HAL
open science

Matériaux polymères pour la création de guides optiques

Christiane Carre, Kevin Audo, Jonathan Lemaître, Isabelle Hardy, Dominique Bosc, Guillaume Vignaud, Isabelle Pillin

To cite this version:

Christiane Carre, Kevin Audo, Jonathan Lemaître, Isabelle Hardy, Dominique Bosc, et al.. Matériaux polymères pour la création de guides optiques. 13ème Colloque francophone du Club CMOI/SFO - Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Nov 2013, Orléans, France. pp.Session 15, n° 35. hal-00914605

HAL Id: hal-00914605

https://hal.science/hal-00914605

Submitted on 5 Dec 2013

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.

Matériaux polymères pour la création de guides optiques

Christiane Carré[1,2], Kevin Audo[1,2], Jonathan Lemaitre[1], Isabelle Hardy[1], Dominique Bosc[1], Guillaume Vignaud[2], Isabelle Pillin[2]

(1) CNRS, UMR 6082 Foton, Enssat, 6 rue de Kerampont, CS 80518, 22305 LANNION Cedex
(2) Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux de Bretagne (LIMATB), Université de Bretagne Sud, Centre de Recherche, BP 92116, Rue Saint Maudé, 56321 LORIENT

1. Introduction :

L'optique intégrée est un domaine de la physique qui s'attache à réaliser des systèmes optiques sur des surfaces de dimension réduite, ce qui offre la possibilité de produire des fonctions optiques complexes tout en miniaturisant les composants, en particulier pour les télécommunications. Créer un guide d'onde de taille micrométrique peut, dans ce contexte, être un objectif de travail.

Pour cela, différentes solutions sont envisageables en terme de matériau. L'utilisation des polymères correspond à un sujet de recherche actif au laboratoire Foton, de par leurs propriétés optiques et mécaniques avantageuses. Leur transparence aux longueurs d'ondes télécoms, mais aussi leur large gamme d'indice de réfraction justifient cet intérêt. Cependant, l'emploi des polymères en optique intégrée doit d'abord passer par la résolution de divers problèmes. Ainsi, une attention particulière est portée sur le choix des polymères mis en oeuvre et sur le procédé de fabrication du guide. En effet, la compatibilité des différents matériaux présents dans le guide, du point de vue de leurs propriétés physico-chimiques, est un point non négligeable, afin d'assurer une qualité satisfaisante des différentes interfaces. De plus, au cours des différentes étapes de post-traitement thermiques intervenant dans la création du guide et permettant d'optimiser les propriétés thermomécaniques d'une nouvelle couche introduite, les polymères précédemment déposés peuvent subir des modifications qui altèrent la qualité des interfaces. Ces défauts entraînent alors la diffusion du faisceau lumineux, ce qui correspond à une augmentation des pertes optiques du composant.

L'identification des paramètres à optimiser passe nécessairement par la caractérisation approfondie des diverses couches du guide. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail ici présenté.

2. Création de guides optiques :

Un guide d'onde est un dispositif permettant de transporter une onde lumineuse dans une direction privilégiée par confinement au sein de matériaux diélectriques. Il se compose principalement d'un cœur et d'une gaine, correspondant à une différence d'indice de réfraction devant répondre à certains critères (Cf. Figure 1).

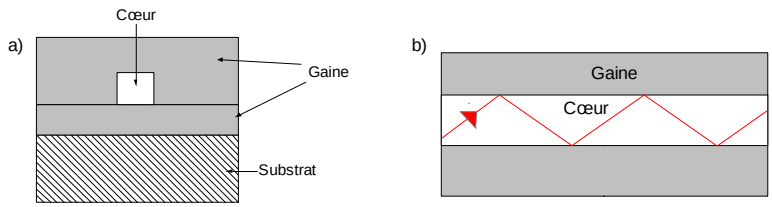


Figure 1 : Schéma d'un guide optique avec les différents éléments le composant, a) vue de face, b) vue de côté.

Pour qu'une onde optique soit confinée à l'intérieur du cœur, il est nécessaire d'être en condition de réflexion totale. De plus, le matériau de la gaine supérieure et celui de la gaine inférieure ne sont pas nécessairement identiques. Le guidage d'une onde lumineuse y est possible, à condition que les indices des deux matériaux composant la gaine soient supérieurs à celui du cœur. Une différence

d'indice élevée est recherchée, afin d'obtenir un meilleur confinement de la lumière et donc de réduire la taille du guide.

