

УДК 537.312.62

PACS number(s): 67.57.Bc; 68.35.Md; 82.65.D; 68.65.+g

## ОСОБЛИВОСТІ ДІАГНОСТИКИ ТЕПЛОВИХ КІНЕТИЧНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ У РЕЖИМІ ПЕРІОДИЧНОГО ІМПУЛЬСНОГО НАГРІВАННЯ ПЛІВКИ

Н. Аленькіна, Ф. Недопьокін, Ю. Ніколаєнко<sup>1</sup>, А. Пігур<sup>1</sup>

*Донецький національний університет  
пр-т Театральний, 13, 83055 м. Донецьк, Україна*

*<sup>1</sup>Донецький фізико-технічний інститут НАНУ ім.Галкіна  
вул. Р. Люксембург, 72, 83114 м. Донецьк, Україна  
e-mail: [nik@kinetic.ac.donetsk.ua](mailto:nik@kinetic.ac.donetsk.ua)*

За допомогою чисельного моделювання часової функції температури нагрівання плівки одношарової плівкової структури доведено, що для коректної оцінки теплових кінетичних коефіцієнтів підкладки в багатоімпульсному режимі вимірювань необхідний облік процесів теплоперенесення на інтерфейсі підкладка-термостат.

*Ключові слова:* часова залежність, теплові кінетичні коефіцієнти, мікрохвильове випромінювання, тепловий опір.

Нестационарні методи вимірювання теплових кінетичних коефіцієнтів (ТКК) у твердотільних зразках є привабливими з погляду технічної простоти, однак не належать до точних, їх застосовують тільки для оцінок порядку величин [1,2]. Цей погляд виявляється під час вивчення й актуальніших сьогодні характеристик, таких як тепловий опір інтерфейсу плівка-підкладка в одношарових плівкових структурах [3-5].

Після появи [4,5] з діагностики ТКК у плівкових структурах з'ясували, що головні труднощі нестационарних методів, які полягають у дотриманні модельної точності та обліку особливостей квазістационарних процесів теплоперенесення, сьогодні легко перебороти завдяки комп'ютерному моделюванню. Наша мета - розглянути особливості організації найпростішої процедури вимірювань у режимі періодичних прямокутних імпульсів потужності, що нагрівають плівку, і одержання значень ТКК із точністю, близькою до апаратурної.

В основі методу [4,5] є використання плівки одночасно як нагрівача та термометра. Температура плівки контрольована її електропровідністю. Тому вона за чотиризондовою схемою гальванічно пов'язана з джерелом електричного струму і вимірником зниження напруги. Періодичне нагрівання плівки виконують імпульсами мікрохвильової потужності зі шпаруватістю 2. Тривалість імпульсів варіює в широких межах ( $t_0=10^{-7}$  - 30 s).

Фізична модель [4], що чисельно модельована на ПК, враховує однорідне нагрівання плівки й одновимірний потік тепла в системі плівка-підкладка-термостат. Відповідні рівняння мають вигляд

$$c_f \rho_f V_f (\partial T_f / \partial t) = -(S \lambda_{fs})(T_f - T_s(x=0, t)) + P_j; \quad (1)$$

$$c_s \rho_s (\partial T_s / \partial t) = \lambda_s (\partial^2 T_s / \partial x^2). \quad (2)$$

де  $c_f$  і  $c_s$  - питома теплоємність матеріалу плівки і підкладки;  $\rho_f$  і  $\rho_s$  - густина матеріалу плівки і підкладки,  $S$  - площа плівки;  $\lambda_{fs}$  - теплопровідність інтерфейсу плівка - підкладка;  $P_j$  - джоулева потужність;  $\lambda_s$  - коефіцієнт питомої теплопровідності підкладки;  $V_f$  - об'єм плівки.

Початкова і граничні умови задають у вигляді:

$$T_f = T_s = T_0, \quad t=0 \quad (3)$$

$$\lambda_s (\partial T_s / \partial x) = \lambda_{fs} (T_f - T_s), \quad x=0 \quad (4)$$

$$\lambda_s (\partial T_s / \partial x) = \lambda_{st} (T_s - T_0), \quad x=D \quad (5)$$

Точка  $x=0$  є на межі плівка-підкладка. Вісь  $x$  спрямована перпендикулярно до площини плівки, а точка  $x=D$  відповідає межі підкладка-термостат.

