

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
5 août 2010 (05.08.2010)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 2010/086377 A2

- (51) Classification internationale des brevets :
G01J 9/00 (2006.01)
- (21) Numéro de la demande internationale :
PCT/EP2010/051009
- (22) Date de dépôt international :
28 janvier 2010 (28.01.2010)
- (25) Langue de dépôt : français
- (26) Langue de publication : français
- (30) Données relatives à la priorité :
09 50613 30 janvier 2009 (30.01.2009) FR
- (71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) :
COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES [FR/FR]; 25 rue
Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D", F-75015 Paris (FR).
- (72) Inventeur; et
- (75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : PIOMBINI,
Hervé [FR/FR]; 8 ter rue de Tours, F-37320 Esvres sur
Indre (FR).
- (74) Mandataires : ILGART, Jean-Christophe et al.;
Brevalex, 3, rue du Docteur Lancereaux, F-75008 Paris
(FR).
- (81) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection nationale disponible) : AE, AG, AL, AM,
AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP,
KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR,
TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) États désignés (sauf indication contraire, pour tout titre
de protection régionale disponible) : ARIPO (BW, GH,
GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), eurasiatique (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ,
TM), européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE,
ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV,
MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM,
TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW,
ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- Publiée :
— sans rapport de recherche internationale, sera republiée
dès réception de ce rapport (règle 48.2.g))

(54) Title : METHOD FOR MEASURING AND METHOD FOR VIEWING A WAVE SURFACE USING SPECTROPHOTOMETRY

(54) Titre : PROCEDE DE MESURE ET PROCEDE DE VISUALISATION D'UNE SURFACE D'ONDE PAR SPECTROPHOTOMETRIE

(57) Abstract : The invention relates to a method for measuring a wave surface of an optical component consisting of a stack of at least two layers with different refractive indices based on reflection or transmission measurements of points located on one surface of said optical component.

(57) Abrégé : L' invention concerne un procédé de mesure d'une surface d'onde d'un composant optique formé d'un empilement d'au moins deux couches d'indices de réfraction différents à partir de mesures de réflexion ou de transmission de points situés sur une face dudit composant optique.



WO 2010/086377 A2

**PROCEDE DE MESURE ET PROCEDE DE VISUALISATION
D'UNE SURFACE D'ONDE PAR SPECTROPHOTOMETRIE**

DESCRIPTION

5 DOMAINE TECHNIQUE

La présente invention est relative à un procédé de mesure de la surface d'onde d'un composant optique, ainsi qu'à un procédé de visualisation de la surface d'onde d'un composant optique.

10 Le procédé de mesure selon l'invention permet en particulier de mesurer les déformations de la surface d'onde d'un composant optique traité, liées aux hétérogénéités des traitements de surface appliqués sur ce composant optique lors de sa fonctionnalisation,
15 tandis que le procédé de visualisation de la surface d'onde permet en particulier de localiser lesdites déformations.

ÉTAT DE LA TECHNIQUE ANTÉRIEURE

Le contrôle de la surface d'onde d'un
20 composant optique, traité ou non, se fait classiquement à l'aide d'un interféromètre, qui est souvent de type Fizeau. Avec cet interféromètre, on compare une surface d'onde de référence avec la surface d'onde à mesurer.

Si le composant optique est non traité, la
25 surface d'onde mesurée par l'interféromètre correspond à un facteur près :

- soit à la déformation de la surface du composant optique, lorsqu'on effectue une mesure en réflexion ;

- soit à la mesure de la différence de chemin optique, liée au composant optique traversé (hétérogénéité d'épaisseur et/ou d'indice de réfraction), dans le cas d'une mesure en transmission.

5 Si le composant optique est traité, c'est-à-dire s'il comprend un traitement de surface tel qu'un antireflet ou un filtre, comme par exemple un miroir, une séparatrice, une dichroïque ou un polariseur, il faut alors en outre tenir compte de la réponse du
10 traitement qui correspond à une lame de phase.

Or, il existe peu d'interféromètres qui permettent de mesurer la surface d'onde d'un composant optique traité si ce traitement n'est pas centré sur 633 nm ou 1064 nm. Il en résulte que le type de
15 composants optiques traités dont il est possible de mesurer la surface d'onde (et en particulier la déformation de la surface d'onde) par interférométrie est très limité.

Par ailleurs, l'interférométrie est limitée
20 en précision aux plans de référence utilisés, soit une précision comprise entre $\lambda/10$ et $\lambda/50$.

De plus, l'interférométrie tient compte de la qualité du substrat initial, ainsi que des contraintes induites par les traitements et subies par
25 le composant optique.

L'inventeur s'est donc fixé comme but d'élaborer un procédé permettant de mesurer, et un procédé permettant de visualiser, la surface d'onde d'un composant optique traité, et en particulier la
30 déformation de la surface d'onde liée au traitement déposé sur le composant optique, , pour la plupart des

traitements optiques pouvant être déposés sur un composant optique.

EXPOSÉ DE L'INVENTION

Ce but est atteint par un procédé de mesure d'une surface d'onde issue d'une zone d'une face d'un composant optique formé d'un empilement comprenant un substrat et au moins une couche ayant des indices de réfraction différents, le procédé comprenant les étapes suivantes :

10 a) mesurer, en un point de référence M_0 situé dans la zone de la face du composant optique, la réponse spectrale dudit point de référence en fonction de la longueur d'onde d'une lumière passant par ledit point de référence et regrouper les mesures ainsi
15 obtenues dans un spectre représentant la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde ;

b) dans le spectre obtenu à l'étape a), déterminer quelle est la portion de ce spectre pour laquelle l'écart entre un minimum et un maximum
20 successifs ou entre un maximum et un minimum successifs du spectre est maximal et sélectionner une longueur d'onde, appelée longueur d'onde de mesure λ_{mes} , parmi les longueurs d'onde correspondant à cette portion du spectre ;

25 c) mesurer la réponse spectrale (appelée ci-dessous RSP) de n points de mesure M_i situés dans ladite zone, n étant un nombre entier supérieur ou égal à 1, à la longueur d'onde de mesure λ_{mes} : $RSP_{(M_i)}(\lambda_{mes})$:

d) parmi les mesures obtenues à l'étape c), déterminer la réponse spectrale moyenne à la longueur d'onde de mesure : $RSP_{\text{moy}}(\lambda_{\text{mes}})$;

