



Métrologie Optique et Instrumentation, Ecole Technologique du réseau Optique
et Photonique, 21/01/2021

Métrologie de la Tenue au Flux Laser

Laurent Gallais¹

laurent.gallais@fresnel.fr

¹Aix-Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249,
13013 Marseille, France

Plan de la présentation

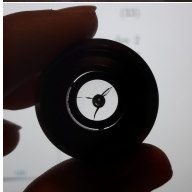
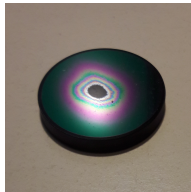
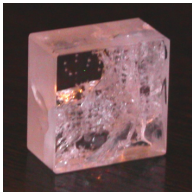
- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt
- 4 Détection de dommages laser
- 5 Tests de TFL
- 6 Conclusions

Plan de la Présentation

- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt
- 4 Détection de dommages laser
- 5 Tests de TFL
- 6 Conclusions

Introduction

Quelques Exemples



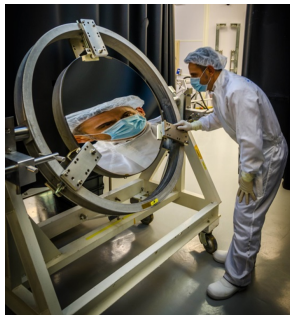
Introduction

Tenue au Flux Laser des Composants Optiques

Endommagement Laser

Modification irréversible du matériau sous flux laser

- Principale limitation des chaînes laser de puissance
- Nécessité de tester, qualifier les composants avant utilisation
- La métrologie de la TFL est la base des développements et optimisation des composants



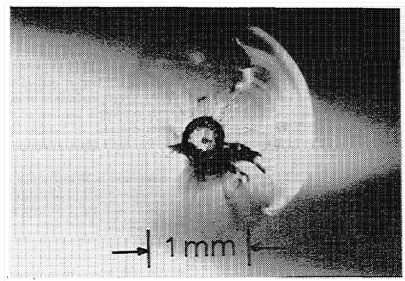
Parabole hors d'axe pour Laser PW¹

¹A. Hervy et al. "Femtosecond laser-induced damage threshold of electron beam deposited dielectrics for 1-m class optics". In: *Optical Engineering* 56.1 (2017), p. 011001.

Introduction

Contexte historique

- L'endommagement laser et sa mesure est étudié depuis l'apparition des lasers^{2,3}
- La thématique est étroitement liée au développement des sources lasers et de leurs applications⁴



Endommagement dans le volume d'un verre amplificateur provoqué par une inclusion de platine⁵

³ M. Hercher. "Laser-induced damage in transparent media". In: *JOSA* 54 (1964), p. 563.

⁴ C. Giuliano. "Laser-induced damage to transparent dielectric materials". In: *JOSA* 54 (1964), p. 1400.

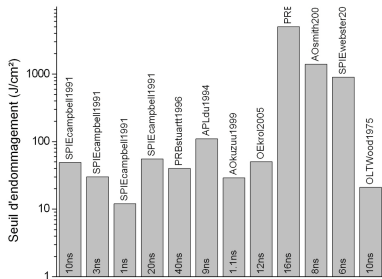
⁵ SPIE Laser Damage 1968-2020

⁶ C. G. Young and R. F. Woodcock. "Damage in Laser Glass". In: *ASTM STP* 469 (1969).

Introduction

Problématique

- L'endommagement est lié à la méthode d'observation et à des critères qui peuvent être subjectifs.
- La mesure est destructive
- Les composants ne sont pas identiques
- Le résultat dépend de la méthode de test
- De multiples paramètres physiques interviennent dans le processus (liés au matériau, au laser ou à l'environnement)

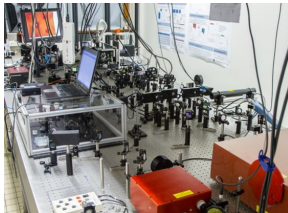
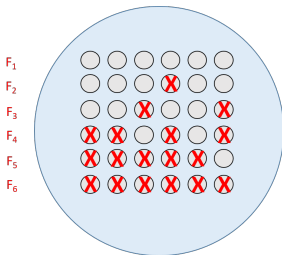


Seuils d'endommagement relevés dans la littérature pour la silice (1064 nm, 1-40 ns)

Introduction

Mesure de la Tenue au Flux Laser

La Tenue au Flux Laser (TFL) est évaluée par différents types de mesures statistiques effectuées sur des échantillons tests, sur des bancs dédiés, dans des conditions les plus contrôlées et maîtrisées possibles.



Les tests reposent sur des normes⁷ ou des procédures développées pour répondre à des besoins spécifiques.

⁷ Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai du seuil d'endommagement provoqué par laser. 2011.

Plan de la Présentation

- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser**
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt
- 4 Détection de dommages laser
- 5 Tests de TFL
- 6 Conclusions

Physique de l'interaction laser/matière

L'endommagement laser résulte du couplage de l'énergie laser dans le matériau et d'une succession de processus physiques résultants

1 Absorption

- linéaire
- non-linéaire
- localisée (défauts)

2 Transferts d'énergie

- Relaxation électronique
- Diffusion de la chaleur
- Plasma

3 Réponse du matériau

- Changements de phase
- Hydrodynamique, ondes de choc
- Contraintes mécaniques

4 Endommagement

- Fracturation
- Ablation
- etc...

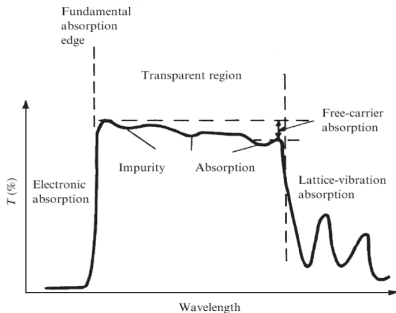
fs

ps

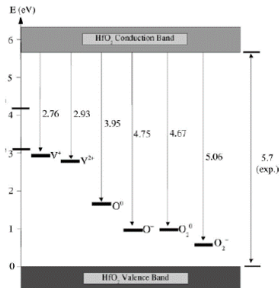
ns

 μ s

Absorption Intrinsèque



Courbe de transmission d'un diélectrique

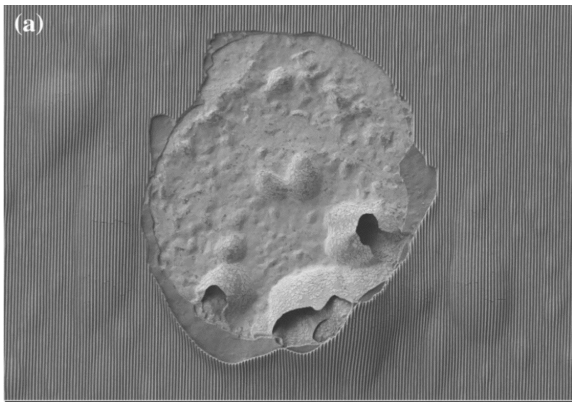


Défauts électroniques dans du HfO_2 ⁸

Les effets thermiques liés à l'absorption ont des conséquences néfastes bien avant l'endommagement.

⁸A. S. Foster et al. "Vacancy and interstitial defects in hafnia". In: *Physical Review B* 75 (2002), p. 174117.

