



Institut
FRESNEL
MARSEILLE

sciences et
technologies
de l'optique
l'électromagnétisme
et l'image

Couches minces optiques sous flux laser intense

L. Gallais

Maître de Conférences à l'Ecole Centrale Marseille
laurent.gallais@fresnel.fr

Plan de l'exposé

- Introduction
- La problématique de l'endommagement dans les couches minces optiques :
 - Mécanismes physiques mis en jeux
 - Importance des matériaux, techniques de fabrication, design en fonction de l'application
 - Influence des conditions d'utilisation
- Traitement de quelques points spécifiques :
 - Modélisation de l'endommagement en régime d'impulsion « longues »
 - Modélisation de l'endommagement en régime ultracourt

Plan de l'exposé

- Introduction
- La problématique de l'endommagement dans les couches minces optiques :
 - Mécanismes physiques mis en jeux
 - Importance des matériaux, techniques de fabrication, design en fonction de l'application
 - Influence des conditions d'utilisation
- Traitement de quelques points spécifiques :
 - Modélisation de l'endommagement en régime d'impulsion « longues »
 - Modélisation de l'endommagement en régime ultracourt

Introduction

- Les couches minces optiques sont au coeur des lasers et des systèmes lasers
- Elles contribuent souvent à diminuer la résistance au flux laser du système!
- La problématique de la tenue au flux laser des couches minces est étudiée depuis plus de 40ans*
- Phénomène complexe impliquant électromagnétisme, thermique, mécanique, plasmas, hydrodynamique,...
- Les propriétés des couches complexifient encore le problème...
- Aujourd'hui, de nouveaux challenges motivent la recherche sur ce sujet

*« *Threshold measurements of laser damage in thin films* », J. Becker, W. Coombs and A. Turner, *J.Opt. Soc.Am.* 56, 1966

Introduction

- Lasers ultracourts

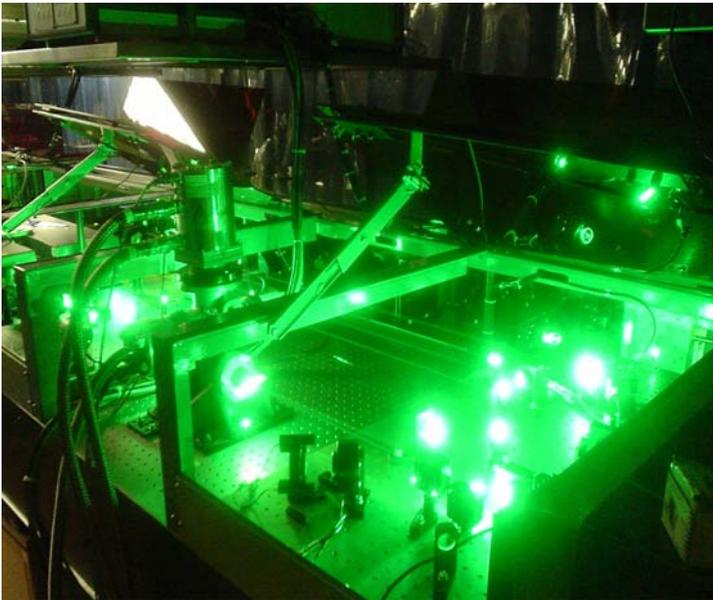
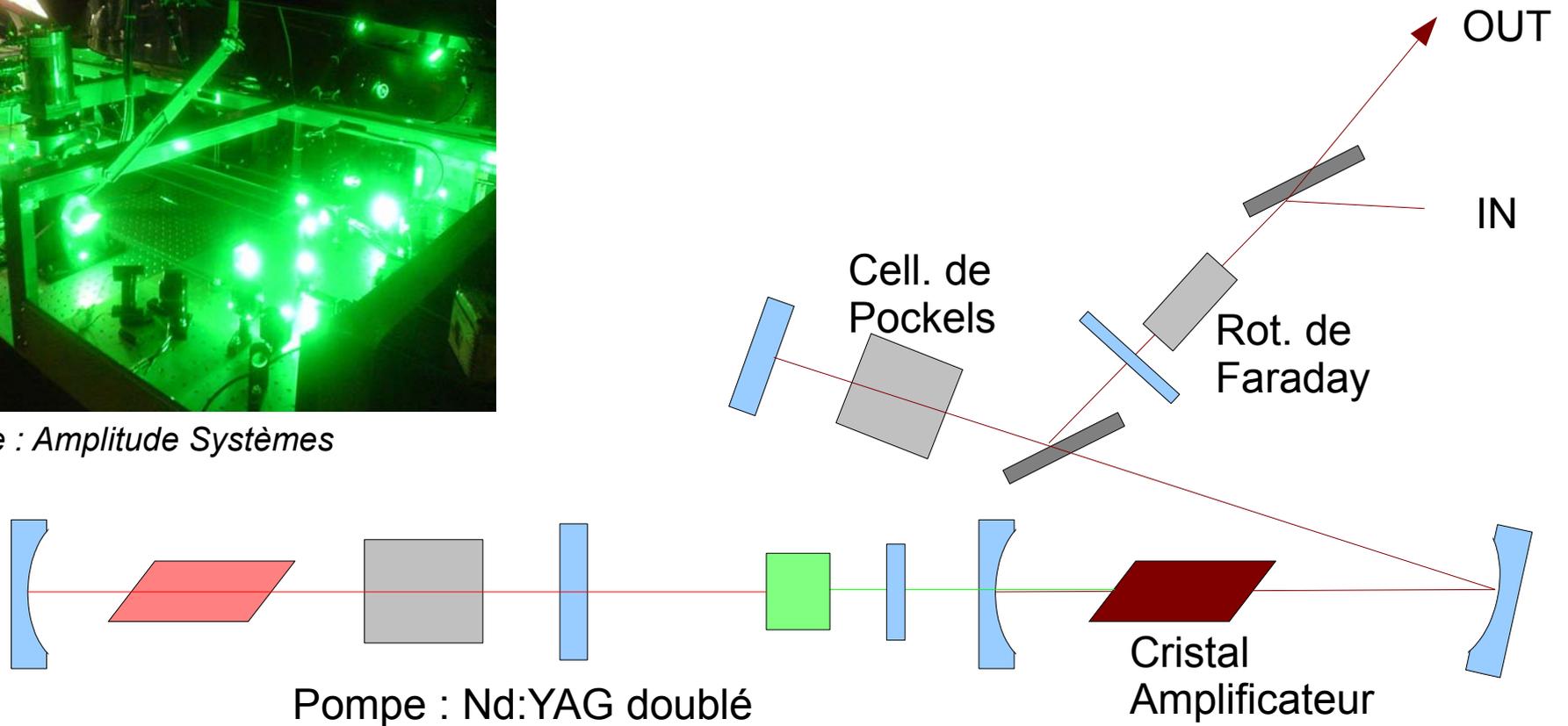


