

Les applications du laser dans l'industrie du verre

Le laser est aujourd'hui une technologie largement diffusée au niveau industriel sur divers secteurs tels que la métallurgie, l'électronique, l'emballage ou le médical. Le but de cet article est de dresser un rapide panorama des applications du laser dans l'industrie du verre, pour laquelle cette technologie est une source d'innovations et de différenciation. Dans un premier temps, nous présentons l'état de l'art et les limitations sur les applications macroscopiques, principalement le marquage et la découpe, puis nous abordons les applications microscopiques et les nouvelles perspectives associées.

INTRODUCTION

L'année 2010 célébrera le cinquantenaire de l'invention du laser. À l'approche de cette échéance, on peut dresser un bilan rapide sur la pénétration de ce magnifique outil dans le tissu industriel. De nos jours, le laser est une technologie mature dont la progression dans le

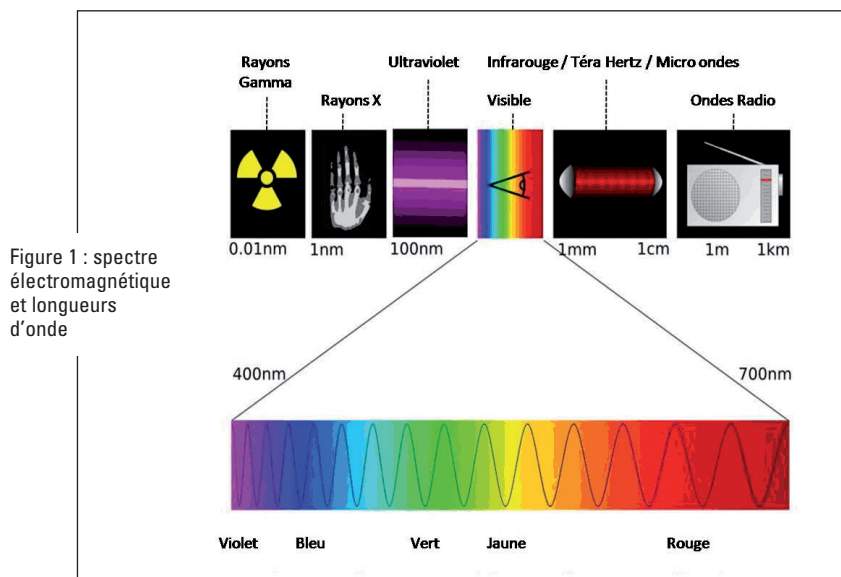
milieu industriel est constante depuis 39 ans malgré 2 années de récession (1992 et 2009), présentant même une accélération depuis 15 ans. L'industrie du laser présente aujourd'hui les signes d'un marché à maturation puisque la croissance se fait sur des applications de niches. Le laser est consi-

John Lopez (1,2)

(1) ALPHANOV, centre technologique optique et laser

(2) CELIA, Unité Mixte de Recherche CNRS-CEA-Université Bordeaux 1

Laser technology is currently widely used throughout industry in many domains such as manufacturing, electronics, packaging and medicine. The aim of this article is to present a panorama of different laser applications in the glass industry, where laser technology is a major source of innovation and process differentiation. We first present the state of the art and discuss current limitations in macroscopic processes, principally engraving and cutting. Secondly we will present microscopic processes currently in development and discuss associated perspectives.



déré maintenant comme un composant des process. L'usinage des matériaux concerne 29 % du marché mondial du laser évalué à 7 milliards de dollars en 2008 et représente approximativement 10 % du marché de la machine-outil. En termes de vente, 42 % des unités concernaient le marquage, 22 % la découpe, 12 % le soudage, 10 % le micro-usinage, 8 % le perçage et 6 % les autres applications. Pour donner une vue simplifiée, un laser regroupe les trois briques élémentaires suivantes : une cavité résonnante, un milieu amplificateur et une source d'énergie de pompage. D'un point de vue physique, le rayonnement laser est caractérisé par divers paramètres comme la longueur d'onde (couleur), la puissance moyenne, le régime continu ou impulsionnel, la durée d'impulsion, la divergence, le profil d'intensité et la qualité de faisceau. D'un point de vue utilisateur, le laser est une source de lumière intense, directionnelle,

