

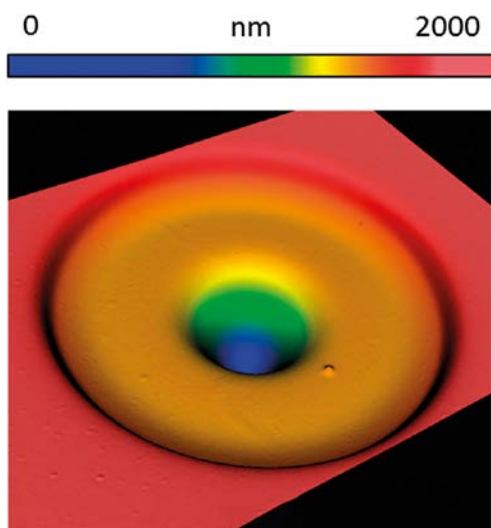
PROCÉDÉS D'USINAGE LASER CO₂ DE COMPOSANTS OPTIQUES EN SILICE

Laurent GALLAIS^{1†}, Philippe CORMONT^{2†}

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

² CEA CESTA, 15 Avenue des Sablières, CS 60001, F-33116 Le Barp, France

* laurent.gallais@fresnel.fr - † philippe.cormont@cea.fr



Les procédés par laser CO₂ sont particulièrement adaptés aux traitements de surface de composants optiques en silice : lissage, refonte, micro-usinage. Cet article décrit la physique d'interaction laser matière et la mise en œuvre pour adresser des applications dans le domaine des lasers de puissance : réparation de défauts de surface et amélioration de la tenue au flux laser des composants en silice du Laser Mégajoule.

<https://doi.org/10.1051/photon/202211232>

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 silice est un matériau de choix pour la réalisation de composants optiques adressant de nombreuses applications, de l'UV au NIR. Dans le domaine des lasers de puissance, la silice, de par ses qualités de haute tenue au flux laser et de faible absorption, est utilisée pour fabriquer des composants transmissifs de type hublots, réseaux de diffraction, lentilles. La surface de ces composants en silice est généralement préparée par des procédés de mise en forme et de polissage mécanique, possiblement associés à des étapes de gravure par des procédés chimiques ou physiques (gravure plasma) pour structurer la surface. Ces étapes peuvent introduire des défauts sur les optiques, de type rayures ou fractures, ou bien introduire des

sites initiateurs de l'endommagement laser (voir encart 1), comme des résidus de polissage ou des fractures sous-surfaciques. Ces sites peuvent provoquer des dommages à des fluences inférieures aux conditions de fonctionnement du laser, et sous des irradiations laser successives, les dommages peuvent s'accroître, ce qui peut rendre le composant inutilisable. Il est donc intéressant, voire indispensable pour certaines applications, de disposer de moyens permettant de traiter ces défauts en surface de la silice pour les « neutraliser » ou « stabiliser », c'est-à-dire faire en sorte qu'ils n'initient plus de dommages laser, ou tout du moins pas plus que la silice vierge. Une solution est de refondre localement la surface de la silice ou d'effectuer un micro-usinage local pour enlever le

défaut (figure 1). Les procédés de fusion ou évaporation locale par laser CO₂ sont particulièrement adaptés pour réaliser ce traitement. Le rayonnement laser à la longueur d'onde autour de 10 μm est en effet absorbé très efficacement par la silice, et ce type de source, fonctionnant en régime impulsif ou continu a un rapport coût/puissance très avantageux qui en fait une des plus utilisées dans l'industrie. Dans ce contexte, nous présentons dans cet article un exemple de mise en œuvre pour le traitement des optiques en silice du laser Mégajoule. La première partie de l'article décrit les processus physiques en jeu dans ce type de procédé et la deuxième partie détaille la mise en œuvre pour la refusion locale de fractures et le micro-usinage de dommages laser.

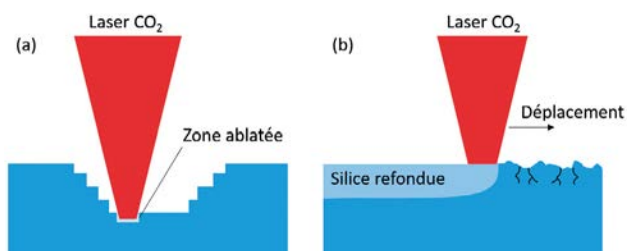


Figure 1. Représentation schématique de 2 procédés laser CO₂ discutés dans cet article. (a) Micro-usinage local par ablation de matière ; (b) Refusion surfacique du verre.

