

# THESE

présentée à  
L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

pour obtenir le titre de  
**DOCTEUR EN PHYSIQUE DE L'UNIVERSITE**

Discipline

Laser Molécules et Rayonnement Atmosphérique

Par

**Arif HIDAYAT**

**Contribution à l'étude de la stabilité de réseaux d'indice inscrits  
dans des fibres optiques germanosilicates à l'aide d'un laser à ArF  
ou d'un laser Titane-Saphire fonctionnant en régime  
femtoseconde**

*Soutenue le 25 septembre 2001 devant la commission d'examen :*

B. POUMELLEC	Chargé de Recherche au CNRS Université de Paris Sud	Président
R. BOCQUET	Professeur, Université du Littoral Côte d'Opale	Co-rapporteur
E. FERTEIN	Ingénieur de recherche Université du Littoral Côte d'Opale	Co-rapporteur
A. BOUKENTER	Professeur, Université Jean Monnet	Rapporteur
I. RIANI	Ingénieur, Alcatel, Recherche&Innovation	Examineur
M. DOUAY	Professeur, Université de Lille 1	Co-directeur de thèse
P. NIAI	Professeur, Université de Lille 1	Co-directeur de thèse

## Résumé

Ce mémoire traite d'une contribution à l'étude de la stabilité de réseaux d'indice de réfraction inscrits dans des fibres optiques germanosilicates à l'aide d'un laser ArF ou d'un laser Titane-Saphire fonctionnant en régime femtoseconde

La première partie du mémoire est relatif à des études critiques bibliographiques. Plusieurs mécanismes microscopiques ont été mis en avant pour expliquer la photosensibilité de type I des verres germanosilicates : formation de défauts ponctuels qui modifient la polarisabilité du verre, densification du verre et création de contraintes, diffusion d'espèces chimiques. Nous discutons une étude bibliographique de la stabilité de ces mécanismes en relation avec celles des variations d'indice et des expériences de vieillissement accéléré publiés dans la littérature avant mes travaux. En fin, nous présentons les méthodes et les dispositifs expérimentaux et nous discutons des sources d'incertitude qui affectent nos mesures.

La seconde partie du mémoire porte sur les résultats expérimentaux. Nous présentons d'abord une étude de l'influence du contraste initial du réseau sur la stabilité thermique des caractéristiques du réseau. Nous montrons que le contraste de modulation évolue au cours des élévations thermiques isothermes. Ce résultat peut s'interpréter comme une signature du caractère local de la stabilité telle qu'elle est prévue par l'approche VAREPA.

L'existence d'une variation réversible de réflectivité des réseaux avec la température s'avère comme une source de difficultés pour analyser la décroissance irréversible. Ce phénomène n'est pas observé de façon significative dans les fibres hydrogénées. Le sens de la variation (croissance avec la température) mise en évidence pour des réseaux de type I est opposé à celui relevé pour les réseaux de type IIA. Une loi phénoménologique de variation de la modulation avec la température a été établie à partir des données expérimentales.

En fin, nous avons réalisé une étude préliminaire afin d'estimer la photosensibilité des fibres de télécommunication insolées par le laser IR fonctionnant en régime femto-seconde. Il a été possible d'induire des variations d'indice de réfraction égale à  $6 \times 10^{-3}$  après quelques secondes de l'irradiation. Nous avons aussi inscrit des LPG dans ces fibres en utilisant le laser IR fonctionnant en régime femtoseconde. Il apparaît que la stabilité des LPG inscrits avec ce type de laser est supérieure à celle des changements d'indice créés par insolation UV.

# TABLE DES MATIERES

<u>INTRODUCTION</u>	1
<u>CHAPITRE I :</u>	8
<b>MODELES DE LA PHOTSENSIBILITE DES FIBRES OPTIQUES EN SILICE DOPEE PAR DU GERMANIUM : RELATION AVEC LA STABILITE THERMIQUE DES RESEAUX DE BRAGG</b>	
I-A. Introduction	8
I-B. Modèles des centres colorés	9
I-B-1. Effet d'une insolation ultra violette	9
a. Fibres non-hydrogénées	11
b. Fibres Hydrogénées	12
I-B-2. Effet d'un recuit sur les concentrations de défauts ponctuels et corrélation avec la diminution du changement photo-induit d'indice de réfraction	14
I-C. Modèle de densification photoélastique	17
I-C-1. Ecriture de réseaux et densification	18
I-C-2. Evolution de la densification lors d'élévations thermiques isochrones de réseaux	21
I-D. Modèle des réseaux chimiques	23
I-E. Conclusion	25
Bibliographie	26
<u>CHAPITRE II :</u>	31
<b>ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DES EXPERIENCES ET DES MODELES ELABORES POUR PREDIRE LA STABILITE DES RESEAUX DE BRAGG DE TYPE I ECRITS DANS DES FIBRES GERMANOSILICATES</b>	
II-A. Introduction	31
II-B. Méthodes de vieillissement accéléré	32
II-C. Approches suivies pour exploiter les expériences de vieillissement accéléré	34
II-D. Etude bibliographique des expériences destinées à mesurer la stabilité de réseaux de type I (fibres germanosilicates hydrogénées ou non)	38
II-D-1. Principaux résultats expérimentaux déduits des études menées à Lille : examen qualitatif des courbes de destruction isochrone (durée 30 min) par pas ( $\Delta\theta = 50^\circ\text{C}$ ) de réseaux de type I écrits dans des fibres germanosilicate [Leconte, 1998]	38
II-D-2. Validité statistique de la représentation des données de destruction par un ajustement sur les lois empiriques (II-1), (II-2) ou (II-3) (tableau I-1)	41

II-E. Analyse critique des méthodes suivies pour conduire et exploiter les expériences de vieillissement accéléré.	42
II-F. Conclusion de l'étude bibliographique	45
Bibliographie	47

**CHAPITRE III :** 50  
**LES RESEAUX DE BRAGG. DESCRIPTION DES FIBRES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX**