cohérente et de couleur définie (figure 1). Le processus d'interaction laser-matière et la qualité d'un usinage dépendent de ces caractéristiques et de la nature de la cible. Ce processus peut être thermique (fusion, vaporisation), photochimique (rupture de liaisons covalentes) ou ultrabref (absorption multiphotonique et avalanche d'ionisation).

Le but de cet article est de dresser un rapide panorama des applications du laser dans l'industrie du verre. Nous verrons en particulier que dans ce secteur le laser est une source d'innovations et de différenciation. Dans un premier temps, nous présenterons l'état de l'art et les limitations sur les applications macroscopiques, principalement le marquage et la découpe, puis nous aborderons les applications microscopiques et les nouvelles perspectives associées.

LES APPLICATIONS MACROSCOPIQUES

Les principales difficultés sur la découpe ou le marquage du verre par laser tiennent au fait que le verre soit, sauf composition particulière, transparent dans le visible d'une part et cassant sous l'effet d'une variation brutale de température d'autre part. Néanmoins, un grand nombre d'applications industrielles ont pu voir le jour sur les deux dernières décennies. Globalement, on distingue deux catégories de lasers pour le marquage et la découpe de verre.

Premièrement, les lasers CO₂ émettant dans l'IR lointain (10,6 µm) et dont le rayonnement est absorbé en surface du verre. L'échauffement brutal et localisé induit une micro fissuration en surface sur quelques microns de profondeur. D'un point de vue macroscopique, cette micro fissuration donne un rendu qui s'apparente à celui obtenu par sablage mais moins esthétique que ce dernier. Cette micro fissuration peut être mise à profit pour graver le verre en surface ou pour entailler le verre avant clivage par pression

mécanique. Pour information, les microfissures ainsi produites peuvent facilement être révélées ou simplement exacerbées en exposant l'entaille macroscopique produite par le laser à un liquide de faible tension de surface (alcool, détergent, etc.).

La seconde catégorie concerne les lasers proches IR (YAG pompé par diode, vanadate, laser à disque, laser à fibre) qui émettent entre 1030 et 1090 nm et dont le rayonnement est absorbé en volume dans le verre puisque l'absorption

Figure 2 : marquage laser sur flacon de parfumerie



© Es Technology

est plus faible dans cette gamme de longueurs d'onde. Les applications des lasers proches IR concernent principalement l'ablation d'un revêtement organique, le marquage intra-volume ou encore la découpe directe (sans clivage mécanique ultérieur). Ce rayonnement laser autour de 1 µm présente l'avantage non négligeable d'être transportable par fibre optique, ce qui confère une grande souplesse de travail et simplifie le trajet optique.

Dans les deux cas, le processus d'ablation ou d'usinage est principalement thermique. Il faudra donc s'attendre à une zone affectée thermiquement plus ou moins marquée selon les paramètres laser, le matériau et le procédé utilisé.

MARQUAGE

Il faut savoir que le marquage de verre a longtemps été la principale application des lasers CO₂ de faible puissance moyenne (<25 W). Pour une question d'esthétique, le marquage de verre par laser CO₂ a rarement une fonction de décoration, il est plutôt réservé à une fonction de traçabilité (horodatage, numéro de lot...), d'identification ou d'authentification (code DataMatrix) dans de nombreux secteurs d'applications : fenêtres dans le bâtiment, écrans plats et cathodiques, bouteilles, flacons de

