

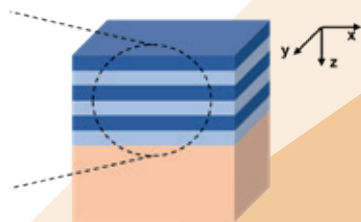
LIGNÉE TECHNIQUE OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

#4 Les couches minces optiques : entre recherche appliquée et révolution industrielle

Modifier à volonté les propriétés de la lumière constitue depuis toujours un enjeu sociétal, économique et de connaissance majeur. Au cœur de cette ingénierie du photon, le filtre optique interférentiel joue un rôle clé : il a été le théâtre d'une évolution rapide qui rend aujourd'hui possible la fabrication de composants dont les caractéristiques seraient passées pour irréalistes à la fin des années 1970. Une telle évolution est le résultat de ruptures scientifiques et technologiques dans plusieurs secteurs d'application emblématiques.

Le filtrage interférentiel

Véhiculer la lumière à travers des systèmes optiques (imageurs par exemple) requiert que cette lumière traverse un ensemble de composants dont chacune des faces réfléchit entre 4% et 40% de l'énergie selon le domaine spectral (visible ou infra-rouge). Ces réflexions parasites réduisent considérablement le signal utile et peuvent même rendre le système inutilisable. Ce premier constat explique pourquoi *on aura toujours besoin de couches minces optiques pour transporter la lumière* : ces composants permettent en effet de réduire voire d'annuler les réflexions parasites, grâce à des structures antireflets qui en sont un premier champ d'application historique. Un deuxième champ d'application a concerné les miroirs multi-diélectriques, dont la fonction consiste cette fois (à l'inverse des antireflets) à réfléchir la quasi-totalité de l'énergie à partir d'une combinaison de matériaux transparents (non métalliques). D'autres structures de composants ont ensuite permis de réaliser une multitude de fonctions optiques, comme les séparatrices, les polariseurs, les dichroïques, les filtres à bande étroite, les filtres froids/chauds, les égaliseurs de gain, les compresseurs d'impulsion...



Un filtre interférentiel est ainsi constitué (figure 1), à la surface d'un substrat, d'un empilement de couches minces transparentes dont les épaisseurs sont typiquement comprises entre quelques nanomètres et quelques centaines de nanomètres. Les ondes secondaires qui prennent naissance à la séparation des différents milieux créent une multitude d'interférences dont les amplitudes et déphasages relatifs sont contrôlés grâce au choix des épaisseurs et des indices de réfraction. On obtient ainsi, dans un composant de structure totalement plane, une variation rapide et contrôlée de l'équilibre interférentiel pour chaque fréquence de l'onde lumineuse qui s'y propage : c'est le phénomène de filtrage optique interférentiel.

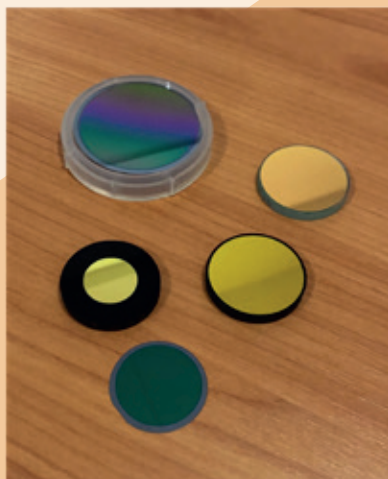


Figure 1 : Schéma de principe d'un filtre interférentiel (à gauche), et exemples de photographies (à droite) de quelques filtres réalisés avec les machines de l'Institut Fresnel
Photo © Claude Amra

Ruptures dans les technologies de fabrication : origine de la lignée

Comment déposer et alterner à souhait de fines couches de différents matériaux sur un substrat ? Cette fabrication est classiquement obtenue (figure 2) par des techniques de dépôt physique sous vide, en disposant chaque cible de matériau massif dans un creuset réfractaire dédié, puis en introduisant ces cibles dans une enceinte à vide avant de les évaporer à tour de rôle à l'aide d'un faisceau d'électrons dont la puissance est asservie à une mesure in situ de la vitesse de dépôt. C'est la technique d'évaporation par canon à électrons (*Electron Beam Deposition ou EBD*). La matière ainsi vaporisée vient se condenser sur la pièce optique que l'on souhaite recouvrir.

Cette technique présente des caractéristiques intéressantes en termes de simplicité, de rapidité de vitesse de dépôt et de compatibilité avec une large gamme de substrats et matériaux amorphes (oxydes, fluorures, nitrures, métaux, semi-conducteurs...) permettant de couvrir un vaste domaine spectral (de l'UV au moyen infra-rouge). En ce sens, le procédé EBD a été la technologie phare jusque dans les années 1970, et elle est encore aujourd'hui largement utilisée. Le contrôle de la fabrication est opéré à l'aide d'un faisceau de lumière qui traverse l'échantillon au cours de son traitement. L'analyse temporelle du signal optique projeté sur un spectrophotomètre donne accès à une précision meilleure que le pour-cent sur chacune des épaisseurs déposées. Des masques peuvent être introduits dans l'enceinte à vide sur la trajectoire de la matière émise, afin d'améliorer l'uniformité spatiale de la matière déposée.