Image : Amplitude Systèmes

Exemple d'un Amplificateur régénératif d'impulsions picoseconde



Pompe : Nd:YAG doublé

Cristal Amplificateur

introduction

- Systèmes Lasers embarqués

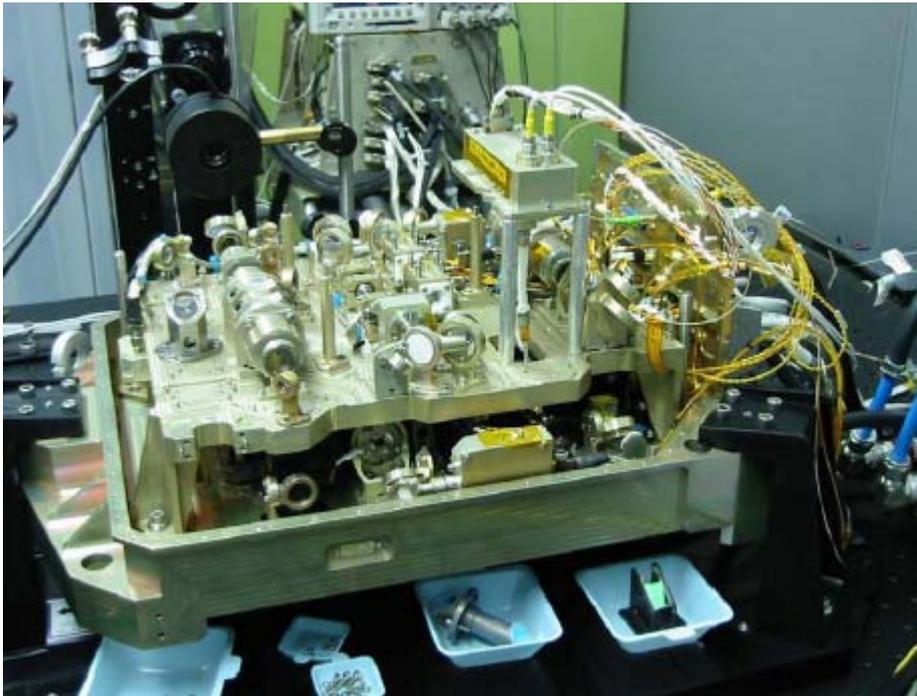
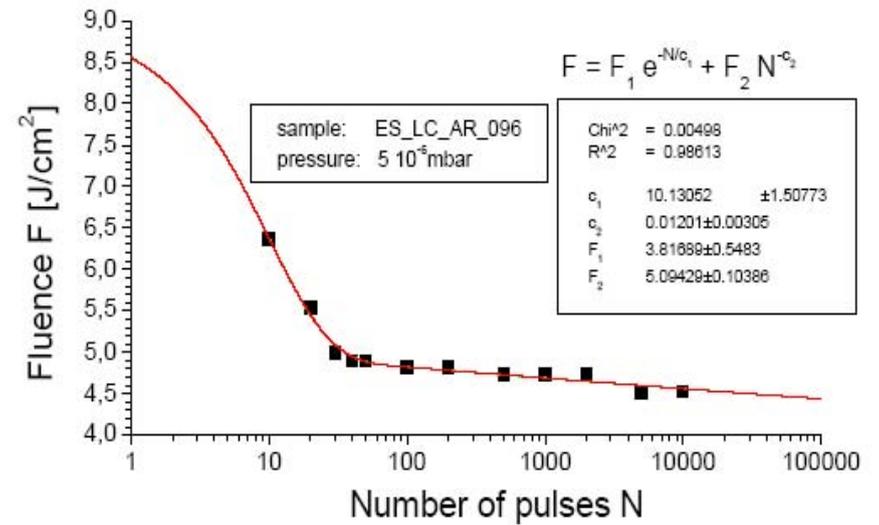


