

Fabrication de composants photoniques à l'aide d'axicons

Rosalie Forest et Michel Piché

Centre d'optique, photonique et lasers
Département de physique, de génie physique et d'optique
Université Laval, Québec, Qc, Canada, G1K 7P4

Les 15 ans du COPL

7 juin 2004



Introduction

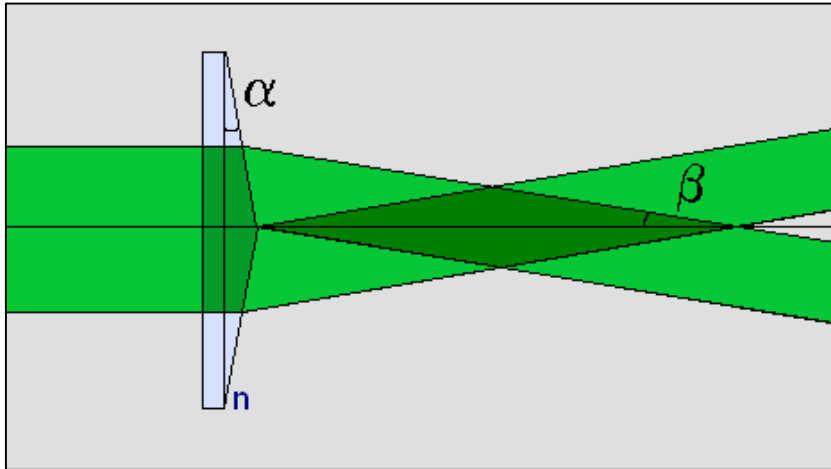


- Les interactions non linéaires avec le rayonnement laser permettent la fabrication de composants photoniques dans le volume de matériaux optiques transparents.
- Intérêt pour la microfabrication de
 - Structures guidantes via un changement permanent d'indice de réfraction (guides cylindriques, coupleurs)
 - Guides creux à géométrie spéciale
 - Structures et cavités micrométriques pour applications en microbiologie (μ -TAS: micro total analysis systems)
- La particularité du projet réside en l'utilisation de faisceaux Bessel générés à l'aide d'un axicon, une lentille conique, pour fabriquer des composants photoniques dans des matériaux transparents.

L'axicon



- Un axicon est un élément optique qui induit un déphasage linéaire en fonction de la position radiale. Un axicon en réfraction est donc une lentille conique d'angle au sommet a , qui dévie les rayons parallèles à l'axe optique d'un angle β :



- Avec la loi de Snell-Descartes on détermine:
$$\mathbf{b} = \arcsin(n \sin \mathbf{a}) - \mathbf{a}$$
- On obtient ainsi une ligne focale au lieu du point obtenu avec une lentille conventionnelle et on peut observer un anneau dans le champ lointain.

Faisceaux produits par l'axicon



- Les caractéristiques du champ phaseur du faisceau obtenu immédiatement après l'axicon peuvent être calculées avec l'intégrale de Fresnel-Kirchhoff en coordonnées cylindriques:

$$\tilde{f}_{trans}(r, z) = \int_0^a \tilde{f}_{inc}(\mathbf{r}, z) \tilde{t}(\mathbf{r}) \tilde{K}(\mathbf{r}, r) \mathbf{r} dr$$

- Avec $\tilde{t}(\mathbf{r}) = \exp[jk\mathbf{b}\mathbf{r}]$ (la transmission de l'axicon)

$$\tilde{K}(\mathbf{r}, r) = j \frac{k}{z} \exp\left[-j \frac{k}{2z} (\mathbf{r}^2 + r^2)\right] J_0\left(\frac{k r \mathbf{r}}{z}\right)$$

et a est le rayon de l'ouverture de l'axicon

- Pour résoudre l'intégrale, on peut avoir recours à l'approximation de la phase stationnaire qui donne, règle générale, d'excellents résultats.

