

Photoniques

LA LUMIÈRE ET SES APPLICATIONS

ACTUALITÉS

Partenaires
& scientifiques

ENTRETIENS

Éric Mottay
Pierre Agostini

COMPRENDRE

La mesure
Shack-Hartmann

ACHERER

Ellipsométrie
spectroscopique

DOSSIER

COUCHES MINCES OPTIQUES

- Méthodes de dépôt liquide de matériaux inorganiques pour la photonique
- Couches minces aux performances ultimes pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles et les instruments des télescopes
- Miroirs interférentiels multicouches pour les impulsions attosecondes
- Filtres optiques interférentiels : guide pratique



EPIC is here
to support you!

Be part of the largest Photonics
Industry Community in Europe

Photoniques est éditée par la Société Française de Physique, association loi 1901 reconnue d'utilité publique par décret du 15 janvier 1881 et déclarée en préfecture de Paris.

<https://www.sfpnet.fr/>

Siège social : 33 rue Croulebarbe,
75013 Paris, France
Tél. : +33(0)1 44 08 67 10

CPPAP : 0124 W 93286
ISSN : 1629-4475, e-ISSN : 2269-8418

www.photoniques.com

Le contenu rédactionnel de Photoniques est élaboré sous la direction scientifique de la Société française d'optique
2 avenue Augustin Fresnel
91127 Palaiseau Cedex, France
Florence HADDOUCHE
Secrétaire Générale de la SFO
florence.haddouche@institutoptique.fr

Directeur de publication

Jean-Paul Duraud, secrétaire général de la Société Française de Physique

Rédaction

Rédacteur en chef

Nicolas Bonod

nicolas.bonod@edpsciences.org

Journal Manager

Florence Anglézio

florence.anglezio@edpsciences.org

Secrétariat de rédaction et mise en page

Agence de communication la Chamade

<https://agencelachamade.com/>

Comité de rédaction

Philippe Adam (DGA, SFO),
Adeline Bonaulet (CNRS),
Benoît Cluzel (Université de Bourgogne),
Sara Ducci (Université de Paris),
Nathalie Destouches (Université Jean Monnet),
Sylvain Gigan (Sorbonne Université),
Aurélien Jullien (CNRS),
Patrice Le Boudec (IDIL Fibres Optiques),
Christophe Simon-Boisson (Thales LAS France).

Advertising Manager

Bernadette Dufour

Cell phone + 33 7 87 57 07 59

bernadette.dufour@edpsciences.org

Photoniques est réalisé par
EDP Sciences,
17 avenue du Hoggar,
P.A. de Courtaboeuf,
91944 Les Ulis Cedex A, France
Tél. : +33 (0)1 69 18 75 75
RCS : EVRY B 308 392 687

Gestion des abonnements

abonnements@edpsciences.org

Impression

Fabrique imprimeur
B.P. 10
87500 Saint-Yrieix la Perche
Dépôt légal : août 2025
Routage : STAMP (95)



© EDP Science/SFP à l'exception des articles publiés avec une licence CC-BY dont les droits reviennent aux auteurs.

Éditorial



NICOLAS BONOD

Rédacteur en chef

Réflexions

La période estivale est propice à la réflexion, à la prise de recul sur nos activités. Ces moments de déconnexion favorisent l'observation, l'émerveillement qui nourrissent *in fine* notre créativité. Les sciences de la lumière nous offrent d'ailleurs un domaine unique pour explorer cette créativité et la mettre à profit dans des projets toujours plus innovants ; à l'image des idées, la lumière se diffuse, se transmet, se propage, se réfléchit...

Sur le thème de la réflexion, je ne cesse de m'émerveiller des effets visuels que cette dernière révèle dans notre quotidien, des couleurs vibrantes d'une bulle de savon à celles plus intrigantes d'insectes flamboyants. Ces reflets colorés trouvent leur origine dans les interférences lumineuses au sein de couches extrêmement fines de matière. Ils illustrent combien la structuration de la matière à l'échelle de la longueur d'onde modifie la réponse spectrale d'un système en réflexion ou en transmission. Superposez plusieurs couches dans un ordre précis et vous obtenez une fonctionnalité optique spécifique. Réflexion faite, c'est bien en combinant des matériaux hautement transparents sous forme de couches minces que les réflectances les plus élevées sont atteintes.

Si les miroirs de haute performance sont emblématiques de ces technologies, les couches minces optiques déploient une

large palette de fonctions optiques. Cette adaptabilité s'associe à d'excellentes performances. Les cahiers des charges toujours plus exigeants ont sans cesse repoussé leurs limites : elles doivent tantôt résister à des fluences laser extrêmes, tantôt offrir des réponses spectrales complexes, tantôt approcher des pertes par absorption ou diffusion nulles.

Cette aptitude à relever les défis les plus pointus place les couches minces au centre des programmes phares dans le spatial, les lasers de puissance, ou les détecteurs d'ondes gravitationnelles, tout autant qu'au service des technologies de l'information, des communications, de la vision et bien d'autres encore. En écho à ce dossier, la rubrique *Acheter* propose un article dédié aux ellipsomètres, outils essentiels à leur caractérisation.

En lisant dans ce numéro l'entretien passionnant avec le Pr. Pierre Agostini, prix Nobel de physique 2023, vous découvrirez que son sujet de thèse portait sur... les couches minces optiques ! Plongez-vous dans cet entretien passionnant pour découvrir un parcours unique et singulier, guidé par la passion pour les sciences et la recherche. Ces entretiens et témoignages, publiés numéro après numéro, nous offrent des expériences, des parcours et des regards divers et précieux ; nul doute qu'ils sauront nous inspirer et nourrir nos propres réflexions.



Sommaire

www.photoniques.com

N° 133

12 ENTRETIENS : Éric Mottay Pierre Agostini



22

Couches minces aux performances ultimes pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles et les instruments des télescopes

43

Ellipsométrie spectroscopique



ACTUALITÉS

- 03 Éditorial et actualités de la SFO
- 05 Informations partenaires
- 11 Actualités scientifiques
- 12 Témoignage d'entrepreneur : Éric Mottay
- 15 Entretien : Pierre Agostini

DOSSIER : COUCHES MINCES OPTIQUES

- 19 Méthodes de dépôt liquide de matériaux inorganiques pour la photonique
- 22 Couches minces aux performances ultimes pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles et les instruments des télescopes
- 28 Miroirs interférentiels multicouches pour les impulsions attosecondes
- 33 Filtres optiques interférentiels : guide pratique

COMPRENDRE

- 38 La mesure de surface d'onde par Shack-Hartmann

ACHERER

- 43 Ellipsométrie spectroscopique

PRODUITS

- 49 Nouveautés

Annonces

2B Lighting 33
 EPIC II^e couv.
 Edp Sciences 37

Edmund optics 35
 Euro PM 2025 23
 HTDS 29
 Imagine Optic 39

Mks | Ophir 31
 Opton Laser 17, 25, IV^e couv.
 SFO 13
 Spectrogon 11

Trioptics 27
 Wavetel 41

Crédit photo (couverture) : © iStockPhoto

L'édito de la SFO



ANTOINE GODARD
Président entrant de la SFO



FRANÇOIS SALIN
Président de la SFO



ARIEL LEVENSON
Président sortant de la SFO

Espoirs et repos estival

Cru mémorable que ces JNOG 2025. Nous pouvons être fiers de notre communauté qui a encore présenté des résultats au meilleur niveau international. Qualité scientifique et convivialité ont été au rendez-vous et malgré la densité du programme, un petit avant-goût de détente estivale pouvait même se faire ressentir. Il est vrai que l'expérience concoctée à Sète, en bord de mer, par les chairs montpelliérains Stéphane Blin de l'Institut d'Électronique et des Systèmes et Cristelle Brimont du Laboratoire Charles Coulomb, soutenus par notre secrétaire générale Florence Haddouche, évoquait déjà la « route des vacances ».

Une mention toute particulière à l'engagement remarquable des jeunes chercheurs, tout d'abord à ceux du Club Jeunes de la SFO pour la qualité de leur organisation et l'animation de la table ronde. Ce dynamisme se retrouvait également dans les conférences et posters, présentés par les autres jeunes, admirable. Que dire des trois étudiants de master, ayant présenté trois posters et un oral, la relève est assurée !

L'année a été intense, marquée par une mobilisation tous azimuts, même si nous ignorons encore le destin de quatre de nos actions emblématiques qui couvrent un large éventail de nos missions : l'initiative PHARE visant à accompagner et promouvoir des recherches et

technologies photoniques innovantes et ambitieuses ; le projet LUMIFORM 2030 visant à soutenir et accompagner les formations jusqu'à BAC +3 et à renforcer l'attractivité des métiers de l'optique ; le projet VEEPS dédié à la féminisation et à la parité en photonique ; sans oublier, notre démarche pour obtenir la reconnaissance en tant qu'association d'utilité publique, qui nous permettrait d'amplifier nos initiatives de diffusion du savoir.

Entre espoirs et besoin de repos, nous vous souhaitons un été agréable, d'excellentes vacances et vous donnons rendez-vous pour une rentrée prometteuse et passionnante.

Photoniquement vôtre

Ariel Levenson

Directeur de recherche CNRS
Président sortant de la SFO

François Salin

Président et CEO Ilasis laser
Président de la SFO

Antoine Godard

Directeur scientifique
du domaine physique – ONERA
Président entrant de la SFO



Alexandre Aubry, le lauréat du Prix Jean Jerphagnon 2025



Alexandre Aubry, chercheur à l'Institut Langevin (ESPCI – CNRS), est le lauréat 2025 du prestigieux Prix Jean Jerphagnon, décerné lors des JNOG 2025 à Sète.

Spécialiste du contrôle et de l'imagerie des ondes dans les milieux complexes, il développe une approche matricielle innovante, avec des applications en microscopie optique, acoustique, micro-ondes et sismologie. Son projet, couronné d'une bourse ERC Consolidator en 2019, vise à concevoir une méthode universelle d'imagerie à travers des milieux diffusants.

Il a récemment cofondé OWLO, une startup issue de ses travaux, qui propose un microscope matriciel alliant flexibilité logicielle et performance optique. Ce système ouvre de nouvelles perspectives en embryologie, organoïdes, ophtalmologie ou dermatologie.

Le Prix Jean Jerphagnon récompense chaque année un chercheur ou ingénieur pour son innovation à fort potentiel technologique.

JNOG 2025, Sète

Que vous profitiez de l'été ou que vous prépariez la rentrée, plongez dans les temps forts du colloque JNOG 2025 à Sète, où jeunesse, science et art ont brillamment conjugué leurs talents.

JNOG 2025 à Sète : une édition marquée par la jeunesse scientifique, les arts et l'excellence

Organisé du 7 au 10 juillet 2025 dans le cadre enchanteur du Domaine du Lazaret à Sète, le colloque des Journées Nationale d'Optique Guidée a su conjuguer excellence scientifique, engagement des jeunes chercheurs et ouverture aux formes sensibles de la recherche.

Co-présidé par Christelle Brimont (L2C, Univ. Montpellier, CNRS) et Stéphane Blin (IES, Univ. Montpellier, CNRS) sous l'égide de la SFO, la Société Française d'Optique, ce rendez-vous incontournable a rassemblé plus de 177 participant·es et 30 exposants autour des avancées récentes en optique guidée, photonique intégrée et fibres spéciales, dans une ambiance mêlant rigueur scientifique et convivialité chaleureuse.

La jeunesse scientifique à l'honneur

Parmi les moments forts, la remise du Prix du Meilleur Poster lors du dîner de gala a particulièrement retenu l'attention. Le premier prix a été décerné à Quentin Le Mignon, pour ses travaux novateurs sur l'estimation de la constante de couplage de Lamb dans un spin-VECSEL. Ont suivi Clément Charliac, Clément Selva et Noémie Mestre, distinguée par un prix spécial du jury. Cette reconnaissance souligne la volonté forte de la SFO de soutenir la recherche émergente et de valoriser la clarté de sa transmission scientifique.

Autre temps fort, une table ronde intergénérationnelle et interactive, conçue et animée par les jeunes chercheurs du club de la SFO, a exploré les perspectives de carrières dans la photonique. Les échanges, mêlant expériences personnelles et aspirations professionnelles, ont permis d'aborder les multiples voies possibles : recherche académique, industrie innovante et entrepreneuriat.

Des conférences de haut niveau

Les interventions des grands conférenciers ont apporté une dimension scientifique majeure à l'événement. Elles ont couvert des thématiques pointues telles que la photonique non linéaire, les capteurs distribués, la microscopie matricielle et l'optoélectronique quantique. Ces présentations de haut niveau ont ponctué le programme, enrichissant le colloque par des échanges nourris avec les contributions des jeunes chercheur·ses.

Un pas de côté poétique

Cette édition 2025 s'est distinguée par une incursion originale dans le domaine des arts. L'exposition d'Emeric Jacob — sculpteur et ingénieur — a offert un espace inédit de dialogue entre technologie, nature et poésie. Depuis plus de dix ans, l'artiste assemble des objets récupérés, mêlant fragments plastiques, composants électroniques et capteurs issus d'appareils obsolètes. Ces sculptures questionnent nos modes de production et notre rapport aux objets technologiques, tout en suscitant une émotion particulière face à ces artefacts. Cette initiative s'inscrit dans un projet Arts & Sciences en cours avec l'Université de Montpellier, ainsi que dans le cadre de l'action LightBox portée par la SFO, avec l'ambition d'y intégrer plus explicitement la lumière.

Vers 2026...

Le rendez-vous est d'ores et déjà donné pour la 43^e édition des JNOG, qui se tiendra du 6 au 10 juillet 2026 au sein du Congrès OPTIQUE Bourgogne Franche-Comté. Cette prochaine édition promet de prolonger l'élan initié à Sète, en favorisant toujours plus les dialogues intergénérationnels et interdisciplinaires, pierre angulaire de la dynamique de la Société Française d'Optique.

AGENDA

■ **CMDO & Journées Scientifique de l'ONERA – SOURCES LASERS & NON LINÉAIRES POUR L'INFRAROUGE MOYEN**
18-19 septembre 2025 à Paris

■ **SFO Thematic School 2026 – ULTRAFast**
23 au 27 mars 2026 – École Physique des Houches
+ 70 participants attendus

■ **OPTIQUE BFC 2026**
06 au 10 juillet 2026, Dijon
+ 650 participants attendus

Le Forum des adhérents ALPHA-RLH 2025 : 20 ans d'ondes positives !

Le Forum des adhérents s'est tenu le 5 juin dernier dans le superbe cadre du Château Grattequina près de Bordeaux.

Cette édition 2025, qui s'est déroulée devant quelque 250 participants, a eu une saveur toute particulière car elle a permis de célébrer l'anniversaire des 20 ans du pôle. Si celui-ci est toujours résolument tourné vers l'avenir, la journée a été l'occasion de s'arrêter un instant sur des chiffres clés significatifs. Depuis 2005, ALPHA-RLH, c'est notamment :

- 300 membres
- 1669 projets d'innovation accompagnés, expertisés, labellisés
- 776 projets financés
- 108 entreprises créées
- 62 entreprises implantées

En la présence des anciens présidents du pôle, ce forum a été marqué par plusieurs temps forts :

- L'Assemblée Générale : bilan d'activité 2024 & perspectives 2025.
 - Le discours d'Alain Rousset, Président de la Région Nouvelle-Aquitaine.
 - Deux Keynotes :
 - > Yann GERARD, GenF, sur le projet TARANIS : fusion nucléaire par confinement inertiel.
 - > Pierre Faucou, The Exploration Company : développement, fabrication et exploitation du premier et unique vaisseau spatial réutilisable d'Europe.
 - Un concours de pitches d'adhérents, remporté par la société Ximed.
 - Un quiz sur le pôle, pour tester de manière ludique les connaissances des participants.
 - Un espace showroom donnant la possibilité à 24 structures d'exposer leur savoir-faire.
- Nous tenons à remercier les partenaires de cette journée : SPIE Nucléaire, Amplitude Laser et le CEA/Cesta.



Retour sur la deuxième édition de la Journée Quantique Nouvelle-Aquitaine



Après le succès de l'édition 2023, la Journée Quantique en Nouvelle-Aquitaine est revenue à l'Institut d'Optique d'Aquitaine à Talence le 4 juillet 2025.

Organisée par le NAQUIDIS Center, l'IOGS, le pôle ALPHA-RLH, la Région Nouvelle-Aquitaine, le CNRS, les universités de Bordeaux et de Limoges et avec le soutien du partenaire officiel Toptica France, le programme de cet événement s'est notamment illustré par plusieurs moments clés, dont le Keynote de Serge Haroche (Prix Nobel de Physique 2012), le focus sur la cryptographie quantique et les enjeux de souveraineté technologique, ainsi que l'Inauguration officielle de la Maison du Quantique – HybQuant.

GREEN MANTIS : ALPHA-RLH AU CŒUR D'UN PROJET EUROPÉEN POUR DÉCARBONER L'INDUSTRIE

Le pôle ALPHA-RLH vient de remporter un nouveau succès à l'échelle européenne en étant lauréat du projet **Green Mantis**, dédié à la transition énergétique et à la décarbonation de l'industrie, dans le cadre du deuxième appel à projets Euroclusters (Single Market programme). Ce projet ambitieux réunit six clusters européens (ALPHA-RLH, ITECAM, PRODUTECH, Confindustria Emilia-Romagna, SOLARTYS, Cluster Inteligentna Energija) afin de couvrir l'ensemble de la chaîne de valeur des secteurs de la fabrication industrielle et de l'énergie, assurant une synergie entre tous les acteurs concernés.

Green Mantis développe un **dispositif complet de soutien à l'innovation** destiné à aider les entreprises industrielles et énergétiques à concevoir et adopter de nouvelles technologies net-zéro carbone. Green Mantis va proposer un **soutien financier** pour le développement de projets innovants, favorisant l'émergence de **solutions industrielles vertes, évolutives et reproductibles**.

Les acteurs de la photonique en particulier joueront un rôle clé dans cette dynamique, en contribuant par des technologies de rupture au contrôle, à l'optimisation et à l'efficacité énergétique des procédés industriels, participant ainsi directement à la décarbonation de l'industrie.

Avec Green Mantis, ALPHA-RLH, dans un rôle de coordinateur, confirme son rôle moteur dans l'innovation industrielle durable en Europe.

AGENDA

■ **Cyber Tour Nouvelle-Aquitaine**
11 septembre à Bordeaux

■ **Journée Défense : dispositifs d'accompagnement pour les entreprises**
17 septembre à Bordeaux

■ **Les Challenges de l'Électronique**
7 octobre à Bordeaux

■ **La photonique à la conquête de l'espace**
15 & 16 octobre à Bordeaux

■ **Matériaux avancés pour la photonique**
5 novembre à Limoges

Tous les événements sur
www.alpha-rlh.com

AGENDA

■ QET W à iXcampus

Une journée dédiée aux synergies entre photonique et technologies quantiques, pour faire émerger des projets habilitants au croisement de ces deux domaines stratégiques.

13 Novembre 2025

■ French Photonic Days

Deux journées de rencontres et de réflexion autour des grands enjeux de la photonique, organisées en partenariat avec Systematic, Photonics France et les Alumni de l'IOGS.

6 & 7 novembre 2025

CONTACT

Vous souhaitez connaître l'écosystème de la photonique, développer de nouvelles collaborations majoritairement en Île de France mais aussi hors Île de France, vous impliquer dans des secteurs stratégiques tels que la Data, l'IA, le Quantique, la Décarbonation, le Semi-Conducteur alors n'hésitez plus et rejoignez-nous !
Une question ?
Un renseignement ?

Contactez
Najwa Abdeljalil,
Coordnatrice du Hub :
najwa.abdeljalil@systematic-paris-region.org



Lumière sur l'innovation : entre célébration, éco-conceptions et perspectives européennes

20 ans du Pôle Systematic Paris Région : bilan technologique et perspectives



Le 2 juillet dernier, plus de 300 membres de l'écosystème se sont réunis à l'EDF Lab Paris-Saclay pour célébrer les 20 ans du Pôle Systematic Paris Région, autour d'un message fort : l'innovation est une oeuvre collective. Depuis deux décennies, le Pôle structure la Deep Tech en Île-de-France autour de six domaines technologiques majeurs, dont la photonique, avec un impact significatif :

plus de 1 000 projets collaboratifs labellisés, et 6,4 milliards d'euros levés. Mais au-delà des chiffres, cette journée a été l'occasion de mettre à l'honneur l'engagement humain et la vision portée par les présidents successifs Dominique Vernay et Jean-Luc Beylat, les premiers directeurs Sylvain Dorschner et François Cuny, et l'équipe opérationnelle. De la petite maison de Palaiseau au plateau de Saclay, c'est toute une aventure humaine qui a été saluée. La communauté photonique a été particulièrement reconnue pour son rôle moteur dans les capteurs intelligents, l'optique appliquée ou encore la photodétection avancée. Systematic continue d'agir comme un catalyseur entre laboratoires, start-up et industriels, avec une ambition claire : mettre les technologies structurantes au service des grands défis contemporains — décarbonation, souveraineté, sécurité — et bâtir, ensemble, les 20 prochaines années de l'innovation.

Evosens : un système de vision optique éco-conçu pour la sécurité industrielle

Parmi les membres actifs du Pôle Systematic, l'entreprise Evosens illustre parfaitement la capacité des PME photoniques à concilier innovation technologique et responsabilité environnementale. En collaboration avec des partenaires régionaux, Evosens a conçu un système de vision intelligent éco-conçu, destiné à la détection préventive de situations à risque dans les environnements industriels. Ce dispositif repose sur une architecture opto-électronique sur-mesure, intégrant une caméra embarquée à haute dynamique, tout en optimisant l'ensemble du cycle de vie produit. Ce projet témoigne de l'importance des synergies entre experts du Pôle pour faire émerger des solutions concrètes, performantes et alignées avec les enjeux de développement durable. Une belle réussite collaborative, reflet de ce que la photonique peut apporter à la modernisation industrielle.

PhotonHub Europe : levier technologique pour la réindustrialisation par la lumière

À l'échelle européenne, la dynamique photonique se structure aussi autour de communautés engagées. L'initiative PhotonHub Europe, soutenue par un financement Horizon Europe de 15 millions d'euros, propose aux entreprises – en particulier les PME et start-up – un accès facilité à des ressources technologiques de pointe. Prototypage rapide, accompagnement sur la photo-



nique intégrée, caractérisation optique avancée, expertise en imagerie ou en laser : autant de briques mises à disposition par un réseau de centres d'excellence européens. L'objectif est clair : accélérer le passage de l'idée au produit, en s'appuyant sur une chaîne de valeur photonique unifiée. PhotonHub incarne une approche collaborative, inclusive et tournée vers l'impact industriel, en parfaite résonance avec l'esprit du Pôle et de sa communauté.

Baromètre économique de la filière photonique

Répondez à l'enquête !

Photonics France réalise un baromètre économique de la photonique, fruit de l'enquête menée auprès des entreprises du secteur.



Le dernier bilan dresse un état des lieux de l'activité en 2024 et indique les grandes tendances du marché pour 2025. Fort du succès de cette nouvelle édition, Photonics France étend cette enquête à un rythme semestriel.

Entreprises photoniques, adhérentes ou non de notre fédération, répondez massivement à cette enquête sur le site web de Photonics France : www.photonics-france.org. Répondez-nous avant le 1^{er} septembre 2025. Seules des grandes tendances vous sont demandées et pas de chiffre précis.

Ce baromètre de la photonique offrira une vision claire de l'état actuel du marché pour évaluer la santé économique de la filière et vous guider dans vos stratégies. Il est diffusé en priorité aux participants.

Bienvenue à notre nouvel adhérent !



ArzhOptics est un cabinet de conseil spécialisé dans le développement commercial et l'accompagnement stratégique des entreprises des secteurs de la photonique, des deep tech et des hautes technologies.

Adhérer à Photonics France, c'est bénéficier de nombreux services pour développer votre réseau professionnel et vos activités. C'est contribuer également à une représentation solide de toute la filière photonique auprès des pouvoirs publics. Rejoignez-nous !

French Photonics Days 2025

Ouverture des inscriptions

Photonics France, SupOptique Alumni et Systematic Paris-Region, vous donnent rendez-vous les 6 et 7 novembre à Orsay pour la septième édition des French Photonics Days, avec le soutien de l'Institut d'Optique et de l'Université Paris Sorbonne.

Retrouvez-nous les 6 et 7 novembre 2025 au Bâtiment 503 de l'Institut d'Optique à Orsay sur le thème : « Photonique en Seine : Challenges de la Photonique francilienne ».

Conçu pour un public technique mais non spécialiste, l'évènement a pour objectif de faire le point sur le développement de nouvelles technologies photoniques et leurs applications, découvrir les thèses en cours sur les thématiques évoquées en conférence et visiter en exclusivité des entreprises et des plateformes technologies du Plateau de Saclay.

Le programme et les modalités d'inscription sont disponibles dès maintenant sur le site web dédié à l'évènement : fpd2025.fr.



AGENDA

Nos prochains rendez-vous :

■ **PLI Conférences**
24-25 septembre - Strasbourg

■ **Business Meeting : La Photonique avec Safran**
1^{er} octobre
Magny-les-Hameaux

■ **La Photonique avec Lavoix**
7 octobre - Paris

■ **La Photonique à la conquête de l'espace**
8-9 octobre - Bordeaux

■ **French Photonics Days**
6-7 novembre - Orsay

CONTACTER
PHOTONICS FRANCE

contact@photonics-france.org
www.photonics-france.org

En chiffre

3000

Élèves de classe préparatoire des filières PC, MP et PSI passent chaque année leurs épreuves du concours Centrale-Supélec au sein des locaux de l'Institut d'Optique à Palaiseau entre mi-juin et mi-juillet. Un défi logistique et humain majeur, qui mobilise nos équipes enseignantes, notre service de TP, nos services infrastructure et informatique, ainsi qu'un groupe d'étudiantes et étudiants formés pour guider, rassurer et accompagner les candidats.

