

Proposition de thèse CNES - Institut Fresnel

Analyse de la diffusion de la lumière par les défauts localisés et les contaminants

Résumé du sujet de thèse

Les techniques d'analyse de la diffusion lumineuse sont aujourd'hui devenues extrêmement sophistiquées et permettent d'examiner avec soin la contribution des rugosités d'interface dans les performances des filtres interférentiels multicouches. L'Institut Fresnel a développé pour cela une modélisation électromagnétique et une instrumentation optique (banc SALSA) uniques sur la scène internationale.

En moins de 20 années, des progrès extraordinaires ont été obtenus sur les filtres optiques, notamment du point de vue de la minimisation de la diffusion lumineuse (quelques 10^{-6} du flux incident). Ces progrès sont étroitement liés aux techniques de polissage, qui permettent d'obtenir, sur des substrats amorphes, des rugosités inférieures à une fraction de nanomètre dans la fenêtre fréquentielle optique. Il est important ici de signaler qu'avec les technologies modernes de fabrication des filtres (Dual Ion Beam Sputtering, Magnétron Sputtering...), la rugosité du substrat est reproduite quasiment à l'identique par chacune des couches minces constituant l'empilement ; il n'y a donc pas d'amplification de la rugosité, de sorte que la valeur seuil (minimale) de la diffusion est imposée par la rugosité du substrat (aux coefficients d'exaltation/inhibition près).

Toutefois, à ce niveau de qualification, de nouvelles problématiques apparaissent et concernent en particulier la présence de défauts localisés dans le composant. Ces défauts sont de taille submicronique et naissent au cours de la fabrication des filtres. Leur densité est faible (< 1 défaut pour un diamètre de $100 \mu\text{m}$) pour les composants classiques, de sorte que dans la majorité des cas, leur contribution peut être négligée. Cependant, dans le cas des filtres complexes (une centaine de couches minces) utilisés pour le spatial, l'impact de ces défauts isolés devient dominant dans le processus de diffusion lumineuse, et c'est ce à quoi on assiste pour un nombre croissant d'applications.

Il devient donc majeur de pouvoir séparer, dans la valeur affichée pour la rugosité, la contribution de la topographie classique (intrinsèque, continue et dérivable), de celle des défauts localisés (nodules, piqûres, rayures, poussières). Cette séparation est majeure pour qualifier les procédés de polissage et nettoyage, comprendre les phénomènes d'absorption et d'endommagement sous flux, et améliorer les technologies de dépôt (propagation des défauts du substrat dans le multicouche, génération de nouveaux défauts dans le volume de ce multicouche). D'un point de vue quantitatif, il s'agit d'analyser avec discrimination le poids d'une rugosité intrinsèque dont l'écart-type est inférieur au nm, et celui d'une densité de défauts isolés distribués de façon aléatoire. Il faut ici préciser que les méthodes non optiques, et celles basées sur la microscopie optique, si elles sont d'une extrême efficacité, ne répondent que partiellement à ce problème, et ce, pour plusieurs raisons. En effet il est tout d'abord majeur que les valeurs d'hétérogénéité correspondent à une intégrale sur la fenêtre fréquentielle (spatiale) optique du point du fonctionnement (l'application), contrainte qui est naturellement satisfaite par les techniques de diffusion lumineuse. Par ailleurs on ne peut pas faire l'impasse des problèmes de stationnarité inhérents à tout processus d'échantillonnage ou à toute surface de dimension bien inférieure au spot d'éclairement utilisé pour l'application. Enfin, on doit garder en mémoire que la cible concerne la lumière parasite (issue de la rugosité) et non la valeur de la rugosité en elle-même. Ces éléments illustrent le caractère stratégique des techniques de diffusion lumineuse pour l'étude des hétérogénéités en lien avec la lumière parasite.

