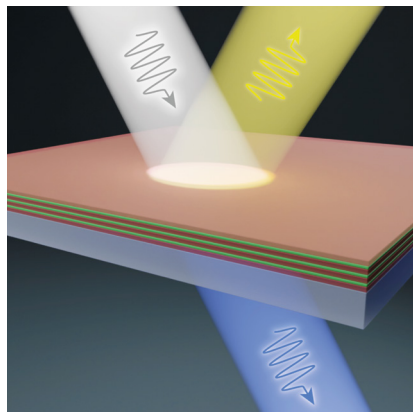


FILTRES OPTIQUES INTERFÉRENTIELS : GUIDE PRATIQUE

Julien LUMEAU*, Fabien LEMARCHAND

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France

*julien.lumeau@fresnel.fr



Les filtres optiques interférentiels sont des composants cruciaux en optique moderne. Ils permettent un contrôle précis des propriétés spectrales de la lumière, telles que la transmission et la réflexion, ouvrant la voie à de nombreuses applications. Cependant, leur fabrication est une technologie

complexe. Les performances de ces filtres dépendent fortement des spécifications initiales, des tolérances de fabrication et du choix des matériaux. Cet article propose un guide pratique et détaillé, décrivant les étapes clés de la conception et de la fabrication de ces filtres, les limitations technologiques actuelles et les défis à relever pour optimiser leur production et leurs performances.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513333>

Article publié en accès libre sous les conditions définies par la licence Creative Commons Attribution License CC-BY (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), qui autorise sans restrictions l'utilisation, la diffusion, et la reproduction sur quelque support que ce soit, sous réserve de citation correcte de la publication originale.

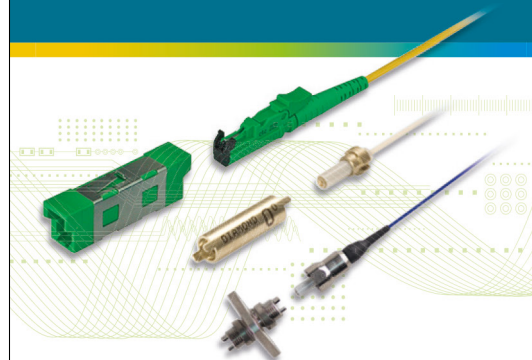
FILTRES INTERFÉRENTIELS : AU-DELÀ DES SIMPLES ANTIREFLETS

Les filtres optiques interférentiels sont constitués de multiples couches minces de matériaux, dont l'épaisseur est inférieure ou égale à la longueur d'onde de la lumière. Ces filtres sont omniprésents, allant des simples traitements antireflets

(quelques couches) aux empilements complexes (plusieurs centaines de couches). Ils permettent de contrôler finement le spectre de la lumière et d'améliorer les performances des systèmes optiques. Malgré les avancées significatives des dernières décennies [1-3], notamment grâce au développement

2BLighting Technologies

High performance and reliable fiber optic assemblies



PM+

Ultra high Polarization Extinction Ratio (PER)

- Up to +4dB higher PER
- State-of-the-art insertion Loss (IL) and Return Loss (RL) values
- Best connector type and tolerance E-2000®, DMI, Mini AVIM® and Micro AVIM®
- Available on homologated fibres and cables

16W



E-2000® PS+

Contact expanded beam

- Low loss
- Interlock solution optional
- 1310-1550nm or 980-1060nm

100W



E-2000® PSm

Contact pump laser connector

- Low loss
- Interlock solution optional
- MM 105 0.22NA (MM 200 0.22NA optional)