5 e) dans le spectre du point M_0 de référence obtenu à l'étape a), déterminer la longueur d'onde moyenne λ_{moy} telle que $RSP_{\text{Réf}(M_0)}(\lambda_{\text{moy}}) = RSP_{\text{moy}}(\lambda_{\text{mes}})$;

f) pour chacun des n points M_i , avec $i=1$ à n :

10 1) déterminer la longueur d'onde λ_i telle que la réponse spectrale au point M_i à la longueur d'onde de mesure soit égale à la réponse spectrale au point M_0 de référence à la longueur d'onde λ_i :

$$RSP_{M_i}(\lambda_{\text{mes}}) = RSP_{\text{Réf}(M_0)}(\lambda_i)$$

15 2) calculer l'écart entre le nombre d'onde σ_i ($\sigma_i = 1/\lambda_i$) et le nombre d'onde moyen σ_{moy} ($\sigma_{\text{moy}} = 1/\lambda_{\text{moy}}$) :

$$\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{\text{moy}}$$

20 3) déterminer le nombre d'onde de centrage réel σ_j au point M_i :

$$\sigma_j = \sigma_{\text{centrage}} + \Delta\sigma_i$$

avec $\sigma_{\text{centrage}} = 1/\lambda_{\text{centrage}}$ et $\lambda_{\text{centrage}}$ étant la longueur d'onde de centrage du composant optique ;

25 4) calculer la longueur d'onde λ_j correspondant au nombre d'onde de centrage réel au point M_i :

$$\lambda_j = 1/\sigma_j$$

5) calculer la différence de phase $\Delta\Phi_{M_i}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à la longueur d'onde de centrage :

$$5 \quad \Delta\Phi_{M_i} = \Phi(\lambda_j) - \Phi(\lambda_{\text{centrage}})$$

6) calculer la différence de marche δ_i existant au point M_i à la longueur d'onde de centrage :

$$\delta_i = \Delta\Phi_{M_i} \times \lambda_{\text{centrage}} / (2\pi).$$

10 L'homme du métier sait comment déterminer la longueur d'onde de centrage d'un composant optique comprenant un substrat et au moins une couche. En fait, on réalise le spectre en transmission ou en réflexion du composant optique en fonction du nombre d'onde et le
15 nombre d'onde de centrage est le nombre d'onde au niveau duquel le spectre représenté en nombres d'onde est approximativement symétrique. La longueur d'onde de centrage correspond alors à l'inverse du nombre d'onde de centrage ($1/\sigma_{\text{centrage}}$).

20 De préférence, le spectre obtenu à l'étape a) est réalisé sur une gamme de longueurs d'onde telle que l'écart entre la longueur d'onde la plus basse et la longueur d'onde la plus élevée de cette gamme de longueurs d'onde est au moins égal à 0,2 fois la
25 longueur d'onde de centrage du composant optique.

Avantageusement, l'empilement comprend m couches, m étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, les couches adjacentes parmi les m couches ayant des indices de réfraction différents. Il est à noter que

chaque couche de l'empilement peut avoir une épaisseur différente.

Le calcul de la différence de phase $\Delta\Phi_{Mi}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à l'étape 6) du procédé peut être obtenu par toute méthode de calcul d'empilement de couches minces.

Selon une première variante, le calcul de la différence de phase $\Delta\Phi_{Mi}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à l'étape 6) est réalisé en utilisant une méthode matricielle, comme par exemple le formalisme d'Abelès.

Selon une seconde variante, le calcul de la différence de phase $\Delta\Phi_{Mi}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à l'étape 6) est réalisé en utilisant une méthode vectorielle, comme par exemple la méthode de Schmith.

Le formalisme d'Abelès et la méthode de Schmith sont respectivement une méthode matricielle et une méthode vectorielle bien connues de l'homme du métier, qui permettent d'établir, à partir des paramètres d'épaisseur et d'indices de réfraction des différentes couches d'un empilement de couches, de déterminer la réflexion, la transmission, les variations de phase et l'absorption de cet empilement.

Avantageusement, la longueur d'onde de mesure λ_{mes} est la longueur d'onde pour laquelle la

portion dudit spectre obtenu à l'étape a) présente un point d'inflexion.

Selon une première variante, la réponse spectrale RPS est une réflexion.

5 Selon une seconde variante, la réponse spectrale RPS est une transmission.

Avantageusement, les n points de mesure M_i sont répartis de manière homogène dans la zone à mesurer. De préférence, les n points de mesure M_i sont
10 équidistants.

L'invention concerne également un procédé de visualisation d'une surface d'onde d'une zone d'une face d'un composant optique comprenant un substrat et
15 au moins une couche ayant des indices de réfraction différents. Le procédé de visualisation comprend les étapes du procédé de mesure décrit ci-dessus et comprend en outre une étape g), située à la suite des étapes du procédé de mesure, consistant à placer les n
20 différences de marche δ_i des n points M_i en fonction des coordonnées spatiales (x_i, y_i) desdits n points dans la zone. On obtient ainsi une cartographie des différences de marche, ce qui correspond, à un facteur $2\pi / \lambda$ près, à une cartographie de la surface d'onde. Ce procédé de
25 visualisation comprend donc la mesure de la différence de marche en chacun des points M_i situés dans la zone de la face du composant optique à étudier et le placement de ces mesures aux endroits de la zone où elles ont été prises.

BRÈVE DESCRIPTION DES DESSINS

L'invention sera mieux comprise et d'autres avantages et particularités apparaîtront à la lecture de la description qui va suivre, donnée à titre
5 d'exemple non limitatif, accompagnée des figures annexées parmi lesquelles :

- la figure 1 représente la réponse spectrale en transmission d'un miroir de formule $S(HB)^{11}H$ en fonction du nombre d'onde ;

10 - la figure 2 représente la réponse spectrale en réflexion d'un miroir de formule $S(HB)^{11}H$ en fonction de la longueur d'onde ;

- la figure 3 représente la cartographie en réflexion du miroir de formule $S(HB)^{11}H$ sur une zone de
15 $79 \times 26 \text{ mm}^2$ à 900 nm ;

- la figure 4 représente une cartographie de réponse spectrale de réflexion après un filtrage médian d'ordre 5 ;

- la figure 5 représente la variation de
20 phase en fonction de la longueur d'onde d'un miroir $S(HB)^{11}H$ ayant un rapport d'indice de 1,37 pour un centrage à 1052 nm et pour un centrage à 1022 nm ;

- la figure 6 représente la cartographie de surface d'onde issue de la cartographie en réflexion
25 illustrée dans la figure 4 exprimée en « épaisseur mécanique » en nm.