Exemple

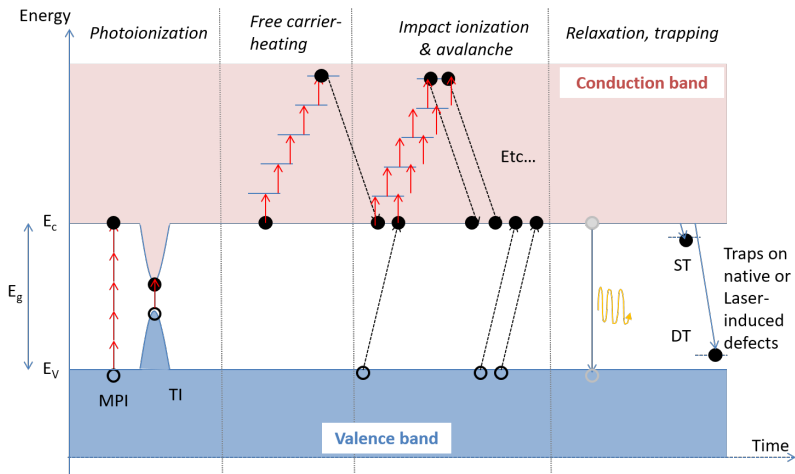


Endommagement d'un réseau multidiélectrique en régime CW⁹

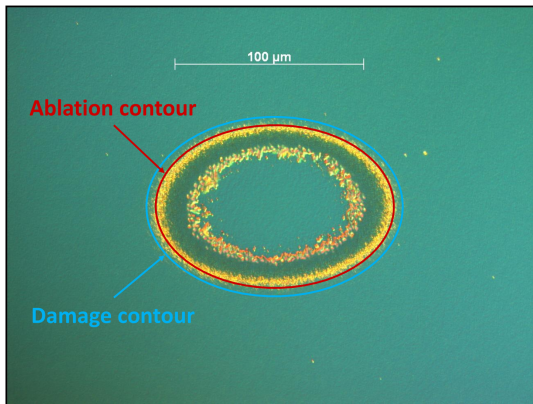
⁹ J. Xu et al. "Continuous-wave laser damage mechanism of a spectral combining grating". In: *Applied Optics* 58 (2019), p. 2551.

Absorption non-linéaire

Processus d'ionisation à forte intensité :



Exemple



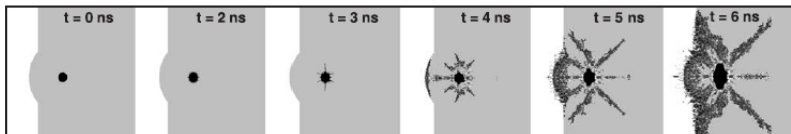
Domage sur un traitement HR à 1053 nm, 500 fs¹⁰

¹⁰A. Ollé et al. "Implications of laser beam metrology on laser damage temporal scaling law for dielectric materials in the picosecond regime". In: *Review of Scientific Instruments* 90 (2019), p. 073001.

Absorption localisée

Un défaut absorbant, même nanométrique, peut entraîner une absorption significative d'énergie.

- Au delà d'un certain seuil, l'énergie accumulée peut entraîner un processus aboutissant à un dommage macroscopique.

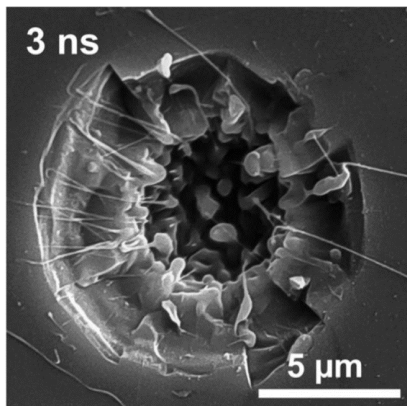


Simulation de la fracturation dans de la silice contenant une inclusion métallique, illuminée par un laser UV ns¹¹

L'endommagement s'initie généralement sur des points faibles de l'optique.

¹¹F. Bonneau et al. "Numerical simulations for description of UV laser interaction with gold nanoparticles embedded in silica". In: *Applied Physics B* 78 (2004), p. 447.

Exemple



Domage en face arrière d'un verre de silice (3 ns/351 nm)¹²

¹²M. Veinhard et al. "Parametric study of laser-induced damage growth in fused silica optics with large beams at 351 nm." In: *Applied Optics* 59 (2020), p. 9543.

Autres processus à considérer

- Effets de fatigue ou incubation sous tirs multiples
- Contamination induite sous flux laser
- Effets non-linéaires (autofocalisation, SBS,...)
- Croissance des dommages sous exposition multiple
- Etc...

Implications pour la métrologie de la TFL

- Caractère "probabiliste" lié à la participation de défauts au mécanisme d'endommagement
- Effet de la taille du faisceau relativement à la densité de ces défauts et à la dimension des optiques
- Diversité des situations à prendre en compte (Critère d'endommagement pour la détection des dommages)
- Nombre de tirs représentatifs de l'application (et fréquence de répétition)
- Connaissance précise des paramètres lasers (forme temporelle et spatiale)
- Conditions environnementales contrôlées

Plan de la Présentation

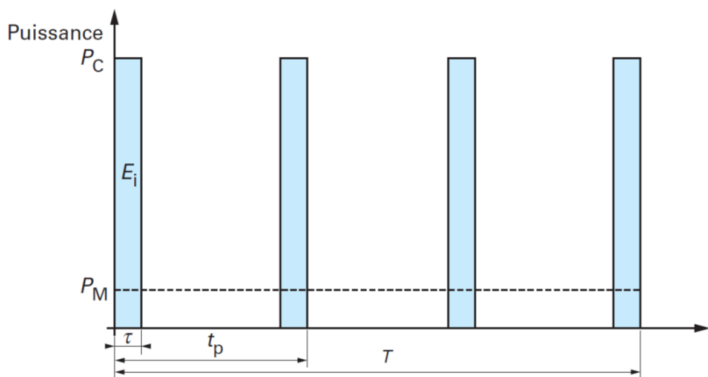
- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt**
- 4 Détection de dommages laser
- 5 Tests de TFL
- 6 Conclusions

Paramètres lasers

Les paramètres principaux à prendre compte pour mesurer les effets d'une irradiation laser sur un composant optique sont principalement:

- La longueur d'onde
- Le profil temporel de l'irradiation
- Le nombre de tirs et la fréquence
- Le profil spatial du faisceau
- Les caractéristiques énergétiques

Caractéristiques énergétiques d'un train d'impulsion



P_C : Puissance crête
 E_i : Énergie par impulsion
 P_M : Puissance moyenne
 τ : Durée d'une impulsion

T : Durée d'irradiation
Énergie totale : $P_M \times T$
 $1/t_p$: Fréquence d'irradiation

Grandeurs énergétiques

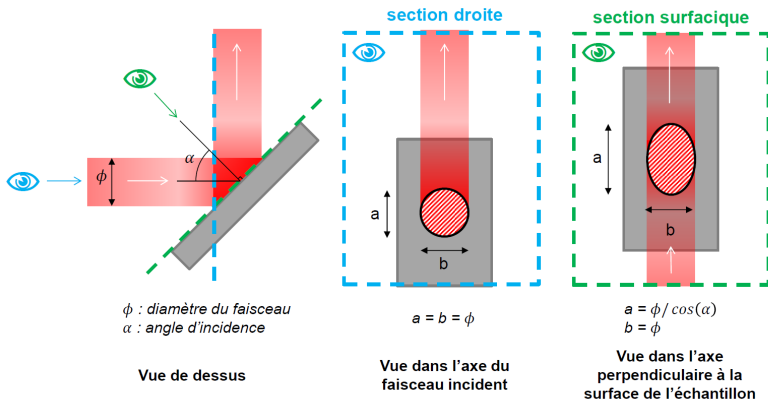
- Densité d'énergie par unité de surface : $F = \frac{E_i}{S} (J.m^{-2})$
- Densité de puissance maximale $I = \frac{F}{\tau} = \frac{P_c}{S} (W.m^{-2})$
- Densité de puissance moyenne $I_m = \frac{P_m}{S} (W.m^{-2})$
- Densité de puissance linéique $P_l = \frac{P_m}{R} (W.m^{-1})$

Grandeurs d'intérêt

- Laser CW ou longues durées d'impulsions ($>ms$). La puissance moyenne est la grandeur d'intérêt et on utilisera:
 - La densité de puissance moyenne, I_m , si $t < \frac{R^2}{D}$ ¹³
 - La densité de puissance linéique, P_l , si $t > \frac{R^2}{D}$
- Laser à impulsions longues ($ns - \mu s$). La quantité d'énergie déposée gouverne le mécanisme et l'unité pertinente est la Fluence, F.
- Laser à impulsions courtes ($fs - ps$). Les puissances crêtes élevées conduisent à l'ionisation du matériau qui dépend de l'intensité maximale, I. C'est cependant la quantité d'énergie déposée et donc la fluence qui conduit à l'endommagement.
 - Dans le cas de lasers MHz on se rapproche du régime CW

¹³avec R le rayon du faisceau et D la diffusivité thermique du matériau, en m^2s^{-1}

Densité en section droite vs densité surfacique



Mesures énergétiques

- **Energie** : Mesure à partir d'un détecteur pyroélectrique sur une voie de prélèvement (réflexion sur un composant, fuite d'un miroir).
- **Puissance** : Mesure à partir d'une photodiode étalonnée à partir d'un calorimètre plein faisceau.

