

Résumé

Dans le domaine du spatial, des sources laser à forte puissance sont déjà employées dans le cadre d'activités scientifiques. On peut citer par exemple l'analyse à distance de la composition chimique des roches sur Mars par LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) et le sondage atmosphérique par Lidar (*Light Detection And Ranging*) pour l'amélioration des prédictions météorologiques. Cependant l'endommagement laser (LID) et la contamination induite par laser (LIC) sur les composants optiques des systèmes demeurent des risques difficiles à anticiper. En ce qui concerne la LIC, l'interaction du flux laser avec les optiques de l'instrument en orbite peut provoquer des dégradations irréversibles, liées à la création de dépôts organiques absorbants qui peuvent induire des endommagements laser dans le temps. L'effet LIC reste donc aujourd'hui un obstacle au développement de sources laser de puissance pour les applications sans maintenance possible et possédant des durées de vie raisonnables. Une étude paramétrique de l'effet LIC est proposée dans cette thèse afin de progresser dans la compréhension des mécanismes mis en jeu.

Pour mener à bien cette étude, un banc d'expérimentations spécifique a été conçu et mis en place à l'Institut Fresnel. Il permet notamment de mettre un composant optique sous vide (comparable au vide spatial) et de procéder à sa contamination tout en effectuant une irradiation laser. Le dispositif expérimental est équipé pour des mesures in situ de fluorescence et de transmission. Des mesures complémentaires ont été effectuées ex situ par des mesures avec un profilomètre optique, un microscope à force atomique (AFM), un microscope confocal et un microscope monochromatique permettant de mesurer l'intensité et la phase de la lumière transmise. Un protocole de test rigoureux a été élaboré dans le but d'obtenir des mesures répétables. Une étude paramétrique a été réalisée sous irradiation multiple à 355 nm en régime nanoseconde afin d'analyser les différentes interactions entre le faisceau laser, le composant optique et le milieu environnant. Nos données montrent une autolimitation en épaisseur du dépôt LIC. L'épaisseur maximale du dépôt LIC ne dépend en particulier pas de la densité d'énergie du laser, mais est influencée par la nature du substrat et par type et quantité des molécules contaminants. Cette autolimitation en épaisseur du dépôt est en fait due à une transformation chimique du dépôt initial qui ne présente plus les mêmes caractéristiques au regard de la contamination.

La nature du matériau joue un rôle important dans l'aptitude du substrat à favoriser ou non le dépôt LIC. Nous avons par exemple montré qu'une fine couche de HfO_2 déposée sur un substrat de SiO_2 pourrait limiter le dépôt LIC de manière significative.

Nous avons étudié plus en détail l'initiation du dépôt contaminant et avons remarqué que la transmission augmente légèrement au début de l'irradiation laser. Ce signal pourrait servir de signature pour prédire l'initiation d'un dépôt contaminant en absence de la fluorescence in situ. Pour expliquer ce comportement, nous nous sommes appuyés sur les résultats des mesures effectuées au profilomètre, à l'AFM et au microscope monochromatique. Nous avons ainsi pu montrer que le dépôt LIC se comporte comme une couche interférentielle et que, du fait de sa porosité nanométrique, son indice effectif peut être pour certaines longueurs d'onde plus bas que celui du substrat. C'est ainsi qu'il peut agir comme couche anti-reflet durant sa première phase d'évolution ce qui cause l'augmentation de transmission observée.

Mots clés : interaction laser-matière, contamination induite par laser, endommagement laser, régime nanoseconde, silice fondue, fluorescence, environnement spatial, nucléation, contaminant.

Abstract

Since their first implementation in satellite systems, lasers have proven to be very versatile devices in space applications. They are key components of a variety of space-based instruments performing altimetry, light detection and ranging, laser sensing, and laser communication. However, laser induced damage (LID) and laser-induced contamination (LIC) of optical surfaces are a major failure risk for space-bound laser instruments. Regarding the LIC effect, the interaction of the laser with slight traces of organic compounds on the optical surface leads to the formation of a highly absorbing nanometric deposit on the laser footprint. Under certain conditions, this deposit may cause laser induced damage. Today, mainly the LIC effect remains an obstacle for the development of reliable and long-living spaceborne lasers. A parametric study concerning this effect was carried out in this work in order to enhance our understanding of the various mechanisms involved.

A new setup was developed to perform LIC tests under space-like vacuum conditions, in order to study the LIC risk and to build a database to provide helpful insight for designers of space instruments. Several in situ and ex situ techniques were used to characterize the LIC deposits. Namely transmission and fluorescence measurements were used in situ, whereas an optical profilometer, an atomic force microscope, a confocal scanning fluorescence microscope, and a monochromatic microscope with the ability to characterize intensity and phase of transmitted light were used ex situ. Specific experimental procedures were developed in order to obtain repeatable test results. A parametric study was performed with a nanosecond pulsed laser operating at 355 nm and 532 nm in order to investigate the different interactions between the laser beam, the optical component and the surrounding environment. Our measurements reveal a self-limitation of the LIC deposit thickness. In particular, the maximum thickness was not influenced by the output laser energy density, but was impacted by the chemical nature of the optical surface as well as the type and the amount of contaminants.

The influence of the chemical surface composition on the observed LIC growth was also investigated. The results showed that the maximum thickness was significantly higher on SiO₂ than on HfO₂.

We also studied in detail the onset and further development phases of LIC deposits. A slight antireflective effect was consistently observed at the onset of the deposition process. This signal could be used as a signature to predict the initiation of a LIC deposit in the absence of in situ fluorescence monitoring. To explain this behavior, we relied on the results obtained by the profilometer, the atomic force microscope and the monochromatic microscope. We showed that the analyzed deposit behaved like an interference coating and that, its effective refractive index can be lower than that of the substrate for some wavelengths due to its nanometric porosity. Such a layer has thus slightly antireflective properties as they are observed during the first phase of the LIC deposit evolution.

Keywords: laser-matter interaction, laser-induced contamination (LIC), laser-induced damage (LID), nanosecond regime, fused silica, fluorescence, space environment, nucleation, contaminant.