parfums (figure 2), lames de microscopes, ampoules d'éclairage ou enseignes lumineuses, pare-brises automobile, etc. Le marquage s'effectue en gravure directe soit en mode vectoriel (déplacement du spot laser selon une trajectoire définie) soit en mode « raster » (nuage de points). Une limitation majeure concerne les dimensions minimales du spot. En effet, les lois de l'optique imposent que le diamètre de spot soit limité par la longueur d'onde. En pratique, il est difficile de focaliser un laser CO₂ de faible puissance sur un diamètre inférieur à 80 µm, voire 50 µm à l'extrême, de fait ce type de laser ne permet pas de produire des motifs de petites dimensions sur le verre. Par exemple, il sera difficile de marquer des lettres inférieures au millimètre ou encore de réaliser un DataMatrix 16x16 de moins de 5 mm de côté. Les lettres les plus fines sont obtenues en minimisant le nombre de spot dans le motif. Nous verrons au paragraphe 3 que d'autres technologies lasers sont plus adaptées au micro marquage. Si la pièce en verre est marquée à chaud (plusieurs centaines de degrés), il est possible de produire un marquage superficiel sans micro fissuration. On a toujours cette limitation sur la taille minimale du motif, et dans les faits, il y a une forte disparité sur la taille du spot. Ce procédé est utilisé aujourd'hui

d'hui pour graver un DataMatrix anti-contrefaçon sur certains flacons ou fioles pour les secteurs du médical et de la parfumerie.

Les lasers proches IR sont plus adaptés au marquage intravolume. Cette technique consiste à focaliser le faisceau laser sous la surface d'un matériau transparent afin de créer un ensemble de défauts ou bulles, lesquelles diffuseront la lumière et donneront un contraste à l'échelle macroscopique. Le faisceau laser doit être fortement convergent de telle sorte que l'intensité laser soit inférieure au seuil d'ablation du verre en surface mais qu'elle soit suffisante pour provoquer une modification de la matière à la profondeur souhaitée (de 1 à 30 mm typiquement sous la surface) par des effets dits non-linéaires au point focal. L'effet produit au plan focal résulte d'un échauffement local puis d'une rupture qui s'apparente en général à un petit éclat de hauteur 0,5 mm et de diamètre 0,1 mm approximativement. Généralement, ce procédé requiert une durée d'impulsion de quelques dizaines de nanosecondes et une énergie par impulsion de plusieurs mJ. En utilisant un laser YAG doublé (émettant dans le visible) il est possible de réduire sensiblement les dimensions de l'éclat de manière à améliorer la qualité et la finesse du motif usiné. Ce procédé de marquage intravolume est utilisé de manière industrielle pour du marquage décoratif, par exemple une petite tour Eiffel ou un visage dans un bloc de verre, ou pour du marquage anti-contrefaçon macroscopique. Le procédé ne requiert pas de pré ou post-traitement du verre. Le marquage ainsi produit est pérenne et inaltérable depuis la surface, néanmoins il y a deux inconvénients majeurs : premièrement le petit éclat produit est susceptible de provoquer la rupture de verre si celui-ci est trop mince, deuxièmement la taille du spot élémentaire ne permet pas de réaliser du micro marquage dans la masse. Là encore nous verrons

dans un prochain paragraphe qu'il est nécessaire de faire appel à des technologies spécifiques, notamment il est possible de descendre à des tailles de spot de quelques microns en utilisant des lasers à impulsions brèves (picoseconde et surtout femtoseconde).

DÉCOUPE ET PRÉDÉCOUPE

Ce thème déchaîne les passions depuis de nombreuses années tant le challenge et l'enjeu sont importants. Plusieurs solutions technologiques de découpe de verre par laser existent et sont exploitées aujourd'hui de manière industrielle, néanmoins les spécialistes cherchent à améliorer les performances du procédé. D'une manière générale, la découpe de verre par laser présente plusieurs avantages majeurs :

- Une méthode sans contact
- Des bords de coupe francs avec peu de débris et qui ne nécessitent pas une étape de polissage ultérieure
- La possibilité de découper des verres multicouches ou feuilletés
- La possibilité de découper des formes 2D complexes ou des courbes "splines"
- Un gain en productivité (jusqu'à 50 %) par rapport à la découpe par voie mécanique
- Une durabilité des pièces deux à trois fois supérieure à celle obtenue par voie mécanique classique (découpe directe à la scie diamantée ou entaille à la pointe diamantée puis clivage par pression mécanique) car la découpe laser introduit moins de microfissures.
- Une perte de matière minimale par rapport à une scie diamantée (pour laquelle la largeur de coupe est proche de 1 mm)
- Une même source pouvant être utilisée pour l'ablation d'un revêtement (ou une peinture) sur le verre à faible puissance, puis une découpe à plus forte puissance moyenne.