EXPOSÉ DÉTAILLÉ DE MODES DE RÉALISATION PARTICULIERS

Le principe du procédé de mesure selon l'invention est basé sur le constat que toute
30 hétérogénéité spatiale d'un composant optique constitué

d'un empilement de couches peut se traduire par une variation de la longueur d'onde de centrage local de l'empilement, ce qui produit une variation de phase.

Nous allons illustrer le principe de l'invention en réalisant la cartographie de surface d'onde d'un composant optique qui est un miroir diélectrique (par exemple un miroir de Bragg).

Le miroir diélectrique choisi pour illustrer cet exemple est composé d'un substrat supportant 23 couches d'indices de réfraction alternés n_H et n_B , n_H étant l'indice des couches de haut indice et n_B étant l'indice des couches de bas indice. Il peut par exemple s'agir d'un filtre passe-bande dans le domaine du proche infrarouge, constitué d'un empilement d'une alternance de couches minces diélectriques de couches de haut indice de réfraction et de bas indice de réfraction, déposé sur un support en verre.

Ici, le substrat est par exemple en borosilicate et a un indice de réfraction de 1,51, les couches d'indice n_H sont des couches en zircone d'indice de réfraction de 1,68 et les couches d'indice n_B sont des couches en silice d'indice de réfraction de 1,22. On précise par ailleurs que les couches sont ici déposées par un procédé sol-gel.

On commence par mesurer la réponse spectrale (en réflexion ou en transmission, au choix) du composant optique à tester en un point du composant, pris comme point de référence M_0 , sur un domaine de longueurs d'onde assez large. Le spectre ainsi obtenu va nous permettre de déterminer la longueur d'onde de centrage et la largeur de bande du composant optique.

On précise que, pour déterminer la longueur d'onde de centrage et la largeur de bande du composant optique, on peut indifféremment étudier le spectre en réflexion ou en transmission du composant optique (si le substrat est transparent) : on obtiendra les mêmes valeurs.

A titre d'exemple, la réponse spectrale en transmission du composant optique à tester sur une gamme de nombres d'onde allant de 5000 à 35000 cm^{-1} (soit de 286 nm à 2000 nm en longueur d'onde) est représentée dans la figure 1.

A partir de ce spectre en transmission, on en déduit que le composant optique à tester a un nombre d'onde de centrage σ_{centrage} égal à 9500 cm^{-1} (soit une longueur d'onde de centrage $\lambda_{\text{centrage}}$ de 1052 nm). On constate également que ce composant a un rapport d'indice $n_{\text{H}}/n_{\text{B}}$ égal à 1,37 et qu'il comporte bien 23 couches.

Dans notre exemple, on choisit de réaliser la réponse spectrale en réflexion d'un point du composant optique à tester sur une gamme de longueurs d'onde allant de 400 nm à 950 nm : cette réponse spectrale en réflexion va être considérée comme étant la réponse spectrale de réflexion de référence $R_{\text{réf (Mo)}}$ et est représentée dans la figure 2.

Le comportement optique (réflexion, transmission, variation de phase) d'un tel composant optique peut être simulé par un empilement de formule $S(\text{HB})^{11}\text{H}$, où S représente le substrat, H représente une couche d'indice de réfraction n_{H} et B représente une couche d'indice de réfraction n_{B} , calculé, par exemple, à partir des formules d'Abelès. Le formalisme d'Abelès

sera particulièrement utile pour calculer les variations de phase du composant optique, comme nous le verrons ci-dessous.

Dans le spectre en réflexion réalisé au point de référence M_0 (figure 2), on détermine quel est l'écart entre un minimum (creux de l'oscillation) et un maximum (sommet de l'oscillation) successifs ou entre un maximum et un minimum successifs du spectre qui est le plus grand. En fait, on détermine l'écart maximal entre deux extremas successifs du spectre, les deux extremas étant un minimum et un maximum. On choisit alors une longueur d'onde parmi les longueurs d'onde correspondant à la portion de spectre comprise entre le minimum et le maximum ou le maximum et le minimum de cet écart maximal ainsi déterminé. Cette longueur d'onde (appelée longueur d'onde de mesure) sera par la suite utilisée pour réaliser la cartographie de la réponse spectrale d'une zone du composant optique, cette zone comprenant le point de référence et pouvant par exemple représenter l'ensemble d'une face du composant optique.

Afin d'obtenir une bonne précision sur la mesures des hétérogénéités du composant optique, la longueur d'onde de mesure est choisi de préférence sur les fronts de montée ou de descente de la réponse spectrale du composant optique, le plus souvent au point d'inflexion.

Dans la figure 2, on constate que, parmi les points d'inflexion du spectre, celui situé à 900 nm est situé sur un front de montée dont la pente semble être la plus abrupte. De plus, à 900 nm, la réflexion

est moyenne et est égale à 40%. En fait, ce qui est important pour le choix de la longueur d'onde de mesure, c'est d'avoir le plus grand domaine spectral où le coefficient de réflexion ou de transmission varie linéairement avec la longueur d'onde, avec une variation non nulle. Dans le spectre représenté dans la figure 2, on constate ainsi que 900 nm peut donc être une longueur d'onde de mesure λ_{mes} adéquate pour représenter la surface d'onde du composant optique.

Après avoir choisi la longueur d'onde de mesure, on réalise ensuite une cartographie en réflexion à la longueur d'onde de mesure λ_{mes} de la zone du composant optique sur laquelle on souhaite mesurer la surface d'onde. Dans la figure 3 est représentée une cartographie en réflexion réalisée à une longueur d'onde de 900 nm sur une zone de 79x26 mm² du miroir diélectrique à tester de formule S(HB)¹¹H.

Avant de transformer les mesures de réflexion de cette cartographie de réflexion en des mesures de surface d'onde, il peut être nécessaire de traiter les mesures de réflexion à l'aide de filtres linéaires ou non-linéaires, par exemple un filtre de type moyeneur ou un filtre de type médian, afin d'éliminer les défauts locaux résiduels réels (rayures, piqûres...) ou dus à la présence de poussières en surface du composant optique.

Le principe du filtre moyeneur consiste à remplacer une mesure prise en un point A par une moyenne pondérée des mesures prises au niveau des points adjacents au point A.