En bref

Le 26 juin dernier, Alain Aspect, prix Nobel de physique et professeur à l'Institut d'Optique, a été élu à l'Académie Française. Par le passé, l'Académie française a déjà accueilli des membres de l'Académie des sciences tels que Louis Pasteur ou Henri Poincaré, et plus récemment Jules Hoffmann.

AGENDA

■ Fête de la science :

2 événements en 2025 !

La lumière dans tous ses états :

4 et 5 octobre à Palaiseau

Journées portes ouvertes de

l'Institut d'Optique d'Aquitaine :

9 au 11 octobre à Talence

■ French Photonics Days

6 et 7 novembre au bâtiment 503 –

Campus d'innovation (Orsay)

■ Forum de la Photonique

13 novembre au bâtiment 503 –

Campus d'innovation (Orsay)

■ Gala SupOptique

14 novembre à Paris

■ Remise des diplômes

de la promotion 2025

12 décembre à l'ENS Paris-Saclay

CONTACT

Clémentine Bouyé, responsable

de la communication

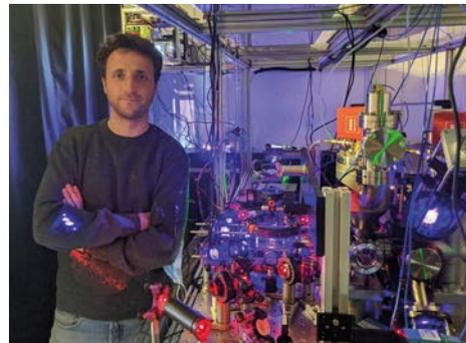
clementine.bouye

@institutoptique.fr

Igor Ferrier-Barbut reçoit la médaille de bronze du CNRS

Igor Ferrier-Barbut, chargé de recherche CNRS dans le groupe Optique Quantique du Laboratoire Charles Fabry (Institut d'Optique / CNRS / Université Paris-Saclay), est lauréat de la médaille de bronze du CNRS 2025 pour ses recherches dans le domaine des interactions lumière-matière.

Dans ses travaux, il s'intéresse à la façon dont un ensemble d'atomes identiques interagit collectivement avec la lumière. Avec son équipe, il tente actuellement de répondre expérimentalement à deux principales questions : la lumière induit-elle des corrélations entre les atomes ? Quel est l'état de la lumière ré-émise par l'ensemble ? Pour étudier ces ensembles d'atomes, Igor et son équipe les produisent par refroidissement laser, puis les contrôlent individuellement à l'aide de pinces optiques. Il est ensuite possible de mesurer comment les atomes absorbent ou ré-émettent la lumière de manière collective.



LES CO-FONDATEURS DE PASQAL REÇOIVENT LE PRIX YVES ROCARD 2025 DE LA SFP

Le Prix Yves Rocard 2025 de la Société Française Physique a été attribué aux co-fondateurs de la société Pasqal : Antoine Browaeys, Thierry Lahaye, tous deux chercheurs au Laboratoire Charles Fabry, Christophe Jurczak, associé directeur chez Quantonation, et Georges-Olivier Reymond, responsable des alliances stratégiques chez Pasqal et alumni de l'Institut d'Optique.

Ce prix récompense une belle aventure scientifique dans le domaine de la simulation quantique avec des atomes ultra-froids contrôlés individuellement, et le transfert technologique réussi vers la société Pasqal, créée en 2019. La start-up s'attaque à l'utilisation de ces techniques pour réaliser un ordinateur quantique.

Source : SFP

L'Institut d'Optique est fier d'avoir soutenu les Olympiades Internationales de Physique 2025

Du 18 au 24 juillet a eu lieu pour la première fois en France l'une des compétitions les plus prestigieuses au monde dans le domaine de la physique pour les lycéens : les Olympiades Internationales de Physique (IPhO), organisées par la Société Française Physique.

Les participantes et participants issus de plus de 90 pays cette année se sont affrontés lors d'épreuves théoriques et expérimentales, et ont profité en parallèle d'un programme de visites culturelles et de moments festifs !

En sponsorisant cet événement, l'Institut d'Optique souhaitait réaffirmer sa volonté d'encourager les vocations scientifiques des jeunes générations.

Assemblée Générale de Photonics Bretagne & Rencontres Labo-Industrie

Le 1^{er} juillet, Photonics Bretagne a réuni adhérents, partenaires et financeurs au Skope à Lannion pour une journée combinant Assemblée Générale et Rencontres Labo-Industrie. Plus de 80 participants ont assisté à ce temps fort, marqué par le bilan d'une année 2024 riche en projets avec nos actions récurrentes d'animation du réseau, la réalisation de nouvelles fibres optiques spéciales, la soutenance de thèse de notre 1^{er} doctorant, la refonte complète de la communication, le développement de notre offre en formation continue, ainsi que le démarrage de nouveaux projets en biophotonique. L'accent a ensuite été mis sur la promotion de l'alternance en photonique illustrée par le témoignage de Cristalens, puis sur les opportunités de projets et de financements, en particulier *via* notre nouveau projet européen PhotonQBoost. La matinée s'est clôturée par une session de pitches adhérents. L'après-midi a quant à elle favorisé les échanges entre laboratoires de recherche et industriels à travers des présentations, des tables de l'innovation et du networking. Une première édition plébiscitée pour son format collaboratif et l'élan donné à la filière.



Photonics PhD Days : quelques places encore disponibles !



Vous êtes doctorant ? Il reste encore quelques places pour vous inscrire aux Photonics PhD Days. Du 24 au 26 septembre, à Lannion, venez présenter votre thèse, rencontrer d'autres doctorants et chefs d'entreprise, visiter des structures photoniques locales, et participer à notre atelier phare pour révéler votre potentiel entrepreneurial ! Le tout dans une ambiance conviviale et face à la mer. Ne manquez pas cet événement !

Vous êtes une entreprise en photonique ? Sponsorisez l'événement ! A partir de 300€ HT pour bénéficier d'une bonne visibilité et être facilement associé à l'événement. + d'infos, contact et inscriptions : <https://www.photonics-bretagne.com/agenda/photonics-phd-days-2025-fr/>

PHOTONQBOOST : MATCHING MISSION EN POLOGNE CANDIDATEZ AVANT LE 26 AOÛT !

Photonics Bretagne participe à la première mission de jumelage PhotonQBoost à Varsovie, du 21 au 23 octobre 2025. Cet événement stratégique vise à connecter les acteurs de la photonique et des technologies quantiques et ceux de l'écosystème agroalimentaire et biotechnologique polonais. Réseautage, visibilité, conseils d'experts et opportunités de financement sont au programme. Inscriptions ouvertes jusqu'au 26 août, avec bourse de voyage possible pour les PME de l'UE hors Pologne.



Candidatez sans tarder ! <https://photonqboost.eu/>

Bienvenue à nos nouveaux adhérents

Arzhoptics : Accompagnement au développement en photonique (22).
Dimione Systems : Solutions optoélectronique pour les applications de détection photonique et à fibre optique (91).
Kacentric : Instrumentation pour la spectroscopie d'absorption (22).



Laser World of Photonics

Le salon Laser World of Photonics 2025, qui s'est tenu à Munich, a établi un nouveau record en termes de nombre d'exposants et de présentation d'innovations de pointe. Du 24 au 27 juin, 1 398 exposants de 41 pays ont présenté toute la gamme des technologies photoniques à quelque 44 000 visiteurs ! Photonics Bretagne et une vingtaine de ses adhérents étaient bien-sûr au rendez-vous sur le Pavillon France ou en dehors : ALPhANOV, Alpha-RLH, Amplitude Laser, BKtel Photonics, Cailabs, Exail, HEF Photonics (Kerdry), IDIL by Fiber Optics Group, Imagine Optics, Iriosome, KwanTek, Laser Components, Le Verre Fluoré, Lumibird, Optosigma, Oxsius, Percipio Robotics, Polytec, SEDI-ATI, Silentsys, Somos, Thales, Toptica.

AGENDA

- ITQW 2025 – Infrared and Terahertz Quantum Workshop
1-5 septembre, Saint-Malo
- Photonics PhD Days
24-26 septembre, Lannion
- ECOC
28 septembre-2 octobre, Copenhague (Danemark)
- Open de l'Industrie
7 octobre, Lannion
- PhotonQBoost Matching Mission en Pologne
21-23 octobre, Varsovie (Pologne)

Focus sur un minicolloque du Congrès Général de la Société Française de Physique à Troyes



Le GDR « plasmonique active » et la Graduate School NANO-PHOT se sont associés pour proposer un mini-colloque autour de la Plasmonique Active et Hybride. La Plasmonique est un domaine de recherche qui exploite l'interaction entre la lumière et les matériaux métalliques (sous forme de couches minces ou nanostructures), à travers l'excitation de plasmons de surface dits localisés (à l'échelle de la particule) ou propagatifs (à l'interface entre un film métallique et un diélectrique). Cet effet est associé à une oscillation de charges en surface, qui s'accompagne d'une forte exaltation locale du champ électrique. Les objectifs majeurs de ce mini-colloque Plasmonique Active et Hybride étaient de rassembler la communauté de la Plasmonique qui travaille sur l'association de résonances Plasmon de Surface avec des molécules, des émetteurs ou des dispositifs actionnables via la lumière, l'électricité ou la chaleur.

Ce vaste domaine d'actualité, résolument interdisciplinaire, a permis de donner la parole à de multiples experts mais également à de jeunes chercheurs (4 sessions de 2h ont eu lieu) autour de sujets importants incluant, de façon non exhaustive, la plasmonique chirale, la nanochimie assistée par plasmons, ainsi que sur les couplages forts et faibles entre plasmon et nano-émetteurs.

AGENDA

■ Journées NANO-Est (CNANO/FRMNGE)
Nancy 1-2 octobre 2025

■ Conférence Nano
Rome, 13-15 octobre, 2025

CONTACT

<https://nano-phot.utt.fr/>
nanophot@utt.fr

NANO-PHOT, co-organisateur du 27^e Congrès Général de la Société Française de Physique

Du 30 juin au 04 juillet 2025, à l'Université de Technologie de Troyes, NANO-PHOT a co-organisé le 27^{ème} Congrès Général de la Société Française de Physique (SFP). Cet événement bi-annuel de la SFP, unique en France, a été pour la première fois organisé dans une université de technologie. C'est le laboratoire L2n UMR 7076 CNRS qui constituait majoritairement le comité local d'organisation (CLO) avec une participation active de NANO-PHOT.

Christophe Couteau, président du CLO, souligne le caractère unique de ce Congrès qui a vu la venue de deux Prix Nobel : Anne L'Huillier (Prix Nobel de Physique 2023) et Alain Aspect (Prix Nobel de Physique 2022). Ce congrès comptait 7 autres plénières, 25 mini-colloques (dont pour la première fois un mini-colloque toutes thématiques, dit 'blanc'), 2 tables rondes, 6 sessions sociétales, des séances posters, plusieurs expositions : Art & Science, Diffusion Scientifique, industrielle et une Village Quantique dans le cadre de l'Année Internationale des Sciences et Technologies Quantiques. Des événements grand public ont également eu lieu durant ce congrès avec la journée « effervesciences » du dimanche avant le congrès et une conférence grand public durant la semaine sur la physico-chimie du champagne. Ce congrès a réuni près de 700 participants sur la semaine et a permis à la communauté des physiciens d'avoir un panorama des sujets d'actualités en physique. Pour la première fois, il a été mis en place une garderie d'enfants pour que les congressistes puissent venir et assister au congrès malgré des contraintes familiales.



Actualités

Participation de chercheurs et étudiants de NANO-PHOT à la Conférence META25, 21-25 juillet 2025, Malaga, Espagne

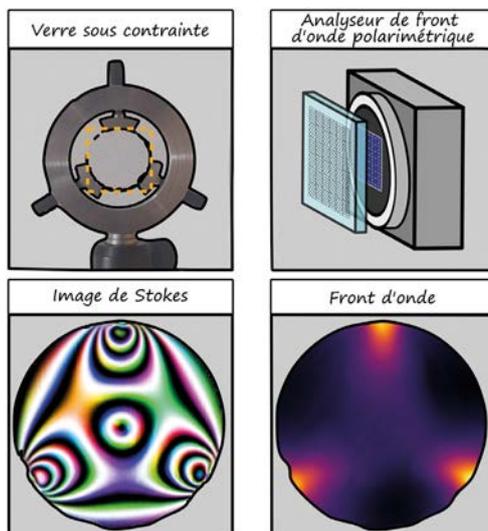
20 nouveaux étudiants master ont confirmé leur arrivée au sein de NANO-PHOT en septembre 2025

Le Laboratoire Commun Luminano - Lumière - Nano-Optique - Vitrail a été approuvé par l'ANR récemment. Il associe l'expertise en nanotechnologie et nanophotonique du laboratoire L2n de l'UTT, à celle du matériau verre de la Manufacture Vincent-Petit, établie à Troyes depuis ses origines. Cette entreprise se consacre à la restauration du patrimoine vitrail ainsi qu'à la création d'oeuvres contemporaines.

Imagerie de champs optiques vectoriels : la simplicité de l'interférométrie à décalage latéral

La mesure de phase et de polarisation aux fréquences optiques est une tâche complexe, nécessitant généralement plusieurs acquisitions distinctes et des montages interférométriques délicats.

Dans un récent article, des chercheurs de Paris et de Marseille proposent une solution d'imagerie quantitative de champs optiques vectoriels – polarisation et front d'onde – en une seule acquisition, reposant simplement sur l'utilisation d'un réseau de diffraction biréfringent placé devant une caméra. L'instrument constitue une généralisation de l'interférométrie à décalage latéral aux ondes vectorielles. Fonctionnant comme un interféromètre auto-référencé, il est plus robuste qu'un système nécessitant un bras de référence externe et s'avère compatible avec des sources à spectres larges ou peu cohérentes. L'ensemble des informations de polarisation (paramètres de Stokes) et de phase spatiale (ou « front d'onde ») est multiplexé spatialement dans un motif de franges au niveau de la caméra : la polarisation est encodée dans les



De gauche à droite, puis de haut en bas.

1. Photographie d'un verre sous contrainte.
2. Schéma illustratif de l'analyseur de front d'onde polarimétrique.
3. Image de Stokes reconstruite, où l'état de polarisation est encodé selon : teinte = azimuth, saturation = taux de polarisation et luminosité = ellipticité.
4. Front d'onde reconstruit.

motifs eux-mêmes tandis que leur déformation est proportionnelle au gradient du front d'onde. Après un

calibrage préalable de l'instrument à l'aide d'au moins quatre faisceaux de référence, un traitement d'image numérique permet de reconstruire cinq images : intensité, front d'onde, taux de polarisation, azimuth et ellipticité de polarisation.

Les auteurs démontrent le caractère quantitatif et haute-résolution de la méthode sur des mires biréfringentes calibrées. Ils proposent aussi une caractérisation complète d'un verre sous contrainte en retrouvant chemins optiques et carte d'orientation des axes propres. Cet instrument ouvre de nombreuses perspectives en métrologie optique et laser, en optique adaptative, en microscopie cohérente ou de fluorescence, ainsi que pour le suivi en temps réel de procédés de fabrication et le contrôle qualité. ●

RÉFÉRENCE

Baptiste Blochet, Grégoire Lelu, Miguel A. Alonso and Marc Guillon, "Quantitative polarimetric wavefront imaging," *Optica* **12**, 907-913 (2025).
<https://doi.org/10.1364/OPTICA.542225>

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 15000 nm
- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock



Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock



UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com



TÉMOIGNAGE D'ENTREPRENEUR

Éric Mottay, Amplitude Laser

Ingénieur opticien, co-fondateur puis PDG (2018-2023) d'Amplitude Laser.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513312>

COMMENT S'EST DÉVELOPPÉ VOTRE INTÉRÊT POUR LES SCIENCES ?

Bon élève au collège et au lycée, j'ai suivi la voie scientifique « par défaut ». Ce n'est qu'en classe préparatoire que je me suis demandé ce que je voulais réellement faire. J'ai durant l'été écrit à toutes les écoles d'ingénieurs pour recevoir leurs brochures, puis les ai triées dans mon grenier. L'optique s'est imposée comme une évidence: c'était propre, élégant et mêlait théorie et applications. C'est pourquoi j'ai choisi SupOptique, et je n'ai jamais regretté ce choix: l'optique, c'est à la fois l'élégance de la physique, la créativité de la technologie et du système D, et des applications foisonnantes.

QUEL POSTE AVEZ-VOUS OCCUPÉ À L'ISSUE DE VOS ÉTUDES ?

Après mon service militaire, j'ai rejoint BMI (BM Industries) en 1986 comme ingénieur de développement laser. L'entreprise fabriquait déjà des lasers solides pour la recherche et l'industrie. En 1995, BMI a été rachetée par ThomsonCSF, devenue ensuite Thales Laser. J'y suis resté jusqu'en 2000: j'ai gravi les échelons d'ingénieur R&D à directeur technique, puis j'ai passé trois ans dans le New Jersey, près de New York, pour y créer la filiale américaine.

QUELS ENSEIGNEMENTS TIREZ-VOUS DE CETTE PÉRIODE ?

Le PDG de l'époque, Gilles Brassart, a enseigné à toute une génération les fondamentaux du métier: l'attention au client, l'importance de la technologie comme moteur de l'innovation, le délicat équilibre entre performances et robustesse industrielle. Son influence est encore visible aujourd'hui dans le paysage industriel français.

QUELLES ONT ÉTÉ VOS MOTIVATIONS POUR QUITTER THALES ET CRÉER AMPLITUDE ?

Quelques années après le rachat par Thalès, nous avons été un petit groupe à souhaiter nous concentrer sur une activité qui nous tenait à cœur, les lasers femtosecondes, dans un environnement de PME que nous jugions plus adapté à nos clients. Avec cinq collègues, nous avons fondé Amplitude fin 2000. Un premier site, à Evry, nous a permis de renforcer notre savoir-faire dans les lasers de très forte puissance. Pressentant le potentiel des lasers femtosecondes industriels, nous nous sommes appuyés sur les travaux de François Salin au laboratoire CELIA de l'Université de Bordeaux pour créer un deuxième site. Les deux structures ont grandi en parallèle, chacune à son rythme, avant de fusionner quinze ans plus tard pour mutualiser leurs forces.

VOUS AVEZ PRIS LE PARI DE NE PAS LEVER DE FONDS EXTÉRIEURS

La rentabilité de chacune des branches du projet Amplitude a été immédiate. La crédibilité de l'équipe d'Évry a rapidement séduit ses clients académiques historiques; La technologie de rupture développée à Bordeaux a trouvé ses premiers clients pré-industriels, et les marges dégagées ont permis de financer l'effort de R&D et les premières embauches. Ce n'est qu'après six ans, lorsque nous avons voulu accélérer la croissance, notamment à l'international, et sécuriser la capacité de production, que nous avons réalisé une première levée de fonds.

QUELS ONT ÉTÉ LES PRINCIPAUX DÉFIS À RELEVER POUR PERMETTRE LA CROISSANCE DE L'ENTREPRISE ?

Entre 2006 et 2007, les premiers contrats "grande série" sont arrivés, venant d'acteurs industriels hors milieu académique qui

exigeaient non seulement des volumes importants, mais aussi une fiabilité très élevée. Il a fallu en un temps très court transformer une start-up de docteurs et d'ingénieurs en une entreprise industrielle de production. Nous avons donc créé des procédures de contrôle qualité, mis en place une traçabilité complète des composants optiques, formé des techniciens spécialisés, réorganisé la production en profondeur. Cette mutation, menée en quelques mois seulement, a été une période très intense, mais, une fois la ligne de fabrication stabilisée, Amplitude s'est retrouvée dans une position unique: très peu d'entreprises savaient alors combiner performance scientifique au meilleur niveau mondial et production industrielle capable de livrer à l'heure et en quantité des lasers sophistiqués. Cette avance a ouvert la porte aux marchés médicaux et microélectroniques et a consolidé notre image de fournisseur industriel dans un secteur encore dominé par les prototypes de laboratoire.

Dans le domaine des grands instruments scientifiques, nous avons beaucoup œuvré pour rester à la pointe de la technologie. Cela nous a permis d'équiper la branche hongroise du projet européen ELI NP, dédié aux lasers très forte puissance et porté par le prix Nobel Gérard Mourou. Plus récemment, nous avons signé un partenariat avec Focus Energy en Allemagne pour fournir les lasers destinés à un programme de fusion nucléaire.

POURQUOI AVOIR CHOISI DE RESTER EXCLUSIVEMENT SUR LE RÉGIME FEMTOSECONDE ?

Dès le départ, notre slogan était clair: « Nothing but ultrafast ». Toute l'équipe venait des premiers développements femtosecondes chez BMI; nous maîtrisions déjà cette physique et avions dix ans d'avance

06/10 juillet 2026

OPTIQUE

SAVE THE DATE

BOURGOGNE / FRANCHE COMTÉ

VENEZ À DIJON

2026



www.sfoptique.org

sur la concurrence. Les lasers nanosecondes ont certes une importance stratégique pour l'entreprise, mais en tant que lasers de pompe pour nos chaînes laser Petawatt – ou composants de systèmes laser plus importants. Tenir ce cap nous a permis d'investir chaque euro de R&D dans la même feuille de route : raccourcir les impulsions, accroître la puissance moyenne et fiabiliser la production. Cette spécialisation extrême est l'une des raisons pour lesquelles Amplitude a conservé une longueur d'avance technique tout en bâtissant une chaîne industrielle cohérente.

QUELLE A ÉTÉ LA STRATÉGIE D'ACQUISITION D'AMPLITUDE ?

Nous avons procédé à plusieurs rachats ciblés, chacun avec un objectif technologique précis. En 2014, la société Continuum aux États-Unis (ex Quantel International) a rejoint Amplitude. Cette société nous apportait à la fois une base industrielle américaine et un accès direct aux pompes nécessaires à nos gros systèmes femtosecondes. En 2018, nous avons racheté Fastlite, une entreprise produisant des composants critiques pour obtenir des impulsions ultracourtes stables et reproductibles, et reconnue pour son savoir-faire en OPCPA. Intégrer Fastlite nous a permis d'internaliser ces maillons et de fiabiliser notre supply chain sans diluer notre spécialisation. Nous avons également acquis une entreprise au Portugal spécialisée dans la production et la conception de lasers à fibre, dont la technologie et l'équipe nous avaient séduits.

VOTRE MARCHÉ A-T-IL ÉTÉ MAJORITAIREMENT INTERNATIONAL ?

Dès les débuts, nos marchés ont été globaux : États-Unis, Europe et Asie. Les laboratoires académiques représentent un réseau international, et tous les acteurs importants se connaissent. Notre visibilité technologique nous a ouvert les portes des grands fabricants coréens, très dynamiques dans la micro-fabrication des écrans plats. Dans un second temps, la Chine est devenue un moteur essentiel de notre croissance. Aux États-Unis, le rachat de Continuum nous a offert une base industrielle et un accès direct aux grands programmes fédéraux. Notre présence sur trois continents nous a

permis d'amortir les cycles : quand un secteur ralentissait, un autre prenait le relais, et nous avons ainsi maintenu une croissance régulière sans dépendre d'un seul territoire.

QUELLES ONT ÉTÉ LES CLÉS DU SUCCÈS D'AMPLITUDE ?

Notre réussite tient à plusieurs éléments. Nous étions techniquement crédibles dès le départ. L'équipe avait dix ans d'expérience dans le laser femtoseconde. Nous avons rapidement rencontré nos marchés, ce qui a permis à l'entreprise d'être rentable très tôt. La bascule s'est faite quand nous avons su passer de la recherche à la production série : très peu d'acteurs savaient à la fois concevoir des impulsions ultra courtes et livrer des machines robustes. Enfin, l'environnement a compté. Le soutien du laboratoire CELIA à Bordeaux, de la Région Aquitaine et des programmes dédiés à l'innovation a été un vrai tremplin.

QUELLES FONCTIONS AVEZ-VOUS OCCUPÉES CHEZ AMPLITUDE ?

Au départ, nous étions six cofondateurs. Gilles Riboulet pilotait le site d'Évry dédié aux lasers de forte puissance pour la recherche, tandis que je dirigeais le site de Bordeaux, focalisé sur les applications industrielles. Pendant une quinzaine d'années, nous avons ainsi cogéré l'entreprise : chacun prenait la responsabilité de son pôle, tout en définissant ensemble la stratégie globale. Lorsque Gilles a pris du recul vers 2018, j'ai repris la direction générale du groupe, couvrant alors Évry, Bordeaux, Antibes, le Portugal et la filiale américaine issue du rachat de Continuum. J'ai occupé ce rôle de PDG jusqu'à mi 2023.

POURQUOI AVOIR QUITTÉ LA DIRECTION OPÉRATIONNELLE ?

Après la crise sanitaire, mon quotidien s'était éloigné de mes moteurs : la technologie et le développement de nouvelles applications. Une évolution de la gouvernance m'a permis de transmettre la direction, tout en restant administrateur et actionnaire.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE VOTRE ACTIVITÉ DEPUIS ?

Depuis mon départ opérationnel d'Amplitude, j'ai créé une entreprise qui me permet de revenir à l'ingénierie pure. Mon sujet est

l'application du machine learning à l'optimisation des procédés laser. Ces procédés comportent de nombreux paramètres (énergie, cadence, focalisation, matière) et très peu de données fiables ; chaque essai coûte du temps et de l'argent. L'enjeu est donc d'utiliser des algorithmes capables d'apprendre dans un régime de données rares, de suggérer intelligemment les expériences suivantes et, *in fine*, de transformer les preuves de concept obtenues au laboratoire en recettes reproductibles directement exploitables sur ligne de production. Je code, je réalise les manip et je collabore avec des partenaires qui me donnent accès au matériel.

COMMENT ÉVALUEZ-VOUS L'ÉCOSYSTÈME LASER FRANÇAIS ?