Initialement, la découpe de verre concernait uniquement le laser CO₂ et s'effectuait en deux étapes.

Le principe en était le suivant : la première étape consiste à produire une entaille en surface par échauffement localisé (on parle alors de « scribing » ou « dicing ») puis dans une seconde étape à propager la fissure en volume par pression mécanique de manière à provoquer une rupture du verre sur toute son épaisseur depuis l'entaille initiale. Cette technique permet de couper jusqu'à 10 mm de verre. En augmentant l'intensité laser, il est possible de découper le verre en une seule étape sur des épaisseurs de 30 µm à 2 mm avec des lasers CO₂ de puissance moyenne 100 à 400 W. Pour ce type de découpe, un défaut fréquemment observé est une déviation du chant de coupe de quelques degrés à l'approche de la face arrière. Ce procédé est, par exemple, utilisé pour la découpe de verre teinté décoratif. À noter cependant que la polarisation du laser est un paramètre à prendre de compte pour avoir une coupe régulière dont la qualité et la conicité ne soient pas tributaires de la direction de coupe. Au-delà de 2 mm d'épaisseur, la puissance moyenne requise pour couper serait trop importante et les microfissures provoquées en surface sous l'effet du laser CO₂ seraient susceptibles de se propager de manière incontrôlée dans le verre jusqu'à provoquer une rupture complète de la pièce. Ainsi, la découpe de verre d'épaisseur supérieure à 2 mm par laser CO₂ n'est pas exploitable. A contrario du verre, les matériaux de grande pureté, homogène et à faible coefficient de dilatation tels le quartz ou la silice fondue se révèlent être particulièrement bien adaptés à la découpe par laser. La puissance laser requise est plus faible et des motifs plus fins peuvent être obtenus. En outre, le quartz présente une bonne absorption du rayonnement CO₂.

Les progrès techniques sur les lasers YAG observés depuis une dizaine d'années, et surtout l'arrivée récente des lasers à disque et à fibre offrant une excellente qualité

de faisceau ont permis d'étendre le champ d'applications des lasers proches IR comme la possibilité de souder à distance (>1 m) ou encore de découper en seule étape le verre. En termes d'applications industrielles on peut citer par exemple la découpe d'écran plasma ou de verre laminé par laser à disque, la découpe de verre par laser YAG ou à fibre pour le photovoltaïque ou encore la découpe de tube pour le pharmaceutique ou d'enseignes lumineuses par ces trois types de sources. La méthode MLBA (multiple laser beam absorption, procédé breveté par la société Rofin) permet d'augmenter de manière significative l'efficacité de la découpe par laser proches IR (YAG ou à disque) et autorise la découpe de verre forte épaisseur en une seule étape. Cette méthode consiste à obtenir un double passage du faisceau laser dans le verre en plaçant un miroir concave en face arrière de la pièce à découper. Par cette technique, il est aujourd'hui possible de découper en coupe directe du verre pour des épaisseurs comprises entre 0,2 et 24 mm avec des lasers de plusieurs centaines de watt, voire plus. Par cette technique il est possible de découper deux plaques de verre l'une sur l'autre.

Le marquage intra-volume évoqué dans le paragraphe 2.1 peut également être mis à profit pour réaliser ce que l'on appelle du « stealth dicing ». Le principe en est le suivant : à l'aide d'un laser YAG nanoseconde, on vient produire dans la masse un plan de défauts (éclats) vertical, une pression mécanique contrôlée vient ensuite provoquer la rupture de la plaque de verre au niveau du plan de défauts intra-volume. C'est donc le plan de défauts initial qui oriente la rupture du verre. L'avantage majeur est l'absence de débris produit pendant la découpe.

