HAL
open science

L'émergence de procédés d'écriture laser 3D dans les technologies silicium

David Grojo

▶ **To cite this version:**

David Grojo. L'émergence de procédés d'écriture laser 3D dans les technologies silicium. Photoniques, 2022, 112, pp.37 - 42. 10.1051/photon/202211237 . hal-03597399

HAL Id: hal-03597399

https://hal.science/hal-03597399v1

Submitted on 4 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

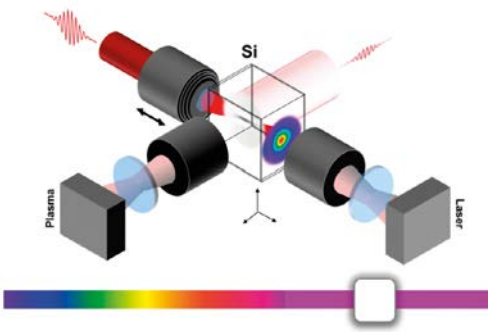
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'ÉMERGENCE DE PROCÉDÉS D'ÉCRITURE LASER 3D
DANS LES TECHNOLOGIES SILICIUM

David GROJO*

Aix-Marseille Université, CNRS, Laboratoire Lasers, Plasmas et Procédés Photoniques (LP3), Marseille, France

*david.grojo@cnrs.fr



https://doi.org/10.1051/photon/202211237

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.

Les lasers femtosecondes sont à la base des technologies d'écriture 3D permettant l'intégration de nombreuses fonctionnalités micro-optiques, fluidiques et mécaniques à l'intérieur des matériaux diélectriques transparents. Cependant, des défis importants restent à relever pour transposer ces technologies dans le silicium et les semi-conducteurs avec les nouvelles sources infrarouges intenses. La forte non-linéarité de propagation inhérente aux semi-conducteurs limite intrinsèquement la localisation de l'énergie lumineuse à un niveau en dessous des régimes d'écriture dans les configurations conventionnelles. L'émergence récente de solutions à ce problème ouvre de nouveaux champs d'applications notamment dans la photonique sur silicium.

TRANSPOSER LES TECHNOLOGIES D'ÉCRITURE 3D DES DIÉLECTRIQUES AUX SEMICONDUCTEURS

Les impulsions lasers intenses fortement focalisées permettent un dépôt non-linéaire et localisé d'énergie dans les matériaux diélectriques qui sont transparents dans le domaine du visible et du proche infrarouge (NIR). Ceci permet d'induire par laser femtoseconde des modifications structurelles dans un espace à trois dimensions (3D) à l'intérieur de ces matériaux. Après deux décennies de recherche et développement sur le sujet, l'approche offre aujourd'hui une alternative à la lithographie pour la fabrication directe et le prototypage rapide de micro-dispositifs dans les verres et polymères. (i) À une intensité laser modeste au-dessus du seuil de modification des matériaux, les régimes d'ingénierie d'indice permettent par exemple la fabrication de guides d'onde et composants micro-optiques. Les démonstrations les plus avancées de traitement quantique de l'information reposent aujourd'hui sur des circuits photoniques qui sont réalisées par cette technique d'écriture laser. (ii) Avec une dose d'irradiation plus forte (fluence plus élevée et/ou plus grand nombre de tirs), les modifications deviennent généralement hétérogènes avec la formation de défauts et une structuration spontanée à une échelle sub-longueur d'onde. Dans la silice fondue, ce régime correspond à la formation de nanostructures périodiques planaires (nanoréseaux) perpendiculaires à la polarisation du laser avec une remarquable régularité et reproductibilité. Ces modifications s'accompagnent d'un changement de l'indice de ●●●