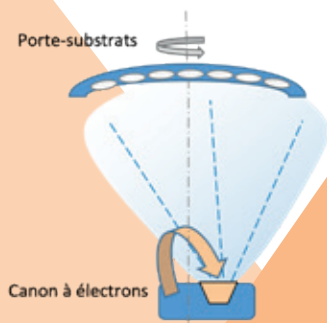


Figure 2 : Schéma de principe du procédé d'évaporation par canon à électrons (EBD, à gauche), et photographie (à droite) de l'intérieur d'une machine fonctionnant sur ce principe à l'Institut Fresnel -1980.
Photo ©Institut Fresnel

■ Première rupture technologique : l'évaporation assistée par faisceau d'ions

Une première rupture technologique a été nécessaire pour améliorer la qualité des composants ainsi fabriqués. En effet, les couches obtenues par *Electron Beam Deposition* présentent une structure lacunaire, ce qui les rend fragiles et poreuses, et leur confère un indice de réfraction susceptible de varier avec les conditions d'utilisation (notamment l'environnement). De plus, la mise en œuvre du procédé EBD nécessite généralement de chauffer les composants à des températures élevées (de l'ordre de 250°C).

Une façon de remédier à ce problème a consisté à associer au processus d'évaporation un bombardement d'ions énergétiques (figure 3) délivrés par un canon à ions (assistance ionique ou IAD, *Ion Assisted Deposition*) ou présents dans un plasma (*Plasma Ion*

Assisted Deposition ou PIAD). Le faisceau d'ions fournit ainsi aux espèces en cours d'accrochage sur le substrat suffisamment d'énergie pour qu'elles soient susceptibles de se déplacer légèrement en surface et remplir les sites encore inoccupés. On obtient alors une couche extrêmement dense, amorphe et sans porosité. Les composants réalisés présentent une microstructure proche du matériau massif et disposent de propriétés mécaniques et optiques peu sensibles aux conditions environnementales. Cette rupture technologique, qui a eu lieu dans les années 1980, a donné lieu à des composants beaucoup plus fiables qui ont pu ainsi être embarqués dans des systèmes spatiaux, par exemple.

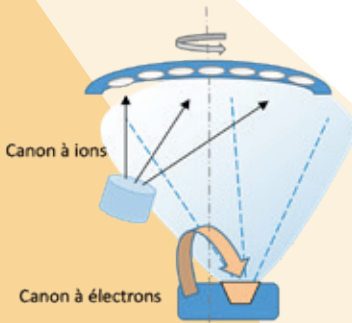


Figure 3 : Schéma de principe (à gauche) du procédé d'évaporation par canon à électrons assistée par faisceau d'ions (IAD, *Ion Assisted Deposition*), et photographie (à droite) de l'intérieur d'une machine fonctionnant sur ce principe à l'Institut Fresnel-1983.
Photo ©Institut Fresnel

▲ Deuxième rupture technologique : le dépôt par pulvérisation

Une deuxième rupture s'est produite dans les années 2000, avec l'objectif de s'affranchir du processus d'évaporation, pour des raisons notamment liées à la pureté des matériaux, à la réduction des pertes optiques et à une meilleure tenue aux flux lumineux intenses. Le processus d'évaporation a été ainsi remplacé (figure 4) par un procédé de pulvérisation des cibles par faisceau d'ions (IBS, *Ion Beam Sputtering*). Le matériau est éjecté des cibles par le faisceau d'ions et déposé sur le substrat, conduisant à une microstructure compacte et quasi-exempte de défauts localisés. On peut aussi utiliser un deuxième canon à ions orienté en direction des substrats : c'est le procédé de pulvérisation ionique assistée par faisceau d'ions (DIBS, *Dual Ion Beam Sputtering*). Ces procédés de dépôt par pulvérisation ionique présentent une excellente répétabilité et stabilité temporelle en cours de dépôt, qui favorise la réalisation d'empilements complexes allant jusqu'à plusieurs centaines de couches minces.

Enfin, le développement de la pulvérisation par magnétron (*magnetron sputtering*) s'est accéléré ces dernières années pour accroître les capacités de production des procédés de pulvérisation ionique (fabrication en masse de fonctions optiques de hautes performances, cas des composants de grandes dimensions). Ce procédé a pris une place importante car il permet d'atteindre une grande uniformité spatiale tout en bénéficiant d'une excellente stabilité de dépôt. Le matériau éjecté de la cible par les ions d'un plasma énergétique est transféré sur le substrat avec une énergie cinétique élevée à la suite de collisions avec les ions de ce plasma, ce qui confère à la couche mince une microstructure très dense. Une source plasma annexe de type radiofréquence et mettant en œuvre des ions oxygène permet de transformer ces monocouches métalliques en oxyde avec la stœchiométrie requise ; on parle alors de pulvérisation cathodique réactive (PARMS, *Plasma-Assisted Reactive Magnetron-Sputtering*).