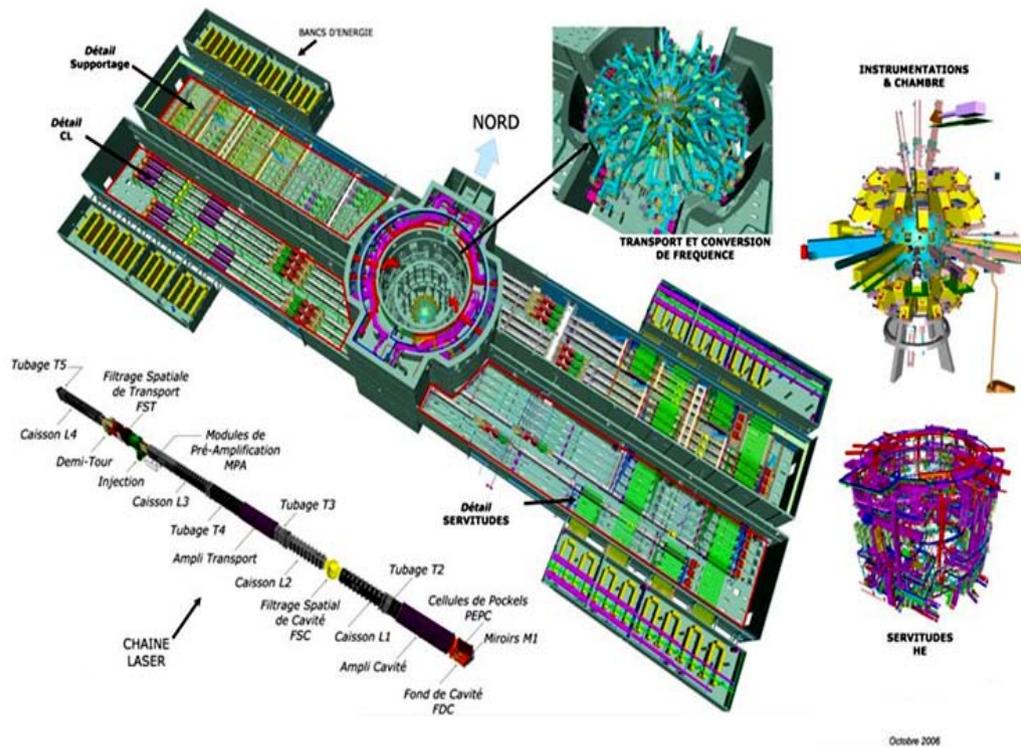
Image : Astrium



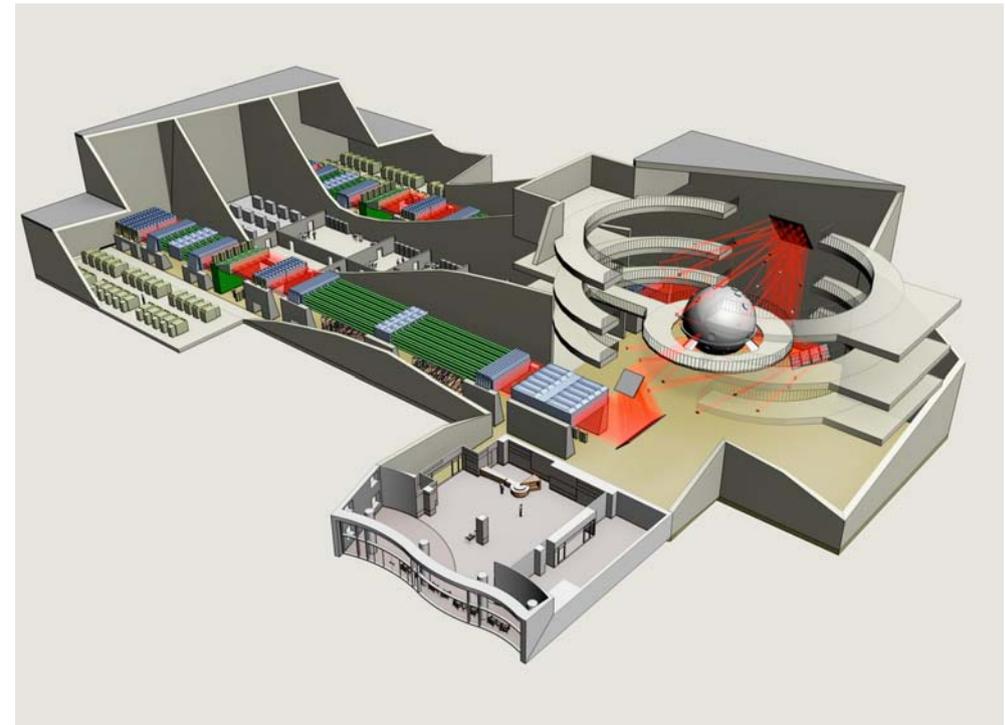
W. Riede et al., « *Aspects of laser optics qualification for space applications* », Laser Damage Symposium, 2009

Introduction

- Grandes chaînes lasers de puissance



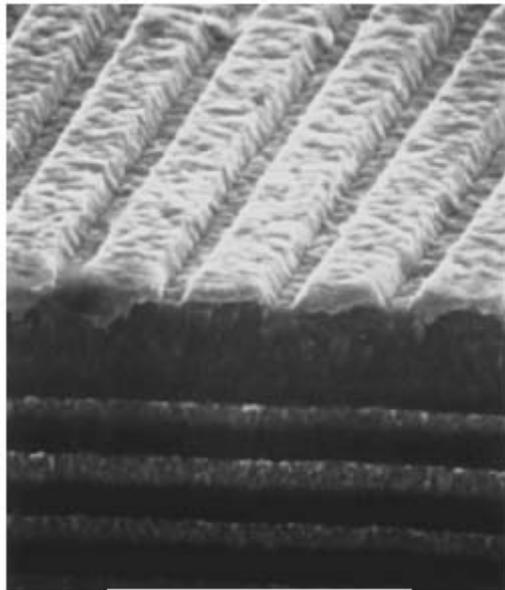
LMJ (www-lmj.cea.fr)



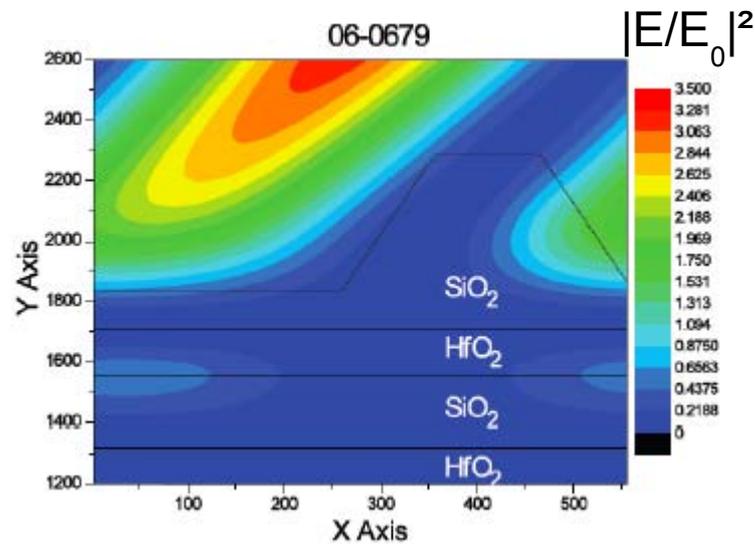
HIPER (<http://www.hiper-laser.org/>)

Introduction

- Structures hybrides



Perry et al., « *High-efficiency multilayer dielectric diffraction gratings* », Opt. Lett. 1995



Néauport et al., « *Mixed metal dielectric gratings for pulse compression* », Opt. Exp. 2010



Image : CEA

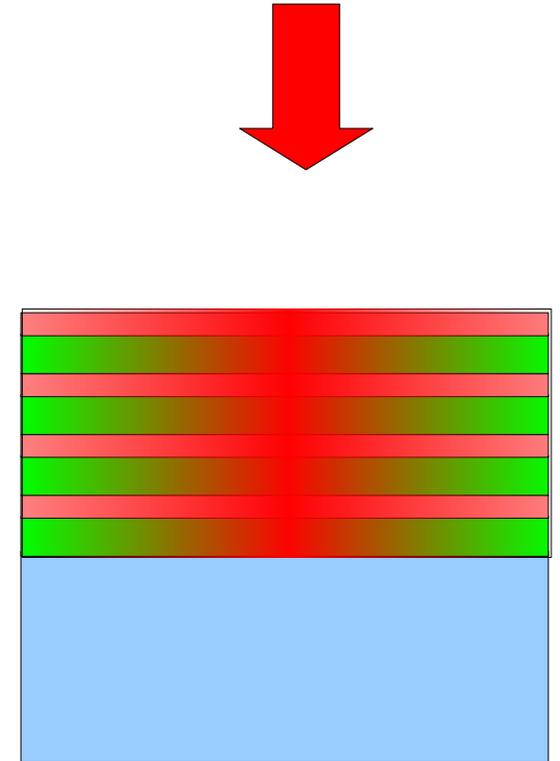
Plan de l'exposé

- Introduction
- La problématique de l'endommagement dans les couches minces optiques :
 - Mécanismes physiques mis en jeux
 - Importance des matériaux, techniques de fabrication, design en fonction de l'application
 - Influence des conditions d'utilisation
- Traitement de quelques points spécifiques :
 - Modélisation de l'endommagement en régime d'impulsion « longues »
 - Modélisation de l'endommagement en régime ultracourt