La France possède un tissu solide mais fragmenté, majoritairement composé de belles PME, et quelques grands groupes : Amplitude, Lumibird, Thales Laser, Oxixus. Beaucoup sont issues de la « galaxie » Quantel et dotées d'une forte expertise. Leur défi reste la taille : elles se retrouvent face à des entreprises américaines ou allemandes beaucoup plus grandes. On pourrait vouloir créer un champion français, mais ce genre d'initiative n'a de sens que si le modèle économique tient la route. Aujourd'hui, ces dossiers doivent être pensés à l'échelle européenne. ●

Nous avons rapidement rencontré nos marchés, ce qui a permis à l'entreprise d'être rentable très tôt. La bascule s'est faite quand nous avons su passer de la recherche à la production série : très peu d'acteurs savaient à la fois concevoir des impulsions ultra courtes et livrer des machines robustes.



Entretien avec Pierre Agostini

Physicien spécialiste des interactions ultracourtes laser-matière, lauréat du Prix Nobel de Physique 2023 pour ses travaux sur la détection des impulsions attosecondes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513315>

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LES SCIENCES ?

J'ai vécu à Tunis jusqu'à la fin de mon année de seconde, au lycée Carnot. Lorsque mes parents se sont installés à Marseille, ils m'ont envoyé au Prytanée militaire de la Flèche dans la Sarthe pour suivre des études en mathématiques, puis en classes préparatoires. C'est là que j'ai découvert les mathématiques et les sciences en général. À la fin de ma première année en mathématiques supérieures, j'ai décidé de revenir à Marseille en 1960 pour suivre un cycle universitaire en sciences, de la licence au DEA, puis la thèse.

QUEL ÉTAIT LE SUJET DE VOTRE THÈSE ?

Ma thèse portait sur l'optique, un domaine très présent à Marseille à cette époque. Il s'agissait d'une thèse expérimentale. J'ai fabriqué un instrument pour mesurer l'épaisseur d'une couche optique durant l'évaporation. L'innovation résidait dans la mesure de la dérivée de la transmission en fonction de l'épaisseur. La transmission passe par des maxima et des minima, et nous cherchions des zéros de transmission plutôt que de mesurer la transmission elle-même. Mon directeur de thèse était Henri Chantrel.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LE SUJET DE L'INTERACTION LASER-MATIÈRE ?

J'ai été recruté au CEA tout de suite, peut-être même avant d'avoir fini ma thèse. Yves Gontier, qui travaillait au CEA et avait fait de la physique théorique à Marseille, était revenu chercher des candidats pour travailler sur l'ionisation multiphotonique. C'était la première équipe à travailler sur ce sujet en France. Il n'y avait qu'un seul groupe à Moscou qui travaillait sur ces sujets. J'ai

accepté immédiatement. Je suis allé voir mon directeur de thèse, Henri Chantrel, pour lui parler de cette opportunité. Il m'avait conseillé de ne pas m'engager dans cette voie, mais j'ai tout de même rejoint le CEA en 1967, l'année de ma soutenance de thèse.

QUELLES ÉTAIENT VOS CONDITIONS DE TRAVAIL LORSQUE VOUS ÊTES ARRIVÉ AU CEA ? AVIEZ-VOUS DES LASERS À DISPOSITION ?

Mon collègue Gérard Mainfray avait un laser à rubis et travaillait sur l'ionisation multiphotonique des gaz rares. Lorsque je suis arrivé, après avoir fait une thèse en optique, on m'a demandé de travailler sur l'instrumentation optique. Il y avait toute une série de problèmes d'optique avec le laser, notamment la focalisation et la détermination du profil d'intensité le long de l'axe. J'ai donc été responsable de ces aspects dès le début. La première chose que j'ai faite a été de déterminer la meilleure méthode pour focaliser le laser. Avec les intensités de ce laser, les lentilles ne tenaient pas longtemps et étaient rapidement détruites. Il fallait surveiller cela, ainsi que la focalisation et mesurer les dimensions du faisceau le long de l'axe.

EN QUELLE ANNÉE AVEZ-VOUS OBTENU VOS PREMIERS RÉSULTATS ?

Je crois que la première publication date de la fin de 1968. Très rapidement, ces lasers étaient vendus ou devaient être fabriqués à partir d'une publication. Nous avons acheté un laser, et il y avait un soutien important du CEA pour développer ces recherches.

VOTRE GROUPE AU CEA ÉTAIT PRÉCURSEUR DANS CE DOMAINE.

À part les Russes à Moscou, qui étaient en avance sur nous, je crois que nous étions les

premiers en France à travailler sur ce sujet. Longtemps après, j'ai découvert, cité dans le fameux article de Keldysh, qu'un autre groupe avait aussi commencé à s'intéresser au problème à Ohio State (!) dès 1962.

SUR QUELS ATOMES TRAVAILLIEZ-VOUS ?

Nous travaillions sur les gaz rares. Ensuite, nous sommes passés aux alcalins.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT AU COURS DE VOS RECHERCHES ?

Au début, il y avait d'un côté le papier de Keldysh qui parlait de l'effet tunnel. De l'autre côté, il y avait la théorie des perturbations, qui était plus soutenue que l'effet tunnel. La théorie des perturbations ne permettait pas de mesurer grand-chose en valeur absolue, mais nous pouvions mesurer la dépendance avec l'intensité. Cette dépendance, en théorie des perturbations, est très simple : c'est l'intensité à la puissance du nombre de photons absorbés. Malheureusement, l'expérience ne donnait jamais ça, alors nous étions très inquiets. Mais nous trouvions toujours quelques bonnes raisons. L'effet Tunnel n'a été démontré qu'en 1985 par mon collègue québécois See Leang Chin et la théorie non-perturbative de l'ionisation à haute intensité a dû attendre 1993 et les travaux de Ken Kulander et Paul Corkum.

EN QUELLE ANNÉE AVEZ-VOUS PUBLIÉ VOS PREMIERS RÉSULTATS SUR LE SUJET ?

En 1968. Il a fallu un an et demi. Même si nous n'étions pas très sûrs de l'interprétation. Nous partions de la théorie des perturbations qui était au début la base de notre interprétation.



QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DANS VOS RECHERCHES À PARTIR DES ANNÉES 70 ?

À la fin des années 70, nous avons découvert à Saclay ce qui s'appelle la théorie ATI (Above Threshold Ionization). Cette théorie décrit le fait que si les atomes absorbent des photons pour être ionisés, l'absorption ne s'arrête pas là, et les atomes peuvent absorber des photons supplémentaires. Si N photons sont nécessaires pour l'ionisation, l'atome peut absorber $N+S$ photons. C'est cela l'ATI. Nous avons découvert cela à Saclay. Gérard Mainfray a posé la question : « Qui veut regarder les électrons ? » J'ai dit, OK, je vais regarder les électrons. Nous avons fabriqué un petit analyseur d'énergie pour électrons et avons eu la chance de voir presque tout de suite deux pics dans le spectre des photoélectrons, séparés par l'énergie du photon. C'était l'objet de cette publication dans PRL en 1979. Une découverte majeure a été lorsque nous nous sommes aperçus que non seulement l'atome pouvait absorber un photon de plus, mais il pouvait absorber des dizaines de photons de plus. Cela devenait très difficile de traiter ce problème par la théorie des perturbations, c'était quasiment impossible. Il y a eu à ce moment-là plusieurs avancées par Paul Corkum et deux théoriciens. Ils ont commencé à résoudre l'équation de Schrödinger numériquement et Paul Corkum a eu l'idée de traiter la partie du spectre qui se passe dans le continuum classiquement. Grâce à cette astuce, il a trouvé très rapidement que l'énergie cinétique des photoélectrons pouvait être très grande et qu'elle dépendait en particulier de l'intensité du laser. Cette découverte a donné naissance à la physique des hautes intensités.

AVEZ-VOUS EU DES COLLABORATIONS DE LONG TERME ?

Des collaborateurs nouveaux sont arrivés. En général, c'étaient des thésards, mais quelquefois ils étaient tellement brillants qu'ils restaient au CEA. Avec Gérard Mainfray ainsi

qu'avec mon ami Guillaume Petite, la collaboration s'est poursuivie pendant des décades. L'équipe des théoriciens, Yves Gontier et Michel Trahin, a été là pratiquement tout le temps où je suis resté au CEA. À l'extérieur, j'ai eu une collaboration avec Harm Greet Muller (Amsterdam) pendant une quinzaine d'années, jusqu'à l'expérience sur les attosecondes de 2001 au LOA, et avec Louis DiMauro à Brookhaven et Ohio State qui dure encore ! L'expérience de 2001 a été réalisée au LOA, alors sous la direction d'Andre Antonetti avec qui nous avons déjà collaboré de nombreuses années.

QUELLE ÉTAIT L'ATMOSPHÈRE DE TRAVAIL ?

Il y avait beaucoup de séminaires. Nous avions des visiteurs qui venaient de l'École Normale et d'ailleurs pour apprendre un peu ce qu'était le multiphoton, car nous étions les précurseurs dans ce domaine. Un peu plus tard, il y a eu des gens à l'École Normale qui ont fait des thèses sur le multiphoton aussi, mais en général, ils se contentaient de processus à 2 ou 3 photons, tandis que nous, c'était beaucoup plus que ça. Je travaillais dans le groupe de Guillaume Petite et nous nous étions spécialisés dans la détection des photoélectrons. Anne L'Huillier s'est dirigée vers la détection des photons. Nous collaborions et échangeions continuellement. L'atmosphère du groupe favorisait les échanges, nous déjeunions ensemble.

ON A L'IMPRESSION D'UNE GRANDE LIBERTÉ DANS LES CHOIX SCIENTIFIQUES QUE VOUS FAISIEZ.

Oui, en fait le CEA nous donnait de l'argent pour travailler, mais il ne s'occupait pas vraiment de nous donner des directions de recherche. Les directions de recherche, c'était le groupe qui décidait de ce qu'il fallait faire ou de ce que nous pouvions faire, etc. Nous n'avions pas d'autres obligations que celles-là.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES AVANCÉES DANS LES ANNÉES 1980 ET 90 ?

Les grandes étapes ont été, d'abord, l'invention de Gérard Mourou sur le CPA (Chirped Pulse Amplification), qui a été installé à Saclay pour la première fois par Louis-André Lompré et Anne L'Huillier. C'est à cette époque qu'Anne L'Huillier a commencé à faire ses études sur les harmoniques. Elle a passé sa thèse à Saclay, mais pas sur les harmoniques, sur l'ionisation multiphotonique. Son directeur de thèse était en Suède et elle avait déjà un pied en Suède. Ensuite, elle a commencé à faire ses études en 1985 ou 1986 sur les harmoniques. Elle était tout à fait étonnée de cette découverte. Elle était pratiquement la seule. Il y avait aussi quelqu'un à Chicago qui faisait quelque chose comme ça, mais il était parti avec des lasers UV alors qu'Anne L'Huillier est partie sur un CPA à 1 micron. Elle avait beaucoup plus de chances de trouver des harmoniques à ce moment-là que lui, et l'expérience a effectivement montré qu'elle pouvait voir des harmoniques jusqu'à des ordres très élevés. Donc, ça a été une des grandes avancées à ce moment-là. Si les impulsions attosecondes sont nées, c'est bien à ce moment-là, bien que personne ne le sache et ne se doute que c'était à cause de ça. Mais c'est maintenant clair que sans les harmoniques, nous n'aurions jamais fait d'attosecondes.

QUELS ONT ÉTÉ VOS PRINCIPAUX TRAVAUX DURANT CES ANNÉES LÀ ?

Nous avons fait plusieurs choses. C'est à ce moment-là qu'a commencé la collaboration avec le LOA (Laboratoire d'Optique Appliquée). Le LOA avait des lasers femtosecondes que nous n'avions pas encore à Saclay. Donc, je suis allé faire plusieurs fois des expériences au LOA pour ces lasers femtosecondes. Il y avait aussi la collaboration avec le FOM d'Amsterdam avec Harm Greet Muller. Nous avons fait plusieurs expériences, dont une assez spectaculaire peut-être en 1993 : nous avons fabriqué une source de rayons X avec un métal liquide dans lequel nous focalisons le laser. Cette approche entraînait plusieurs difficultés, comme par exemple le fait que le liquide était éjecté un peu partout et qu'il fallait nettoyer les optiques assez souvent. Nous avons publié un article dans PRL sur ce sujet en 1994 que

LASER & ÉLECTRONIQUES DE PUISSANCE

Lasers et électronique pour la génération/accélération de particules, pompage OPCPA et fusion par confinement inertiel



LASERS SÉRIE FLUX

- ▶ Pompage par lampe flash : énergie d'impulsion jusqu'à 10J
- ▶ Pompage par diode : puissance moyenne jusqu'à 500 W
- ▶ Solutions innovantes de mise en forme des impulsions
- ▶ Synchronisation précise entre différentes sources laser

CELLULES DE POCKELS ET DRIVER ASSOCIÉ



- ▶ Temps de montée ultra-rapide <math>< 10\text{ ns}</math>
- ▶ Synchronisation parfaite pour les systèmes fs & CPA
- ▶ Compatibilité haute tension pour lignes laser à forte énergie
- ▶ Stabilité longue durée en environnement intensif

j'aime beaucoup. J'ai commencé à travailler avec Louis F. DiMauro qui était à Brookhaven à ce moment-là. Les expériences se sont un peu dirigées vers les femtosecondes et les XUV. Les deux sujets pouvaient laisser prévoir les attosecondes, mais personne ne pouvait à l'époque les prédire.

MAIS VOS TRAVAUX PUBLIÉS EN 2001 VONT ENFIN PERMETTRE DE DÉTECTER DES IMPULSIONS ATTOSECONDES

Oui, c'est l'expérience que nous avons faite au LOA, basée en partie sur la théorie développée par les trois théoriciens de Pierre et Marie Curie, Valérie Vénier, Richard Taïeb et Alfred Maquet. Ils avaient un papier datant de 1996 dans lequel ils avaient calculé ce qui se passe avec l'ionisation à trois couleurs : deux harmoniques consécutives et l'infrarouge. Ils avaient prédit l'apparition de side-bands et que la probabilité de ces side-bands allait dépendre des phases. C'est l'article qui nous a servi de base pour l'expérience de 2001 qui a été couronnée par le prix Nobel, peut-on dire.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE PLUS PRÉCISÉMENT LE CONTEXTE DE CETTE EXPÉRIENCE ET LES PRINCIPALES DIFFICULTÉS QU'IL A FALLU SURMONTER ?

Le problème était d'observer les photoélectrons, donc il fallait prendre un spectre avec un spectromètre à photoélectrons, ce qui était déjà un standard à l'époque par temps de vol. Une fois qu'on avait ça, on pouvait voir, quand on mélangeait sur l'atome irradié les harmoniques et le fondamental, toute une série de pics correspondant aux harmoniques et une série de pics intermédiaires qui correspondaient aux side-bands. Les side-bands étant des transitions ATI à deux photons, un photon harmonique et un photon infrarouge. Ce qui était ensuite un peu plus difficile à faire, c'était de trouver le bon régime d'intensité pour que ce soit des transitions ATI à deux photons, pas à trois ou quatre ou six, parce que ça, ça complique vraiment beaucoup les détections et l'indépendance en intensité des phases. Donc, une fois qu'on avait trouvé ça, l'expérience a été assez simple. Il fallait avoir un interféromètre qui permette de faire varier dans l'échelle attoseconde la différence de marche entre les harmoniques et le fondamental. On faisait

alors varier cette différence de marche et on regardait comment variaient les amplitudes des side-bands en fonction de la différence de marche et en fonction du retard entre les harmoniques et l'infrarouge. Cette différence de marche, la théorie dit qu'elle contient la différence de phase entre les deux harmoniques qui ont servi, qui sont de part et d'autre du photon infrarouge. Une fois qu'on avait ça, on avait les phases de pratiquement toutes les harmoniques et donc on pouvait faire un tracé de ces phases et une fois qu'on avait les phases et les amplitudes, on avait tout ce qu'il fallait pour reconstituer dans le domaine temporel l'impulsion. C'est là tout le secret de l'expérience de 2001.

L'EXPÉRIENCE DE 2001 A ÉTÉ UN PEU COMPLIQUÉE PAR LE FAIT QUE PENDANT UN CERTAIN TEMPS, VOUS N'OBTENIEZ PAS DE RÉSULTAT. QUELLE EN ÉTAIT LA RAISON ?

Parce que le laser avait des fluctuations d'intensité et ces fluctuations d'intensité se traduisaient par des fluctuations de l'amplitude des side-bands qui, au lieu de suivre une belle sinusoïde, formaient un nuage de points. Ce n'est que deux ou trois mois plus tard que nous avons trouvé que c'était très simple : il suffisait de normaliser les résultats au compte total et hop, les sinusoïdes sont apparues. Nous avons pu mesurer les phases et donc en déduire l'apparition du premier train d'attosecondes.

AVEZ-VOUS PERÇU L'AMPLEUR ET L'IMPACT DE CES RÉSULTATS ?

Non, pas vraiment. Nous avons été très contents que le papier soit publié presque tout de suite dans Science, mais à part ça, non. Nous sentions bien qu'il y avait quelque chose d'intéressant là-dedans. Mais les attosecondes, c'était un mot un peu à la mode! C'est à peu près à ce moment-là que j'ai été invité à Marseille à faire un exposé à la Société Française de Physique. Vers 2003 ou 2004, il y a eu un journal de sciences populaires qui a décidé qu'il y avait quelque chose là et qu'un des auteurs ou peut-être plusieurs allaient être prix Nobel, mais bon, c'était en 2003 ou 2004, et le type a dû être renvoyé depuis parce qu'il a fallu attendre 20 ans pour que le prix Nobel arrive.



IL S'AGISSAIT BIEN DE LA TOUTE PREMIÈRE DÉTECTION EXPÉRIMENTALE D'IMPULSIONS ATTOSECONDES.

Oui, c'est la toute première. Et à ce moment-là, comme notre train d'impulsions était un train d'impulsions, le laser que nous avions était un laser assez long, d'une cinquantaine de femtosecondes. Nous n'avions pas le moyen de faire ce qui a été fait par Ferenc Krausz à Vienne à ce moment-là, de faire des impulsions attosecondes uniques. Donc pour nous, c'était simplement un train qui se répétait toutes les demi-périodes du fondamental. C'est la première publication. Presque la même année, Ferenc Krausz a publié une publication avec une impulsion unique de 500 attosecondes. Voilà, et à partir de là, nous avons fait plusieurs publications.

QUEL ÉTAIT LE PAYSAGE CONCURRENTIEL ? SAVIEZ-VOUS QUE CE RÉSULTAT ÉTAIT ATTENDU PAR BEAUCOUP DE GROUPES DEPUIS LE DÉBUT DES ANNÉES 80 ?

Pas vraiment. Lorsque nous avons obtenu le résultat, nous étions très contents, bien sûr. Nous avons eu la chance d'être les premiers, je dirais que c'est vraiment un coup de chance. Parce que bon, quelques mois après, ça aurait pu être Ferenc Krausz. Nous participions à un réseau européen dans lequel participaient Ferenc Krausz et Anne L'Huillier. Et je me souviens lors d'une réunion à Paris où mon étudiant de l'époque, qui s'appelait Pierre-Mary Paul et qui était le premier auteur de la publication, était très content d'être là. Et quand nous avons annoncé le résultat, Ferenc a dit : « Ah mais oui, bien sûr, ils ont travaillé dans le spectre » parce que lui, il a essayé de trouver les attosecondes directement dans le domaine temporel. Nous ne pouvions pas faire ça et dans notre méthode, qui s'appelle RABBIT depuis 2002, c'est un peu la même chose que la méthode de Rick Trebino appelée FROG pour les femtosecondes, transposée dans l'ultraviolet extrême et les attosecondes.

AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ CETTE MÉTHODE RABBIT SPÉCIFIQUEMENT POUR CETTE EXPÉRIENCE DE 2001 ?

Oui, nous l'avons développée spécifiquement pour l'expérience de 2001. C'était la première fois que nous montions cette expérience, et

c'était la première fois qu'elle était montée. Nous avons une manipulation en 1994 pour mesurer la durée d'impulsion X que nous fabriquions avec un miroir de gallium, mais c'étaient des impulsions qui étaient de l'ordre de 500 femtosecondes, ce n'était pas du tout des attosecondes que nous mesurions, mais nous avions déjà une idée de ce qu'il fallait faire pour mesurer des temps.

COMMENT AVEZ-VOUS TRAVAILLÉ POUR GÉNÉRER CES IMPULSIONS ATTOSECONDES ?

La question était de savoir si nous générions une bande passante suffisante pour faire des attosecondes. Il s'avère qu'avec 5 harmoniques, nous avons la bande passante suffisante. Les premières impulsions étaient de l'ordre de 200 à 300 attosecondes, donc ce n'était pas extrêmement court, ce n'était pas le record du monde, mais c'était quand même des attosecondes et nous n'avions pas besoin de faire autre chose que de sélectionner 5 harmoniques à ce moment-là.

VOUS AVEZ RÉALISÉ CETTE EXPÉRIENCE MAJEURE APRÈS 30 ANS DE CARRIÈRE.

Nous avons publié ces résultats en 2001 et je suis parti à la retraite en 2002. À cette époque là à Saclay, il n'y avait pas le choix : si on avait les annuités et plus de 60 ans, la retraite était obligatoire.

MAIS VOUS ÊTES RESTÉ PAR LA SUITE PARTICULIÈREMENT ACTIF EN RECHERCHE.

À partir de 2002, et la prise de ma retraite, il me devenait très difficile d'accéder à Saclay et de travailler dans la laboratoire. Donc c'est à partir de là que j'ai passé 6 mois au Québec puis 6 mois à Amsterdam ou encore à Berlin au MBI. Jusqu'en 2005, j'étais un peu à droite à gauche mais je ne considérais pas que j'étais encore en âge de partir à la retraite. Je me sentais en pleine forme et j'avais bien envie de continuer. C'est à ce moment là que Louis DiMauro a installé son groupe à Columbus. Et il m'a proposé de postuler pour obtenir un poste à Columbus et j'ai été recruté en 2005. Ce fut le début d'une autre activité parce qu'il a fallu que j'enseigne. Et c'est ainsi que j'ai commencé une nouvelle carrière à 64 ans d'enseignant-chercheur dans une université américaine.

AVEZ-VOUS FAIT ÉVOLUER VOS THÉMATIQUES DE RECHERCHE ?

Oui parce que les recherches étaient essentiellement les recherches de Louis DiMauro qui avait l'équipement et les étudiants pour les faire. Et donc ce sont des recherches qui étaient plutôt orientées vers les hautes intensités que vers les attosecondes.

JUSQU'À QUELLE ANNÉE AVEZ-VOUS ENSEIGNÉ ?

Jusqu'en 2017, année où je pris une 2^e retraite, mais volontaire cette fois-ci. L'enseignement devenait un peu lourd et me prenait beaucoup de temps.

EN OCTOBRE 2023, PRESENTEZ-VOUS LE COUP DE TONNERRE QUI VA SURVENIR AVEC L'ANNONCE DES PRIX NOBEL ?

Pas du tout. Et je ne m'occupais pas de savoir qui avait été nommé prix Nobel, donc ça a été une grande surprise pour moi. C'est ma fille qui m'a appelé en fin de matinée pour me dire « tu as le prix Nobel, et je n'en sais rien ?! ». Le Président du jury avait essayé de me joindre au téléphone mais il n'y parvenait pas parce qu'il essayait de me joindre à Columbus alors j'étais à Paris à l'époque. Ce n'est que dans le courant de l'après-midi que j'ai pu m'entretenir avec lui, après l'annonce des résultats.

QU'AVEZ-VOUS RESENTI ?

J'étais tout d'abord très surpris, et puis à la fois content et inquiet parce que je ne m'imaginai pas obtenir le prix Nobel. Lorsque je suis allé à Stockholm, après la cérémonie de remise du prix, au moment de signer le livre d'or où tous les prix Nobel ont apposé leur signature, je me demandais s'il fallait vraiment que je signe. Je me souviens du prix Nobel de Claude Cohen Tannoudji et des cours qu'il donnait au collège de France et je ne me voyais pas au même rang que lui.

QUEL A ÉTÉ L'IMPACT SUR VOTRE SUR VOTRE VIE DE CE PRIX NOBEL ?

L'année dernière a été une année très chargée avec beaucoup de visites, d'invitations. J'étais à la retraite de l'Ohio State et ma principale occupation était les meetings en visio avec le groupe de Lou, et ce quotidien a été complètement bouleversé. ●

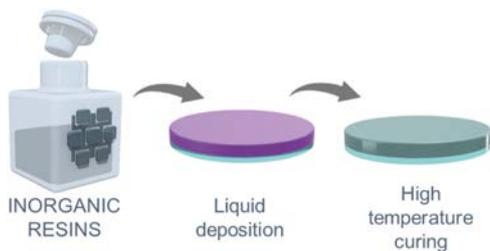
MÉTHODES DE DÉPÔT LIQUIDE DE MATÉRIAUX INORGANIQUES POUR LA PHOTONIQUE

Arthur CLINI DE SOUZA^{1,2}, Mahmoud ELSAWY², Stephane LANTERI², Badre KERZABI², David GROSSO¹, Marco ABBARCHI^{1,*}

¹ SOLNIL, Pépinière d'entreprises Luminy Biotech, 163 avenue de Luminy, 13011 Marseille France

² Université Côte d'Azur, Inria, CNRS, LJAD, 06902 Sophia Antipolis Cedex, France

*marco.abbarchi@solnil.com



<https://doi.org/10.1051/photon/202513319>

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.

La chimie sol-gel est une méthode éprouvée pour créer une grande variété de matériaux. Jusqu'à récemment, elle ne satisfaisait pas les exigences de qualité nécessaires aux applications haute technologie telles que l'optique et la photonique, ce qui en limitait l'exploitation. Nous présentons ici des revêtements inorganiques de haute qualité obtenus par chimie sol-gel, affichant des indices de réfraction faibles ou élevés (respectivement 1,12 et 2,6 à 500 nm), et discutons de l'importance d'un fort contraste d'indice dans les dispositifs photoniques.