Profil spatial

La dimension du faisceau est critique et doit être spécifiée lors d'un test de TFL

La mesure est réalisée à l'aide d'un capteur matriciel (CCD, CMOS, microbolomètre) soit:

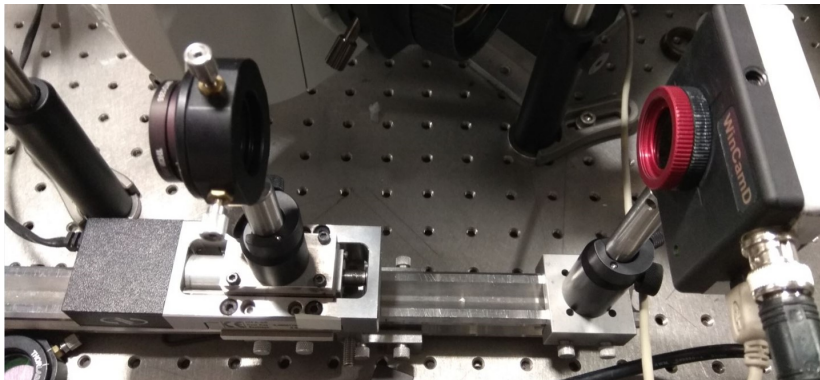
- sur un plan équivalent à celui du composant
- à la place du composant avant le test

A partir de cette acquisition on peut déterminer la **surface effective** du faisceau définie comme:¹⁵

$$S_{eff} = \frac{E_{tot}}{F_{max}}$$

¹⁵Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai du seuil d'endommagement provoqué par laser.

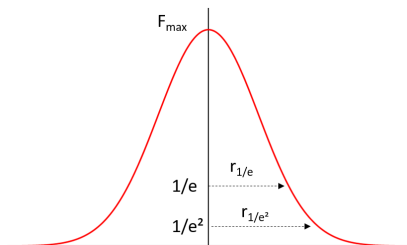
Profil spatial-acquisition



Acquisition du profil du faisceau au foyer d'une lentille

Profil spatial

Cas d'un faisceau Gaussien



Définition des rayons à $1/e$ et $1/e^2$

Dans le cas d'un faisceau Gaussien la surface effective s'exprime :

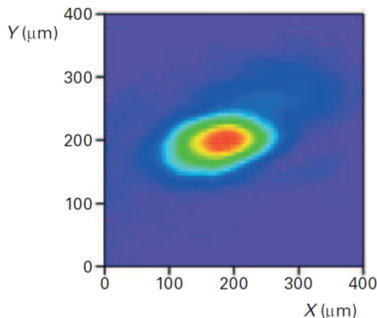
$$F_{max} = \frac{E}{\pi w_{1/e}^2} = \frac{E}{S_{eff}}$$

et

$$S_{eff} = \pi w_{1/e}^2 = \frac{1}{2} \pi w_{1/e^2}^2$$

Profil spatial

Cas d'un faisceau quelconque



Profil 2D d'un faisceau issu d'un laser Nd:YAG à 355 nm, focalisé par une lentille de focale 1 m

$$E^N = \alpha \sum_{ij} V_{ij}$$

$$F_{max}^N = \alpha \frac{\max(V_{ij})}{S_{pix}}$$

avec V_{ij} la valeur du pixel à la position (i,j) , S_{pix} la surface effective d'un pixel

$$S_{eff} = \frac{E^N}{F_{max}^N}$$

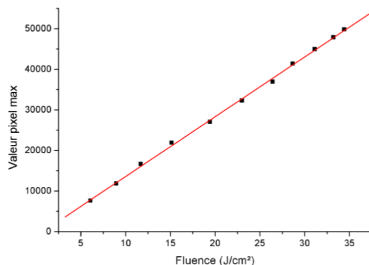
- $S_{eff} = 8,82 \times 10^{-2} \text{ mm}^2$
- $R_{eff} = 0,168 \text{ mm}$

Profil spatial

Mesure

Quelques éléments à prendre en compte pour la mesure du profil du faisceau

- Bruit du système d'acquisition
- Calibration de la taille élémentaire d'un pixel
- Linéarité du détecteur
- Position du plan de mesure
- Effet de l'atténuation du faisceau



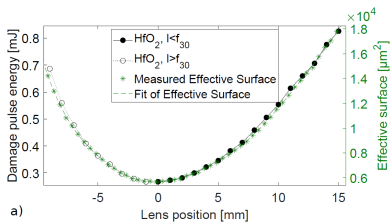
Exemple de calibration de la valeur maximale du pixel en fonction de la fluence.

Profil spatial

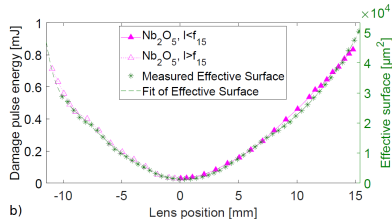
Implications pour la métrologie

Expériences pour étudier l'influence de la taille du faisceau sur le seuil de tenue au flux de couches minces de diélectriques¹⁶

- 500 fs, 1030 nm, 1 on 1
- mesures de surface effective à différentes positions d'une lentille



Couche de HfO_2

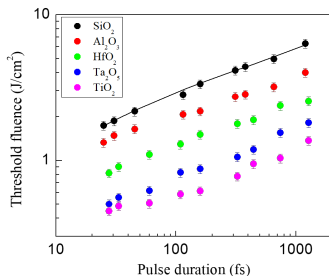
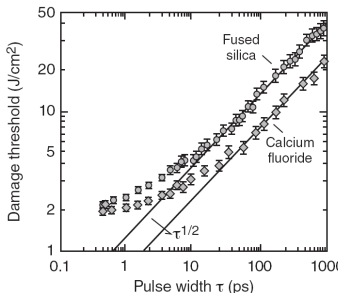


Couche de Nb_2O_5

¹⁶Thèse M. Stehlik

Profil temporel

Importance de la durée d'impulsion



Dépendances mesurées pour la silice et le CaF_2 à 1053 nm.¹⁷

Dépendances mesurées pour des couches d'oxydes à 800 nm.¹⁸

¹⁷ B. C. Stuart et al. "Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics". In: *Physical Review B* 53 (1996), p. 1749.

¹⁸ M. Mero et al. "Scaling laws of femtosecond laser pulse induced breakdown in oxide films". In: *Physical Review B* 71 (1996), p. 114109.

Profil temporel

Mesure

On peut distinguer :

- Les mesures directes dans le domaine nanoseconde
ex: photodiode + oscilloscope
- Les mesures indirectes dans le domaine subpicoseconde
ex: autocorrélateur

La durée d'impulsion est spécifiée par :

- sa durée effective¹⁹

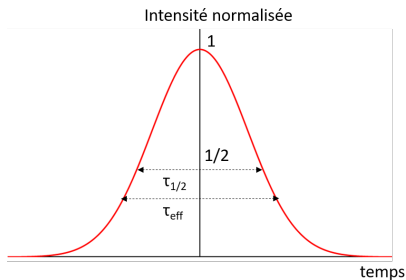
$$\tau_{eff} = \frac{E}{P_c} = \frac{\int_0^{\infty} P(t)dt}{P_c}$$

- ou sa durée à mi-hauteur

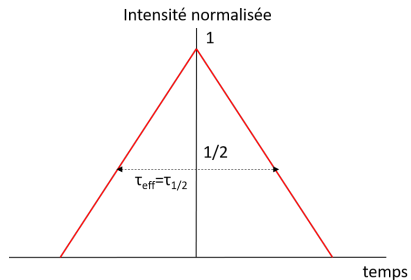
¹⁹Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai du seuil d'endommagement provoqué par laser.

