

УДК 535.341.08

ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПОГЛИНАННЯ ТОНКОПЛІВКОВИХ ПОКРИТЬ ФОТОТЕПЛОВИМ МЕТОДОМ

Г. Петровська, І. Демкович

*Національний університет "Львівська політехніка"
вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна
galina_petrovska@mail.ru*

Наведено результати розробки безконтактного неруйнівного методу вимірювання поглинання тонкоплівкових покриттів, що ґрунтується на використанні фототеплових ефектів. Поглинуту потужність визначено за розміром теплової лінзи, яка виникає у повітрі поблизу поверхні досліджуваного зразка в разі опромінення його пучком потужного лазера з відомим просторово-часовим розподілом випромінювання. Для реєстрації фазових змін, спричинених тепловою лінзою, використано двоканальний сканувальний інтерферометр Фабрі-Перо. У випадку використання для опромінення досліджуваного зразка аргонового лазера з потужністю 5 Вт чутливість під час вимірювання коефіцієнта поглинання становить 0,005 % за відносної похибки вимірювань не більше 10 %.

Ключові слова: тонкоплівкове покриття, коефіцієнт поглинання, інтерферометр Фабрі-Перо, фототепловий метод.

Підвищення якості та надійності лазерних оптоелектронних систем можливе в разі використання в них високоякісної оптики, зокрема оптики, що має низьке поглинання. В оптоелектронних системах, де використовують потужні лазери, поглинання призводить до зміни просторових параметрів пучків та залежності цих параметрів від потужності випромінювання, що значно ускладнює керування пучками. Високе поглинання за критичних потужностей випромінювання може призводити також до незворотних термодформацій та руйнування оптичних лазерних елементів.

Проблеми, пов'язані з отриманням високоякісної лазерної оптики, передбачають створення високочутливих неруйнівних методів контролю як об'ємного поглинання в оптичних прохідних елементах, так і поглинання в оптичних тонкоплівкових покриттях.

Останнім часом активно розвиваються фототеплові методи вимірювання теплофізичних характеристик матеріалів, у тому числі й поглинання [1–5]. Чутливість цих методів залежить від теплофізичних та оптичних характеристик матеріалу досліджуваного зразка, потужності джерела нагрівання, а також від

методу детектування фототеплових змін. Оскільки потужність опромінення можна змінювати в широких межах, то чутливість фототеплових методів може бути дуже високою навіть для матеріалів, які мають слабку залежність фізичних та оптичних характеристик від температури.

Однак сьогодні фототеплові методи потребують подальшої розробки та вдосконалення, зокрема, їх адаптації для дослідження специфічних оптичних елементів, підвищення чутливості і точності вимірювань під час дослідження слабкопоглинальних елементів тощо. Ми наведемо результати розробки чутливого безконтактного неруйнівного методу вимірювання коефіцієнта поглинання тонкоплівкових покриттів, що ґрунтується на використанні фототеплових ефектів.

Принцип вимірювання. Якщо досліджуваний зразок опромінювати потужним лазерним випромінюванням, то внаслідок поглинання частини випромінювання в ньому виникають теплові поля, просторово-часовий розподіл яких залежить від параметрів лазерного випромінювання та від характеристик матеріалу зразка. Локальне підвищення температури зразка призводить до виникнення різних фотостимульованих змін у ньому та навколишньому середовищі: термодформації поверхні, інфрачервоного випромінювання, теплової лінзи у зразку та повітрі, акустичної хвилі тощо. В працях [3–5] розроблено фототеплові методи діагностики оптичних і теплофізичних характеристик матеріалів за експериментально зареєстрованими тепловими полями чи полями деформацій, що виникають у разі опромінення досліджуваного зразка потужним лазерним пучком з відомим просторово-часовим розподілом випромінювання.