III-A. Le réseau de Bragg uniforme utilisé pour estimer la photosensibilité des fibres et la stabilité de cette dernière	50
III-A-1. Définition	50
III-A-2. Détermination des variation d'indice à partir des caractéristiques spectrales de réseaux de Bragg	53
III-A-3. Mesure de la variation d'indice moyen à l'aide d'un Fabry-Perot à réseaux de Bragg	55
III-B. Les Fibres étudiées	56
III-C. Dispositif d'inscription des réseaux de Bragg et d'analyse spectrale	56
III-C-1. Dispositif d'inscription des réseaux de Bragg	56
III-C-2. Dispositif d'analyse spectrale	60
III-C-3. Les fours utilisés pour procéder aux expériences de vieillissement accéléré	61
a. Dispositif utilisé avec la méthode isotherme	61
b. Dispositif utilisé avec la méthode isochrone	63
III-D. Détermination de $\Delta n_{\text{mod}}$ et $\Delta n_{\text{moy}}$ au cours des expériences d'inscription ou de vieillissement accéléré : sources d'incertitude	64
Bibliographie	72

**CHAPITRE IV :** 74  
**INFLUENCE DU CONTRASTE INITIAL DU RESEAU SUR LA STABILITE THERMIQUE DES CARACTERISTIQUES SPECTRALES DE RESEAUX ECRITS DANS UNE FIBRE DE TELECOMMUNICATION AU MOYEN D'UN LASER A ArF**

Article 1 :INFLUENCE OF BLANKET POST-EXPOSURE ON THE THERMAL STABILITY OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF GRATINGS WRITTEN IN A TELECOMMUNICATION FIBER USING LIGHT AT 193 nm	
I. INTRODUCTION	78
II. EXPERIMENTAL DETAILS AND RESULTS	79
III. DISCUSSION	85
IV. CONCLUSION	88
REFERENCE	90
Bibliographie	93

<u>CHAPITRE V :</u>	94
ETUDE DES VARIATIONS REVERSIBLES DES CARACTERISTIQUES SPECTRALES DE RESEAUX DE BRAGG SOUS L'EFFET D'UN CHANGEMENT DE TEMPERATURE	
Article 2 : TEMPERATURE-INDUCED REVERSIBLE CHANGES IN FIBER BRAGG GRATING SPECTRAL CHARACTERISTICS	
I. INTRODUCTION	97
II. EXPERIMENTAL DETAILS	98
III. EXPERIMENTAL RESULTS	100
IV. DISCUSSION	107
V. CONCLUSION	116
REFERENCE	118
Bibliographie	121
<u>CHAPITRE VI :</u>	122
MODIFICATION D'INDICE DANS DES FIBRES DE TELECOMMUNICATION SOUMISES A UN RAYONNEMENT LASER FEMTOSECONDE A 810 NM	
Article 3 : REFRACTIVE-INDEX CHANGES OF STANDARD TELECOMMUNICATION FIBER THROUGH EXPOSURE TO FEMTOSECOND LASER PULSES AT 810 nm	
I. INTRODUCTION	125
II. EXPERIMENTAL PROCEDURE	126
III. RESULTS	128
IV. CONCLUSION	130
REFERENCE	132
<u>CHAPITRE VII :</u>	135
CONCLUSION GENERALE	
ANNEXE	139

# INTRODUCTION

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent d'une contribution à l'étude de la stabilité de réseaux d'indice de réfraction inscrits dans des fibres optiques germanosilicates à l'aide d'un laser ArF ou d'un laser Titane-Saphire fonctionnant en régime femtosecond.

L'inscription d'un réseau de Bragg dans une fibre optique consiste à insoler le cœur de cette fibre soit par un champ de franges ultraviolettes (réseau à courte période  $\Lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$ ) soit par une insolation uniforme appliqué périodiquement par pas le long de l'axe de la fibre (réseau à longue période,  $\Lambda > 200 \mu\text{m}$ ) [Kasyhap, 1999]. Les insolutions provoquent une modulation de l'indice de réfraction du cœur de la fibre, périodique le long de son axe. Dans la suite du mémoire, nous convenons de désigner les réseaux à courts périodes sous le vocable de réseaux de Bragg et les réseaux à long pas sous l'acronyme LPG (long period gratings).

La présence d'un réseau de Bragg se manifeste par un pic dans un spectre de réflexion (un creux dans le spectre de transmission) de la fibre. Le pic est localisé à la longueur d'onde de Bragg  $\lambda_B$  du réseau. Il traduit l'existence d'un couplage entre les deux modes fondamentaux contra-directifs [Kasyhap, 1999]. Le LPG introduit des pertes sélectives en longueur d'onde en raison du couplage qu'il crée entre le mode fondamental et des modes co-propagatifs de gaine [Kasyhap, 1999]. La fibre offre des degrés de liberté dans les directions axiale et radiale si bien que des réseaux à profil d'indice non uniforme dans ces directions peuvent être inscrits pour réaliser des fonctions de filtrage spécifiques et complexes [Erdogan, 1997]. Les insolutions provoquent également des variations de biréfringence de la fibre [Erdogan, 1994]. Cette propriété associée au caractère vectoriel de la lumière peut être mise à profit pour inscrire des filtre sélectifs en polarisation [Kasyhap, 1999]. L'ensemble de ces propriétés explique que les réseaux de Bragg et les LPG sont largement utilisés dans les domaines des lasers à fibre, des capteurs à fibre optique et dans l'industrie des télécommunications [J.Lightwave. Tech, 1997]. La permanence des changements d'indice créés par les insolutions lumineuses conditionne la stabilité des caractéristiques spectrales des réseaux. L'étude de cette permanence constitue donc un sujet de grand intérêt pour les industriels. Elle apporte de plus des renseignements précieux sur les mécanismes de la photosensibilité des fibres.

A mon arrivée au laboratoire PhLAM en 1998, il m'a donc été proposé de m'intéresser à ce sujet. Le laboratoire disposait d'une expérience dans les techniques d'inscription de réseaux de Bragg [Legoubin, 1994], mais avait surtout consacré son activité à l'étude des mécanismes microscopiques de la photosensibilité de différentes fibres. Ainsi le laboratoire a été à l'origine de la découverte de la photosensibilité de type IIA des fibres germanosilicates [Fertein, 1995]. L'évolution de la modulation d'indice de réfraction induite par insolation de fibres faiblement dopées est monotone en fonction de durée de l'insolation. Cette propriété est caractéristique de la photosensibilité de type I. Le comportement sous l'effet d'une insolation de fibres fortement dopées ( $[\text{GeO}_2] > 12\%$ , diamètre de cœur  $\varnothing \approx 2$  à  $5 \mu\text{m}$ ) est notablement différent de celui des fibres faiblement dopées. Au début de l'inscription, la réflectivité du réseau de Bragg dans l'ordre un commence par augmenter, la longueur d'onde de Bragg du réseau se translate alors vers le rouge. Cette croissance est suivie d'une décroissance et d'une seconde croissance qui est cette fois monotone. Pendant la seconde croissance,  $\lambda_B$  se translate vers le bleu ou semble ne pas évoluer. Les réseaux formés lors de cette seconde croissance sont significativement plus stables que les réseaux de type I [Niay et al, 1994]. Cet ensemble de propriétés correspond à une photosensibilité de type IIA.