Le principe du filtre médian consiste à remplacer une mesure prise en un point A par la valeur médiane de toutes les mesures prises au niveau des points situés dans une fenêtre centrée sur le point A.

5 Par exemple, la figure 4 représente la cartographie de réflexion de la figure 3 après un filtrage médian d'ordre 5.

La transformation de la cartographie de réflexion en cartographie de surface d'onde est obtenue
10 en déterminant, pour chaque point M_i du composant optique, son écart par rapport au centrage théorique. Cet écart par rapport au centrage théorique est ensuite transformé en déphasage Φ . Ce déphasage Φ est à son tour transformé en différence de marche δ . La
15 différence de marche δ peut être transformée en épaisseur mécanique, en multipliant la différence de marche δ par un facteur égal à 0,5 (s'il s'agit d'une réponse spectrale en réflexion) ou à 1 (s'il s'agit d'une réponse spectrale en transmission). La
20 cartographie de la surface d'onde du composant optique peut être visualisée en réalisant une cartographie de marche ou « d'épaisseur mécanique ».

Le déphasage Φ peut être obtenu en utilisant le formalisme matriciel d'Abelès. En effet,
25 le formalisme d'Abelès permet d'obtenir la réflexion, la transmission, l'absorption, ainsi que la phase d'un empilement de couches optiques. Ce formalisme consiste en de simples multiplications de matrices 2x2, à raison d'une matrice par couche optique considérée.

30 A titre d'illustration, la figure 5 montre l'évolution spectrale de la phase théorique en

réflexion d'un miroir diélectrique de formule $S(HB)^{11}H$ ayant un rapport d'indice de 1,37, lorsque le miroir a une longueur d'onde de centrage à 1052 nm et lorsqu'il a une longueur d'onde de centrage à 1022 nm (ligne en pointillés). A partir de ces données, on peut déduire la différence de phase $\Delta\Phi$ existant lorsque le miroir est hétérogène et, qu'au lieu d'avoir une longueur d'onde de centrage à 1052 nm, a en fait une longueur d'onde de centrage réelle de 1022 nm. Un miroir ayant une telle hétérogénéité spatiale présentera une variation de phase à la longueur d'onde d'utilisation, par exemple 1054 nm, $\Delta\Phi(1054) = \Phi_{1052}(1054) - \Phi_{1022}(1054) = 11^\circ 35'$, cette valeur pouvant être exprimée en différence de marche (ou différence de chemin optique) par la relation $\Delta\Phi = 360 \times \delta / \lambda$, soit ici 33 nm, et cette valeur étant équivalente à une « épaisseur mécanique » de 16,5 nm.

La procédure pour mesurer et visualiser une surface d'onde selon l'invention est récapitulée ci-dessous.

Tout d'abord, on réalise un spectre en réflexion [en transmission] en fonction de la longueur d'onde en un point M_0 , situé dans la zone du composant optique dont on souhaite connaître l'effet d'un traitement sur la surface d'onde ; ce point M_0 est choisi comme point de référence. On sélectionne ensuite dans ce spectre une longueur d'onde de mesure λ_{mes} et on mesure la réflexion en n points de mesure M_i situés dans la zone à étudier du composant optique à la longueur d'onde de mesure λ_{mes} (n étant un nombre entier

supérieur ou égal à 1 et $i=1$ à n) : $R_{(M_i)}(\lambda_{mes})$. Par exemple, pour une zone ayant une surface de $79 \times 26 \text{ mm}^2$, on réalise ici 179 points sur 105 points de mesure.

On fait la moyenne de tous ces points de mesure et on détermine ainsi la réflexion [la transmission] moyenne à la longueur d'onde de mesure dans la zone de mesure : $R_{moy}(\lambda_{mes})$ [$T_{moy}(\lambda_{mes})$].

On recherche ensuite dans le spectre en réflexion [en transmission] de référence au point M_0 pour quelle longueur d'onde (appelée longueur d'onde moyenne λ_{moy}) la réflexion [la transmission] moyenne à la longueur d'onde de mesure est égale à la réflexion [transmission] de référence au point M_0 à la longueur d'onde moyenne, c'est-à-dire $R_{moy}(\lambda_{mes}) = R_{Réf(M_0)}(\lambda_{moy})$ [$T_{moy}(\lambda_{mes}) = T_{Réf(M_0)}(\lambda_{moy})$].

Cela permet alors d'obtenir le nombre d'onde moyen : $\sigma_{moy} = 1/\lambda_{moy}$.

A partir de là, pour chacun des n points M_i , on réalise les étapes suivantes :

- on détermine à partir du spectre de référence au point M_0 quelle est la longueur d'onde λ_i pour laquelle la réflexion [transmission] au point M_i à la longueur d'onde de mesure est égale à la réflexion [transmission] de référence au point M_0 à la longueur d'onde λ_i :

$$R_{M_i}(\lambda_{mes}) = R_{Réf(M_0)}(\lambda_i)$$

$$[T_{M_i}(\lambda_{mes}) = T_{Réf(M_0)}(\lambda_i)]$$

- on calcule les nombres d'ondes σ_i correspondant aux longueurs d'ondes λ_i :

$$\sigma_i = 1/\lambda_i$$

- on calcule les écarts entre les nombres d'onde σ_i et le nombre d'onde moyen σ_{moy} :

$$\Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{\text{moy}}$$

- on détermine le nombre d'onde de centrage réel σ_j au point M_i par rapport au nombre d'onde de centrage σ_{centrage} :

$$\sigma_j = \sigma_{\text{centrage}} + \Delta\sigma_i$$

- on calcule la longueur d'onde de centrage réel λ_j correspondant au nombre d'onde de centrage réel au point M_i :

$$\lambda_j = 1/\sigma_j$$

- on calcule la différence de phase théorique $\Delta\Phi_{M_i}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$:

$$\Delta\Phi_{M_i} = \Phi(\lambda_j) - \Phi(\lambda_{\text{centrage}})$$

- on calcule la différence de marche δ_i existant au point M_i :

$$\delta_i = \Delta\Phi_{M_i} \times \lambda_{\text{centrage}} / (2\pi)$$

Les différences de marche δ_i obtenues pour chacun des points M_i peuvent ensuite être multipliées par un facteur F , selon que l'onde est réfléchie ($F = 0,5$) ou transmise ($F = 1$), ce qui nous permet d'obtenir « l'épaisseur mécanique équivalente » en chaque point M_i .

