

досліджень. 1999. Т. 3. № 4. С. 513-518. 3. Архангельская В.А. Люминесценция, термо- и фотохимия возмущенных центров окраски в кристаллах типа флюорита со щелочными примесями // Изв. АН СССР, сер. физ. 1982. Т. 46. № 2. С. 295-299. 4. Чорній З.П., Качан С.І., Щур Г.О., Салапак В.М., Дубельт С.П. $F_A \rightarrow M_A^+$ -перетворення у кристалах CaF_2-Me^+ // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". Елементи теорії та прилади твердотільної електроніки. 2000. № 393. С. 25-28. 5. Чорній З.П., Качан С.І., Щур Г.О., Салапак В.М. Фотоіндукований дихроїзм M_A^+ -смуг поглинання в кристалах CaF_2-Me^+ // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". Електроніка. 1998. № 357. С.102-112. 6. Чорній З.П. Іонні процеси в радіаційно забарвлених кристалах галогенідів двовалентних металів. Автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук. Львів, 2000.

УДК 621.317.78

Ю.О. Скрипник, Г.В. Юрчик*

Київська Державна Академія технологій та дизайну,
кафедра автоматизації комп'ютерних технологій,
*Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра конструювання і виробництва радіоапаратури

КАЛОРИМЕТРИЧНИЙ ВИМІРЮВАЧ НАДВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПОТУЖНОСТІ

© Скрипник Ю.О., Юрчик Г.В., 2001

Розглядається калориметричний вимірювач надвисокочастотної потужності з напівпровідниковим термоелектричним перетворювачем, висока точність вимірювання якого забезпечується спеціальним алгоритмом автоматичної компенсації виникаючих систематичних похибок як мультиплікативного, так і адитивного характеру .

A calorimetrical device for very high frequency power measurement is proposed. The device has a semiconductor thermoelectrical transducer; high accuracy of power measurement is provided by special algorithm of compensating the arising errors both of multiplicative and additive types.

В останні роки спостерігається швидкий розвиток надвисокочастотної технології (НВЧ), яка дає змогу інтенсифікувати і підвищити ефективність технологічних процесів теплової обробки різних матеріалів при їх сушці, полімеризації, розморожуванні, пастеризації тощо. Як правило, точність контролю цих технологічних процесів більшою мірою визначає якість готових виробів. Тому актуальною є проблема пошуку і розробки високоточних широкодіапазонних вимірювачів потужностей електромагнітних коливань НВЧ.

Найбільш розповсюдженими методами вимірювання НВЧ потужності є теплові методи, засновані на перетворенні енергії НВЧ в теплову і вимірюванні виникаючого при цьому теплового ефекта в робочому тілі перетворювача [1]. До таких методів належить метод з використанням калориметричного перетворювача НВЧ потужності, який являє собою сукупність калориметричної насадки або камери з сухим навантаженням і термоелектричного перетворювача теплоти, що виділяється в сухому навантаженні, в електричний сигнал. Отже, мірою НВЧ потужності є термоелектрорушійна сила (ТЕРС) на виході

термоелектричного перетворювача – термопар. Перевагою цього методу є досить просте технічне рішення і висока надійність. Недоліком методу є недостатня чутливість до малих значень НВЧ потужностей і низька точність.

Недостатня точність вимірювання обумовлена тим, що серійні металічні термопари через їх низьку чутливість 40...50 мкВ/°С розвивають на своїх вільних кінцях досить малі значення ТЕРС (лише одиниці мікрвольт на рівні випромінювання потужності менше 10 мВт), вимірювання яких пов'язане з великими похибками. Використання термобатарей для підвищення чутливості не завжди виправдано через складність їх встановлення та експлуатації, а виникнення неоднозначних процесів теплообміну в такому перетворювачі викликає збільшення інерційності вимірювача і додаткових похибок вимірювання. Крім того, в процесі експлуатації термопар з'являються прогресуючі мультиплікативні і адитивні похибки термоелектричного перетворення внаслідок їх поступового старіння і зміни фізико-хімічних властивостей електродів під дією різних дестабілізуючих факторів і можливої агресивності навколишнього середовища [2], а також через неминучу зміну температури вільних кінців термопар. Досить суттєва похибка вимірювання виникає також через нелінійність градувальної характеристики (ГХ) термопар.