Les composants optiques, les circuits photoniques intégrés (PIC) et les métasurfaces transforment des technologies allant de l'imagerie et l'affichage à la détection et la communication. En contrôlant la lumière à l'échelle sub-longueur d'onde, ces innovations offrent des alternatives compactes et économes en énergie à l'optique traditionnelle. Les PICs ouvrent la voie à des avancées en imagerie, optique quantique et affichages réalité augmentée (AR). Les métasurfaces, structures 2D ultrafines, fournissent des lentilles légères et efficaces, des couleurs

structurelles et des revêtements antireflets. Avec l'amélioration des matériaux et procédés, on s'attend à voir se généraliser métalentes, filtres de couleur miniaturisés, écrans transparents, capteurs bio-photonique et PIC visibles. Chaque segment adoptera des matériaux spécifiques et méthodes spécifiques (films 2D, structures 3D) selon les performances, les coûts et les volumes requis.

Le dépôt de couches minces, essentiel pour ces technologies, comprend des méthodes physiques, chimiques et en solution [1]. Les procédés physiques/chimiques offrent des films de haute qualité mais nécessitent

des équipements sous vide coûteux, lents et utilisant des gaz dangereux. Les méthodes en solution (spin-, dip-, spray-coating) sont économiques et évolutives, mais offrent en général une moindre pureté et un contrôle plus limité.

Nous nous concentrons ici sur la chimie sol-gel, présentant les avancées récentes permettant de produire des films de SiO₂ et TiO₂ de haute pureté, avec des indices allant de 1,12 à 2,6, de faibles pertes optiques et offrant une excellente planéité. Ces matériaux permettent la réalisation de dispositifs optiques haute performance où un fort contraste d'indice est indispensable.

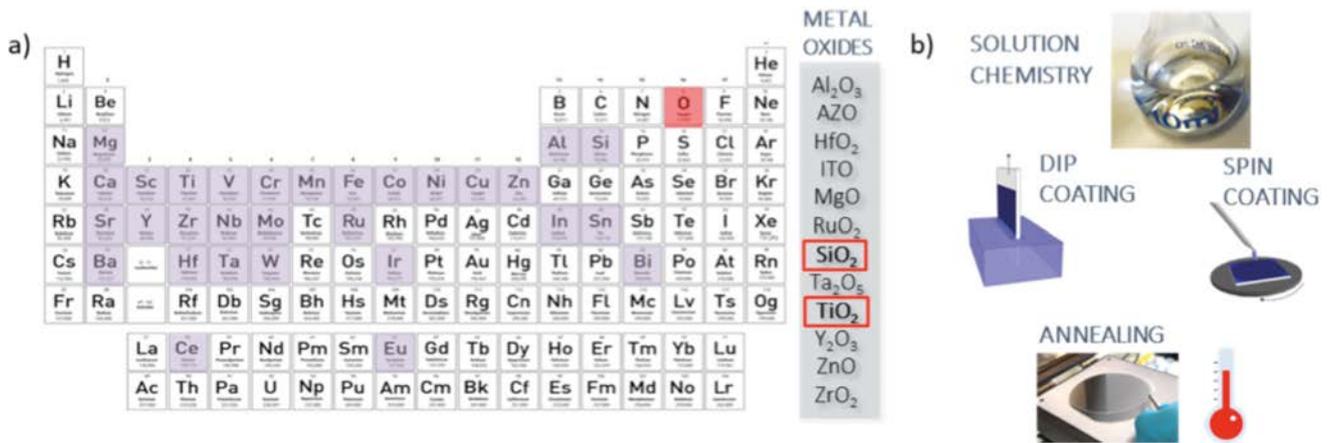


Figure 1. (a) Gauche : tableau périodique indiquant les éléments pouvant être combinés par voie sol-gel pour former un oxyde métallique (MO_x). L'oxygène est surligné en rouge clair. Encadré : exemples de MO_x utiles en optique/photonique. TiO₂ et SiO₂ sont mis en évidence comme paradigmes d'indice élevé et faible dans le visible. (b) Les trois briques technologiques : solution initiale, dépôt (spin ou dip) et recuit.

CHIMIE SOL-GEL

La chimie sol-gel et les méthodes de dépôt liquide exploitent des procédés simples à pression ambiante, tels que le spin- ou le dip-coating, pour déposer des films minces entièrement inorganiques (Fig. 1b), proposant une alternative économique et évolutive, avec en prime la possibilité d'accorder finement les propriétés optiques via la porosité et la cristallinité [2].

La chimie sous-jacente est un procédé humide polyvalent pour synthétiser des oxydes métalliques (Fig. 1a). Elle s'appuie sur la formation d'un sol

colloïdal qui évolue en réseau gélifié via hydrolyse et condensation d'alkoxydes ou de sels métalliques :

- **Hydrolyse** : Les alcoxydes métalliques ([M(OR)]_x) réagissent avec l'eau, ce qui remplace les groupes alcoxyde (-OR) par des groupes hydroxyle (-OH) et forme ainsi des espèces métalhydroxo:
 $M(OR)_x + H_2O \rightarrow M(OH)_x + ROH$
- **Condensation** : Les groupes hydroxyle subissent ensuite une

condensation, reliant les centres métalliques par des liaisons M-O-M ; il se forme alors un réseau croissant qui évolue vers un gel :
 $(RO)_x M(OH) + (RO)_x M(OH) \rightarrow (OR)_x M - O - M(OR)_x + H_2O \rightarrow MO_n$

Selon les conditions, on obtient des gels polymériques ou des suspensions colloïdales. Les solutions sont déposées (spin, dip, spray) puis recuites ; cristallinité et densité se règlent par le procédé thermique. À partir de pré-curseurs liquides, on contrôle précisément la composition, la porosité et la structure. Contrairement aux techniques sous vide exigeantes, le procédé s'opère à température et pression ambiantes et se termine par un recuit

Table 1. Propriétés de silice et dioxyde de titane à indice de refraction ultra-élevé ou ultra-faible.

PROPRIÉTÉS	SILICA SiO ₂	TITANIA TiO ₂
Épaisseur de dépôt maximale en 1 seule étape	2600 nm ± 3% (larger values achieved by multi-layer deposition)	100 nm ± 3% (1000 nm avec de multiples étapes)
Rugosité de surface (RMS, nm)	1 nm for n = 1.12 0.4 for n = 1.38	<0.5 nm jusqu'à n = 2.6
n@520nm	1.12-1.45±0.005	1.70-2.60 ± 0.01
Haze	<0.05%	<0.2% for n<2.5 <0.5% for 2.5<n<2.6
Abs. (pertes par diffusion)	<0.05% dans le visible	<0.2% dans le visible
Temp de recuit	300-450 °C	100-800 °C
Module d'Young	≈2 GPa	≈200 GPa
Humidité relative RH 85% à 85°C × 72 h		Δn = 0.01
UV light 1h, 306 W/cm ² @ 365 nm		Δn ≈ 0
Choc thermique, -30°C to + 60 °C × 100 cycles		Δn ≈ 0
Procédés de dépôt	Spin-coating, Dip-coating, Nano-Imprint	
Durée de vie des solutions	>2 mois à 6 °C	

(100–800 °C) en simple four, ajusté au substrat et aux propriétés visées.

MATÉRIAUX À INDICE DE RÉFRACTION ULTRA-ÉLEVÉ ET ULTRA-FAIBLE

Nous détaillons le cas de 2 matériaux d'intérêt pour la photonique, la silice (SiO_2) et le dioxyde de titane (TiO_2), tous les 2 déposables sur grandes plaques avec forte planéité et faible rugosité, limitant les pertes par diffusion (Tableau 1).

Silice (SiO_2) — Déposée par spin ou dip sur plus de 2600 nm en un seul passage (plus épais par couches successives). Un recuit 300–450 °C produit un réseau SiO_2 entièrement inorganique, homogène, robuste, hydrophobe, avec indice de refraction modulable de 1,12 (ULRI) à $1,45 \pm 0,005$. L'indice est ajusté finement par la porosité. Le dépôt se fait à pression ambiante, et la matière peut être moulée en 3D par nano-impression directe, évitant les étapes de gravure [3]. Cette « résine » de silice sert à encapsuler des métasurfaces ou à gagner des PIC. Contrairement aux aérogels, elle reste thermiquement, chimiquement et mécaniquement stable.

Dioxyde de titane (TiO_2) — Dépôts jusqu'à 100 nm en un passage (jusqu'à 1 μm en multicouche) [4]. Après recuit, on obtient des films denses, homogènes, présentant un indice de refraction n jusqu'à $2,60 \pm 0,01$ à 520 nm (UHRI). L'indice se règle *via* l'état cristallin (amorphe \rightarrow anatase, Fig. 2). Les films présentent une très faible absorption et une très faible diffusion (Tableau 1) même à indice de refraction élevé, grâce à des grains d'anatase < 20 nm denses. La matière peut être imprimée par nano-impression thermique douce.

La chimie sol-gel développée permet de mélanger parfaitement les résines inorganiques ULRI et UHRI ; en combinant porosité contrôlée (indices faibles) et cristallinité ajustée (indices élevés), il est possible de couvrir la plage d'indice de refraction allant de $n = 1,12$ à $n = 2,60$. Des indices encore plus élevés sont envisageables, mais

DE L'IMPORTANCE DU CONTRASTE D'INDICE

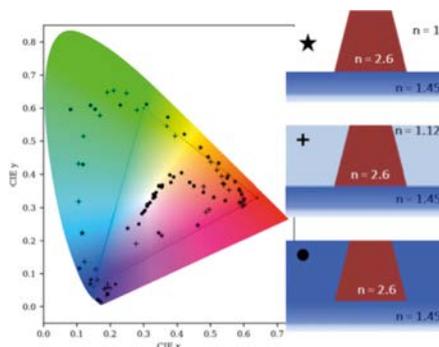


Figure 2. Gauche : diagramme de chromaticité de méta-surfaces colorées constituées de traits inclinés en TiO_2 à indice de refraction élevé sur verre, (★) dans l'air, (+) encapsulés dans de la silice SiO_2 à indice de refraction faible, (●) dans de la silice SiO_2 à indice de refraction standard. Droite : schémas correspondants.

Pour les métasurfaces dédiées à la génération de couleurs structurales (Fig. 2), un contraste d'indice de refraction élevé se traduit par des réflexions plus fortes aux interfaces, des franges d'interférence plus nettes et donc des couleurs plus vives et saturées. À contraste faible, les interférences s'affaiblissent : les couleurs deviennent pâles et larges. Exemple : nervures inclinées en TiO_2 ($n = 2,6$) sur verre ($n = 1,45$) [5] ; dans l'air ou dans SiO_2 ($n = 1,12$) le gamut atteint les bords du diagramme, tandis que dans SiO_2 classique les résonances s'élargissent et les teintes tirent vers le blanc.

l'apparition de la phase rutile accroît les pertes par diffusion aux courtes longueurs d'onde. Même très poreux, ces matériaux peuvent être entièrement hydrophobes.

CONCLUSION

Grâce à une chimie liquide avancée, nous avons développé des procédés évolutifs pour déposer des matériaux à indice de refraction ultra-élevé et ultra-faible avec de très faibles pertes. Le contrôle précis de l'épaisseur, de la porosité et de la cristallinité par des techniques de dépôt simples (spin-, dip-coating) à conditions ambiantes offre une fabrication à faible coût

répondant aux exigences strictes des prochaines générations de composants photoniques: méta-surfaces, PIC, composants optiques avancés pour l'imagerie, la réalité augmentée et la photonique quantique. Le contraste d'indice inédit entre SiO_2 , hautement poreux et TiO_2 dense ouvre la voie à des performances extrêmes. Bien que la nano-fabrication de dispositifs dépasse le cadre de cet article, il est important de souligner qu'avec le procédé chimie sol-gel permet d'imprimer directement des structures 3D en silice et dioxyde de titane, évitant la complexité des procédés de lithographie, lift-off et gravure conventionnels. ●

RÉFÉRENCES

- [1] A. Jilani *et al.*, *Advance deposition techniques for thin film and coating. Modern technologies for creating the thin-film systems and coatings* 2.3, 137 (2017).
- [2] C. C Sanchez *et al.*, *Comptes Rendus Chimie* 13, 3 (2010)
- [3] M. Modaresialam *et al.*, *Chemistry of Materials* 33, 5464 (2021)
- [4] M. O'Byrne, *et al.*, *Thin Solid Films* 790, 140193 (2024)
- [5] A. C. de Souza, *et al.*, *Scientific reports* 13.1, 21352 (2023)

COUCHES MINCES AUX PERFORMANCES ULTIMES POUR LES DÉTECTEURS D'ONDES GRAVITATIONNELLES ET LES INSTRUMENTS DES TÉLESCOPES

Laurent PINARD*

Laboratoire des Matériaux Avancés – IP2I - CNRS Nucléaire et Particules, Villeurbanne, France

*pinard@lma.in2p3.fr



Les miroirs utilisés par les détecteurs d'ondes gravitationnelles Virgo et LIGO sont synthétisés par une technique de dépôt bien particulière : la pulvérisation par faisceaux d'ions. C'est la seule capable de réaliser des empilements de couches minces exempts de pertes optiques, tout en ayant une uniformité remarquable sur des grands diamètres. Ces propriétés sont également recherchées pour d'autres grands instruments, comme les spectrographes installés sur les grands télescopes terrestres.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513322>

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.

Les grands instruments scientifiques actuels ont besoin d'optiques de grandes dimensions (30-50 cm de diamètre) nécessitant des revêtements de couches minces ayant des performances ultimes dans le visible et proche infrarouge : pertes optiques (absorption, diffusion) et pertes mécaniques (bruit thermique)

très basses, uniformité poussée. C'est le cas de tous les interféromètres gravitationnels terrestres tels que Virgo, LIGO (USA) ou KAGRA (Japon), mais également des spectrographes de dernière génération ou Etalon Fabry-Perot installés sur les télescopes terrestres.

Pour réaliser ces composants, la technique de Pulvérisation par Faisceaux d'ions (ou Ion Beam

Sputtering, IBS) [1] est utilisée car c'est la seule capable réaliser des couches minces ayant les performances optiques ultimes nécessaires. Les matériaux utilisés sont des oxydes (SiO_2 , Ta_2O_5 , $\text{Ti}:\text{Ta}_2\text{O}_5$) pour leurs excellentes propriétés optiques dans le visible et proche infrarouge. Le LMA a développé en 2000 un bâti de dépôt IBS unique au monde par sa taille et ses performances capables de



Figure 1. Bâti de dépôt IBS développé pour Virgo (©Cyril FRESILLON LMA CNRS Photothèque_2016)

traiter deux miroirs Virgo ou LIGO en même temps (Figure 1).

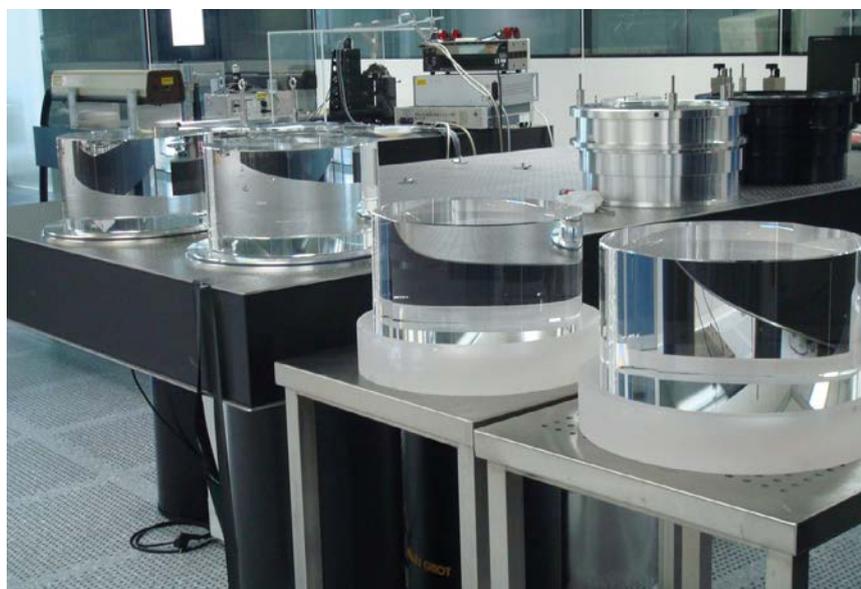
SPÉCIFICATIONS DES SUBSTRATS EN SILICE ET DES EMPILEMENTS DE COUCHES MINCES

Pour répondre aux besoins de ces instruments, la première étape consiste à avoir des substrats en silice fondue ultrapure de très haute qualité (Ø35 cm, 20 cm d'épaisseur - Figure 2). Ainsi, pour le détecteur Virgo, la dernière génération

de Suprasil développée par Heraeus [2] en Allemagne (Suprasil 3002) a été utilisée comme matériau de base pour les miroirs d'entrée des cavités Fabry-Perot. Ce choix est motivé par la grande homogénéité de l'indice de réfraction et l'absorption extrêmement faible à 1064 nm : 0,2 ppm/cm (partie par million).

Des spécifications de polissage très sévères ont aussi été définies afin de garantir après traitement un faible niveau de diffusion ainsi qu'une très ●●●

Figure 2. Substrats Advanced LIGO avant traitement dans la salle blanche du LMA (crédits LMA)



EURO
PM2025
CONGRESS & EXHIBITION

INSCRIVEZ-VOUS
DÈS MAINTENANT

sur www.europm25.com

Exposition

Congrès

Networking

14-17 SEP 2025
Glasgow, Écosse



bonne planéité (Figure 3). En effet, voici ci-dessous les spécifications les plus contraignantes demandées aux entreprises de polissage qui sont peu nombreuses à pouvoir atteindre ces niveaux de performances (AMETEK ZYGO (USA), THALES-SESO (France)) :

- Microrugosité : < 0.1 nm RMS
- Planéité de surface : < 0.5 nm RMS sur Ø15 cm central
- Défauts ponctuels : densité < 1/4 mm² dans Ø15 cm (défauts < 5µm), <15 dans Ø15 cm (défauts [5µm, 50µm])

En ce qui concerne les spécifications des empilements haute réflexion des miroirs des détecteurs d'ondes gravitationnelles, des performances optimales en termes d'absorption, de diffusion et de planéité sont requises :

- Planéité après traitement : < 0,5 nm RMS sur Ø15 cm
- Absorption moyenne à 1064 nm < 0,5 ppm
- Diffusion moyenne à 1064 nm < 10 ppm
- Dépôts Antireflets à 3 bandes (532, 800, 1064 nm) : R<100 ppm à 1064 nm (face arrière du miroir)

De plus, une faible dissipation mécanique des couches minces est nécessaire pour minimiser le bruit thermique.

LES MIROIRS DÉVELOPPÉS POUR LES DÉTECTEURS VIRGO, LIGO ET KAGRA

A. Bruit thermique et absorption

Une source importante de bruit dans les interféromètres a été identifiée comme étant le bruit thermique des empilements de couches minces. De nombreux travaux ont été réalisés [3] pour modifier et optimiser les couches à haut indice de réfraction (Ta2O5) qui sont la principale source de perte mécanique (directement proportionnelle à l'épaisseur totale de Ta2O5). Le meilleur compromis trouvé a été de doper le Ta2O5 avec des atomes de Ti.

Afin de réduire l'épaisseur totale de

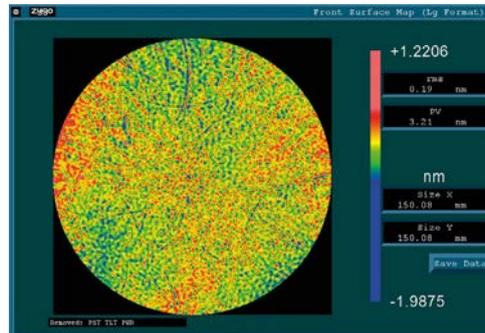


Figure 3. Planéité de la surface (0,19 nm RMS Ø15 cm) d'un substrat Virgo.

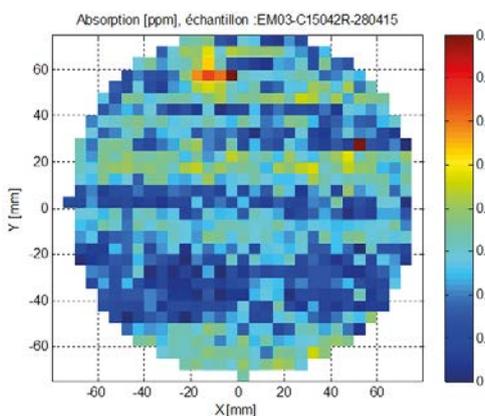
Ti:Ta2O5 tout en conservant les propriétés du miroir, un empilement optimisé du miroir avec des couches non quart d'onde (aH (bL cH)x dL, avec a,c<1 et b>1) a été étudié [4]. Des mesures expérimentales ont montré que les pertes mécaniques du miroir diminuaient [5] par rapport à un empilement quart-d'onde classique et que l'absorption moyenne à 1064 nm était également plus faible (mesure par déflexion photothermique).

La figure 4 montre une carte d'absorption réalisée sur un miroir haute réflectivité de Virgo dont la transmission est de 3 ppm à 1064 nm : valeur moyenne de 0,24 ppm sur Ø15 cm à 1064 nm.

B. Diffusion

Afin d'améliorer le niveau moyen de diffusion après dépôt, une nouvelle machine de nettoyage humide a été

Figure 4. Cartographie d'absorption Ø15 cm à 1064 nm d'un miroir Virgo.



développée, permettant une meilleure efficacité du nettoyage sur les très petites particules (combinaison d'ultrasons, de mégasons).

Pour les 20 miroirs Advanced LIGO traités, voici ci-dessous la diffusion moyenne (Figure 5) sur Ø15 cm à 1064 nm obtenue pour les deux types de dépôt réfléchissant (miroirs d'entrée, miroirs de sortie) :

- Sur 10 ITM (Input Test Mass): 3,7 +/- 1,2 ppm
- Sur 10 ETM (End Test Mass): 4,9 +/- 1,5 ppm

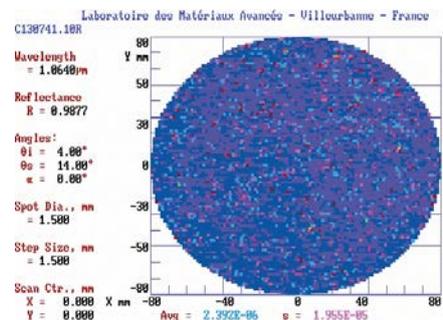


Figure 5. Carte de diffusion moyenne Ø15 cm sur un miroir d'Advanced LIGO mesurée avec un diffusomètre CASI.

C. Planéité du miroir

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles de 2^e génération (à partir de 2015) ont eu besoin de miroirs haute réflectivité ayant une planéité meilleure que 0,5 nm RMS sur le même diamètre central de 15 cm. C'est un énorme challenge, compte tenu des spécifications pour la 1^{ère} génération de composants (3-4 nm RMS).

Le contrôle de l'épaisseur de l'empilement de couches minces est donc un point crucial. Il est nécessaire d'avoir des couches minces avec une très bonne uniformité d'épaisseur afin de garantir des propriétés optiques constantes sur la surface de l'optique. Les deux cavités Fabry-Perot des interféromètres gravitationnels (composées d'un miroir d'entrée et d'un miroir de sortie) doivent avoir les mêmes caractéristiques optiques :



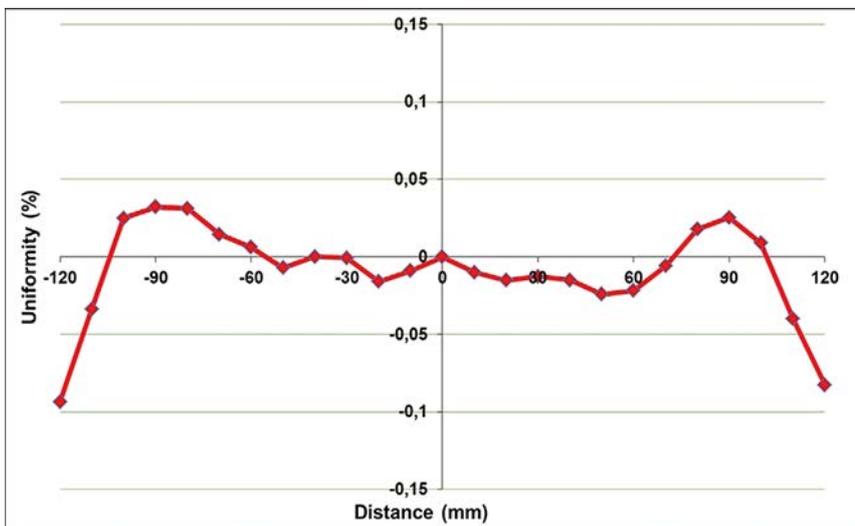
Figure 6. Deux miroirs de Ø35 cm montés sur le porte-échantillon de la machine de dépôt (crédits LMA)

transmission du miroir, finesse, pertes aller-retour. Cela implique de traiter deux substrats de silice de 35 cm (Figure 6) en même temps (miroirs jumeaux).

Pour atteindre le niveau de planéité requis par LIGO et Virgo, il a été nécessaire de développer un nouveau porte-échantillon incluant un mouvement planétaire couplé à des masques dédiés situés entre les cibles et les substrats.

Pour chaque matériau (SiO_2 , $\text{Ti-Ta}_2\text{O}_5$), la forme du masque est calculée à l'aide d'un logiciel de simulation, car les profils des particules pulvérisées sont différents. L'optimisation de la forme du masque a d'abord été réalisée sur des monocouches déposées sur de grandes plaques de silice fondue (Ø35 cm, 6 mm d'épaisseur) avec des mesures spectrophotométriques le long des diamètres. ●●●

Figure 7. Profil d'uniformité moyen sur Ø24 cm d'un empilement miroir haute réflectivité



SOLUTIONS POUR LE TRAITEMENT DE SURFACE

LASER FS 50W SANS EAUX



- ▲ 1030/515/343nm
- ▲ Jusqu'à 50W, 1mJ
- ▲ Monocoup à 50MHz
- ▲ Mode rafale MHz-GHz ou mixte MHz+GHz
- ▲ Impulsion à la demande
- ▲ Extension de la durée d'impulsion jusqu'à 1 ns
- ▲ Refroidissement sec (sans chiller)

LASERS CO2



- ▲ Choix de la longueur d'onde, adaptée à l'absorption des matériaux
- ▲ Large choix de puissance, jusqu'à 250W
- ▲ Contrôle des paramètres du faisceau
- ▲ Stabilité de la puissance
- ▲ Technologie Ceramicore = pas de dégradation du gaz

Recharge gratuite pendant 7 ans !



