

DOSSIER DE THESE CIFRE

PROPRIETES & COMPORTEMENT DE MATERIAUX INFRAROUGE : VERS UNE ARCHITECTURE ANTIREFLET HAUTE EFFICACITE ET HAUTE RESISTANCE

PROJET DE RECHERCHE

REF DOSSIER : THESE 193

**NOT EXPORT CONTROLLED TECHNOLOGY /
TECHNOLOGIE NON SOUMISE À CONTRÔLE DES EXPORTATIONS**

*Ce document et les informations qu'il contient sont la propriété de Safran.
Ils ne doivent être copiés ni communiqués à un tiers sans autorisation préalable et écrite de Safran.
This document and the information contained herein are the property of Safran.
They must not be copied or disclosed to third parties without prior Safran written authorization.*

Page laissée intentionnellement blanche.

TABLE DES MATIÈRES / DOCUMENT CONTENT

| | <u>Page</u> |
|---|-------------|
| TABLE DES MATIÈRES / DOCUMENT CONTENT | 3 |
| 1 CONTEXTE | 4 |
| 2 OBJECTIFS | 5 |
| 3 ORGANISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE | 7 |
| 4 ETAT DE L'ART | 11 |

1 CONTEXTE

Ce sujet de thèse est proposé dans le cadre du Laboratoire Commun PRIMEO (Partenariat pour la Recherche et l'Innovation sur des Matériaux Emergeants pour l'Optronique) mis en place entre Safran Electronics & Defense et l'Institut Pprime - UPR CNRS 3346. Cette collaboration, effective depuis 2010, permet la réalisation d'études aussi bien académiques qu'industrielles, et adresse ainsi la quasi-entièreté de l'échelle de maturité TRL (*Technology Readiness Level*). L'acculturation est un point très important entre les équipes des 2 entités, des ingénieurs Safran sont ainsi régulièrement amenés à évoluer au sein du laboratoire pour réaliser eux-mêmes des caractérisations et échanger avec les chercheurs de l'Institut.

Les systèmes optroniques tels ceux développés par Safran Electronics & Defense sont composés de composants optiques variés tels que des hublots, des lentilles, des filtres, des lames dichroïques...etc. Pour chacun de ces composants, la fonctionnalisation (optique, mécanique, électrique...) est réalisée par l'intermédiaire d'un traitement composé de films minces. La différenciation technologique se fait en grande partie dans les performances qui peuvent être obtenues grâce à ces revêtements de surface.

Les optiques frontales de ces dispositifs optroniques participent directement à la performance des systèmes pour la détection, l'observation et l'identification. Ces optiques évoluent dans un environnement particulièrement complexe qui dépend du milieu atmosphérique et de nombreux paramètres externes, par essence non maîtrisables. Dès lors, celles-ci doivent disposer de caractéristiques suffisantes pour tenir des profils d'utilisation dans un environnement qui peut être contraignant, corrosif et érosif, tout en étant compatible des fonctions du système optronique (i.e. disposant d'une transmission élevée). Dans les années à venir, les programmes de Défense seront toujours d'avantage demandeurs de caractéristiques améliorées vis-à-vis de la robustesse mécanique et chimique de ces optiques, notamment pour ce qui concerne les fenêtres multispectrales dont la gamme de transmission peut s'étaler du visible à l'infrarouge lointain.

Ces revêtements sont communément réalisés par des techniques de dépôt en phase vapeur telles que le procédé d'évaporation par canon à électron (EB-PVD – *Electron Beam Physical Vapor Deposition*), conduisant à des systèmes interférentiels en multicouche constitués de matériaux denses et uniformes sur toute la surface du composant. Il existe cependant certaines configurations géométriques (pièce optique de grande dimension, forte courbure...) pour lesquelles il devient complexe d'obtenir une uniformité en tout point : dispersion d'épaisseur, de densité, de propriétés mécaniques...ce qui devient particulièrement problématique quand les pièces optiques et leurs revêtements sont amenés à évoluer dans des conditions opérationnelles sévères.