INTERACTION LASER CO₂ / SILICE

La silice vitreuse, à distinguer du quartz cristallin, est obtenue par fusion de quartz naturel (fused quartz, ou silice de type I, II) ou par synthèse à partir d'hydrolyse de SiCl₄ (fused silica, ou silice de type III, IV). De légères différences existent entre ces différents types de silice, notamment la teneur Hydroxyle (OH) mais elles sont toutes caractérisées par leur excellente qualité optique qui en fait un matériau de choix pour de nombreuses applications dans la bande d'environ 200 à 2000 nm où la silice est transparente. Autour de 9,5 µm par contre, la molécule de SiO₂ présente une résonance vibrationnelle, associée à un coefficient d'extinction très élevé. Cette forte absorption optique dans cette zone de l'infrarouge ouvre la possibilité pour des traitements laser à l'aide de laser de type CO₂ (voir encart 2). La silice est caractérisée par une température de transition vitreuse qui correspond au milieu de l'intervalle de température dans lequel le matériau devient progressivement plus visqueux et passe de l'état liquide à l'état solide. Cette température ●●●

ENDOMMAGEMENT LASER

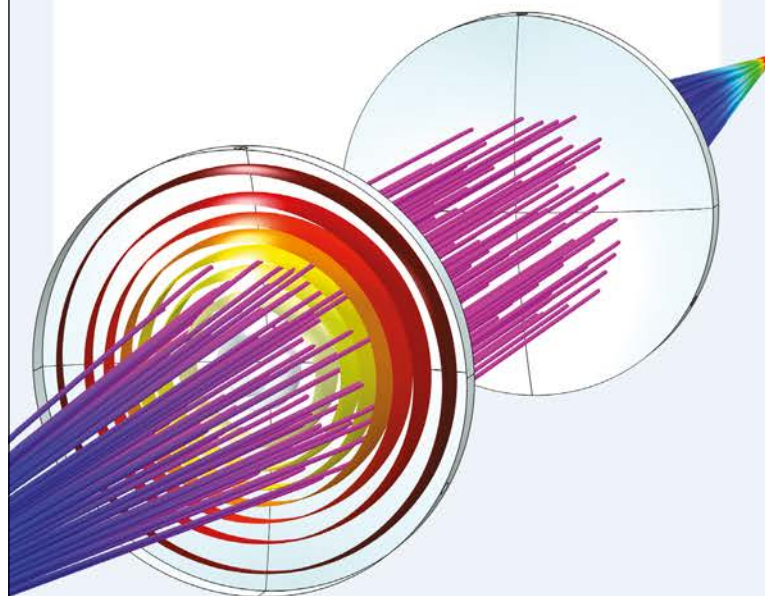
Lorsqu'un fort flux laser traverse ou est réfléchi sur un composant optique, le couplage du rayonnement laser dans la matière (par absorption intrinsèque, par absorption sur des défauts locaux, ou par absorption non-linéaire) peut conduire à des effets irréversibles altérant la fonction optique du composant, voire le rendre inutilisable. Ces modifications permanentes du matériau, caractérisées par exemple par de la fusion, vaporisation, fracturation, ou des décollements de couches, sont définies comme des « endommagements laser ». C'est un verrou technologique majeur à l'essor des sources lasers à haute puissance ou haute énergie, puisque qu'il limite la densité de puissance ou d'énergie accessible, affecte la durée de vie des composants optiques, ainsi que le coût de maintenance des chaînes laser.

ÉTUDE DE CAS

Analyser l'interaction laser-matière à l'aide de la simulation

L'interaction laser-matière, et le chauffage qui en découle, est souvent étudiée par le biais de la simulation en utilisant l'une des nombreuses techniques de modélisation. Pour choisir l'approche la plus appropriée, vous pouvez vous baser sur des informations telles que les propriétés optiques du matériau, les tailles relatives des objets à chauffer, ainsi que la longueur d'onde et les caractéristiques du faisceau laser. Pour effectuer votre simulation, vous pouvez utiliser COMSOL Multiphysics®.

EN SAVOIR PLUS comsol.blog/laser-heating



COMSOL

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour la conception et la simulation des dispositifs et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche.

n'est pas fixe mais dépend de la cinétique de refroidissement, et se situe généralement autour de 1200°C pour la silice. L'atteinte de cette gamme de température en surface, par chauffage laser par exemple, diminue fortement la viscosité et permet un fluage de la matière ce qui peut être mis à profit pour lisser la surface (polissage laser) ou refermer des fractures (réparation de défauts). A plus haute température, autour de 2200°C, le point d'ébullition de la silice est atteint. Le processus d'évaporation en surface, contrôlé par un chauffage laser par exemple, permet de structurer localement la surface. D'autres phénomènes physiques comme des effets de trempe laser (chauffage et refroidissement rapides) en surface peuvent être mis à profit pour modifier structurellement le verre et sa densité. Ces différents effets physiques peuvent engendrer des contraintes mécaniques dans le verre donnant lieu à de la biréfringence qu'il peut être possible de contrôler. La maîtrise de ces différents effets peut se faire localement en contrôlant la température de surface et la cinétique de montée/descente en température. Les moyens laser sont parfaitement appropriés pour cela [1,2].