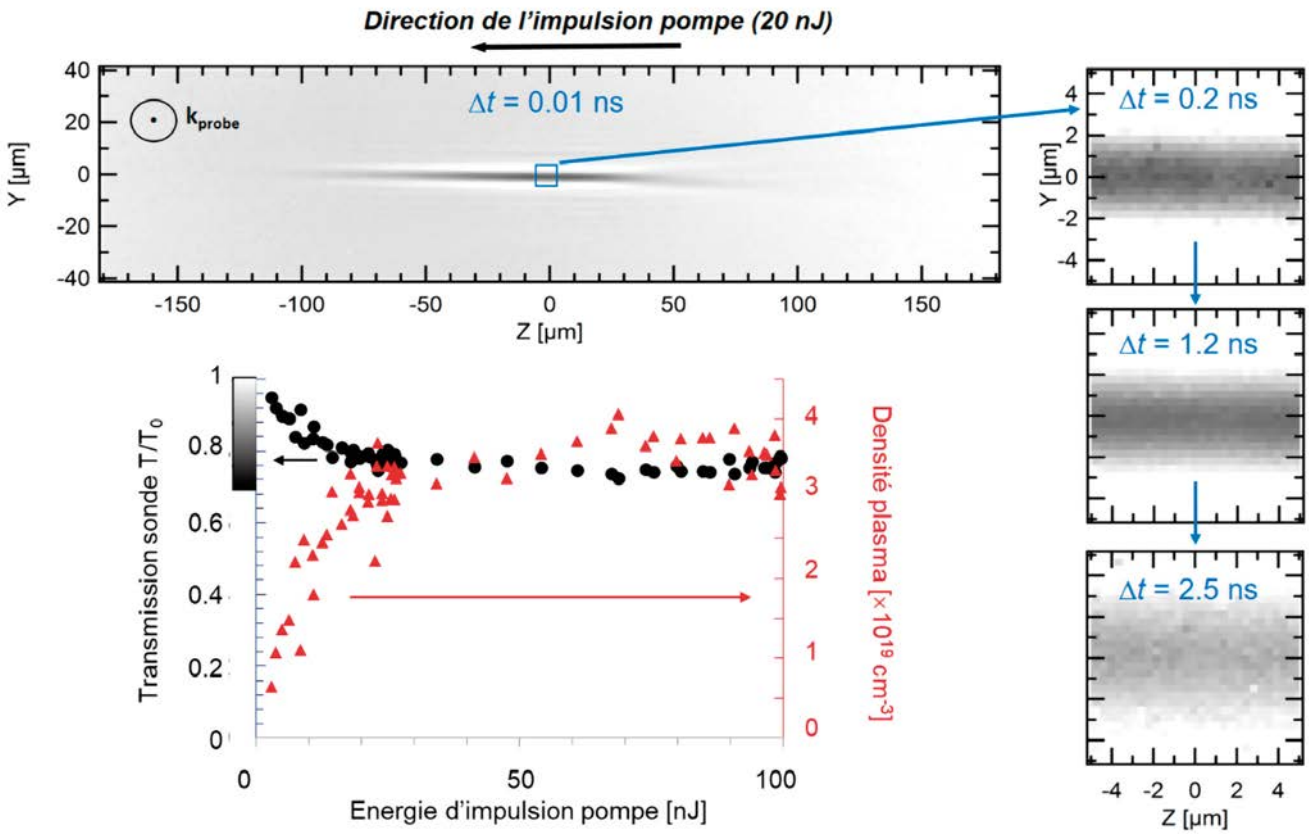


Figure 1. Observation par microscopie ultra-rapide infrarouge de microplasmas formés dans le volume du silicium avec des impulsions focalisées (NA=0.3) de durée 90 fs à 1300 nm. Les images à différents instants témoignent de la dynamique de dissipation des charges. La transmission du plasma permet d'évaluer sa densité. Ces grandeurs sont reportées pour des énergies d'impulsion jusqu'à 100 nJ révélant une saturation de l'excitation à un niveau bien en dessous de la densité critique du plasma (> 6×10^{20} cm^{-3}).

réfraction plus important mais également du taux de gravure chimique. Cet aspect est exploité pour la fabrication de dispositifs de microfluidique et/ou micromécanique. (iii) Enfin, lorsque de très fortes focalisations sont utilisées, le confinement spatial et temporel de l'énergie laser mène à des conditions de température et pression dans le matériau qui ne seraient pas accessibles par d'autres méthodes expérimentales. En dehors de l'intérêt fondamental pour des études de Sciences des Matériaux, ces régimes de micro-explosions sont à base d'applications industrielles comme la découpe précise de verres.