Des limitations liées au dispositif de métrologie ont été rapidement observées lorsque le niveau d'uniformité est devenu inférieur à 0.2% sur Ø16 cm (impossibilité de bien optimiser la forme du masque, incertitudes).

Il a alors été décidé de mesurer l'uniformité du revêtement directement sur les empilements haute réflectivité (HR) complets. Les profils d'uniformité sont déduits également des mesures spectrales en évaluant le décalage en longueur d'onde de la bande de réflexion induit par les non-uniformités.

La Figure 7 montre le profil d'uniformité moyen obtenu sur Ø24 cm pour un revêtement HR d'un End Mirror (EM) (6µm d'épaisseur totale, 40 couches). L'uniformité atteinte est remarquable : #0.05% sur Ø20 cm ou 3 nm PV.

Grâce à une telle uniformité, les spécifications de planéité de surface des miroirs des détecteurs d'ondes gravitationnelles ont pu être atteintes comme on peut le voir sur la Figure 8 (0,37 nm RMS sur Ø15 cm).

AUTRES APPLICATIONS POUR CES COUCHES MINCES IBS DE HAUTE QUALITÉ

Ces développements qui ont conduit à pouvoir déposer des empilements de couches minces complexes ayant de faibles pertes optiques et une excellente uniformité sur des grands diamètres ont suscité un grand intérêt dans d'autres projets instrumentaux. Cela concerne par exemple les spectrographes ou les cavités Fabry-Perot installés autour des grands

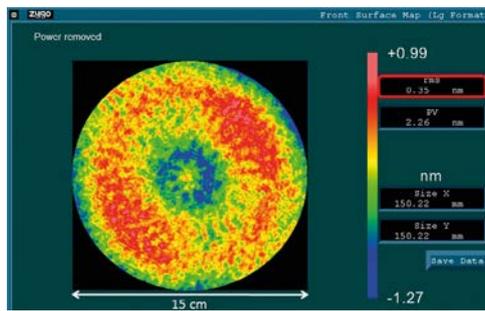


Figure 8. Planéité d'un miroir d'Advanced Virgo sur Ø15 cm (Courbure soustraite).

télescopes terrestres.

Les spectrographes ont besoin de lames dichroïques de 30 ou 40 cm (Figure 9b) de côté pour permettre l'analyse spectrale du flux lumineux du télescope. Il est nécessaire de déposer un empilement d'une centaine de couches pour atteindre les réponses spectrales en transmission et réflexion souhaitées. Mais la principale difficulté de ce genre d'empilement est de garantir une zone de transition étroite et raide entre les deux zones du spectre (comme on peut le voir sur la figure 9a). La bonne uniformité des dépôts IBS garantit que la zone de transition ne bouge pas spectralement entre le bord et le centre du composant, ce qui est fondamental pour que l'instrument fonctionne de façon nominale. Sur la Figure 9a, on voit que tous

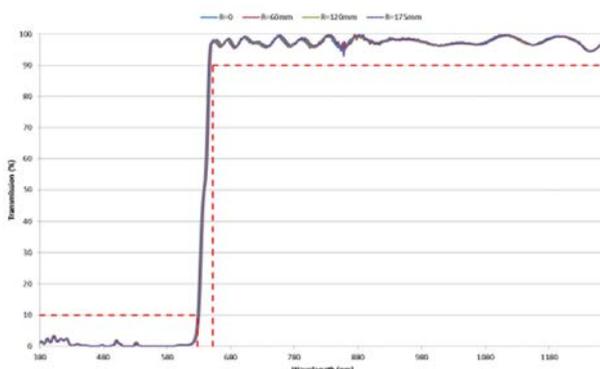
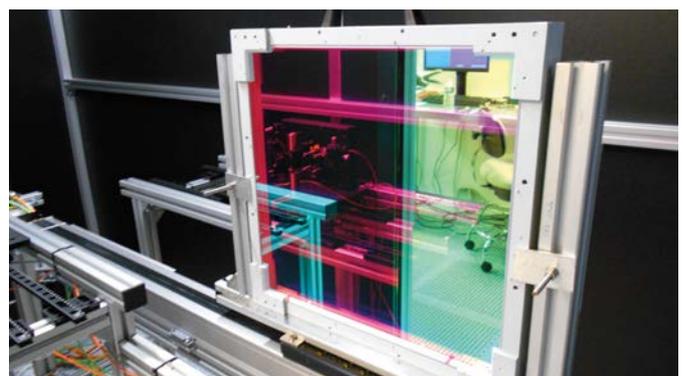


Figure 9. a) Spectres en transmission d'un empilement dichroïque (instrument PFS, <https://pfs.ipmu.jp/>) mesurés au centre et à 60, 120, 175 mm du centre. b) Photo d'un dichroïque de l'instrument HRS du télescope 4Most (ESO, crédits LMA).



les spectres sont confondus entre le centre (rayon 0 mm) et le bord (rayon 175 mm).

Ces couches minces très uniformes ont été aussi utilisées pour réaliser deux grands Etalon Fabry-Perot de 35 cm de diamètre (le plus grand du monde), en collaboration avec ZYGO (USA) et le Kiepenheuer-Institut für Sonnenphysik (Freiburg, Allemagne). Cet étalon est utilisé comme filtre accordable dans le visible pour le télescope solaire DKIST (Hawaï). L'empilement est réflecteur (95%) sur la bande 520-870 nm. La principale exigence concerne la variation RMS de l'espace d'air entre les deux miroirs de l'étalon (Figure 10) qui doit être inférieure à 3 nm RMS sur 250 mm de diamètre.

Pour garantir cela, il faut d'une part que les deux miroirs de l'étalon aient une planéité de surface <1 nm RMS sur Ø25 cm, ce qui a pu être atteint. Mais il a fallu également compenser la courbure générée (10 nm d'amplitude) par les contraintes compressives de couches minces IBS. Pour réaliser cela, une couche de SiO₂ d'épaisseur contrôlée (même matériau que le substrat) a été déposée sur la face arrière. Le stress également compressif de cette couche va lui aussi induire une variation de courbure sur la face avant du miroir et ainsi annuler la déformée liée à l'empilement réflecteur.

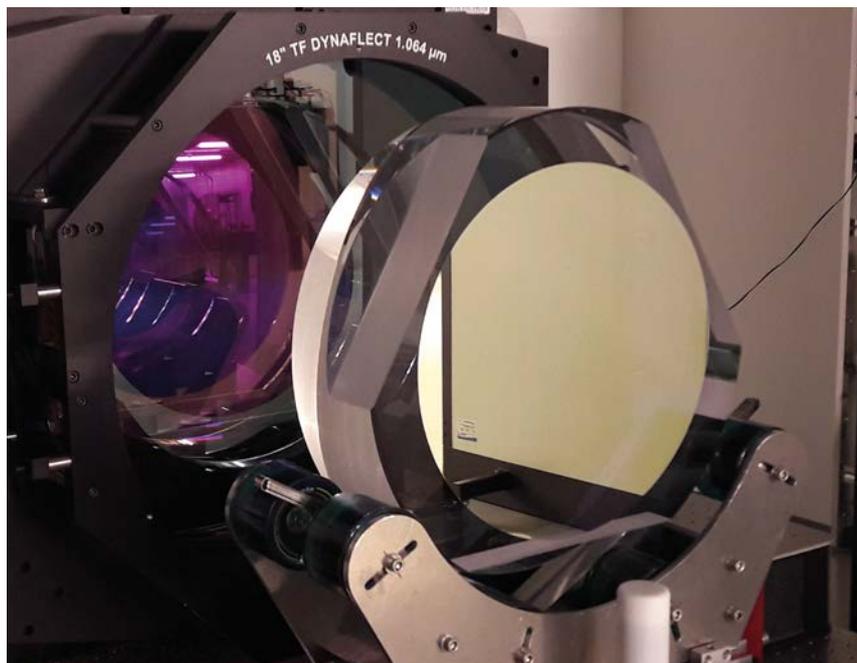


Figure 10. Miroir d'une cavité Fabry-Pérot de l'instrument VTF (crédits LMA)

CONCLUSION

La technologie IBS développée au LMA depuis plus de 20 ans a permis de réaliser des miroirs de grandes dimensions aux performances optiques (absorption, diffusion, uniformité) et mécaniques ultimes pour tous les détecteurs d'ondes gravitationnelles au monde. Cela a permis aux interféromètres LIGO de détecter expérimentalement en 2015 pour la 1ère fois une onde gravitationnelles sur terre.

Mais, les futures upgrades et nouvelles générations de détecteurs (Einstein

Telescope) vont demander de pousser encore plus loin la technologie pour produire des composants plus grands et plus lourds (60 cm de diamètre 100-200 kg). Il va falloir optimiser encore le procédé de dépôt IBS et trouver des matériaux en couches minces plus performants (bruit thermique plus bas). De même, les nouveaux instruments qui seront installés sur l'ELT de l'ESO ont également besoin de composants dichroïques encore plus grand (94 cm de diamètre) ce qui représentera un nouveau défi pour cette technique IBS. ●

RÉFÉRENCES

- [1] B. Cimma, D. Forest, P. Ganau, B. Lagrange, J.M. Mackowski, C. Michel, J.L. Montorio, N. Morgado, R. Pignard, L. Pinard, A.Remillieux, *Appl. Opt.* **45**, 1436 (2006)
- [2] <https://www.heraeus-conamic.com/>
- [3] M. Granata, E. Saracco, N. Morgado, A. Cajgfinger, G. Cagnoli, J. Degallaix, V. Dolique, D. Forest, J. Franc, C. Michel, L. Pinard, R. Flaminio, *Phys. Rev. D* **93**, 012007 (2016)
- [4] L. Pinard, B. Sassolas, R. Flaminio, D. Forest, A. Lacoudre, C. Michel, J.L. Montorio, N. Morgado, *Opt. Lett.* **36**, 1407 (2011)
- [5] A. E. Villar *et al.*, *Phys. Rev. D* **81**, 122001 (2010)

Instrumentation de test optique



Mesure de la plupart des paramètres optiques

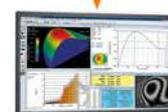
FTM, EFL, BFL, centrage, alignement front d'onde

Applications en R&D et production



Banc de FTM
UV, VIS, IR

Interféromètre "µPhase"



Station de centrage optique

TRIOPTICS France

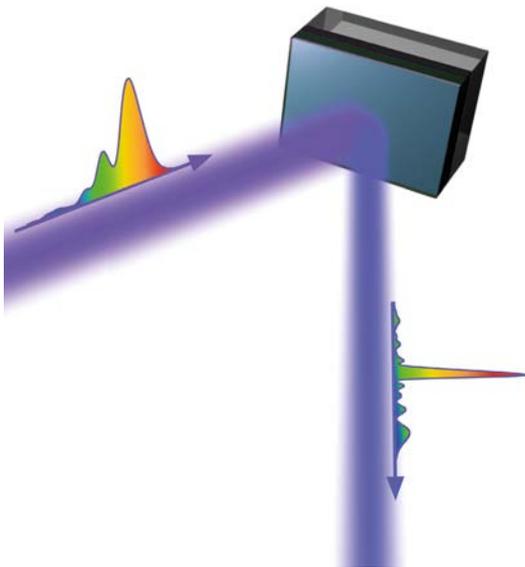
76 rue d'Alsace
69100 Villeurbanne
Tel. +33 (0)4 72 44 02 03
www.trioptics.fr

MIROIRS INTERFERENTIELS MULTICOUCHES POUR LES IMPULSIONS ATTOSECONDES

Franck DELMOTTE*, Sébastien de ROSSI, Charles BOURASSIN-BOUCHET

Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, Palaiseau, France

*franck.delmotte@institutoptique.fr



Les impulsions attosecondes, découvertes il y a une vingtaine d'années et célébrées par les prix Nobel de physique 2023, ont suscité le développement de composants optiques spécifiques. Le spectre de ces impulsions ultrabrèves se situe dans l'extrême ultraviolet (EUV), domaine spectral où les revêtements interférentiels multicouches sont indispensables pour réfléchir efficacement la lumière. En optimisant la structure de ces empilements, il est possible de transporter et même de compresser temporellement ces impulsions ultrabrèves.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513328>

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.

L'étude des phénomènes physiques ultrarapides est entrée dans une nouvelle ère avec l'avènement des impulsions de durée inférieure à 1 femtoseconde ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$) : l'ère de la physique attoseconde ($1\text{as} = 10^{-18}\text{s}$), célébrée par les prix Nobel de physique 2023. Des impulsions attosecondes peuvent aujourd'hui être produites dans le domaine spectral extrême ultraviolet (EUV, de 10nm à 100nm de longueur d'onde) par la génération d'harmoniques d'ordre élevé (HHG), un procédé basé sur l'interaction non linéaire d'un laser

femtoseconde infrarouge de haute puissance avec un gaz (Fig. 1). Malgré leur découverte relativement récente, les sources HHG sont déjà utilisées dans l'industrie des semi-conducteurs pour répondre à des besoins spécifiques dans le développement des optiques, des masques et des résines. Ces sources ont également révolutionné la physique fondamentale en permettant d'observer les mouvements des électrons dans la matière.

Ces recherches et ces applications nécessitent des composants optiques complexes aux spécifications exigeantes. Cependant, la réalisation de composants optiques pour

le domaine spectral EUV est rendue difficile par les propriétés optiques des matériaux à ces longueurs d'onde très courtes. D'une part, l'absorption est non nulle et augmente avec la longueur d'onde. D'autre part, la réfraction est faible et ne permet pas de réfléchir efficacement la lumière à une interface. Les revêtements interférentiels multicouches permettent de surmonter ces défis et constituent le seul moyen de réfléchir efficacement ce rayonnement à des incidences non rasantes. Obtenir des revêtements multicouches efficaces et stables est toutefois une tâche ardue car il faut maîtriser plusieurs

exigences très strictes et souvent contradictoires : un bon contraste optique, un contrôle des couches de l'ordre de la dimension atomique, des interfaces stables avec une interdiffusion minimale, de faibles contraintes mécaniques, et une bonne résistance aux processus de dégradation.

Des optiques à haute efficacité, présentant une bande passante et une phase spectrale contrôlées ainsi qu'une bonne stabilité temporelle sont des composants clés pour manipuler les impulsions ultracourtes générées par des sources cohérentes EUV/X, telles que les sources HHG ou les lasers à électrons libres [1]. Dans cet article, nous décrivons les principes fondamentaux ainsi que les principaux résultats que nous avons obtenus au cours de nos recherches sur le développement de miroirs interférentiels pour les impulsions ultrabrèves au cours de ces 20 dernières années.

PRINCIPE DES MIROIRS INTERFÉRENTIELS MULTICOUCHES POUR L'EXTRÊME ULTRAVIOLET

L'idée d'utiliser des revêtements interférentiels multicouches en incidence normale pour réfléchir efficacement le rayonnement EUV a été proposée en 1972 par Eberhard Spiller (IBM, USA). Du fait de l'absence de matériaux transparents dans ce domaine

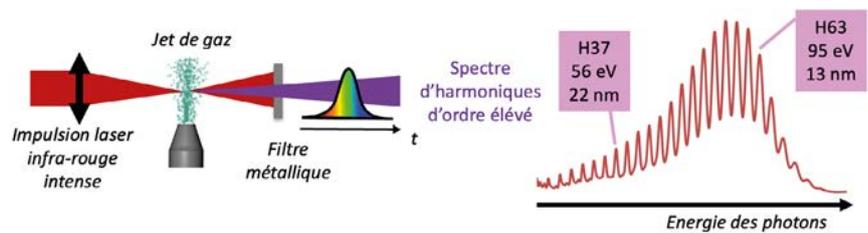


Figure 1. Principe de fonctionnement d'une source HHG et exemple de spectre EUV produit.

spectral, l'efficacité de ces revêtements reste limitée en comparaison au domaine visible/IR pour lequel les empilements multi diélectriques permettent de réfléchir plus de 99% du rayonnement incident. Il faudra attendre 1985 pour la découverte de miroirs multicouches EUV qui réfléchissent plus de 50% en incidence normale : c'est la combinaison molybdène/silicium (Mo/Si) proposée pour la première fois par Troy W. Barbee Jr (LLNL, USA). Ce résultat a ouvert la voie à de nombreuses applications dans le domaine EUV : lithographie EUV, astrophysique, microscopie, etc.

Pour un empilement périodique, seules les longueurs d'onde pour lesquels les ondes réfléchies à chaque période interfèrent constructivement sont réfléchies efficacement par le miroir. La loi de Bragg (modifiée pour tenir compte de la réfraction) permet de relier la période d de l'empilement à la longueur d'onde

λ_{Bragg} du pic de réflectivité (on parle de pic de Bragg) pour un angle d'incidence donné. En incidence normale, on a $d \approx \lambda_{\text{Bragg}}/2$. La largeur du pic de Bragg est déterminée par le nombre d'ondes qui interfèrent, c'est-à-dire par le nombre de périodes dans l'empilement (c'est l'équivalent du facteur de qualité d'un système résonnant). Ainsi, plus le nombre d'interfaces est élevé, plus le pic de Bragg sera étroit. Nous verrons dans la section suivante qu'il est nécessaire de disposer d'une large bande spectrale pour pouvoir manipuler des impulsions attosecondes. Une première approche pourrait consister à utiliser un miroir multicouche périodique et à réduire suffisamment le nombre de périodes pour élargir le pic de Bragg. Cependant cela se fait au détriment de l'efficacité du miroir et le flux de photons réfléchi par le miroir ●●●



**LA FLEXIBILITÉ ET L'EXPERTISE
AU SERVICE DE L'INNOVATION**

LED UV

**LED / MODULES LED
VERSION STANDARD ET CUSTOM
POUR PETITES À GRANDES SÉRIES**





WOB_16A





- De 237 à 405 nm
- Large choix de puissances et d'angles
- Boîtiers CMS ou traversants

Large gamme de Photodiodes UV également disponible

APPLICATIONS

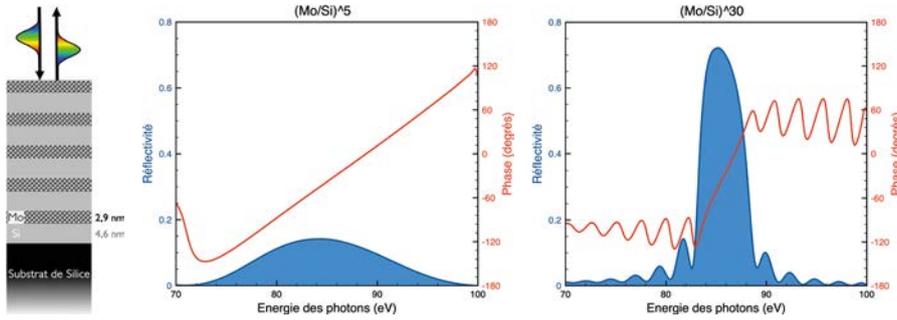
Décontamination - Stérilisation surfaces, fluides et air -
Analyse de gaz - Spectroscopie - Curing - Fluorescence -
Effets spéciaux - Forensic - Détection de contrefaçon...

Suivez nous !






www.htds.fr
info@htds.fr



sera alors très faible (Fig. 2).

En 2005, notre laboratoire a démontré expérimentalement l'intérêt d'ajouter un troisième matériau dans les empilements multicouches EUV [2] : en ajoutant une interface supplémentaire dans chaque période de l'empilement, on peut réfléchir plus efficacement le rayonnement EUV incident avant qu'il ne soit absorbé. En sélectionnant bien les 3 matériaux et l'ordre dans lequel on les dépose (pour bénéficier des interférences constructives) on peut augmenter significativement le pic de réflectivité du miroir ainsi que sa bande passante (la largeur à mi-hauteur du pic de Bragg). Ce double effet « tri-matériaux » est particulièrement intéressant pour manipuler des impulsions attosecondes.

Lorsque l'on manipule des impulsions attosecondes, il est également nécessaire de s'intéresser à la dimension temporelle : la forme temporelle de l'impulsion va-t-elle changer après réflexion sur le miroir multicouche ? Un simple calcul du temps que met la lumière pour se propager au travers d'une période laisse penser que oui : pour un miroir centré à 15 nm de longueur d'onde, il faudra environ 25 as à la lumière pour parcourir une période de l'empilement. Il pourrait alors apparaître des retards de certaines composantes spectrales par rapport à d'autres au cours du processus de réflexion et donc une déformation de la forme temporelle de l'impulsion. Il sera donc indispensable de s'intéresser à la phase spectrale de l'empilement multicouche (en plus de l'intensité réfléchie) si l'on veut manipuler des impulsions ultrabrèves.

Figure 2. Spectres de réflectivité et de phase calculés pour un miroir multicouche Mo/Si composé de 5 périodes (à gauche) et de 30 périodes (à droite).

En première approximation, pour un empilement périodique, la phase spectrale a un comportement linéaire dans le pic de Bragg (Fig. 2). Nous verrons qu'il est cependant possible de contrôler la phase spectrale du miroir multicouche en utilisant des empilements non périodiques.

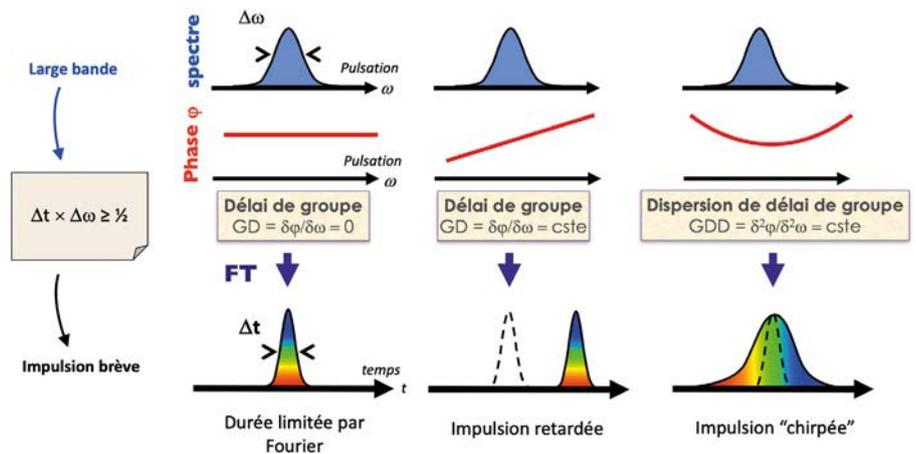
PROBLÉMATIQUE DES IMPULSIONS ULTRABRÈVES

Générer une impulsion ultrabrève requiert deux conditions : (i) que le spectre en fréquence de la source soit suffisamment large et (ii) qu'une relation de phase existe entre toutes les composantes du spectre (Fig. 3). La condition (i) est expliquée dans l'encart ci-contre : plus la bande spectrale est large, plus la durée d'impulsion

pourra être courte. La condition (ii) peut se vérifier en traçant la phase spectrale de l'impulsion : si la phase spectrale est linéaire, alors le délai de groupe (c'est-à-dire la dérivée de la phase spectrale) sera le même pour toutes les pulsations et l'impulsion sera dite « limitée par Fourier ». C'est la plus courte impulsion que l'on puisse obtenir pour la largeur de spectre considérée. Si la phase spectrale est parabolique, alors une dispersion du délai de groupe apparaît et l'impulsion sera étirée temporellement : les différentes composantes spectrales ne sont plus synchronisées. On parle alors d'impulsion « chirpée ».

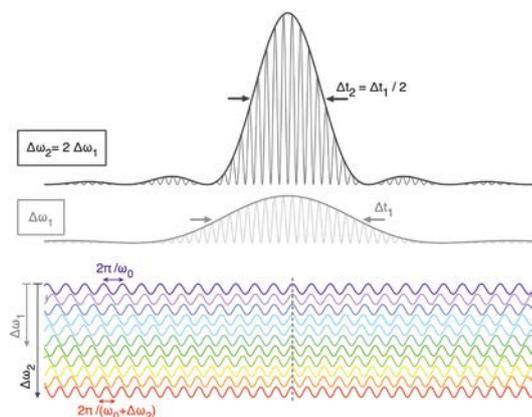
Le processus de génération des sources HHG présentées sur la Figure 1 peut être décrit par un modèle semi-classique en 3 étapes : (i) le champ laser intense crée l'ionisation par effet tunnel d'un atome du gaz et libère ainsi un électron, (ii) le champ laser sinusoïdal accélère l'électron et le ramène sur l'ion, (iii) le processus de recombinaison avec l'ion convertit l'énergie cinétique acquise par l'électron en un photon de haute énergie, dans le domaine extrême ultra-violet. Le calcul de la trajectoire des électrons dans ce modèle permet de montrer que les photons d'énergies différentes ne sont pas émis simultanément. L'impulsion générée par une source HHG sera donc une ●●●

Figure 3. Représentation d'une impulsion ultrabrève dans le domaine spectral et dans le domaine temporel



Une impulsion lumineuse peut être décrite comme une superposition d'ondes planes monochromatiques. Le champ électromagnétique associé à cette impulsion peut donc être calculé en additionnant les champs électriques sinusoïdaux correspondant à chaque fréquence (ou longueur d'onde) présente dans le spectre de l'impulsion. Sur la figure ci-contre, on considère 2 impulsions composées d'ondes planes monochromatiques d'amplitudes identiques et de pulsations comprises entre ω_0 et $\omega_0 + \Delta\omega$. Le champ électrique associé à l'impulsion est alors la somme des sinusoïdes représentées en bas de la figure. On peut définir la durée de l'impulsion comme la largeur à mi-hauteur de l'enveloppe du carré de ce champ électrique (représenté en haut de la figure). On note alors qu'une impulsion avec une largeur de spectre $\Delta\omega_1$ est deux fois plus longue qu'une impulsion de largeur de spectre double ($\Delta\omega_2 = 2 \Delta\omega_1$). Autrement dit, plus le spectre de l'impulsion est large et plus l'impulsion sera brève. Toutefois cette condition ne suffit pas à créer une impulsion lumineuse. Il faut également que toutes les composantes du spectre respectent une relation de phase à un instant donné. Le trait pointillé sur la figure indique l'instant où toutes les composantes ont une phase identique. Lorsque l'on s'éloigne de cet instant, les différentes sinusoïdes ne sont plus en phase et interfèrent destructivement.

