

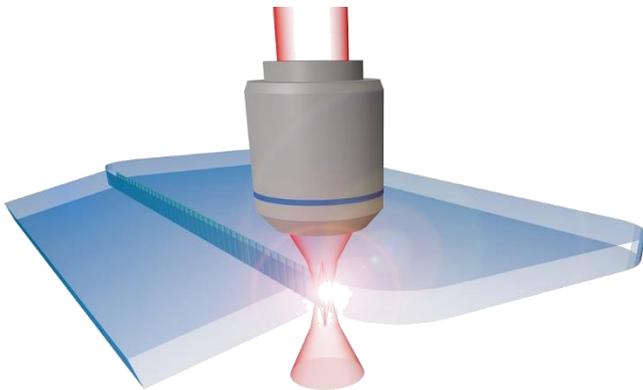
Des nano-plasmas pour la découpe du verre

François COURVOISIER ^{1,*}

¹ Institut FEMTO-ST,
Univ. Bourgogne Franche-Comté, CNRS,
15B avenue des Montboucons, 25030, Besançon Cedex, France

*francois.courvoisier@femto-st.fr

Dans le domaine de l'ablation par laser femtoseconde, une classe particulière de faisceaux a récemment attiré une large attention de la part de la communauté scientifique et industrielle : les faisceaux « non-diffractants ». Leur profil transverse varie très peu lorsqu'ils se propagent et ils se révèlent particulièrement efficaces pour déposer de l'énergie à une échelle nanométrique sur de grandes distances à l'intérieur des matériaux transparents. Ceci permet en particulier la découpe de verre et de saphir à des vitesses pouvant atteindre le mètre par seconde. Ces nano-plasmas à très haut rapport de forme posent des défis scientifiques et ouvrent de nouvelles opportunités scientifiques.



1. Introduction

Les verres sont des matériaux de notre quotidien : ils servent à nos écrans de smartphones, d'ordinateurs ; ils servent d'isolants et de substrats pour la microélectronique, mais aussi en tant que fenêtres, pare-brises, ou encore en pharmacie, automobile et aérospatiale pour encapsuler des médicaments ou des composants fragiles. Leur découpe fait face à plusieurs impératifs : la rapidité pour abaisser les coûts de production, et en termes de qualité, le processus de découpe ne doit pas fragiliser le verre. Par exemple, lors de la découpe d'un écran de smartphone, dont l'épaisseur est environ 300 microns, il faut éviter les écaillages des bords ainsi que permettre aux verres de rester suffisamment flexible sans que des fissures ne soient générées.

Dans ce contexte, la découpe par ablation laser, où la totalité du matériau est enlevée, génère hélas beaucoup de défauts. Il en est de même pour les techniques basées sur des fractures induites par pointe diamant ou par stress thermomécanique. Une approche intéressante s'inspire de la technique "stealth dicing", *i.e.*, de la découpe «furtive», qui a été développée initialement par Hamamatsu pour la séparation de composants en silicium: il s'agit d'induire un plan de fragilisation le long de toute l'épaisseur du matériau, puis de le cliver (cf Encart 1).

Un aspect clé de cette technique est d'arriver à créer à l'intérieur des diélectriques un défaut, le plus homogène possible s'étendant sur toute l'épaisseur. Cependant, à haute intensité laser à l'intérieur des diélectriques, (10^{14}W/cm^2), l'impulsion laser se déforme spatialement et temporellement sous l'effet combiné de l'effet Kerr, qui autofocalise l'impulsion, et de la défocalisation par le plasma créé par ionisation, qui a une contribution négative à l'indice de réfraction. Ainsi, la propagation non linéaire d'une impulsion laser femtoseconde à l'intérieur des diélectriques est généralement difficile à contrôler.