En disposant ces différences de marche δ_i ou ces « épaisseurs mécaniques équivalentes » selon les coordonnées géographiques des points M_i auxquels elles sont liées, il est possible de réaliser une cartographie représentant la surface d'onde. Il est ainsi possible de visualiser la surface d'onde. Une

telle cartographie de surface d'onde exprimée en épaisseur mécanique est représentée dans la figure 6. Dans cette figure 6, les épaisseurs mécaniques sont exprimées en nanomètres (voir l'échelle de gris sur la
5 droite).

Il est à noter que les exemples ci-dessus sont relatifs à des réponses spectrales en réflexion. Néanmoins, il est tout à fait possible de réaliser, selon le même principe, une cartographie de la surface
10 d'onde d'un composant optique à partir d'une réponse spectrale en transmission (voir les passages ci-dessus mis entre crochets).

Par ailleurs, les procédés selon l'invention peuvent être appliqués sur des composants
15 optiques autres que celui décrit ci-dessus, par exemple des empilements de formule générale $S(H_k B_1)^m$ où les H_k sont des couches à haut indice de réfraction ayant une épaisseur e_k , les B_1 sont des couches à bas indice de réfraction ayant une épaisseur e_1 , S le substrat et m
20 le nombre de couches de l'empilement. Il suffit que le composant optique à tester soit un empilement de couches optiques alternées de deux indices de réfraction différents, un formalisme matriciel, comme par exemple le formalisme d'Abelès, pouvant alors être
25 utilisé pour calculer les variations de phase du composant optique.

L'originalité du procédé selon l'invention est qu'il fournit des informations en termes de surface
30 d'onde au moyen de mesures spectrophotométriques,

c'est-à-dire au moyen de mesures de réflexion ou de transmission.

Le procédé de mesure de la surface d'onde d'un composant optique selon l'invention permet de mesurer la déformation de la surface d'onde d'un composant optique liée à l'hétérogénéité du traitement déposé sur le composant et ainsi, de visualiser les modifications de la surface d'onde d'un composant optique quelque soit sa longueur d'onde d'utilisation. Cela permet en particulier de repérer la présence d'hétérogénéités provoqués par le dépôt physique ou chimique d'une ou de plusieurs couches minces sur le composant. Le procédé selon l'invention permet ainsi de contrôler la déformation de la surface d'onde liée uniquement aux traitements optiques du composant optique en étudiant la surface d'onde issue de ce composant après une réflexion ou une transmission, indépendamment de la nature du polissage du composant et des contraintes du traitement optique réalisé sur le composant.

Un tel procédé de mesure est particulièrement utile pour contrôler des composants optiques subissant des traitements diélectriques et comprenant de nombreuses couches, comme par exemple les filtres (polariseurs ou miroirs), dont le bon fonctionnement nécessite la présence d'une surface d'onde homogène.

REVENDICATIONS

1. Procédé de mesure d'une surface d'onde issue d'une zone d'une face d'un composant optique formé d'un empilement comprenant un substrat et au moins une couche ayant des indices de réfraction différents, le procédé comprenant les étapes suivantes :

a) mesurer, en un point de référence M_0 situé dans la zone de la face du composant optique, la réponse spectrale dudit point de référence en fonction de la longueur d'onde d'une lumière passant par ledit point de référence et regrouper les mesures ainsi obtenues dans un spectre représentant la réponse spectrale en fonction de la longueur d'onde ;

b) dans le spectre obtenu à l'étape a), déterminer quelle est la portion de ce spectre pour laquelle l'écart entre un minimum et un maximum successifs ou entre un maximum et un minimum successifs du spectre est maximal et sélectionner une longueur d'onde, appelée longueur d'onde mesure λ_{mes} , parmi les longueurs d'onde correspondant à cette portion du spectre ;

c) mesurer la réponse spectrale de n points de mesure M_i situés dans ladite zone, n étant un nombre entier supérieur ou égal à 1, à la longueur d'onde de mesure λ_{mes} : $RSP_{(M_i)}(\lambda_{mes})$:

d) parmi les mesures obtenues à l'étape c), déterminer la réponse spectrale moyenne à la longueur d'onde de mesure : $RSP_{moy}(\lambda_{mes})$;

e) dans le spectre du point M_0 de référence obtenu à l'étape a), déterminer la longueur d'onde moyenne λ_{moy} telle que $\text{RSP}_{\text{Réf}(M_0)}(\lambda_{\text{moy}}) = \text{RSP}_{\text{moy}}(\lambda_{\text{mes}})$;

f) pour chacun des n points M_i , avec $i=1$ à
5 n :

1) déterminer la longueur d'onde λ_i telle que la réponse spectrale au point M_i à la longueur d'onde de mesure soit égale à la réponse spectrale au point M_0 de référence à la longueur
10 d'onde λ_i :

$$\text{RSP}_{M_i}(\lambda_{\text{mes}}) = \text{RSP}_{\text{Réf}(M_0)}(\lambda_i)$$

2) calculer l'écart entre le nombre d'onde σ_i ($\sigma_i = 1/\lambda_i$) et le nombre d'onde moyen σ_{moy} ($\sigma_{\text{moy}} = 1/\lambda_{\text{moy}}$) :

$$15 \quad \Delta\sigma_i = \sigma_i - \sigma_{\text{moy}}$$

3) déterminer le nombre d'onde de centrage réel σ_j au point M_i :

$$\sigma_j = \sigma_{\text{centrage}} + \Delta\sigma_i$$

avec $\sigma_{\text{centrage}} = 1/\lambda_{\text{centrage}}$ et $\lambda_{\text{centrage}}$ étant
20 la longueur d'onde de centrage du composant optique ;

4) calculer la longueur d'onde λ_j correspondant au nombre d'onde de centrage réel au point M_i :

$$25 \quad \lambda_j = 1/\sigma_j$$

5) calculer la différence de phase $\Delta\Phi_{M_i}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à la longueur d'onde de centrage :

$$\Delta\Phi_{M_i} = \Phi(\lambda_j) - \Phi(\lambda_{\text{centrage}})$$

6) calculer la différence de marche δ_i existant au point M_i à la longueur d'onde de centrage :

$$\delta_i = \Delta\Phi_{M_i} \times \lambda_{\text{centrage}} / (2\pi).$$

2. Procédé de mesure d'une surface d'onde selon la revendication 1, dans lequel l'empilement comprend m couches, m étant un nombre entier supérieur ou égal à 2, les couches adjacentes parmi les m couches ayant des indices de réfraction différents.