2 OBJECTIFS

Les revêtements multicouches réalisés sur les optiques frontales ont pour but de conférer une fonction optique particulière, classiquement antireflet, mais également une fonction de protection envers les agressions mécaniques ou chimiques. Les performances de ces traitements obtenus par EB-PVD sont globalement satisfaisantes pour des optiques classiques, i.e. planes et/ou de faible courbure, mais les études récentes ont montré un manque de robustesse envers des environnements critiques tels que le brouillard salin pour des pièces aux géométries complexes : grand diamètre, forte courbure... Les mécanismes mis en jeu sont encore insuffisamment compris, toujours est-il qu'ils donnent lieu à de multiples dégradations : attaque chimique, délamination... Les spécifications techniques auxquelles doivent répondre les dispositifs optroniques de SAFRAN Electronics & Defense deviennent ainsi toujours plus sévères et les technologies conventionnelles d'élaboration de couches minces se doivent être d'avantage caractérisées en vue d'améliorer leurs niveaux de performance.

A l'instar de la baisse de performance optique, le manque de robustesse mécanique est en grande partie expliqué par la très grande difficulté d'obtenir un dépôt uniforme en tout point sur des pièces complexes, avec une dispersion importante des propriétés :

- microstructurales : épaisseur, densité, rugosité...etc.
- chimiques : stœchiométrie, énergie de surface... etc.
- mécaniques : contrainte, adhésion, dureté... etc.

Il conviendra donc de trouver les conditions de dépôt optimales en jouant sur les paramètres de dépôt influents, voire également d'utiliser des systèmes de dépôt avancés tels que des masques d'uniformité ou encore des systèmes mécatroniques permettant une croissance sous incidence variable.

De nouveaux matériaux pourront également être envisagés suite à une veille bibliographique exhaustive qui sera réalisée en début du projet de recherche. Cette recherche se concentrera principalement sur les fluorures à utiliser au sein de l'architecture antireflet (YbF_3 , DyF_3 , CeF_3 , ...) mais également sur le matériau protecteur en surface pour envisager de nouvelles voie d'optimisation (cf. le paragraphe 4 sur l'état de l'Art actuel du MgF_2 communément utilisé en surface pour des applications multispectrales).

Le projet a également la vocation de travailler sur la conception et le développement d'un nouveau type d'architecture multicouche, en intégrant :

- de nouveaux matériaux
- des interfaces nouvelles pour promouvoir la tenue: gradient de composition, couche tampon...
- la prise en compte des caractéristiques mécaniques de chacune des couches : contrainte mécanique et intrinsèque, énergie d'adhésion, coefficient de dilatation thermique...

A l'instar des préceptes optiques, ces nouveaux designs nécessiteront d'être modélisées par simulations numériques (du type Abaqus, Ansys) et/ou analytiques pour optimiser l'architecture selon une approche holistique.

Concernant les performances mécaniques et chimiques visées pour cette nouvelle génération d'antireflet, les prérogatives de la solution « robuste » sont les suivantes (environnements applicables selon les normes ISO9211-4:2012 et ISO9022:2002) :

- Abrasion sévère ISO 9211-4-01-03
- Adhérence ISO 9211-4-02-02
- Solubilité ISO 9211-4-04-02
- Froid ISO 9022-2-10-09-1
- Chaleur sèche ISO 9022-2-11-06-1
- Chaleur humide ISO 9022-2-12-06-1
- Résistance à l'acétone ISO 9022-87-04-1

De plus, l'inconvénient des tests normalisés est que le résultat est souvent binaire (conforme/non-conforme). De nouveaux tests seront mis en place pour d'avantage discriminer les différents comportements des architectures et conditions de dépôt utilisées :

- Choc thermique :
 - o la pièce optique et son traitement doit résister à 5 cycles de 2h (1h à -40°C + 1h à une température de +90°C) avec passage d'une température à l'autre se fera avec une pente de 30°C/min
- Cross-hatch :
 - o réalisation d'un quadrillage de rayure puis test d'arrachement, avant et après sollicitation en chaleur humide
- Indentation selon le test Mercedes – « VDI 3198 test » :
 - o A l'instar du scratch-test, l'indentation peut apparaître comme être un outil de choix, pour d'avantage appréhender l'adhérence et les énergies d'adhésion. Une empreinte est réalisée par micro et ou nano-indentation, puis observée à l'aide des techniques de microscopie (optique, électronique, interférentielle ou champ proche type AFM) afin d'observer la présence de fracture ou délamination

3 ORGANISATION DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Les revêtements étudiés dans le cadre de ce projet de thèse seront en grande partie élaborés sur des moyens de développement et de production disponibles sur le site de Safran E&D – Saint Benoît (86), ce qui favorisera grandement la montée en maturité (TRL) par la suite. Les films minces seront notamment élaborés au moyen d'une technique de dépôt physique en phase vapeur, à savoir l'évaporation thermique (EB-PVD – *Electron Beam Physical Vapor Deposition*). Un bâti de développement (nommé bâti B23) sera spécialement concerné pour la réalisation des empilements mono- ou multi-couches. Néanmoins, des dépôts spécifiques pourront également être réalisés sur le bâti de dépôt DIVA de l'Institut Pprime.