www.2blighting.fr

info@2blighting.com

+33 1 64 59 21 30

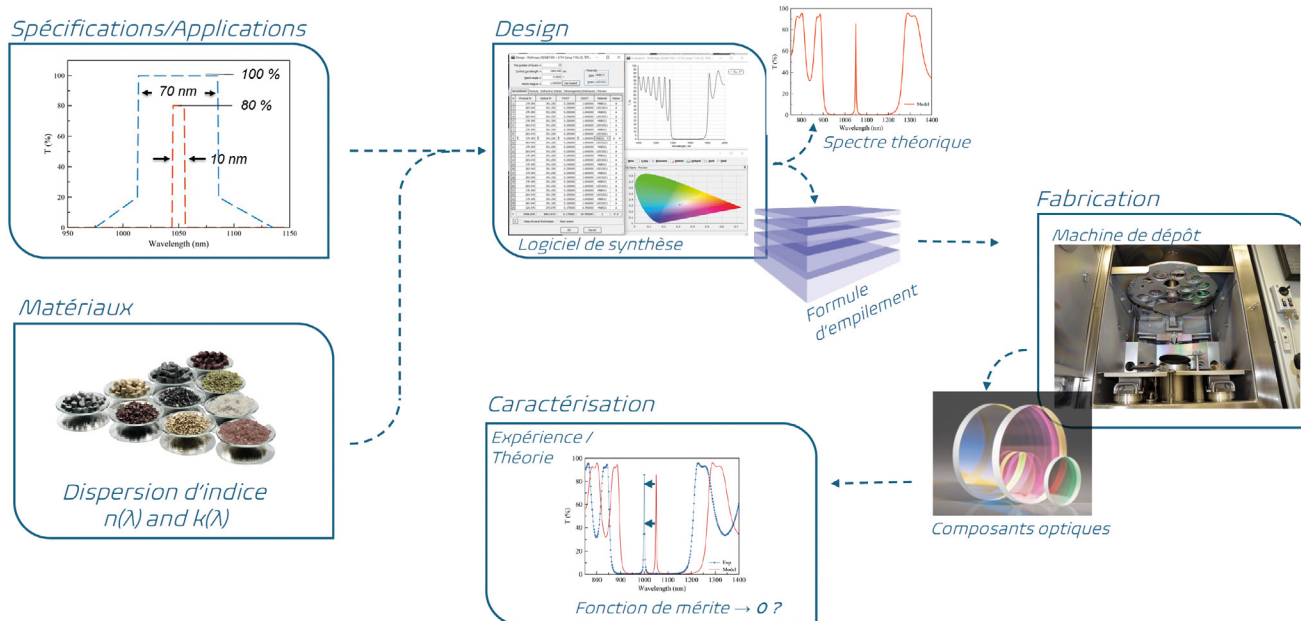


Figure 1. De la spécification à la réalisation.

des télécommunications, la fabrication de ces filtres reste un défi. Elle dépend de nombreux paramètres : choix des matériaux, structure, techniques de dépôt, contrôle précis des épaisseurs, etc. Il n'existe pas de solution unique, mais plutôt un ensemble d'approches possibles. Ce guide présente les étapes de fabrication et les limites technologiques actuelles.

MATÉRIAUX POUR FILTRES INTERFÉRENTIELS : UN VASTE PANORAMA

Le choix des matériaux est une étape cruciale, qui intervient dès le début du projet, après avoir défini

précisément les performances souhaitées du filtre. Il est important de bien cerner le besoin et d'éviter de sur-spécifier inutilement, car cela augmente potentiellement la complexité de la fabrication.

Le domaine spectral d'application et l'utilisation finale guident le choix des matériaux. Le domaine allant du proche ultraviolet au proche infrarouge (300-2500nm) est une cible privilégiée, car de nombreux matériaux oxydes (SiO_2 , Al_2O_3 , HfO_2 , ZrO_2 , Ta_2O_5 , Nb_2O_5 , TiO_2 ...) y sont

transparents et présentent de bonnes propriétés optiques et mécaniques. De plus, les épaisseurs de couches nécessaires sont compatibles avec les techniques de dépôt actuelles, et le choix précis du matériau sera fonction de l'application, et de la technologie de dépôt utilisée.

L'extension vers l'UV ou l'extrême UV (EUV) est possible, mais souvent limitée par le manque de matériaux ayant un fort contraste d'indice de réfraction ou par des pertes optiques importantes. De même, l'extension vers les grandes longueurs d'onde (2,5-20 microns) pose des défis, car les matériaux présentent souvent une tenue dans le temps et/ou à l'environnement précaire, et les épaisseurs de couches nécessaires deviennent beaucoup plus importantes, allongeant considérablement le temps de fabrication.

Lord Rayleigh, en 1886, observa une plaque de verre ternie, exposée aux gaz de cheminée. La surface n'était pas juste sale, mais *irisée*, avec des couleurs changeantes et une transmission augmentée. Il comprit que c'était dû à une fine couche formée par la réaction chimique du verre, créant des interférences lumineuses, comme les lames minces de Newton ou Boyle. Phénomène de couche mince, un des premiers anti-reflets !