Пропонований для розгляду калориметричний вимірювач НВЧ потужності відрізняється тим, що в ньому використаний замість металічної термопари високочутливий напівпровідниковий термоелемент (коефіцієнт чутливості 500 – 600 мкВ/°С) з електродами електронної та діркової провідностей, а шукане значення контрольованої потужності визначається за допомогою додаткових результатів спостережень за формулою, що дозволяє усунути вищезгадані похибки термоелектричного перетворення. За рахунок високої чутливості термоелемента розширено діапазон вимірювача потужності в бік малих значень випромінювань НВЧ.

На рис. 1 подано функціональну схему калориметричного вимірювача НВЧ потужності. При надходженні електромагнітного випромінювання НВЧ потужності P_x в калориметричну насадку 2 з сухим навантаженням 1 нагрівається останній в усьому об'ємі за рахунок діелектричних втрат до температури

$$T = K_1 P_x, \quad (1)$$

де $P_x = Q_T / \tau = C \Delta T / \tau$; Q_T – кількість теплоти, що виділяється в сухому навантаженні і яке еквівалентне значенню контрольованої потужності НВЧ; C – теплоємність сухого навантаження; ΔT – зміна температури сухого навантаження; τ – час, за який виділяється в навантаженні теплота Q_T ; K_1 – коефіцієнт зв'язку і передачі теплоти від сухого навантаження через тонку стінку калориметричної насадки 2 за рахунок її високої теплопровідності до робочих кінців напівпровідникового термоелемента 3, внаслідок чого їх температура дорівнює:

$$T_1 = K_1 K_2 P_x, \quad (2)$$

де K_2 – коефіцієнт пропорційності. Для забезпечення надійного механізму теплопередачі без втрат робочі кінці термоелемента безпосередньо жорстко контактують з поверхнею калориметричної насадки 2. Вільні кінці термоелемента знаходяться при температурі T_2 , дещо більшій за температуру навколишнього середовища T_0 .

На початку експлуатації вимірювача його калібрують при відомій НВЧ потужності P_0 , яку вибирають з умови

$$P_0 = \sqrt{P_{MAXS} \cdot P_{MIN}}, \quad (3)$$

де P_{MAXS} і P_{MIN} – максимальна і мінімальна НВЧ потужності діапазону вимірювання.

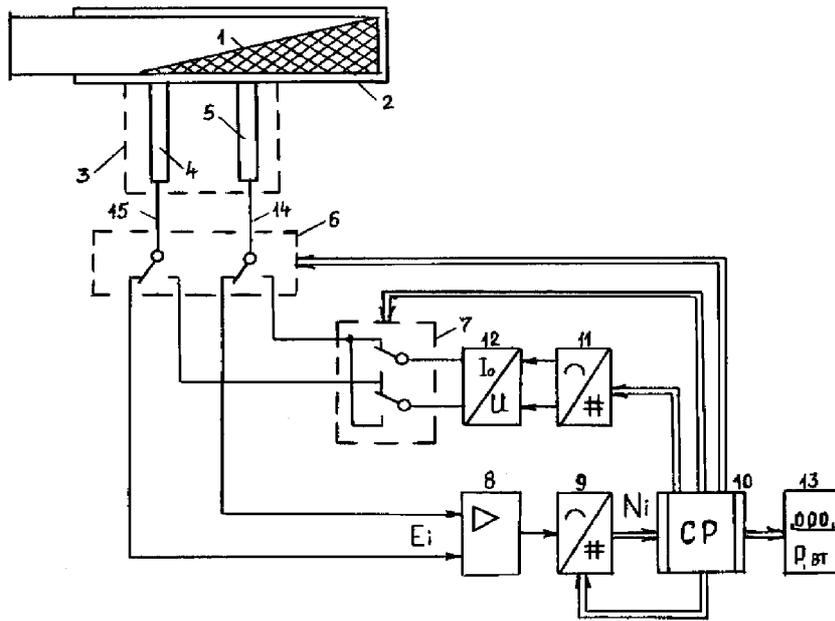


Рис. 1. Калориметричний вимірювач НВЧ потужності:

- 1 – сухе навантаження; 2 – калориметрична насадка, на поверхні якої встановлений термоелемент 3, утворений двома напівпровідниковими електродами 4 і 5; 6 і 7 – двополюсні перемикачі (мультиплексори); 8 – нормуючий підсилювач постійної напруги; 9 – аналогово-цифровий перетворювач; 10 – мікропроцесорний контролер; 11 – цифро-аналоговий перетворювач; 13 – цифровий індикатор

Термо ЕРС E_1' , що утворюється на вільних кінцях термоелемента при нагріванні робочих кінців до температури T_1 , яка відповідає НВЧ потужності P_0 , можна подати у вигляді

$$E_1' = \alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2, \quad (4)$$

де α_1 і α_2 – коефіцієнти Зеєбека відповідно робочого і вільних кінців термоелемента.

Сигнал термоелемента E_1' надходить через контакти перемикача 6, які знаходяться в лівому положенні (рис. 1), на вхід нормуючого підсилювача 8, після чого перетворюється аналого-цифровим перетворювачем 9 в цифровий код

$$N_1' = K_3 S (\alpha_1 T_1 - \alpha_2 T_2), \quad (5)$$

де K_3 – коефіцієнт підсилення підсилювача 8; S – чутливість аналого-цифрового перетворювача 9. Код N_1' реєструється в пам'яті контролера 10. Після цього за командою контролера 10 контакти перемикача 6 встановлюють у праве положення і водночас за допомогою цифро-аналогового перетворювача 11 і перетворювача постійної напруги в постійний струм 12 формують постійний струм значенням I_0 , який пропускають протягом визначеного часу Δt через робочі кінці термоелемента, що охолоджує їх за рахунок поглинання в них теплоти Пельтьє $Q_n = \Pi I_0$, де Q_n – кількість теплоти, що поглинається в місці контакту робочих кінців; Π – коефіцієнт Пельтьє робочого кінця термоелемента. В результаті температура робочого кінця термоелемента зміниться на величину $\Delta T \ll T_1$. Невеликі зміни температури робочого кінця при нелінійній характеристиці термоелемента в околиці робочої точки, яка задається температурою T_1 , викликають пропорційні, тобто лінійні зміни ТЕРС.

Водночас із поглинанням теплоти відбувається також і виділення теплоти Джоуля за довжиною електродів термоелемента. Якщо час протікання струму Δt вибирають значно більшим за теплову сталу термоелемента ($\Delta t = 3 \div 4 \tau$), то процес охолодження робочих кінців має усталений характер, а його інтенсивність буде визначатися теплопровідністю електродів термоелемента. Після часу Δt за командою мікропроцесорного контролера 10 контакти керованого перемикача 6 переводять в початкове ліве положення, і в пам'яті мікропроцесорного контролера 10 реєструється цифровий код напруги охолодженого термоелемента

$$N_2' = K_3 S \{ \alpha_1 [T_1 + (K_4 I_0^2 R - \Pi I_0) / \lambda \cdot l] - \alpha_2 T_2 \}, \quad (6)$$

де I_0 – оптимальний струм через термоелемент; R – внутрішній опір термоелемента; K_4 – коефіцієнт, що враховує частку теплоти Джоуля, яка розсіюється на робочому кінці термоелемента; λ – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності робочого кінця та електродів термоелемента; l – довжина термоелектродів.

