утвореними одним і тим же пікселем при різних температурах з врахуванням реального характеру перетворення освітленості у вихідний сигнал.

Проведені нами експериментальні дослідження [7] підтвердили, що значення λ_e можуть виявитися різними для різних зон СЕП. Отже, стосовно задач, при яких провадиться контроль температури по зображенню значних розмірів, ЕДХ повинна визначатися окремо для таких зон (тобто кожний результат по λ_e повинен співвідноситись з координатами в площині СЕП).

1. Пфанн В. Зонная плавка. — М.: Мир, 1970. - 366 с.
2. Патон Б. Е., Лапчинский В. Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. — К.: Наукова думка, 1998. — 178 с.
3. Порев В. А. Анализ параметров зонной очистки за допомогою приладів з електронним розгортанням зображення // Наукові вісті НТУУ "КПІ". — 2000. - № 1. — С. 21-25.
4. Порев Г. В., Лагодний В. І. Програмна корекція в телевізійних системах автоматизованого контролю // Приборостроение-96. — Том 1. — Судак: АІНУ. — 1996. — С. 18.
5. Гордов А. Н. Основы пирометрии. — М.: Металлургия, 1971. — 448 с.
6. Теория оптических систем. Учебник для вузов / Б. Н. Бегунов и др. — М.: Машиностроение, 1981. — 432 с.
7. Порев Г. В., Порев В. А. Визначення ефективної довжини хвилі телевізійних засобів контролю температурних полів // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. — 1998. — № 2. — С. 168-170.