Однак для контролю поглинання тонкоплівковими покриттями фототепловим методом доцільною є реєстрація лише підвищення температури на поверхні опромінюваного зразка. Зазначимо, що поблизу опромінюваної поверхні у повітрі внаслідок локального нагрівання оптичної деталі утворюється тепла лінза, розмір якої залежить від поглинутої потужності. На рис. 1 схематично зображена тепла лінза у повітрі та інтерферограма такої лінзи, зареєстрована за допомогою інтерферометра Майкельсона.

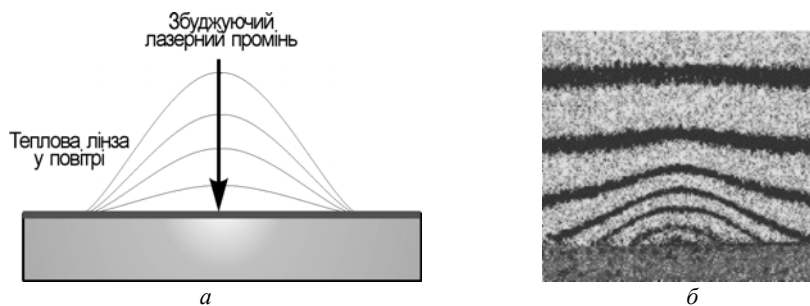


Рис. 1. Теплова лінза у повітрі: *a* – схематичне зображення; *б* – інтерферограма теплової лінзи

Отже, поглинуту потужність можна визначити за розміром теплової лінзи у повітрі поблизу поверхні досліджуваного зразка в разі опромінення його пучком потужного лазера з відомим просторово-часовим розподілом випромінювання.

На рис. 2 показана схема установки для вимірювання поглинання тонкоплівкових покриттів, у якій для реєстрації теплової лінзи використано двоканальний сканувальний інтерферометр Фабрі-Перо. Досліджуваний зразок 3 опромінювали пучком потужного лазера, його потужність контролювали фотоприймачем 11. Як тестувальний використано одночастотний He-Ne-лазер 2. За допомогою подільника 5 пучок лазера розділяли на два паралельні пучки, які надходять на вхід сканувального інтерферометра (дзеркала 6 та 7), причому один з пучків проходить паралельно до поверхні досліджуваного зразка безпосередньо через теплову лінзу (вимірювальний канал II), а другий – поза межами лінзи (опорний канал I).

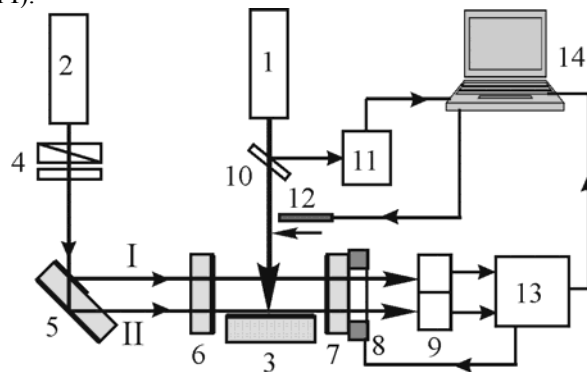


Рис. 2. Установка для вимірювання коефіцієнта поглинання тонкоплівкових покриттів: 1 – збуджувальний лазер, 2 – тестувальний лазер, 3 – досліджуваний зразок, 4 – оптичний затвор, 5 – подільник, 6, 7 – дзеркала сканувального інтерферометра Фабрі-Перо, 8 – п'єзокераміка, 9 – двоплощадковий фотодіод, 10 – подільник, 11 – фотоприймач, 12 – шторка, 13 – фазометр, 14 – ПК, I – опорний канал інтерферометра, II – вимірювальний канал

За допомогою сканувального інтерферометра Фабрі-Перо експериментально реєструють фазові зміни $\Delta\varphi_e(r)$, які виникають у вимірювальному каналі II в разі опромінення досліджуваного зразка 3 пучком потужного лазера 1. Для вимірювання фазових змін розроблено систему реєстрації зміщення інтерференційних смуг, принцип дії якої ґрунтується на використанні методу часових інтервалів [6, 7].

