

Procédé d'écriture laser pulsé de matériaux photo-polymérisable élaborés par voie SOL-GEL pour la fabrication de circuits optiques intégrés

S. Gatti, J. Jabbour, K. Kribich, G. Pille, R. Legros, Y. Moreau
Groupe Photonique - IES, CEM2, UMR CNRS 5507
Université Montpellier II
Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5
E-mail : gatti@cem2.univ-montp.fr

Résumé

Grâce à une nouvelle méthode de fabrication de guides d'onde optiques, nous améliorons la qualité de réalisation des circuits optiques développés au sein de l'Institut Electronique du Sud (I.E.S. - groupe photonique-nanosolo). Ces circuits optiques, destinés aux applications de télécommunication et capteur, utilisent une technologie innovante : au niveau du matériau organo-minéral d'une part et d'autre part au niveau de la technique d'inscription par laser UV pulsé que nous présentons ici.

1. Introduction

L'évolution des réseaux de télécommunication vers le transport de données multimédias et interactives nécessite une augmentation des débits de transmission pour répondre à la demande croissante des utilisateurs. Les fibres optiques offrent une large bande passante comparées aux systèmes hertziens tel que le WIFI, et de faibles pertes par rapport aux médias traditionnels. Le multiplexage en longueur d'onde, par exemple, qui s'est considérablement développé ces dernières années, permet un partage optimisé de la bande passante. L'optique intégrée est une alternative prometteuse pour la réalisation de circuits [1].

La fabrication des circuits intégrés en micro-électronique comme en optique est fondée sur une technologie planaire. Des dépôts de couches successifs sont réalisés et des étapes de photolithographie intermédiaires sont effectuées afin de faire apparaître les motifs composant la structure des circuits. La photolithographie est effectuée par insolation à travers un masque mais peut être aussi réalisée directement avec un laser. Généralement la résine exposée sert de masque : de faibles épaisseurs peuvent être ainsi considérées. Dans le cas de la fabrication de guides d'ondes dans un matériau photosensible l'épaisseur, fonction du confinement optique, est de quelques micromètres. Dans ce cas l'inscription permet une meilleure résolution contrairement au procédé par masquage pénalisé par les effets de diffraction. Des procédés d'inscription laser continu ont déjà été mis au point. Cette méthode, déjà développée au sein du laboratoire [2], a été repensée pour être moins coûteuse,

plus précise et plus adaptée au matériau. Nous utilisons un laser qui est pulsé et de longueur d'onde plus faible ; cela nous ouvre de nouvelles perspectives.

Nous avons développé, en collaboration avec le *Laboratoire des colloïdes, verres et nanomatériaux (L.C.V.N.)* des matériaux organiques-inorganiques élaborés par voie sol-gel à faible coût. Des guides d'onde optique de formes diverses peuvent être inscrits dans ce matériau, qui est sensible aux radiations UV.

2. Fabrication d'un guide d'onde

Les guides d'onde sont constitués d'un coeur entouré d'une gaine. L'indice de réfraction du coeur est légèrement supérieur (de l'ordre du centième) à celui de la gaine. Cette augmentation d'indice est obtenue par la modification des propriétés structurales du matériau. L'absorption de photons émis par un laser entraîne la modification dans les zones rendues photosensibles par l'adjonction, lors de la synthèse du matériau, d'un photoinitiateur adapté. Un guide optique est ainsi obtenu.

D'autres types de structures guidantes peuvent utiliser l'inscription laser : les zones insolées sont rendues plus résistantes à des attaques chimiques. Nous pouvons donc fabriquer des structures guidantes en relief par gravure sélective.

2.1. Synthèse du matériau

Les matériaux utilisés sont des matériaux dans lesquels coexistent une partie organique et une partie inorganique. Ils sont élaborés, sous forme de couches, au sein du *Laboratoire des Colloïdes, Verres et Nanomatériaux (L.C.V.N.)* par voie sol-gel qui est un procédé de synthèse à température modérée du réseau minéral. Des travaux antérieurs ont montré l'efficacité d'une composition basée sur le MAPTMS pour la fabrication des circuits photoniques [3][4]. Pour cette composition, la polymérisation de la partie organique est de type radicalaire. Depuis peu, le L.C.V.N. a élaboré un nouveau matériau, utilisé pour réaliser des circuits intégrés optiques, dont la polymérisation se fait par un photoamorceur cationique.