Différents matériaux sont envisagés en vue d'une intégration in fine dans une architecture antireflet de nouvelle génération:

- un sulfure : typiquement du ZnS, matériau incontournable en vue des applications visées
- des fluorures : YF₃ est le matériau actuellement largement utilisé, l'étude bibliographique devrait permettre de considérer de nouveaux matériaux tels que YbF₃, DyF₃, CeF₃...
- un matériau protecteur : en l'occurrence ici un autre fluorure, MgF₂, communément utilisé sur des optiques planes, mais des oxydes pourrait être également étudiés
- des matériaux pouvant servir de couche tampon ou promoteur d'adhérence, tel que des oxyde du type HfO₂
- des matériaux hybrides, au sens où ils présentent une composition complexe et graduelle (cf. gradient de composition aux interfaces)

Il est envisagé de faire varier les paramètres de dépôts influents de manière à contrôler les propriétés microstructurales (épaisseur, densité, rugosité...), les propriétés mécaniques (contrainte, adhésion, dureté...) ainsi que les propriétés chimiques (stœchiométrie, énergie de surface...) en plus des propriétés optiques habituelles (indices optiques n & k)

La caractérisation physico-chimique des revêtements sera quant à elle essentiellement menée sur le site de l'Institut Pprime, avec des outils de choix tels que les ellipsomètres spectroscopiques, la microscopie électronique à balayage, des techniques de microscopie en champ proche (AFM) ou interférentielle, ou encore les moyens de caractérisation des propriétés mécaniques voire thermo-mécaniques telles que les nano- et micro-indentateurs.

Deux approches distinctes sont ici envisagées, elles seront menées de manière concomitante et sont détaillées ci-après. Le périmètre et le découpage de ces études, présenté par la suite, a été discuté et défini conjointement avec les chercheurs de l'Institut P' :

- Propriétés physiques & Phénomènes de croissance à l'échelle du matériau en monocouche

Il s'agit ici de mieux appréhender les propriétés de différents matériaux d'intérêt pour le domaines visible et infrarouge (fluorure, sulfure...), notamment lorsqu'ils sont déposés sous incidence (modérée, liée à la courbure des substrat). L'objectif est de mieux comprendre les phénomènes de croissance sur des procédés d'élaboration pouvant être complexes : plusieurs sources d'évaporation et/ou d'assistance ionique, mouvement épicycloïdal des substrats, utilisation de masques d'uniformité, croissance sous incidence...

Diverses caractérisations seront réalisées à l'échelle de la monocouche afin de mieux appréhender les propriétés intrinsèques des matériaux en fonction des paramètres de dépôt, et notamment l'uniformité de celles-ci sur des surfaces complexes, parmi lesquelles les propriétés microstructurales (épaisseur, densité, porosité...), les propriétés mécaniques (contraintes, dureté...), les propriétés chimiques (stœchiométrie, présence de pollutions...) en plus des propriétés optiques usuelle (indices optiques n & k , ...). Des informations sur le module d'Young, le coefficient de Poisson et le coefficient d'expansion thermique pourront également permettre d'affiner les prévisions de performance des nouveaux traitements conçus.

Une fois les caractéristiques thermomécaniques obtenues (module d'Young, coefficient de Poisson, CTE...), il est envisagé d'appréhender le comportement mécanique par le biais de modélisations numériques (Abaqus, Ansys) et/ou analytiques, et ce aussi bien à l'échelle de la monocouche que sur des architectures partielles voire complètes, afin de comprendre plus précisément les forces et déformations engendrées en fonction des conditions appliquées. Cet aspect est à ce jour insuffisamment réalisé chez les concepteurs optiques, et revêt d'une grande importance en vue d'obtenir des structures efficaces aussi bien d'un point de vue optique que mécanique.