Enfin, la technique Laser micro jet (procédé breveté par la société Synova) consistant à combiner un jet d'eau sous pression (environ 120 bars) et un faisceau laser pro-

che IR (<100 W) ne convient pas pour le verre, essentiellement pour une question de défaut d'absorption du rayonnement par le matériau transparent.

DÉCAPAGE

Depuis quelques années, le laser YAG ou à fibre est utilisé pour la décoration de bouteilles ou flacons en verre. Le décapage par laser peut intervenir à deux niveaux, soit pour éliminer un revêtement organique ou métallique (film mince) sur le verre, soit pour élimi-

Figure 3 : ablation laser sur flacon de parfumerie



© Es Technology

ner un résidu de verre dans un moule de bouteille ou de flacon. Le processus de décapage fait appel, selon les paramètres laser, à une ablation directe du revêtement ou à un effet de type « choc laser ». Dans le premier cas, le revêtement est vaporisé sans affecter le verre. Ce procédé peut être utilisé pour éliminer localement aussi bien un revêtement organique qu'un film métallique mince. Le rendu macroscopique est excellent et esthétique. Dans le second cas, l'impulsion mécanique liée au départ de matière par ablation laser conjuguée à l'échauffement localisé de la surface conduisent à la formation d'une onde acoustique qui se propage de la surface vers le cœur du matériau. Pour un verre revêtu par un film organique (vernis, laque, peinture) cette onde acoustique peut être mise à profit pour créer un effet de cisaillement à l'interface et ainsi séparer localement le revêtement du substrat de verre, voire expulser ce même revêtement. Ce procédé peut être transposable à d'autres couples revêtement-substrat à condition qu'il y ait une discontinuité de matière suffisamment marquée pour avoir cet effet de cisaillement. Les deux processus de décapage décrits ci-dessus trouvent aujourd'hui bon nombre d'applications industrielles, par exemple pour dénuder de la fibre

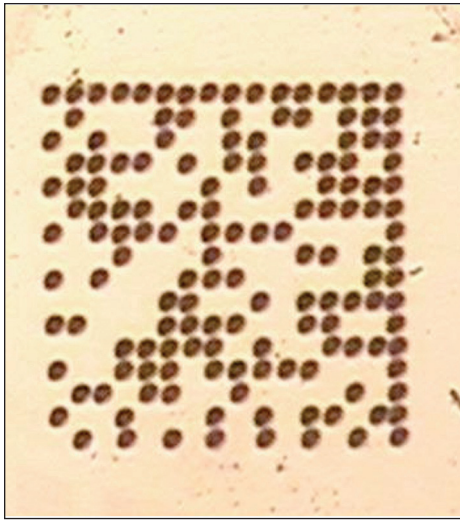
optique, la démétallisation ou l'ablation de laque sur des flacons de parfums (figure 3), l'ablation d'une couche de peinture pour matérialiser les graduations sur des béchers en Pyrex de chimie de laboratoire. Pour ce type d'application, les lasers proches IR sont en général préférables au laser CO₂ car à l'inverse des premiers le laser CO₂ est absorbé à la fois par le revêtement et le substrat de verre, il est donc difficile d'éliminer sélectivement le revêtement sans affecter le verre. Les lasers proches IR seront donc plus adaptés à une ablation sélective sur le verre que les lasers CO₂.

SOUDAGE ET REFUSION

Le laser CO₂ est également utilisé pour des applications spécifiques où il est nécessaire de fondre de manière localisée le verre depuis la surface dans les secteurs de la photonique ou de la chimie de laboratoire par exemple. La clef est en général une rotation régulière de la pièce sous le faisceau de manière à produire un échauffement le plus homogène possible.

