

УДК 539.2

Мар’ян Галушак¹, Андрій Ткачук^{1,2}, Олександр Криницький^{1,2}

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,

²Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
м. Івано-Франківськ, Україна

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТОНКОПЛІВКОВИХ КОНДЕНСАТІВ

Щоб оцінити стан тонкоплівкових конденсатів, потрібно виміряти їх термоелектричні параметри: теплопровідність, електропровідність, коефіцієнт термо-е.р.с. Тому доцільно описати основні методи вимірювання термоелектричних параметрів тонкоплівкових матеріалів.

Вимірювання теплопровідності тонких плівок важливе як для конструювання елементів мікроелектронних схем, плівкових приймачів випромінювання і т. д., так і для досліджування фізичних особливостей плівкового стану. Ці вимірювання ускладнені тим, що у зв’язку з малою площею поперечного перерізу зразків, температурне поле в них порушене неконтрольованим відводом тепла дротинами термопар або термометрів опорів, які використовуються для вимірювання температури.

Опишемо особливості визначення теплопровідності тонких плівок.

Перший за все розглянемо абсолютний метод вимірювання теплопровідності [1]. На вимірюваний зразок, який являє собою непровідну плівку, наноситься допоміжний шар S-подібної форми металу чи напівпровідника (рис. 1). При пропусканні через полоску l струму I відбувається її нагрів, який залежить від підведеної електричної потужності і теплового потоку, який поширюється від полоски l до ізотермічних електродів 4.

Використання S-подібної форми допоміжного шару виключає шунтування теплового потоку у вимірюваній плівці цим шаром. Відносно невелика втрата тепла через перемички 2 враховується поправочним членом у формулі для визначення теплопровідності.

Вимірювання проводяться в ізотермічній камері вакуумованого кріостата. Тут же проводиться наплення досліджуваних металічних і напівпровідникових плівок у вакуумі 10^{-7} Па.

Для визначення коефіцієнта теплопровідності провідного шару, потрібного для обчислення поправки на краєві ефекти, використовувалась запропонована методика. Наплення плівок в тій же камері, що і проводиться вимірювання, підвищує точність вимірювання за рахунок збереження умов, в яких проводилось дослідження властивостей підкладки, крім того, зменшується імовірність забруднення підкладки.

Коефіцієнт теплопровідності розраховується за формулою:

$$\kappa = \left(\frac{I^2 R_0^2 \beta l}{2Ld\Delta R} - k \right) \left(1 - \frac{2}{nL} \right), \quad (1)$$

де R_0 – опір полоски l (рис. 1) при відсутності струму нагріву; β – температурний коефіцієнт опору провідного шару; ΔR – зміна опору полоски l під дією струму I ; k – поправка на випромінювання $k = 2(l^2 + lb)\alpha / d$; α – коефіцієнт тепловіддачі за рахунок випромінювання; $\left(1 - \frac{2}{nL}\right)$ – поправка на краєві ефекти $n^2 = (2\kappa d + 2l^2\alpha) / bl(\kappa_n\alpha + \kappa d)$; κ_n – теплопровідність провідного шару. Величини l, L, b, d вказані на рис. 1.

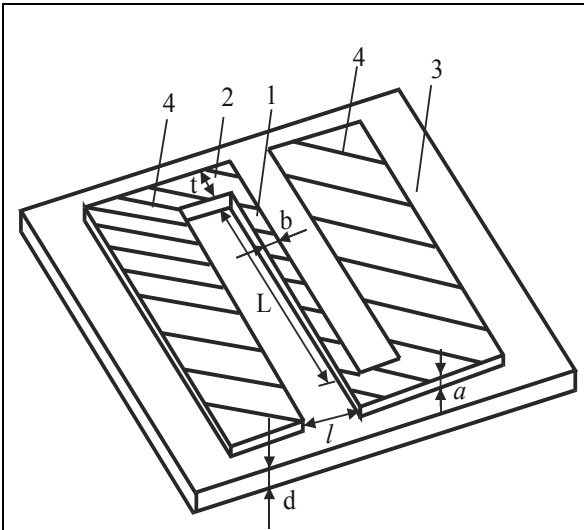


Рисунок 1 -Схема тонкоплівкового зразка для вимірювання теплопровідності: 1 — вузька провідна полоска; 2 — перемичка, 3 — підкладка; 4 — ізотермічні електроди, L — довжина провідної полоски, l — ширина зазору, b — ширина провідної полоски, a — товщина провідного шару, d — товщина підкладки, t — ширина перемички.