Différents matériaux sont utilisables pour la fabrication de ces guides, présentant chacun leurs avantages et leurs inconvénients [1]. On peut citer les verres, avec en particulier la silice, les matériaux semi-conducteurs comme le silicium, ou encore les nitrures et oxynitrures de silicium. Les polymères constituent une solution innovante et prometteuse, compte tenu de leurs pertes optiques intrinsèques qui sont a priori peu importantes. Les propriétés moléculaires de certains polymères permettent une absorption optique faible sur le spectre de longueurs d'onde utilisé en télécoms. Autre avantage, les polymères possèdent un domaine d'indice de réfraction large allant de n = 1,3 à 1,7. En conséquence, il est possible de choisir des polymères de gaine et de cœur, donnant un contraste d'indice élevé. D'autre part, la facilité de mise en œuvre et la possibilité de moduler les propriétés physico-chimiques de ces matériaux par fonctionnalisation des molécules sont aussi ici des points essentiels.

Par ailleurs, des contrastes d'indices de 0,1 imposent des dimensions pour le guide légèrement supérieures au micron, ce qui reste compatible avec l'utilisation de la photolithographie conventionnelle à 365 nm pour la définition des motifs. Plus le contraste d'indice est élevé, plus les dimensions géométriques du guide optiques sont petites, afin d'être en régime de propagation monomode et afin d'avoir un mode (répartition de l'énergie lumineuse dans le plan transversal à la direction de propagation) confiné dans le cœur. Plus la lumière est confinée dans le cœur, plus le rayon de courbure des circuits peut être réduit, sans apporter d'atténuation supplémentaire due à la courbure, ce qui permet de densifier les circuits et fonctions en optique intégrée (Cf. Figure 2).

Réalisation de guides gravés

Materials	PMATRIFE (cladding)	PMMA (core)	PMMI (core)	PVCi (core)
Index at 1550nm	1.409	1.481	1.522	1.582
Contrast with PMATRIFE	-	0.072	0.113	0.173
w(µm)	-	2.5	1.5	1.4
Minimum radius of curvature (µm)	-	120	90	24
IR in cm $^{-2}$ ~	-	1100	3400	41000

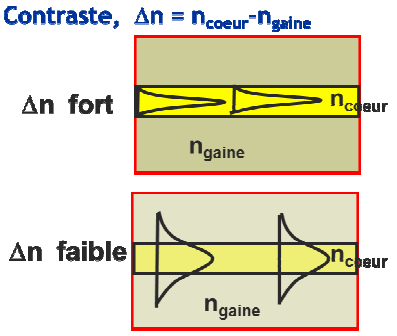


Figure 2 : Tableau de caractérisation des guides gravés par FOTON pour différents matériaux polymères. Incidence sur la taille du guide w, le rayon de courbure admissible et la densité de fonctions selon le contraste d'indice cœur/gaine correspondant.

Un des couples de polymères mis en œuvre au laboratoire Foton correspond au PMATRIFE pour la gaine supérieure et inférieure et à la Su-8 pour le cœur. Le PMATRIFE, Poly(2,2,2 MéthAcrylate de TRIFluoro-Ethyle) [1] est un polymère principalement utilisé dans l'industrie du revêtement de sol. Son indice de réfraction est donné à 1,409 à 1550 nm [2]. La Su-8 [3] est une résine photosensible couramment employée dans la réalisation de composants optiques [4]. Les possibilités de moduler ses propriétés en fonction des conditions de préparation sont une des raisons de son utilisation. Son indice (1,6031 à 1,6110 à 500 nm [5]), est de 1,575 à 1550 nm, valeur déterminée par la technique du m-lines par Foton [8]. Ces deux matériaux permettent donc d'obtenir théoriquement un contraste d'indice d'environ 0,17 à l'interface cœur-gaine.