Сигнали з обох каналів сканувального інтерферометра реєструються за допомогою двоплощадкового фотодіода 9 і надходять на входи двох каналів формувального підсилювача, у якому формуються дві послідовності тонких прямокутних імпульсів. Різницю фаз між двома каналами інтерферометра реєструють фазометром 13. Фазометр – це мікропроцесорна система, яка вимірює різниці фаз між опорним та вимірювальним каналом інтерферометра. Часові діаграми, що ілюструють роботу фазометра, показані на рис. 3.

Перше вимірювання різниці фаз між двома каналами інтерферометра виконують за закритою шторкою, після чого відбувається автоматичне її відкриття, вимірювання потужності фотоприймачем 11 і, після часової

затримки, що забезпечує усталення стаціонарного теплового режиму, відбувається друге вимірювання різниці фаз.

Фазові зміни у вимірювальному каналі інтерферометра в разі виникнення у повітрі теплової лінзи, які зареєстровані експериментально,

$$\Delta\varphi_e(r) = \Delta\varphi_n - \Delta\varphi_o \quad (1)$$

де $\Delta\varphi_o$ та $\Delta\varphi_n$ – відповідно, початкова різниця фаз між двома каналами інтерферометра та різниця фаз після установаження теплової лінзи.

Початкову різницю фаз через часові інтервали (див. рис. 3) визначають так:

$$T = \frac{t_2 + t_3}{2} - \frac{t_1}{2}; \quad \Delta t = \frac{t_4 + t_5}{2} - \frac{t_1}{2};$$

$$\Delta\varphi_o = \arccos\left(\frac{\Delta t}{T}\right) = \arccos\left(\frac{t_2 + t_3 - t_1}{t_4 + t_5 - t_1}\right). \quad (2)$$

Різницю фаз $\Delta\varphi_n$ визначають аналогічно після встановлення стаціонарної теплової лінзи в разі неперервного опромінення досліджуваного зразка.

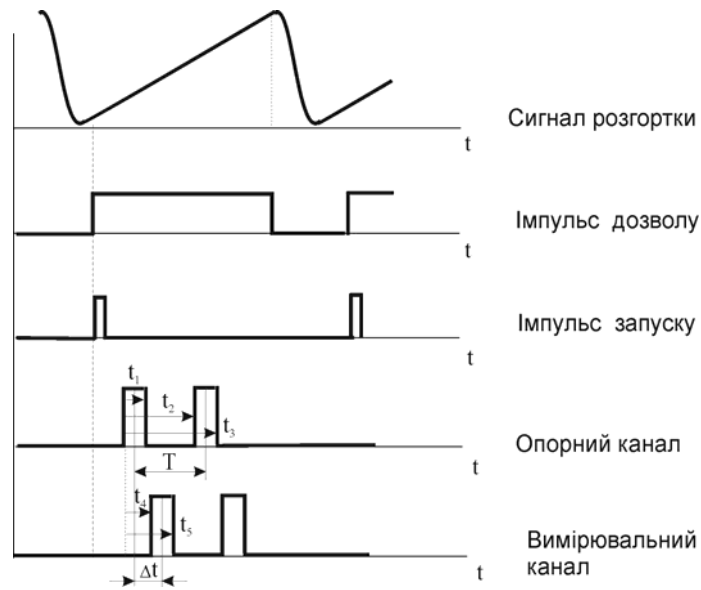


Рис. 3. Часові діаграми роботи фазометра

Принцип визначення коефіцієнта поглинання тонкоплівкового покриття полягає в тому, що змодельоване математично поле температур i , відповідно, зумовлені ним фазові зміни у вимірювальному каналі інтерферометра за допомогою математичних методів оптимізації [8] наближають до експериментально зареєстрованих фазових змін. Мінімум наступного функціонала відповідає найбільш імовірному значенню коефіцієнта поглинання:

$$\Phi = \int_0^l [\Delta\varphi_e(r) - \Delta\varphi_t(r, \alpha)]^2 dr, \quad (3)$$