В експерименті умова для одновимірного потоку тепла в плівковій структурі забезпечена вимірюваннями у вакуумі. Втрати тепла з поверхні плівки внаслідок випромінювання виявляються малими [5]. Для плівок субмікронної товщини проблема щодо малої глибини скін-шару звичайно не виникає. Процеси, пов'язані з градієнтом температури по товщині плівки через однобічний стік тепла, також не враховані моделлю, оскільки вони мають ще менший час і температурну амплітуду та є за межами можливостей звичайної вимірювальної техніки. Вимога до однорідності нагрівання всієї поверхні плівки (якщо не створені спеціальні умови для опромінення) фактично є обмеженням на її поперечний розмір, що повинен бути набагато менший від довжини хвилі. Передбачають також, що коефіцієнти теплопровідності меж поділу  $\lambda_{fs} = (SR_{fs})^{-1}$  і  $\lambda_{st} = (SR_{st})^{-1}$  ( $R_{st}$  - тепловий опір інтерфейсу підкладка-термостат) є лінійаризованими на малій ділянці  $\Delta T$  функціями температури. Це необхідно для того, щоб не враховувати залежність  $P_j(T)$ . Крім того, ми не розглядаємо ефекти нестійкості, пов'язані з мимовільним розігріванням плівки, що можуть виникати, наприклад, унаслідок різкої залежності  $P_j(T)$  в області надпровідного переходу за невеликого вибору експериментальних умов.

Функція  $\Delta T_f(t)$  для поширених ВТСП і манганітових плівкових структурах займає три-п'ять порядків по температурі і сім-дев'ять порядків за часом. На рис. 1 зображено криві  $\Delta T_f(t)$ , розраховані для плівкової структури з величинами ТКК, що відповідають манганітовмісній плівці на стандартній монокристалічній підкладці  $\text{LaAlO}_3$  [4]. Для реєстрації такої залежності зручно використовувати швидкодіючий 10-розрядний АЦП з таймером, що, відповідно, може записувати дані з точністю 0,1%. Оскільки, відносна точність вимірювання напруги в приладах на кожній межі зменшується зі зменшенням вимірюваної величини, для відтворення функції  $\Delta T_f(t)$  у лінійному масштабі буде потрібно не менше п'яти-шести окремих ділянок. Нагадаємо, що реєстрація всієї кривої  $\Delta T_f(t)$  необхідна для одержання правильних значень ТКК підкладки (через специфіку вигляду функції  $\Delta T_f(t)$  у масштабі  $\tau_2$ ), а також оцінки теплового опору плівка-підкладка навіть у

тому випадку, коли апаратурні можливості не дають змоги повноцінно зареєструвати ділянку кривої в масштабі часу  $\tau_1$  [4]. Тут  $\tau_1$  і  $\tau_2$  - сталі часу, що характеризують устанавлення стаціонарного теплоперенесення на інтерфейсі плівка - підкладка і на товщині підкладки.

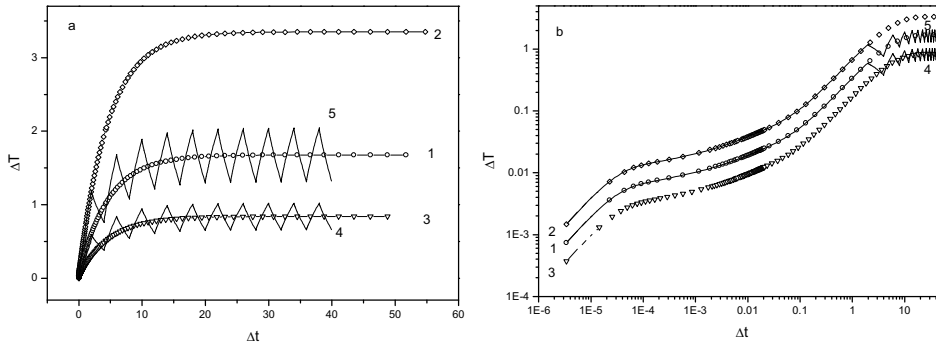


Рис. 1. Результат розрахунку часової залежності температури нагрівання плівки в одно- (1-3) та багатоімпульсному (4,5) режимі.