3. Procédé de mesure d'une surface d'onde selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le calcul de la différence de phase $\Delta\Phi_{M_i}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à l'étape 6) est réalisé en utilisant une méthode matricielle, comme par exemple le formalisme d'Abelès.

4. Procédé de mesure d'une surface d'onde selon la revendication 1 ou 2, dans lequel le calcul de la différence de phase $\Delta\Phi_{M_i}$ existant entre la phase de centrage réel $\Phi(\lambda_j)$ et la phase de centrage théorique $\Phi(\lambda_{\text{centrage}})$ à l'étape 6) est réalisé en utilisant une méthode vectorielle, comme par exemple le formalisme de Schmith.

5. Procédé de mesure d'une surface d'onde selon la revendication 1 ou 2, dans lequel la longueur

d'onde de mesure λ_{mes} est la longueur d'onde pour laquelle la portion dudit spectre obtenu à l'étape a) présente un point d'inflexion.

5 **6.** Procédé de mesure d'une surface d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel la réponse spectrale RPS est une réflexion.

10 **7.** Procédé de mesure d'une surface d'onde selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, dans lequel la réponse spectrale RPS est une transmission.

15 **8.** Procédé de mesure d'une surface d'onde selon la revendication 1 ou 2, dans lequel les n points de mesure M_i sont répartis de manière homogène dans la zone à mesurer.

20 **9.** Procédé de visualisation d'une surface d'onde d'une zone d'une face d'un composant optique comprenant un substrat et au moins une couche ayant des indices de réfraction différents, caractérisé en ce qu'il comprend les étapes du procédé de mesure selon l'une quelconque des revendications 1 à 8 et comprend en outre une étape g) consistant à placer les n
25 différences de marche δ_i des n points M_i en fonction des coordonnées spatiales (x_i, y_i) desdits n points dans la zone.