де $\Delta\varphi_e(r)$ – експериментально зареєстрована зміна фази у вимірювальному каналі інтерферометра; $\Delta\varphi_t(r, \alpha)$ – зміна фази, розрахована теоретично для певного значення поглинання α :

$$\Delta\varphi_t(r, \alpha) = \frac{2\pi l}{\lambda} \cdot \gamma \int_0^l [T_2(r, \alpha) - T_1(r)]^2 dr, \quad (4)$$

де $T_1(r)$ і $T_2(r, \alpha)$ – розподіли температур у повітрі вздовж координати r у початковий момент часу і в заданий після взаємодії з потужним лазерним випромінюванням; l – геометрична довжина ходу променя у вимірювальному плечі інтерферометра; γ – коефіцієнт, який враховує температурний приріст показника заломлення повітря.

Розподіл температури на поверхні досліджуваного зразка $T_2(r, \alpha)$ розраховують числовими методами з використанням математичної моделі, яка описана в працях [3–5]. На підставі цієї математичної моделі розроблено програмне забезпечення, що дає змогу моделювати температурні поля, які виникають у зразку в разі дії на нього лазерного випромінювання з заданими просторово-часовими параметрами.

Для реалізації сканувального інтерферометра як перетворювача використано п'єзокоректор КП1-1, перевагою якого є змога отримання великих переміщень (у межах кількох довжин хвиль λ) без використання високовольтного джерела напруги: за частоти сканування близько 100 Гц переміщення на одну довжину хвилі λ досягають амплітудним значенням напруги близько 10 В. Це дає змогу використовувати для вимірювань прецизійну аналогову техніку і легко забезпечити диференційну нелінійність менше 0,5 %.

Для розширення діапазону вимірюваних величин та підвищення точності вимірювань змодельовано оптимальну функцію розгортки для п'єзокоректора сканувального інтерферометра, яка має велику лінійну ділянку та малий коефіцієнт гармонік [9].

Оцінка чутливості та точності методу. Чутливість методу значно залежить від точності вимірювання різниці фаз між двома каналами інтерферометра. Найбільш точне вимірювання можна отримати, якщо сигнали з виходу інтерферометра мають правильну та стабільну форму і велику шпаруватість. Однак якщо як тестувальний лазер використовують багаточастотний лазер, то якщо база інтерферометра Фабрі-Перо близько 5 см, відбувається зовнішня селекція поздовжніх мод резонатора вимірювального лазера, що зумовлює виникнення в каналах інтерферометра хибних імпульсів. У разі використання ж одночастотного тестувального лазера з низьким рівнем шумів чутливість фазометра досягає $\lambda/1000$.

Розроблений метод відрізняється високою чутливістю та точністю, дає змогу уникнути впливу розсіяного світла і не потребує калібрування. Експериментальні дослідження засвідчили, що в разі використання для опромінення аргонного лазера з потужністю 5 Вт та одночастотного гелій-неонового лазера як

тестувального, чутливість у разі вимірювання коефіцієнта поглинання тонкоплівкових покриттів становить 0,005 % за відносної похибки вимірювань не більше 10 %.