2.2. Dépôt en couches minces

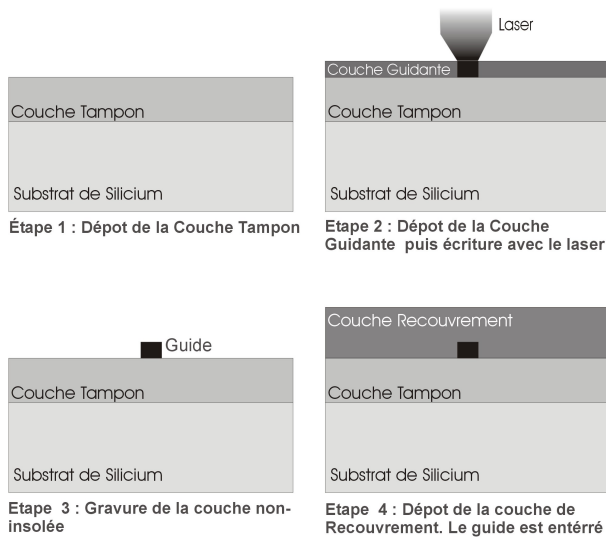


FIG. 1. Protocole de dépôt de couches pour la fabrication d'un matériau hybride organique-inorganique.

On dépose une couche dite couche tampon (fig. 1 - étape 1) sur un substrat de silicium. Celle-ci subit différents pré-recuits. La seconde étape est la fabrication du coeur du guide : une couche guidante est déposée par dip-coating sur la couche tampon (fig. 1 - étape 2). Son épaisseur détermine la hauteur du guide. Cette couche est séchée afin que l'on ait une résistance mécanique suffisante pour la manipulation mais une réticulation suffisamment faible pour permettre aux entités photopolymérisables de se mouvoir pour réagir entre elles. Ainsi la réalisation des guides est faite en créant une polymérisation dans la couche guidante par insolation UV (fig. 1 - étape 2). D'un point de vue optique l'indice de réfraction de la partie polymérisée est alors modifié (augmenté dans le cas de notre matériau) ce qui permet un confinement optique. La partie non polymérisée peut être dissoute avec du propanol (fig. 1 - étape 3); cela permet d'observer la géométrie de la section et la qualité des interfaces. Le guide peut être enterré sous une couche de recouvrement (fig. 1 - étape 4) pour que le confinement soit optimal : le guide est ainsi isolé de l'influence de l'air.

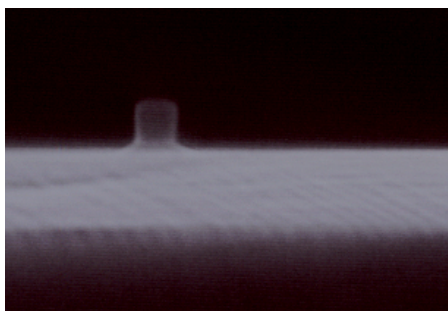


FIG. 2. Guide d'onde vu en section.

3. Banc d'écriture laser pulsé

L'écriture laser est fondée sur le déplacement d'un spot sur une couche photo-sensible. Le laser utilisé pour la polymérisation du matériau est un laser solide YLF pompé par diode, émettant dans l'ultra-violet à la longueur d'onde $262nm$. Il est pulsé (3 à $10kHz$) ce qui lui permet d'atteindre de fortes puissances crêtes ; la puissance moyenne étant de $12mW$. La longueur d'onde plus faible que celle des lasers à Gaz de type Hélium-Cadium ($\lambda = 325nm$) utilisés généralement [5], nous permet d'obtenir une meilleure résolution en terme de profil du faisceau et d'espérer un écart d'indice plus important. De plus, ce laser solide nécessite moins de maintenance.

Afin d'obtenir un spot de dimension égale à la largeur des guides utilisés typiquement dans les circuits optiques ($5\mu m \times 5\mu m$), il est nécessaire de transformer le faisceau issu du laser à l'aide d'éléments optiques (fig. 3). Nous éclairons une lentille qui préfocusse le faisceau laser sur un micro-trou. En aval, une lentille convergente permet de collimater le faisceau issu du micro-trou. Un diaphragme est placé sur le chemin optique afin de ne garder de l'image du micro-trou que le disque d'Airy, et ainsi supprimer les anneaux de diffraction. Cette image est ensuite focalisée sur le matériau avec un objectif.

