

Réflectométrie par microscopie holographique numérique

Tristan Colomb⁽¹⁾, Stefan Krivec^(2,3), Herbert Hutter⁽²⁾, Ahmet Ata Akatay⁽⁴⁾, Nicolas Pavillon⁽⁴⁾, Frédéric Montfort⁽¹⁾, Etienne Cuche⁽¹⁾, Jonas Kühn⁽⁵⁾, Christian Depeursinge⁽⁴⁾, Yves Emery⁽¹⁾

(1) Lyncée Tec SA, PSE-A, 1015 Lausanne, Suisse

(2) KAI Kompetenzzentrum Automobil- und Industrieelektronik, Europastrasse 8, A-9524, Villach, Austria

(3) Technische Universität Wien; Institut für Chemische Technologien und Analytik, Getreidemarkt 9/164-AC, A-1060 Wien, Austria

(4) Laboratoire d'optique appliquée, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1015 Lausanne, Suisse

(5) DP-CHUV, Site de Cery, 1008 Prilly, Suisse

1. Introduction

La microscopie holographique numérique mesure le front d'onde complexe réfléchi par ou transmis à travers un échantillon à partir d'un seul hologramme acquis. Pour le cas d'un échantillon étudié en réflexion, en supposant une surface homogène composé du même matériau et en excluant des réflexions multiples qui pourraient provenir d'éventuelles couches sous-jacentes, la topographie de l'objet est proportionnelle à la phase reconstruite. La mesure étant interférométrique la précision est nanométrique.

Par contre, pour des échantillons formés de couches semi-transparentes, les réflexions multiples dans les couches sous-jacentes, modifient le front d'onde réfléchi. La topographie n'est donc plus proportionnelle à la phase du front d'onde. Celle-ci peut néanmoins être déduite de la mesure du front d'onde complexe (amplitude et phase) obtenue grâce à la microscopie holographique numérique. En modélisant la structure de l'échantillon, il est de plus possible, dans certains cas, de mesurer non seulement la topographie de l'échantillon, mais aussi les épaisseurs et les indices de réfractions des couches sous-jacentes.

Afin de mesurer ces différents paramètres, la fonction théorique du front d'onde réfléchi par un échantillon formé de multicouches est développée, et différents types d'échantillons sont modélisés. Le principe sera démontré avec un échantillon composé de dépôt de différentes couches minces de SiO₂ sur un substrat de silicium et avec un échantillon dans lequel un cratère a été foré par spectrométrie de masse à ionisation secondaire (SIMS) dans une galette composée de diverses couches.

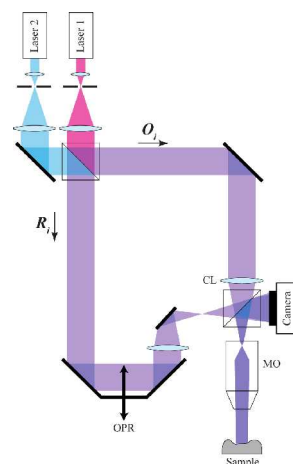


Figure 1

Montage holographique à deux longueurs d'onde qui peuvent être allumées alternativement. Le faisceau objet O_i passe à travers un condensateur C et un objectif de microscope (MO) pour illuminer l'échantillon. Le faisceau réfléchi interfère avec le faisceau de référence R_i dont le chemin optique peut être ajusté par le système retard (OPR).

2. Montage et mesure du front d'onde

Le microscope holographique numérique utilisé pour cette étude (Figure 1) est un DHM R1100® commercialisé par Lyncée Tec (www.lynceetec.com), composé de deux sources laser (682.5 nm et 660 nm) qui peuvent être commutées successivement afin d'obtenir deux hologrammes différents à partir du même objet. Tous les résultats présentés ici ont été obtenus en utilisant un objectif de microscope 10x et d'ouverture numérique NA=0.3 qui donne une résolution latérale d'environ 1.4 µm.

A partir des deux hologrammes enregistrés successivement et d'hologrammes de référence enregistrés dans une zone homogène de l'échantillon, les fronts d'onde sont reconstruits dans le plan de l'hologramme et propagés numériquement pour obtenir les fronts d'onde complexes focalisés [1] [2].

3. Modèles et mesures

En utilisant un modèle théorique du faisceau réfléchi et en modélisant le type d'échantillon qui est étudié [2], les paramètres inconnus (topographie, indice de réfraction, épaisseur de couche) sont optimisés en comparant le modèle théorique aux mesures expérimentales obtenus aux deux longueurs d'ondes. En pratique, l'écart entre les vecteurs théoriques et expérimentaux que forment les valeurs complexes va être minimisé.