Криві 1-3 на рис.1,а і b, розраховані в режимі одноразового ввімкнення потужності. Криві 2 і 3 від кривої 1 відрізняються значенням  $P_j$ , відповідно, збільшеним і зменшеним удвічі. Криві 4 і 5 відповідають багатоімпульсному режиму з тривалістю імпульсу  $t_0=5\tau_2$ . Як бачимо, за досить тривалого впливу імпульсів потужності в структурі усталюється квазістаціонарний режим теплоперенесення за якого середня температура плівки збігається з температурою  $T_f$  в одноімпульсному режимі зі зниженим удвічі рівнем потужності, що не дивно, оскільки просто відображає факт зменшення середньої потужності за рахунок шпаруватості імпульсів. Ми цю особливість використовували для зменшення часу розрахунків у разі малих тривалостей імпульсу. Тобто процедура розрахунку включала перший імпульс зі зниженим удвічі рівнем потужності і тривалістю, достатньою для усталення в системі стаціонарного теплоперенесення (порядку  $\tau_3$  - сталої часу релаксації теплового потоку на інтерфейсі підкладка-термостат). Потім йшла невелика серія коротких імпульсів зі шпаруватістю 2 і повною потужністю. У результаті виходив квазістаціонарний режим, реєстрований в експерименті.

Отже, особливістю режиму послідовності імпульсів потужності є зміщення середньої температури структури. Зміщення  $\Delta T$  залежить від тривалості імпульсів і при  $t_0$  порядку  $\tau_1$  вона приблизно дорівнює  $(\Delta T_2 + \Delta T_3)/2$  [4]. З урахуванням виконання строгої нерівності  $\tau_3 \gg \tau_2 \gg \tau_1$  за короткий час імпульсу температура в структурі може змінюватися практично тільки на межі плівка-підкладка. В підкладці та на інтерфейсі підкладка-термостат устанавиться стаціонарне теплоперенесення зі сталим потоком.

Ці дві обставини - додаткова різниця температур і сталий тепловий потік у структурі - необхідно враховувати під час опрацювання даних у багатоімпульсному режимі. З урахуванням нерівності  $\Delta T_3 \gg \Delta T_2 \gg \Delta T_1$  (див. рис. 1), що добре виконується для більшості стандартних структур,

температурне зміщення  $\Delta T$  можна оцінити  $\Delta T_3/2 = P_j R_{st}/2$ , а амплітуду лінійного убування температури плівки -  $n = P_j / (2c\rho v) = \Delta T_3 / 2\tau_3$ .

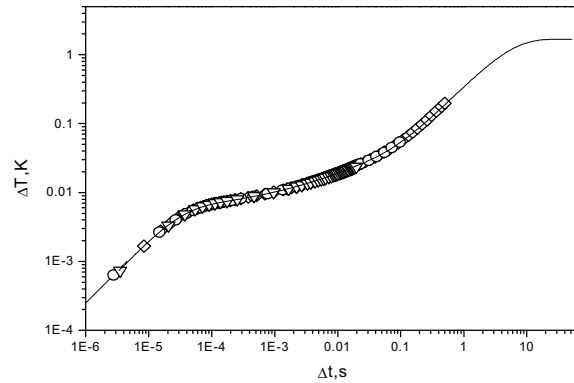


Рис. 2. Результат розрахунку часової залежності температури нагрівання плівки в одно- (суцільна крива) та багатоімпульсному режимі (геометричні фігури залежно від тривалості).

На рис. 2 показано результат суміщення останньої зростаючої ділянки кривої, розрахованої в багатоімпульсному режимі за тривалостей імпульсу  $t_0 = 0.04\tau_2$  (трикутники);  $0.2\tau_2$  (окружності);  $\tau_2$  (ромби), перебудованої у вигляді  $\Delta T_f(\Delta t)$  із кривою  $\Delta T_f(t)$  в одноімпульсному режимі. Без обліку лінійної за температурою домішки одержати прийнятну точність неможливо. Навпаки, з її обліком функцію  $\Delta T_f(t)$  відтворюють ділянками  $\Delta T_f(\Delta t)$  з гарною точністю аж до часів, коли  $t_0$  стає порівнянною за значенням з  $\tau_3$ .

На рис. 3,а в разі багатоімпульсного режиму, після суміщення останньої наростаючої ділянки кривої  $\Delta T_f(\Delta t)$  з кривою  $\Delta T_f(t)$  в одноімпульсному режимі