Pour obturer le faisceau laser, nous utilisons un modulateur acousto-optique calibré à la longueur d'onde de notre laser. Ce cristal est transparent dans l'UV : il nous permet de moduler le niveau de puissance de sortie du laser, en se comportant comme un réseau de Bragg. Une modification périodique de l'indice de réfraction est ainsi induite par l'onde acoustique qui se propage dans le cristal. En envoyant le faisceau sur le module, on récupère à la sortie de celui-ci l'ordre 0 et l'ordre 1 de diffraction, ce dernier étant modulable en puissance. Nous l'utilisons donc afin d'obturer le faisceau issu du laser et d'en faire varier l'intensité lumineuse.

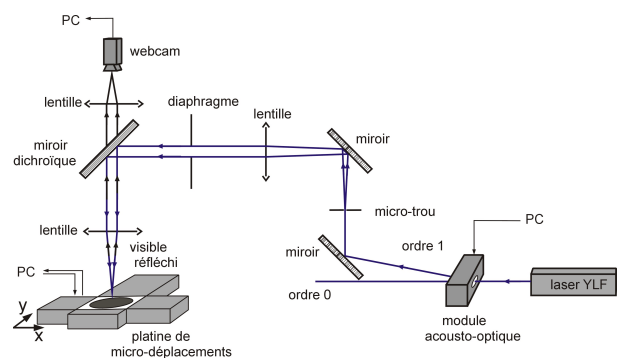


FIG. 3. Montage du banc d'écriture laser.

Pour que le spot se déplace relativement à la couche photo-sensible, nous utilisons des platines de micro-déplacement contrôlées par un ordinateur. Une interface graphique a été développée au sein du laboratoire afin de pouvoir retranscrire les designs étudiés par notre équipe. Un système d'observation du spot laser permet de régler

avec précision l'alignement du chemin optique ainsi que la focalisation du faisceau sur l'échantillon.

4. Caractérisation des guides d'ondes

Nous avons développé en collaboration avec le Groupe d'Étude des Semi-conducteurs (GES), un banc de caractérisation des structures guidantes réalisées.

Nous entendons par caractérisation :

- l'évaluation de l'adhérence plus ou moins effective en fonction de la durée et de la température des recuits, de la puissance d'insolation,
- l'observation de la section du guide (rectangulaire, trapézoïdale...),
- la finesse du dessin,
- la rugosité des parois, qui reste faible malgré l'utilisation d'un laser pulsé,
- le comportement modal (nombre de modes à différentes longueurs d'onde),
- les pertes de couplage, de propagation.

Afin d'étudier l'adhérence et la polymérisation des guides d'ondes, nous avons exposé le matériau à des vitesses supérieures à 30mm/s permettant de séparer spatialement les impulsions du laser. Leur visualisation (fig. 4) nous a permis de confirmer que les motifs de base adhèrent bien sur la couche tampon. Leur aspect circulaire démontrent que les réglages de la focalisation, de l'alignement et le choix des éléments optiques sont optimaux pour la réalisation de circuits intégrés optiques.

L'écriture de ces séries d'impulsions va nous permettre d'approfondir une méthode d'inscription de réseaux diffractifs intégrés à nos guides d'ondes pour diverses applications (filtres en longueur d'onde, capteurs...).

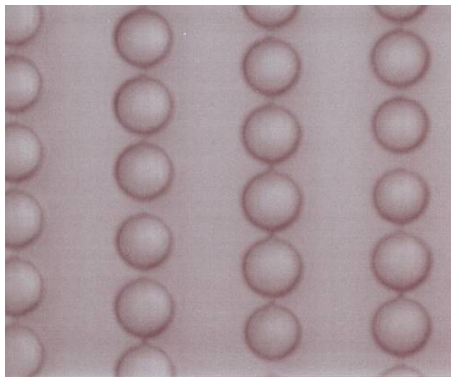


FIG. 4. Écriture des impulsions laser.

Les mesures de caractérisation sont effectuées à différentes longueurs d'onde, en particulier celles utilisées dans les applications de télécommunications : $\lambda = 850\text{nm}$, $\lambda = 1310\text{nm}$ et $\lambda = 1550\text{nm}$.

Les pertes totales mesurées sont la somme des pertes de propagation et des pertes de couplage. Les pertes de propagation correspondent aux pertes par diffusion principalement dues à une rugosité des guides ainsi qu'aux pertes par absorption dues au matériau. Les pertes de couplage sont le résultat des pertes engendrées par l'injection et la récupération du signal lumineux à l'entrée

et à la sortie du guide d'onde (fig. 5).