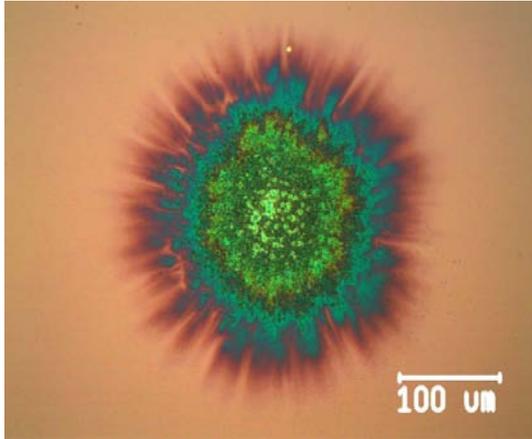
Mécanismes physiques mis en jeux

Effets thermiques

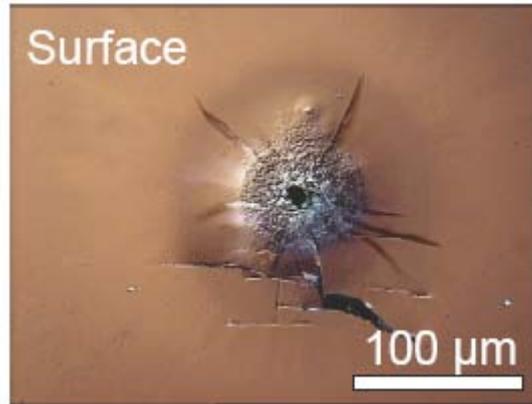
- Absorption importante à la longueur d'onde d'utilisation (UV, IR)
- Contraintes thermomécaniques, rupture, décollement
- Activation de processus thermo-chimiques
- Fusion, vaporisation du matériau
- Seuil lié à la taille du faisceau et à la durée d'irradiation (diffusion thermique)



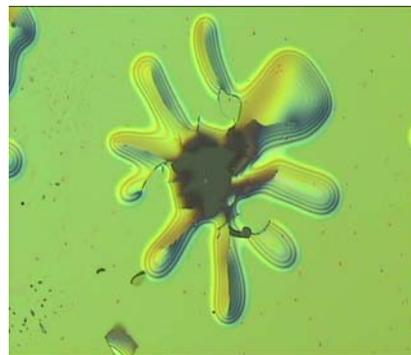
Quelques exemples...



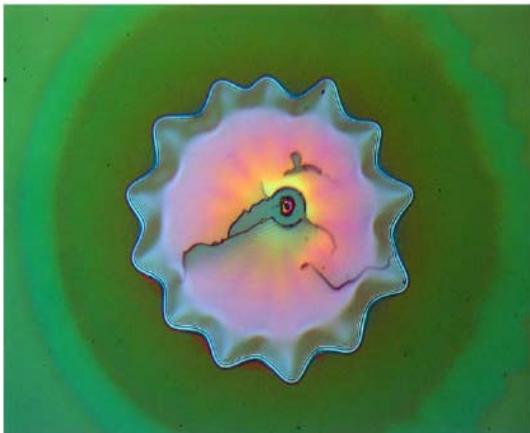
*Ta₂O₅ EBD irradiée avec 1 impulsion 1064nm, 14ns, 29J/cm²



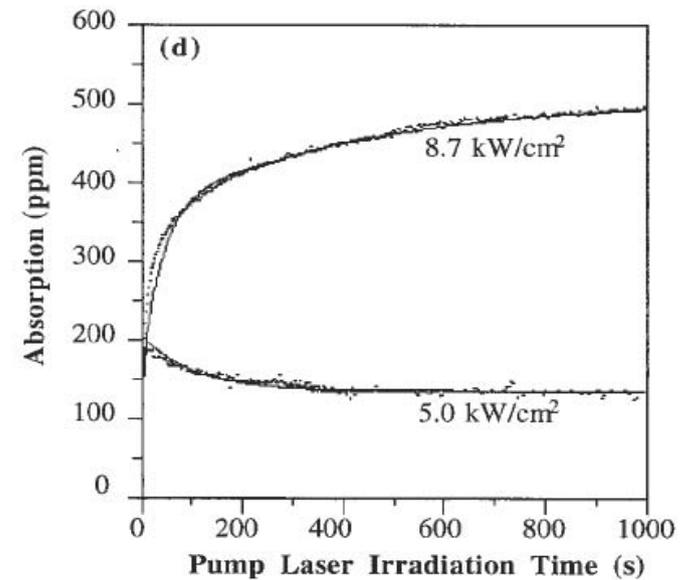
Surface d'un cristal de RTP



ZnS on SiO₂, irradié à 2μm, 12ns



*HR@1064nm irradié avec 200 impulsion 1064nm, 14ns, 140J/cm²



**Evolution de l'absorption HR EBD irradié à 514nm

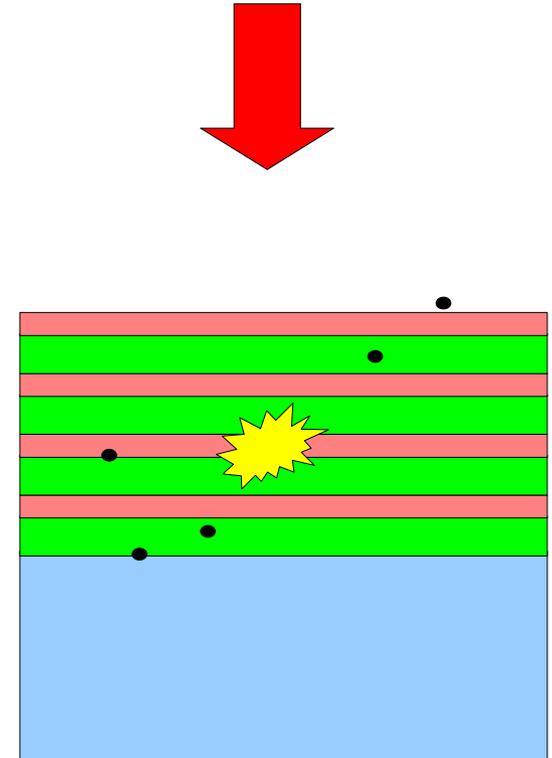
*D. Ristau et al., « *Laser damage thresholds of optical coatings* », Thin Solid Films, 2009

**R. Chow et al., « Absorptance behavior of optical coatings for high-average-power laser applications », Appl. Opt. 2000

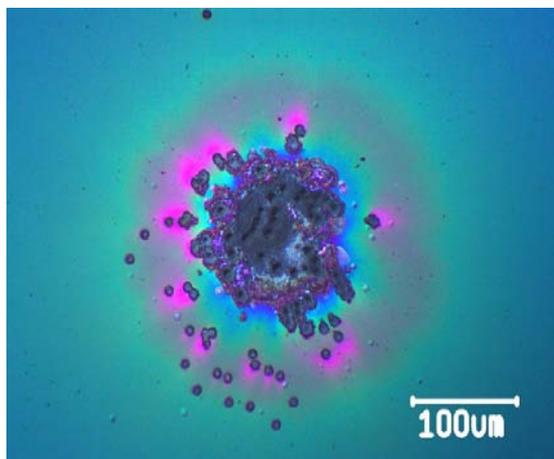
Mécanismes physiques mis en jeux

Défauts

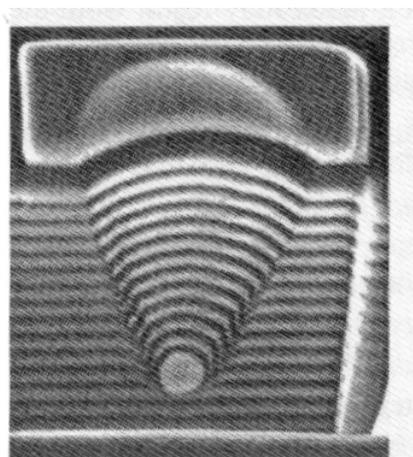
- Défauts intrinsèques ou extrinsèques
- Centres privilégiés d'absorption
- Création de sur-intensifications locales du champ électrique
- Echauffement localisé
- Amorçage d'un plasma
- Rupture mécanique
- Comportement statistique du seuil d'endommagement