- Comportement mécanique sous sollicitation mécanique ou environnementale

Nous considérerons ici aussi bien des systèmes modèles (monocouches ou bicouches élémentaires) que des architectures multicouches complètes telles que les antireflets externes. Des tests sont communément réalisés sur celles-ci de manière à évaluer la robustesse de même que reproduire les environnements rencontrés en conditions opérationnelles : adhérence, abrasion modérée/sévère, cyclage thermique, chaleur humide, brouillard salin, ... Comme explicité précédemment ces tests ne sont pas suffisamment discriminants pour décrire finement le comportement mécanique. L'objectif est donc ici de mieux comprendre les modes de dégradation de ces architectures lors des tests: manque de robustesse d'un des matériaux, fissuration, interface fragile due à une faible énergie d'adhésion...

Des caractérisations fines seront effectuées sur les éprouvettes de test pour identifier la/les cause(s) de dégradation. Les résultats dépendront bien évidemment très fortement des conditions de dépôt telles que la $T^{\circ}\text{C}$, vitesse de dépôt, puissance ionique appliquées... Safran dispose d'ores et déjà d'un certain savoir-faire dans le domaine, mais souhaite d'avantage inclure les chercheurs de l'Institut P' pour améliorer l'interprétation des résultats et orienter les travaux d'optimisation.

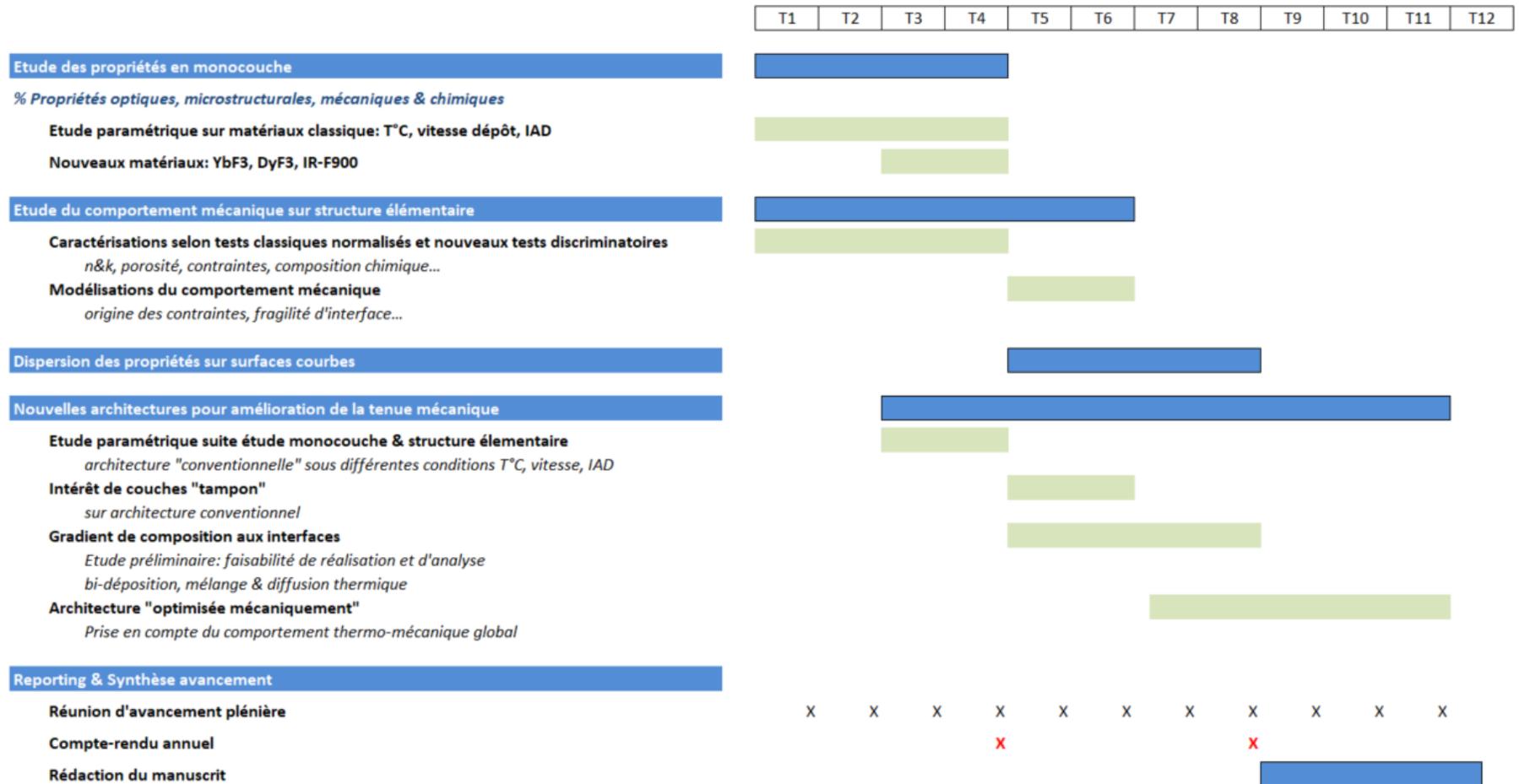
Selon les domaines spectraux visés et les caractérisations, différents substrats seront utilisés parmi lesquels le silicium, le germanium, le verre BK7, un verre de chalcogénure (GASIR) ou encore du sulfure de zinc (ZnS).

