

## Sujet de thèse

Laboratoire : **Institut Fresnel** ([www.fresnel.fr](http://www.fresnel.fr))  
Equipe Couches Minces Optiques (RCMO)

Directeur de thèse : **Julien LUMEAU**  
Coordonnées : [julien.lumeau@fresnel.fr](mailto:julien.lumeau@fresnel.fr), 06 72 28 90 61

**Titre** : Composants infrarouges multicouches spatialement structurés

### Description du sujet :

Les filtres optiques interférentiels interviennent dans de nombreux domaines des sciences et de l'industrie. Grâce à la maturité qui a été acquise au cours des trente dernières années, ainsi qu'à la diversité et à la complexité des fonctions optiques réalisées (respect de contraintes simultanées sur l'intensité et la phase, la polarisation, l'achromaticité ou la résonance, la stabilité à l'incidence,...). La conception de ces empilements bénéficie aujourd'hui de la disponibilité de logiciels de synthèse élaborés qui font appel aux techniques d'optimisation les plus récentes (algorithmes génétiques, recuit simulé, méthode des aiguilles, ...). Si, dans les années 2000, des progrès spectaculaires ont été réalisés dans le domaine de la fabrication de filtres destinés aux applications micro-électronique (traitement des optiques des systèmes de photolithographie UV), télécommunications optiques à haut débit (multiplexeurs et démultiplexeurs des liaisons DWDM, filtres égaliseurs de gain) ou biomédical (filtres dichroïques bord de bande à flancs très raides pour les observations en fluorescence, filtres suppresseurs de raies laser de densité optique supérieure à 7), la technologie a encore progressé au cours des 5 dernières années, notamment dans le domaine de l'automatisation des procédés, et rend aujourd'hui accessible le dépôt de plusieurs centaines de couches avec une précision nanométrique.

Cependant, quel que soit le domaine d'application, et malgré les progrès évoqués plus haut, la réalisation de fonctions de filtrage à performances ultimes soulève encore plusieurs problèmes critiques de fabrication tels que la maîtrise de l'épaisseur optique de chacune des couches de l'empilement avec une précision nanométrique, voire dans certains cas, sub-nanométrique (toute erreur de réalisation étant en effet susceptible d'induire une modification non désirée, et parfois dramatique, de ses propriétés optiques), la maîtrise de l'uniformité, i.e. de l'évolution de l'épaisseur optique de chacune de couches de l'empilement à la surface du substrat associée à la forme de l'inductrice d'évaporation qui va induire une évolution des propriétés optiques locales du filtre (réflexion et transmission) ou encore la maîtrise des problèmes associés à une structuration spatiale d'un empilement. Enfin, même si les progrès réalisés ces dernières années dans les technologies de dépôt rendent envisageable la fabrication de filtres comportant plusieurs centaines de couches, il n'en reste pas moins vrai que ces progrès concernent essentiellement le domaine du visible et du proche infrarouge et que la réalisation de filtres à bande passante ultra-étroite adaptés à l'infrarouge moyen reste encore aujourd'hui un problème relativement ouvert.

Ce projet de thèse consiste donc à développer et fabriquer des couches minces optiques à base de matériaux photosensibles de type chalcogénures et d'intégrer ces couches à des empilements multicouches complexes. Les matériaux à base de chalcogénures ont connu de nombreux développements au cours de ces 15-20 dernières années, plus spécifiquement dans le domaine des fibres ou des couches minces optiques pour la réalisation de guides d'ondes planaires. Cependant, il n'y a eu que très peu de démonstrations du potentiel de ces couches pour la réalisation d'empilements complexes. De plus, la possibilité de micro- ou nano-structurer en volume ces empilements permettra de développer de nouvelles fonctionnalités. En outre, cette nouvelle approche permettra de fabriquer des éléments volumétriques basés sur la modification locale photo-induite de l'indice de réfraction de l'une ou plusieurs couches photosensibles d'un empilement multicouches et ainsi de réaliser, par exemple, des lames de phase volumétriques pour la mise en forme de faisceau (ordres supérieurs, flattop...). Cette méthode de mise en forme de faisceaux existe déjà par structuration locale de l'épaisseur mécanique d'une fenêtre optique (e.g. à l'aide de techniques photolithographiques). L'utilisation de la photosensibilité permet alors d'intégrer la modification de phase dans une des couches et ainsi de réaliser une lame de phase à faces planes et parallèles qui ne nécessite qu'une étape d'exposition laser et est de plus beaucoup moins sensible à l'environnement extérieur.

Ces couches photosensibles permettront également de réaliser des réseaux de Bragg en volume en transmission ou réflexion (i.e. respectivement très sélectifs angulairement ou spectralement (notch)). De plus, l'intégration de ces structures à réseau de Bragg dans des structures multicouches permettra par la suite de fabriquer des filtres à réseaux résonnants intégrés. Ces structures sont en général composées d'un empilement dont la dernière couche a été gravée avec un réseau surfacique 2D. A l'aide de ces structures, il est ainsi possible de réaliser des filtres très étroits (de l'ordre du picomètre ou de la dizaine de picomètres) et ce à l'aide de structures multicouches présentant une dizaine de couches. Cette approche est alors très intéressante pour la réalisation de filtres pour le moyen infrarouges dont les épaisseurs totales, dans le cas de filtres classiques en couches minces, peuvent atteindre plusieurs dizaines de microns. L'utilisation de matériaux chalcogénures associés à leur photosensibilité

permettront donc de réaliser les premiers prototypes de filtres à réseaux résonnants intégrés. Cette approche permettra d'une part de pouvoir désigner des nouvelles structures qui ne nécessiteront pas d'avoir le réseau situé sur la dernière couche de l'empilement et de plus l'utilisation de méthodes holographiques pour la fabrication du réseau permettra de diminuer les imperfections de la structure et par conséquent d'augmenter les surfaces utiles des filtres fabriqués.