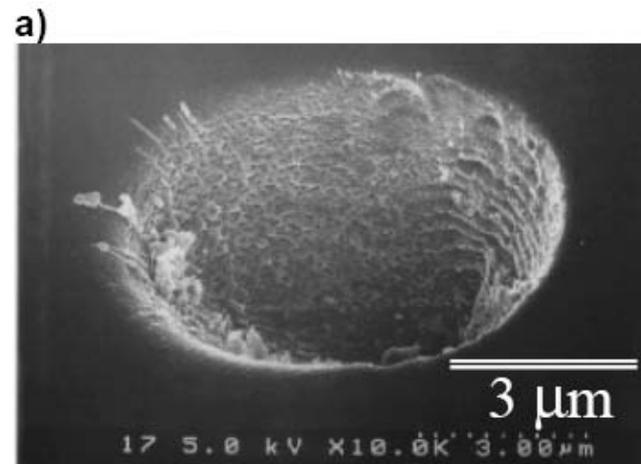
Quelques exemples...



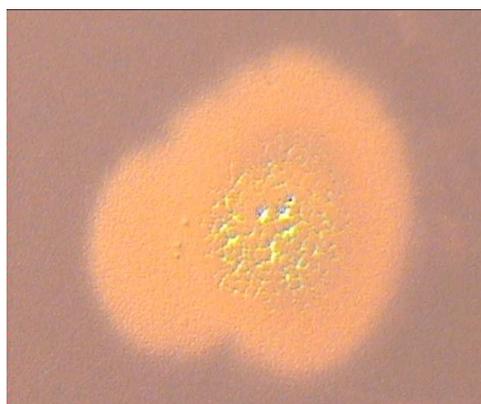
*17J/cm², 1000 impulsions à 1064nm, 14ns



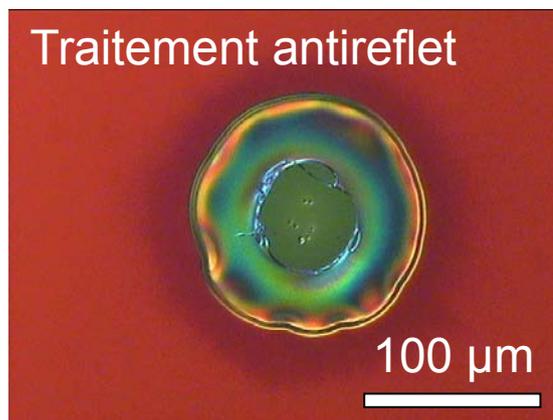
(a)
**nodule dans HfO₂/SiO₂



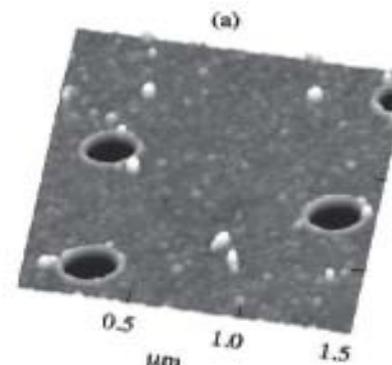
a)
**nodule après 1 tir à 47J/cm², 1064nm, 3ns



BaF₂ EBD irradiée avec 1 impulsion 2µm, 12ns



Traitement antireflet



(a)
***HfO₂/SiO₂ après 1 tir 351nm, 3ns

*D. Ristau et al., « *Laser damage thresholds of optical coatings* », Thin Solid Films, 2009

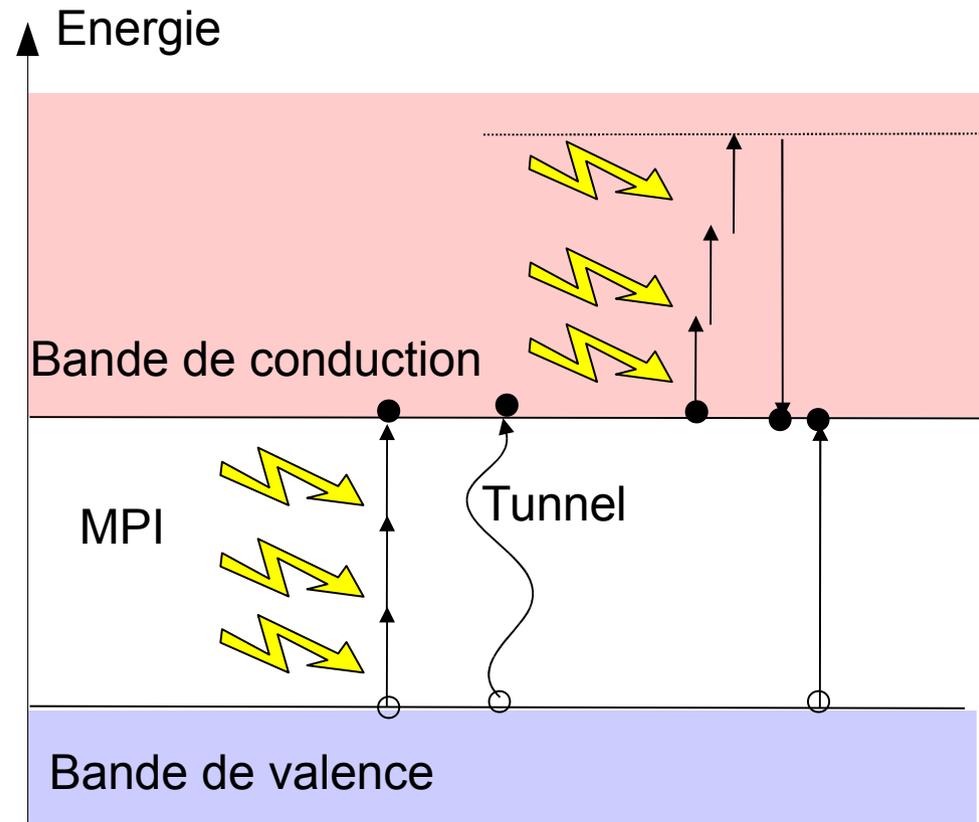
**F. Génin et al., « *Morphologies of laser-induced damage in hafnia-silica multilayer mirror and polarizer coatings* », SPIE 1996

***S. Papernov et al., « *Localized absorption effects during 351 nm, pulsed laser irradiation of dielectric multilayer thin films* », J. Appl. Phys. 1997