Finalement, dans les conditions de cette illustration, l'impulsion lumineuse s'étend temporellement sur plusieurs périodes ($T = 2\pi / \omega_0$) des sinusoïdes qui la composent. Dans le domaine visible ou infra-rouge, la période T des ondes électromagnétiques est toujours supérieure à 1 femtoseconde ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$). Il est donc impossible de générer une impulsion attoseconde ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) avec de la lumière visible. La seule solution pour générer des impulsions aussi brèves est d'utiliser le rayonnement extrême ultraviolet ou les rayons X qui ont des périodes T bien plus courtes.



NOUVEAU

DÉFINIR LA NORME D'EXCELLENCE DE PRÉCISION



BeamSquared® SP204S-PRO

Analysez la propagation de vos faisceaux laser en toute autonomie et avec une précision exceptionnelle – de l'UV au NIR. Bénéficiez d'une analyse de l'astigmatisme à la pointe de la précision industrielle.

- Précision extrême de la localisation de la taille du faisceau, idéale pour les faisceaux UV
- Précision de 3 % de l'astigmatisme laser
- Cohérence exceptionnelle entre les appareils, moins de 5 %
- Supporte les lasers à longue portée Rayleigh jusqu'à 40 mètres
- Couvre le spectre 266-1100nm (CW ou pulsés)
- Caméra haute sensibilité et haute résolution
- Mesures conformes à la norme ISO en moins d'une minute

Appelez-nous **+33 6 01 01 27 32**
ou visitez notre site web:
www.ophiropt.com/photonics



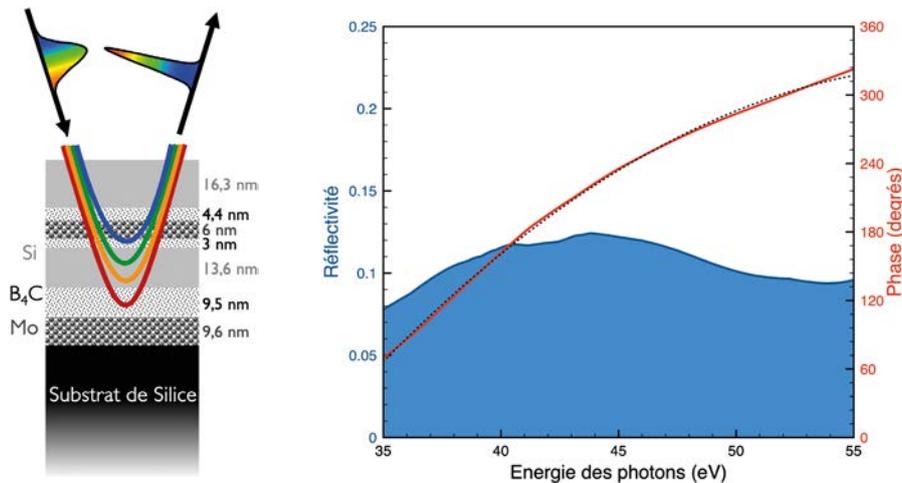


Figure 4. Principe de la compression d'impulsions attosecondes par un miroir multicouche.

impulsion chirpée. La dispersion du délai de groupe qui apparaît est intrinsèque au processus de génération et est appelée « attochirp ».

La problématique des miroirs pour manipuler des impulsions attosecondes est donc double : il faut être capable d'une part d'atteindre une réflectivité élevée sur une large bande spectrale (la Figure 2 montre que ces 2 grandeurs ne peuvent pas facilement être optimisées simultanément) et d'autre part de contrôler la phase spectrale du miroir interférentiel sur cette bande spectrale. Un revêtement large bande à phase linéaire pourra réfléchir une impulsion sans la déformer temporellement. Un revêtement large bande à phase parabolique pourra être utilisé pour comprimer l'impulsion si la dispersion du délai de groupe du miroir compense l'attochirp.

DÉVELOPPEMENT DE MIROIRS INTERFÉRENTIELS MULTICOUCHE POUR LES IMPULSIONS ATTOSECONDES

En 2005, les premières mesures de la phase spectrale de l'impulsion avant et après réflexion sur un miroir multicouche large bande synthétisé dans notre laboratoire ont été réalisées au Centre Laser de Lund en collaboration avec Anne L'Huillier, prix Nobel de Physique 2023. Cette expérience a permis de démontrer

expérimentalement pour la première fois que ce type de miroir interférentiel ne rallonge pas la durée de l'impulsion initiale [3]. Le miroir utilisé dans cette expérience était constitué d'un empilement de 2 multicouches périodiques à 3 matériaux (B₄C/Mo/Si) déposé par pulvérisation cathodique magnétron.

Suite à ces premiers résultats, nous avons conçu et réalisé des empilements aperiodiques afin de contrôler la phase spectrale du miroir (Fig. 4). En optimisant les épaisseurs individuelles des couches de l'empilement de manière à ce que la phase spectrale soit parabolique et compense l'attochirp de la source HHG, il est possible de réduire d'un facteur 2 la durée de l'impulsion attoseconde initiale. Ce type d'empilement a permis la première démonstration expérimentale d'une compression de la durée des

impulsions attosecondes sur une source attoseconde du CEA Saclay [4].

Ce savoir-faire nous a permis de développer et de fabriquer des revêtements multicouches spécifiques pour la station ATTOLAB, plateforme expérimentale (opérée par le LIDYL) ouverte aux utilisateurs et dédiée aux études de dynamique électronique ultrarapide. Ces optiques sont aujourd'hui installées sur la station ATTOLAB et ont permis des premières expériences de type pompe-sonde pour l'étude des phénomènes de décohérence dans les processus de physique attoseconde [5].

CONCLUSION

Au cours de ces 20 dernières années, nous avons conçu et développé des miroirs interférentiels multicouches permettant de manipuler les impulsions ultracourtes générées par des sources cohérentes EUV, telles que la génération d'harmoniques d'ordre élevé. Ces revêtements sont constitués d'un empilement aperiodique de couches minces optimisé pour maximiser l'efficacité sur une bande passante définie et pour produire une phase spectrale spécifique. Nous avons démontré qu'il est possible de compresser d'un facteur 2 des impulsions attosecondes EUV en utilisant ce type de miroirs multicouches.

Aujourd'hui, les recherches dans ce domaine se poursuivent pour étendre cette approche à des énergies de photons plus élevées, dans le domaine des rayons X mous et en particulier dans la fenêtre de l'eau. ●

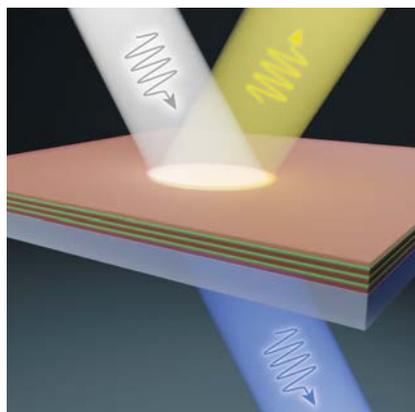
RÉFÉRENCES

- [1] *Multilayer mirrors for coherent XUV sources*, C. Bourassin-Bouchet, S. de Rossi, and F. Delmotte in Springer book vol. 197 (2015) *Optical technologies for extreme-ultraviolet and soft X-ray coherent sources*, Luca Poletto and Federico Canova (eds.)
- [2] J. Gautier *et al.*, *Appl. Opt.* **44**, 384 (2005)
- [3] A.-S. Morlens *et al.*, *Opt. Lett.* **31**, 1558 (2006)
- [4] C. Bourassin-Bouchet *et al.*, *Opt. Express* **19**, 3809 (2011)
- [5] D. Bresteau *et al.*, *Eur. Phys. J.:Spec. Top.* **232**, 2011 (2023)

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



NEW

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

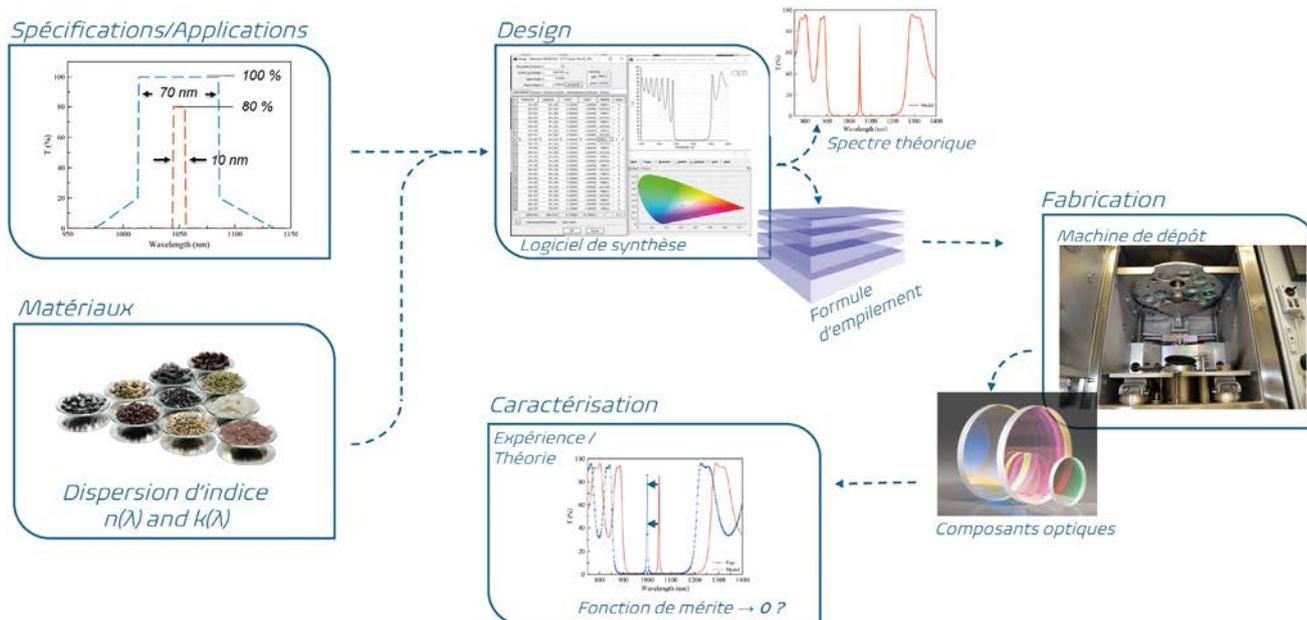


Figure 1. De la spécification à la réalisation.

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

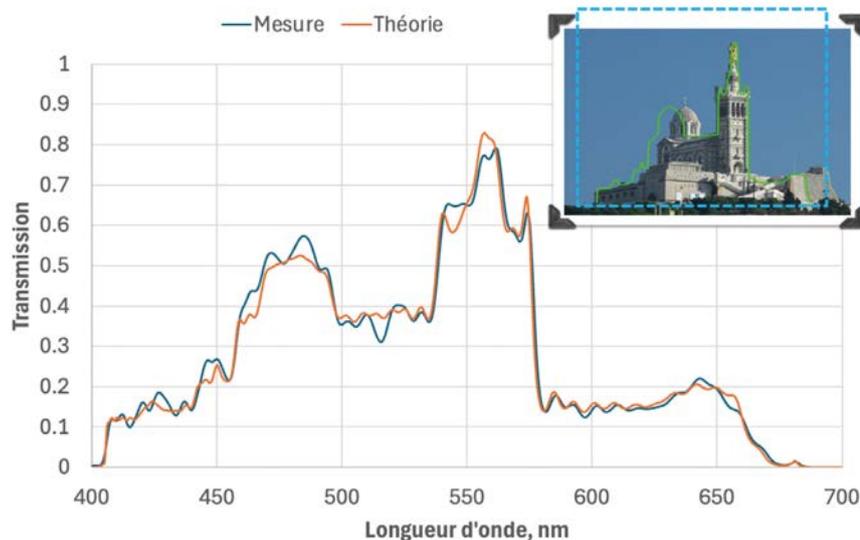
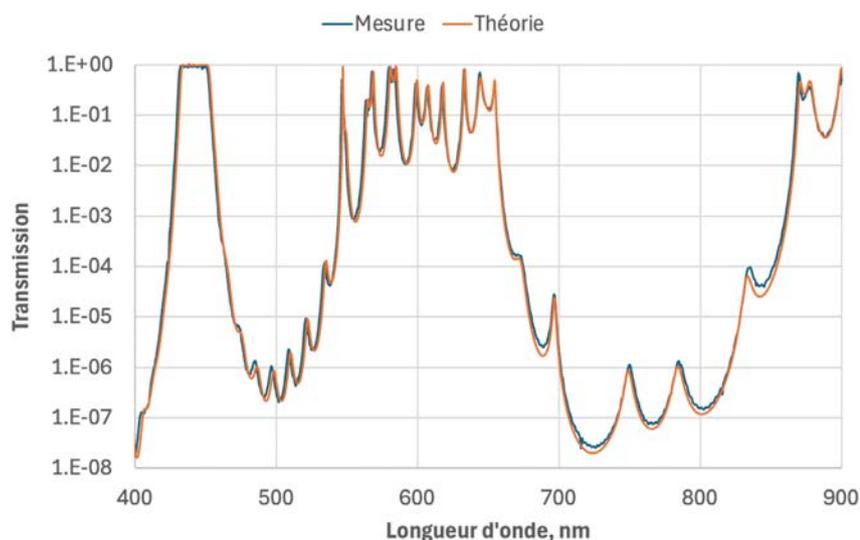
La synthèse de filtres optiques, c'est-à-dire la conception de l'empilement optimal des couches minces, est une étape critique. C'est la structure précise de cet empilement (le nombre de couches, l'épaisseur et le matériau de chaque couche) qui détermine les performances finales du filtre. Bien que des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

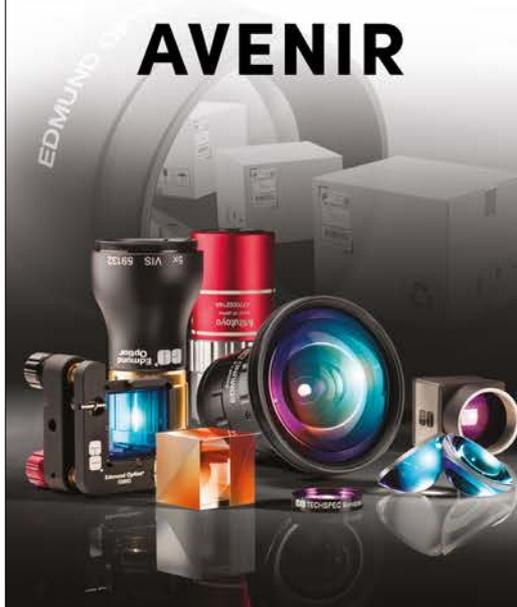
« quart d'onde » (dont l'épaisseur optique est égale à un quart de la longueur d'onde de référence) est fréquemment utilisée. Pour des fonctions plus complexes, l'utilisation de logiciels de conception est indispensable. Ces logiciels utilisent des algorithmes de génération d'empilement (comme la méthode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

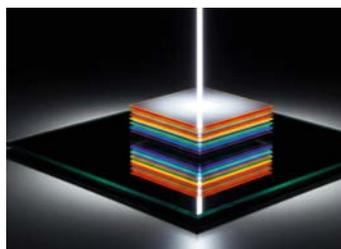
Le contrôle précis de l'épaisseur de chaque couche est fondamental pour obtenir les performances spectrales souhaitées. La microbalance à quartz et le contrôle par temps de dépôt sont des méthodes courantes, mais elles ne permettent pas de mesurer directement les performances optiques du filtre en cours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

edpsciences

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

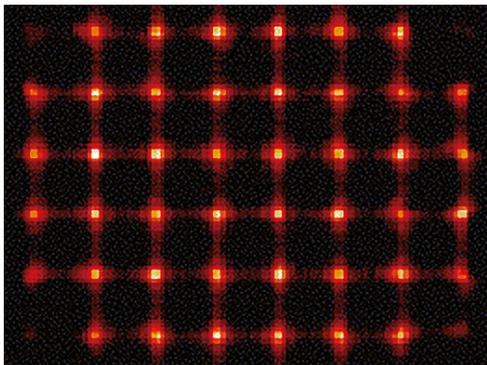


COMPRENDRE LA MESURE DE SURFACE D'ONDE PAR SHACK-HARTMANN

Vincent MICHAU*, Thierry FUSCO

DOTA, ONERA, Université Paris-Saclay, 91120, Palaiseau, France

*vincent.michau@onera.fr



Le Shack-Hartmann est un analyseur largement utilisé en optique adaptative et en métrologie. La mesure repose sur un réseau de microlentilles qui échantillonne la surface d'onde. Les images obtenues permettent d'accéder aux pentes locales, puis, après reconstruction, à la surface d'onde elle-même. Après avoir rappelé son principe, le traitement des données et la reconstruction de la surface d'onde sont abordés en soulignant les avantages et les limites de ce dispositif.

<https://doi.org/10.1051/photon/2025313338>

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.

Le test Hartmann a été inventé pour caractériser les grandes optiques au début du vingtième siècle. Dans ce dispositif, un masque percé de trous est associé à une plaque photographique placée à distance pour mesurer les directions des rayons matérialisés par les trous et remonter aux aberrations du système optique. En 1971, Shack a proposé de remplacer le masque par une matrice compacte de microlentilles, corrigeant ainsi les deux défauts majeurs du test de Hartmann, sa faible efficacité lumineuse et le mauvais

échantillonnage spatial de la surface d'onde [1].

Le principe de l'analyseur de Shack-Hartmann est présenté sur la Figure 1. Une onde optique incidente sur un réseau de microlentilles forme des tâches lumineuses enregistrées sur un détecteur matriciel (un CCD sur la figure). La mesure du déplacement des tâches donne accès aux gradients de la surface d'onde à l'échelle de la sous-pupille définie par la microlentille. Le motif de la matrice de microlentilles est généralement un réseau régulier de carrés ou d'hexagones. Le domaine de linéarité de la mesure est ajustable avec la distance focale.

Le Shack-Hartmann fait partie d'une famille d'analyseurs dont le fonctionnement peut être décrit en s'appuyant sur l'approximation de l'optique géométrique. Il donne accès aux aberrations exprimées en chemin optique avec une source temporellement incohérente. Si la source est résolue, la surface d'onde obtenue à partir des déplacements des tâches est une moyenne sur les directions définies par l'objet, pondérée par le flux issu de chaque élément de résolution. Dans le cas d'une scène infiniment étendue, la mesure des aberrations d'un système optique est encore possible avec l'ajout d'un diaphragme de

champ en amont de la matrice de microlentilles, elle-même placée dans la pupille (cf. Figure 2). Enfin, en provoquant le même déplacement dans toutes les sous-pupilles, une vibration n'a pas d'impact direct sur la mesure des aberrations de plus haut ordres.

Compact, adapté aux faibles flux comme aux grandes dynamiques, achromatique, faiblement affecté par des vibrations et fonctionnant sur tout type d'objet, le Shack-Hartmann est un analyseur particulièrement polyvalent, l'échantillonnage et la dynamique de mesure étant indépendamment ajustables avec le pas du réseau de microlentilles et la distance focale. Il est aujourd'hui employé dans de nombreux domaines.

MODÈLE DE MESURE

Deux approches coexistent pour décrire les images au plan focal des microlentilles en fonction de l'onde incidente. La plus courante traite la formation de chaque image de manière indépendante de ses voisines. Dans ce cas, le traitement des données se fait en deux étapes : l'évaluation du déplacement de chacune des images, c'est-à-dire les gradients de la surface d'onde, puis la reconstruction de la surface d'onde à partir des gradients estimés. Il est également possible de traiter la matrice de microlentilles comme un

réseau. Cette approche alternative permet de prendre en compte les interactions entre images et s'applique prioritairement aux réseaux de microlentilles peu ouvertes présentant une faible dynamique par sous-pupille. Un traitement global de l'ensemble des images permet alors de remonter directement à la phase de l'onde. Dans la suite, nous nous restreindrons à la première approche, la plus étudiée et la plus utilisée aujourd'hui.

ESTIMATION DES GRADIENTS DE LA SURFACE D'ONDE

La position de l'image au foyer de chaque microlentille est classiquement estimée par centre de gravité. Examinons le lien entre le déplacement du centre de gravité et le gradient local de la surface d'onde. On note le support de la sous-pupille définie par la microlentille, $S(u, v)$ la surface d'onde exprimée en chemin optique et $I(u, v)$ la répartition d'intensité dans P . Le déplacement du centre de gravité exact de l'image, δG s'exprime en fonction du gradient de S sous la forme :

$$\delta G = f \times \frac{\int_p I(u, v) \text{grad} S(u, v) du dv}{\int_p I(u, v) du dv} \quad (1)$$

avec f , la distance focale de la microlentille. Pour manipuler des grandeurs indépendantes de la taille de la pupille, le gradient moyen mesuré est ●●●

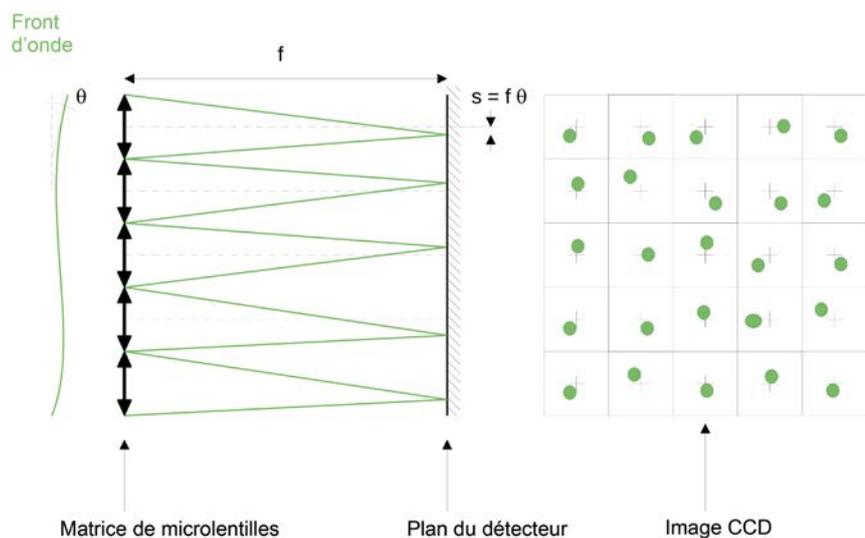


Figure 1. Principe de l'analyseur de Shack-Hartmann.



Unique Shack Hartmann and Phase retrieval wavefront sensors

High accuracy $\lambda/100$ RMS

High resolution 680x500

Achromatic from DUV to SWIR



www.imagine-optic.com

sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60



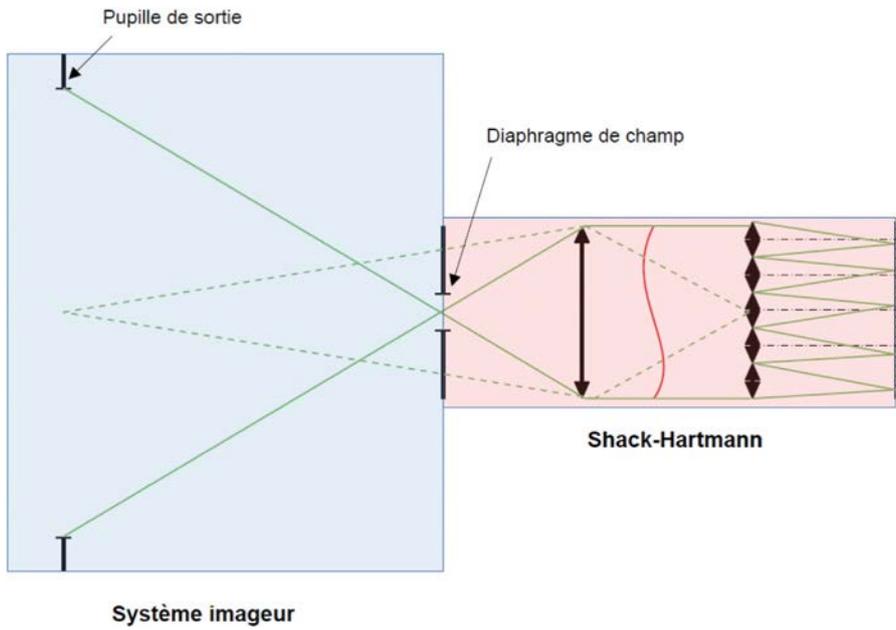


Figure 2. Exemple de mise en œuvre de l’analyseur de Shack-Hartmann pour la mesure des aberrations d’un système d’imagerie de scènes d’étendue supérieure au champ de vue d’une sous-pupille (surface du Soleil, de la Terre ...).

souvent exprimé en chemin optique au bord de la sous-pupille, soit :

$$\underline{m} = \frac{d}{f} \times \delta \underline{G}, \quad (2)$$

où d représente la dimension d’un côté d’une sous-pupille. En l’absence de fluctuations spatiales d’intensité dans le plan des microlentilles, le déplacement du centre de gravité de l’image donne ainsi accès au gradient de la surface d’onde moyenné sur la sous-pupille. Lorsque celles-ci sont significatives, deux démarches ont été développées. Si les variations spatiales d’intensité sont lentes devant le pas des microlentilles, une interpolation linéaire permet leur prise en compte dans l’estimation de position. Lorsqu’elles sont rapides, une expression de l’erreur commise en moyenne a été établie en s’appuyant sur la connaissance de la densité spectrale de puissance de ces fluctuations.

En pratique, l’image au foyer de la microlentille est enregistrée par un détecteur matriciel, de type CCD ou CMOS. L’évaluation de cette position est affectée par l’échantillonnage de l’image et le bruit de détection par pixel.

Le bruit de détection s’écrit comme la somme de deux contributions : la fluctuation intrinsèque du nombre de photons détectés appelée bruit de photons, et le bruit électronique du détecteur. En supposant les gradients moyens estimés par centre de gravité, la variance de l’erreur induite par le bruit de photons sur l’estimation de $\underline{m} = (m_u, m_v)$, s’exprime [2] :

$$\sigma_{m_{w,ph}}^2 = \frac{\lambda^2}{8 \ln(2)} \frac{1}{n_{ph}} \left(\frac{N_T}{N_D} \right)^2, \quad (3)$$

avec λ , la longueur d’onde, n_{ph} le nombre de photons détectés par sous-pupille et par pose, N_T la largeur de la tâche, et N_D la largeur de la tâche de diffraction.

Le bruit électronique étant uniforme, il est important de minimiser le nombre de pixels utilisés pour le calcul du centre de gravité afin de limiter sa contribution. En notant ce nombre N_S , et σ_a^2 la variance du bruit électronique par pixel et par lecture, il vient :

$$\sigma_{m_{w,e}}^2 = \frac{\lambda^2}{12} \frac{N_S^2 \sigma_a^2 (N_S)^2}{n_{ph}^2 (N_D)}, \quad (4)$$

En astronomie stellaire, différentes méthodes d’estimation de pentes

locales ont été proposées afin de réduire encore l’effet du bruit de détection sur l’estimation des gradients [3].

L’échantillonnage par le capteur matriciel affecte également l’estimation de la position de l’image. Un pas équivalent à 2 pixels par largeur de la tâche à mi-hauteur est couramment retenu pour rendre cette erreur raisonnable. Avec des signaux faibles, comme par exemple en astronomie, il est possible de réduire ce pas à l’extrême (2 par 2 pixels par sous-pupilles) pour minimiser l’impact du bruit électronique. A l’inverse, en fort flux, comme par exemple en métrologie, il peut être intéressant de l’augmenter pour réduire l’impact de l’échantillonnage sur l’erreur de calcul du centre de gravité et atteindre des précisions très élevées. Il est à noter que ce sur-échantillonnage peut avoir comme conséquence une réduction de la dynamique si on raisonne à nombre de pixels total constant sur le capteur matriciel.

Dans le cas d’une scène infiniment étendue comme le Soleil, le centre de gravité ne peut pas être utilisé : le déplacement de la scène au foyer de chacune des microlentilles est alors estimé par corrélation [4].

En résumé, supposant un réseau carré de microlentilles jointives de pas d , et les effets des variations d’intensité compensées ou négligeables, la mesure d’un Shack-Hartmann s’écrit sous la forme du couple :

$$m_u = \left[\frac{\partial S}{\partial u}(u,v) \otimes \Pi \left(\frac{u}{d}, \frac{v}{d} \right) \right] \times \text{III} \left(\frac{u}{d}, \frac{v}{d} \right) + n_u \text{ et}$$

$$m_v = \left[\frac{\partial S}{\partial v}(u,v) \otimes \Pi \left(\frac{u}{d}, \frac{v}{d} \right) \right] \times \text{III} \left(\frac{u}{d}, \frac{v}{d} \right) + n_v \quad (5)$$

où Π désigne le support d’une sous-pupille et III les fonctions de Dirac placées aux nœuds du réseau de microlentilles. Dans l’espace de Fourier, l’échantillonnage par la matrice de microlentilles fait apparaître des harmoniques. Le moyennage du gradient de S par sous-pupille n’est pas suffisant pour

éviter le repliement de spectre. Lorsque le spectre de la surface d'onde ne respecte pas le critère de Nyquist, les effets du sous-échantillonnage et du repliement de spectre sont à considérer dans l'erreur de mesure. Trois approches ont été mises en œuvre pour les atténuer. Dans la première, l'utilisation de microlentilles légèrement astigmatiques ouvre la voie à la mesure de quelques modes par sous-pupilles, en plus des simples basculements. La deuxième applicable dans le cas où l'amplitude de la surface d'onde est faible, consiste à placer un diaphragme de champ en amont de l'analyseur pour filtrer les hautes fréquences. Enfin, il est possible de les prendre en compte lors du processus de reconstruction, comme nous allons le voir par la suite.

RECONSTRUCTION DE LA SURFACE D'ONDE

L'estimation de la surface d'onde à partir des gradients mesurés est la seconde étape du traitement des données du Shack-Hartmann. La bonne connaissance de cette étape, comme celle de l'estimation des gradients, est indispensable pour maîtriser l'information délivrée par le Shack-Hartmann. Le vecteur des gradients mesurés, m , s'exprime en fonction de la surface d'onde S par :

$$m = AS + n, \tag{6}$$

où n est un vecteur décrivant le bruit de mesure supposé gaussien, homogène, de variance σ_n^2 et indépendant entre sous-pupilles. Reconstruire la surface d'onde consiste en pratique à inverser la relation (6) après avoir choisi une famille de modes pour décrire S .

$$\hat{S} = Rm, \tag{7}$$

Une solution classique à ce problème est l'estimation aux moindres carrés. La minimisation de $\epsilon_{LS}^2 = |m - A\hat{S}|^2$ conduit au reconstructeur $R_{LS} = (A^t A)^{-1} A^t$. La qualité de l'inversion aux moindres carrés repose sur des modes choisis pour décrire S , et sur le filtrage adopté pour inverser $A^t A$. La reconstruction est dite modale lorsque la famille de modes retenue est à support étendu sur la pupille. L'utilisation des polynômes de Zernike est souvent imposée en métrologie optique. Des modes à support local peuvent être également utilisés, par exemple dans le cas d'un support de mesure irrégulier ou évolutif. On parle alors de reconstruction zonale. Enfin, en optique adaptative, les modes de reconstruction sont en général les fonctions d'influence du miroir déformable. Pour garantir la stabilité de l'inversion, le nombre de modes est nécessairement plus petit que le nombre de mesures. En pratique, il est de l'ordre du nombre de sous-pupilles bien que 2 gradients soient mesurés dans chacune d'elle.

En mettant de côté les effets temporels, l'erreur sur la surface d'onde reconstruite peut se décomposer en trois termes : la composante de la surface d'onde non décrite par les modes utilisés pour l'inversion (erreur dite ●●●

Pôle d'Expertise Photonique :
Précision, Performance, Innovation

PHOTONICS & SENSING

Plongez dans notre nouveau catalogue,
explorez les innovations Photonics & Sensing
et remontez avec une perle de technologie !



Caractérisation

- Spectrale
- Temporelle
- Composant
- Impulsionnelle
- Polarisation

Optique-Électrique

- Convertisseur
- Testeur de taux d'erreur
- Générateur d'impulsions
- Générateur de forme d'onde

Émission

- Lasers à fibre
- Lasers accordables (TLS)
- Lasers continus (CW)
- Lasers pulsés
- Sources larges bandes
- Sources portables

Composants personnalisés

- Composants fibrés
- Amplificateurs
- Lasers

Mesure

- Spectrale
- Puissance
- Perte

F.O.S.

- OFDR
- DAS
- DTS
- OTDR
- FBGI

Modulation

- Amplificateur
- Atténuateur
- Égaliseur
- Polarisation
- Convertisseur
- Commutateur

Outils & Accessoires

- Soudure
- Nettoyage
- Inspection

Nanophotonique

- Alignement
- Test
- Caractérisation

Plateformes modulaires

- Communications cohérentes
- Plateforme à modules rackables
- Plateforme de tests électriques (SMU)

Téléchargez le catalogue



Nos Partenaires



de sous-modélisation), l'impact de cette composante sur les gradients moyens vus par le Shack-Hartmann puis sur la surface d'onde reconstruite (erreur dite de repliement) et la propagation des erreurs d'estimation des gradients sur la surface d'onde reconstruite. L'amplitude des deux premières erreurs peut s'évaluer en s'appuyant sur une connaissance statistique de la surface d'onde, quand elle est disponible. La variance de l'erreur sur la surface d'onde due à la propagation du bruit de mesure s'exprime simplement en fonction de σ_m^2 , en supposant ce bruit homogène, et indépendant d'une sous-pupille à l'autre. Elle vaut : $Trace(R_{LS}R_{LS}^t) \times \sigma_m^2$. Le coefficient de propagation de bruit, $Trace(R_{LS}R_{LS}^t)$, augmente suivant $\ln(N)$ avec N le nombre de modes reconstruits. Il est de l'ordre de 1 pour quelques centaines de modes. Ce coefficient faible au regard d'une opération qui s'apparente à une intégration s'explique par la redondance des mesures de gradients.

Lorsque l'on dispose de bonnes connaissances statistiques sur la surface d'onde, une méthode bayésienne peut être mise en œuvre pour la reconstruction [5]. Le reconstruteur linéaire Minimum Mean Square Error, ou LMMSE, s'appuie sur un critère quadratique dans l'espace des surfaces d'onde, $\epsilon_{MMSE}^2 = |S - \hat{S}|^2$. Le reconstruteur MMSE s'écrit : $R_{MMSE} = C_s A^t (A C_s A^t + C_n)^{-1}$, où C_s est la matrice de covariance des mesures et C_n la matrice de covariance du bruit. Cette approche qui élimine les problèmes d'inversion rencontrés dans le cadre des moindres carrés s'appuie sur une famille de modes permettant de décrire statistiquement l'ensemble de la surface d'onde incidente.

CONCLUSION, APPLICATIONS

Le Shack-Hartmann est un analyseur qui mesure les gradients locaux de la surface d'onde. Très polyvalent, il a trouvé de nombreuses applications

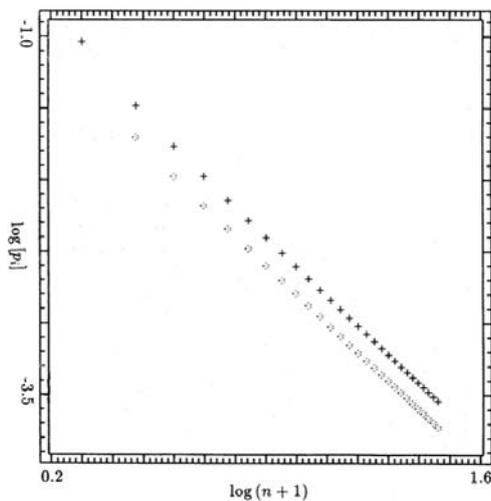


Figure 3. Coefficients diagonaux de la matrice $R_{LS}R_{LS}^t$, notés p_i , dans le cas où la surface d'onde est reconstruite sur les polynômes de Zernike. i : numéro du polynôme, n : degré radial du polynôme, $+$: fréquences azimutales n et $n+1$, \diamond : autres fréquences azimutales (tiré de : F. Rigaut et E. Gendron, *Astron. Astrophys.* 261, 677684 (1992)).

en astronomie, en métrologie optique, en imagerie biomédicale et dans d'autres domaines.

En optique adaptative, le Shack-Hartmann est largement utilisé pour sa dynamique, sa compacité, sa sensibilité et sa capacité à fonctionner avec des sources variées. Ainsi on le retrouve dans la plupart des systèmes de correction des effets de la turbulence en astronomie comme en télécommunications optiques en espace libre². Il cède toutefois la place à d'autres types d'analyseurs (comme

la famille des analyseurs à filtrage de Fourier dont la pyramide est le membre le plus connu) lorsque la recherche de la sensibilité ultime est indispensable. Le Shack-Hartmann est également utilisé en optique adaptative pour l'imagerie de la rétine et pour l'imagerie biomédicale (microscopie). En ophtalmologie toujours, le Shack-Hartmann est mis en œuvre pour la mesure des aberrations oculaires pour la correction de la vision [6].

Apprécié pour sa compacité et sa précision, le Shack-Hartmann fait partie des méthodes de contrôle mise en œuvre en métrologie optique pour les surfaces et éléments optiques. Néanmoins sa dynamique élevée au pas d'échantillonnage fixé par les microlentilles est obtenue au prix d'un nombre important de pixels par sous-pupille. L'interférométrie, les analyseurs à courbure ou à décalage peuvent lui être préférés lorsqu'un nombre très élevé de points de mesure est recherché.

Pour les mêmes qualités de compacité, de dynamique et de précision, le Shack-Hartmann est également mis en œuvre pour le contrôle et l'alignement de systèmes optiques comme les télescopes, les chaînes laser ou la microlithographie. Il faut noter qu'en l'absence de continuité du support de mesure, comme dans le cas des optiques segmentées, une mesure de phase par interférométrie est préférable. ●

RÉFÉRENCES

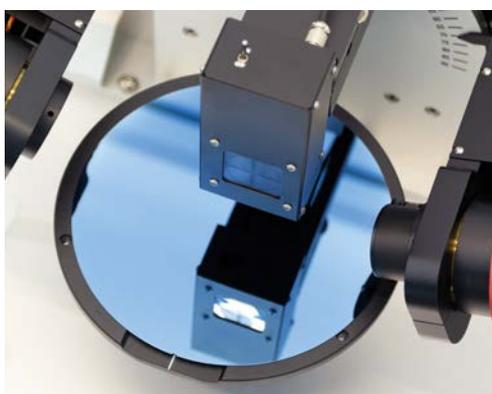
[1] R. Shack, "Production and Use of a Lenticular Hartmann Screen," *Spring Meeting of Optical Society of America* **656** (1971)
 [2] G. Rousset, *Adaptive Optics in Astronomy*, vol. 1, Cambridge University Press, 91
 [3] S. Thomas *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **371**, 323 (2006).
 [4] V. Michau *et al.*, "Wavefront Sensing from Extended Sources", *NSO/SP Summer Workshop, Sunspot New Mexico* **13**, 124 (1993)
 [5] E. P. Wallner, *J. Opt. Soc. Am.* **73**, 1771 (1983)
 [6] A. Roorda *et al.*, *Opt. Express* **10**, 405 (2002)

ELLIPSOMÉTRIE SPECTROSCOPIQUE

Ramdane BENFERHAT*

HORIBA France – 14, Boulevard Thomas Gobert - Passage Jobin Yvon CS 45002 – 91120 Palaiseau – France

*ramdane.benferhat@horiba.com



L'ellipsométrie est une technique optique qui permet de déterminer avec précision les propriétés optiques et structurales de matériaux massifs ou déposés en couches minces. Elle consiste à mesurer la modification de la polarisation d'un faisceau lumineux par suite de sa réflexion par une surface plane. Cette technique d'analyse et de caractérisation, non destructive, est précise et très sensible est utilisée dans des domaines d'application de plus en plus larges.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513343>

PRINCIPE DE LA MESURE

Lorsqu'une onde électromagnétique plane polarisée arrivant sur une interface, supposée plane, entre deux milieux (0) et (1) (Figure 1), une partie de cette onde est transmise ou « réfractée » et une autre partie est réfléchi. Par rapport au plan défini par la normale à la surface et la direction du faisceau incident, le champ électrique E_i de l'onde incidente peut être écrit comme la somme de deux composantes orthogonales : la première, appelée polarisation p, d'amplitude complexe E_p^i est parallèle au plan d'incidence et la seconde, appelée polarisation s, d'amplitude complexe E_s^i est orthogonale au plan d'incidence. On peut décomposer de la même façon le champ transmis E^t et le champ réfléchi E^r . Nous n'étudierons ici que l'onde réfléchi, mais il est possible de définir également des coefficients de transmission.

Les coefficients de réflexion \tilde{r}_p et \tilde{r}_s sont des grandeurs complexes et correspondent respectivement aux polarisations p et s. Ces deux coefficients sont définis par les expressions :

$$\tilde{r}_p = \frac{E_p^r}{E_p^i} = |\tilde{r}_p| e^{i\delta_p} \quad \text{et} \quad \tilde{r}_s = \frac{E_s^r}{E_s^i} = |\tilde{r}_s| e^{i\delta_s}$$

où $|\tilde{r}_p|$, $|\tilde{r}_s|$, δ_p et δ_s représente les amplitudes et les phases des coefficients et \tilde{r}_p et \tilde{r}_s .

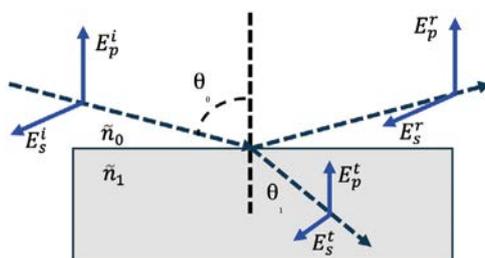
Pour un échantillon isotrope et massif considéré comme un milieu semi infini, l'angle de réfraction est régi par la loi de Descartes.

$$\tilde{n}_0 \sin \theta_0 = \tilde{n}_1 \sin \theta_1 \quad \text{avec} \quad \tilde{n}_0 = \tilde{n}_0 + jk_0$$

L'indice de réfraction (ou indice optique) \tilde{n} est une grandeur physique complexe, qui caractérise la façon dont la lumière se propage dans un milieu donné. Sa partie réelle (n) est définie comme le rapport entre la vitesse de la lumière dans le vide (c) et la vitesse de la lumière dans le milieu considéré (v), et sa partie imaginaire (k) le coefficient d'extinction lié à l'absorption des photons lumineux par la relation $\alpha = 4\pi k/\lambda$.

Les coefficients de réflexion (\tilde{r}_p , \tilde{r}_s) sont déduits de la continuité des composantes tangentielles des champs électrique et magnétique à l'interface et ne dépendent que de l'angle d'incidence θ_0 et des indices des

Figure 1. Onde plane incidente sur une interface plane séparant 2 milieux homogènes d'indices de réfraction \tilde{n}_0 et \tilde{n}_1 avec un angle d'incidence θ_0 .



milieux 0 et 1, lesquels varient avec la longueur d'onde.

$$\tilde{r}_s = \frac{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 - \tilde{n}_1 \cos \theta_1}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_1 \cos \theta_1}$$

$$\tilde{r}_p = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_0 - \tilde{n}_0 \cos \theta_1}{\tilde{n}_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_1 \cos \theta_1}$$

Dans le cas d'une structure multicouche (voir Figure 2), les calculs de ces coefficients sont effectués en utilisant un produit matriciel et vont dépendre des épaisseurs et des indices de réfraction des couches.

L'ellipsométrie spectroscopique mesure le rapport ρ des coefficients \tilde{r}_p et \tilde{r}_s en fonction de la longueur d'onde et de l'angle d'incidence.

$$\rho = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} = \frac{|\tilde{r}_p|}{|\tilde{r}_s|} e^{i\Delta} = \tan \Psi e^{i\Delta} \quad \text{et} \quad \Delta = \delta_p - \delta_s$$

avec $0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$ et $0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$
Expérimentalement, en ellipsométrie, on cherchera à effectuer la mesure des angles Ψ et Δ .

INSTRUMENTATION

Un ellipsomètre spectroscopique est essentiellement constitué d'une source de lumière, d'un générateur de polarisation, d'un analyseur et d'un système de détection. En fonction du domaine spectral désiré, la source de lumière utilisée peut être soit une source Xénon (190 nm - 2200 nm), soit une lampe halogène (350 nm - 2500 nm). Le système de détection est constitué d'un spectromètre couplé soit à un détecteur monocanal (photomultiplicateur ou photodiode) soit à un détecteur multicanal (barrette linéaire de photodiode ou CCD).

Méthode de zéro

Cette méthode est basée sur l'extinction du signal pour effectuer une mesure. Le schéma synoptique d'un ellipsomètre à annulation est donnée par la figure 2. Le montage optique est constitué d'une source monochromatique (laser ou lampe filtrée), d'un polariseur, d'une lame retardatrice (e.g lame quart-d'onde), d'un analyseur et d'un système de détection (généralement un photomultiplicateur). La polarisation linéaire générée par le polariseur est transformée en polarisation elliptique par la lame retardatrice. Cette dernière est orientée de manière à obtenir une polarisation linéaire après la réflexion sur l'échantillon. L'analyseur est ensuite orienté de manière à être croisé avec la polarisation linéaire ainsi obtenue, ce qui conduit à l'extinction du faisceau. Les orientations du polariseur, de la lame retardatrice et de l'analyseur permettent de déduire les paramètres ellipsométriques (Ψ, Δ) de l'échantillon. Basée sur la recherche d'un minimum d'intensité, la mesure nécessite l'utilisation d'une source monochromatique et sa précision dépend du bruit de fond du détecteur. De nos jours, cette méthode est rarement utilisée.

Méthode de modulation de polarisation

Les méthodes de mesure basées sur la modulation de l'état de polarisation de la lumière se prêtent bien à leur utilisation

sur un large domaine spectral d'une façon automatique. Il existe deux manières de moduler la polarisation d'un faisceau lumineux, soit en tournant mécaniquement un composant optique de l'ellipsomètre (polariseur, analyseur, ou compensateur), soit en utilisant un modulateur photoélastique.

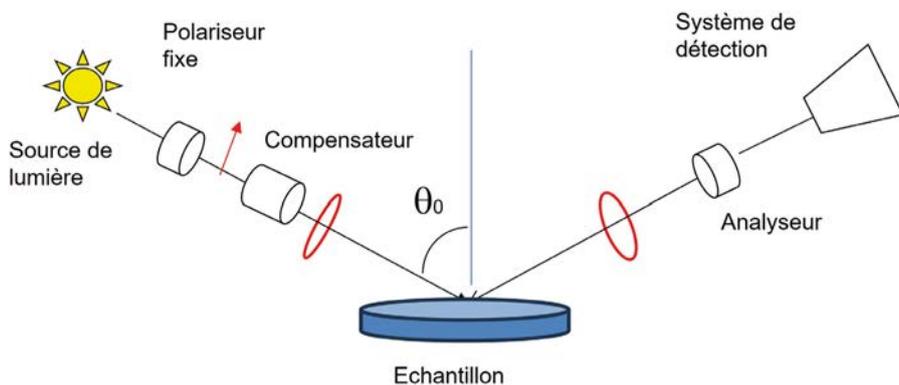
Ellipsomètre à polariseur tournant

L'ellipsométrie à polariseur tournant est la technique spectroscopique la plus simple et ancienne utilisée pour la mesure des paramètres Ψ et Δ d'un échantillon. La technique repose sur une modulation de la polarisation de la lumière incidente grâce à la rotation mécanique d'un polariseur, ce qui permet d'extraire les paramètres ellipsométriques $\tan \Psi$ et $\cos \Delta$ à partir des variations d'intensité détectées. Nous présentons dans la figure 3 le schéma synoptique d'un ellipsomètre à polariseur tournant à une fréquence de quelques hertz. Après l'échantillon, l'analyseur étant fixe, il n'est pas nécessaire d'avoir un système de détection insensible à la polarisation. Cela permet de placer un spectromètre (qui modifie la polarisation du faisceau) entre l'analyseur et le détecteur. Ce spectromètre dispersera et filtrera la lumière parasite présente au niveau de l'échantillon. Du fait de la faible fréquence de rotation du polariseur, un détecteur multicanal (barrettes de photodiodes ou CCD), peut être utilisée pour mesurer l'ensemble du spectre en quelques secondes. Cette technique, en raison de sa faible sensibilité à l'angle Δ lorsqu'elle est proche de 00 et de 1800, est de moins en moins utilisée.

Ellipsomètres à compensateur tournant

Afin de s'affranchir de toutes les contraintes de polarisation au niveau de la source et du système de détection et afin d'augmenter la précision sur la mesure du paramètre Δ , des ellipsomètres à compensateur tournant ont fait leur apparition sur le marché dès les années 90. Le schéma synoptique d'un ellipsomètre à compensateur

Figure 2. Schéma synoptique d'un ellipsomètre à annulation.



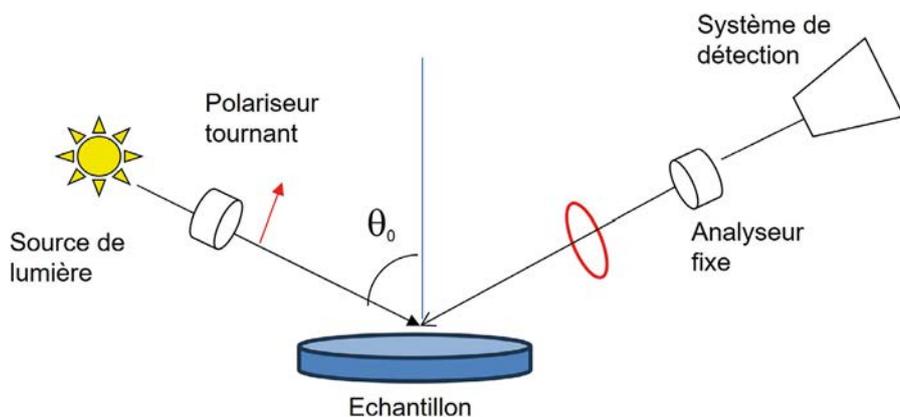


Figure 3. Schéma synoptique d'un ellipsomètre à polariseur tournant.

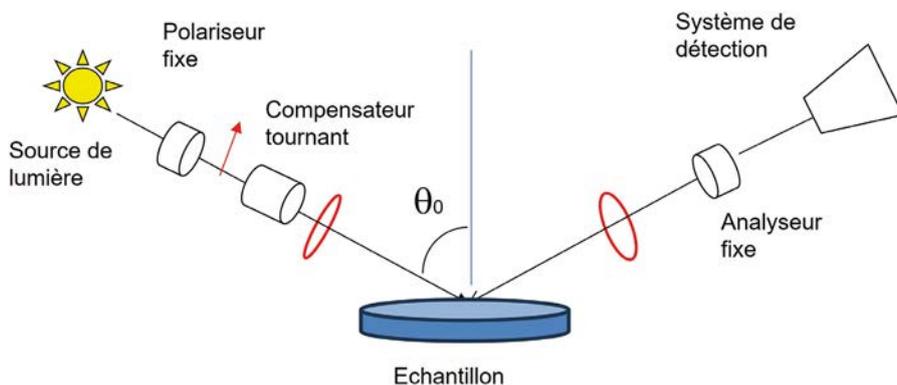
tournant est donnée par la figure 4. La polarisation linéaire générée par le polariseur est transformée en polarisation elliptique par la lame compensatrice. Cette lame en rotation à une fréquence de quelques hertz produit un signal modulé à la fréquence de rotation. L'analyse de Fourier de ce signal permet d'extraire les valeurs de $\tan \Psi$ et de $\tan \Delta$ de l'échantillon. Les points forts de ce type d'ellipsomètre sont la simplicité de la technologie, la précision de la mesure des angles Ψ et Δ et le fait de pouvoir utiliser des détecteurs multicanaux de type CCD. Les points faibles sont essentiellement liés à l'existence de pièces mécaniques mobiles, la difficulté d'obtenir des compensateurs à large gamme spectrale (190 nm – 2500 nm) et à leur calibration difficile en fonction de la longueur d'onde.