Profil temporel

Cas de profils simples



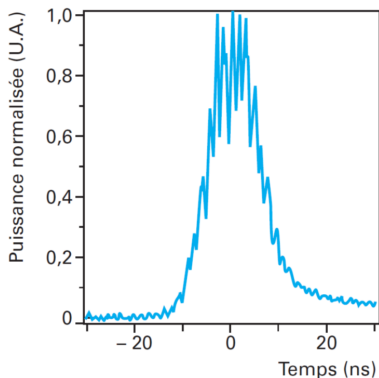
Cas d'un profil temporel Gaussien



Cas d'un profil temporel "triangle"

Profil temporel

Cas d'un profil réel



- Durée à mi-hauteur : 10,3 ns
- Durée à $1/e$: 12,3 ns
- Durée à $1/e^2$: 22,1 ns
- Durée effective : 12,7 ns

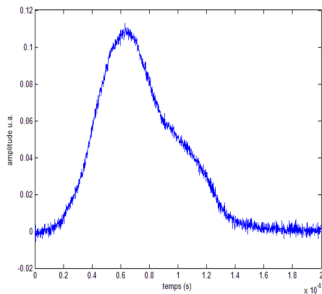
*Profil temporel mesuré pour un laser
Nd:YAG multimode longitudinal*

Profil temporel

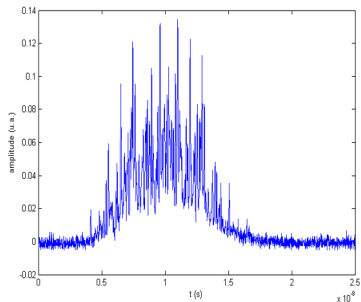
Mesures temporelles directes

Pour des mesures directes, la bande passante de la chaîne de mesure doit être suffisamment élevée pour caractériser le profil.

Exemples de mesures à 15 GHz pour un laser YAG²⁰



Cas d'un profil temporel monomode longitudinal



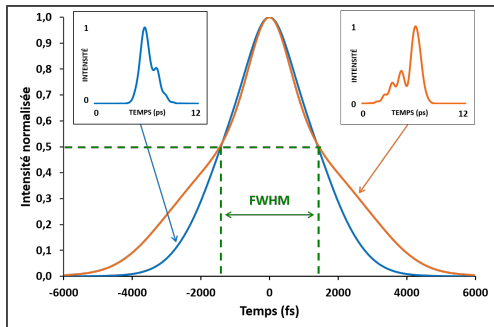
Cas d'un profil temporel multimode longitudinal

²⁰R. Diaz et al. "Influence of longitudinal mode beating on laser-induced damage in fused silica". In: *Optics Letters* 39 (2014), p. 674.

Profil Temporel

Mesures temporelles indirectes

La caractérisation d'une durée d'impulsion par autocorrélation est limitée.
Exemple d'une mesure par autocorrélateur²¹ :



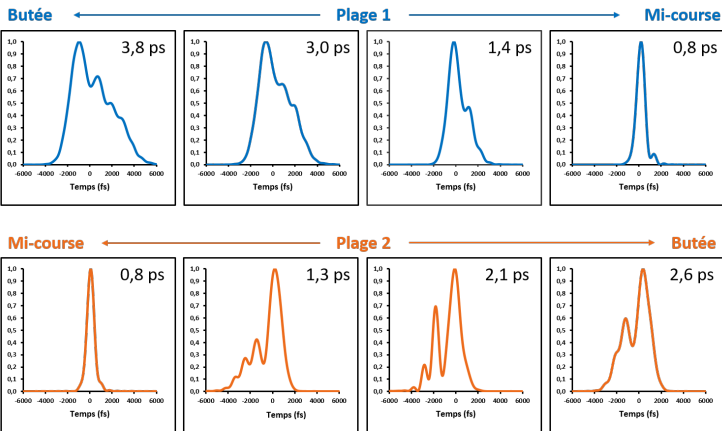
Comparaison de mesures par autocorrélateur et de profils obtenus par mesure de phase spectrale

²¹Ollé et al., "Implications of laser beam metrology on laser damage temporal scaling law for dielectric materials in the picosecond regime".

Profil Temporel

Implication pour la métrologie

Expériences réalisées avec le diagnostic SPIRITED du CEA CESTA²²

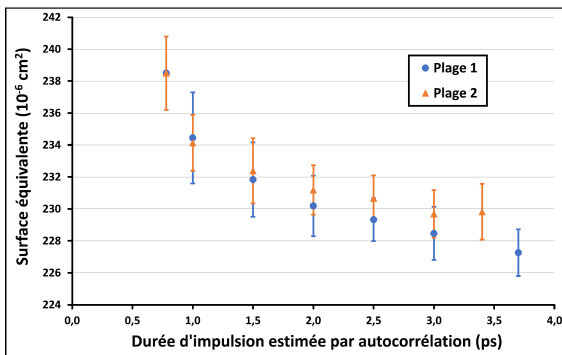


²²D. Bigourd et al. "Direct spectral phase measurement with Spectral Interferometry Resolved in Time Extra Dimensional". In: *Review of Scientific Instruments* 81 (2010), p. 053105.

Profil Temporel

Implication pour la métrologie

Prise en compte de l'évolution du profil spatial avec la durée de l'impulsion²³ :

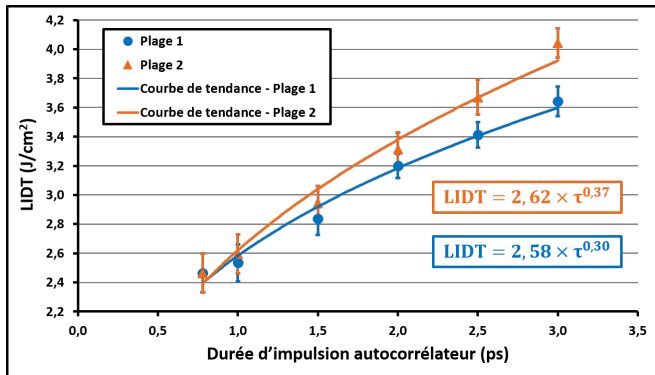


²³Ollé et al., "Implications of laser beam metrology on laser damage temporal scaling law for dielectric materials in the picosecond regime".

Profil Temporel

Implication pour la métrologie

Lois d'échelles temporelles expérimentales sur miroir $\text{HfO}_2/\text{SiO}_2$ ²⁴



²⁴Ollé et al., "Implications of laser beam metrology on laser damage temporal scaling law for dielectric materials in the picosecond regime".

Budget d'incertitude

Incertitudes absolues des appareils

- Etalonnage détecteur pyroélectrique ou calorimètre $\sigma_E \approx 1\%$
- Surface effective d'un pixel $\sigma_{pix} \approx 1 - 5\%$

Incertitudes relatives liées aux fluctuations de la source:

- les fluctuations d'énergie E: E_{moy} et σ_E
- les fluctuations de la durée: τ_{moy} et σ_τ
- les fluctuations de surface: S_{moy} et σ_S

Exemple (banc sub-ps IF): $\sigma_E = 0.4\%$, $\sigma_\tau = 0.4\%$, $\sigma_S = 1\%$

Autres incertitudes:

- positionnement échantillon
- densités optiques
- etc...

Plan de la Présentation

- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt
- 4 Détection de dommages laser**
- 5 Tests de TFL
- 6 Conclusions

Détection de dommages

Il est nécessaire de définir ce qu'est un dommage et la façon de le détecter.