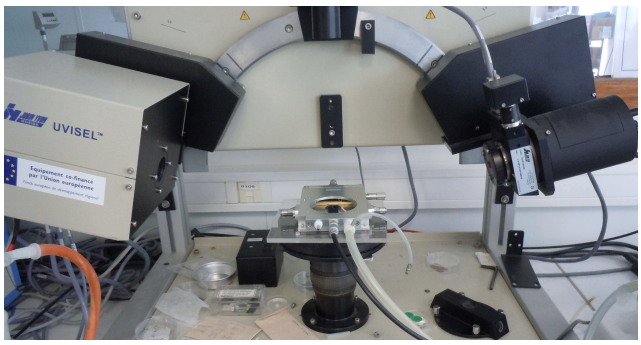
3. Caractérisation par spectroscopie ellipsométrique des deux matériaux polymères :

Afin d'approfondir la caractérisation des deux matériaux polymères choisis, une analyse par spectroscopie ellipsométrique est mise en œuvre. L'ellipsométrie est une technique optique non destructive permettant d'analyser et de caractériser les propriétés intrinsèques d'un échantillon. Cette méthode consiste à étudier la modification de la polarisation d'un faisceau lumineux après interaction

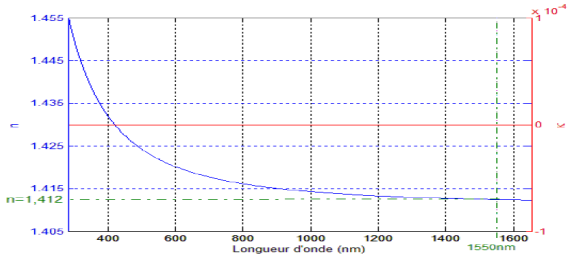
avec l'échantillon. Les propriétés accessibles sont par exemple l'indice de réfraction d'un matériau ou encore son épaisseur [6,7]. L'ellipsomètre « Jobin Yvon-Uvisel » utilisé dans ce contexte (Cf. Figure 3) est composé principalement d'une lampe à vapeur de Xénon, émettant dans le proche UV jusqu'à l'IR, de 2 polariseurs, le second servant d'analyseur, et d'un détecteur avec monochromateur, afin d'étudier la réflexion pour chaque longueur d'onde.

En ellipsométrie, l'acquisition des mesures se fait de façon indirecte. L'onde électromagnétique se réfléchit sur la surface et se transforme en une onde elliptique. Cela permet de mesurer les 2 angles ellipsométriques Ψ et Δ, afin de tirer profit de l'équation fondamentale de l'ellipsométrie $\rho=\tan\Psi\exp(i\Delta)$, où le paramètre ρ est le rapport des coefficients de réflexion r_p /r_s. Cette technique consiste à comparer avec un modèle théorique les résultats expérimentaux : les valeurs recherchées sont déterminées lorsque les courbes expérimentales coïncident avec les courbes théoriques.

3-a



3-b



3-c

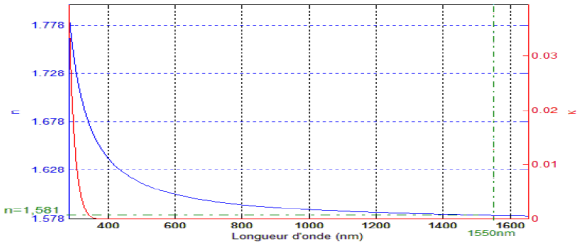
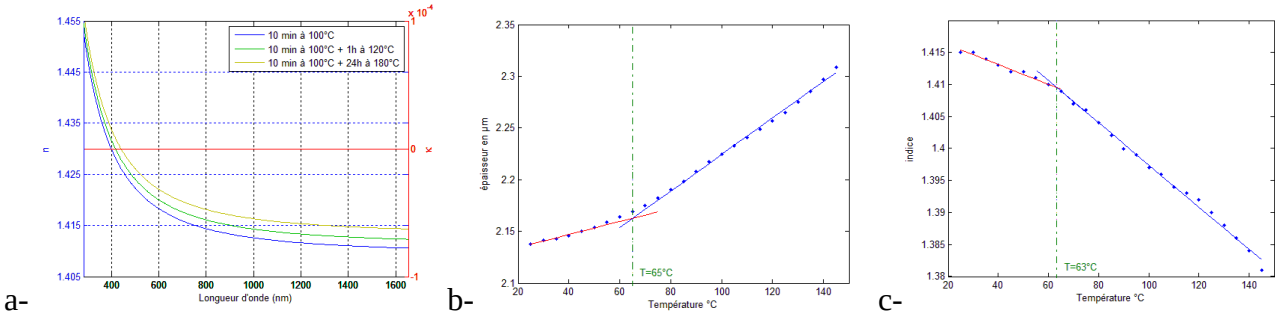


Figure 3 : Analyses effectuée par spectroscopie ellipsométrique : - a : appareil permettant de déterminer les courbes n = f(λ), -b :courbe du PMATRIFE (n = 1,412 à 1550 nm – utilisation du modèle "Classical" affiné), -c : courbe de la Su8 (n = 1,581 à 1550 nm – utilisation du modèle "Double New Amorphous").