Approximation de la phase stationnaire



- La solution analytique d'une intégrale du type suivant peut être approchée grâce à l'approximation de la phase stationnaire qui s'exprime comme suit:

si x est très grand,

$$I = \int_a^b \exp[jxp(t)] q(t) dt \cong I|_{t=b} - I|_{t=a} + \sum_i I|_{t=t_{0i}}$$

où t_{0i} satisfait $p'(t_{0i}) = 0$

$$I|_{t=b \text{ ou } a} = \mp \frac{q(a)}{jxp'(a)} \exp[jxp(a)]$$

$$I|_{t=t_0} = q(t_0) \exp[jxp(t_0)] e^{j\frac{\pi}{4}} \sqrt{\frac{I}{p''(t_0)}}$$

Focalisation d'un faisceau gaussien avec un axicon

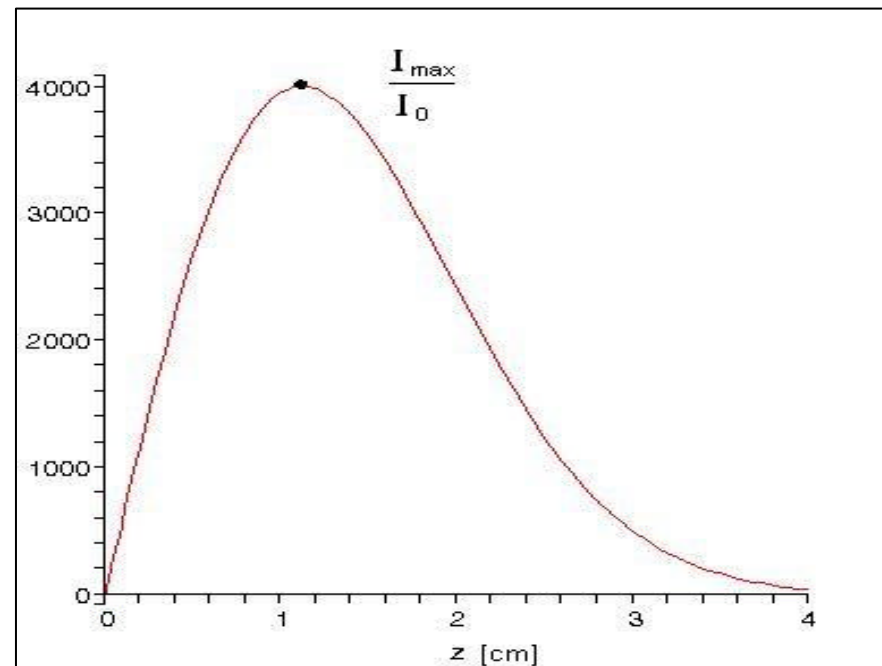


- Si on focalise un faisceau gaussien de taille w et d'intensité sur l'axe I_0 avec un axicon (angle β), l'approximation de la phase stationnaire permet d'obtenir:

$$\frac{I_{\max}}{I_0} = \mathbf{p} \mathbf{k} \mathbf{b} w e^{-1/2},$$

à la position

$$z = \frac{w}{2\mathbf{b}}$$

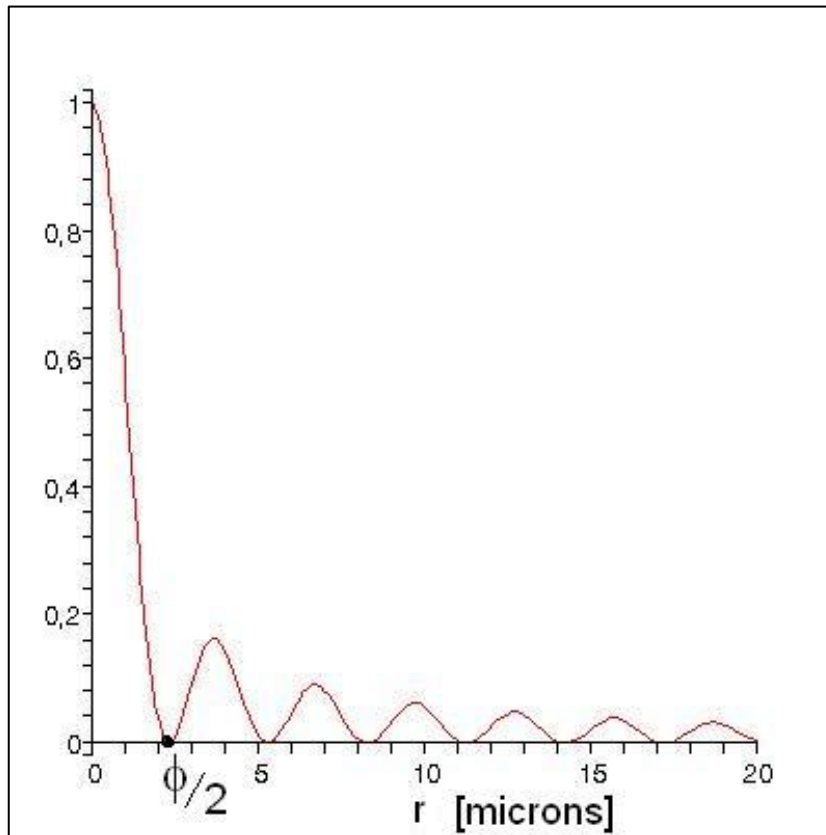


(Valeurs numériques: $\lambda = 532$ nm, $\alpha = 10^\circ$, $n = 1,5$, $w = 2$ mm)