La diffusion d'hydrogène à température ambiante et à haute pression ( $> 100 \text{ atm}$ ) constitue un procédé très efficace d'augmentation de la photosensibilité des fibres germanosilicates. Il est d'un usage courant dans l'industrie. Le procédé a été mis au point dans les laboratoires d'ATT des 1993 [Atkins et al, 1993]. Son efficacité pour augmenter la photosensibilité des fibres aluminosilicates a été ensuite démontrée par T. Taunay (1997) au laboratoire. Il a rapidement mis en évidence que le procédé d'hydrogénation des fibres conduit à la fabrication de réseaux de type I et que ces derniers sont moins stables que ceux écrits dans des fibres non hydrogénées [Kasyhap, 1999][Patrick et al, 1995]. P. Cordier *et al* (1998) et C. Dalle *et al* (1999) au laboratoire ont utilisé la spectroscopie infrarouge pour étudier la nature et la dynamique de formation des espèces créées par insolation de verres germanosilicates hydrogénés. Elle a ainsi montré que sous l'effet du rayonnement UV, l'hydrogène réduit le verre selon une réaction qui conduit à la formation d'espèces "eau", hydrures et hydroxyles. La stabilité de l'eau formée dans la réaction s'avère assez faible, ce qui peut expliquer le fait que les réseaux fabriqués dans des fibres chargées en hydrogénation sont moins stables que les réseaux inscrits sans hydrogénation. Le procédé d'hydrogénation présente également d'autres inconvénients: les pertes en excès créées par l'insolation peuvent

s'avérer significatives dans la fenêtre des télécommunications située vers 1.5  $\mu\text{m}$  (bande C) et surtout dans la future bande S ( $\lambda_B < 1.5 \mu\text{m}$ ). Par ailleurs, la formation d'espèces hydroxyles réduit la durée de vie de la luminescence des ions de terre rare [Leconte, 1998]. Il en résulte une réduction du gain des lasers à fibre lorsque les cavités de ces derniers sont fermées par des réseaux de Bragg directement inscrits dans la fibre hydrogénée amplificatrice. Devant les inconvénients inhérents à l'hydrogénation, le laboratoire a cherché (et continue à chercher) à mettre au point des méthodes d'inscription de réseaux qui permettent de s'affranchir du procédé d'hydrogénation. Le travail initié par B. Leconte (1998) s'inscrit dans cette perspective.

B. Leconte (1998) a comparé les efficacités d'inscription de réseaux de Bragg dans une même fibre en fonction de la longueur d'onde du laser utilisé pour l'inscription. Il a ainsi montré que le laser à ArF s'avère très efficace au début des inscriptions des fibres germanosilicates, mais que cette efficacité se sature ensuite si bien que les variations d'indice créées s'avèrent le plus souvent insuffisante si le procédé d'hydrogénation n'est pas utilisé. Les développements récents de la technologie des lasers infrarouges en régime femto-seconde permettent d'envisager leur utilisation pour l'inscription de LPG dans des fibres ou pour la réalisation de structures de type "guide d'onde" dans les verres. Nous avons donc décidé d'explorer les potentialités de ce type de laser et d'étudier la stabilité des changements d'indice qu'il permet de créer. Les lasers femtosecondes ne sont pas disponibles au laboratoire. Nous avons développé une collaboration sur ce sujet avec l'Université du Littoral.

Devant l'importance que revêt pour les industriels la maîtrise de la stabilité de la photosensibilité, de nombreuses équipes (dont notre laboratoire) ont, depuis 1994, lancé des programmes d'étude sur la stabilité des réseaux de type I écrits dans des fibres de communication. On comprend qu'il s'agit d'une étude complexe: les paramètres qui régissent l'inscription des réseaux sont multiples; par ailleurs, le détail des mécanismes microscopiques de la photosensibilité n'est pas parfaitement élucidé. La principale avancée dans ce domaine trouve son origine dans des approches théoriques élaborées par T. Erdogan *et al* (1994) d'une part et B. Poumellec (1998) d'autre part. Sous réserve de validité de certaines hypothèses, ces auteurs ont, en effet, montré que la variation relative du changement d'indice créé par l'inscription n'évolue pas en fonction des variables indépendantes  $t$  (temps) et  $T$  (température) mais décroît avec une variable  $E_d = k_B T \ln(k_0 t)$  appelée énergie de démarcation. Ce résultat constitue la base des méthodes de passivation des réseaux. D. Razafimahatratra (2000) a

décrit dans son mémoire de thèse une expérience permettant de tester la validité de cette hypothèse. Cette expérience s'est avérée concluante à la condition de prendre en compte un résultat original découvert au laboratoire : la réflectivité de réseaux écrits dans des conditions particulières augmente de façon réversible avec la température. L'origine de ce phénomène n'était pas élucidée si bien qu'une partie de mon travail de doctorat a été consacré à l'étude des conditions dans lesquelles il peut être observé. Une autre hypothèse qui est formulée implicitement dans la plupart des études consiste à confondre l'évolution du changement local d'indice de réfraction avec celle de la modulation (ou de la variation d'indice moyen). Cette hypothèse n'est bien sûr pas correcte si la stabilité du changement d'indice dépend des conditions d'écriture. Ainsi, si l'on suppose que le changement d'indice est d'autant plus stable que la fluence cumulée utilisée pour le créer est grande, il est clair que l'indice de réfraction sur les franges brillantes du réseau décroît moins vite que les franges sombres. Je me suis donc intéressé à la question de la localité de la stabilité du changement d'indice. J'ai ainsi mis au point une méthode de test de l'hypothèse précédemment énoncée.

Le mémoire est organisé de la façon suivante. Les deux premiers chapitres sont relatifs à des études critiques bibliographiques. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des méthodes de mesure et des dispositifs expérimentaux. Mes résultats expérimentaux sont présentés dans les trois chapitres suivants. Ils ont fait l'objet de publications acceptées dans des revues internationales. Nous avons choisi de les présenter sous cette forme afin de rendre plus aisée la lecture de mon mémoire à un public indonésien. La conclusion générale du mémoire est présentée dans le dernier chapitre.