La couche de PMATRIFE pouvant subir un post-traitement thermique après dépôt, pour la stabiliser, toute une étude a été mise en place par ellipsométrie en fonction de la durée et de la température à laquelle est effectué ce traitement, sachant que cette technique offre la possibilité de déterminer la température de transition vitreuse d'un matériau (T_g) [7]. Cette grandeur T_g est définie par la température pour laquelle un polymère passe de son état vitreux (caractérisé par de longues chaînes de polymères entremêlées, bloquées les unes par rapport aux autres et donc immobiles) à un état caoutchouteux (chaînes mobiles, le polymère est capable de s'écouler). Lorsque le matériau polymère subit une élévation de température, il se dilate, ce qui augmente son épaisseur. Cette variation s'effectue linéairement en fonction de la température, mais, au dessus de T_g, ce changement d'épaisseur est différent suite au changement d'état du polymère. Ainsi en reportant la variation d'épaisseur en fonction de la température, un changement de pente est observé, ce qui permet de déterminer la T_g. De même, l'indice de réfraction du polymère, étant relié directement à la nature et au nombre d'atomes par unité de volume, il est, à priori, expérimentalement possible d'accéder à la T_g par suivi de l'indice en fonction de la température.

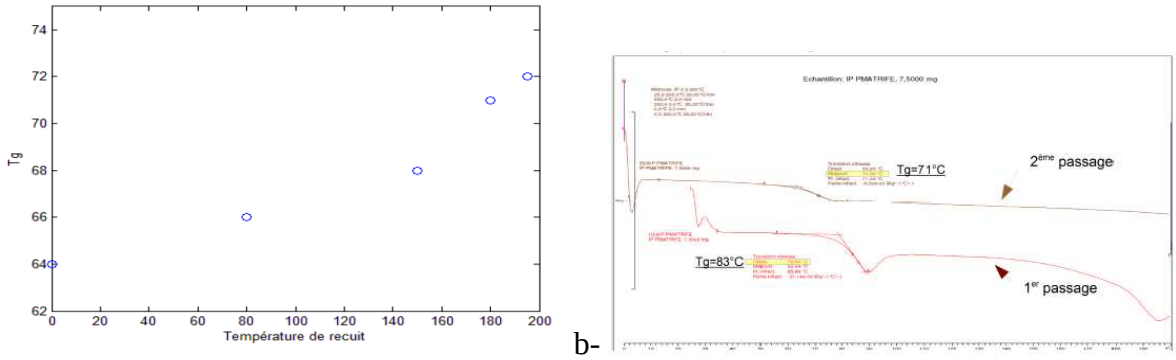
L'étude de l'épaisseur et de l'indice du PMATRIFE en fonction de la température a été effectuée par acquisition des paramètres Ψ et Δ pour des longueurs d'onde allant de 310nm à 1630 nm, pour des températures de post-traitement des échantillons comprises entre 25°C à 145°C (Cf. Figure 4).



a- b- c-

Figure 4 : Etude de la température de transition vitreuse de PMATRIFE en fonction de la température : - a : influence de la température et de la durée du post-traitement sur la courbe n = f(λ) ; b- détermination de T_g à partir de l'épaisseur du film de PMATRIFE en fonction de la température ; -c : idem pour l'indice de réfraction du film.

Sont alors tracées la courbe Tg en fonction de la température (Cf. Figure 5) et celle de la durée du post-traitement. Toute cette analyse permet finalement d'optimiser le traitement proposé à une température de 180°C pour une durée d'une heure. L'augmentation de Tg en fonction de la température, à laquelle est effectué le post-traitement, est attribuée à la présence de solvant résiduel dans le polymère après création du film (ce solvant permet initialement de dissoudre le polymère, puis de le déposer à la tournette), ce qui modifie malheureusement les propriétés du polymère et n'assure pas une stabilité totale de l'échantillon lors de la suite des opérations intervenant dans la création du guide. Par ailleurs, la valeur maximale de Tg obtenue est en accord avec celle déterminée par DSC (differential scanning calorimetry) : T_g = 71 °C (c'est la valeur au second passage qui doit être prise en compte, déterminée directement au sein du polymère).