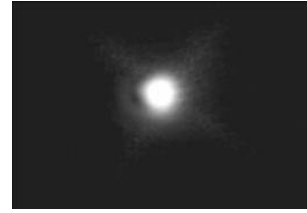


FIG. 5. Récupération du signal de sortie à $\lambda = 1310\text{nm}$

Pour effectuer ces mesures, nous avons développé un banc de caractérisation avec des micro-déplacements montés en X, Y, Z au niveau de l'injection et de la récupération du signal permettant l'alignement fibre d'injection, guide d'onde et photo-détecteur. Nous injectons en entrée un signal de puissance fixe et de longueur d'onde choisie. Nous récupérons en sortie le signal avec un appareil de mesure permettant de déterminer la puissance en fonction de la longueur de l'onde injectée. La méthode utilisée est la méthode dite du *cut - back*. Elle permet de séparer les pertes de propagations et les pertes de couplage. Elle consiste à mesurer les pertes totales pour différentes longueurs de guide. On obtient une relation linéaire entre ces deux grandeurs d'où on extrait la pente (perte de propagation en dB/cm) et l'ordonnée à l'origine (la somme des pertes de couplage en dB).

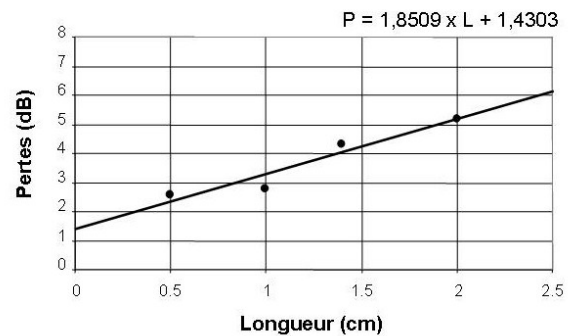


FIG. 6. Représentation des pertes de notre composant.

Ces résultats nous permettent de mettre en évidence des pertes de couplage de l'ordre de 1.4dB (0.7dB par face) et des pertes de propagation de 1.85dB/cm à la longueur d'onde $\lambda = 1310\text{nm}$. Nous étudions actuellement divers protocoles de synthèse du matériau afin de diminuer le pic d'absorption dû aux liaisons OH , principale cause des pertes de propagations.

5. Conclusion

La technique de fabrication des circuits intégrés optiques en technologie organique-inorganique telle que nous l'avons développée à l'université de Montpellier

offre une solution prometteuse à faible coût et fiable. Le nouveau banc d'écriture utilisant un laser pulsé, a été validé par la réalisation de guides dont les paramètres opto-géométriques correspondent parfaitement à nos attentes. Ce banc peut être utilisé pour une large gamme de matériaux organiques-inorganiques (MAPTMS et composés de type cycloaliphatique ont déjà été validés). Des designs de circuits optiques ont été effectués parmi lesquels on peut citer des diviseurs de puissance, des WDMs ((Dé)multiplexeurs en longueur d'onde) et des dispositifs à interférences multimodes. Nous travaillons actuellement sur la réalisation de circuits à multiplexage par code orthogonaux CDMA [6] et de capteurs d'humidité et de gaz.

Références

- [1] H. Nishiara, M. Haruna, T. Suhara, *Optical Integrated Circuits*, Ohmsha, Ltd.
- [2] R. K. Kribich, *Développement et Fabrication par Ecriture Laser de Circuits Optiques Intégrés pour les Télécommunications*, Thèse, Université Montpellier II, 2002.
- [3] M. Oubaha, M. Smâïhi, P. Etienne, P. Coudray, Y. Moreau, *Spectroscopic characterization of intrinsic losses in an organic-inorganic hybrid waveguide synthesized by the sol-gel process*, Journal of Non-Crystalline Solids 318, Université Montpellier II, 2003.
- [4] P. Coudray, P. Etienne, Y. Moreau, *Integrated Optics Based on Organo-Mineral Materials*, EMRS Spring Meeting, Materials, Process and Technology for Optical Interconnect, invited paper, Strasbourg, Juin 99.
- [5] R. Charters, B. Luther-Davies, *Laser Written Mode Evolution Couplers*, SPIE's 44th Annual Meeting, Denver, Paper no.3799C-36, July 1999.
- [6] G. Pille, *Multiplexage Optique à Répartition par Codes Spectraux en Optique Intégrée*, Thèse, Université Montpellier II, 2005.