| | | Si | Ge | GASIR | ZnS | BK7 | Lame BK7 |
|---------------------------------|--|----|----|-------|-----|-----|----------|
| Spectro-photométrie UV-Vis-SWIR | $T(\lambda)$, $R(\lambda)$, $A(\lambda)$ | | | | X | X | |
| Spectro-photométrie IR | $T(\lambda)$, $R(\lambda)$, $A(\lambda)$ | X | X | X | X | | |
| Ellipsométrie UV-Vis-SWIR | Épaisseur, $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ | X | X | X | | | |
| Ellipsométrie IR | Épaisseur, $n(\lambda)$, $k(\lambda)$ | | X | | | | |
| MEB | Morphologie, composition chimique | X | X | X | | | |
| Indentation | Adhérence | X | X | | | | |
| Mesure de courbure | Contrainte | X | | X | | | X |
| Diffraction des rayons X | Cristallinité | X | | | | | |

A noter que les essais préliminaires réalisés sur des monocouches déposées sur ces différents substrats ont montré des différences importantes en termes de microstructure et de propriétés mécaniques.

L'influence de traitements thermiques post-dépôt sur le contrôle et l'optimisation de la microstructure pourra également être étudiée au moyen des différentes techniques in-situ : ellipsométrie spectroscopique voire diffraction des rayons X si les dépôts témoignent d'un caractère cristallin.

Planning de réalisation :



Ce document et les informations qu'il contient sont la propriété de Safran.
 Ils ne doivent être copiés ni communiqués à un tiers sans autorisation préalable et écrite de Safran.
 This document and the information contained herein are the property of Safran.
 They must not be copied or disclosed to third parties without prior Safran written authorization.

4 ETAT DE L'ART

La veille bibliographique effectuée au démarrage du projet a principalement été focalisée sur le matériau « protecteur » de référence utilisé en couche de surface des architectures antireflet multispectrales : le fluorure de magnésium – MgF_2 . Une attention particulière a été portée sur les dépôts par évaporation assistés par faisceau d'ion (IBAD – Ion Beam Assisted Deposition). Par ailleurs, il n'existe pas de littérature fournie concernant les autres matériaux infrarouge d'intérêt dans le cadre de cette étude, seuls quelques papiers ont été recensés notamment sur le matériau YbF_3 qui est régulièrement utilisé au sein de l'architecture antireflet.

Le MgF_2 est un matériau présentant de nombreux avantages: faible indice de réfraction, faible perte optique, haute durabilité optiques, ce qui en fait un matériau de choix pour les applications antireflet depuis l'UV (large gap, haut seuil d'endommagement laser) jusqu'à l'infrarouge. Il peut être synthétisé en film mince selon différentes méthodes: évaporation conventionnelle [1-9], dépôt sous assistance ionique (IAD « *Ion-Assisted Deposition* ») [9-14], dépôt assisté par plasma (PIAD « *Plasma Ion-Assisted Deposition* ») [3, 15], ou encore pulvérisation par faisceau d'ions (IBS « *Ion-Beam Sputtering* ») [2,16].

L'influence de la température de dépôt sur l'indice de réfraction (visible étendu), sur la composition (*ratio Mg/F*) et sur la microstructure (rugosité, cristallinité, morphologie) a été particulièrement étudiée. D'une manière générale, l'augmentation de la température de dépôt de $50^\circ C$ à $240^\circ C$ se traduit par une diminution de l'indice de réfraction (ce qui peut paraître surprenant), conduisant globalement à des films poreux présentant des micro-craquelures en dessous de $200^\circ C$ [8].