La norme ISO le définit comme²⁵:

Toute modification visible sous un microscope à contraste interférentiel avec un grossissement de X100 au minimum.

Certains protocoles de tests utilisent néanmoins d'autres critères, par exemple "Uniquement les dommages présentant de la croissance sous tirs multiples".

On distingue pour cette détection :

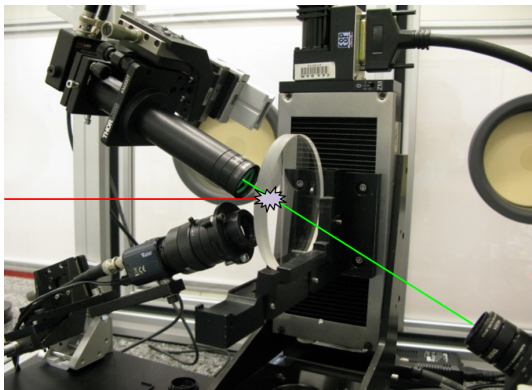
- Les observations post-mortem
- Les systèmes de détection temps réel

²⁵ Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai du seuil d'endommagement provoqué par laser.

Détection de dommages

Détection temps réel

Les méthodes les plus couramment employées sont basées sur des mesures de diffusion



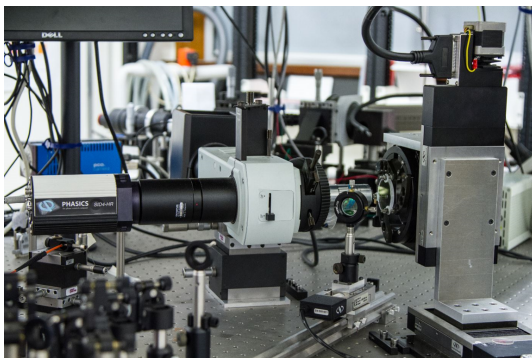
Exemple du système de détection de l'installation DERIC du CEA CESTA²⁶

²⁶Thèse M. Sozet, 2016

Détection de dommages

Détection temps réel

La microscopie in situ permet de détecter et d'acquérir des données sur l'évolution des dommages



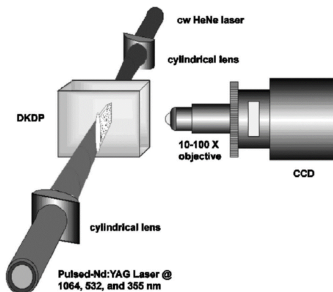
Exemple du système d'observation in-situ d'un banc de l'IF²⁷

²⁷ B. Mangote et al. "A high accuracy femto-/picosecond laser damage test facility dedicated to the study of optical thin films". In: *Review of Scientific Instruments* 83 (2012), p. 013109.

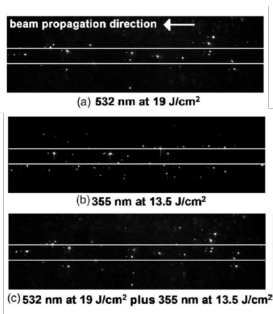
Détection de dommages

Détection temps réel

La microscopie in situ peut également être appliquée à l'étude de dommages dans le volume²⁸



Dispositif permettant d'initier et caractériser des dommages dans le volume de cristaux non-linéaires



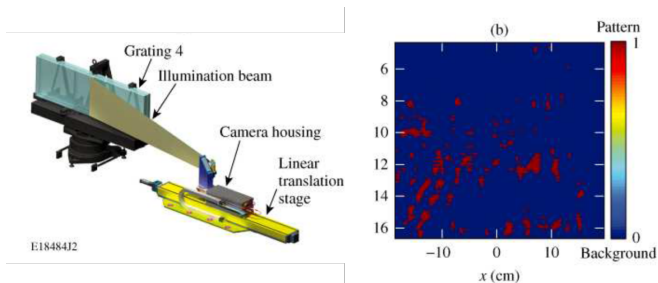
Observation en fond noir des populations de dommages induits dans différentes conditions de tir (ns)

²⁸P. DeMange et al. "Differentiation of defect populations responsible for bulk laser-induced damage in potassium dihydrogen phosphate crystals". In: *Optics Express* 45 (2006), p. 104205.

Détection de dommages

Détection in situ

Certaines installations laser sont équipés d'une détection de dommage in situ pour les composants les plus sensibles



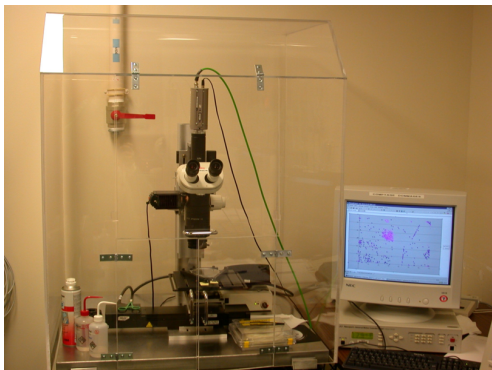
Exemple du système d'observation d'un réseau de compression sur OMEGA EP²⁹

²⁹ J. Qiao et al. "In situ detection and analysis of laser-induced damage on a 1.5-m multilayer-dielectric grating compressor for high-energy, petawatt-class laser systems". In: *Optics Express* 18 (2010), p. 10423.

Détection de dommages

Observations post-mortem

Un système de détection automatisé peut permettre d'effectuer une cartographie des dommages et de leur associer une fluence de tir.

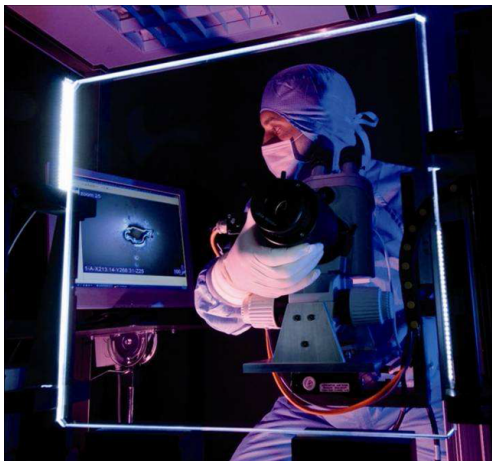


Exemple d'un système d'observation ex-situ du CEA CESTA³⁰

³⁰L. Laignère et al. "An accurate, repeatable, and well characterized measurement of laser damage density of optical materials". In: *Review of Scientific Instruments* 78 (2007), p. 103105.

Détection de dommages

Observations post-mortem

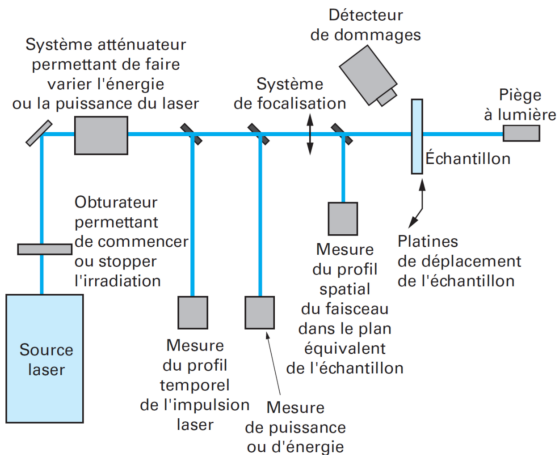


Exemple d'un système d'observation ex-situ du CEA CESTA

Plan de la Présentation

- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt
- 4 Détection de dommages laser
- 5 Tests de TFL**
- 6 Conclusions

Banc de test de TFL

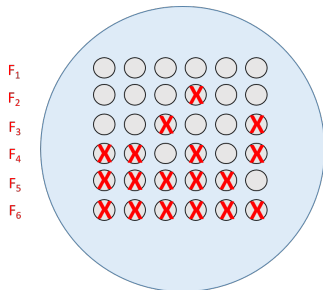


Configuration typique d'un banc d'endommagement laser

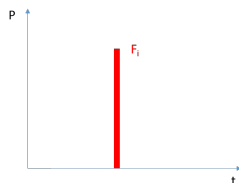
1 on 1

Principe

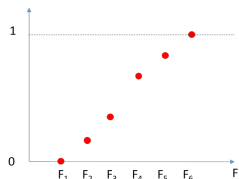
Procédure de test définie par la norme ISO 21254-2³¹



Echantillonnage d'un test 1 on 1



Puissance appliquée sur un site



Probabilités d'endommagement obtenues

³¹ Lasers et équipements associés aux lasers — Méthodes d'essai du seuil d'endommagement provoqué par laser.