Plusieurs mécanismes microscopiques ont été mis en avant pour expliquer la photosensibilité de type I des verres germanosilicates: formation de défauts ponctuels qui modifient la polarisabilité du verre, densification du verre et création de contraintes, diffusion d'espèces chimiques. Dans le chapitre I du mémoire, nous discutons de la stabilité de ces mécanismes en relation avec celle des variations d'indice. Le chapitre II est relatif à la présentation des expériences de vieillissement accéléré publiés dans la littérature avant mes travaux et aux résultats qui peuvent s'en déduire. Nous montrons qu'une étude rigoureuse de la stabilité d'un réseau implique d'enregistrer simultanément les décroissances de la réflectivité du réseau et de sa longueur d'onde de Bragg et ceci pour différentes valeurs du contraste initial. Nous montrons également que des difficultés d'ordre expérimental surgissent en raison de l'existence de phénomènes réversibles qui perturbent les mesures de la décroissance de

caractéristiques spectrales. Nous consacrons le chapitre III à la présentation des méthodes et dispositifs expérimentaux. Après avoir décrit les dispositifs d'inscription ou de destruction de réseaux et d'analyse de leurs caractéristiques spectrales, nous discutons des sources d'incertitude qui affectent nos mesures. Le chapitre IV traite d'une étude effectuée en collaboration avec Q. Wang (Wuhan Institute of Post and Telecommunication) lors de son séjour dans le laboratoire. Des réseaux ont été écrits dans une fibre de télécommunication avec un laser à ArF (193 nm). Le contraste initial des réseaux constitue le paramètre d'expériences de destruction isotherme dans lesquelles les évolutions de la réflectivité et de la longueur d'onde de Bragg sont enregistrées: test du caractère local ou non-local de la stabilité. Dans le chapitre V, nous nous intéressons au phénomène d'évolution réversible de la réflectivité de réseaux soumis à un changement de température. Nous examinons dans quelles conditions cet effet est mis en évidence et nous établissons une loi phénoménologique qui relie les variations de réflectivité aux variations de température. Nous proposons un mécanisme qui permet d'expliquer nos observations. Le chapitre VI est consacré à la présentation des expériences préliminaires que nous avons effectuées à l'Université du Littoral afin d'estimer la photosensibilité de fibres de télécommunications insolées par des impulsions en provenance d'un laser infrarouge en régime femtoseconde. Les changements d'indice créés par l'insolation sont mesurés à l'aide d'un interféromètre à réseaux de Bragg photoinscrits dans la fibre. Des réseaux LPG ont été écrits dans les fibres et leur stabilité a été étudiée. Dans la conclusion finale présentée dans le chapitre VII, nous énonçons quelques perspectives offertes par notre travail.

# CHAPITRE VII

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une étude de stabilité de réseaux d'indice de réfraction inscrits dans des fibres germanosilicates. Différentes sources lasers ont été utilisées pour inscrire ces réseaux : un laser continu de longueur d'onde 244 nm, un laser fonctionnant en régime d'impulsions nanosecondes à 193 nm et un laser IR (810 nm) en régime d'impulsions femto-secondes. L'étude a porté sur deux types de réseaux : réseaux de Bragg inscrits par les lasers UV, LPG inscrits par le laser IR.

Préalablement à nos expériences deux études bibliographiques ont été présentées. La première est relative aux mécanismes de la photosensibilité induite par insolation UV des verres germanosilicates. La stabilité de la modulation d'indice créée dans les verres non hydrogénés est bien corrélée à la stabilité des centres Ge(E') et à celle de la densification résultant de l'insolation. Dans les verres hydrogénés, la situation est plus complexe puisque de nombreuses espèces sont formées lors de l'insolation. L'eau semble jouer un rôle important pour expliquer la relative faiblesse de la stabilité des réseaux inscrits dans des fibres hydrogénées. Il apparaît aussi que la formation de centres Ge(1) et Ge(2) peu stables contribue surtout au changement d'indice moyen. De ce fait, on peut s'attendre à ce que la stabilité de la longueur d'onde de Bragg des réseaux soit plus faible que celle de la modulation.

La deuxième étude consiste en une revue critique des expériences de vieillissement accéléré et des modèles utilisés pour prédire la durée de vie des réseaux. L'examen de la littérature scientifique fait apparaître une dispersion importante des résultats expérimentaux. Par ailleurs, les mesures sont presque toutes exclusivement relatives à la stabilité de la

réflectivité des réseaux. Cette dernière constatation explique probablement en partie la dispersion des résultats. En effet, notre principale conclusion porte sur le fait qu'il est nécessaire pour prédire correctement la durée de vie des réseaux 1) de contrôler le contraste initial du réseau et 2) de procéder à des expériences de vieillissement accéléré dans lesquelles les évolutions de la réflectivité  $R_{\max}$  et de la longueur d'onde  $\lambda_B$  des réseaux sont enregistrées simultanément et ceci pour différents contrastes initiaux des réseaux. Il est bien sûr nécessaire pour procéder à ces enregistrements de séparer les variations irréversibles de ces deux caractéristiques spectrales des variations réversibles. La dépendance éventuelle de la stabilité des caractéristiques spectrales des réseaux avec les conditions d'écriture a également été examinée. Plusieurs approches théoriques ont été élaborées pour rendre compte de cette dépendance. Les modèles de stabilité locale de la variation d'indice (VAREPA) peuvent être distingués des modèles non locaux (S. Kannan) en procédant selon la méthodologie énoncée plus haut.

Nous avons illustré les conclusions de notre étude en procédant à des destructions isothermes de réseaux non saturés écrits dans une fibre de télécommunication au moyen d'un laser à ArF. Le contraste initial des réseaux constituait le paramètre des expériences au cours desquelles les évolutions de  $R_{\max}$  et  $\lambda_B$  étaient mesurées simultanément. Nous avons montré que la stabilité du réseau dépend dans ce cas du contraste initial et qu'il ne faut pas confondre stabilité de la modulation avec stabilité du changement d'indice moyen. Nous avons signalé que cette conclusion n'est pas générale. En effet, la stabilité des caractéristiques spectrales des réseaux saturés écrits au moyen d'un laser continu dans des fibres hydrogénées s'avère indépendante du contraste initial du réseau. Pour disposer d'un ensemble complet de données expérimentales, il s'avère nécessaire de procéder à des mesures de décroissance isotherme de réseaux écrits dans des fibres hydrogénées au moyen d'un laser fonctionnant en régime pulsé.