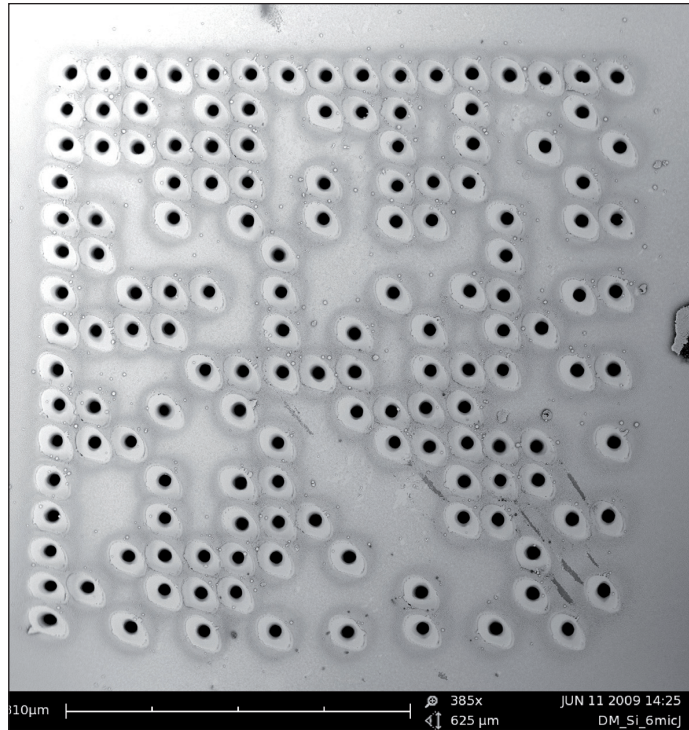
LES APPLICATIONS MICROSCOPIQUES

Jusqu'ici, nous avons évoqué les applications macroscopiques du laser, en soulignant les limitations lorsque l'on souhaite réduire la taille des motifs à des dimensions comprises entre quelques millimè-



▲ Figure 4 : DataMatrix (photo prise au microscope électronique à balayage)

Figure 5 : DataMatrix de dimensions 500µm gravé sur silicium – crédit photo Alphanov ▶



tres voire quelques microns, éliminer la zone affectée ou encore améliorer la qualité de l'usinage. Pour s'affranchir de ces limitations il est nécessaire d'utiliser des technologies laser plus spécifiques. Globalement, pour ces applications microscopiques, on distingue deux catégories de lasers : les lasers UV (YAG à 355 nm ou 266 nm, ou les Excimères) et les lasers à impulsions brèves (picoseconde, femtoseconde). Malheureusement, ces technologies laser sont souvent moins productives que celles évoquées dans les paragraphes précédents. Ainsi, pour usiner proprement la matière (y compris le verre) il faudra enlever peu de matière à la fois, mais compenser ce faible débit matière en renouvelant l'opération d'ablation le plus souvent possible, notamment par l'utilisation de laser à taux de répétition élevé (jusqu'à 2 MHz pour les lasers femtosecondes de dernière génération).

Dans le cas des lasers UV, le processus d'ablation des matériaux diélectriques met en jeu une décomposition photochimique de la matière. Pour simplifier, chaque photon UV dispose de suffisamment d'énergie pour casser à lui

seul une liaison covalente dans la matière. Plus le matériau absorbe à la longueur d'onde du laser UV, moins il y aura d'effets thermiques. En outre, la plupart des matériaux absorbent plus dans l'UV que dans l'IR. Pour des applications de gravure de surface, on recherchera donc une absorption maximale pour minimiser l'épaisseur de matière affectée et diminuer l'endommagement matière. Par exemple, les lasers à excimères ArF (193 nm) sont utilisés pour la gravure de verres de lunette, la réalisation d'optique de Fresnel ou encore le prototypage de micro systèmes de type « lab-on-a-chip » dédiés à la micro fluidique (canaux de largeur 10 à 100 µm). Au contraire, pour des applications en volume, telle la gravure de réseaux de Bragg sur fibre optique on préférera les lasers YAG à 355 nm ou 266 nm pour lesquels le rayonnement pénétrera dans la matière puisque le verre n'est que partiellement absorbant à ces longueurs d'onde.