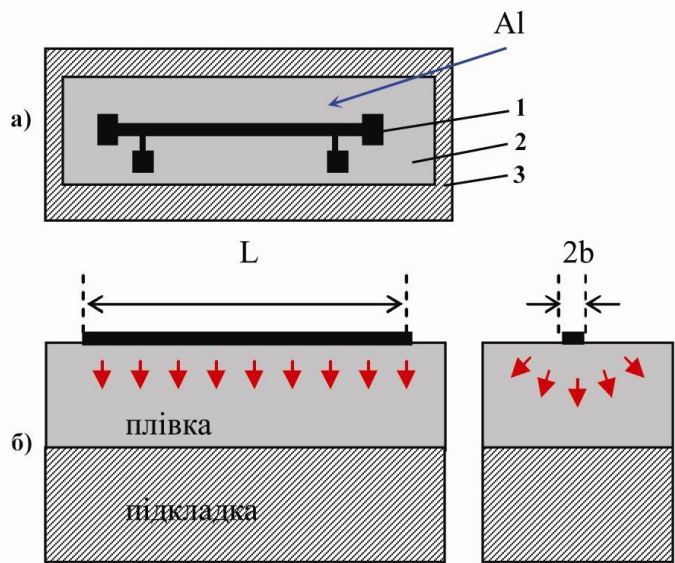


Рисунок 2 - Схема досліджуваної структури для вимірювання теплопровідності тонких плівок (а) та розподіл теплового поля (б): 1 — металева смужка, 2 — досліджуваний зразок (плівка), 3 — підкладка.

Три омега [2] є другим методом по вимірюванні термоелектричних параметрів тонкоплівкових конденсатів. Він одержується шляхом пропускання змінного струму з частотою ω через лінію метал нагрівач, який був безпосередньо нанесений на електроізоляційний зразок (рис. 2). Цей струм нагріває зразок з частотою 2ω завдяки джоулевого нагріву, виробляючи коливання температури також при частоті 2ω з амплітудою, скажімо, $\Delta T_{2\omega}$, і фазовою різницею. Оскільки опір чистих металів зростає лінійно з температурою, коливання температури створює осциляції опору в лінії металу з частотою 2ω . Осциляції опору при 2ω , з джерелом струму при частоті ω , створюють невеликі осцилюючі сигнали напруги на лінії металів з частотою 3ω [2].

Коефіцієнт теплопровідності розраховується за формулою:

$$\kappa = \frac{U^3 \cdot \ln \omega_2 / \omega_1}{4\pi LR^2 (U_{3\omega_1} - U_{3\omega_2})}, \quad (2)$$

де U – напругою живлення, $U_{3\omega}$ – третя гармоніка напруги, пов’язана з термічними втратами плівки, L – довжина металевої смужки-нагрівача, R – опір металевої смужки-нагрівача, індекси 1 і 2 стосуються двох різних частот.

Третій лазерний флеш-метод ґрунтується на вимірюванні часу поширення теплової хвилі, створеної лазерним імпульсом від однієї сторони плівки до протилежної (рис. 3). Використовуючи теорію, яка ґрунтується на одномірній моделі поширення тепла у напівобмеженому тілі, за умов відносно невеликого нагрівання, можна визначити коефіцієнт теплопровідності досліджуваного зразка [3].

Вираз для коефіцієнта теплопровідності записується так [3]:

$$\kappa = \rho CD, \quad (3)$$

де ρ - густина речовини досліджуваних плівок, C – теплоємність яка є сталюю, оскільки вона визначається розігрівом зразка, який в експерименті є не більшим ~ 1 К, D – температуропровідність, яка визначається половинним часом $t_{1/2}$, і товщиною зразка d , необхідним для досягнення T_{max} , $D = 1,38d^2 / \pi^2 t_{1/2}$.

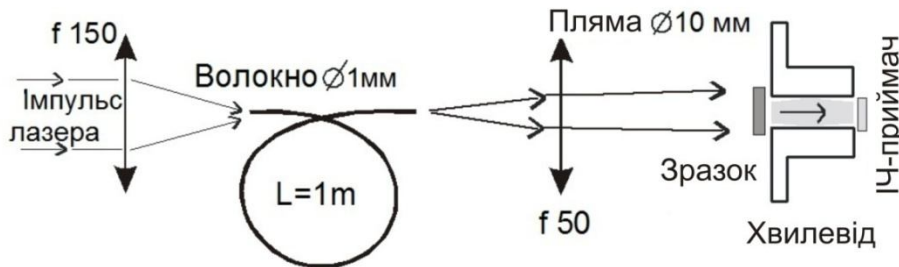


Рисунок 3 - Оптична система установки вимірювання теплопровідності тонких плівок лазерним флеш-методом.

1. Ю.А. Бойков, Б.М. Гольцман, С.Ф. Синенко, Приборы и техника эксперимента **2**, 230 (1975).
2. D.G. Cahill, Rev. Sci. Instrum. **61**, 802 (1990).
3. W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Butler, G.L. Abbot, J. Appl. Phys. **32**, 1679 (1964).