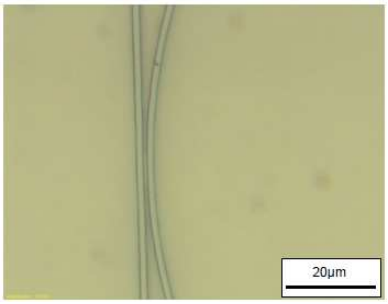


a- b-

Figure 5 : Etude de la température de transition vitreuse du PMATRIFE en fonction de la température à laquelle est effectuée le post-traitement thermique du film.

4. Caractérisation des guides optiques :

Après dépôt de Su8 sur le PMATRIFE, différentes microstructures correspondant à des guides optiques sont créées par un procédé associant la lithographie conventionnelle par masquage à une étape de gravure RIE (reactive ionic etching) [8]. Ces structures sont caractérisées par différentes techniques de microscopie : - optique, - électronique à balayage et - à force atomique (Cf Figure 6). En particulier, pour l'exemple ci-dessous reporté lié à la fabrication de microrésonateurs, les analyses mettent en évidence une largeur de guide de 1,5 µm et, plus particulièrement, un gap entre l'anneau et le guide droit égal à 500 nm. La recherche d'une séparation la plus fine possible est ici un des éléments clés de l'étude, sachant qu'elle est essentielle pour le processus de miniaturisation et l'optimisation du couplage entre le guide droit et l'anneau.

a- 

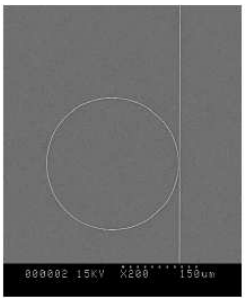
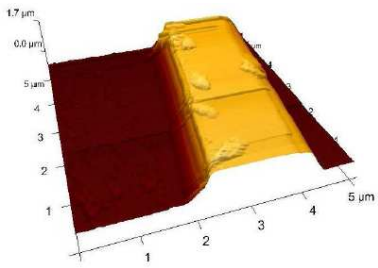
b- 
c- 

Figure 6 : Images obtenues lors de la création d'un microrésonateur par : -a : microscopie optique ; -b : au MEB ; -c : analyse du guide droit par AFM.

5. Conclusion :

Cette thématique de recherche engendre donc un programme de recherche pluridisciplinaire. Afin de disposer de systèmes de plus en plus variés et complexes, en particulier de composants de base qui soient aussi petits que possible, souples d'utilisation et bon marché, la création de guides optiques polymères performants est une étape incontournable pour parvenir à la fabrication de composants optiques passifs, tels que des coupleurs et diviseurs, mais aussi des filtres, commutateurs et atténuateurs variables. Tous ces composants doivent ici avoir des pertes d'insertion et des consommations d'énergie compatibles avec les spécifications standard.

6. Bibliographie

1. A. MAALOUF, "Contribution à l'étude des procédés de réalisationde circuits intégrés optiques en matériaux polymères", Thèse de doctorat, Université de Rennes 1, 2007

2. PMATRIFE/Sigma-Aldrich, http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/591963

3. Su-8/ MicroChem, http://microchem.com/Prod-SU8_KMPR.htm

4. B. BECHE, "Integrated photononics devices on SU8 on organic materials", International Journal of Physical Sciences, vol. 5, pp 612-618, 2010

5. H.G. TOMPKINS, E.A. IRENE, "Handbook of ellipsometry", Springer, 2005

6. A.T. CANNISTRA, T.J. SULESKI, "Characterization of hybrid molding and litography for SU-8 micro-optical components", J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, vol. 9, pp. 13025, 2010

7. A. NARLADKAR, E. BALNOIS, G. VIGNAUD, Y. GROHENS, J.-F. BARDEAU, "Morphology and glass transition of thin polylactic acid films", Polym. Eng. Sci., vol. 48, pp. 1655-1660, 2008

8. A. MAALOUF, M. GADONNA, D. BOSC & I. HARDY, "Integrated polymers (PVCi/PMATRIFE) microring resonators", Opt. Com., vol. 285, pp. 4088-4091, 2012