Un verrou a été levé dans ce domaine grâce à une mise en forme originale du faisceau laser. Les faisceaux de Bessel, nommés "non-diffractants" par J. Durnin en 1987, sont des solutions de l'équation d'onde dans le vide dont le profil d'intensité est invariant selon l'axe de propagation. Leur énergie est infinie au même titre que les ondes planes. En pratique, ces faisceaux peuvent être vus comme une zone d'interférence, dont le profil transverse est représenté sur la figure 1. Un lobe central très intense est entouré par une succession de franges d'interférences circulaires, de moindre intensité. Ce type d'interférence peut être créé par exemple en utilisant un axicon ou un modulateur spatial de lumière. On peut remarquer que, contrairement aux faisceaux gaussiens où un *waist* très fin implique une longueur de Rayleigh très limitée, ici, le diamètre du lobe central peut être défini jusqu'à $\lambda/2$ indépendamment de l'extension longitudinale du faisceau. Le plus important est que, dans le régime non linéaire, les faisceaux de Bessel peuvent également maintenir leur propriété d'invariance le long de la propagation, si la focalisation est suffisamment forte. Cette propriété tient à la conicité de l'illumination: le plasma est généré au cœur du lobe central tandis que le faisceau l'illumine par les côtés (voir Fig. 1a).

En 2010, nous avons pu ainsi démontrer qu'avec une seule impulsion femtoseconde mise en forme de faisceau de Bessel, il est possible de générer un nano-canal à très haut rapport de forme dans les diélectriques [1]. La figure 2 présente un exemple de nano-canal percé à l'intérieur d'une lame de verre. La longueur du canal est de 43 microns pour un diamètre d'environ 400 nm, soit un rapport de forme de 100 pour 1, ce qui est extrêmement élevé par rapport aux techniques classiques de lithographie pour lesquelles le rapport d'aspect est généralement inférieur à 10.

Lors de la propagation de l'impulsion laser, un canal plasma est formé. La relaxation de ce plasma permet de créer une transformation de phase, générant une « micro – explosion » qui comprime la matière sur les côtés, ouvrant un vide à l'intérieur du matériau. Ce phénomène a été reproduit dans un très grand nombre de matériaux transparents (PMMA, saphir, verres, MgO...etc). Un nano-vidé à très haut rapport de forme peut même être formé totalement à l'intérieur du matériau, sans éjection de matière en dehors. L'intérêt de cette approche est que la longueur du canal peut être quasiment aussi longue que désirée, puisqu'il suffit de créer un faisceau de Bessel suffisamment long avec le même angle conique. Par exemple, nous avons pu créer des canaux jusqu'à plusieurs millimètres de longueur. L'uniformité du profil du canal sur l'image de la figure 2 n'est pas tout à fait parfaite : il existe nécessairement des variations locales de dépôt d'énergie laser, dues par exemple à de légères inhomogénéités du faisceau initial et des effets d'amplification de champ aux interfaces. Ceci est généralement négligeable pour les applications.

