



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 60440

(13) A

(51) 7 G01B9/021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ

ОПИС

ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДвидається під
відповідальність
власника
патенту

(54) СПОСІБ ВИМІРЮВАННЯ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ

1

2

(21) 2002065249

(22) 25 08 2002

(24) 15 10 2003

(46) 15 10 2003, Бюл. № 10, 2003 р.

(72) Кравченко Вілен Йосипович, Вербицький Володимир Павлович, Савенков Сергій Миколайович
(73) НАУКОВО-ВИРОБНИЧА ФІРМА ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "БІЕЛТ" ЛТД

(57) 1 Спосіб вимірювання шорсткості поверхні, який полягає в тому, що поверхню, що досліджується, освітлюють поляризованим випромінюван-

ням, виділяють фрагмент розсіяного поля, визначають його поляризацію, будують матрицю Мюллера, по елементах якої судять про шорсткість, який відрізняється тим, що матрицю Мюллера повертають до отримання симетричної матриці шляхом її математичного повороту або фізичного повороту поверхні.

2 Спосіб за п. 1, який відрізняється тим, що із матриці Мюллера виділяють її складову матрицю, яка не змінюється при математичному повороті або фізичному повороті поверхні, і за її значенням виносять рішення щодо шорсткості поверхні.

Вінахід відноситься до вимірювальної техніки, зокрема - оптичним методам вимірювання шорсткості поверхні полімерних оптичних елементів та плівок.

Для вимірювання шорсткості широко використовуються профілометри, оптичний або механічний щуп яких відслідковує профіль поверхні при переміщенні від однієї точки поверхні до іншої. Такі вимірювання вимагають багато часу і за їх допомогою не можливо провести вимірювання всієї поверхні.

Відомі також оптичні методи, які дозволяють визначити шорсткість всієї поверхні за відношенням дзеркально відбитої компоненти світла до розсіяної. Точність такого метода обмежується точністю вимірювання інтенсивності світла розсіяного у великий просторовий кут.

Шорсткість поверхні може бути визначена за зміною поляризації світла відбитого від поверхні, що досліджується. Наприклад за еліпсометричними параметрами χ та Δ (Петровский Г.Т. Доклады АН СССР, т. 290 №2 стр. 317-321 (1986)). Однак значення цих параметрів залежить не тільки від шорсткості поверхні, а і від властивостей матеріалу поверхні, що ускладнює визначення шорсткості поверхні.

Найближчим до метода, який заявляється, є спосіб визначення величини розсіювачів, які розташовані хаотично у просторі за значенням елементів матриці Мюллера цього простору (W. M.

McClain, Wen-ham Jeng, Biswajit Pati, Yaoming Shi, Duan Tian Appl. Optics V 33 №7, p. 1230-1241 (1994)). Відповідно до цього метода поверхню освітлюють поляризованим випромінюванням, визначають поляризацію відбитого випромінювання і будують матрицю Мюллера зразка, який досліджується. Порівнюють елементи матриці Мюллера з теоретичною матрицею, яка має вигляд

$$M \propto \frac{1}{\lambda^4} \begin{pmatrix} 1 & 1 & \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 & \left(\frac{d}{\lambda}\right) \\ 1 & 1 & \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 & \left(\frac{d}{\lambda}\right) \\ \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 & \left(\frac{d}{\lambda}\right)^4 & 1 & \left(\frac{d}{\lambda}\right)^5 \\ \left(\frac{d}{\lambda}\right) & \left(\frac{d}{\lambda}\right) & \left(\frac{d}{\lambda}\right)^5 & 1 \end{pmatrix}$$

де d - характерний розмір неоднорідності, λ - довжина хвилі випромінювання. Не важко бачити, що, знаючи довжину хвилі світла, за значенням, наприклад, елементу 41 побудованої матриці визначається характерний розмір неоднорідності поверхні, яка досліджується. Цей метод застосовується в першу чергу для визначення величини частинок, що розсіюють випромінювання, у розчинах. Якщо розміри частинок менші за довжину хвилі випромінювання і вони розташовані хаотично, то їх особисті властивості не позначаються на