Focalisation d'un faisceau gaussien avec un axicon (suite)



Radialement, le champ est un faisceau Bessel du premier ordre ce qui donne, en terme d'intensité, un faisceau ayant l'allure suivante:



- Le rayon du premier lobe du faisceau Bessel est invariant selon la distance z après l'axicon.
- Son rayon est donné par:

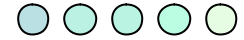
$$\frac{f}{2} = \frac{2,405}{kb}$$

Fabrication de guides d'onde



- L'exposition de matériaux diélectriques transparents à des impulsions laser femtoseconde de très forte intensité [$\sim 10^{14}$ W/cm²] donne lieu à un changement permanent de l'indice de réfraction de l'ordre de 10^{-3} .
- Les mécanismes à l'origine de ce phénomène ne sont pas réellement élucidés.
- Les expériences précédentes font usage de lentilles conventionnelles pour focaliser le faisceau laser (focalisation en un point): il faut donc déplacer le matériau en cours d'exposition et les guides obtenus n'ont pas la même géométrie selon le sens du déplacement.
- Avec un axicon, on peut utiliser toute la puissance du laser et nul besoin de déplacer le matériau pour obtenir des guides d'onde cylindriques de longueur élevée.

Structures creuses

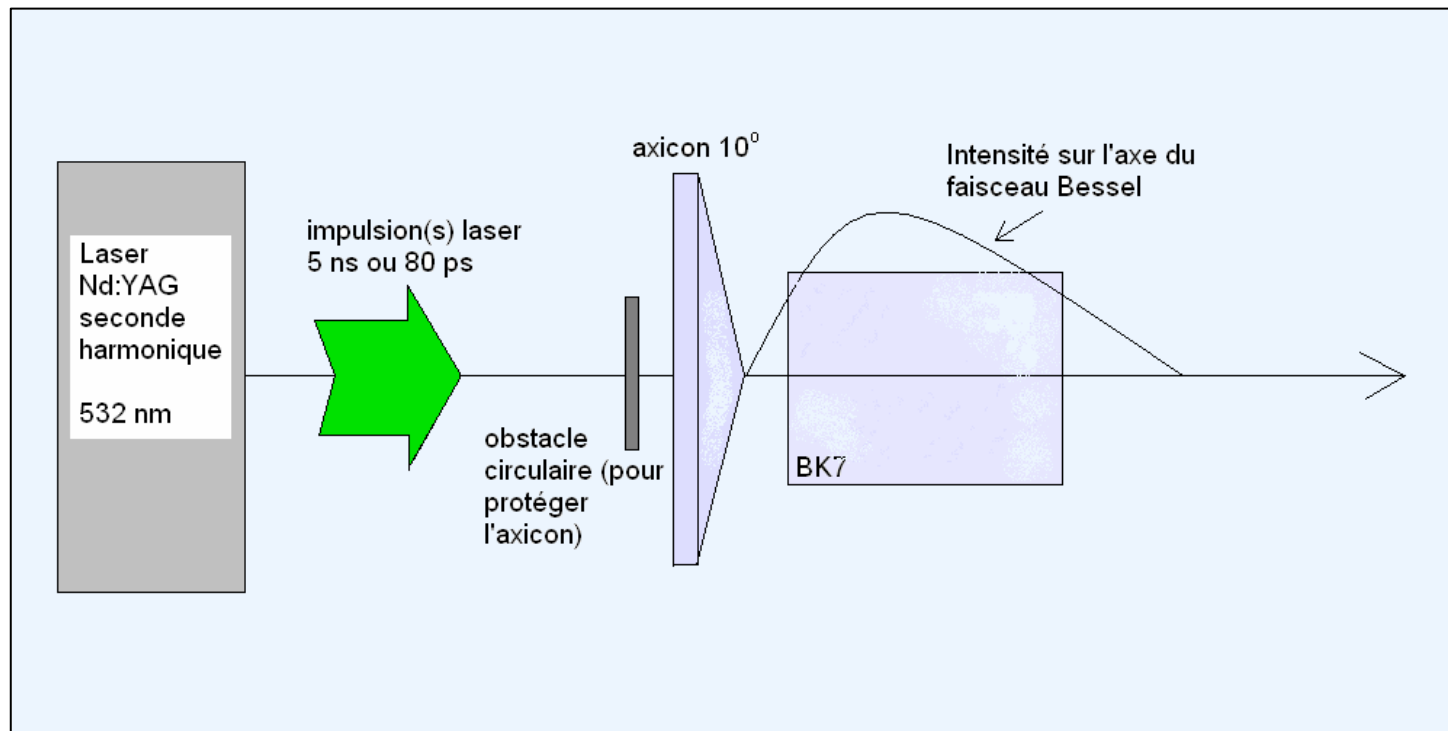


- L'exposition du matériau à de très fortes intensités cause des modifications ou dommages irréversibles qui peuvent être mis à profit.
- En plongeant de la silice amorphe dans un bain d'acide HF, les régions préalablement exposées au faisceau laser sont préférentiellement attaquées. On peut supposer qu'il en sera de même pour d'autres verres optiques.
- On peut ainsi produire des micro canaux dans le volume ou des reliefs complexes à la surface de verres optiques.

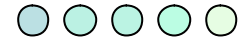
Expériences



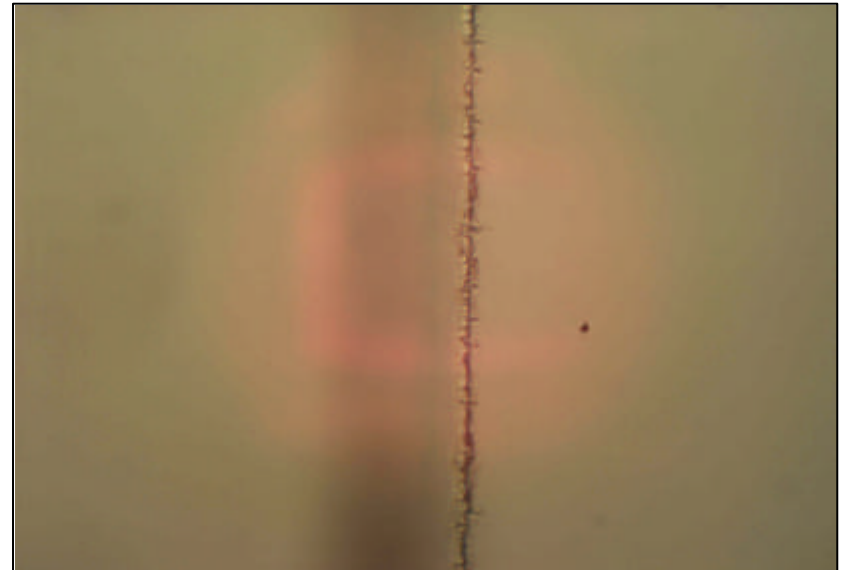
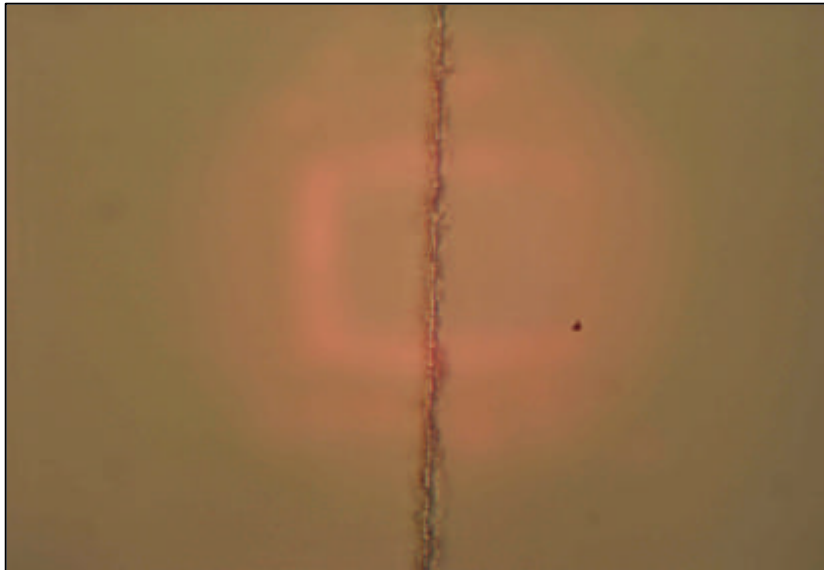
- Dans un premier temps, des expériences ont été conduites avec un verre borosilicaté (BK7), des impulsions de 5 ns et de 80 ps à 532 nm. et un axicon de 10° .