Силу оптимального струму I_0 вибирають з умови максимального охолодження робочих кінців термоелемента [3]. Оскільки при цьому зменшення ТЕРС на вільних кінцях термоелемента буде найбільшим, то оптимальний струм визначають з рівняння

$$\frac{dE_2'}{dI} = 2K_4 I_0 R - \Pi = 0, \quad (7)$$

звідки

$$I_0 = \frac{\Pi}{2K_4 R}. \quad (8)$$

При симетричній конструкції термоелемента половина теплоти Джоуля надходить до робочих кінців електродів, а половина – до вільних кінців. Тому $K_4 = 0,5$ і оптимальний струм

$$I_0 = \frac{\Pi}{R}. \quad (9)$$

Враховуючи, що коефіцієнт Пельтьє робочих кінців пов'язаний з коефіцієнтом Зеєбека α через температуру T_1 , маємо

$$\Pi = \alpha_1 T_1. \quad (10)$$

Тоді код напруги охолодженого термоелемента при оптимальному струмі I_0 з врахуванням виразу (6) подамо у вигляді

$$N_2' = K_3 S \{ \alpha_1 [T_1 + (0,5 I_0^2 R - \alpha_1 T_1) / \lambda \cdot l] - \alpha_2 T_2 \}. \quad (11)$$

Еквівалентну теплопровідність λ робочих кінців вибирають такою, щоби температура охолодженого робочого кінця ΔT при оптимальному струмі I_0 була в межах лінійної ділянки статичної характеристики термоелемента, тобто виконувалася умова

$$-\Delta T = \alpha_1 (0,5 I_0^2 R - \alpha_1 T_1 I_0) / \lambda l \leq (0,05 \div 0,1) T_1. \quad (12)$$

Після реєстрації цифрового коду N_2' виконується коротка часова затримка Δt_1 , в результаті якої температура робочого кінця охолодженого термоелемента починає за відсутності струму I_0 швидко підвищуватися і наближатися до початкової T_1 за рахунок, в основному, природного кондуктивного та конвекційного теплообміну робочого кінця з елементами конструкції калориметричної насадки та навколишнім середовищем. В момент, коли мікропроцесорний контролер 10 зафіксує значення вихідної напруги термоелемента,

що дорівнює E'_1 , тобто N'_1 (момент, коли температура робочого кінця термоелемента дорівнюватиме T_1) за командою контролера 10 контакти перемикачів 6 і 7 встановлюються відповідно в праве і нижнє положення згідно з рис. 1, у результаті чого змінюється керунок протікання струму I_0 через робочий спай термоелемента 3.

Внаслідок реверсивності ефекта Пельтьє в робочому спаї відбувається виділення теплоти Пельтьє і Джоуля, що викликає швидке зростання температури робочого кінця термоелемента. В момент закінчення часової витримки Δt за командою контролера 10 контакти перемикачів встановлюють в початкове положення .

Запам'ятовується цифровий код ТЕРС термоелемента, який відповідає перегріву робочого кінця термоелемента струмом I_0 протягом часу Δt

$$N'_3 = K_3 S \{ \alpha_1 [T_1 + (0,5 I_0^2 R + \alpha_1 T_1 I_0) / \lambda \cdot l] - \alpha_2 T_2 \}. \quad (13)$$

Вимикають цифро-аналоговий перетворювач 11.

На цьому калібрування вимірювача НВЧ потужності закінчується, внаслідок чого отримують цифрові коди N'_1 , N'_2 , N'_3 , а також фіксують в пам'яті контролера 10 параметри калібрування – P_0 , Δt і I_0 .

Під час подальшої довготривалої експлуатації вимірювача точність результату прямого вимірювання потужності поступово починає знижуватися, в основному через прогресуючу систематичну похибку термоелемента внаслідок поступового старіння його електродів, зміни їх структури під дією дестабілізуючих факторів навколишнього середовища. Відбуваються зміни як термоелектричних коефіцієнтів Зеєбека і Пельтьє термоелемента, так і помітний дрейф його ГХ. Внаслідок впливу навколишнього середовища неминуче змінюється і температура вільних кінців термоелемента T_2 , що викликає появу адитивної похибки, а зміна коефіцієнта Зеєбека обумовлює появу мультиплікативної похибки вимірювання потужності.