(13) A

(11) 60440

(19) UA

значенні елементів матриці Мюллера. Однак, при визначенні шорсткості поверхні за цим методом поляризація відбитого випромінювання буде залежати як від геометрії поверхні, так і від її оптичних властивостей, наприклад, оптичної анізотропії. Якщо промінь послідовно відбивається від двох неоднорідностей поверхні, то таке відбиття еквівалентно проходженню променя через дві пластини з різною орієнтацією лінійної анізотропії. Матриця Мюллера, яка описує таку систему складається з матриці оптичної активності та лінійної анізотропії. У загальному випадку вона буде мати несиметричний вигляд, що ускладнює визначення шорсткості поверхні шляхом порівняння її матриці з теоретичною матрицею, яка має симетричний вигляд.

Задачею винаходу є підвищення точності визначення шорсткості поверхні.

Задача вирішується за рахунок того, що поверхню, що досліджується, освітлюють поляризованим випромінюванням, виділяють фрагмент розсіяного поля, визначають його поляризацію, будують матрицю Мюллера, по елементах якої судять о шорсткості, причому матрицю Мюллера повертають до отримання симетричної матриці шляхом її математичного повороту або фізичного повороту поверхні, наприклад, за рахунок того, що із матриці Мюллера виділяють її складову матрицю, яка не змінюється при математичному повороті або фізичному повороті поверхні і за її значенням виносять рішення щодо шорсткості поверхні.

При цьому як при фізичному повороті поверхні, так і при математичному повороті матриці її елементи змінюються за законом

$$M^1(\lambda_i) = S(-\theta) M_i(\lambda_i) S(\theta),$$

де S - матриця повороту на кут θ , $M_i(\lambda_i)$ - побудована матриця, $M^1(\lambda_i)$ - симетрична матриця. О шорсткості судять за елементами симетричної матриці. Поставлена задача вирішується за рахунок того, що значення симетричних елементів, наприклад, M_{14}^1 та M_{41}^1 , не будуть залежати від

лінійної анізотропії. Більш того, з цієї матриці можна виділити складову симетричну матрицю або матриці, які не змінюють своє значення при фізичному повертанні поверхні, або при математичному повороті матриці, наприклад, наступним методом (Cloude S R and E Pottier Opt Eng 34 1599-1610 (1995))

Матрицю Мюллера, яка має вигляд

$$M = \begin{bmatrix} A_0 + B_0 & C + N & H + L & I + F \\ C - N & A + B & E + J & K + G \\ H - L & E - J & A - B & M + D \\ I - F & K - G & M - D & A_0 - B_0 \end{bmatrix}$$

перебудовують на матрицю

$$T = \begin{bmatrix} A_0 + A & C - iD & H + iG & I - iJ \\ C + iD & B_0 + B & E + iF & K - iL \\ H - iG & E - iF & B_0 - B & M - iN \\ I + iJ & K + iL & M - iN & A_0 - A \end{bmatrix}$$

Матриця T є ермітовою і їй завжди може бути наданий діагональний вигляд

$$\begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_4 \end{bmatrix}$$

де λ_i власні значення цієї матриці. Далі визначають ентропію матриці

$$H = - \sum_{i=1}^N P_i \log_N P_i, \text{ де } P_i = \frac{\lambda_i}{\sum_j \lambda_j}, \text{ і якщо } H \leq 0,5, \text{ то матриця } M \text{ ставлять у відповідність додток чотирьох базисних матриць, які описують лінійну та кругову амплітудну, а також лінійною та кругову фазову анізотропію}$$