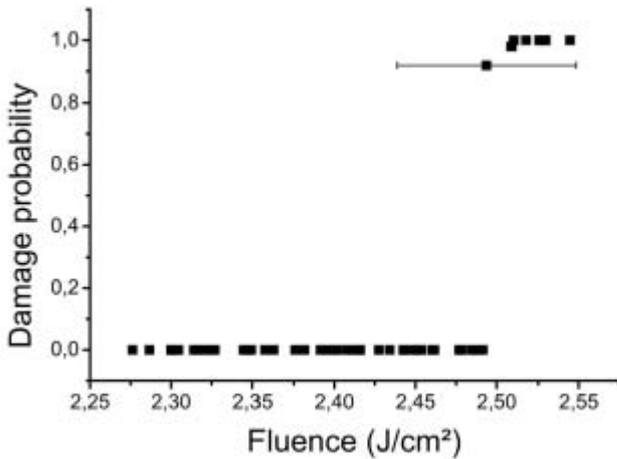
Mécanismes physiques mis en jeux

Effets électroniques

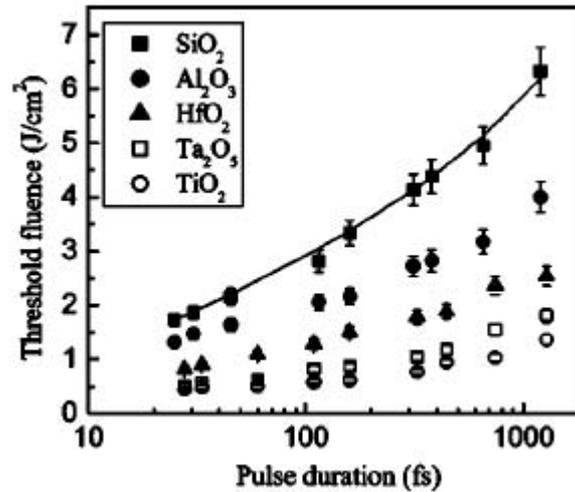
- Régime sub-ps
- Photo-Ionisation du matériau et avalanche électronique
- Découplage Absorption / transferts d'énergies / dommage macroscopique
- Seuil inhérent au matériau (largeur de bande interdite)
- Faible sensibilité aux défauts



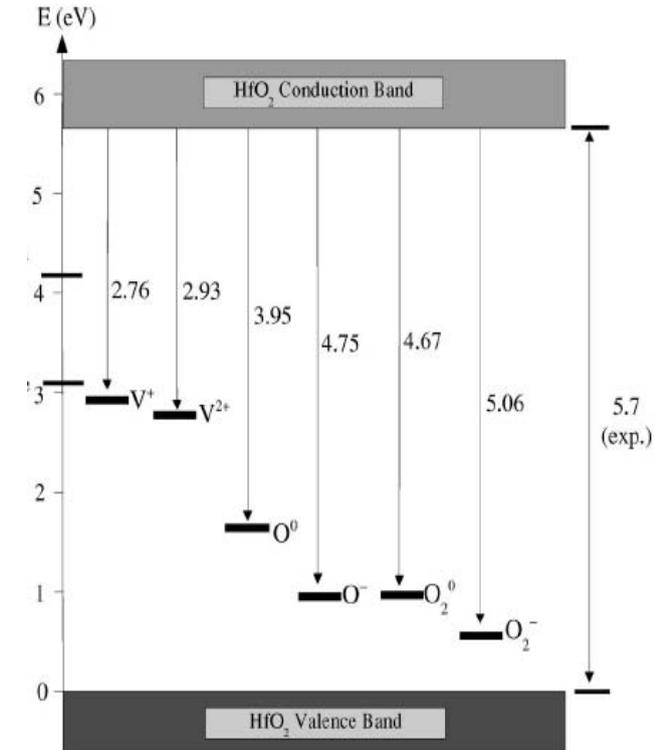
Quelques exemples...



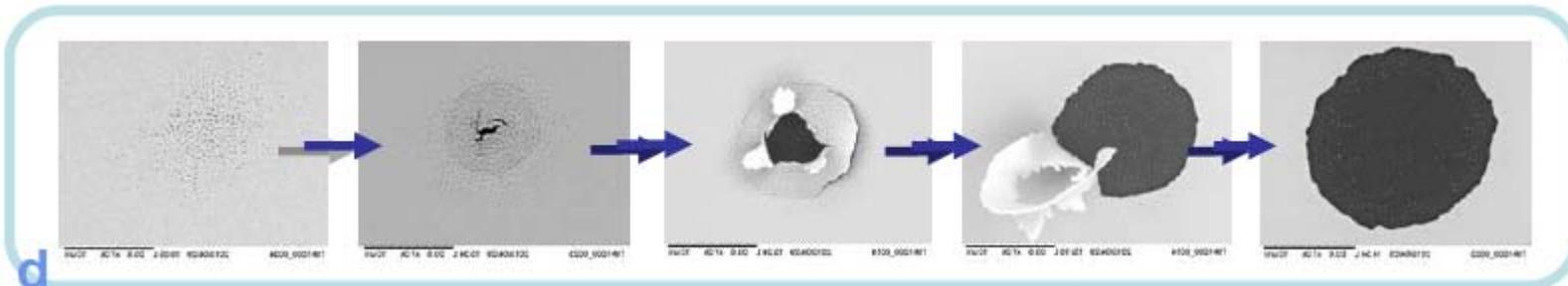
Mangote et al., cf Poster



Méro et al., « *Scaling laws of femtosecond laser pulse induced breakdown in oxide films* », Phys. Rev. B 2005



Foster et al., « *Vacancy and interstitial defects in hafnia* », Phys. Rev. B 2002