La combinaison de toutes ces possibilités offre un outil versatile unique pour les applications dites *lab-on-a-chip*. Les fonctionnalités optiques, mécaniques et/ou fluidiques peuvent ainsi être directement réalisées par écriture laser dans les diélectriques tandis que les fonctionnalités et connectiques électroniques restent le plus souvent ajoutées par d'autres méthodes (étapes lithographiques ou autre). Pour aller plus loin dans l'intégration monolithique de microtechnologies, la prochaine étape consiste à rendre les modalités d'écriture laser 3D totalement opérantes dans les matériaux de base de la microélectronique comme dans le silicium et les autres semi-conducteurs. Ceci nécessite de transposer ces expériences d'interaction dans le domaine infrarouge pour accéder à la région de transparence des matériaux de faible bande interdite (dits à *gap* étroit) et ainsi induire des processus d'ionisation multiphotonique similaires à ceux exploités pour le dépôt d'énergie dans les diélectriques.

LE DÉFI DES NONLINÉARITÉS LIMITANT LES DENSITÉS D'ÉNERGIE LASER DANS LES SEMICONDUCTEURS

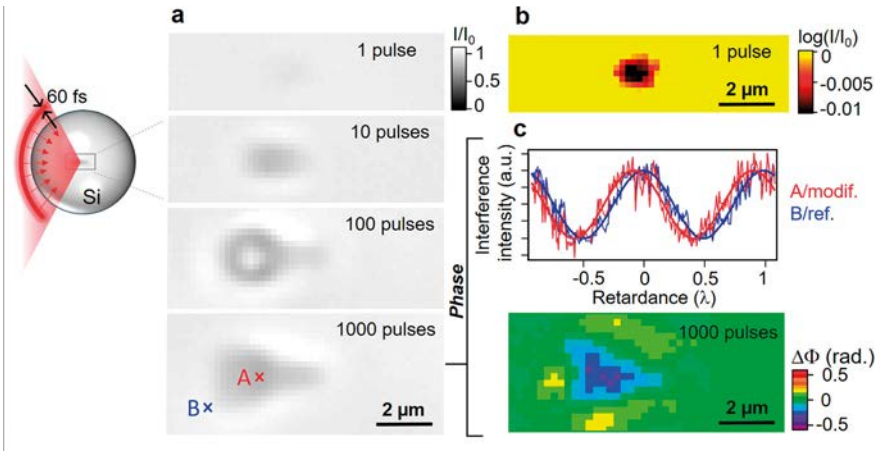
Des avancées récentes dans cette direction ont été rendues possible avec l'émergence de nouvelles sources lasers de puissance émettant directement dans l'infrarouge (par exemple les sources fibrées dopées Erbium) et l'utilisation d'amplificateurs paramétriques optiques qui sont aujourd'hui largement répandus dans les laboratoires pour accéder à de nouvelles régions du spectre. Des expériences et simulations ont été menées à l'international avec des durées d'impulsion allant de 60 fs à 150 ns, des longueurs d'onde de 1.03 µm à 5.25 µm et un large jeu de

paramètres a été exploré pour tenter de réaliser des micro-modifications sous la surface du silicium cristallin (c-Si). Le lecteur pourra se référer à l'article de revue [1] pour les résultats en régimes d'impulsions longues. Nous concentrons ici la discussion sur les régimes ultra-brefs offrant les meilleurs potentiels de précision au regard des démonstrations dans les diélectriques. Pour illustrer la complexité du problème dans le silicium, il est frappant de noter que les premières tentatives d'écriture avec des lasers femtosecondes intenses remontent à 2005 mais les premières preuves de faisabilité sont intervenues après plus d'une décennie d'études approfondies sur les spécificités des interactions infrarouge intenses dans les semiconducteurs [1]. Ces dernières reposent notamment sur des techniques d'imagerie pompe-sonde infrarouge pour évaluer les densités de porteurs libres créés dans le silicium par ionisation non-linéaire locale tel qu'illustré dans la figure 1. Ces efforts expérimentaux ont permis de mettre en évidence une saturation du dépôt d'énergie laser accessible à un niveau particulièrement bas et largement en dessous des conditions pour la modification des matériaux avec des configurations d'écriture laser conventionnelles [2]. La compréhension fondamentale de ces limitations dans le volume du silicium reste partielle mais une conclusion des travaux sur le sujet est une saturation liée à une limitation optique sur l'intensité délivrable dans les matériaux à gap étroit [3,4]. Comme détaillé dans l'encart page 40, différentes raisons physiques sont aujourd'hui identifiées. Le fort indice de réfraction mais également de façon encore plus importante les sévères non-linéarités de propagation dans les semi-conducteurs tendent à fortement délocaliser les radiations intenses utilisées pour ces applications.