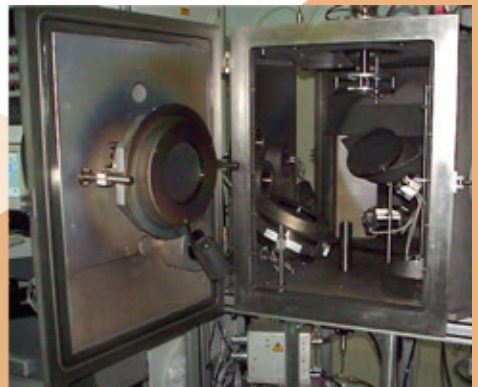
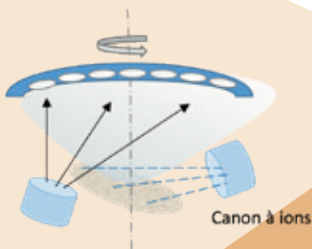


Figure 4 : Schéma de principe (à gauche) du procédé de pulvérisation par faisceau d'ions avec assistance ionique (DIBS, *Dual Ion Beam Deposition*), et photographie (à droite) de l'intérieur d'une machine fonctionnant sur ce principe à l'Institut Fresnel- 2000.
Photo © Institut Fresnel

Le filtrage interférentiel aujourd'hui

L'un des moteurs les plus puissants de l'évolution du domaine des couches minces optiques a certainement été, au début des années 1990, l'explosion de la demande en télécommunications optiques, ultérieurement qualifiée de « Bulle Internet ». Elle concernait en particulier le développement de filtres à bande étroite¹ nécessaires au multiplexage et au démultiplexage spectral des porteuses laser de transmission de données utilisées dans la technique DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*). On peut sans crainte d'être excessif affirmer que ce marché est aujourd'hui entièrement détenu par les composants utilisant des traitements optiques interférentiels.

Ce succès a incité les acteurs industriels du domaine à rechercher de nouveaux débouchés où les avancées techniques qu'ils venaient de réaliser pourraient être efficacement mises à profit : la microscopie de fluorescence et la microscopie Raman se

sont avérées des secteurs particulièrement intéressants dans un contexte biomédical. Dans l'industrie des semi-conducteurs et pour les opérations de photolithographie, la réalisation de structures toujours plus fines a conduit à envisager l'utilisation de rayonnements de très courtes longueurs d'onde (13,5 nm), où tous les matériaux ont des indices de réfraction proches de l'unité. L'emploi d'empilements de couches minces quart d'onde, par exemple de molybdène et de silicium, a permis d'augmenter significativement le coefficient de réflexion des miroirs utilisés pour ces applications.

En conclusion, les couches minces optiques ont connu des progrès spectaculaires au cours des trente dernières années, dans les secteurs industriels cités ou dans d'autres domaines comme l'imagerie spatiale, le bâtiment, l'automobile, la défense ou encore la lunetterie.

¹ Les filtres à bande étroite de type Fabry-Pérot ont été mises au point à Marseille en 1913



Figure 5 : procédé de dépôt par évaporation par canons à électrons assistée par plasma (SYRUSpro 710 fabriquée par la société Bühler- 2018).
Photo © Institut Fresnel



*Figure 6 : procédé de dépôt par pulvérisation cathodique magnétron assistée par plasma (HELIOS 400) fabriquée par la société Bühler-2012.
Photo © Institut Fresnel*

Les figures 5 et 6 représentent les machines actuelles à l'Espace Photonique de l'Institut Fresnel, où sont abritées l'ensemble des technologies de fabrication de filtres interférentiels. Il est à noter que le bâtiment et les équipements du laboratoire ont été financés dans le cadre d'un projet de Plan État Région (CPER) labellisé en 2007, pour une construction finalisée en 2015.

LIGNÉE TECHNIQUE* OU L'ÉVOLUTION D'UN INSTRUMENT

*Définition d'une lignée technique :
« [...] les objets évoluent selon des « lignées », c'est à dire des ensembles regroupant les objets de même type, ayant même fonction et même principe de fonctionnement ».

Bruno JACOMY

Cette plaquette s'inscrit dans un projet d'inventaire et de valorisation du patrimoine scientifique, technique et contemporain d'Aix-Marseille Université.

Contact :

**Culture et Patrimoine Scientifique
Direction de la Recherche et de la Valorisation**

3 place Victor Hugo
13003 Marseille
corine.levy-battesti@univ-amu.fr
+33(0)4 13 94 97 29

Rejoignez le réseau !
Join the network



www.univ-amu.fr

Cette plaquette a été réalisée en partenariat avec l'Institut Fresnel



Auteurs et rédaction :
Gérard Albrand : Ingénieur de recherche au CNRS, retraité
Claude Amra : Directeur de recherches au CNRS
Michel Lequime : Professeur émérite à École Centrale Méditerranée

Sur une idée de Corine Lévy Battesti, ingénieur d'étude, chargée de l'inventaire des instruments scientifiques d'Aix-Marseille Université.