Les lasers CO₂ sont très répandus dans l'industrie et sont des sources disponibles à un rapport coût / puissance inégalé par rapport à d'autres

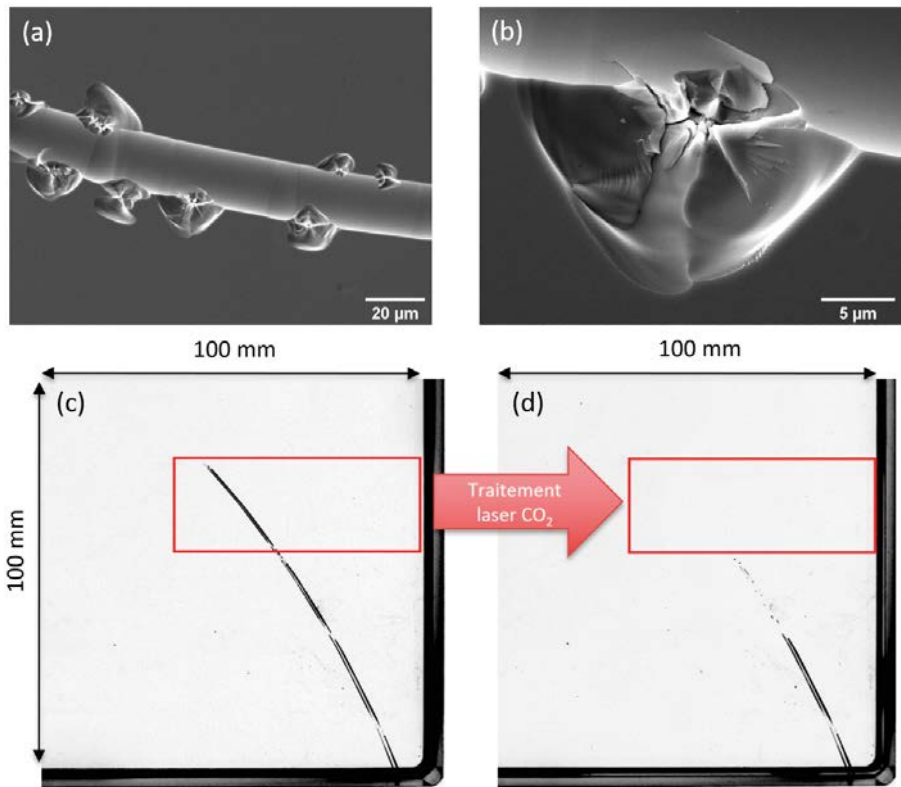


Figure 2. L'image 2a obtenue au MEB est une rayure de polissage d'environ 20 μm de large avec, sur les bords de la rayure quelques dommages, créés par laser UV. L'image 2b obtenue par MEB est un des dommages de l'image 2a. L'image 2c est une photo d'un coin d'un hublot du LMJ présentant une longue rayure. L'image 2d est le même hublot après fusion par laser CO₂ sur une partie de la rayure dans le cadre rouge.

technologies lasers. Depuis leur avènement dans les années 60, de nombreuses applications ont été développées pour la fabrication de micro-composants optiques, pour la réalisation de composants holographiques, pour le traitement des fibres optiques comme le soudage, le dénudage, le traitement des faces de sortie pour optimiser le couplage, pour ne citer que quelques applications. Un intérêt particulier de ces techniques est qu'elles sont sans contact et peuvent s'affranchir de tout traitement mécanique ou chimique de la surface. Dans le domaine des lasers de puissance, ce type de traitement de la silice est donc un procédé particulièrement pertinent et efficace puisqu'il n'amène pas de contamination de surface.