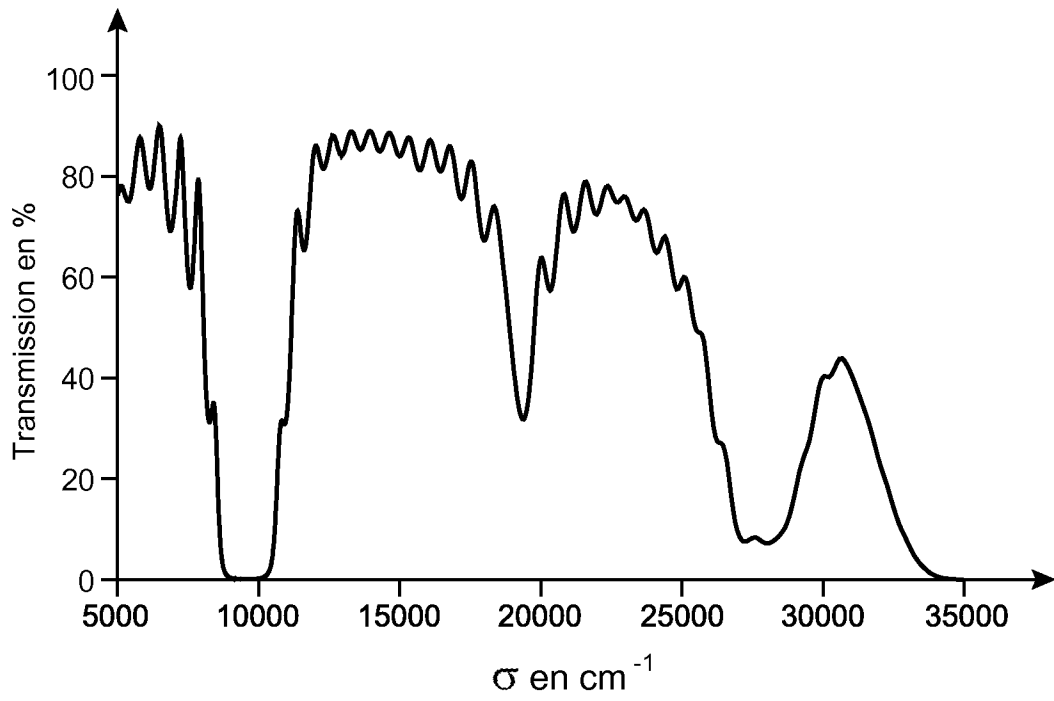


FIG.1

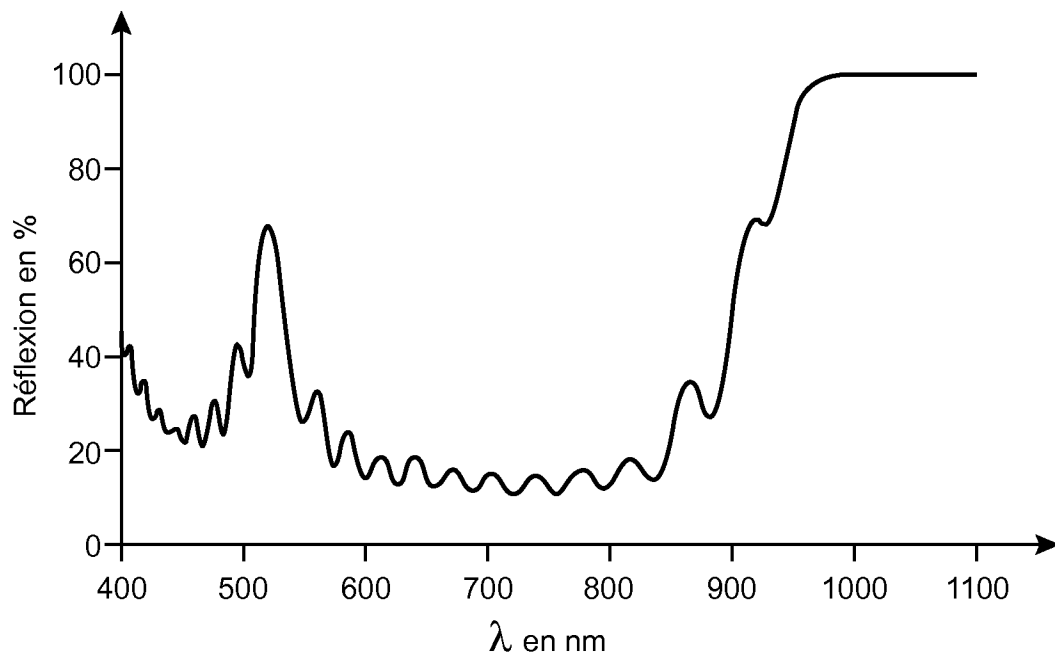


FIG.2

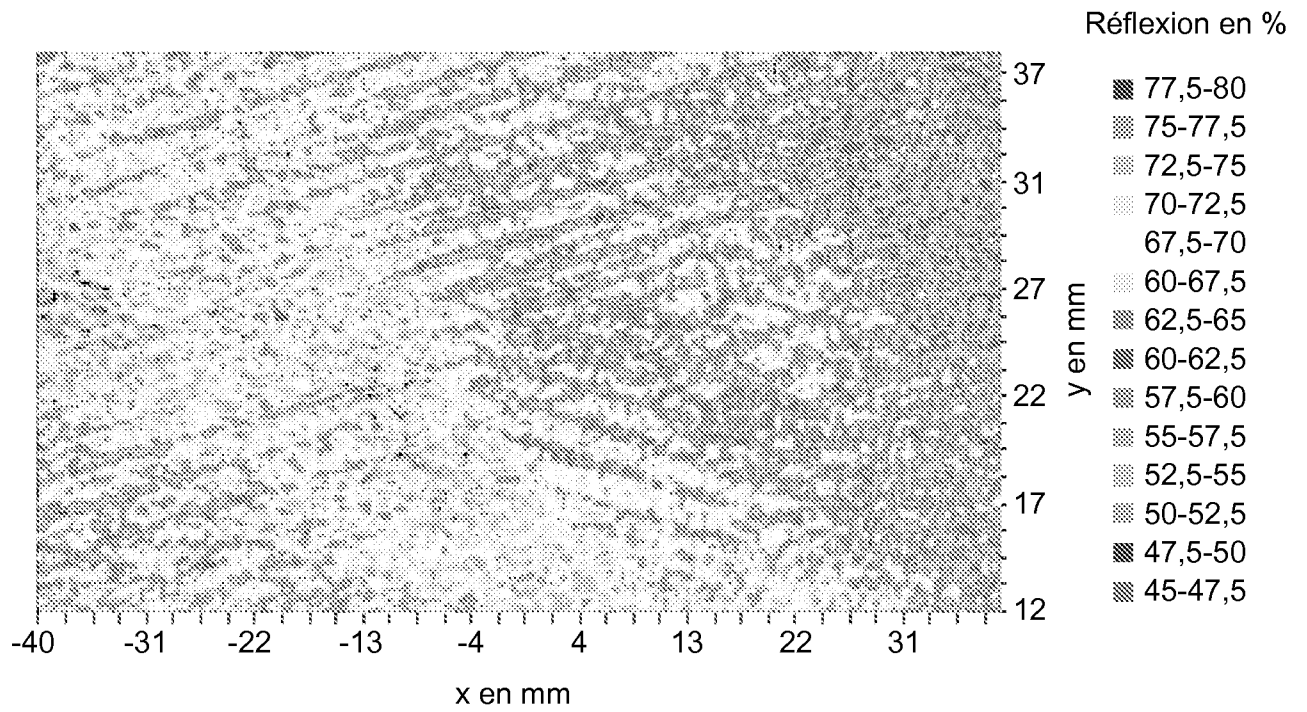


FIG.3

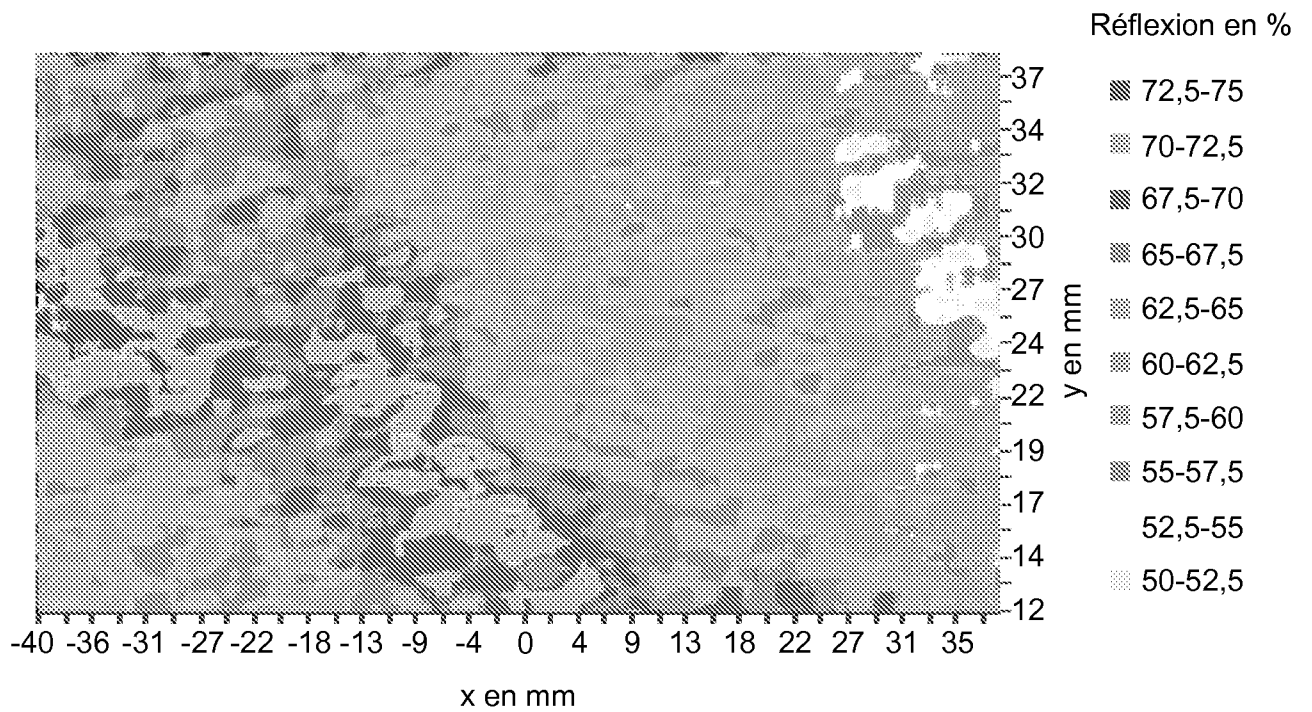