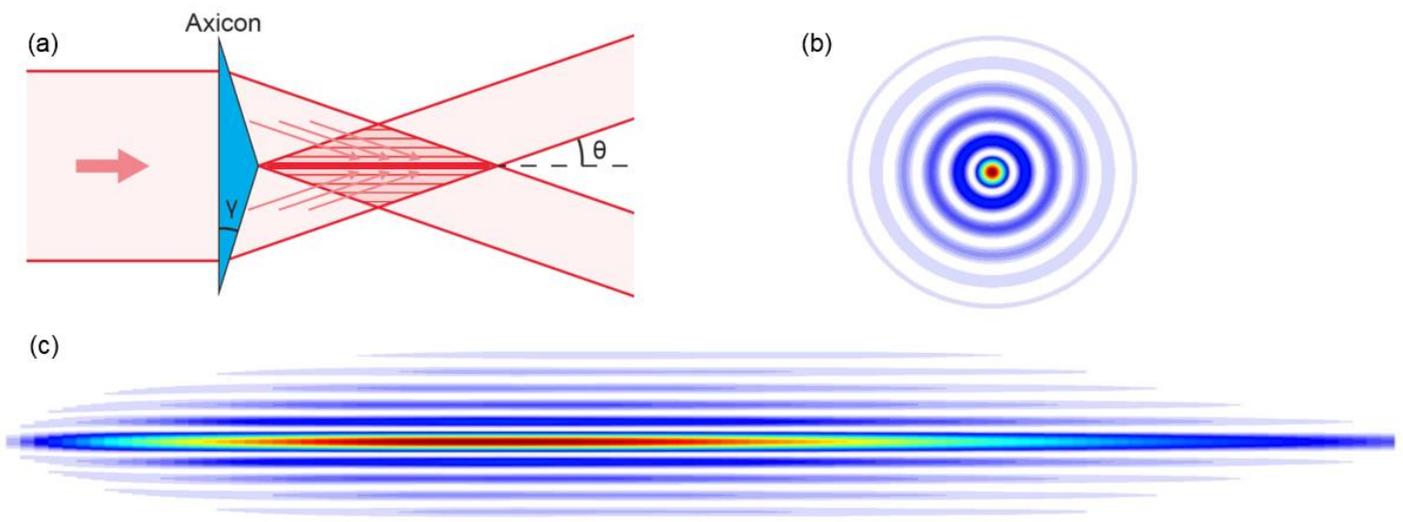


Figure 1. Formation d'un faisceau de Bessel. (a) Ce type de faisceau consiste en un champ d'interférence, par exemple produit via une lentille conique, *i.e.*, un axicon. Les flèches indiquent la propagation des rayons lumineux, faisant apparaître la structure conique du faisceau. (b) Le profil transverse est formé d'un lobe central intense entouré par des lobes de moindre intensité. Ces lobes sont d'autant plus nombreux que le faisceau est long. (c) La coupe longitudinale de la distribution d'intensité montre que le faisceau est quasiment invariant avec la propagation. En particulier, la dimension du lobe central ne change pas lors de la propagation. Ces propriétés sont également conservées pour des impulsions courtes.

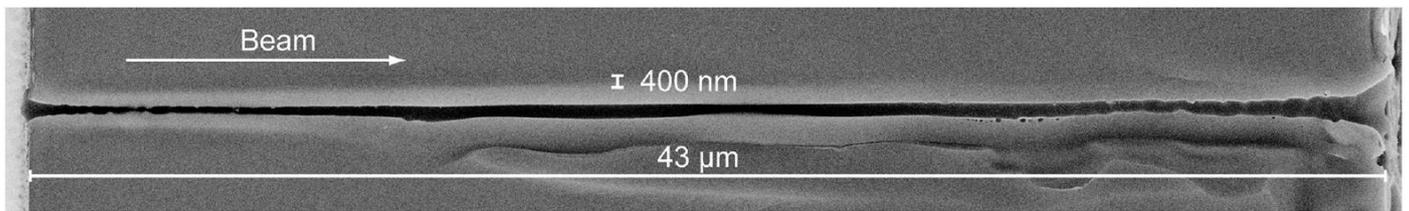


Figure 2. Nano-canal percé dans une lame de verre par une impulsion femtoseconde unique, mise en forme de faisceau de Bessel.

2. Applications

Une application directe de ces nano-canaux créés par laser concerne le domaine de la photonique : un nano-canal positionné à la proximité d'un guide d'onde photonique permet d'extraire de la lumière hors du guide par diffusion et de réaliser des mesures spectrométriques, comme réalisé par exemple par le groupe de R. Stoian (Univ. St Etienne-Lyon) dans des chalcogénures [2].

Une deuxième classe d'applications, sur laquelle nous allons nous concentrer ici, concerne la découpe des verres par la technique de *stealth dicing* : en effet, en réalisant successivement des nano-canaux par une succession d'impulsions uniques, il est possible de définir un plan de fragilisation le long duquel une fracture peut être propagée. Cette opération peut être réalisée par application d'un stress mécanique comme une faible torsion, un stress thermique, comme celui appliqué par laser CO₂, ou encore un stress chimique: le stress interne des verres durcis, comme par exemple le Gorilla glass™ de nos écrans tactiles, conduit inéluctablement au clivage quelques secondes après l'irradiation laser.