DES PREMIÈRES SOLUTIONS POUR L'ÉCRITURE 3D DANS LE SILICIUM AVEC DES IMPULSIONS ULTRA-BRÈVES

Les premières solutions au problème de l'écriture femtoseconde dans le silicium ne sont apparues que ces dernières années avec l'introduction d'innovations et stratégies expérimentales visant à des optimisations spatiales et temporelles des interactions pour exalter les densités d'énergie délivrées.

Figure 2. Modification locale de l'indice de réfraction du silicium avec des impulsions femtosecondes par la technique de focalisation à immersion solide. Des micro-modifications sont créées au centre de sphères de silicium en utilisant des impulsions de 60 fs focalisées avec une ouverture numérique effective de 2,97. (a) Images infrarouges (transmission) de la croissance des modifications pour différents nombres d'impulsions lasers appliquées. (b) Image en échelle logarithmique révélant une modification après le premier tir laser. (c) Mesure de phase révélant une variation négative de l'indice $\Delta n < -0{,}07$ pour la modification créée avec 1000 impulsions. (Reproduit avec autorisation [4])



Une preuve-de-principe par focalisation extrême

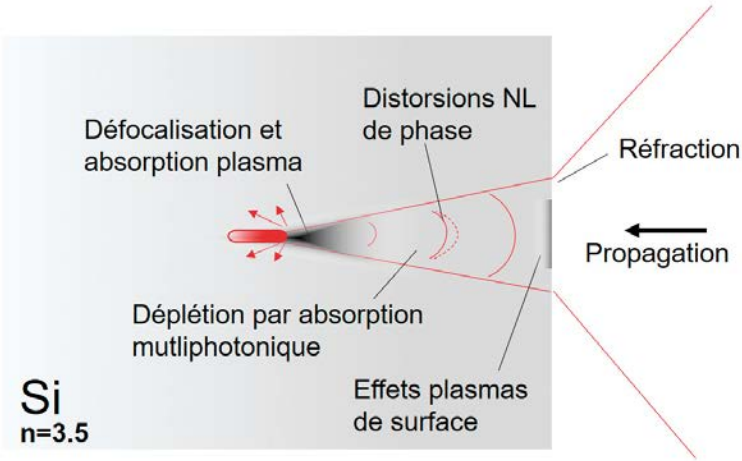
Pour contourner les effets non-linéaires limitant les conditions dans la matière, l'augmentation de l'ouverture numérique (NA) de focalisation reste l'option la plus naturelle car cela permet de réduire l'intensité et la longueur d'interaction dans la région pré-focale. L'extrapolation de résultats d'expériences et simulations jusqu'à NA = 1,5 (correspondant à l'ouverture maximale accessible avec un objectif à immersion dans l'huile), toutes infructueuses pour l'écriture, a permis de mettre en évidence la nécessité d'ouvertures numériques extrêmes pour délivrer localement une fluence dépassant le seuil de modification dans le volume du silicium avec des impulsions de durées <100 fs [4]. Dans cette perspective, la stratégie de focalisation en immersion solide initialement proposée pour améliorer la résolution en microscopie a été mise en œuvre pour la première preuve de principe d'un procédé d'écriture applicable au silicium [4]. Le principe est rigoureusement identique à celui de la microscopie à immersion liquide, excepté que le liquide est remplacé par un solide d'indice de réfraction plus élevé pour

Différents facteurs tous plus ou moins couplés tendent à délocaliser le flux laser et donc limiter les capacités d'écriture des lasers femtosecondes dans le volume des semi-conducteurs.