$M = [\text{Cir Am}][\text{Lin Am}][\text{Cir Ph}][\text{Lin Ph}]$, де

де

$$[\text{Lin Am}] = \begin{bmatrix} 1+P & (1-P)c & (1-P)s & 0 \\ (1-P)c & c^2(1+P)+2s^2\sqrt{P} & cs(1-\sqrt{P})^2 & 0 \\ (1-P)s & cs(1-\sqrt{P})^2 & s^2(1+P)+2c^2\sqrt{P} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\sqrt{P} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$[\text{Cir Am}] = \begin{bmatrix} 1+R^2 & 0 & 0 & 2R \\ 0 & 1-R^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-R^2 & 0 \\ 2R & 0 & 0 & 1+R^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[\text{Lin Ph}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_1^2 + s_1^2\beta & c_1s_1(1-\beta) & -s_1\mu \\ 0 & c_1s_1(1-\beta) & s_1^2 + c_1^2\beta & c_1\mu \\ 0 & s_1\mu & -c_1\mu & \beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$[\text{Cir Ph}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\varphi & \sin 2\varphi & 0 \\ 0 & -\sin 2\varphi & \cos 2\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Тут R , P , ϕ відповідно лінійна амплітудна анізотропія, кругова амплітудна анізотропія, кругова фазова анізотропія, а $c=\cos 2\theta$, $s=\sin 2\theta$, $\beta=\cos \delta$, $\mu=\sin \delta$, $c_1=\cos 2\alpha$, $s_1=\sin 2\alpha$, де θ , δ , α відповідно азимут орієнтації лінійної амплітудної анізотропії, лінійна фазова анізотропія, орієнтація азимута лінійної фазової анізотропії.

Далі, дорівнюючи між собою матрицю M та добуток матриць (1)-(4), знаходять параметри анізотропії R , P , θ , δ , α , ϕ поверхні, що досліджується. Іншими словами реальному зразку ставлять у відповідність оптичну систему, яка складається з послідовно розташованих лінійного та циркулярного поляризаторів, а також пластинок з лінійною та циркулярною фазовою анізотропією. При цьому параметри R , P , δ , ϕ не змінюються при математичному повороті матриці M або фізичному повороті поверхні.

Метод, що розглядається, перевірявся при дослідженні зразків полімерної плівки. Досліджувалися два типи плівки - з матовою та дзеркальною поверхнею. Зразки №1 і №2 були прозорими, а на одну із сторін аналогічних плівок (зразки №3 і №4) було нанесено алюмінієве покриття.

Зонduюче випромінювання направлялося на плівку під кутом 30° . Причому для прозорих плівок безпосередньо на поверхню, що досліджується, а поверхня плівок з покриттям досліджувалась при проходженні світла крізь зразок з наступним відбиттям від поверхні з покриттям. Відбите від поверхні випромінювання складається з двох компонент - дзеркальної та розсіяної. При вимірах досліджувався фрагмент розсіяного поля, оскільки саме неоднорідність поверхні приводить до розсіювання світла. Знайдені параметри анізотропії приведені у таблиці.

Таблиця

	№1	№2	№3	№4
R	0,0133	0,0113	-0,0063	-0,0040
P	0,7721	0,7962	0,9825	0,9415
θ	$178,6^\circ$	$2,6^\circ$	$141,1^\circ$	$141,6^\circ$
δ	$176,4^\circ$	160°	$-181,1^\circ$	$-193,4^\circ$
α	$96,1^\circ$	$177,4^\circ$	$82,1^\circ$	$0,98^\circ$
ϕ	$14,2^\circ$	$-2,8^\circ$	$-14,3^\circ$	$3,08^\circ$

Оскільки поверхня зразків 3,4 за умовами вимірювання розгорнута по відношенню до відповідних поверхонь зразків 1, 2 на кут 180 градусів, то відповідна оптична система 1-4 за допомогою якої описується поверхня також повинна бути розгорнута на кут 180 градусів. Це приводить до зміни порядку добутку матриць 1-4 на добуток матриць 4-1 та зміни знаку фазової анізотропії. Таким чином визначається не тільки шорсткість поверхні, а і напрямок з якого визначається ця шорсткість.

З формули 4 видно, що вона має симетричний вигляд і не змінюється при фізичному обертанні поверхні, або математичному обертанні матриці 4. Виходячи з фізичних міркувань можна стверджувати, що матриця, яка описує шорсткість поверхні із стохастичним розташуванням неоднорідностей, має не залежати від як від обертання об'єкту навколо вісі перпендикулярної до його поверхні, так і від математичного повороту цієї матриці.

Вимірювання шорсткості поверхні цих плівок за допомогою профілометра підтвердили співпадіння шорсткості відповідних поверхонь зразків 1, 3 та 2, 4.