SYNTHÈSE DE FILTRES : OPTIMISATION ET COMPROMIS

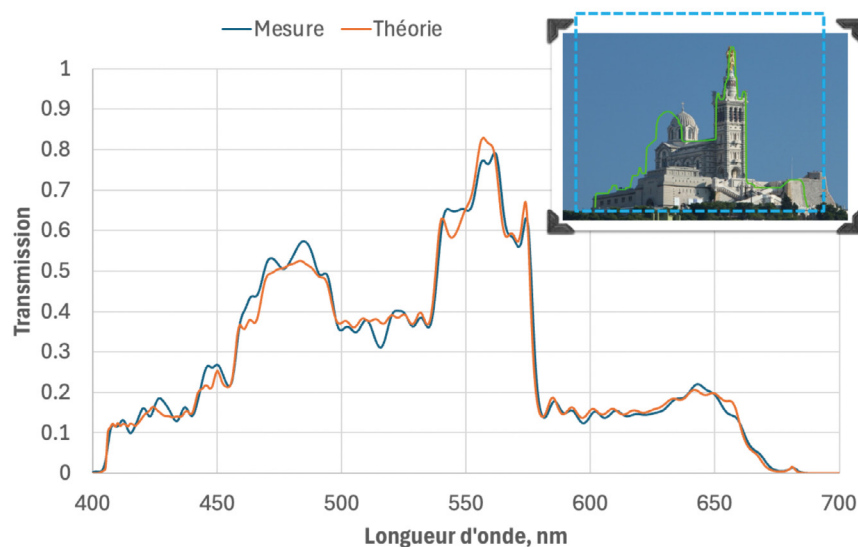
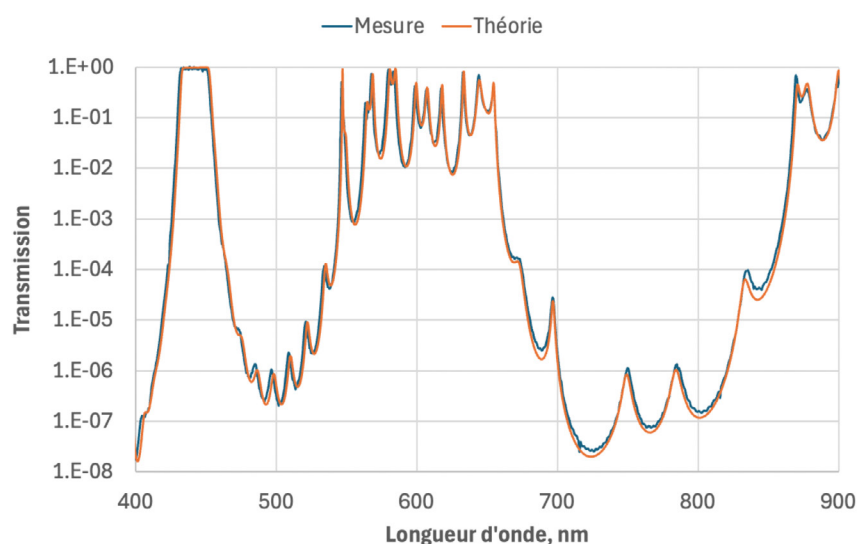
La synthèse de filtres optiques, c'est-à-dire la conception de l'empilement optimal des couches minces, est une étape critique. C'est la structure précise de cet empilement (le nombre de couches, l'épaisseur et le matériau de chaque couche) qui détermine les performances finales du filtre. Bien que des logiciels de

conception commerciaux (tels qu'Optilayer, OTF Studio, Essential McLeod) et open-source (comme OpenFilters) soient disponibles, la conception d'un filtre à la fois performant et réalisable en pratique reste un défi qui requiert une expertise significative. Pour des fonctions optiques simples (par exemple, un miroir de Bragg, un filtre passe-bande de type Fabry-Pérot), des solutions analytiques ou des « recettes » issues de l'expérience, existent. Une alternance de couches

« quart d'onde » (dont l'épaisseur optique est égale à un quart de la longueur d'onde de référence) est fréquemment utilisée. Pour des fonctions plus complexes, l'utilisation de logiciels de conception est indispensable. Ces logiciels utilisent des algorithmes de génération d'empilement (comme la méthode des aiguilles) ou d'optimisation locale/globale.

Certaines précautions sont critiques pour cette étape de synthèse et vont conditionner le résultat final : ● ● ●

Figure 2. Exemple de réponses spectrales de filtres complexes. Alors qu'il est possible d'obtenir des accord théorie/expérience quasi parfaits sur plusieurs ordres de grandeurs en transmission pour des fonctions classiques, les structures peuvent être beaucoup plus sensibles aux erreurs d'épaisseur comme c'est le cas pour ce filtre représentant le profil de Notre Dame de la Garde à Marseille.