D'un point de vue pratique, les ingénieurs doivent prendre en compte ces résultats pour prédire la durée de vie des composants et plus particulièrement celle de composants dont le processus de fabrication intègre des post-insolations.

Nous avons étudié le phénomène de variation réversible avec la température de la réflectivité de réseaux de Bragg. Différentes fibres ont été utilisées. Le phénomène n'est pas observé de façon significative dans les fibres hydrogénées. Le sens de la variation (croissance avec la température) mise en évidence pour des réseaux de type I est opposé à celui relevé pour les réseaux de type II A. Une loi phénoménologique de variation de la modulation avec la température a été établie à partir des données expérimentales. Cette loi permet d'effectuer des corrections tenant compte de cet effet réversible lors de l'analyse des données des expériences de destruction isotherme. Nous avons présenté une série d'arguments pour attribuer l'origine de l'effet à la photo-inscription d'un réseau de coefficients de dilatation thermique. Nous avons émis l'hypothèse qu'à l'emplacement des franges brillantes le coefficient de dilatation thermique diminue lors de l'inscription d'un réseau de type I. Une diminution de l'ordre de quelques pour cent suffit à rendre compte de nos observations. Ces résultats s'avèrent donc utiles dans l'interprétation des expériences de recuit mais aussi a priori dans le domaine des capteurs à réseaux de Bragg. En effet, la plupart de ces capteurs utilisent le fait que la longueur d'onde de Bragg évolue sous l'effet de la variable faisant l'objet de la mesure. Il en est ainsi par exemple des capteurs de température à réseaux de Bragg. Ces capteurs sont sensibles à d'autres paramètres (par exemple à l'allongement relatif de la fibre) Pour s'affranchir de cette difficulté, on pourrait penser tirer profit des changements réversibles de réflectivité avec la température pour découpler l'effet d'un changement de température d'une variation de longueur du réseau. Cette idée implique pour être mise en application de mesurer les éventuels changements de réflectivité induits par un allongement de la fibre. Des

mesures préliminaires ont été effectuées sur ce sujet au laboratoire. Les variations de modulation d'indice qui résultent d'un allongement relatif des fibres se sont le plus souvent avérées de l'ordre de notre sensibilité de mesure. Ce résultat associé à l'ordre de grandeur des variations réversibles de réflectivité avec la température montre que la méthode est pour l'instant difficilement applicable en pratique. Il serait toutefois utile d'examiner si l'introduction de dopants permet d'amplifier l'effet mis en évidence et ceci afin d'en tirer profit dans le domaine des capteurs

De fortes variations d'indice de réfraction ont été créées lors d'insolations de verres germanosilicates par le laser IR fonctionnant en régime femto-seconde. Les durées d'insolation utilisées à cet effet sont restées courtes. Elles s'avèrent compatibles avec les contraintes de l'industrie sans qu'il soit nécessaire de charger le verre en hydrogène. Le processus mis en jeu dans la photo-inscription est non-linéaire. De ce fait les changements d'indice de réfraction peuvent être localisés avec précision à l'intérieur du matériau grâce au choix convenable des paramètres de l'inscription. Les variations d'indice sont significativement plus stables que celles induites par des insolations UV. Il apparaît donc utile de continuer les travaux sur ce sujet afin de mieux comprendre les mécanismes des changements d'indice et de maîtriser le photochromisme.

## Bibliographie

R. Kasyhap,  
Optics and photonics series edited by P.L. Kelly, I. Kaminov, G. Agrawal, Academic Press,  
Chap. 1, (1999)  
« Fiber Bragg grating »

T. Erdogan,  
J. Lightwave Tech. 15, 8, p. 1277-1294, (1997)  
«Fiber Grating Spectra»

T. Erdogan, V. Mizrahi  
J. Opt. Soc. Am. B 11, p. 2100-2105, (1994)  
«Characterization of UV-induced birefringence in photosensitive Ge-doped optical fibers»

Special issue on fiber gratings, photosensitivity and poling,  
Journal of Lightwave Technology. 15, 8, (1997)

S. Legoubin,  
Thèse, Université de Lille 1, (1994)  
«Etude expérimentale et théorique de la réponse spectral de composants photoinscrits dans des fibres optique»

E. Fertein  
Thèse, Université de Lille 1, (1995)  
«Contribution à l'étude des mécanismes de la photorefraction dans des fibres optiques dopées à l'oxyde de germanium»

P. Niay, P. Bernage, S. Legoubin, M. Douay, W.X. Xie, J.F. Bayon, T. Georges, M. Monerie and B. Pournellec  
Opt. Commun. 113, p. 176-192, (1994)  
«Behaviour of spectral transmissions of Bragg gratings written in germania-doped fibers: writing and erasing experiments using pulsed or cw UV»

R.M. Atkins, P.J. Lemaire, V. Mizrahi, T. Erdogan  
Elect. Lett. 29, p. 1234-1235, (1993)  
«Mecanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses»

T. Taunay  
Thèse, Université de Lille 1, (1997)  
Contribution à l'étude des mécanismes de la photosensibilité de verres et de fibre dopés par des ions de terre rare ou par de l'oxyde de germanium

H. Patrick, S.L. Gilbert, A. Lidgard, M.D. Gallagher  
J. Appl. Phys. 78, p. 2940-2945, (1995)  
«Annealing of Bragg grating in hydrogen loaded optical fiber»