La technique de diffusion lumineuse couramment développée au laboratoire consiste à extraire le spectre de rugosité (Transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation de la topographie) de la topographie d'un

substrat à partir de la mesure de son indicatrice de diffusion (obtenue en déplaçant un détecteur autour de l'échantillon). Cette extraction se fait en appui sur une théorie électromagnétique (au premier ordre compte tenu du très faible rapport rugosité/longueur d'onde) largement validée. Le spectre ainsi mesuré caractérise l'échantillon sur toute la surface du spot d'éclairage (ajustable du mm² au cm²) ; sa forme spectrale indique la nature statistique de la rugosité, avec une décroissance liée à l'inverse de la longueur de corrélation et d'éventuels maxima indiquant de pseudo-périodes ; le cas échéant, des fonctions de corrélation angulaire permettent d'identifier les directions privilégiées sur l'échantillon (anisotropie de rugosité). Quant à la rugosité elle-même, elle est obtenue par intégration du spectre de rugosité.

Le montage (SPARSE, **SP**ATIALLY **R**ESOLVED **S**CATTEROMETRY **E**QUIPMENT) que nous avons récemment développé pour résoudre le challenge cité (séparation des rugosités intrinsèque et extrinsèque) consiste à mesurer, non pas une indicatrice de diffusion pour un échantillon, mais 10⁶ indicatrices correspondant à chaque pixel d'une matrice CCD en bijection avec un élément de surface grâce à un système télé-centrique adapté. Il faut noter que la qualité de cette bijection interdit toute rotation du détecteur autour de l'échantillon (cas précédent classique), de sorte qu'il faut remplacer cette rotation du détecteur par une rotation du faisceau d'éclairage, en appui sur le théorème de réciprocité. Dans ces conditions, on extrait le spectre de rugosité de chaque « pixel de surface » et on en analyse la forme spectrale. Une décroissance monotone est caractéristique d'une rugosité intrinsèque, tandis que la présence d'oscillations révèle l'existence d'un défaut isolé (diffraction par une particule) dont les dimensions imposent la forme des oscillations. Cette analyse pixel à pixel permet de trier les pixels « intrinsèques » et « extrinsèques », et en conséquence d'extraire 2 valeurs de rugosités indiquant respectivement le poids des défauts isolés et celui de la topographie. Chacune de ces valeurs est donnée avec une précision relative (valeur normée à la valeur de la rugosité) de l'ordre du %, pour des rugosités détectées jusqu'à un millième de nm. A noter que la détectivité optique du système SPARSE est de l'ordre de 10⁻⁸ pour l'indicatrice de diffusion (limitation imposée par la diffraction Rayleigh des particules d'air) dans tout le domaine angulaire.

Nous disposons ainsi au laboratoire d'une instrumentation de type SPARSE. Toutefois celle-ci fonctionne en lumière non polarisée et sur un mode monochromatique (une seule longueur d'onde : 840 nm), alors que la diffusion des filtres optiques est particulièrement chromatique et polarisante. L'objectif de cette thèse consiste ainsi, dans une première étape, à étendre l'instrumentation SPARSE à un régime continu polychromatique (laser à super continuum + filtre accordable). Dans une deuxième étape, on cherchera des critères robustes pour identifier rapidement, en appui sur les outils théoriques de l'optique statistique, le poids des défauts isolés. On étudiera ensuite la propagation de ces défauts dans le volume des filtres, en résolvant le problème inverse qui consiste à identifier les lois de corrélation entre interfaces (lesquelles pilotent la cohérence mutuelle des sources de diffusion). Enfin, une rétroaction avec la technologie sera proposée.

Profil recherché :

Le/La candidat.e devra être diplômé.e d'un master 2 de physique ou d'une école d'ingénieur.e.s. Le travail à réaliser présentera des aspects théoriques, numériques et expérimentaux à mener en parallèle. Le/La candidat.e devra donc présenter un gout certain pour ces différentes approches de la physique en général et de l'optique en particulier. Une formation de base en optique est souhaitable

Environnement et supervision :

Direction de la thèse : M. Zerrad, myriam.zerrad@fresnel.fr , Co-direction : M. Lequime, C. Amra

Financement CNES – Entreprise

Entité d'accueil : équipe Concept de l'Institut Fresnel : www.fresnel.fr/concept

Candidature : Envoyer CV, lettre de motivation et bulletins de notes à myriam.zerrad@fresnel.fr **avant le 10 mars 2021**