Enfin, cette photosensibilité permettra également, dans le cas où ces couches sont positionnées au niveau de couches critiques d'un empilement, d'aller modifier la réponse spectrale d'un filtre et ainsi de corriger d'éventuelles erreurs de fabrications ou bien le défaut d'uniformité inhérent à toute technique de dépôt. Cette approche a déjà été démontrée par l'équipe Couches Minces Optiques dans le cas d'un filtre de type Fabry-Perot dont le spacer était réalisé à l'aide d'un matériau chalcogénure photosensible. Cette même approche peut être appliquée par exemple dans le cas d'antireflets, dichroïques ou bien de structures à résonnances géantes. De plus, bien que l'ensemble des travaux ont été jusqu'à maintenant restreints aux domaines visibles et proche-infrarouges, l'emploi de chalcogénures permet d'étendre cette approche à des bandes jusqu'à 10+ microns. Cette nouvelle technologie bénéficiera de nombreux secteurs où les couches minces optiques interviennent (défense, imagerie, espace, biologie ...) puisqu'elle permettra de fabriquer des filtres qui ne pouvaient être fabriqués jusqu'à maintenant. De plus cette nouvelle technologie renforcera le lien entre couches minces optiques et cristaux photoniques puisqu'elle ouvre la porte à la fabrication de composants ayant une phase structurée en volume.

Ce projet de thèse vise donc à développer les procédés de dépôt de couches minces à base de chalcogénures photosensibles présentant de larges fluctuations photo-induites de l'indice de réfraction entre  $10^{-3}$  et  $10^{-1}$ . Les procédures permettant d'obtenir des couches uniformes et homogènes de chalcogénures associées à de faibles pertes seront développées. Nous étudierons également les matériaux qui peuvent être combinés à ces couches de chalcogénures pour la réalisation d'empilements complexes ainsi que la possibilité d'utiliser des couches de passages dans le cas où il existerait des incompatibilités. Les cinétiques de photosensibilité seront étudiées en priorité, mais il est intéressant de noter que les variations photoinduites de l'indice de réfraction seront étudiées en priorité, mais que d'autres propriétés photo-induites seront également investiguées telles que les variations photoinduites de biréfringence qui pourraient permettre de fabriquer des matrices de micro-polariseurs par exemple.

Dans un second temps, les structures pouvant bénéficier de ces propriétés de photosensibilité seront étudiées théoriquement et expérimentalement. Par exemple, nous nous proposons d'étudier des lames de phase par modification locale de l'indice de réfraction d'une couche mince de chalcogénure. Compte tenu de leur photosensibilité géante, une couche de 5 à 10 microns d'épaisseur est suffisante pour produire un saut de phase de  $2\pi$ . De plus, l'utilisation de structures multicouches devrait permettre de fabriquer des structures complexes. Par exemple, l'achromatisme de ces lames de phase représente une des limitations principales de ces structures. Le design de structures multicouches sera étudié afin d'étendre la gamme spectrale de fonctionnement de ces structures. Une liste non-exhaustive de ces structures inclut des microlentilles de Fresnel, des convertisseurs de modes, des diffuseurs, des lames génératrices de vortex. Dans le cas de structures multicouches, une étude théorique et expérimentale de la réponse spectrale d'un filtre sera également réalisée. Par exemple, l'apport de la photosensibilité pour la réalisation de filtres Fabry-Perot ultra-uniformes ou bien d'antireflets présentant une très forte atténuation de la réflectivité résiduelle sera mis en évidence. Enfin, la réalisation de structures périodiques modulées à hautes fréquences (réseaux de Bragg submicroniques) sera investiguée. Des réseaux de Bragg simples seront étudiés aussi bien théoriquement qu'expérimentalement mais également leur intégration dans une structure multicouche pour la réalisation de filtres à réseaux résonnants pour la réalisation de filtres à bande passante très étroite en transmission ou en réflexion (notch).

Enfin, il est important de noter que l'ensemble de ces travaux bénéficiera d'un environnement en accord avec l'état de l'art dans le domaine des couches minces optiques. En effet l'équipe Couches Minces Optiques de l'Institut FRESNEL a emménagé depuis septembre 2014 dans l'Espace Photonique, un ensemble de salles grises et blanches de 250 m<sup>2</sup> dans lequel sont regroupés les moyens technologiques de production et de caractérisation de filtres optiques interférentiels dont 2 machines de dépôt performantes et permettant le dépôt de structures complexes à plusieurs dizaines voire centaines de couches (magnétron sputtering et Plasma ion assisted déposition) qui ont été acquises au cours de ces deux dernières années.

**Date de début : dernier trimestres 2015**

**Financement : Bourse DGA/AMU**