При нелінійній характеристиці термоелемента складові похибки в околиці робочої точки, яка визначається температурою T_x , можна врахувати шляхом зміщення апроксимуючої дотичної (адитивна похибка) та її поворотом (мультиплікативна похибка) відносно вихідної дотичної, проведеної до точки з температурою T_x початкової ГХ термоелемента. Тому цифровий код напруги термоелемента з врахуванням похибок вимірювання, які існують в даний момент часу, можна подати у вигляді

$$N_1 = K_3 S \{ \alpha_1 (1 + \gamma_1) T_x - \alpha_2 T_2 \} + \delta_1, \quad (14)$$

де $\gamma_1 = \Delta \alpha_1 / \alpha$ – відносна мультиплікативна похибка від нестабільності чутливості і нелінійності статичної характеристики; $\delta_1 = K_3 S \alpha_2 \Delta T_2$ – сумарна абсолютна адитивна похибка від нестабільності температури вільних кінців термоелемента; ΔT_2 – відхилення температури вільних кінців термоелемента від температури калібрування T_2 .

Цифровий код N_1 реєструють в пам'яті контролера 10. Потім виконують додаткові вимірювання ТЕРС термоелемента при охолодженні і нагріванні його робочого кінця постійним струмом I_0 таким самим шляхом, як і при калібруванні вимірювача потужності на початку його експлуатації. Операції зміни абсолютної температури робочого кінця та вимірювання ТЕРС термоелемента здійснюються аналогічними перемиканнями контактів дво-полюсних перемикачів 6 і 7.

Після охолодження робочого кінця термоелемента струмом I_0 протягом визначеного часу Δt цифровий код ТЕРС термоелемента буде дорівнювати

$$N_2 = K_3 S \left\{ \alpha_1 (1 + \gamma_1') \left[T_X + \frac{0,5 I_0^2 R - \alpha_1 (1 + \gamma_1') T_X I_0}{\lambda \cdot l} \right] - \alpha_2 T_2 \right\} + \delta_1', \quad (15)$$

де γ_1' і δ_1' – значення мультиплікативної і адитивної похибок елемента в точці $(T_X - \Delta T)$.

Цифровий код N_2 реєструють в пам'яті контролера 10. Після витримки часу Δt_2 , в результаті чого температура робочого кінця набуває початкове значення T_X , що фіксує контролер по коду N_1 , нагрівають робочий кінець термоелемента струмом I_0 протягом визначеного часу Δt . Вимірюють ТЕРС на виході термоелемента, цифровий код якої буде мати значення

$$N_3 = K_3 S \left\{ \alpha_1 (1 + \gamma_1'') \left[T_X + \frac{0,5 I_0^2 R + \alpha_1 (1 + \gamma_1'') T_X I_0}{\lambda \cdot l} \right] - \alpha_2 T_2 \right\} + \delta_1'', \quad (16)$$

де γ_1'' і δ_1'' – значення мультиплікативної і адитивної похибок термоелемента в точці $(T_X + \Delta T)$.

Оскільки примусове охолодження і нагрівання робочого кінця термоелемента здійснюється в невеликих межах і протягом досить малого часу Δt , то похибки трьох вимірювань можна вважати однаковими

$$\gamma_1 = \gamma_1' = \gamma_1''; \quad \delta_1 = \delta_1' = \delta_1''. \quad (17)$$

Виходячи з рівнянь (15) і (16), обчислюють різницю кодів

$$N_3 - N_2 = 2 K_3 S \alpha_1^2 (1 + \gamma_1)^2 T_X I_0 / \lambda \cdot l. \quad (18)$$

Використовуючи рівняння (14), (15) і (16), обчислюють значення цифрового коду, який відповідає величині зміни ТЕРС термоелемента від виділення в ньому теплоти Джоуля

$$N_2 + N_3 - 2N_1 = K_3 S \alpha_1 (1 + \gamma_1) I_0^2 R / \gamma \cdot l. \quad (19)$$

Якщо тепер поділити вираз (18) на квадрат виразу (19), то отримаємо відношення

$$\frac{N_3 - N_2}{(N_2 + N_3 - 2N_1)^2} = \frac{2 T_X \lambda \cdot l}{I_0^3 R^2 K_3 S}, \quad (20)$$

звідки температура робочого кінця термоелемента

$$T_X = \frac{(N_3 - N_2) I_0^3 R^2 K_3 S}{2 \cdot (N_2 + N_3 - 2N_1)^2 \lambda \cdot l}. \quad (21)$$