Ellipsomètre à modulation de phase

Le schéma optique d'un ellipsomètre à modulation de phase reprend les mêmes éléments que celui d'un ellipsomètre à compensateur tournant dans lequel on a remplacé le compensateur tournant par un modulateur photo-élastique (Figure 5). Un modulateur photo-élastique (souvent abrégé en PEM pour Photo-Elastic Modulator) est un dispositif optique utilisé pour moduler l'état de polarisation de la lumière grâce à l'effet photo-élastique. L'effet photoélastique est la propriété de certains matériaux de modifier d'une façon réversible leur indice de réfraction sous l'effet d'une

contrainte mécanique. Ce changement d'indice engendre un déphasage différent selon la direction de la polarisation. En pratique, cette contrainte est appliquée sous forme d'une vibration acoustique à haute fréquence (généralement de l'ordre de quelques dizaines à centaines de kHz). Comme la contrainte appliquée est périodique, la biréfringence induite dans le barreau variera aussi dans le temps sous la forme $\delta(t) = a \sin \omega_0 t$. Dans cette configuration le signal détecté est constitué d'un niveau continu et de composantes modulées à la fréquence ω_0 et $2\omega_0$. L'amplitude de ces composantes, fonction des angles Ψ et Δ dépend de l'orientation des axes du modulateur par rapport à ceux de l'échantillon. Lorsque le PEM est

Figure 4. Schéma synoptique d'un ellipsomètre à compensateur tournant.



aligné avec les axes de l'échantillon, les quantités mesurées sont $\sin 2\Psi \sin \Delta$, et $\sin 2\Psi \cos \Delta$, et dans le cas où les axes du PEM font un angle de 45° avec ceux de l'échantillon, les quantités mesurées sont $\sin 2\Psi \sin \Delta$ et $\cos 2\Psi$. Comme pour les ellipsomètres à compensateur tournant, dans un ellipsomètre à modulation de phase, aucune caractéristique particulière n'est requise au niveau de la polarisation de la source et du système de détection. Le point fort de ce type d'instruments est l'absence de pièces mécaniques mobiles qui peuvent générer des variations d'angle d'incidence et son large domaine spectral (du lointain UV au proche IR) grâce à des méthodes de calibration simple du modulateur. En revanche, en raison de la fréquence élevée de la modulation de phase, il n'est pas possible d'utiliser un système de détection basée sur des détecteurs multicanaux (barrette de photodiodes ou CCD).

Ellipsomètre à modulation par des cristaux liquides

Un ellipsomètre basé sur des cristaux liquides (LC-Ellipsometer) est une forme moderne et versatile d'ellipsomètre sans pièces mécaniques mobiles, dans lequel les modulations d'état de polarisation sont réalisées par des modulateurs de cristaux liquides (LC). Cette technologie est particulièrement utile pour la spectroscopie rapide et pour l'imagerie. Les modulateurs à cristaux liquides (LC) agissent comme des lames à retards variables commandées électroniquement. En modifiant la tension appliquée, on ajuste ●●●

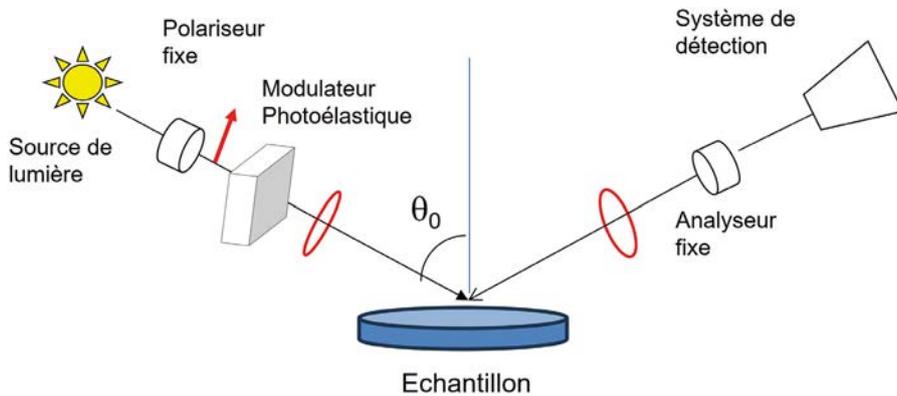


Figure 5. Schéma synoptique d'un ellipsomètre à modulation de phase.

l'indice de réfraction biréfringent, ce qui permet de contrôler la phase entre deux directions de polarisation. Le schéma synoptique d'un ellipsomètre à modulation de polarisation par des cristaux liquides est donné par la figure 6. En combinant deux modulateurs LC, on peut mesurer la matrice de Mueller de l'échantillon. La matrice de Mueller d'un échantillon, donne une description complète de l'interaction d'une onde électromagnétique avec un échantillon. La matrice de Mueller est une matrice 4x4 réelle qui décrit comment un échantillon transforme l'état de polarisation de la lumière, représenté par un vecteur de Stokes. La mesure de la matrice de Mueller est nécessaire pour l'étude de matériaux anisotropes, diffusants ou biréfringents. La mesure des éléments de la matrice de Mueller, permettent d'extraire avec une grande précision les angles Ψ et Δ .

Les points forts de cette technologie est sa capacité de mesurer rapidement la matrice de Mueller sans aucune pièce mécanique en mouvement avec un système de détection multicanal ou CCD, ce qui permet de l'utiliser en mode imageur. En revanche, en raison de la transmission des cristaux liquides, le domaine spectral de ce type d'instruments est limité (400nm - 1000 nm).

Ellipsomètre polarimètre de Stokes

Le vecteur de Stokes est un outil mathématique utilisé pour décrire l'état de polarisation d'une onde électromagnétique. Il est particulièrement utile car il permet une représentation complète et mesurable (via des intensités

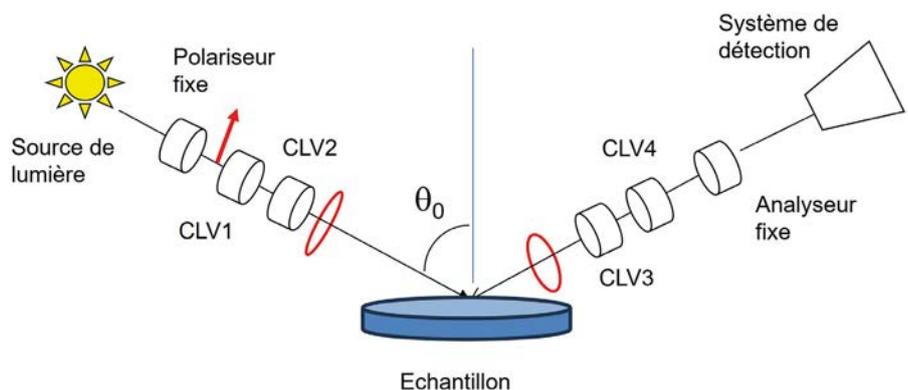
de la polarisation, y compris les états partiellement polarisés, ce que ne permet pas la représentation par vecteurs de Jones dans les cas non parfaitement cohérents. Défini pour la première fois par George Gabriel Stokes en 1852, le vecteur de Stokes est une représentation à quatre composantes qui permet de caractériser à la fois l'intensité lumineuse et l'état de polarisation, qu'il soit totalement, partiellement ou non polarisé. Le vecteur de Stokes est directement mesurable expérimentalement. Les quatre composantes du vecteur, notées généralement S_0, S_1, S_2, S_3 , correspondent respectivement à l'intensité totale (S_0), à la différence d'intensité entre les polarisations linéaires horizontale et verticale (S_1), à la différence

d'intensité entre les polarisations à 45° et -45° (S_2) et enfin à la différence d'intensité entre les polarisations circulaires droite et gauche (S_3). La mesure des 4 composantes du vecteur de Stokes permettent d'extraire les valeurs de Ψ et Δ avec une grande précision. Expérimentalement, le faisceau réfléchi par l'échantillon est séparé optiquement en 4 faisceaux représentant chacun une composante du vecteur de Stokes. Habituellement, cette technique est basée sur l'utilisation d'une source lumineuse couplée à une série de filtres interférentiels et un système de détection basé sur des détecteurs à 4 cadrans. La complexité de la technique liée à la difficulté technique d'obtenir des données spectroscopiques a limité son utilisation. Récemment, une nouvelle méthode de mesure des composantes du vecteur de Stokes en mode spectroscopique a été développée. Cette nouvelle méthode est basée sur la conception d'un prisme spécifique capable de séparer le faisceau réfléchi par les échantillons en 6 faisceaux indépendants contenant les informations relatives aux composantes du vecteur de Stokes (voir Fig. 7). Ce nouveau type d'ellipsomètre spectroscopique est capable de faire des mesures avec une grande précision et une grande vitesse d'acquisition de quelques millisecondes.

Traitement des données ellipsométriques

L'ellipsométrie permet de mesurer les angles Ψ et Δ qui décrivent la variation de l'état de polarisation de la lumière réfléchi par un

Figure 6. Schéma synoptique d'un polarimètre de Mueller basé sur l'utilisation de cristaux liquides (CLV1, CLV2, CLV3, CLV4).



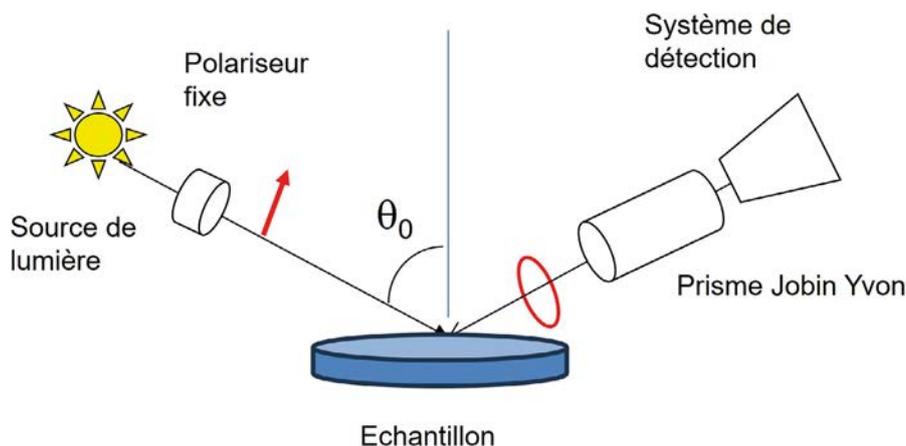


Figure 7. Schéma synoptique d'un polarimètre de Stokes basé sur l'utilisation d'un prisme Jobin Yvon.

échantillon. La valeur de ces angles dépend des propriétés du matériau, de son épaisseur, et de la structure de l'échantillon. Pour extraire des informations physiques utiles (comme l'épaisseur d'un film mince ou son indice de réfraction), on doit interpréter les données brutes (Ψ , Δ) à l'aide d'un modèle optique. Le traitement commence par des hypothèses physiques sur la structure de l'échantillon. On construit un modèle en définissant le type de substrat et le nombre de couches déposées. Pour chaque couche, on définit son épaisseur, ses propriétés optiques et sa nature (homogène, mélange, anisotropie). Ce modèle va générer des valeurs théoriques (Ψ_{th} , Δ_{th}) que l'on va comparer aux valeurs expérimentales (Ψ_{exp} , Δ_{exp}). En modifiant les paramètres du modèle théorique, on cherchera à minimiser l'écart quadratique moyen donné par l'équation ci-dessous où Γ_{Ψ} et Γ_{Δ} représentent les erreurs de mesure estimées :

$$\chi^2 = \min \sum_{i=1}^n \left[\frac{(\Psi_{th} - \Psi_{exp})_i^2}{\Gamma_{\Psi,i}} + \frac{(\Delta_{th} - \Delta_{exp})_i^2}{\Gamma_{\Delta,i}} \right]$$

Couches homogènes

Dans le cas d'un empilement de couches homogènes où les indices des matériaux utilisés sont connus (base de données fournie par les fabricants d'ellipsomètres), les paramètres à ajuster sont essentiellement les épaisseurs des couches. Une estimation approximative de ces épaisseurs permettra une convergence

rapide de la procédure d'ajustement. Dans le cas contraire, les outils avancés fournis par certains fournisseurs d'ellipsomètres permettent de retrouver les valeurs finales mais demanderont plus de temps de calculs pour converger. Dans le cas d'un empilement de couches avec des indices optiques inconnus, on utilise des lois de dispersion pour décrire les variations des indices de réfraction $n(\lambda)$ et $k(\lambda)$ de ces couches. En fonction du type de matériau à analyser, semi-conducteurs, transparents, métalliques, il existe des lois spécifiques qui décrivent le mieux ces variations d'indice. Ces lois contiennent des paramètres qui viennent s'ajouter aux épaisseurs à ajuster.

Couches inhomogènes

Dans le cas de couches inhomogènes, la théorie des milieux effectifs (TME), ou Effective Medium Theory (EMT) en anglais, est une approche utilisée en physique, en science des matériaux et en électromagnétisme. La théorie des milieux effectifs (TME) est un ensemble de méthodes permettant de modéliser les propriétés physiques d'un matériau composite — c'est-à-dire un matériau constitué de plusieurs phases différentes (par exemple, des inclusions dans une matrice)

— comme s'il s'agissait d'un matériau homogène fictif. Cette approche est très utilisée en ellipsométrie pour décrire la rugosité de surface (mélange de matériau et de vide), les matériaux polycristallins (mélange de phase cristalline, phase amorphe et vide) et dans l'analyse des interfaces entre deux couches (mélange des deux matériaux). Les théories souvent utilisées, sont celles établies par Maxwell-Garnett (approprié pour des inclusions dispersées à faible fraction volumique dans une matrice continue) et celle de Bruggeman, (approprié pour des mélanges sans phase dominante, fortes fractions volumiques des différentes phases).

Application de l'ellipsométrie

Grace au développement d'instruments de plus en plus performants couplés à des logiciels de traitement de données de plus en plus puissants, l'ellipsométrie spectroscopique trouve ses applications dans plusieurs domaines.

Semiconducteurs

L'industrie des semiconducteurs a été la première à adopter l'ellipsométrie pour le contrôle non destructif, rapide et précis des épaisseurs et des propriétés optiques et physiques des matériaux et couches utilisées dans les dispositifs microélectroniques. Dans cette industrie, les ellipsomètres sont souvent installés dans des plateformes de chargement automatique de plaquettes de silicium et sont utilisés pour contrôler les différentes étapes de production (dépôts, lithographie, gravure et polissage) des transistors MOSFET et des circuits intégrés avancés. Les matériaux analysés sont souvent des oxydes, des nitrures, des résines photosensibles et des matériaux low-k et high-k qui sont utilisés pour augmenter la capacité du diélectrique sans réduire l'épaisseur physique des couches, de réduire les fuites de courant et d'améliorer le contrôle des grille dans les transistors.

Photonique

La photonique repose sur la génération et le contrôle de la propagation, de la réflexion, de l'absorption et de la polarisation de la lumière dans des structures élaborées. L'ellipsométrie joue un rôle crucial en photonique, car elle permet de caractériser avec une grande précision les structures optiques complexes, les matériaux à propriétés optiques avancées, et les dispositifs fonctionnels utilisés pour manipuler la lumière à l'échelle nanométrique (lasers, LEDs, réseaux photoniques, guides d'onde, cristaux photoniques, couches minces optiques, ...). Elle permet de mesurer avec une grande précision les épaisseurs des couches et leurs indices de réfraction complexes. Lorsque des semi-conducteurs composés de type III-V (e.g. AlGaAs) sont utilisés (laser, LEDs, détecteurs), la composition en aluminium des matériaux est déduite à partir de la mesure des indices de ces matériaux.

Photovoltaïque

Les cellules solaires reposent sur des couches très minces, dont les propriétés optiques (absorption, réflexion, transmission) sont cruciales pour le rendement énergétique. L'ellipsométrie est un outil de caractérisation optique avancé qui joue un rôle clé dans le domaine du photovoltaïque pour optimiser la performance, la qualité et la fiabilité des cellules solaires. Elle permet d'analyser les couches minces, les interfaces, et les matériaux actifs présents dans les dispositifs photovoltaïques, tout au long de leur fabrication. Elle permet de mesurer l'épaisseur de ces couches, d'obtenir leurs indices optiques (n,k), de caractériser les traitements antireflets et passivation, de détecter des défauts ou inhomogénéités dans les couches, et enfin de suivre les variations structurelles ou chimiques après dépôt, recuit ou vieillissement. Les matériaux analysés dans le domaine du photovoltaïque sont le Silicium amorphe

(a-Si:H), le Silicium polycristallin (p-Si), le Tellure de cadmium (CdTe), les Pérovskites, les Nitrures de silicium (SiNx), le Dioxyde de titane (TiO₂), le Fluorure de magnésium (MgF₂), ou les Oxydes d'aluminium (Al₂O₃).

Métallurgie

En métallurgie, il est essentiel de contrôler la formation de couches d'oxydes (corrosion, passivation), d'évaluer les traitements de surface (dépôts, nitruration, anodisation), de mesurer l'épaisseur de films protecteurs (nickelage, chromage, dépôts CVD/PVD), de détecter des changements microstructuraux (phases, porosité, croissance de grains) *via* leurs propriétés optiques.

Biologie

L'ellipsométrie spectroscopique est utilisée dans le domaine de la biologie pour détecter et quantifier en temps réel l'adsorption d'une biomolécule sur une surface fonctionnalisée grâce à la variation d'épaisseur optique qu'elle induit. Sa combinaison avec la résonance plasmonique de surface

permet de gagner plusieurs ordres de grandeur de sensibilité.

CONCLUSION

L'ellipsométrie a fait preuve de sa puissance et de sa polyvalence dans plusieurs domaines aussi variés que la physique, la chimie, l'électrochimie, l'électronique, les nanotechnologies, les écrans plats, la verrerie, la métallurgie, les télécommunications et la biologie. Malgré sa nature non-destructive, sa grande sensibilité aux couches ultra-minces, et sa capacité à être intégrée facilement dans des outils industriels automatisés, elle a été longtemps considérée comme une technique compliquée limitée à une utilisation dans les laboratoires de recherche, en raison de la nécessité d'appliquer un modèle mathématique pour déterminer les paramètres physiques des échantillons. Grâce au développement de logiciels de traitement de données performants et à la disponibilité d'ordinateurs puissants, elle est devenue aujourd'hui une technique incontournable pour le contrôle des procédés dans la production industrielle. ●

FOURNISSEUR	SITE INTERNET	DISTRIBUTEUR
HORIBA France SAS	www.horiba.com	
J.A. Woollam Inc	www.jawoollam.com	Quantum Design S.A.R.L
Sentech mbh	www.sentech.com	Agence Française SENTECH
SemiLab	www.semilab.com	

RÉFÉRENCES

- [1] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara, in *Ellipsometry and Polarized Light*, North Holland (1986)
- [2] P. Drude, *Ann. Phys.* **32**, 584 (1887); **36**, 532 (1889); **39**, 481 (1890)
- [3] D. E. Aspnes, A. A. Studna, *Appl. Opt.* **14**, 1 (1975)
- [4] B. Drévilion, J. Perrin, R. Marbot, A. Violet, J. L. Darby, *Rev. Sci. Instrum.* **53**, 7 (1982); B. Drévilion, *Thin Solid Films* 313-314, 625-630 (1998)
- [5] P. G. De Gennes, J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford (1993)
- [6] P. J. J. Gil, R. Ossikovski, *Polarized Light and the Mueller Matrix Approach*, CRC Press (2016)
- [7] D. E. Aspnes, J. B. Theeten, *Appl. Opt.* **14** (1975)
- [8] F. Snik, J. Craven-Jones, M. Escuti *et al.*, *Proc. SPIE* 9099, 90990B (2014).
- [9] M. Losurdo, M. Bergmair, G. Bruno *et al.*, *J. Nanopart. Res.* **11**, 1521 (2009)

Module de couplage par fibre



Le nouveau module de couplage par fibre Axon FL transforme le laser femtoseconde ultra-rapide Axon 920 TPC en une solution plug-and-play pour la microscopie Mini2P. Conçu pour passer d'une sortie en espace libre à une sortie couplée à une fibre, l'Axon FL améliore la polyvalence du laser Axon 920 TPC, permettant aux chercheurs d'utiliser une seule source de lumière pour un plus large éventail d'applications, telles que l'étude des circuits neuronaux complexes et de la dynamique cellulaire en profondeur dans les tissus vivants.

www.coherent.com

ABSORBEURS



Edmund Optics propose une gamme complète de produits d'Acktar® d'absorption de la lumière parasite. Les produits Acktar® sont secs, sans particules, compatibles avec les salles blanches et le vide, sans dégagement gazeux ni durcissement. Dotés de traitements propriétaires tels que Metal Velvet™ et Spectral Black™, les films et composants d'Acktar offrent une réflectance hémisphérique totale de ~1% dans les domaines du visible (VIS), SWIR et LWIR.

www.edmundoptics.fr

Cordon à fibre refroidi pour laser de puissance



LASER COMPONENTS a développé un nouveau cordon fibré avec un refroidissement actif ou passif spécifiquement pour les lasers de haute puissance. En fonction du diamètre de la fibre, il supporte des puissances laser allant de 200W (@ 200 µm) à 450W et plus. Le cordon offre une qualité de faisceau optimale sur une large plage de longueurs d'onde de 300 à 1900 nm, ce qui le rend adapté à de nombreuses applications telles que la découpe laser, le soudage, le nettoyage et la soudure. Il est disponible en version passive et active, refroidie à l'eau.

www.lasercomponents.com/fr/

LASER DFB À BALAYAGE SANS SAUT DE MODE



Le DFB pro de TOPTICA est un laser monofréquence basé sur une diode à rétroaction répartie (DFB). Le DFB pro couvre des longueurs d'onde allant de 633 nm et 760 nm jusqu'à 3500 nm, avec une plage d'accord sans saut de mode pouvant atteindre 1400 GHz. Les lasers à rétroaction répartie (DFB) allient large accordabilité et forte puissance de sortie. L'élément sélectif en fréquence – un réseau de Bragg – est intégré dans la zone active du semiconducteur, garantissant un fonctionnement continu en monofréquence. Il convient à de nombreuses applications, notamment la métrologie des semiconducteurs et la spectroscopie.

www.toptica.com

Laser femtoseconde à taux de répétition GHz

Le MENCHIR-1030 est un laser industriel à taux de répétition de 1 GHz fonctionnant à 1030 nm en régime femtoseconde.



Ce laser intègre des options de contrôle du taux de répétition et de la fréquence porteuse-enveloppe, permettant une synchronisation précise avec des horloges externes. Fiable et silencieux, il ouvre de nouvelles possibilités pour des applications exigeantes en métrologie optique, peignes de fréquences, recherche scientifique et industrie.

https://menhir-photonics.com/

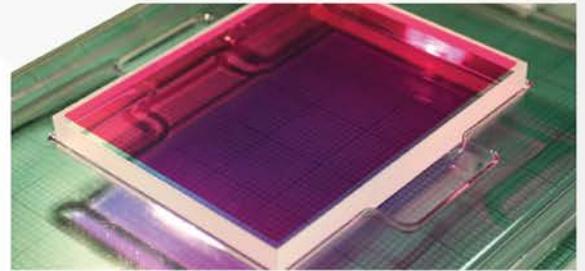
Optiques hautes performances pour lasers haute energie

par **OPTON LASER**
INTERNATIONAL

Manx Precision Optics fournit des composants optiques de précision pour les systèmes lasers à haute énergie et pour impulsions femtoseconde.

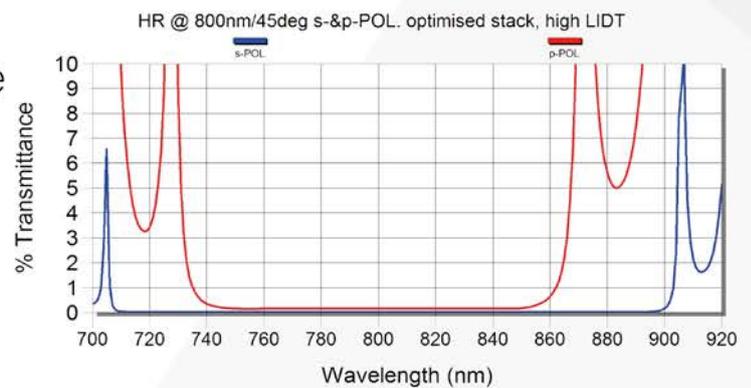
/ LARGE GAMME D'OPTIQUES

- ▲ Jusqu'à 500 mm de diamètre
- ▲ Planéité jusqu'à $\lambda/20$ après traitement
- ▲ Miroirs, fenêtres, polariseurs, cubes, étalons, lentilles, beam splitters, cubes à contact optique à haute énergie, lames d'onde...
- ▲ Composants catalogue en stock (de 1/2" à 6" de diamètre) ou sur demande.



/ REVÊTEMENTS TECHNIQUES COMPLEXES

- ▲ Large bande spectrale 248 à 2000nm
- ▲ Faible GDD et haute tenue au flux
- ▲ Dispersion (GDD) mesurée et garantie



/ RUGOSITÉ DE SURFACE FAIBLE

- ▲ Process optimisé pour réduire les dommages sub-surfaciques
- ▲ Rugosité de surface après polissage de 1-2 Angstroms