L'OPTIQUE EST NOTRE AVENIR



Edmund Optics®

**Le guichet unique
pour vos besoins en
optiques !**

- Un large choix de plus de 34.000 produits en stock
- Optiques provenant de plus de 40 marques leaders du secteur
- Expédition rapide depuis nos 9 centres de distribution à travers le monde
- Assistance produit & application 24 h/24 et 7 j/7 par chat – une première dans l'industrie
- Entreprise internationale avec plus de 80 ans d'expérience dans le domaine de l'optique

**Parcourez notre magasin
en ligne dès maintenant !**

www.edmundoptics.fr

+33 (0) 820 207 555
sales@edmundoptics.eu

→ **Définition de la fonction cible :**

Il faut traduire les spécifications techniques en une fonction cible numérique compréhensible par le logiciel. Il est préférable de spécifier des valeurs cibles précises plutôt que de simples seuils.

→ **Choix des matériaux :** La synthèse se fait généralement avec deux matériaux, un à haut indice (H) et un à bas indice (L). Il est important de connaître précisément leurs indices de réfraction et leur variation en fonction de la longueur d'onde (dispersion). Ces données sont cruciales et doivent être mesurées.

→ **Initialisation :** Si aucune solution initiale n'est connue, pour les filtres simples (moins de 40 couches), il est possible d'utiliser itérativement une optimisation locale à partir de tirages aléatoires d'épaisseurs initiales. Pour les filtres complexes, la méthode des aiguilles est recommandée. Cette méthode, même en commençant avec une seule couche, permet d'introduire progressivement de nouvelles couches très fines ("aiguilles") à des endroits stratégiques, tout en ajustant les épaisseurs existantes. Il est crucial de bien choisir l'épaisseur totale souhaitée au départ, car la méthode des aiguilles a tendance à la conserver relativement stable pendant l'optimisation.

→ **Simulation des imperfections :**

La simulation de l'impact des imperfections de fabrication (erreurs d'épaisseur et d'indice) est une étape à ne pas négliger. La conception n'est validée que si le filtre conserve des performances acceptables malgré ces imperfections.

La synthèse est donc un compromis subtil entre la théorie, la modélisation et les contraintes de la fabrication. Il faut bien souvent itérer entre la conception théorique et la simulation de la fabricabilité.

PROCÉDÉS DE FABRICATION ET CONTRÔLE DES FILTRES INTERFÉRENTIELS

Une fois la structure du filtre définie, l'étape de fabrication peut commencer. Trois technologies principales sont utilisées :

→ L'évaporation (thermique, par canon à électrons, assistée par ions). C'est une technique flexible et relativement peu coûteuse, mais elle peut manquer de stabilité et de reproductibilité pour les empilements très complexes.

→ La pulvérisation cathodique magnétron : (DC, MF ou RF, assistée par plasma). Elle est souvent préférée pour les filtres complexes, notamment pour les applications spatiales, car elle offre une bonne densité des couches et une

excellente adhérence. Cependant, elle est limitée par la taille maximale des substrats et peut générer davantage de défauts.

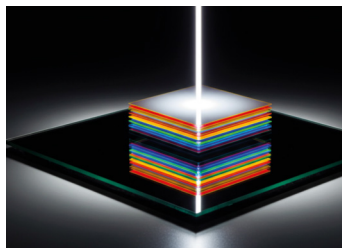
→ La pulvérisation ionique : (assistée ou non par canon à ions). Elle offre une excellente stabilité et permet de déposer des couches très denses avec une faible absorption, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications nécessitant une très faible absorption, comme les lasers de haute puissance. Elle est cependant généralement plus lente que les autres techniques.

Le contrôle précis de l'épaisseur de chaque couche est fondamental pour obtenir les performances spectrales souhaitées. La microbalance à quartz et le contrôle par temps de dépôt sont des méthodes courantes, mais elles ne permettent pas de mesurer directement les performances optiques du filtre en cours de fabrication.

Le contrôle optique *in-situ*, qui s'est largement développé, permet de mesurer en temps réel l'évolution du signal lumineux transmis ou réfléchi par le filtre pendant le dépôt. Le filtre en cours de fabrication sert alors de capteur d'épaisseur de la couche en cours de dépôt. On peut utiliser soit une seule longueur d'onde (contrôle monochromatique), soit une gamme de longueurs d'onde (contrôle large bande). Le contrôle monochromatique nécessite de sélectionner la ou les longueurs d'onde optimales pour le contrôle, ce qui requiert une expertise et une bonne connaissance du design. L'analyse du spectre en temps réel par un contrôle large bande permet de connaître l'épaisseur et les propriétés optiques pendant le dépôt de la couche. Il n'existe pas de consensus sur la supériorité d'une méthode de contrôle par rapport à l'autre.