FIG.4

3/3

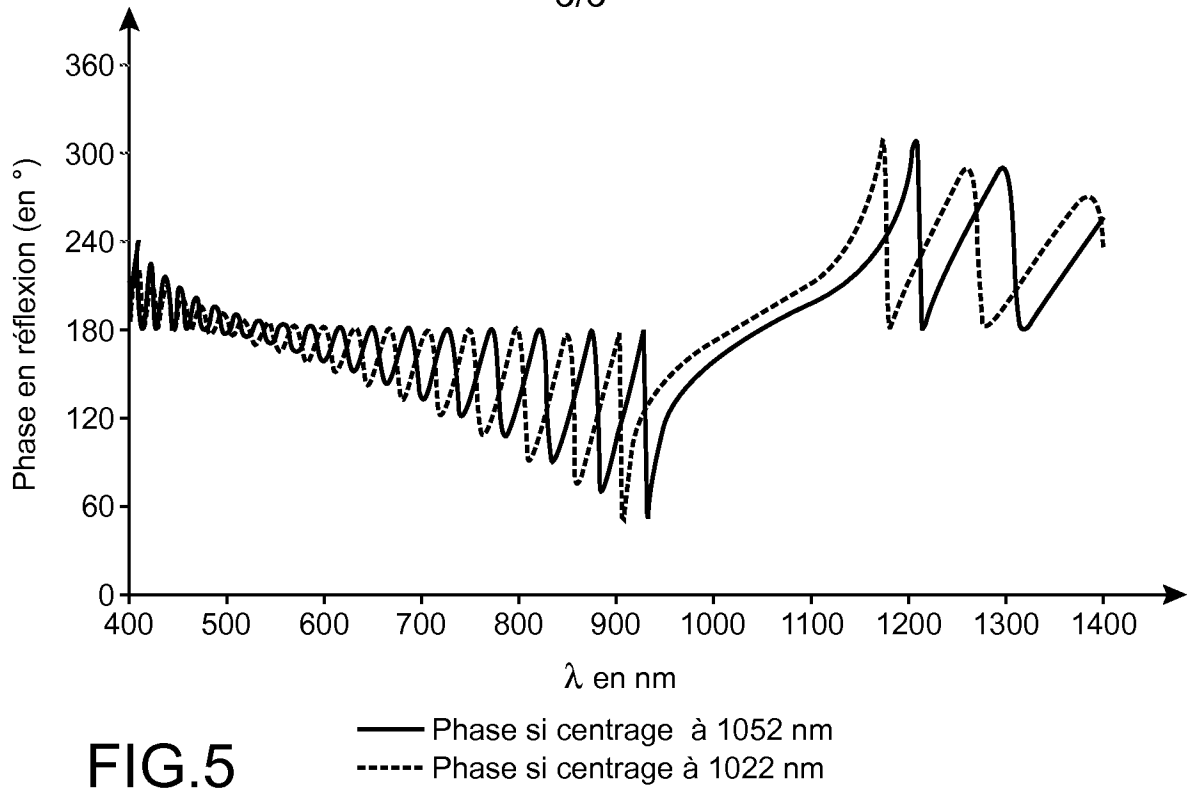


FIG.5

— Phase si centrage à 1052 nm
 - - - Phase si centrage à 1022 nm

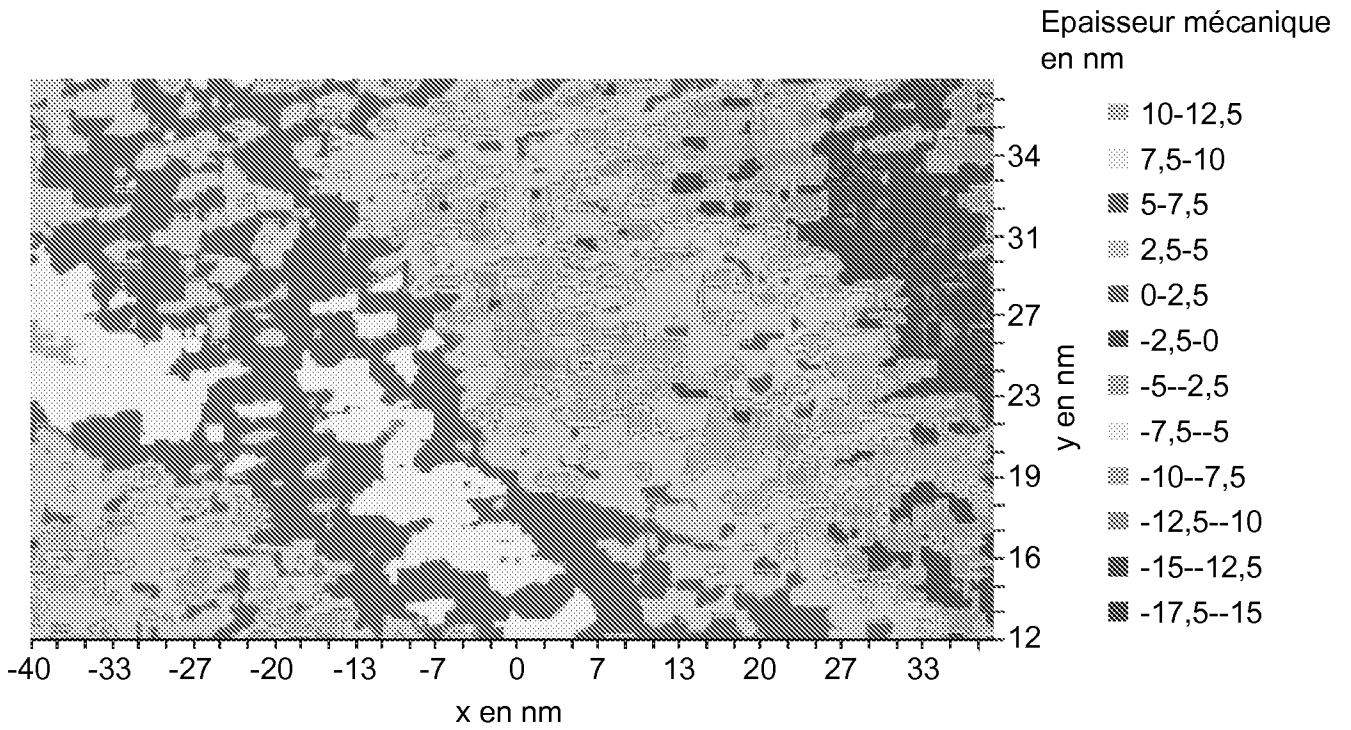


FIG.6