Pour les lasers à impulsions picosecondes ou femtosecondes, le processus d'ablation de la matière est fondamentalement différent. D'une manière générale, les effets

thermiques diminuent avec la durée d'impulsion du laser. En dessous d'une durée d'impulsion de 1 ps (10^{-12} seconde), la durée de l'impulsion est inférieure au temps caractéristique de diffusion de la chaleur, la chaleur est donc piégée dans le volume irradié et ne diffuse pas en dehors de celui-ci. De fait, la zone affectée thermiquement est négligeable voire inexistante. Par ailleurs, malgré des puissances moyennes faibles, l'intensité laser sur la cible est considérable (10^{12} - 10^{14} W/cm²), il est donc possible de micro usiner par un processus d'absorption dit multiphotonique des matériaux a priori peu absorbants à la longueur d'onde du laser. En focalisant en surface du verre, il est possible de graver, de marquer (photos 4 et 5), de découper ou de percer avec une grande précision (quelques microns) et une qualité inégalée en laser. En focalisant dans la masse, il est possible de réaliser un marquage interne soit en produisant un petit éclat de quelques microns de diamètre soit un changement d'indice de réfraction (densification locale de la matière, sans éclat). Cette capacité unique à modifier localement l'indice de réfraction sans produire



d'éclat dans la matière est aujourd'hui utilisée pour graver des guides d'onde ou pour réaliser un marquage intra-volume anti-contrefaçon basé sur un effet diffractif uniquement (procédé Nagimels breveté et exploité par la société Trackinside [figures 6 et 7]). Des codes DataMatrix de 50 μm à 2 mm de côté peuvent ainsi être inscrits dans la masse du verre, à des cadences compatibles avec les secteurs de la parfumerie ou de la pharmaceutique (typiquement 70 ms pour un code DM 16x16 de dimensions 0,5x0,5 mm²). La profondeur de marquage intra-volume varie de quelques millimètres à une centaine de microns sous la surface. La technologie actuelle permet de marquer et de relire un DataMatrix 16x16 sur une section équivalente à la section d'un cheveu.

Des travaux récents ont également montré la capacité de réaliser un réseau de canaux 3D dans la masse d'un verre spécifique (Foturan) par une attaque chimique HF d'une zone préalablement photosensibilisée au laser femtoseconde. Les canaux enterrés ainsi obtenus peuvent faire jusqu'à 8 μm de diamètre.

CONCLUSION

Au travers de cet article, nous avons pu montrer que la technologie laser est un vecteur d'innovation et de différenciation dans l'industrie du verre. La transparence

◀ Figure 6 : marquage intra-volume anti-contrefaçon

Figure 7 : marquage intra-volume anti-contrefaçon ▶

du verre et son côté cassant en font un matériau à part qui nécessite de développer des approches d'usinage originales mais néanmoins performantes (découpe avec double passage du faisceau, « stealth dicing », décapage d'un revêtement par ablation sélective...). Enfin, les lasers développés pour le micro-usinage ouvrent la voie à de nouvelles applications telles que le prototypage de micro systèmes pour la micro fluidique ou encore le marquage intra volume anti-contrefaçon quasi invisible de part sa taille. On pressent bien que l'aventure du laser dans le monde du verre ne fait que commencer. ■

Remerciements et sources :

Amplitude Systemes, Eolite Systemes, ES Technology, Novalase, Rofin, Synrad, Trackinside





Centre Technologique Optique et Lasers

Votre partenaire en micro-usinage laser

Etude de faisabilité, développement de procédés, prototypes et réalisations



Le parc laser français le plus complet
10 ans d'expérience
Plus de 120 clients et 700 contrats

Contact
Ioan Hacala
+33 (0)5 4000 3609
ioan.hacala@alphanov.com