À ce jour, la combinaison de méthodes de dépôt stables, d'un contrôle optique *in-situ* précis et de stratégies adaptées permet d'obtenir des filtres dont les performances expérimentales correspondent très bien aux prédictions théoriques, avec des erreurs par couche typiquement de l'ordre de 0,1 à 0,3 nm.

Les filtres optiques métalliques (argent, or, aluminium) ont des propriétés différentes de celles des filtres diélectriques (à base d'oxydes). Leur indice de réfraction complexe, avec une partie imaginaire importante, se traduit par une forte absorption de la lumière. Cette propriété peut être exploitée pour créer des filtres interférentiels combinant des couches métalliques et diélectriques. Les métaux nobles présentent également des résonances plasmoniques, qui peuvent être utilisées pour réaliser des filtres ajustables. Cependant, la modélisation des filtres métalliques est complexe car leur indice dépend fortement de la longueur d'onde, de l'épaisseur de la couche et peut être affecté par des phénomènes d'oxydation.



LES COUCHES MINCES AU NATUREL



Dans le règne animal, de nombreuses couleurs irisées, comme celles des coléoptères, de certains papillons et des plumes d'oiseaux (paon, colibri), proviennent d'interférences lumineuses par couches minces. Ces couleurs résultent de la réflexion de la lumière sur des structures nanométriques superposées (chitine, protéines, mélanosomes). L'épaisseur et l'indice de réfraction de ces couches déterminent les longueurs d'onde réfléchies, créant des couleurs variables avec l'angle, essentielles pour la communication et le camouflage.

VERS DES FILTRES TOUJOURS PLUS PERFORMANTS : ENJEUX ET PERSPECTIVES

La technologie des filtres optiques interférentiels est désormais mature, permettant de réaliser des filtres aux performances exceptionnelles, pour des applications exigeantes (spatial, grands instruments scientifiques, lasers de haute puissance). Cependant, la conception et la fabrication de filtres très complexes (grand nombre de couches, fonctions spectrales très spécifiques) restent un défi. Trouver la combinaison optimale entre une structure d'empilement robuste et une méthode de production efficace nécessite une grande expertise. Il n'existe

pas de solution universelle, et, malgré les progrès constants, certains filtres restent difficiles à réaliser. La conférence « Optical Interference Coatings » (OIC) et son « Manufacturing Problem Contest » [4] illustrent régulièrement ces défis. Les axes de recherche actuels incluent l'amélioration des algorithmes de synthèse, le développement de nouvelles techniques de dépôt et de contrôle in-situ, et la recherche de nouveaux matériaux aux propriétés optiques et mécaniques optimisées. L'intégration de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage automatique dans les processus de conception et de fabrication ouvre également des perspectives prometteuses pour l'avenir. ●

RÉFÉRENCES

- [1] *Thin-Film Optical Filters*, book by H. Angus Macleod, 5th Edition, 2017, <https://doi.org/10.1201/b21960>
- [2] *Optical Coating Technology*, book by Philip Baumeister, SPIE 2004 <https://doi.org/10.1117/3.548071>
- [3] *Optical Coatings: Design, Characterization, Monitoring*, book by A. Tikhonravov, SPIE 2024 <https://doi.org/10.1117/3.100017>
- [4] D. Poitras et al., "2022 Optical Interference Coatings Conference: Manufacturing Problem Contest", *Appl. Opt.* **62**, B104 (2023). <https://doi.org/10.1364/OIC.2022.WC.1>

Ultra-cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

By
Robin Kaiser,
Michèle Leduc,
Hélène Perrin

Preface By
Alain Aspect

Current Natural Sciences

QUANTUM INFORMATION

Robin KAISER, Michèle LEDUC and Hélène PERRIN, Eds

Ultra-Cold Atoms, Ions, Molecules and Quantum Technologies

Preface by Alain Aspect



The field of cold atoms was born forty years ago and today remains a theme regularly awarded Nobel Prizes and at the forefront of physics research. This book presents the most recent developments and traces the exceptional growth of this field over the last years.

Also available in e-book format
For sale on
laboutique.edpsciences.fr

ISBN : 978-2-7598-2745-9

168 illustrated pages

Price : 95 €



Prix Roberval