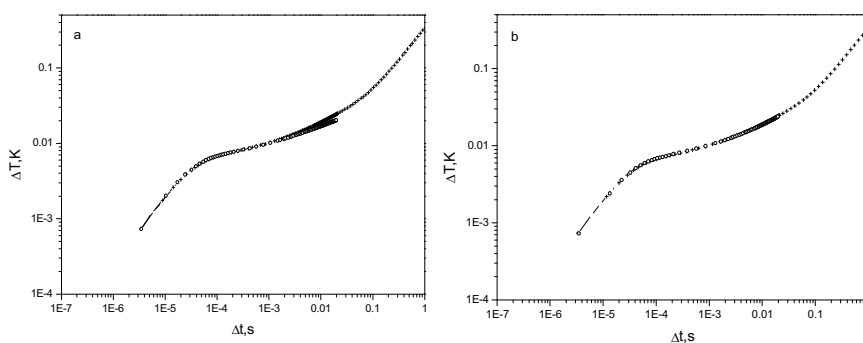


Рис. 3. Результат суміщення часових залежностей температури нагрівання плівки в одно- (хрестики) та багатоімпульсному (круги) режимах.

простежується розбіжність у масштабі часу  $\tau_2$ . Різниця з'являється через особливості багатоімпульсного режиму. Прямий облік  $\Delta T_3$  необхідний у зв'язку з можливістю різкої залежності ТКК підкладки від температури. Окрім цього, в разі при тривалості імпульсів близько  $\tau_2$  та більше наявність додаткового теплового потоку через межу підкладка-термостат потребує обліку лінійної добавки  $dT/dt = \Delta T_3 / 2\tau_3$ . З її урахуванням криві добре сполучаються, що відображено на рис. 3,б. Ділянку ж у максимальному тимчасовому масштабі  $\tau_3$  рекомендують вимірювати в режимі одноразового ввімкнення потужності.

На базі імпульсної мікрохвильової техніки розвинуто метод вимірювання ТКК в одношарових плівкових структурах. Від інших методів аналізу болометричного відгуку плівок він відрізняється кількісним обліком не тільки часових, а й амплітудних характеристик температури плівки в процесі її нагрівання, а також від методів вимірювання ТКК тим, що плівка водночас використовується як нагрівач і як термометр.

Розвинута вище методика вимірювань разом із програмою машинного розрахунку придатна для швидкої діагностики ТКК плівкових структур і контролю змін, що відбуваються в перехідному шарі плівки залежно від різних технологічних режимів. У цілому вона може бути корисна для оптимізації плівкових болометрів за співвідношенням між вольт-ватною чутливістю і швидкодією, а також для відділення внеску прямих теплових ефектів під час дослідження електродинамічних явищ у напівпровідникових і металевих плівках та явищ вихрової динаміки у надпровідникових плівках.

- 
1. Берман Р. Теплопроводность твердых тел. Москва: Мир, 1979. С. 286.
  2. Zang Z. M., Frenkel A. // J. Superconductivity. 1994. Vol. 7, N6. P. 871-884.
  3. Prasher R. S., Phelan P. E. // J. Superconductivity. 1997. Vol. 10, N5. P. 473-484.
  4. Гришин А. М., Медведєв Ю. В., Ніколаєнко Ю. М. Діагностика теплових кінетичних коефіцієнтів в  $YBa_2Cu_3O_{7-6}/LaAlO_3$  тонкоплівкових болометрах // ФТТ. 1999. Т. 41, Вип. 8. С. 1377-1384.
  5. Медведєв Ю. В., Ніколаєнко Ю. М., Гришин А. М., Харцев С. І. Діагностика теплових кінетичних коефіцієнтів для оптимізації характеристик плівкових болометрів // ЖТФ. 2002. Т. 72, Вип. 1. С. 117-124.

**PARTIQLARITIES OF DYAGN OSTICS OF THERMAL KINETIC  
COEFFICIENT IN THE REGIME OF PERIODICAL PULSE HEATING OF  
THE FILM**

**N. Alenkina, F. Nedopekin, Yu. Nikolaenko<sup>1</sup>, A. Pigur<sup>1</sup>**

*Donetsk National University, physical faculty, Teatralniy, 13, 83055, Donetsk, Ukraine*

<sup>1</sup>*Donetsk Physico-Technical Institute of NASU,*

*R.Luxemburg 72, 83114, Donetsk, Ukraine*

*e-mail: [nik@kinetic.ac.donetsk.ua](mailto:nik@kinetic.ac.donetsk.ua)*

The particularities of multi-pulse regime of measurement of time function of film temperature of monolayer film structures were investigated with a help of digital computer modeling. We have demonstrated for correct estimation of thermal kinetic coefficient of substrate the thermal process in the substrate- thermostat interface must be take into account.

*Key words:* times dependence, thermal kinetic coefficient, microwave power, thermal resistance.

Стаття надійшла до редколегії 23.05.2002

Прийнята до друку 06.02.2003