Limitations sur la focalisation. Un faisceau focalisé à l'intérieur d'un matériau de très fort indice subit une réfraction importante à la traversée de l'interface air-matériau. Les aberrations sphériques associées sont ainsi beaucoup plus importantes dans le silicium ($n \approx 3{,}5$) que dans les matériaux diélectriques ($n \approx 1{,}5$). Le confinement de l'interaction est alors dégradé à moins qu'une compensation des aberrations soit implémentée. Une autre conséquence directe de cette forte réfraction est l'aspect plus paraxial de la propagation dans le silicium (demi-angle du cône de lumière réduit) qui rend les impulsions particulièrement vulnérables à l'accumulation d'effets non-linéaires et la transformation des faisceaux (voir ci-dessous).

Déplétion de l'énergie de l'impulsion en région pré-focale. Un autre effet important qui abaisse l'intensité délivrée au point focal est l'absorption multiphotonique particulièrement efficace dans les matériaux à gaps étroits. Par exemple, les coefficients d'absorption multiphotoniques pour le silicium sont plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ceux pour la silice. De fortes pertes d'énergie interviennent durant la propagation dans la région préfocale et une très faible fraction (de l'ordre du pourcent) de l'énergie d'impulsion incidente contribue à l'expérience dans ces conditions d'écriture.

Ecrantage et défocalisation plasma. Une autre limitation vient de l'infrarouge nécessairement utilisé dans ces expériences. Lorsque les densités de porteurs libres approchent la densité critique (plus modeste dans ce domaine spectral), l'importance d'effets de défocalisation du faisceau et d'absorption (Bremsstrahlung inverse) par le plasma affecte sévèrement le flux d'énergie laser. Pour une augmentation de l'énergie incidente, les simulations et les expériences montrent que le maximum d'intensité et le front de plasma « critique » se déplacent dans la direction opposée au laser pour une fluence délivrée au point focal quasi-constante (*clamping* de l'intensité).



Représentation schématique des principaux effets physiques limitant l'intensité délivrée par des impulsions femtosecondes dans le silicium

Transformations non linéaires du faisceau. Les aspects ci-dessus et d'autres effets non-linéaires exaltés dans les semiconducteurs (comme l'effet Kerr) causent des distorsions d'amplitude et de phase de l'onde incidente menant ainsi à des transformations non-linéaires du profil du faisceau. En augmentant l'énergie des impulsions ultra-brèves, on observe des comportements de type filamentation avec une élongation de la zone focale nuisible pour le confinement des interactions.

augmenter davantage l'ouverture numérique apparente. Puisque les objectifs de microscope utilisés pour l'écriture sont conçus pour transformer l'onde plane entrante en une onde sphérique parfaite (tronquée au demi-angle $\theta = \mathrm{asin}(NA)$), il est alors possible d'utiliser directement le silicium comme milieu d'immersion solide en replaçant les échantillons plats (*wafers*) par des échantillons sphériques. En focalisant les impulsions au centre de ces sphères cette configuration supprime totalement la réfraction à l'interface de l'échantillon et l'ouverture numérique apparente est directement donnée par l'ouverture numérique dans l'air (celle de l'objectif) multipliée par l'indice du silicium $n = 3{,}5$. Avec un objectif de $NA = 0{,}85$, les expériences menées avec les sphères correspondaient ainsi à des ouvertures numériques apparentes approchant 3 à l'intérieur de Si et une taille de la tâche focale correspondante de $\lambda/2NA \approx 220$ nm. Le confinement extrême du flux laser ainsi obtenu a permis la première démonstration expérimentale d'écriture telle qu'illustré dans la figure 2. Pour cette expérience, il est intéressant de noter qu'une énergie de seulement 20 nJ fut utilisée alors que des impulsions bien plus énergétiques (jusqu'au niveau millijoule) avaient été totalement inopérantes par le passé [1]. Pour les considérations technologiques, il est naturel de s'intéresser immédiatement au changement d'indice de réfraction associé à cette première modification en régime femtoseconde. Sur les modifications obtenues après 1000 tirs appliqués, la microcopie de phase révèle une variation d'indice négative de plusieurs pourcents. Ce résultat suggère une réponse similaire aux diélectriques sous irradiation femtoseconde avec la formation de nano-disruptions (sous illuminations répétées) exploitées notamment pour des développements technologiques en micro-optique tels qu'évoqués en introduction. La focalisation en immersion solide ajoute néanmoins une importante complexité motivant ces dernières années des optimisations dans le domaine temporel.