Pour obtenir cet effet, il suffit d'un espacement entre canaux de l'ordre de 5 à 10 μm. Avec un laser commercial de taux de répétition de l'ordre de plusieurs centaines de kilohertz, la vitesse de découpe atteint donc le mètre par seconde !

Un des bénéfices de l'interaction conique est qu'elle est invariante le long de l'axe de propagation. Ainsi, toutes les épaisseurs de verre peuvent être clivées de la même manière. Nous avons réussi à fabriquer des faisceaux de Bessel permettant de découper du verre jusqu'à 1 cm d'épaisseur [3]! Ceci ouvre des perspectives pour des verres moins technologiques mais néanmoins d'un grand intérêt pour la réduction des coûts de fabrication de fenêtres thermiquement performantes, essentielles pour réduire notre impact climatique.

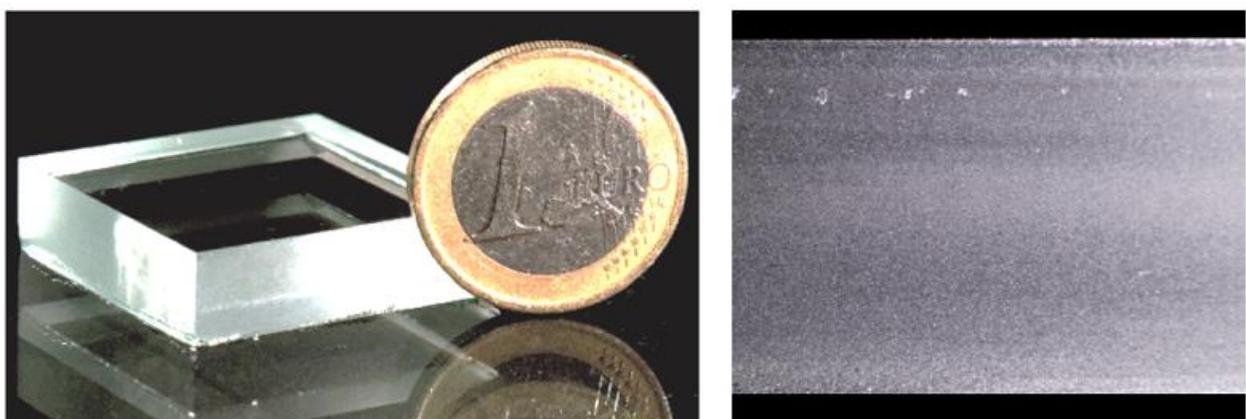


Figure 3. Verre épais découpé par la technique de stealth dicing. L'image de droite présente une vue au microscope d'un verre de 8 mm d'épaisseur après découpe (© Rémi Meyer, FEMTO-ST).

Bien évidemment, augmenter la longueur du nano plasma de 40 μm à 1 cm requiert d'augmenter l'énergie de l'impulsion laser dans le même rapport. L'énergie typique pour découper des verres de plusieurs millimètres d'épaisseur est de l'ordre de 1 mJ. Atteindre de grandes vitesses requiert donc des lasers d'une puissance moyenne de l'ordre de plusieurs centaines de watts: la nouvelle génération de laser femtoseconde avec des puissances

moyennes de l'ordre du kilowatt sera à même de donner de l'élan à ces applications technologiques (par exemple, le projet kW-Flexiburst a pour objectif de développer un laser ultrabref, de puissance moyenne 1 kW, dont les burst d'impulsions permettront d'augmenter l'efficacité de découpe [4]).