- P. Cordier C. Dalle, C. Depecker, P. Bernage, M. Douay, P. Niay  
J. Non-Cryst. Solide. 224, p. 277-282, (1998)  
«UV-induced reaction of H<sub>2</sub> with germanosilicate and aluminosilicate glass»
- C. Dalle, P. Cordier, C. Depecker, P. Bernage, M. Douay, P. Niay  
J. Non-Cryst. Solid. 260, p. 83 – 98, (1999)  
«Growth kinetics and thermal annealing of UV induced H-bearing species in hydrogen loaded germanosilicate fibre preforme»
- B. Leconte  
Thèses, Université de Lille 1, (1998)  
«Controbuton à l'étude de la photosensibilité des fibres en silice sous l'effet d'une insolation par un laser à ArF»
- B. Poumellec  
J. Non-Crystalline Solid. 239, p. 108, 1997  
«Links between writing and erasure (or stability) of Bragg gratings in disordered media»
- D. Razafimatratra  
Thèse, Université de Lille 1, (2000)
- M.G. Sceats, G.R. Atkins, and S.B. Poole  
Ann. Rev. Mater. Sci. 23, p. 381-410, (1993)  
« Photolytic index changes in optical fibers »
- R.J. Campbell, R. Kashyap  
Int. J. of Opto-electron. 9, p. 33-57, (1994)  
« The properties and applications of photosensitive germanosilicate fibres »
- B. Poumellec and F. Kherbouche  
J. Phys. III France. 6, p. 1595-1624, (1996)  
«The Photorefractive Bragg Grating in the fibers for telecommunication »
- M. Douay, W.X. Xie, B. Leconte, T. Taunay, P. Bernage, P. Niay, P.Cordier, J.F.Bayon, H.Poignant, E. Delevaque  
J. Annals Télécommunications, (1997)  
« Progress in silica optical fiber photosensitivity »
- R.M. Atkins, V. Mizrahi, T. Erdogan  
Elect. Lett. 29, 4, p. 385-387, (1993)  
« 248 nm induced vacuum UV spectral changes in optical fibre preform cores : support for a color centre model for photosensitivity »
- M.J.F. Dignonnet  
Proceed. SPIE Vol. 2841, p. 109-120, (1996)  
« A Kramers-Kronig analysis of the absorbtion change in fiber gratings »

- D.P. Hand, P.St.J. Russel  
Opt. Lett. 15, 2, p. 102-104, (1990)  
« Photo-induced refractive index changes in germanosilicate fibers »
- J.P. Bernardin, N.M. Lawandy  
Opt. Comm. 79, p. 194-199, (1990)  
« Dynamics of the formation of Bragg gratings in germanosilicate optical fibres »
- C. Friori, R.A.B. Devine  
Mat. Res. Soc. Symp. 61, p. 188-195, (1986)  
« Ultraviolet irradiation induced compaction and photobleaching in amorphous thermal SiO<sub>2</sub> »
- F.P. Payne  
Elect. Lett. 25, 8, p. 498-499, (1989)  
« Photorefractive gratings in single-mode optical fibres »
- M.G. Sceats, P.A. Krug  
In Photosensitivity and Self-Organization in Optical Fibers and Waveguides,  
F. Oullete, Editor, Proc.SPIE 2044, p. 113-120, (1993)  
« Photoviscous annealing – Dynamics and stability of photorefractive in optical fibers »
- B. Poumellec, P. Niay, M. Douay, J.F. Bayon  
J. of Phys. D : Appl. Phys. 29, p. 1842-1856, (1996)  
« The UV induced refractive index grating in Ge :SiO<sub>2</sub> preforms : additional CW experiments and the macroscopic origin of the change in index »
- M.A. Fokine, B.E. Sahlgren, R. Stubbe.  
Proceeding of the BGPP Meeting at Williamsburg, paper BsuD5, p. 58-60, (October 1996)  
« A novel approach to fabricated high-temperature resistant fiber Bragg grating »
- F. Kherbouche, B. Poumellec, F. Charpentier, P. Niay  
J. Phys. D : Appl. Phys, p 3233-3238, (2000)  
« Chemical migration during UV writing of Bragg grating in germanium doped silica optical fibers »
- F. Kherbouche  
Thèse, Université Paris Sud, Orsay, (1999)  
« Modifications chimiques et des contraintes mécaniques induites par irradiation UV des fibres optiques Germanosilicates »
- H. Hosono, Y. Abe, D.L. Kinser, R.A. Weeks, K. Muta, H. Kawazoe  
Phys. Rev. B. 46, 18, p. 11445-11451, (1992)  
« Nature and Origin of the 5-eV band in SiO<sub>2</sub>:GeO<sub>2</sub> glasses »
- J. Albert, K.O. Hill, D.C. Johnson, F. Bilodeau, S.J. Milailov, N.F. Borelli, J. Amin

Opt. Lett. 24, 18, (1999)

« Bragg gratings in defect-free germanium doped optical fibers »

T.E. Tsai, E.J. Friebele, M. Rajaram, S. Mukhopadhyay

App. Phys. Lett. 64, p. 1481-1483, (1994)

« Structural origin of the 4.16 eV optical absorption band in silica and Ge-doped silica »

E.V. Anokin, A.N. Guryanov, D.D. Gusovskii, V.M. Mashinskii, S.I. Miroshinskii,

S.I. Miroshnichenko, V.B. Neustreuv, V.A. Tikhomirov, YU B. Zverev

Sov. Lightwave. Commun. 1, p. 123-131, (1991)

« Photoinduced defects in silica glass doped germanium and cerium »

B. Leconte, W.X. Xie, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, J.F. Bayon, E. Delevaque and

H. Poignant

Appl. Optics. 36, 24, p. 5923-5930, 1997.

« Analysis of color center related contribution to Bragg grating formation in Ge :SiO<sub>2</sub> fibers based on a local Kramers-Kronig transformation of excess loss spectra »

T.E. Tsai, G.M. Williams, E.J. Friebele,

Opt. Lett. 22, 224 (1997)

« Index structure of fiber Bragg gratings in Ge-SiO<sub>2</sub> fibres »

T.E. Tsai, G.M. Williams, E.J. Friebele

Appl. Phys. Lett. 72, p. 3243, (1998)

« Uniform component of index induced in Ge-SiO<sub>2</sub> fibers by spatially modulated ultraviolet light »

M. Essid, J.L. Brebner, J. Albert, K. Awazu

J. Appl. Phys. 84,8, p. 4193-4197, (1998)

« Difference in the behavior of oxygen deficient defects in Ge-doped silica optical fiber preforms under ArF and KrF excimer laser irradiation »

R.M. Atkins, P.J. Lemaire, T.E. Erdogan, V. Mizrahi

Elect. Lett. 29, 14, 1231-1235, (1993)

« Mechanisms on enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading germanosilicate glasses »

K. Awazu

J. Non-Cryst. Solids. 201, 267 (1997)

« Thermal and photo-initiated reactions of H<sub>2</sub> with germanosilicate optical fibers »

T.E. Tsai, E.J. Friebele

Bragg Grating, Photosensitivity, and Poling in Glass Fibers and Waveguides : Applications and Fundamentals, Williamsburg, Tech. Digest, Vol. 17, JMA4-1, p.101, (1997)

« Kinetics of defect centers formation and photosensitivity in Ge-SiO<sub>2</sub> fibers of various compositions »

B.I. Greene, D.M. Krol, S.G. Kosinski, P.J. Lemaire, P.N. Saeta

J. Non-Cryst. Solid. 168, p. 195-199, (1994)

«Thermal and photo-initiated reactions of H<sub>2</sub> with germanosilicates opticals fibers »