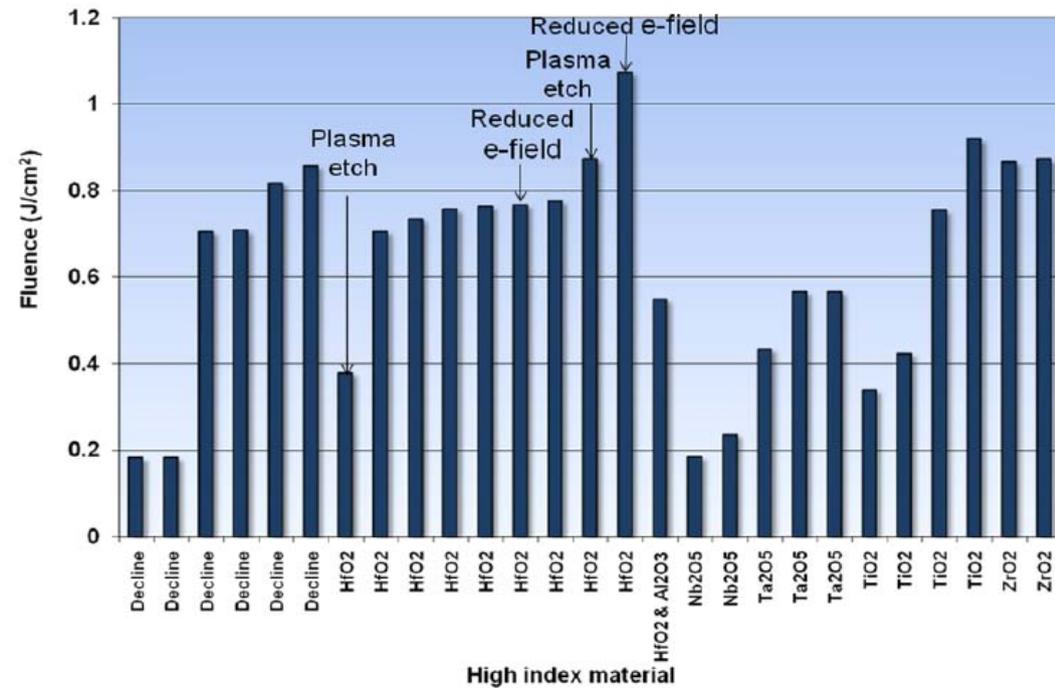
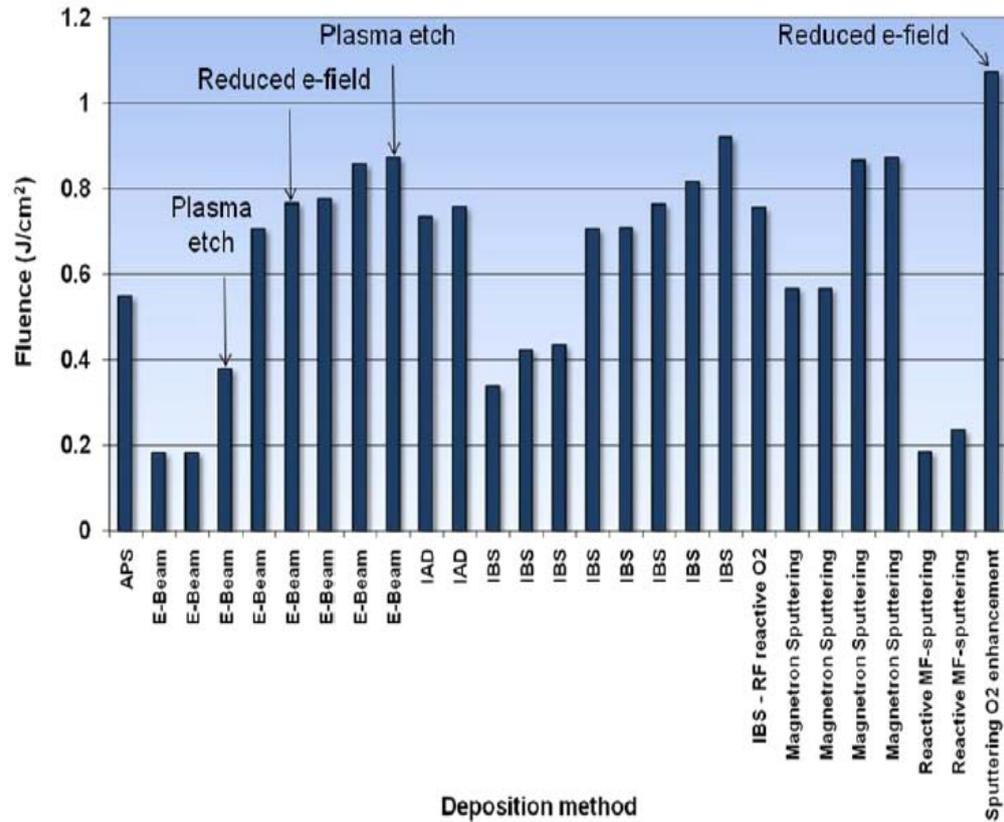
Couche de HfO₂ soumise à des fluences croissantes (500fs, 1030nm, 1 tir/site)

Matériaux et design

- Le choix du matériau et des conditions de fabrication ont eu influence majeure :
 - Propriétés optiques, thermiques, mécaniques
 - Défauts, stoechiométrie
 - Structure, densité
 - Substrat, polissage, nettoyage
 - ...
- Il existe des structures adaptées permettant de :
 - Réduire le champ aux interfaces, éliminer les discontinuités
 - Diminuer le champ dans la couche « faible »
 - Protéger l'empilement des interaction avec l'environnement
 - ...

Matériaux et design

- Exemple : R-max (99,5%) à 800nm testé à 200 fs :



Influence des conditions d'utilisation

- Paramètres d'irradiation :
 - Durée d'irradiation
 - Nombre de tirs, fréquence de répétition
 - Longueur d'onde
 - ...
- Conditions environnementales :
 - Pression
 - Température
 - Contamination
 - Nettoyage
 - Stockage
 - ...

Plan de l'exposé

- Introduction
- La problématique de l'endommagement dans les couches minces optiques :
 - Mécanismes physiques mis en jeux
 - Importance des matériaux, techniques de fabrication, design en fonction de l'application
 - Influence des conditions d'utilisation
- Traitement de quelques points spécifiques :
 - Modélisation de l'endommagement en régime d'impulsion « longues »
 - Modélisation de l'endommagement en régime ultracourt

TFL des couches minces optiques à l'Institut Fresnel

- Problématique : complexité des matériaux et des structures (influence des paramètres de dépôt, des conditions d'utilisation)
- Objectif des études : améliorer la compréhension des phénomènes mis en jeux pour améliorer la tenue au flux laser des traitements



Equipe Couches
Minces Optiques

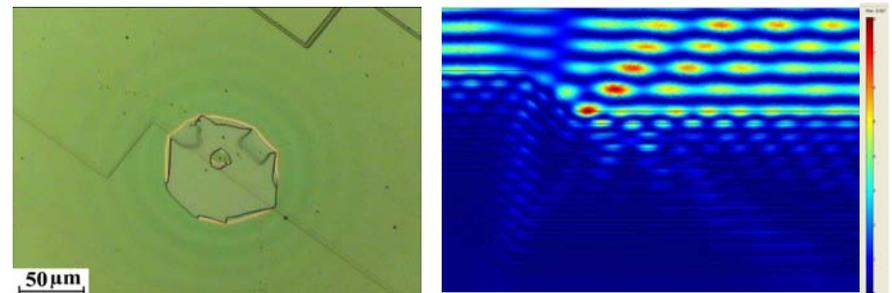
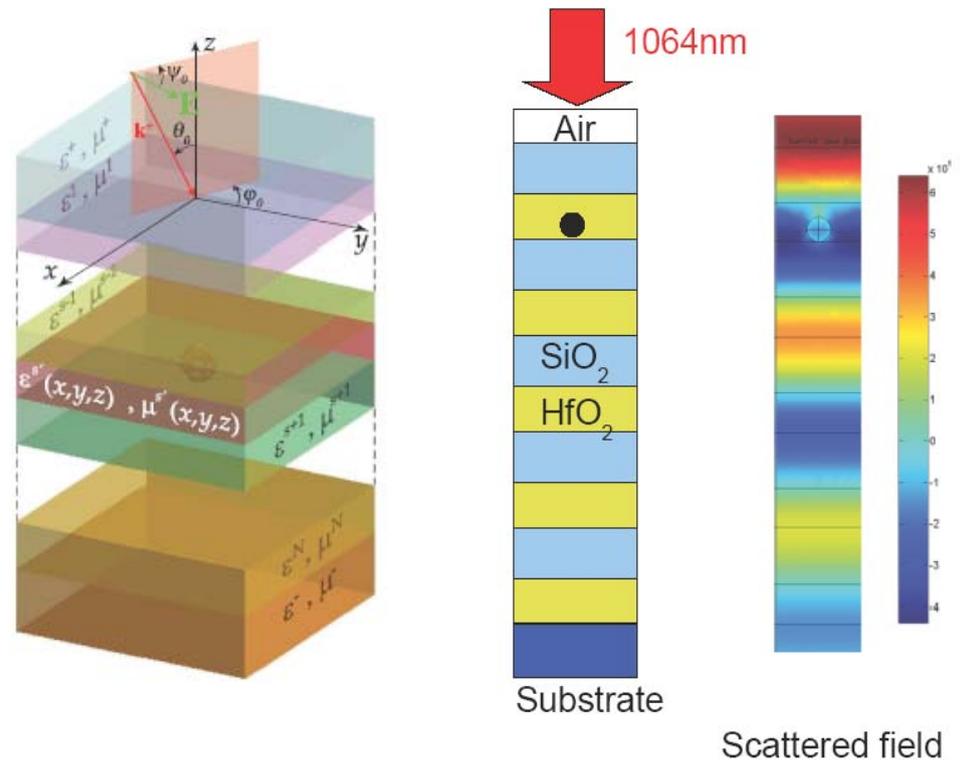