La figure 3 montre l'état de surface d'un verre de 8 mm coupé par la technique de "stealth dicing". L'état de surface n'est pas un poli optique. Au contraire, le clivage a été obtenu parce qu'un réseau de micro fractures s'est développé autour des nano-canaux. La rugosité est, dans les meilleurs cas, inférieure à $1\ \mu\text{m}$. Cette valeur est proche de la rugosité des verres sablés, comme il est usuellement réalisé pour protéger les surfaces du verre coupées par d'autres techniques. Ici, l'état de surface obtenu après découpe permet donc de s'affranchir de l'étape de sablage qui est extrêmement coûteuse d'un point de vue énergétique.

Pour être tout à fait précis, la technique de "stealth dicing" ne fonctionne que partiellement lorsque les nano-canaux ont une symétrie circulaire. Dans ce cas, la fracture est imparfaitement guidée, en particulier pour des découpes suivant des lignes courbes. Plusieurs groupes, dont le nôtre, ont développé des approches qui permettent de guider la fracture de façon extrêmement précise. Il s'agit de modifier la structure du faisceau pour générer des nano-canaux elliptiques. La structuration du faisceau peut par exemple, constituer à éliminer certaines fréquences spatiales dans l'espace de Fourier, pour créer un faisceau de Bessel elliptique. Il se trouve que les nano-canaux créés par ces faisceaux de Bessel elliptiques sont aussi elliptiques- bien que le processus entre illumination et ouverture du canal soit très largement non linéaire-. L'ellipticité des canaux permet d'augmenter la localisation du stress au niveau du grand axe des ellipses, et ainsi d'augmenter très significativement le guidage des fractures et d'améliorer la flexibilité des verres après découpe [5].

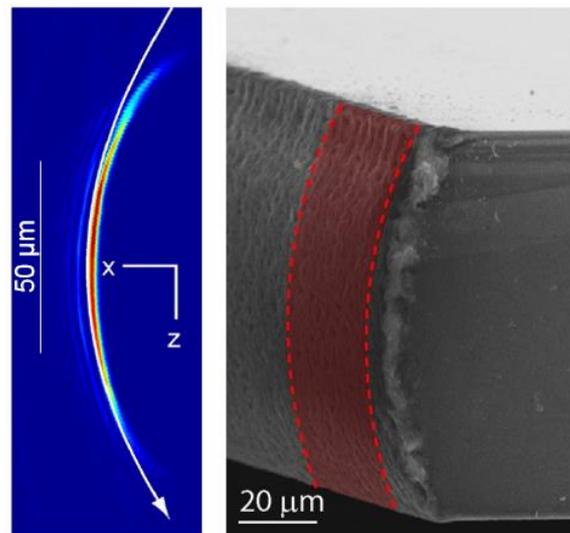


Figure 4. (gauche) Exemple de distribution d'intensité d'un faisceau accélérant dans le régime hors paraxial. Les échelles verticales et horizontales sont identiques. Le rayon de courbure du faisceau est $120\ \mu\text{m}$. (droite) Vue au microscope électronique à balayage d'une ablation courbe d'une lame de silicium de $100\ \mu\text{m}$ d'épaisseur réalisée avec le faisceau de gauche.

Cependant, une découpe avec un profil carré ne peut pas être laissée telle quelle sous peine de voir les coins s'écailler. En effet, lorsqu'un verre est manipulé, les stress mécaniques tendent à s'accumuler au niveau des angles. Pour pallier à ce problème, les coins sont usuellement éliminés par polissage mécanique. Pour des opticiens, un objectif attrayant consiste donc à créer un faisceau définissant une découpe de profils courbes. Il y a quelques années, nous avons développé le domaine des faisceaux « accélérants » dans le régime non paraxial. Ces faisceaux sont caractérisés par un profil d'intensité se propageant sur une courbe de profil arbitraire. Ces faisceaux peuvent être générés par un masque de phase contenant une forte composante d'ordre 3. Les faisceaux accélérants partagent beaucoup de propriétés avec les faisceaux de Bessel. Nous avons pu mettre à profit la courbure de faisceaux accélérants dans le

régime non paraxial, pour réaliser des découpes de matériaux avec des profils courbes, avec une inclinaison de l'ordre de 30° par rapport à la normale, comme le montre la figure 4 sur un échantillon de silicium [6].