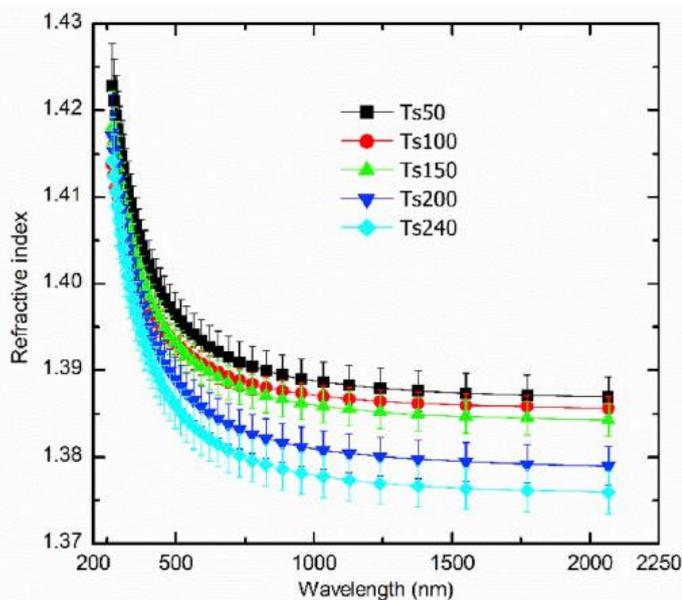


Fig. 1 : Dispersion de l'indice de réfraction de couches MgF_2 déposés à différentes températures. [8].

L'assistance ionique est aussi vu comme le moyen d'obtenir une bonne tenue mécanique de films MgF_2 même à basse température, en comparaison à des films déposés sans assistance à des

températures comprises entre l'ambiante et 270°C [11,12]. L'énergie apportée par le flux ionique énergétique (quelques dizaines à quelques centaines d'eV) permet d'améliorer les forces d'adhésion d'un ordre de grandeur par rapport à l'évaporation thermique seule. De plus, l'IAD peut dans certains cas permettre une relaxation du champ de contrainte lié à une modification de la microstructure [3]. Il est en effet admis que le changement d'état structural et une densification peut aller jusqu'à une transition tension/compression.

A noter l'intérêt de l'assistance au Xénon (en comparaison de l'Argon) qui permet d'obtenir un indice de réfraction plus élevé (i.e. densité plus élevée), une absorption plus faible aux basses longueurs d'onde de même qu'une meilleure durabilité mécanique.

L'utilisation de l'assistance ionique (IAD pour *Ion-Assisted Deposition*) durant la croissance de MgF₂ a pour principal effet d'augmenter l'absorption optique, notamment aux basses longueurs d'onde, de même que l'indice de réfraction principalement expliqué par la densification du matériau [6,8]. Une sous-stœchiométrie en fluor est systématiquement observée du fait de la pulvérisation préférentielle des atomes de fluor (léger, Z= 9) par rapport au magnésium (Z=12), provoquant ainsi une augmentation du taux d'oxygène [14].

TABLE I. Main characteristics of MgF₂ films deposited by IBAD: normalized momentum (P_N) and temperature of the substrate (T_S) during deposition, film thickness (e), mass density (ρ), extinction coefficient (k) at 260 nm, and F/Mg and O/Mg atom number ratios.

| Sample | Process | P_N ($\text{g}^{1/2} \text{mol}^{-1/2} \text{eV}^{1/2}$) | T_S (°C) | e (nm) | ρ (g cm^{-3}) | k at 260 nm | F/Mg | O/Mg |
|--------|--------------------|---|---------------|-------------|-------------------------------|----------------------|------|------|
| A_0 | Direct evaporation | 0 | 30 | 2050 | 2.60 | $<5 \times 10^{-5}$ | 1.95 | 0.07 |
| A_1 | Ar IBAD | 24 | 60 | 2012 | 2.89 | 5.3×10^{-3} | ... | ... |
| A_2 | Ar IBAD | 31 | 50 | 2350 | 2.90 | 8.6×10^{-3} | ... | ... |
| A_3 | Ar IBAD | 48 | 80 | 1940 | 3.00 | 3.3×10^{-2} | 1.95 | ... |
| A_4 | Ar IBAD | 118 | 50 | 1400 | 3.15 | 5.5×10^{-2} | 1.7 | ... |
| A_5 | Ar IBAD | 232 | 50 | 1760 | 3.16 | 6.8×10^{-2} | 1.7 | 0.18 |
| A_6 | Ar IBAD | 12 | 50 | 3900 | 2.84 | 4.5×10^{-3} | ... | ... |
| A_7 | Ar IBAD | 14 | 100 | 3400 | 3.05 | 2.2×10^{-2} | ... | ... |
| A_8 | Ar IBAD | 16 | 200 | 3000 | 3.06 | 7.0×10^{-2} | ... | ... |

