

RÉFLECTOMÉTRIE HOLOGRAPHIQUE NUMÉRIQUE APPLIQUÉE À LA MÉTROLOGIE DES FLUIDES

Tristan, Colomb, Yves Emery
PSE-A, 1015 Lausanne (Suisse)
tristan.colomb@lynceetec.com

Isabelle Bergoënd, Ahmet Ata Akatay, Nicolas Pavillon, Jonas Kühn, Christian Depeursinge
Laboratoire d'optique appliquée, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne (Suisse)

MOTS CLÉS

Microscopie, topographie, Mesure 3D

RÉSUMÉ

L'holographie numérique en réflexion permet de mesurer la topographie d'un échantillon à partir de la mesure de la phase du front d'onde réfléchi sur la surface de celui-ci. Néanmoins, la linéarité entre la topographie et la mesure de phase n'est valable que si l'échantillon est homogène (même matériau) et que seule la réflexion sur la surface contribue au front d'onde réfléchi. Cette dernière hypothèse n'est plus valable pour des échantillons composés de fines couches semi-transparentes, pour lesquelles des réflexions multiples dans les couches contribuent de manière non négligeable au faisceau réfléchi. Une goutte de liquide sur un substrat est un exemple pour lequel la microscopie holographique numérique standard échoue à mesurer la forme. Nous démontrons dans ce papier qu'un modèle de réflexions multiples (modèle réflectométrique) appliqué à l'holographie numérique permet de mesurer les épaisseurs et les indices de réfraction de couches semi-transparentes à partir de la mesure du front d'onde complexe (amplitude et phase). En particulier on mesurera la topographie de gouttes de Tetraethylene-glycol déposées sur un substrat de Si.

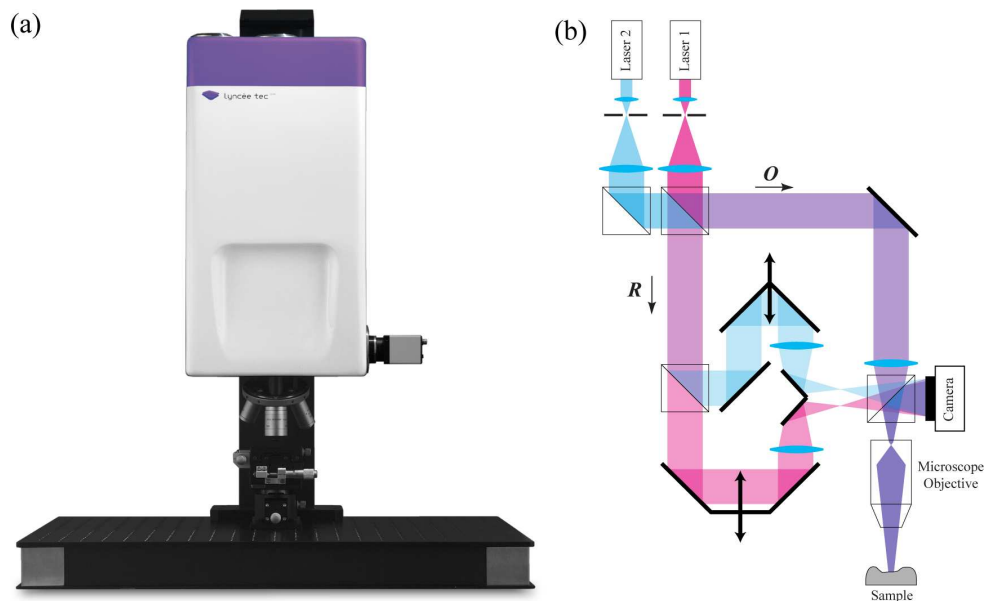


Figure 1: Microscope DHM R2100 microscope commercialisé par Lyncée Tec. (a) vue de face et (b) schéma du montage

I. RÉFLECTOMÉTRIE HOLOGRAPHIQUE

I.1 Montage

Les microscopes holographiques numériques utilisés pour les mesures réflectométriques sont équipés d'objectifs de différents grossissements et de deux sources de longueur d'onde différente, d'une part le DHM R1100 qui mesure alternativement les fronts d'onde aux deux longueurs d'onde (682.5 nm, 660nm) et d'autre part le DHM R2100 qui permet une mesure simultanée (682.5 nm, 796.5 nm). Ces deux microscopes holographiques sont commercialisés par Lyncée Tec (www.lynceetec.com).