Des solutions pratiques par ingénierie de trains d'impulsions ultra-brèves

L'analogue dans le domaine temporel à l'hyper-focalisation pour minimiser les réponses de propagation non linéaire consiste à remplacer les impulsions uniques intenses par des trains d'impulsions ultra-rapides (dits « *bursts* ») de plus faibles intensités. Si la cadence dans le train est suffisamment rapide, on prévoit également une accumulation de porteurs de charges et/ou thermique pouvant mener à un emballement favorable pour le dépôt local d'énergie [5]. Les temps caractéristiques de l'ordre de la nanoseconde mesurés pour la dissipation d'énergie dans le volume focal (voir Fig.1 pour le déclin du plasma) ont conduit à explorer la réponse du silicium à des trains d'impulsions à très hautes cadences [1]. À des cadences THz générées par propagation passive dans une série de cristaux biréfringents [5], les conditions locales atteintes dans le silicium montrent que la réduction des non-linéarités préjudiciables et les effets d'accumulation mènent à une amélioration significative de la densité d'énergie déposée. Le bénéfice du mode « *burst* » a également été confirmé par des tests d'écriture 3D à l'intérieur du silicium avec des impulsions picosecondes qui témoignent de performances améliorées. La figure 3 illustre un niveau de répétabilité et de contrôle local inaccessible avec des impulsions ultrabrèves individuelles mêmes répétées à des cadences conventionnelles. Sur ces aspects d'optimisation temporelle, il convient également de remarquer que différents travaux depuis 2017 témoignent d'une plus grande capacité des technologies lasers femtosecondes fibrées à adresser ces applications. On peut citer notamment plusieurs démonstrations de fabrication de guides d'onde dans c-Si en utilisant des impulsions ● ● ●

PUBLI-RÉDACTIONNEL

PHOTOMATIQ®
le packaging photonique

La machine Photomatiq® automatise la production des produits photoniques avec alignement passif (assisté par vision) et actif, assemblage par collage ou soudure laser. Photomatiq® optimise le temps de cycle et la répétabilité de l'assemblage. De nombreuses fonctionnalités concourent à l'excellente qualité de production. Exemples d'application : Diodes lasers ; Photodétecteurs ; Modules lasers ; Photonic Integrated Circuit (PIC) ; Modules fibrés.

Les bénéfices de la machine Photomatiq® :

- Différents modes d'assemblage : collage, soudure laser, … *etc.*
- Changement automatique d'outils
- Prise de composants sur gel-pack
- Appareils de mesure customisés à l'application
- Localisation des composants par vision 3D

Grâce à son logiciel PhotonSmart®, l'IHM devient intuitive et intelligente, les opérations se décrivent rapidement et simplement. Des capacités de calcul intégré permettent l'exécution de séquences conditionnelles et multi-composants. Le mode manuel permet une mise au point aisée. **Démonstration de la machine à ISP System (Vic-en-Bigorre – 65).** ●

ISP System,
05 62 33 44 44
contact@isp-system.fr
www.isp-system.fr

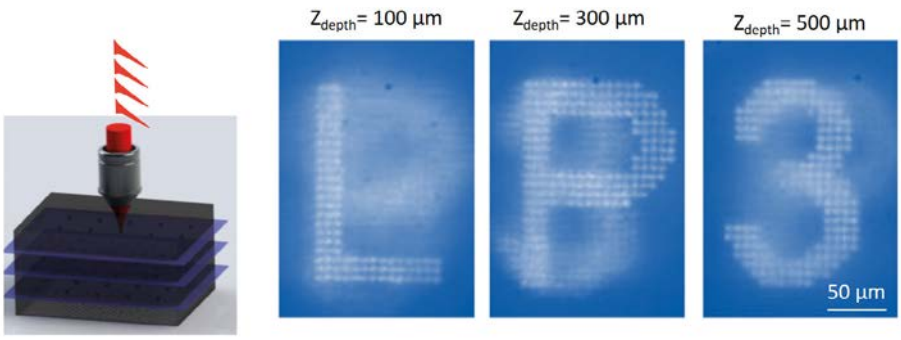


Figure 3. Inscription d'informations par trains d'impulsions lasers ultra-rapides (4 impulsions picosecondes à cadence THz) à différentes profondeurs dans un wafer de silicium. Les 3 images montrent la lecture par imagerie infrarouge (*NA* = 0.45, fond noir) d'inscriptions réalisées les unes au-dessus des autres à des profondeurs de 100, 300 et 500 µm à l'intérieur du wafer. Les aberrations sont corrigées pour chaque plan (écriture laser et imagerie).