Підставляючи у вираз (21) значення температури $T_1 = T_X$ з (2), отримаємо вираз для вимірюваної потужності НВЧ

$$P_X = \frac{(N_3 - N_2) I_0^3 R^2 K_3 S}{2 \cdot (N_2 + N_3 - 2N_1)^2 K_1 K_2 \lambda \cdot l}. \quad (22)$$

З виразу (22) випливає, що отримане значення НВЧ потужності не залежить від коефіцієнта Зеєбека, який визначає чутливість термоелемента, від коефіцієнта Пельтьє, який визначає інтенсивність додаткового охолодження та нагрівання робочого кінця, від адитивної і мультиплікативної похибок, які відображають зміну параметрів термоелемента в процесі його тривалої експлуатації в умовах дестабілізуючих факторів при певних рівнях вимірюваної потужності (температури), а також від ступеня нелінійності статичної характеристики термоелемента.

На залишкову похибку кінцевого результату, як видно з формули (22), може впливати лише нестабільність коефіцієнта підсилення K_3 підсилувача 8 та чутливості S аналого-цифрового перетворювача 9. Але виконання цих ланок вимірювального тракту на сучасній

елементній базі дозволяє схемним шляхом досить точно стабілізувати ці коефіцієнти і вважати їх з певним наближенням постійними величинами.

Тепер, якщо скористатися результатами калібрування вимірювача потужності НВЧ на початку його експлуатації, які були занесені в пам'ять контролера 10, то вираз для відомої потужності НВЧ P_0 калібрування буде мати аналогічний вигляд

$$P_0 = \frac{(N_3' - N_2') I_0^3 R^2 K_3 S}{2 \cdot (N_2' + N_3' - 2N_1')^2 K_1 K_2 \lambda \cdot l}. \quad (23)$$

Якщо взяти відношення лівої та правої частини рівнянь (22) і (23), то отримаємо

$$\frac{P_X}{P_0} = \frac{(N_3 - N_2)(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2 + N_3 - 2N_1)^2}, \quad (24)$$

звідки вимірювальна потужність

$$P_X = \frac{(N_3 - N_2)(N_2' + N_3' - 2N_1')^2}{(N_3' - N_2')(N_2 + N_3 - 2N_1)^2} P_0. \quad (25)$$

Значення контрольованої НВЧ потужності обчислюється за допомогою мікропроцесорного контролера 10 за формулою (25) і подається в цифровій формі на табло індикатора ІЗ.

Як видно з формули (25), значення шуканої НВЧ потужності визначається тільки значеннями цифрових кодів ТЕРС термоелемента і не залежить від змін параметрів та похибок термоелемента з нелінійною статичною характеристикою при нестабільній температурі T_2 його вільних кінців.

1. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ. М., 1986. 2. Ярышев Н.А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. М., 1990. 3. Иорданишвили Е.К., Бабин В.П. Нестационарные процессы в термоэлектрических и термомагнитных системах преобразования энергии. М., 1983.

УДК 621.315.592

Ю.М. Білинський, О.С. Захар'яш, П.С. Кособуцький, Т.В. Лахоцький
Національний університет "Львівська політехніка",
кафедра фізики

ОПТИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СЕЛЕНІДУ ЦИНКУ

© Білинський Ю.М., Захар'яш О.С., Кособуцький П.С., Лахоцький Т.В., 2001

Наведено результати досліджень оптико-механічних властивостей селеніду цинку. Проведено порівняльний аналіз фізичних властивостей селеніду цинку монокристалічного, полікристалічного та матричного типів, а також оптичної кераміки (КО-4).

The results of tests of optic and mechanical properties of zinc selenide is presented in this paper. The comparison analysis of zinc selenide of monocrystalline, polycrystalline and matrix type and optic ceramics (КО-4) is carried out.

Розвиток лазерної техніки зумовив необхідність одержання оптичних матеріалів, прозорих в інфрачервоній (ІЧ) області спектра, які б мали високу механічну та променеву стійкість та були інертними до атмосферного середовища.