Modélisation de l'endommagement en régime d'impulsions « longues »

- Initiation sur des défauts micro/nanométriques inclus dans la structure
- Géométries complexes des composants
- Différents phénomènes physiques impliqués
- Objectifs : construire un modèle 3D permettant de calcul des champs et des élévations de température transitoires dans des structures arbitraires

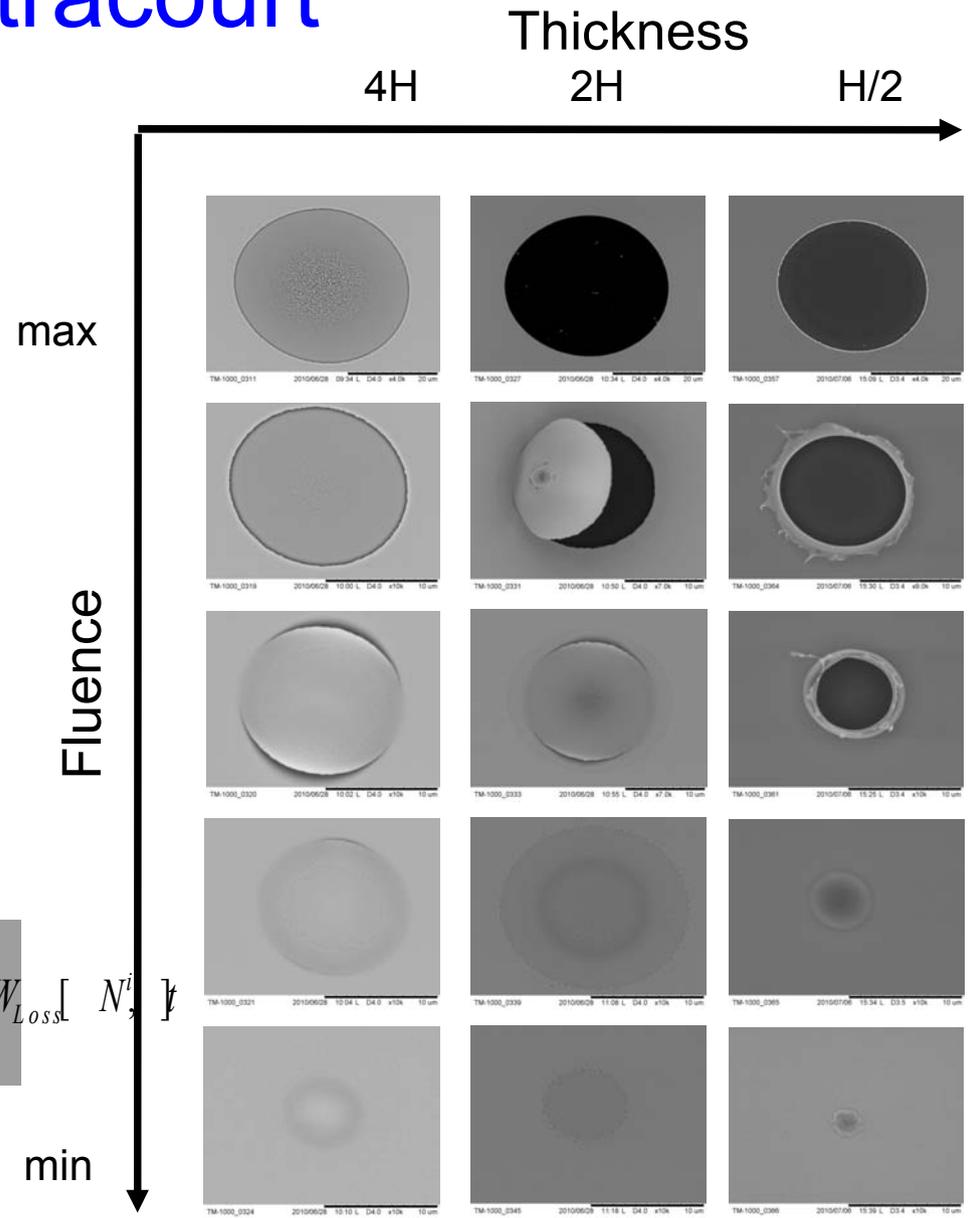
G. Demésy et al., "Tridimensionnal multi-physics model for the study of photoinduced thermal effects phenomena in arbitrary nanostructures", soumis

Thèse Xinghai Fu (2012)



Modélisation de l'endommagement en régime ultracourt

- L'endommagement résulte de processus électroniques (PI et Avalanche) *ie* dépendant de la valeur locale du champ électrique
- Objectifs : développer des modèles adaptés au cas des couches minces optiques *ie* tenant des effets interférentiels et transitoires



$$\frac{dN(z)}{dt} = W_{PI}^i[E(z,t), N^i] - W_{AV}^i[E(z,t), N^i] + W_{LOSS}^i[N^i]$$

L. Gallais et al., « *Transient interference implications on the subpicosecond laser damage of multielectrics* », Appl. Phys. Lett., 2010

Thèse Benoît Mangote (2011)

Couche de Ta₂O₅ irradiée à 500fs, 1030nm

Bibliographie

- Articles de revue ou de synthèse sur la TFL des couches minces :
 - Damage resistant laser coatings*, M. Kozlowski, Thin Film for optical Coatings (1995)
 - Laser resistant coatings*, C. Stolz, F. Génin, Optical Interference Coatings, Kaiser and Pulker (2003)
 - Review of structural influences on the laser damage thresholds of oxide coatings*, Hacker & al, Boulder 1995
- Actes de la conférence « **Boulder Laser Damage Symposium** »
- Formation du Réseau Optique et Photonique « **Tenue au flux laser des composants optiques** » (www.rop.cnrs.fr)
- **Métrieologie de l'endommagement laser**, L. Gallais, Techniques de l'ingénieur, R6738