1 on 1

Traitement des données

Seuil d'endommagement laser (LIDT) : Fluence/Intensité la plus élevée pour laquelle la probabilité d'endommagement est nulle

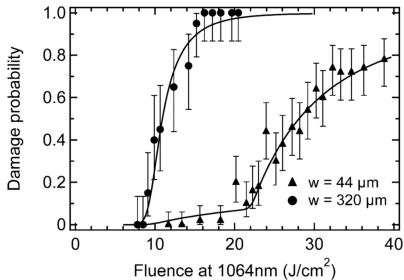
- Ecart type sur la probabilité d'endommagement :

$$\frac{\sigma_p}{p} = \sqrt{\frac{(1-p)}{pN}},$$

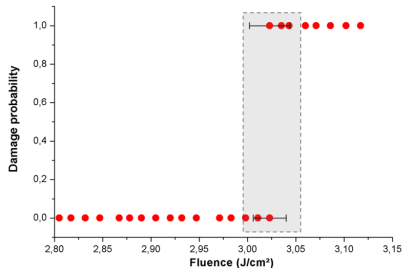
- avec N le nombre de sites testés
- Relation probabilité d'endommagement - densité de dommages : $P = 1 - \exp(-d_S(F)S(F))$,
 - avec $d_S(F)$ la densité de dommages à la fluence F
 - et S(F) la surface illuminée à fluence $> F$.

1 on 1

Exemples



Couche de HfO_2 testée à 1064 nm/12 ns avec différentes tailles de faisceaux (10 sites par fluence)³²



Couche de HfO_2 testée à 1030 nm/500 fs avec un faisceau de 80 μm de diamètre (10 sites par fluence)³³

³²J. Capoulade et al. "Multiscale analysis of the laser-induced damage threshold in optical coatings". In: *Applied Optics* 47.29 (2008), p. 5272.

³³Mangote et al., "A high accuracy femto-/picosecond laser damage test facility dedicated to the study of optical thin films".

1 on 1

Discussion

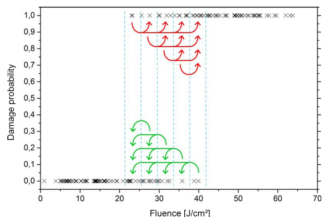
- Paramètres de tests :
 - Taille de faisceau
 - Nombre de sites testés
 - Extrapolation du seuil
 - Pas entre chaque site
- Intérêt de la méthode
 - Simple à mettre en oeuvre
 - Résultat sous forme d'une valeur seuil
 - Représentative de la qualité intrinsèque du matériau
- Limitations de la méthode de test
 - Faible surface testée
 - Valeur "seuil" dépendant des conditions de test (nombre de sites testés, taille de faisceau, pas en fluence)
 - Conditions très éloignées des conditions d'utilisation (1 tir!)

1 on 1

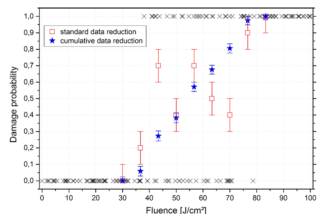
Réduction d'erreurs statistiques

Sous réserve de quelques hypothèses, il est possible d'augmenter virtuellement la base de données de sites testés³⁴

- Un site non endommagé aurait également survécu à une fluence plus faible
- Un site endommagé le serait également à une fluence plus forte



Données brutes d'un test 1 on 1 et redistribution par paquet



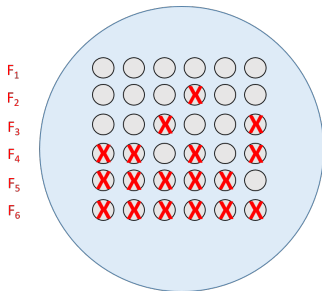
Comparaison des résultats obtenus sans et avec l'évaluation cumulative

³⁴ L. Jensen et al. "Higher certainty of the laser-induced damage threshold test with a redistributing data treatment". In: *Review of Scientific Instruments* 86 (2015), p. 103106.

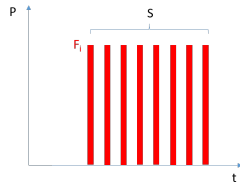
S on 1

Principe

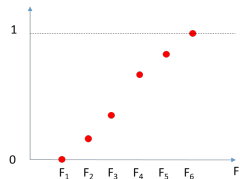
Défini également par la norme ISO 21254



Echantillonnage d'un test S on 1



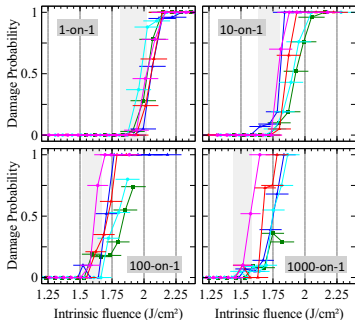
Puissance appliquée sur un site



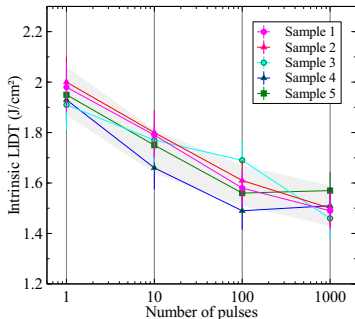
Probabilités d'endommagement obtenues

S on 1

Exemples



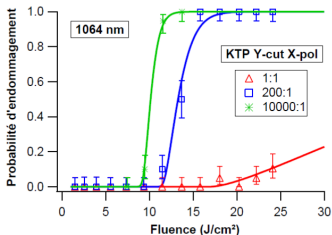
Tests S-on-1 sur des couches de HfO_2 testées à 1030 nm/500 fs / 10 Hz avec un faisceau de 80 μm de diamètre (10 sites par fluence)



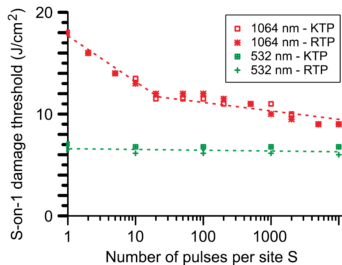
Seuils de Tenue au Flux Laser en fonction du nombre de tirs³⁵

³⁵ Heryv et al., "Femtosecond laser-induced damage threshold of electron beam deposited dielectrics for 1-m class optics".

S on 1 Exemples



Tests S-on-1 sur des cristaux de KTP
testés à 1064 nm et 532 nm / 12 ns / 100
Hz



Seuils de Tenue au Flux Laser en fonction
du nombre de tirs³⁶

³⁶F. Wagner et al. "Catastrophic nanosecond laser induced damage in the bulk of potassium titanyl phosphate crystals". In: *Journal Applied of Physics* 115 (2014), p. 243102.