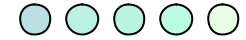
Résultats



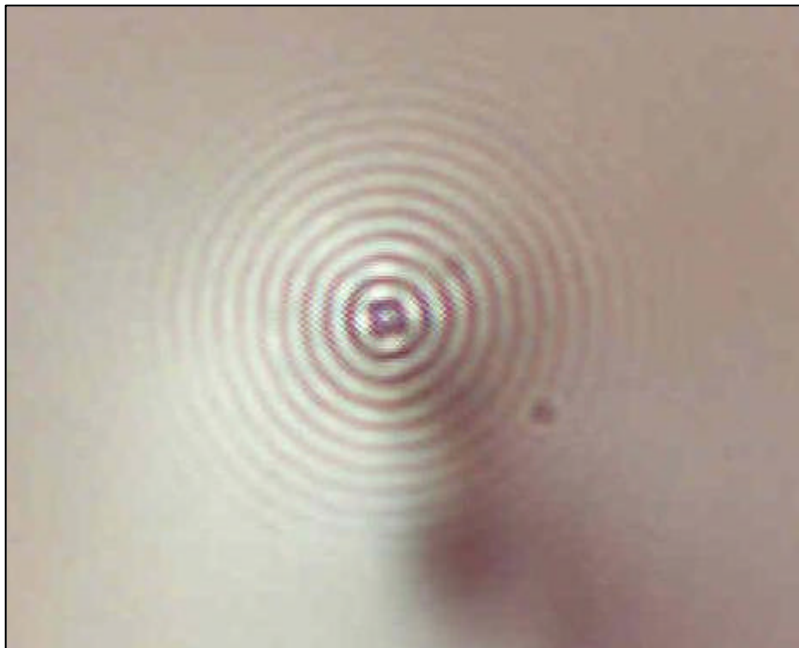
- Que l'on ait utilisé une seule ou plusieurs impulsions, et ce pour les deux durées utilisées, il s'est avéré possible d'inscrire des motifs cylindriques de grande extension longitudinale dans le volume du matériau sans nécessairement affecter la surface.
- Ces motifs ne semblent pas être le résultat d'un changement d'indice mais plutôt d'un dommage permanent.



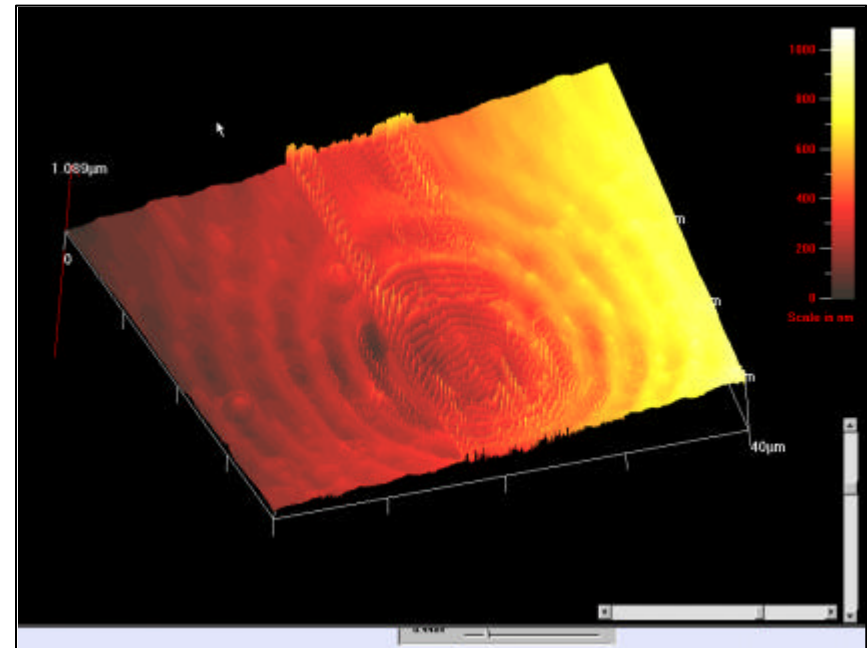
Résultats (suite)



- Sur la face avant du BK7, des anneaux peuvent être observés dans certains cas (une impulsion de 5 ns). Le nombre d'anneaux secondaires dépend de l'intensité du faisceau incident.