Fig. 2 : Principales propriétés du MgF₂ déposé sous différentes conditions [14]

Enfin, l'intérêt d'un post-traitement type plasma ou faisceau d'ions ionique a également été étudié en vue de modifier les propriétés optiques et surtout les propriétés de mouillabilité de films minces de MgF₂ [5,7]. L'application d'un plasma Ar dans un réacteur PECVD (100W / 0,2Torr / 2') n'a eu aucun impact sur les propriétés optiques du film, mais a par ailleurs augmenté significativement sa rugosité (RMS 0.22nm → 2.03nm) ce qui a engendré une forte baisse de l'angle de contact (WCA 71° → 4,2°) conduisant ainsi à une surface super-hydrophile. L'application d'un faisceau ions oxygène a quant à lui globalement un effet néfaste en produisant un grand nombre de défauts conduisant à l'apparition de nombreuses craquelures, une augmentation d'indice de réfraction associée à une diminution de la transmission, et enfin la présence de MgO or MgO_xF_y détecté au moyen de la diffraction des rayons X [5].

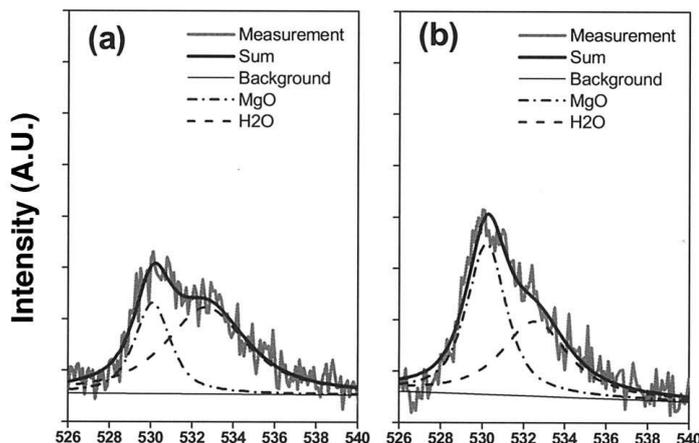


Fig. 3 : Spectre O-1s mesuré en XPS sur l'échantillon avant (a) et après recuit (b) [3]

La présence de porosité rend les films plus sensibles à l'humidité, qui provoque une modification d'indice optique, l'adsorption d'eau est cependant un phénomène réversible en appliquant un recuit sous vide du type recuit thermique rapide (RTA) préférentiellement jusqu'à 600°C pour diminuer la porosité tout en évitant les effets de retrait [8]. Les recuits thermiques ont globalement un effet de densification se traduisant par une augmentation de l'indice de réfraction et une diminution du coefficient d'extinction. L'étude en spectroscopie de photo-électron X montre quant à elle la formation de MgO lors du recuit [3] au travers des changements observés sur les énergies de liaisons des différentes espèces en présence (Mg-2p, F-1s, O-1s). Les Figures 3 et 4 présentent une synthèse des résultats obtenus par XPS, avec de l'oxygène principalement présentant sous forme d'eau avant recuit qui évolue vers le composé MgO après recuit.