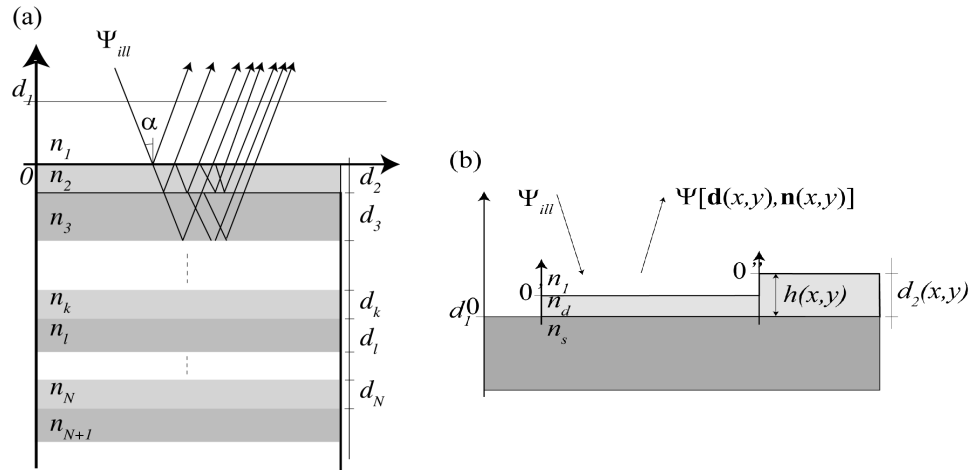


Figure 2: (a) Modèle de multi-couches et (b) modèle pour un dépôt de matériau d'indice n_d de différentes épaisseurs $h(x,y)$ sur un substrat d'indice n_s . La fonction pour la réflexion (Eq.(4)) est définie à partir du repère défini par l'origine 0, 0' etc.

I.2 Coefficient de réflectivité globale

Habituellement en microscopie holographique numérique, seule la mesure de phase du front d'onde est exploitée. Dans le cas de couches multiples semi-transparentes, l'amplitude réfléchi est modifiée par les caractéristiques physiques des couches (indice de réfraction, épaisseur). Ainsi, en comparant la mesure complexe du front d'onde réfléchi avec sa fonction théorique, les valeurs d'épaisseurs et d'indices de réfraction de la structure pourront être déduites. Dans un précédent article, nous avons modélisé cette fonction théorique en tenant compte de la longueur de cohérence de la source [1]. Les couches internes des échantillons observés étant bien plus petites que la cohérence de la source, nous allons ici négliger son influence. En supposant que le faisceau d'illumination arrive perpendiculairement à la surface de l'échantillon ($\alpha=0$ sur la Figure 2(a)), on obtient les coefficients de Fresnel de réflexion et de transmission pour chaque interface entre les milieux k et l d'indice n_k et n_l :

$$r_{kl} = \frac{n_k - n_l}{n_k + n_l},$$

$$t_{kl} = \frac{2n_k}{n_k + n_l},$$

Soit M_p le p -ième milieu ($1 \leq p \leq n + 1$). En partant des couches les plus profondes, on définit le coefficient de réflexion global des deux dernières couches par $U_N = r_{N,N+1}$ [2]. Puis pour $p=N$ à 2 la relation de récurrence suivante est utilisée:

$$U_{p-1} = \frac{r_{p-1,p} + U_p e^{i \frac{2\pi}{\lambda} 2d_p}}{1 + r_{p-1,p} U_p e^{i \frac{2\pi}{\lambda} 2d_p}},$$

avec λ la longueur d'onde et d_p l'épaisseur de la couche p . Le coefficient de réflexion global pour toutes les couches est donc U_l . Le front d'onde à la position d_l de la Figure 2(a) s'écrit donc:

$$\Psi(\mathbf{d}, \mathbf{n}) = U_1 e^{-i \frac{2\pi}{\lambda} 2d(1)n_1}$$

avec $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_N]$ et $\mathbf{n} = [n_1, \dots, n_{N+1}]$.