Bien que les paramètres d'illumination par le faisceau d'Airy, comme l'intensité crête, soient très proches de ceux des faisceaux de Bessel précédents, un régime de nano-perçage n'a pas encore pu être mis en évidence dans le verre. Les résultats présentés concernent donc un régime d'ablation par accumulation de tirs et d'ablation de la totalité du matériau. Ces résultats, bien que prometteurs, démontrent la nécessité de pouvoir atteindre le régime de nano perçage, y compris sur des trajectoires courbes. Pour cela, il est nécessaire de comprendre le phénomène menant à l'ouverture de nano vide après illumination laser dans un régime de faisceaux de Bessel...

3. Une physique riche

La physique de formation des nano-canaux après illumination laser possède encore de nombreuses zones d'ombre. De multiples effets physiques se déroulent sur des échelles allant de la femtoseconde à la microseconde : lors de la propagation du faisceau, les champs laser sont suffisamment intenses pour déclencher l'ionisation non linéaire ainsi que l'ionisation par avalanche. La dynamique de la propagation de l'impulsion est fortement liée à celle de l'ionisation. L'énergie déposée dans le gaz d'électrons libres et de trous, *i.e.* le plasma, est ensuite transférée au solide : si le taux d'ionisation dépasse environ 10%, alors, une transition de phase ultrarapide peut avoir lieu, par déstructuration de la maille du solide, à l'échelle d'une picoseconde après l'impulsion laser. Les plasmas générés ont une taille transverse typique de l'ordre de 200 nm, et une densité qui peut atteindre la densité critique, à laquelle la permittivité diélectrique s'annule.

En pratique, obtenir des informations sur la taille et la densité de ces plasmas représente un réel challenge scientifique. En effet, des plasmas de densité sur-critique et de taille sub-longueur d'onde sont extrêmement difficiles à imager. Les informations que nous pouvons extraire sont indirectes. Une des approches possibles est de comparer une série de diagnostics comme la distribution de fluence en champ proche et lointain, l'absorption, avec des simulations numériques. Nous avons pu mettre en évidence que ces simulations doivent nécessairement être en mesure de reproduire la dynamique des ondes plasma. Plus précisément, nous avons réalisé des simulations de type « particle in cell (PIC) », qui résolvent les équations de Maxwell de façon combinée aux trajectoires de particules (groupes d'électrons). Ceci nous a permis de mettre en évidence un phénomène d'absorption jusqu'ici négligé dans la plupart des modèles, l'absorption résonnante [7]. Ce type d'absorption est une interaction non-collisionnelle, basée sur la génération d'ondes plasma autour de la zone de densité critique. L'absorption résonnante intervient lors de l'interaction entre l'onde plasma et les particules, et permet de localiser de façon extrême le dépôt d'énergie. Nous avons pu également obtenir confirmation de la génération d'un plasma sur-critique grâce à l'imagerie de seconde harmonique : l'impulsion laser, pendant la génération de plasma, est convertie en fréquence, comme le fait une impulsion femtoseconde sur un nano cylindre métallique et nous avons réussi à imager ce rayonnement de seconde harmonique [7].

En comparant l'intensité de seconde harmonique avec l'émission du corps noir, nous avons pu estimer que le plasma se trouve à une température d'environ 10 eV, tout en étant à la densité proche de celle du matériau initial : ce régime correspond à la matière dense et chaude qui constitue le cœur de la plupart des planètes et de nombreux astres. L'ouverture du nano vide se déroule dans la relaxation depuis cet état, typiquement sur des durées de l'ordre de la microseconde. De façon intéressante, les pressions et températures atteintes lors de l'excitation du solide sont suffisamment élevées pour permettre la création de nouvelles phases de la matière. D'autres groupes avaient mis en évidence la génération de nouvelles phases de l'aluminium autour de micro explosions générées par laser femtoseconde à l'intérieur de l'alumine. Nous pouvons espérer que la géométrie des faisceaux de Bessel permettra de créer ces phases avec de bien plus grands volumes de matériau produit.

4. Conclusion

En conclusion, les nano plasmas créés à l'intérieur des matériaux offrent non seulement une très large palette d'applications au traitement de la matière, mais ils permettent aussi de créer des états relativement « hors du

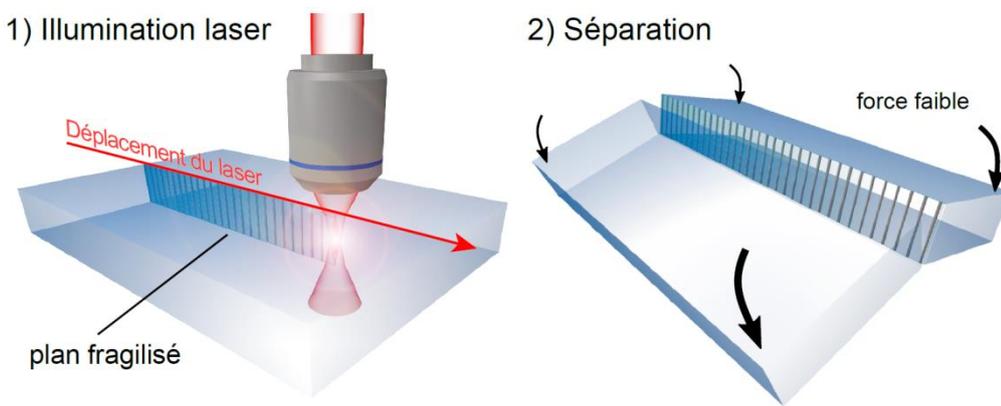
commun », avec une nano physique extrêmement riche, qui, nous l'espérons, permettra d'envisager l'étude de la matière dense et chaude sur des dispositifs expérimentaux à l'échelle d'une table optique, ainsi que de créer de nouvelles phases denses de la matière, en mettant à profit les micros explosions générées par les impulsions ultrabrèves au cœur des solides transparents.

Remerciements :

F.C. souhaite remercier le support de l'ERC PULSAR (CoG 682032), et de l'Agence Nationale de la Recherche (EQUIPEX+ SMARTLIGHT ANR-21-ESRE-0040, I-SITE BFC ANR-15-IDEX-0003, et EIPHI Graduate School ANR-17-EURE-0002).

Encart 1

La technique de "stealth dicing"



La technologie de "stealth dicing" consiste dans un premier temps à créer une série de modifications à haut rapport de forme dans le verre, comme des nano-canaux, définissant un plan de fragilisation. Cette opération peut être réalisée à des vitesses atteignant le mètre par seconde. Dans un deuxième temps, la séparation mécanique, ou clivage, peut être induite par un stress mécanique (flexion), thermique (laser CO₂) ou encore chimique (auto-clivage pour les verres durcis chimiquement). La conicité des faisceaux de Bessel permet de créer des canaux très uniformes et de cliver des matériaux transparents avec des épaisseurs comprises entre quelques dizaines de micromètres et un centimètre. (© Rémi Meyer, FEMTO-ST)

Références

- [1] M. K. Bhuyan *et al.*, Appl. Phys. Lett. **97**, 081102 (2010)
- [2] G. Martin *et al.*, Opt. Express **25**, 8386 (2017)
- [3] R. Meyer *et al.*, Appl. Phys. Lett. **114**, 201105 (2019)
- [4] www.kw-flexiburst.eu
- [5] R. Meyer *et al.*, Opt. Lett. **42**, 4307-4310 (2017)
- [6] A. Mathis *et al.*, Appl. Phys. Lett. **101**, 071110 (2012)
- [7] K. Ardaneh *et al.*, arXiv:2109.00803 (2021)