C. Dalle, P. Cordier, C. Depecker, P. Bernage, M. Douay, P. Niay,  
J. Non-Cryst. Solid. 260, p. 83-98, (1999)

«Growth kinetics and thermal annealing of UV-induced H-bearing species in hydrogen loaded germanosilicate fibre preforms »

C. Dalle

Thèse, Université de Lille 1, (2000)

« Contribution à l'étude des mécanismes microstructuraux liés à la photosensibilité de type I et de type IIA des verres de silice par spectroscopie infrarouge et microscopie électronique en transmission »

E.J. Friebele, D.L. Griscom,

in Defects in Glasses, edited by F.L. Galeener, D.L. Griscom, M.J. Weber  
Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 61, 319, (1986)

T.E. Tsai, E.J. Friebele, D.L. Griscom ,

Opt. Lett. 18, p.935 (1993)

« Thermal stability of photoinduced gratings and paramagnetic centers in Ge and Ge/P doped silica optical fibers »

M. Ohama, T. Fujiwara, and A.J. Ikushima

Appl. Physics. Lett. 73, 11, p. 1481-1483, (1998)

«Decay of ultraviolet-induced optical absorption in Ge-doped SiO<sub>2</sub> glass »

T. Erdogan, V. Mizrahi, P.J. Lemaire, D. Monroe

J. Appl. Phys. 76, 1, p. 73-80, (1994)

« Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings »

S. Kannan, J.Z.Y. Guo, P.J. Lemaire

J. Lightwave. Technology. 15, 8, p. 1478-1483, (1997)

« Thermal stability analysis of UV-induced fiber Bragg grating »

H. Patrick, S.L. Gilbert, A. Lidgard, M.D. Gallagher

J. Appl. Phys. 78, p. 2940-2945, (1995)

« Annealing of Bragg grating in hydrogen loaded optical fiber »

V. Grubsky

PhD dissertation , University of Southern California, (1999)

« Photosensitivity of germanium doped silica glass and fibers and its applications »

P. Cordier, J.C. Doukhan, E. Fertien, P. Bernage, P. Niay, J.F. Bayon, T. Georges

Opt. Comm. 111, p. 269-276, (1994)

« TEM characterization of densification associated to Bragg grating inscription in a germanosilicate optical fibers »

B. Poumellec, I. Riant , P. Niay, P. Bernage, J.F. Bayon

Opt. Mater. 4, p.404-409, (1995)

« UV induced densification during Bragg grating inscription in Ge :SiO<sub>2</sub> preforms : interferometric microscopy investigation »

M. Douay, W.X. Xie, T. Taunay, P. Bernage, P. Niay, P. Cordier, B. Poumellec, L. Dong, J.F. Bayon, H. Poignant, and E. Delevaque

J. of Lightwave. Tech. 15, 8, p. 1329-1342, (1997)

« Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers »

N.F. Borrelli, Douglass C. Allan, Robert A. Modavis

J. Opt. Soc. Am B, Vol. 16, 10, p. 1672-1679, (1999)

« Direct measurement of 248- and 193- nm excimer-induced densification in silica-germania waveguide blanks »

H.G. Limberger, P.Y. Fonjallaz, R.P. Salathé, F. Cochet, B. Leuenberger

in XX<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication, Florence, p. 1005-1008, (1994)

« Correlation of index changes with stress changes in fibers containing UV-written Bragg gratings »

H.G. Limberger, P.Y. Fonjallaz, R.P. Salathé, F. Cochet

Appl. Phys. Lett. 68, 22, p. 3069-3071, (1996)

« Compaction – end photoelastic-induced index changes in fiber Bragg gratings »

T. Erdogan, V. Mizrahi, P.J. Lemaire, D. Monroe

J. Appl. Phys. 76, p. 73-80, (1994)

« Decay of ultraviolet-induced fibre bragg gratings »

D. Razafimahatratra, P. Niay, M. Douay, B. Poumellec and I. Riant

BGPP, Tech. Digest, FE2, p. 216-218, (1999)

« Comparison of isochronal and isothermal decays of Bragg gratings written through continuous-wave exposure of an unloaded germanosilicate fiber »

G. Meltz and W.W. Morey

SPIE, V. 516, Inter. Workshop on Photoinduced Self-Org. effects in Opt. Fib, p. 185, (1991)

« Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity »

D. Razafimahatratra, P. Niay, M. Douay, B. Poumellec and I. Riant

Appl. Opt. 39, 1924-1933, (2000)

« Comparison of isochronal and isothermal decays of Bragg gratings written through continuous-wave exposure of an unloaded germanosilicate fiber »

S.R. Baker, H.N. Rourke, V. Baker, D. Goochild

J. Light Technology. 15, p. 1470-1477, (1997)

« Thermal decay of fiber Bragg gratings written in boron and germanium codoped silica fiber »

S. Ishikawa, A. Inoue, M. Harumot  
OFC 98, Tech. Digest, paper WM6, p. 183-184, (1998)  
« Adequate aging condition for fiber Bragg grating based on simple power law model »

S. Kannan, J.Z.Y. Guo, P.J. Lemaire  
J. Light Technology . 15, p. 1478-1483, (1997)  
« Thermal stability analysis of UV-induced fiber bragg gratings »

B. Pommellec  
J. Non-Cryst. Solid. 239, p. 108-115, (1998)  
« Links between writing and erasure (or stability) of Bragg gratings in disorderd media »

B. Pommellec  
POWAG 2000  
« Kinetics of thermally activited physical process in disordered média »

I. Riant, S. Borne, P. Sansonetti  
OFC 96, Tech. Digest, paper TuO5, p. 86-87, (1996)  
« Dependence of fiber Bragg grating thermal stability on grating fabrication process »

H. Patrick, S.L. Gilbert, A. Lidgard, M.D. Gallagher  
J. Appl. Phys. 78, p. 2940-2945, (1995)  
« Annealing of Bragg grating in hydrogen loaded optical fiber »

R.J. Egan, H.G. Inglis, P. Hill, P.A. Krugg, F. Oullette  
OFC 96 Tecnicl digest, paper TuO3, p. 83-84, (1996)  
« Effects of hydrogen loading and grating strength on the thermal stability of fiber Bragg grating »

I. Riant, F. Haller  
J. Lightwave. Techology. 15, 8, p. 1464, (1997)  
« Study of the photosensitivity at 193 nm and comparison with photosensitivity at 240 nm influence of fiber tension : Type IIA aging »