En toute généralité, il faudrait tenir compte de la longueur de cohérence de la source [2], mais ici comme nous allons étudier des échantillons de fines épaisseurs, la cohérence va être considérée comme infinie ce qui va simplifier le modèle théorique du front d'onde réfléchi par l'échantillon multi-couches. Le calcul des coefficients de Fresnel pour le cas de c interfaces [3], permet aisément de définir le coefficient de réflexion global r_g . Soit M_p le p -ième milieu ($1 \leq p \leq c + 1$) d'épaisseur d_p ($2 \leq p \leq c$ car M_1 et M_{c+1} sont semi-infinis). En considérant une incidence normale du faisceau d'illumination, on obtient la relation de récurrence suivante en partant de $U_c = r_{c,c+1} = (n_c - n_{c+1}) / (n_c + n_{c+1})$:

$$U_{p-1} = \frac{r_{p-1,p} + U_p e^{i \frac{4\pi}{\lambda} d_p}}{1 + r_{p-1,p} U_p e^{i \frac{4\pi}{\lambda} d_p}} \quad (1)$$

Le coefficient de réflexion globale s'écrit alors $r_g = U_1$. Le front d'onde réfléchi s'écrit donc:

$$\Psi(\mathbf{d}, \mathbf{n}, x_1) = r_g e^{-i \frac{4\pi}{\lambda} x_1 n_1}, \quad (2)$$

où $\mathbf{d} = [d_p]$ et $\mathbf{n} = [n_p]$ et x_1 est la position relative de la couche supérieure. Par exemple dans la Figure 2(a), si l'origine est placée au niveau du substrat vert d'indice n_w , alors $x_1(x,y) = -h(x,y) = -h_j$.

Les front d'onde théoriques et expérimentaux sont tout d'abord normalisés pour pouvoir être comparés:

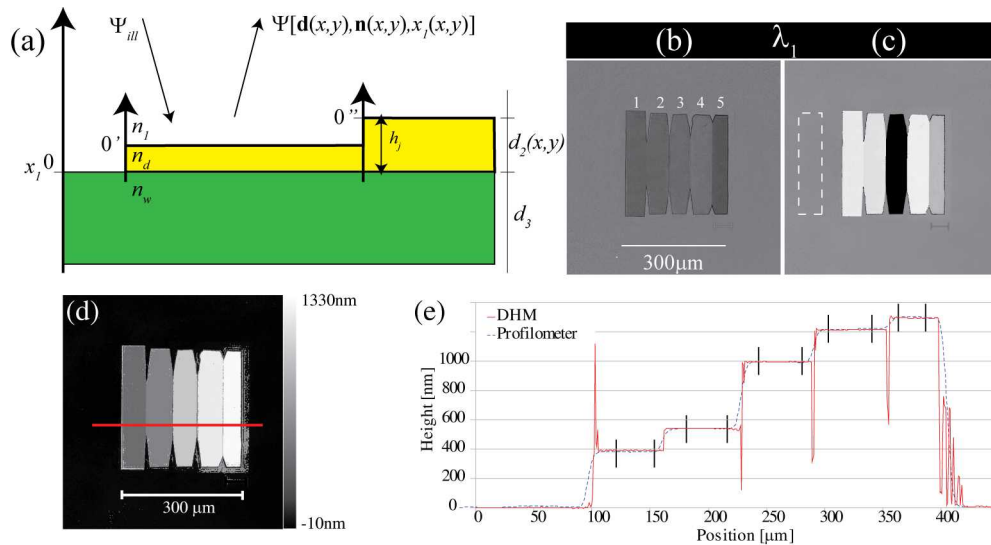
$$\bar{\Psi}_{exp}(x, y) = \Psi_{exp}(x, y) \exp[-i \phi_{exp}(h = 0)] \quad (3)$$

$$\bar{\Psi}(x, y) = \frac{\Psi(x, y)}{\Psi(h=0)} \quad (4)$$

A noter, que l'amplitude du front d'onde expérimental est normalisée par l'utilisation d'un hologramme de référence [2]. Pour un type spécifique d'échantillon comme présenté par exemple dans la Figure 2, un modèle (a) est défini et les fronts d'ondes complexes normalisées sont reconstruits pour les deux longueurs d'ondes (amplitude (b) et phase (c) pour λ_1). Certains paramètres sont connus (indice de l'air n_j) et d'autres sont inconnus. La mesure des paramètres inconnus se fait donc en minimisant la somme MSE des normes de la différence entre le front d'onde expérimental et théorique:

$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^S |\bar{\Psi}_{ij} - \bar{\Psi}_{ij,exp}(\mathbf{d}, \mathbf{n})| \quad (5)$$

où ij correspond à la longueur d'onde λ_j et la marche j . Les résultats obtenus pour un dépôt de SiO_2 sur un substrat de silicium pour lequel les inconnus sont les épaisseurs de SiO_2 et les indices du SiO_2 et du Si. La mesure des indices donnent $n_{\text{SiO}_2}=1.4706$ et $n_{\text{Si}}=3.8051$ en accord avec les valeurs théoriques. Alors que la mesure topographique est en parfait accord une mesure effectuée avec un profilomètre mécanique.



Un deuxième exemple est présenté à la Figure 3 pour lequel un trou est gravé dans un échantillon composé de 3 couches d'or ($n_2=0.131+3.445812 @670.2\text{nm}$, $d_2=40\text{nm}$), de SiO_2 ($n_3=1.4560 @670\text{nm}$, $d_3=100\text{nm}$) et finalement d'un substrat de Si ($n_4=3.815103+0.014051i @673.8\text{nm}$). La topographie de la gravure est calculée et un profil est comparé à une mesure faite avec un profilomètre mécanique.

Figure 2

Dépôt de SiO_2 sur un substrat de silicium: (a) modèle; (b,c) images de l'amplitude et de la phase reconstruites pour $\lambda_1=682.5\text{nm}$, (d) image de la topographie et (e) profil mesuré avec le microscope holographique numérique comparé à une mesure effectuée avec un profilomètre mécanique.

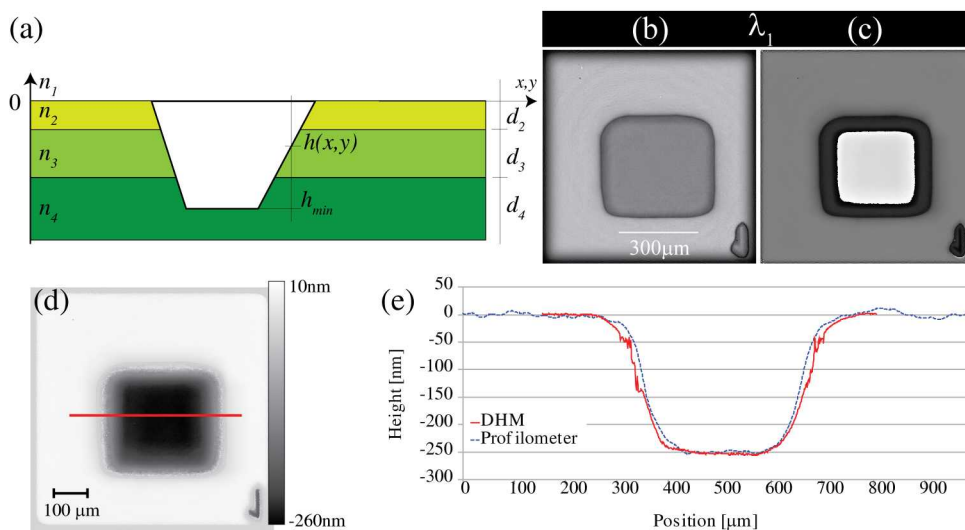


Figure 3

Gravure dans un échantillon composée de 3 couches ($\text{Au/SiO}_2/\text{Si}$): (a) modèle, (b,x) images de l'amplitude et de la phase reconstruites pour $\lambda_1=682.5\text{nm}$, (d) image de la topographie et (e) profil mesuré avec le microscope holographique numérique comparé à une mesure effectuée avec un profilomètre mécanique.

4. Conclusion

Les résultats démontrent que la réflectométrie par microscopie holographique numérique permet de mesurer l'épaisseur et les indices de réfractons de couches semi-transparentes et de faire de l'imagerie de la topographie. Ces résultats ouvrent de nouveaux champs d'application pour la microscopie holographique numérique, comme les investigations sur les couches minces par exemple.

5. 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. »

6. Bibliographie

- [1] 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, n°. 10, p. 4300-4306, 2006.
- [2] T. Colomb et al., “Digital holographic reflectometry,” *Optics Express*, vol. 18, n°. 4, p. 3719-3731, 2010.
- [3] “Coefficients de Fresnel,” *Wikipedia*. Lien: http://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficients_de_Fresnel.