S on 1

Discussion

- Paramètres de tests :
 - Idem 1 on 1
 - Nombre de tirs
 - Fréquence de répétition
- Intérêt de la méthode
 - Plus proche des conditions d'utilisation
 - Extrapolation d'une valeur limite pour N tirs
 - Représentative de la qualité intrinsèque du matériau et de son comportement sous tirs multiples
- Limitations de la méthode de test
 - Idem 1 on 1
 - Possible contamination si la séquence de tirs n'est pas être stoppée
 - Résultat pouvant dépendre de la fréquence de répétition
 - Possibles effets de "pseudo-fatigue" liés aux fluctuations de la source laser

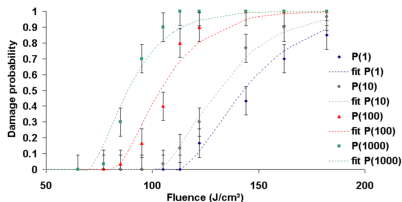
S on 1

Effets statistiques

Dans le cas d'un processus affecté d'une probabilité d'occurrence $P_1(F)$, la probabilité d'endommagement au $N^{\text{ième}}$ tir s'exprime par $P_N(F) = 1 - (1 - P_1(F))^N$ dans le cas d'un processus purement statistique.

Par exemple si $P_1 = 0,01\%$:

- $P_{1000} = 9,5\%$
- $P_{10000} = 63\%$
- $P_{100000} = 99,995\%$



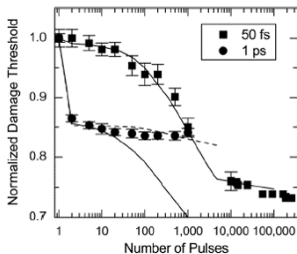
Probabilités d'endommagement mesurés dans le volume d'une silice à 1064 nm/12 ns / 10 Hz avec un faisceau de 12 μm ³⁷

³⁷L. Gallais, J. Natoli, and C. Amra. "Statistical study of single and multiple pulse laser-induced damage in glasses". In: *Optics Express* 10 (2002), p. 1465.

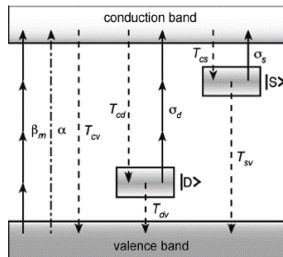
S on 1

Modifications du matériau

L'effet de fatigue peut être lié à des modifications du matériau sous flux laser.



Tests S-on-1 sur des couches de HfO_2 testés à 800 nm avec différentes durées d'impulsions



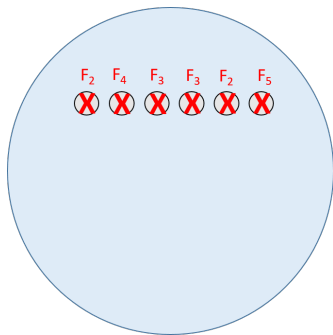
Représentation schématique des différentes voies d'excitation et de relaxation électronique entre la bande de conduction et la bande de valence³⁸

³⁸ L. Emmert, M. Mero, and W. Rudolph. "Modeling the effect of native and laser-induced states on the dielectric breakdown of wide band gap optical materials by multiple subpicosecond laser pulses". In: *Journal Applied of Physics* 108 (2010), p. 043523.

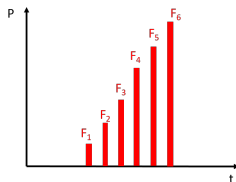
R on 1

Principe

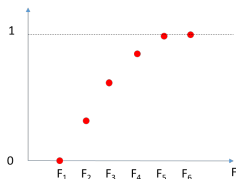
Test par rampe de fluence sur
chaque site³⁹



Echantillonnage d'un test R on 1



Puissance appliquée sur un site



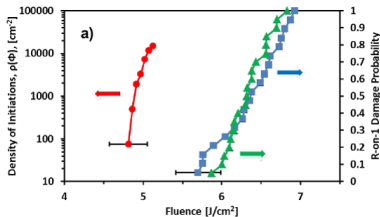
Probabilités d'endommagement obtenues

³⁹ J. Hue et al. "R-on-1 automatic mapping: a new tool for laser damage testing". In: *Proc. SPIE 2714* (1995).

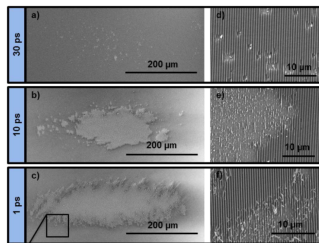
R on 1

Exemples

Utilisé en première approche pour un test rapide, ou pour tester de petits composants



Comparaison de tests Ron1 et Raster scan sur des réseaux testés à 1053 nm / 30 ps sous vide⁴⁰



Morphologie des dommages Ron1 observées pour plusieurs durées d'impulsion⁴⁰

⁴⁰D. Alessi et al. "Picosecond laser damage performance assessment of multilayer dielectric gratings in vacuum". In: *Optics Express* 23 (2015), p. 15532.

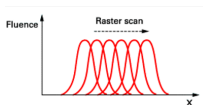
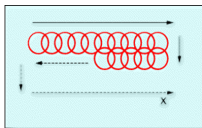
R on 1

Discussion

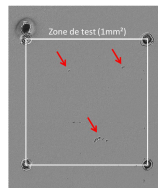
- Paramètres de test :
 - Idem S on 1
 - Incrément de fluence
- Intérêt de la méthode
 - Chaque site donne un résultat
 - Détermination de points faibles
 - Peu de surface nécessaire
 - Représentatif d'une vraie séquence sur une installation laser
- Limitations de la méthode de test
 - Mélange d'effets de fatigue et de conditionnement
 - Possible contamination si la séquence de tirs n'est pas stoppée
 - Résultat dépendant des paramètres (pas, fréquence,...)
 - Peu de surface testée

Raster scan

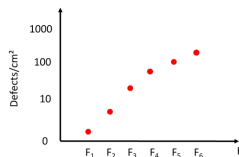
Irradiation d'une large zone à fluence constante avec un petit faisceau⁴¹



Principe d'un test Raster scan



Cartographie de dommages à l'issue d'un balayage



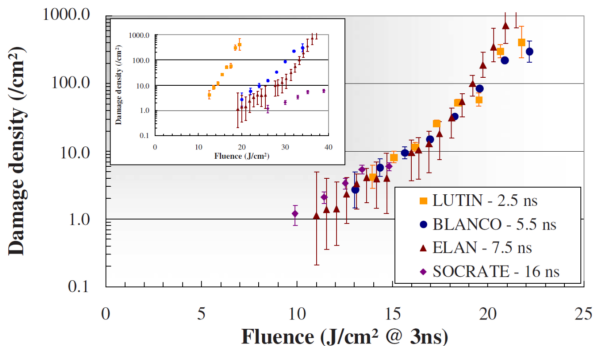
Densités de dommages obtenues

⁴¹L. Lemaignère et al. "Parametric study of laser-induced surface damage density measurements: Toward reproducibility". In: *Journal Applied of Physics* 107 (2010), p. 023105.

Raster Scan

Exemples

Mesures de références pour les optiques ns de grandes dimensions



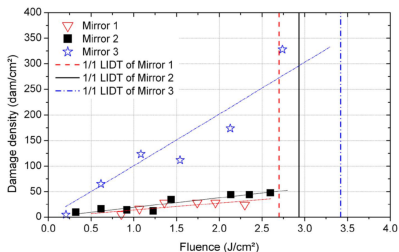
Densités de dommages mesurées sur des optiques en silice superpolies (100 mm de diamètre) à 355 nm sur différentes installations de test de TFL ns du CEA ⁴²

⁴²Lamaignère et al., "Parametric study of laser-induced surface damage density measurements: Toward reproducibility".

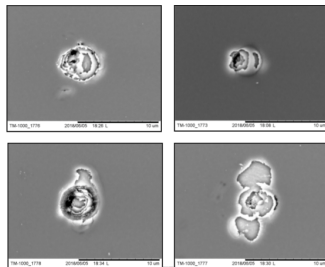
R on 1

Exemples

Ce mode de test est également pertinent pour les optiques sub-ps



Comparaison de mesures 1on1 et Raster Scan sur des traitements HR testés à 1053 nm / 675 fs⁴³



Morphologie des dommages observés

⁴³M. Sozet et al. "Laser damage density measurement of optical components in the sub-picosecond regime". In: *Optics Letters* 40.9 (2015), p. 2091.