CARACTÉRISTIQUES FONDAMENTALES DE L'INTERACTION LASER CO₂/SILICE

À la longueur d'onde principale d'un laser CO₂, autour de 10,6 μm, la silice absorbe 85% du flux lumineux ce qui induit un couplage laser / matière très efficace. Avec un coefficient d'extinction de $1,8 \times 10^{-2}$ la profondeur de pénétration du rayonnement à cette longueur d'onde est d'environ 50 μm. La source de chaleur induite par l'absorption du rayonnement s'étend donc sur plusieurs dizaines de microns dans la profondeur du verre. La silice ayant une diffusivité thermique de l'ordre de 10^{-6} m²/s, on peut alors définir comme « courtes » des impulsions laser inférieures à la milliseconde pour lesquelles la chaleur n'a pas le temps de diffuser significativement hors de la zone de dépôt de puissance pendant la durée du tir, et « longues » des durées supérieures à la ms pour lesquelles la chaleur va diffuser en profondeur dans le matériau pendant l'irradiation laser.

APPLICATION À LA RÉPARATION DE DÉFAUTS SUR DES COMPOSANTS OPTIQUES

La fabrication des composants optiques pour les installations lasers de puissance comme le LMJ et PETAL est un enjeu technique et économique majeur pour ces projets. Les

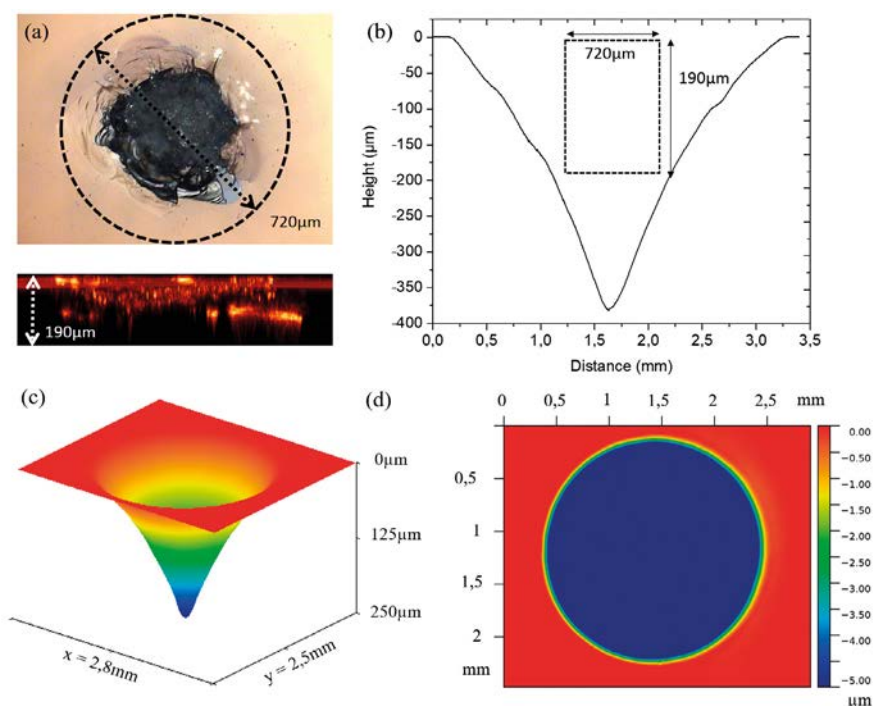
dimensions hors normes, la résistance au flux laser nécessaire et la qualité optique visée sont des éléments qui ont amené à revoir les méthodes et les moyens de production.

Dès le début du projet LMJ, la durée de vie des composants optiques a été identifiée comme une donnée dimensionnante et structurante. Sur les lasers de puissance, la durée de vie du composant optique est souvent liée à l'endommagement de sa surface par le rayonnement laser. En effet, l'endommagement d'un composant optique pose plusieurs problèmes pour le fonctionnement du laser : pertes de transmission de l'énergie, modulations sur le front d'onde transmis et fragilité mécanique, ce qui est particulièrement critique dans le cas d'un hublot faisant limite de vide comme celui de la chambre d'expérience du LMJ. Des critères d'endommagement maximal admissible qui sont alors définis amènent à changer régulièrement les composants optiques les plus exposés.

Un exemple de dommage est présenté sur la figure 2 (b). Le dommage, généré par l'impulsion du laser, présente une fracturation sous-surfacique importante qui va s'étendre sous l'effet des impulsions suivantes. Les deux étapes principales reconnues lors de l'endommagement sont l'amorçage du dommage puis sa croissance. En effet, lorsqu'un dommage est créé, il y a une probabilité importante que des fractures apparaissent sous l'effet du choc laser et que ces fractures continuent de se propager à chaque tir laser même à des densités surfaciques d'énergie relativement faibles.

Les rayures à la surface des optiques sont des amorces à l'endommagement comme on peut le voir sur la figure 2 (a). Une application du laser CO₂ sur ces rayures permet de supprimer ces points faibles. Cette opération est réalisée en suivant la rayure avec le laser à une puissance juste nécessaire pour fondre la silice, comme cela a été fait sur la figure 2 (c) et (d) [3].