sub-picosecondes à une longueur d'onde de 1550 nm [1]. Ces capacités ont été originellement attribuées par les auteurs aux taux de répétition très élevés accessibles avec ces technologies et utilisés pour les démonstrations (>250 kHz). Cependant, les échelles de temps ne pouvant pas complètement confirmer l'hypothèse d'une accumulation thermique (voir ci-dessus) pour l'abaissement des seuils d'écriture, d'autres travaux ont plus récemment analysé méthodiquement la dépendance du problème au contraste temporel des impulsions. La confrontation d'expériences à la littérature a permis de révéler une importance critique de ce paramètre. Les conditions d'irradiation plus favorables observées avec les lasers fibrés reposent ainsi principalement sur les imperfections de contraste temporel inhérentes à ces technologies (gestion plus complexe de la compensation de la dispersion dans les fibres pour la re-compression des impulsions). Plus précisément, c'est la combinaison d'une composante femtoseconde et picoseconde (piédestal) dans l'irradiation, agissant respectivement sur le degré d'ionisation et l'emballement thermique, qui mène à ces conditions plus favorables. Tous ces travaux révèlent une dépendance des interactions aux caractéristiques temporelles d'irradiation sans équivalent dans le contexte des procédés lasers et il est donc naturel d'anticiper que de nouvelles avancées viendront rapidement avec l'implémentation de technologies de mise en forme temporelle des impulsions ultrabrèves dans le domaine infrarouge.

APPLICATIONS POTENTIELLES ET PERSPECTIVES

Les perspectives applicatives générales de ces travaux sont variées. À moyen terme, l'intégration monolithique de fonctionnalités photoniques, fluidiques et électroniques par écriture laser femtoseconde 3D dans le silicium doit ouvrir la voie à des procédés pour la conception de dispositifs hybrides. On pense par exemple à des solutions de refroidissement fluidique pour les composants électroniques avancés ou plus généralement à des applications de type *lab-on-a-chip*. Une autre motivation porte sur la conception de nouvelles plateformes pour le traitement de l'information. Les caractéristiques des plasmas obtenus avec les impulsions femtosecondes tiennent déjà de grandes promesses pour des études orientées vers le traitement ultrarapide de signaux.

L'ingénierie d'indice du silicium par écriture laser offre également la possibilité d'une rupture technologique dans la *photonique sur silicium*. La conception dans ce secteur s'appuie aujourd'hui principalement sur les technologies lithographiques (par exemple SOI) et la fabrication de systèmes planaires (2D). L'écriture laser offrirait une solution pour des architectures 3D innovantes et un outil de prototypage rapide et flexible pour des nouveaux développements. Comme discuté dans cet article, des démonstrations d'inscription par laser de guides d'onde et autres fonctionnalités optiques dans le silicium sont apparues très récemment [1]. Beaucoup reste à réaliser pour la contrôlabilité des procédés qui influe directement sur la qualité et la question des pertes optiques des microsystèmes aujourd'hui réalisés. Cependant, les briques essentielles pour la conception de systèmes complexes se mettent progressivement en place. La perspective d'un ordinateur quantique tout-silicium offre certainement la motivation à long terme la plus forte pour tous ces développements technologiques.

RÉFÉRENCES

[1] M. Chambonneau, D. Grojo, O. Tokel *et al.*, Laser Photonics Rev. **15**, 2100140 (2021)

[2] A. Mouskeftaras, A. V. Rode, R. Clady *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 191103 (2014)

[3] V. Yu. Fedorov, M. Chanal *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 043902 (2016)

[4] M. Chanal., V. Yu Fedorov, M. Chambonneau *et al.*, Nat. Commun. **8**, 773 (2017)

[5] A. Wang, A. Das, D. Grojo, Research 8149764 (2020)