Raster Scan

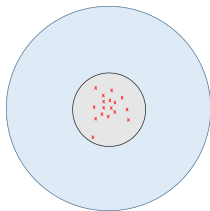
Discussion

- Paramètres de test :
 - Surface balayée
 - Fluence de consigne
 - Recouvrement entre tirs
 - Vitesse de balayage
- Intérêt de la méthode
 - Une zone représentative du composant est testée
 - Permet de mesurer de très faibles probabilités d'endommagement (très faibles densités de dommages)
- Limitations de la méthode de test
 - Détection des dommages
 - Fluctuations de la source
 - Complexité de mise en oeuvre

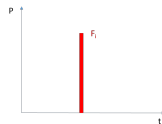
Tests large faisceau

Principe

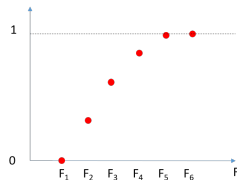
Mesure directe de la distribution de densité de dommages à partir de faisceaux de tirs centimétriques⁴⁴



Principe d'un test large faisceau



Puissance appliquée sur un site



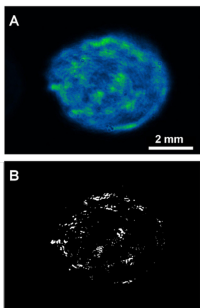
Densités de dommages obtenues

⁴⁴ C. Carr et al. "Techniques for qualitative and quantitative measurement of aspects of laser-induced damage important for laser beam propagation". In: *Measurement Science and Technology* 17 (2006), p. 1958.

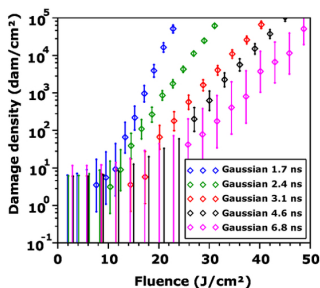
Tests large faisceau

Exemple

Mesures de densités de dommages sur des échantillons de silice à 355 nm à l'aide de l'installation MELBA au CEA CESTA⁴⁵



(A) Cartographie de fluence d'un tir et (B) dommages correspondants détectés



Densités de dommages mesurées pour plusieurs durées d'impulsion

⁴⁵M. Veinhard et al. "MELBA: a fully customizable laser for damage experiments". In: *Proc. SPIE 10447* (2017).

Tests large faisceau

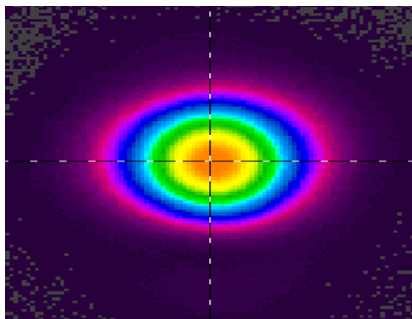
Discussion

- Intérêt de la méthode
 - La fluctuations de fluence ne sont plus limitantes
 - Test représentatif des applications
 - Mesure rapide
- Limitations de la méthode de test
 - Disponibilité de la source
 - Corrélation profil spatial/dommages
 - Détection des dommages

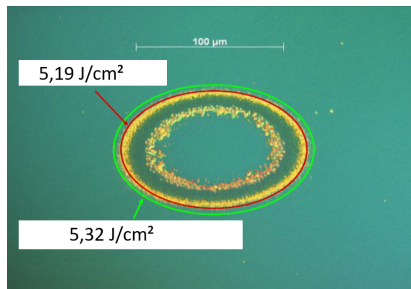
Mesure de seuil par tir unique

Principe

Corrélation de la distribution de fluence et de la morphologie des dommages⁴⁶



Distribution de fluence d'un tir



*Contour de la zone limite
d'endommagement et détermination du
seuil*

⁴⁶Sozet et al., "Laser damage density measurement of optical components in the sub-picosecond regime".

Mesure de seuil par tir unique

Exemple

Exemple d'application à des traitements HR testés à 1053 nm, 700 fs⁴⁷

Sample	Deposition Process	Angle of Incidence (°)	Mono-Shot LIDT (J/cm ²) (2 sites per sample)	1/1 LIDT (J/cm ²)	Absolute Difference between 1/1 and m-s LIDT (%)
HfO ₂ single layer	E-beam + IAD	45	5.19	5.43	4.4
			5.32		1.9
Sc ₂ O ₃ single layer	IBS	15	5.02	4.91	2.4
			5.01		2.0
Quarter-wave mirror	E-beam	45	2.86	2.93	2.4
			2.86		2.4
Broad bandwidth mirror[17]	E-beam + IAD	0	1.33	1.32	0.8
			1.34		1.5
			1.06		0.9
		40	1.11		3.7

Comparaison des résultats obtenus par la méthode de détermination du seuil par tir unique et par la méthode 1 on 1

⁴⁷ Sozet et al., "Laser damage density measurement of optical components in the sub-picosecond regime".

Mesure de seuil par tir unique

Discussion

- Intérêt de la méthode
 - Très peu de surface nécessaire
 - Mesure extrêmement rapide
 - Adaptée également au cas de tirs multiples⁴⁸
- Limitations de la méthode de test
 - Adaptée uniquement à la mesure de seuils intrinsèques
 - Ne permet pas de tester les limitations par des défauts
 - Erreur plus importante que pour les tests statistiques
 - Corrélation profil spatial/morphologie du dommage

⁴⁸S. Elhadj and J. Yoo. "Efficient method for the measurement of lifetime optical damage performance of thin film coatings from laser damage size analysis". In: *Optics Letters* 42 (2017), p. 3153.

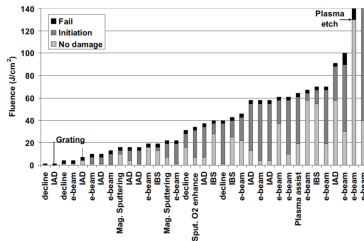
Autres tests

- Test de résistance au flux (Défini dans la norme ISO)
- Croissance (Seuil, Probabilité, Vitesse de croissance)
- Tests CW

Combinaison de méthodes

Certains protocoles ont été développés pour combiner les avantages de plusieurs méthodes de tests. Par exemple (test ns)⁴⁹ :

- 1 Série de Raster Scan (1 cm²) par fluence croissante
- 2 tests Son1 (300-on-1) sur les sites initiés pour tester la croissance
- 3 Critère = 1 dommage > 100 μm ou 1% de sites endommagés



Application à la comparaison de miroirs 1064 nm, 5 ns⁵⁰

⁴⁹ M. R. Borden et al. "Improved method for laser damage testing coated optics". In: *Proc. SPIE 5991* (2005), 59912A.

Plan de la Présentation

- 1 Introduction
- 2 Endommagement laser
- 3 Définitions et grandeurs d'intérêt
- 4 Détection de dommages laser
- 5 Tests de TFL
- 6 Conclusions**

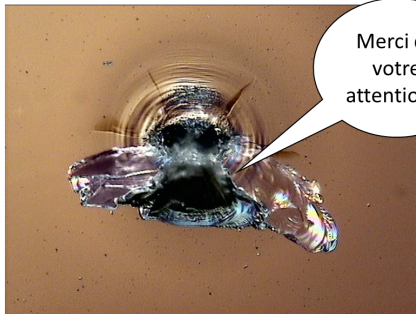
Conclusions

Pour résumer :

- Il existe une grande diversité de méthodes de mesures, qui doivent être adaptées à l'application
- Les paramètres de test doivent être parfaitement contrôlés pour avoir un résultat exploitable
- Il n'existe pas un seuil absolu d'endommagement laser pour un composant particulier
- Il est important de s'intéresser à la physique du processus pour interpréter les résultats

Pour en savoir plus :

- Livres, articles, thèses sur le sujet
- Entreprises et labos spécialisés dans les mesures de TFL
- Formation CNRS sur le sujet organisée régulièrement



Merci de
votre
attention !