Figure 3. L'image 3a est un dommage laser de 720 µm de diamètre et de 190 µm de profondeur. La figure 3b est le profil d'un cône d'usinage par laser CO₂ avec la représentation en trait pointillé du dommage à enlever. Les figures 3c et 3d obtenues au profilomètre représentent la visualisation en 3D (3c) et en vue de dessus (3d) d'un cône d'usinage par laser CO₂.



UNE EXPERTISE UNIQUE DANS LE DÉVELOPPEMENT D'AMPLIFICATEUR À FIBRE DE TRÈS HAUTE PUISSANCE

Amplificateurs laser à fibre
PCF classe 100 W :

- Architecture à base de fibre microstructurée dopée Yb
- Longueur d'onde opérationnelle 1030 - 1064 nm
- Adaptation de la puissance ou du régime





Figure 4. Photo d'un opérateur installant un hublot de chambre en cadre dans la machine de micro-usinage par laser CO₂ installée dans un bâtiment proche du LMJ.

Malgré les efforts réalisés avant utilisation, les conditions d'utilisation ne peuvent empêcher l'apparition de dommages. Des moyens ont alors été développés pour pouvoir donner une seconde vie aux composants optiques endommagés. Pour interrompre la croissance exponentielle des dommages, une méthode consiste à remplacer la zone fracturée par un cratère lisse résistant au flux laser et dont la forme a été choisie pour ne pas créer des modulations d'intensité importantes sur le faisceau LMJ. La forme conique de ce cratère, visible sur la figure 3, est obtenue en utilisant une tête d'usinage laser qui est composée de miroirs galvanométriques pour dévier rapidement le faisceau laser CO₂ et d'une lentille dite f-thêta qui assure la linéarité du déplacement du faisceau dans le plan focal en fonction de l'angle thêta de déviation du faisceau laser. Typiquement, le temps d'usinage du cratère de la figure 3 est de quelques dizaines de secondes [4].

La machine de micro-usinage, visible sur la figure 4, spécialement conçue par la société girondine ES LASER suivant les prototypes réalisés à l'Institut Fresnel et au CEA, identifie toutes les zones fracturées de plus de

50 micromètres de diamètre puis réalise le micro-usinage laser sur ces zones. Elle est notamment adaptée à la taille et au poids des hublots de chambre du LMJ, qui sont des carreaux de silice de 40 cm de côté et de 34 mm d'épaisseur pour un poids de 14 kg.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La refonte locale ou le micro-usinage de la silice par laser CO₂ sont des procédés particulièrement pertinents et efficaces pour traiter des défauts sur des optiques en silice (rayures de polissages, dommages laser). Sur la

base d'une dizaine d'années de co-développement entre l'Institut Fresnel et le CEA, ce type de procédé a pu être déployé de façon industrielle pour traiter les optiques de fin de chaîne du LMJ (Laser Mégajoule en France).

Les traitements de surface par laser CO₂ tels que ceux qui ont été décrits pourraient également trouver d'autres applications dans la préparation de composants à haute tenue au flux laser. Les abrasifs de polissage par exemple créent des micro-fractures sous-surface qui sont des précurseurs d'endommagement laser. Plutôt qu'une abrasion de la surface, le polissage par laser peut être réalisé par la fonte surfacique du matériau. Dans le cas de la silice, la refonte locale par laser permet d'atteindre d'excellentes performances en tenue au flux, pour améliorer la durée de vie des optiques. Par ailleurs, le polissage par laser ne nécessite pas d'outils et peut potentiellement être utilisé sur des formes très variées de composants à polir. Les procédés laser permettent également de structurer la surface des verres, avec des profondeurs de gravure de la dizaine de nanomètres à plusieurs micromètres, ce qui permet d'envisager la réalisation de composants de type lames de phase ou optiques diffractives, ces composants étant utilisés pour la mise en forme du front d'onde. Les optiques « free form » ou les optiques diffractives pouvant être réalisées par ce type de procédé permettent de résoudre de nombreux problèmes de mise en forme de faisceaux laser de puissance notamment. ●

RÉFÉRENCES

- [1] T. Doualle *et al.*, *J. Appl. Phys.* **119**, 113106 (2016)
- [2] C. Cifuentes Quintal *et al.*, *J. Appl. Phys.* **130**, 093106 (2021)
- [3] P. Cormont *et al.*, *Opt. Express* **21**, 28272 (2013)
- [4] T. Doualle *et al.*, *Opt. Engineering* **56**, 011022 (2017)