D.L. Williams, R.P. Smith  
Elect. Lett. 31, p. 2120-2121, (1995)  
« Accelerated lifetime tests on UV written intra-core gratings in boron germania codoped silica fiber »

M.A. Fokine, B.E. Sahlgren, R. Stubbe.  
Proceeding of the BGPP Meeting at Williamsburg, paper BsuD5, p. 58-60, (October 1996).  
« A novel approach to fabricated high-température resistant fiber Bragg grating »

E. Salik, D.S. Starodubov, V. Grubsky, J. Feinberg  
Proc. Techn. Digest OFC 99, paper Th03-1, p. 56-58, (1999)  
« Thermally stable gratings in optical fibers without temperature annealing »

G. Robert, I. Riant

OFC 97 Technical Digest. 6, paper WL18, p. 180-181, (1997)  
« Demonstration of two distributions of defects centers in hydrogen-loaded high germanium content fibers »

I. Riant, B. Poumellec  
Elect. Lett. 34, p. 1603-1604, (1998)  
« Thermal decay of gratings written in hydrogen-loaded germanosilicate fibres »

B. Malo, J. Albert, K.O. Hill, F. Bilodeau and D.C. Johnson  
Elect. Lett. 30, p. 442-444, (1994)

N.H. Ky, H.G. Limberger, R.P. Salthe, F. Cochet and L. Dong  
Appl. Phys. Lett. 74, 4, p. 516-518, (1999)  
« Hydrogen-induced reduction of axial stress in optical fiber cores »

D. Ramecourt  
Thèse université de Lille 1, 2001

Y. Quiquempois, P. Niay ,  
Communication personnelle

L.B. Jeunhomme  
Marcel Dekker Editeur, New York, (1993)  
« Single mode fiber optics : principles and application »

D.K.W. Lam, B.K. Garside  
Appl. Opt. 20, p. 440-445, (1981)  
« Characterization of single mode optical fiber filter »

S. Legoubin, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, S. Boj, E. Delevaque  
Opt. Soc. Am A. 12, 8, p. 1687-1694, (1995)  
« Free spectral range variation of grating based Fabry-Perot filters photowritten in optical fibers »

D. Razafimahatratra  
Appl. Opt. 39, 1924-1933, (2000)  
« Comparasion of isochronal and isothermal decays of Bragg gratings written throughcontinuous-wave exposure of an unloaded germanosilicate fiber »

S. Legoubin  
Thèse ,Université de Lille 1, (1994)  
« Etude expérimentale et théorique de la réponse spectral de composants photoinscrits dans des fibres optique »

P.A. Krug, R. Solte, R. Ulrich  
Opt. Lett. 20, 17, p. 1767-1769, (1995)  
« Measurement of index modulation along an optical fiber Bragg grating »

D. Ramecourt, P. Niay, P. Bernage, I. Riant, M. Douay  
Elec. Lett. 35, p. 329-331, (1999)

« Growth of strength of Bragg gratings written in H<sub>2</sub> loaded telecommunication fibre during cw UV post-exposure »

T. Erdogan and V. Mizrahi  
JOSA. B 11, p. 2100-2105, (1994)

«Characterization of UV-induced birefringence in photosensitive Ge-doped silica optical fibers»

G. Meltz, W.W. Morey and W.H. Glenn  
Opt. Lett.; vol 14, 823-825, 1989

“Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method”

K.O. Hill, Y. Jujii, D.C. Johnson and B. S. Kawasaki  
Appl. Phys. Lett.; vol 32, 647-649, 1978

“Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”

K.O. Hill and G. Meltz,  
J. Light. Technol.; vol 15, 1263, 1997.

“Fiber Bragg grating technology: fundamental and overview”.

M. Douay, W.X. Xie, T. Taunay, P. Bernage, P. Niay, P. Cordier, B. Poumellec, L. Dong,  
J.F. Bayon, H. Poignant, and E. Delevaque  
J. Light. Technol.; vol 15, 1329, 1997.

”Densification involved in the UV-based photosensitivity of silica glasses and optical fibers”

P.J. Lemaire, R.M. Atkins, V. Mizrahi and W.A. Reed  
Elec. Lett.; vol 29, 1191-1193, 1993

“High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers”

L. Dong, J. Pinkstone, P.St. J. Russell, and D. Payne  
J. Opt. Soc. Am. B; vol 1, 2106-2111, 1994

“ Ultraviolet absorption in modified chemical vapor deposition preforms”

K.M. Davis, K. Miura, N. Sugimoto, and K. Hirao  
Opt. Lett. 21, 21, 1729-1731, 1996.

“Writing waveguides in glass with a femtosecond laser”

D. Homoelle, S. Wielandy, Alexander L. Gaeta, N.F. Borrelli, and C. Smith  
Opt. Lett. 24, 18, 1311-1313, 1999.

“Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses”

Y. Kondo, K. Nouchi, T. Mitsuyu, M. Watanabe, P.G. Kazansky, and K.K. Hirao  
Opt. Lett. 24, 10, 646-648, 1999.

“Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses”

K. Kawamura, T. Ogawa, N. Sarukura, M. Hirano, H. Hosono,  
Appl. Phys. B 71, 119-121, 2000.

“Fabrication of surface relief gratings on transparent dielectric materials by two-beam holographic method using infrared femtosecond laser pulses”

A. Naumov, X. Zhu, P.B. Corkum, and C. Przygodzki

Technical digest, Conference on Lasers and Electro-optics (C.L.E.O.), Baltimore-USA, May 23-28, 1999

“Microstructuring with femtosecond laser inside silica glasses”

L. Sudrie, M. Franco, B. Prade, A. Mysyrowycz

Opt. Com; vol 171, 279-284, 1999

“Writing of permanent birefringent microlayers in bulk fused silica with femtosecond laser pulses”

S. Legoubin, M. Douay, P. Bernage, P. Niay, S. Boj, E. Delevaque

J.O.S.A. 12, 1687 (1995).

“ Free spectral range variations of grating-based Fabry-Perot filters written in optical fibers ”

D.Jholen, H. Renner, A. Ewald and E. Brinjmeyer

ECOC'98, 20-24 September 1998, Madrid, Spain, pp 393-394.

“Fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer for a precise measurement of the UV-induced index change”

P.A. Krug, R. Solte, and R. Ulrich

Opt. Lett. 20, 17, 1767-1769, 1995.

“Measurement of index modulation along an optical fiber Bragg grating”