I.2 Modélisation de l'échantillon

Nous allons maintenant montrer que ce modèle appliqué aux mesures du front d'onde obtenues par holographie numérique permet la mesure de la topographie d'un échantillon composé d'une couche semi-transparente sur un substrat. Pour cela, un échantillon composé de différentes épaisseurs de SiO₂ déposées sur un substrat de silicium est utilisé. La première étape consiste à modéliser l'échantillon (Figure 2(b)) pour définir la fonction théorique de réflectivité de cet échantillon (Eq.(4)).

Pour chaque position (x,y) de l'échantillon, le front d'onde s'écrit:

$$\Psi(x, y) = \Psi[\mathbf{d}(x, y), \mathbf{n}(x, y)],$$

avec les paramètres qui dépendent de l'épaisseur du dépôt $h(x,y)$:

$$\mathbf{d}(x, y) = [-h(x, y), h(x, y)]$$

$$\mathbf{n}(x, y) = \begin{cases} [n_1, n_s] & \text{si } h(x, y) = 0 \\ [n_1, n_d, n_s] & \text{si } h(x, y) > 0 \end{cases}$$

I.3 Mesure et ajustement de fonction

La mesure quantitative de l'amplitude étant primordiale ici (contrairement à l'holographie numérique « habituelle » qui ne s'intéresse qu'à la phase pour déduire la topographie), il est nécessaire de supprimer l'influence de l'inhomogénéité d'amplitude des faisceaux. C'est pourquoi, une calibration est effectuée en enregistrant un hologramme de référence sur l'échantillon dans une région d'intérêt sans dépôt. La calibration s'opère dans le plan de la caméra en divisant le front d'onde mesuré par le front d'onde de référence obtenu avec cet hologramme [1][3]. Puis le front d'onde est propagé numériquement dans le plan image où le décalage de phase est ajusté pour que les parties sans dépôt aient une phase moyenne nulle.

$$\bar{\Psi}_{exp} = \Psi_{exp} e^{-i\phi_{exp}(h=0)}$$

Le front d'onde expérimental ψ_{exp} ainsi obtenu est approché aux moindres carrés par la fonction théorique, elle aussi normalisée, afin que la phase dans la région sans dépôt soit égale à la phase expérimentale, soit:

$$\bar{\Psi}(x, y) = \frac{\Psi(x, y)}{\Psi(h=0)}$$

II.1 Validation

La méthode est évaluée sur un échantillon test qui comporte 5 différentes marches (375, 525, 975, 1200 et 1275 nm) de SiO₂ sur un substrat de Si. Deux

mesures faites à des longueurs d'ondes différentes $\lambda_1=682.5\text{nm}$ et $\lambda_2=660\text{nm}$ sont effectuées et approchées par les fonctions théoriques. Afin de diminuer le temps de calcul, on approche les épaisseurs et les indices de réfraction en prenant les valeurs complexes moyennes sur les marches. Les épaisseurs des couches mesurées sont comparées dans le Tableau 1 à une mesure effectuée avec un profilomètre et les indices de réfraction sont comparés aux valeurs théoriques des matériaux.

Paramètres	Théorie	DHM	Profilomètre
n_{SiO_2}	1.46	1.47	-
n_{Si}	3.81	3.81	-
h_1 [nm]	375 ± 11.3	388.8	379.7 ± 3.9
h_2 [nm]	525 ± 15.8	539.4	542.3 ± 4.1
h_3 [nm]	975 ± 29.3	995.8	994.6 ± 5.1
h_4 [nm]	1200 ± 36.0	1216.7	1220.2 ± 5.8
h_5 [nm]	1275 ± 38.3	1293.8	1300.7 ± 4.9

Tableau 1: Comparaison des indices de réfraction, et des épaisseurs théoriques et mesurées par holographie numérique et avec un profilomètre.