Vue au microscope

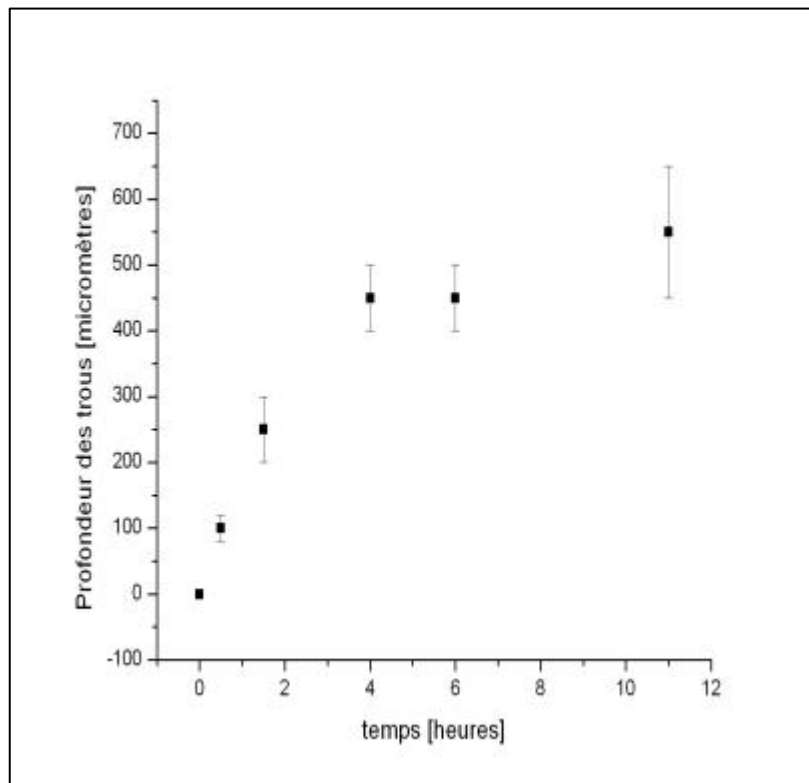


Vue avec AFM

Attaque avec acide HF

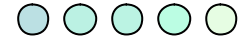


Un morceau de BK7 a été trempé dans l'acide HF (5% vol) pour une durée totale de 11 heures.



- On obtient des cônes dont la profondeur est de plus en plus importante mais dont l'angle au sommet reste pratiquement constant pour $t > 2h$.
- Aux endroits où les dommages ne se rendaient pas jusqu'à la surface (invisibles au microscope), on observe plutôt une dépression en demi-cercle d'environ $200 \mu m$ de diamètre.

Orientations futures



- L'utilisation d'un laser femtoseconde devrait permettre d'induire un ?n sans endommager le matériau pour écrire des guides d'onde cylindriques
- Trouver une façon de réaliser un faisceau Bessel avec une intensité sur l'axe constante sur une certaine distance
- Refaire des tests pour créer des micro canaux: optimisation du temps de trempage dans l'acide, concentration etc.
- Explorer les techniques pour des géométries plus complexes

Conclusion



- Les faisceaux Bessel produits en focalisant un faisceau laser gaussien à l'aide d'un axicon ont été modélisés et une solution analytique est obtenue en utilisant l'approximation de la phase stationnaire.
- L'utilisation de faisceaux Bessel générés avec des axicons peut s'avérer être une variante économique et simple pour la fabrication de dispositifs optiques tels que les guides d'onde cylindriques.
- L'acide HF permet d'attaquer préférentiellement les parties du matériau (BK7) qui ont été exposées au faisceau laser. On pourrait éventuellement utiliser ce phénomène pour inscrire des microstructures creuses dans le verre.

Remerciements



- **COPL**, Centre d'Optique Photonique et Laser
- **ICIP/CIPI**, Institut Canadien pour les Innovations en Photonique
- **FQRNT**, Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies
- **CRSNG**, Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada