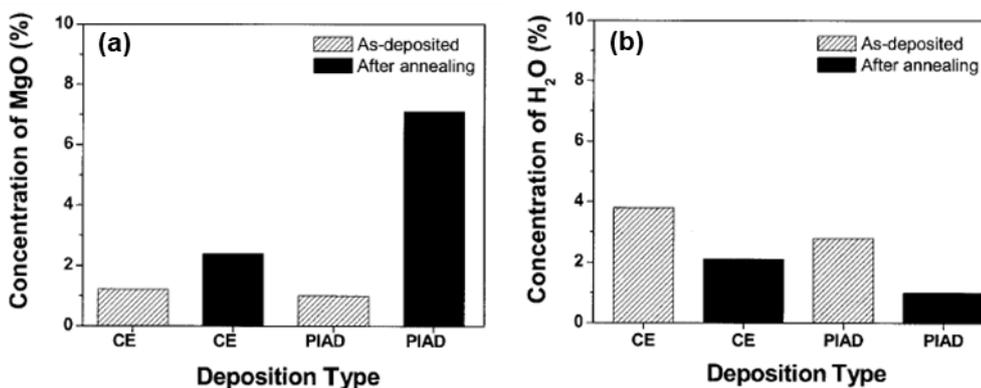


Fig. 4 : Concentration en MgO (a) et H₂O(b) mesurés sur des films MgF₂ déposés par évaporation conventionnelle (CE) ou par dépôt assisté plasma (PIAD) avant et après recuit [3]

- [1] Y.H. Ye et al., "Influence of annealing on the surface topography of MgF₂: an atomic force microscopic study", *Thin Solid Films* 346 (1999) 230-233
- [2] D. Ristau et al., "Ultraviolet optical and microstructural properties of MgF₂ and LaF₃ coatings deposited by ion-beam sputtering and boat and electron-beam evaporation", *Applied Optics* (2002) Jun 1;41(16):3196-204. doi: 10.1364/ao.41.003196
- [3] S.H.Woo et al., "Effects of annealing on the optical, structural, and chemical properties of TiO₂ and MgF₂ thin films prepared by plasma ion-assisted deposition", *Applied Optics* Vol.45 No.7 (2006) 1447
- [4] H. Yu et al., "Influence of substrate temperature on properties of MgF₂ coatings", *Applied Surface Science* 253 (2007) 6113–6117
- [5] X. Guo et al., "Influence of Oxygen Ions Bombardment on Optical Properties of MgF₂ Anti-reflection Films", *Advanced Materials Research* Vols. 805-806 (2013) 99-102
- [6] J. Mashaieky et al., "Effect of deposition method on the optical and microstructural properties of vacuum-deposited MgF₂ thin films", *Optik* xxx (2013) xxx–xxx
- [7] A. Eshaghi et al., "Influence of physical plasma etching treatment on optical and hydrophilic MgF₂ thin film", *Optik* 161 (2018) 1–7
- [8] J. Reuna et al., "Influence of ex-situ annealing on the properties of MgF₂ thin films deposited by electron beam evaporation", *Optical Materials* 96 (2019) 109326
- [9] P.J. Martin et al., "Influence of ion assistance on the optical properties of MgF₂", *Applied Optics* Vol. 26, No. 7 (1987) 1235
- [10] C. M. Kennemore et al., "Ion beam processing for coating MgF₂ onto ambient temperature substrates", *Applied Optics* Vol.23 No.20 (1984) 3608
- [11] S. D. Jacobs et al., "Adhesion enhancements and internal stress in MgF₂ films deposited with ion beam assistance", *Thin Solid Films*, 144 (1986) 69-76
- [12] M. Kennedy et al., "Ion beam-assisted deposition of MgF₂ and YbF₃ films", *Thin Solid Films* 333 (1998) 191-195
- [13] L. Dumas et al., "Characterization of magnesium fluoride thin films produced by Ar IBAD", *Thin Solid Films* 382 (2001). 61-68
- [14] L. Dumas et al., "Optical properties of magnesium fluoride thin films produced by argon ion-beam assisted deposition", *J. Vac. Sci. Technol. A* (2002) 102-106
- [15] S.H Woo et al., "Plasma ion-assisted deposition of TiO₂ and MgF₂ thin films", *Optical Society of America* (2004) MB8
- [16] D.Jacob et al., "Microstructure and composition of MgF₂ optical coatings grown on Si substrate by PVD and IBS processes", *Thin Solid Films* Vol. 360 Issues 1-2 (2000) 133-138

**POWERED
BY TRUST**

Safran Electronics & Defense

2, boulevard du Général Martial Valin
75015 Paris - France
Tél. : + 33 (0)1 55 60 38 00
Fax : + 33 (0)1 41 09 01 85
SAS au capital de 45.570.621,90 €
480 107 911 R.C.S. Paris

www.safran-electronics-defense.com