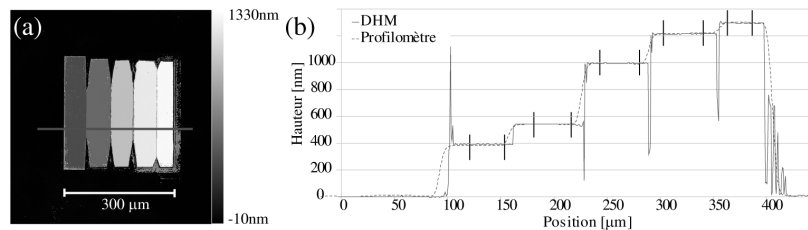


Figure 3: (a)Topographie obtenue et (b) profil obtenus en approchant les épaisseurs des couches de la fonction théorique en considérant les indices de réfraction constant mesuré au préalable. Le profil est comparé à une mesure effectuée avec un profilomètre.

A partir des indices de réfraction mesurés, la topographie de l'échantillon en chaque point peut être reconstruit ainsi que des profils (Figure 3). On remarque que les hauteurs mesurées avec le profilomètre et le DHM correspondent très bien et que les valeurs des indices sont proches des valeurs théoriques. Il faut noter que ces valeurs théoriques ne sont pas les valeurs effectives puisque l'indice dépend des caractéristiques de dépôt et des longueurs d'onde.

II.1 Application à la métrologie des fluides

Le front d'onde réfléchi sur un fluide déposé sur un substrat peut être modélisé de la même manière que l'échantillon précédent avec n_d , l'indice du liquide et n_s , l'indice du matériau sur lequel est déposé le liquide. Des mesures simultanées effectuées avec $\lambda_1=682.5\text{nm}$ et $\lambda_2=796.5\text{nm}$ et avec des objectifs de grossissement 10x et 20x permettent de reconstruire la topographie du Tetraethylene-glycol ($n_d=1.4472$) déposé sur du Si ($n_s=3.8051$). La Figure 4 présente les reconstructions d'amplitude, de phase et de la topographie. On observe très bien des franges sur les images d'amplitude qui correspondent aux additions constructives ou destructives des multiples réflexions internes.

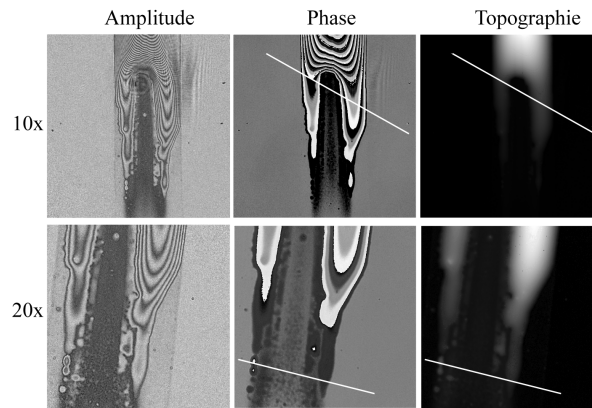


Figure 4: Images d'amplitude (1^{ère} colonne) et de phase (2^{ème} colonne) obtenues par la mesure avec la microscopie holographique numérique pour un objectif de microscope de grossissement 10x (1^{ère} ligne) et 20x (2^{ème} ligne). La réflectométrie DHM permet d'obtenir les images topographiques (3^{ème} colonne).

Pour montrer l'importance de l'utilisation du modèle de réflexion multiple, la Figure 5 compare les profils obtenus en utilisant la relation usuelle entre la phase et la topographie et en utilisant le modèle présenté ici. On voit clairement que le profil habituel est faux puisqu'il donne des hauteurs négatives.