1. *Shannon M., Rubinsky B., Russo R.*, Detecting Laser Induced Phase Change at the Surface of Solids via Latent Heat of Melting with a Photothermal Deflection Technique J. // *Appl. Phys.* 1994. N 75. P. 1473–1485.
2. *Lee J., Kim D.*, Photothermal Methods for Measuring the Thermal Diffusivity of Microstructured Materials. // *Introduction Laser Processing & Laser Processing & Microscale Microscale Heat Transfer Lab. Heat Transfer Lab. μ -Therm-UCB Joint Symposium, July 29, 2002.*
3. *Петровська Г.А., Демкович І.В., Бобицький Я.В., Тоган М.М., Пашкевич Р.І.* Комплексний метод визначення поглинання оптичних матеріалів // *Укр. фіз. журн.* 2001. Т. 46. №8. С. 893–898.
4. *Петровська Г. А., Демкович І. В., Бобицький Я. В.* Фототепловий метод визначення коефіцієнта поглинання дзеркальних покриттів // *Вісник НУ “Львів. політехніка”*. Серія електроніка. 2005. № 532. С. 170–177.
5. *Petrovska H., Demkovych I., Bobitski Y.* The measurement photothermal method of mirrors covering absorption coefficient // *Proc. 7th International Conference on Optical Technologies, Optical Sensors and Measuring Techniques OPTO 2006 Nürnberg, Germany 2006*, P. 147–152.
6. А.с.СССР №1522865 Устройство для измерения дробной части интерференционной полосы / Мартыневич Г.А.(Петровская), Марусин Т.В., Тищенко П.А. Заявлено 29.02.88, № 4417450 МКИ G 01 B 9/02.
7. А.с.СССР №1468207 Цифровой фазометр / Мартыневич Г.А.(Петровская), Марусин Т.В., Тищенко П.А. Заявлено 13.07.87, № 4281969 МКИ G 01 R 25/08.
8. *Terry E. Shoup.* A practical guide to computer methods for engineers. N. J.: Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs. 1979. 238 с.
9. *Татарин В.Я., Петровська Г. А.*, Оптимізація функції розгортки п’єзокоректора сканувального інтерферометра // *Вісн. НУ “Львівська політехніка”*. Сер. електроніка. 2008. № 619. С.181–185.

APPARATUS FOR MEASUREMENT ABSORPTION OF THE THIN-FILM COATINGS BY THE PHOTOTHERMAL METHOD

G. Petrovska, I. Demkovych

*Lviv Polytechnic National University
Bandera Str., 12, 79013 Lviv, Ukraine
galina_petrovska@mail.ru*

The results of development of contactless nondestructive technique for measuring low absorption in thin-film coatings are presented. The absorbed laser power is determined by characteristics of a thermal lens appearing in the air near

the surface of a sample under test in case if the latter is irradiated by a powerful laser beam with a known spatial-temporal emission distribution. The phase changes imposed by the thermal lens are detected by a two-channel scanning Fabry-Perot interferometer. The experimental researches show that, if an argon laser with the power of 5 W is used for the irradiation, the sensitivity of the measurements of absorption of thin-film coatings is 0.005%, with the relative error not larger than 10%.

Key words: thin-film coating, absorption, Fabry-Perot interferometer, photo-thermal method.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ФОТОТЕПЛОВЫМ МЕТОДОМ

Г. Петровская, И. Демкович

Национальный университет “Львовская политехника”

ул.С.Бандеры 12, 79013, Львов, Украина

galina_petrovska@mail.ru

Представлены результаты разработки бесконтактного неразрушающего метода измерения поглощения тонкопленочных покрытий, который основывается на использовании фототепловых эффектов. Поглощенная мощность определена по величине тепловой линзы, возникающей в воздухе у поверхности исследуемого образца при облучении его лучом мощного лазера с известным пространственно-временным распределением излучения. Для регистрации фазовых изменений, вызванных тепловой линзой, использовано двухканальный сканирующий интерферометр Фабри–Перо. При использовании для облучения исследуемого образца аргонового лазера мощностью 5 Вт чувствительность при измерении коэффициента поглощения составляет 0,005 % при относительной погрешности измерений не более 10 %.

Ключевые слова: тонкопленочное покрытие, коэффициент поглощения, интерферометр Фабри–Перо, фототепловой метод.

Стаття надійшла до редколегії 19.04.2010

Прийнята до друку 16.06.2010