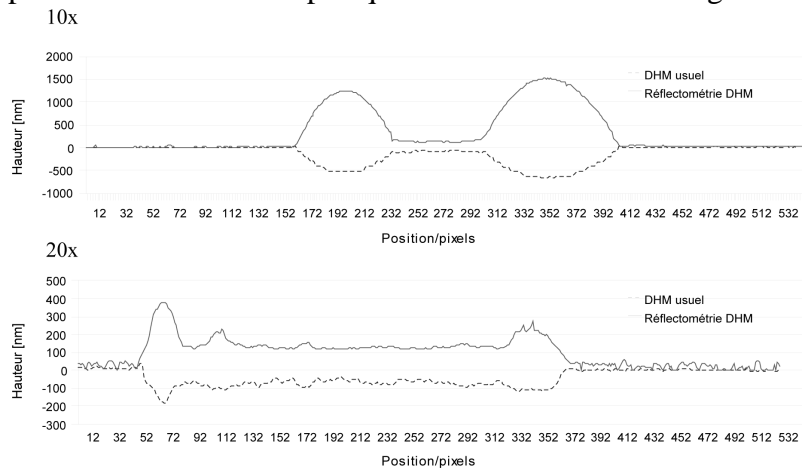


Figure 5: Profils de hauteur le long des lignes définies sur la Figure 4 mesurés avec la relation standard de la phase avec la topographie et avec le modèle de réflectométrie DHM.

CONCLUSIONS

La réflectométrie DHM permet de tenir compte des réflexions multiples qui peuvent intervenir lorsque des échantillons composés de couches semi-transparentes sont observés. On a démontré qu'approcher la mesure du front d'onde complexe avec la fonction théorique de ce front d'onde permet de mesurer précisément les épaisseurs et les indices de réfraction. Cette approche est particulièrement intéressante dans la métrologie des fluides lorsque les réflexions à l'interface liquide-substrat ne peuvent plus être négligées. Étant donné qu'une seule acquisition est nécessaire pour reconstruire cette topographie, la réflectométrie DHM est particulièrement indiquée pour les mesures dynamiques.

REMERCIEMENTS

La recherche menant à ces résultats a été financée par l' « European Community's Seventh Framework Programme FP7/2007-2013 » au travers de la convention de subvention n° 216105. Ahmet Ata Akatay est supporté par la subvention CCMX NMMC: « Study of the complex interfacial properties with nanoscale resolution optical microscopy. »

RÉFÉRENCES

- [1] T. Colomb, S. Krivec, H. Hutter, A.A. Akatay, N. Pavillon, F. Montfort, E. Cuhe, J. Kühn, C. Depeursinge, et Y. Emery, "Digital holographic reflectometry," *Optics Express*, vol. 18, 2010, p. 3719-3731.
- [2] "Coefficients de Fresnel," *Wikipedia*.
- [3] T. Colomb, J. Kühn, F. Charrière, C. Depeursinge, P. Marquet, et N. Aspert, "Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram," *Optics Express*, vol. 14, 2006, p. 4300-4306.
- [4] C. Cobianu, C. Pavelescu, et A. Paunescu, "The effect of deposition conditions on the refractive index of LTCVD SiO₂ films," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 4, 1985, p. 1419-1420.[1] T. Colomb, S. Krivec, H. Hutter, A.A. Akatay, N. Pavillon, F. Montfort, E. Cuhe, J. Kühn, C. Depeursinge, et Y. Emery, "Digital holographic reflectometry," *Optics Express*, vol. 18, 2010, p. 3719-3731.
- [2] "Coefficients de Fresnel," *Wikipedia*.
- [3] T. Colomb, J. Kühn, F. Charrière, C. Depeursinge, P. Marquet, et N. Aspert, "Total aberrations compensation in digital holographic microscopy with a reference conjugated hologram," *Optics Express*, vol. 14, 2006, p. 4300-4306.
- [4] C. Cobianu, C. Pavelescu, et A. Paunescu, "The effect of deposition conditions on the refractive index of LTCVD SiO₂ films," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 4, 1985, p. 1419-1420.