

文章编号 1004-924X(2005)06-0633-04

# 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作

桑新柱<sup>1,2</sup>, 余重秀<sup>1</sup>, 王葵如<sup>1</sup>, M. K. Islam<sup>2</sup>, 吕乃光<sup>3</sup>

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100876; 2. 香港城市大学 光电子技术研究中心, 香港九龙;

3. 北京机械工业学院 电子信息工程系, 北京 100085)

**摘要:**采用相位掩模版法实验研究了高非线性掺铈光子晶体光纤中布拉格光栅的制作。实验中采用的光子晶体光纤的非线性系数约为  $12 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ , 模场直径约为 2.4 mm。分析了布拉格光栅的反射率随着曝光脉冲数的变化, 随着曝光脉冲数的增加其反射率逐渐达到饱和, 继续增加曝光量发射率开始下降。实验验证了可以在高非线性光子晶体中写入布拉格光栅, 得到光栅的反射率为 44.4%, 这对于研究光纤布拉格光栅的非线性效应和应用具有重要意义。讨论了影响布拉格光栅写入效率的因素。

**关键词:**光子晶体光纤; 布拉格光栅; 非线性

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A

## Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber

SANG Xin-zhu<sup>1,2</sup>, YU Chong-xiu<sup>1</sup>, WANG Kui-ru<sup>1</sup>, M. K. Islam<sup>2</sup>, LU Nai-guang<sup>3</sup>

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and

Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Optoelectronics Research Centre, City

University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong China; 3. Department of Electronic Information,

Beijing Institute of Machinery, Beijing 100085, China)

**Abstract:** Fabrication of the Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber was investigated experimentally by phase mask method. Nonlinear coefficient and mode-area diameter of the highly nonlinear photonic crystal fiber are  $12 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  and 2.4 mm respectively. The evolution of reflectivity of the Bragg grating against irradiation pulse number was analyzed. The reflectivity entered into a saturated phase with increasing the irradiation pulse number, and it began to decrease with further increasing exposure. Bragg grating with the reflectivity of 44.4% in the highly nonlinear photonic crystal fiber was demonstrated, which paved the way for studying the nonlinear effects of fiber Bragg grating and their applications. The factors affecting writing efficiency Bragg grating in the highly nonlinear fiber were discussed.

**Key words:** photonic crystal fiber; Bragg grating; nonlinearity

收稿日期: 2005-07-06; 修订日期: 2005-09-01.

基金项目: 国家 973 计划 (No. 2003CB314906); City Strategic Research Grant for Fundable CERG (No. 9040707) 和北京市教委科技发展计划 (No. 200411232005) 项目资助。

## 1 引言

近年来光子晶体光纤(PCF)由于其独特的光学特性以及在光电子器件、测量和传感等领域巨大的潜在应用前景引起人们广泛的关注<sup>[1]</sup>。小芯径实芯光子晶体光纤,由于其硅芯和空气孔覆层之间高的折射率差,可将光的基模更好地限制在纤芯内,增大光纤的非线性,而且通过改变纤芯和包层中的孔的结构及分布,可以灵活设计光纤的色散特性。光纤的高非线性和色散特性的结合,可以大大提高非线性效率,使非线性光纤器件研究进入了一个新的研究阶段,从而减小器件的尺寸,降低泵浦光所需的功率,并提高器件的性能<sup>[2-5]</sup>。光纤布拉格光栅的线性特性已经为人们熟知,它不仅可用于实现光纤通信系统中的激光光源的选频、窄带滤波、插分复用、色散补偿和放大器的增益平坦,利用光纤光栅谱对环境变化的响应,还可以实现对温度、应力、扭矩等物理量的传感检测<sup>[6-7]</sup>。在布拉格光栅线性特性的研究和应用的同时,对非线性特性的理论研究也不断深入并产生一些有趣的现象,展现出它们的应用前景。窄带反射和非线性特性的所产生的双稳现象<sup>[8-9]</sup>,成为全光开关的理论基础。LaRochelle等首先采用交叉相位调制方法实验实现了全光开关<sup>[10]</sup>,后来 Perlin 等又对这种方法进行了理论分析<sup>[11]</sup>。非线性耦合模方程预测了布拉格光栅的色散和非线性作用可以形成布拉格孤子<sup>[12-13]</sup>,在理论上可以从零到  $c/\bar{n}$  ( $c$  为真空中的光速,  $\bar{n}$  为光纤纤芯的有效折射率)之间的任何速度传输,并且实验验证了在光纤光栅中光的速度可以降低<sup>[14]</sup>。目前具有挑战性的研究课题是在光纤布拉格光栅中捕获住光,并希望在布拉格光栅中获得零速度的光<sup>[15]</sup>。该项研究不仅具有重大的物理意义,而且在基于光纤的全光存储器件方面有着巨大的潜在应用价值。

美国贝尔实验室 Eggleton 等首先报道了采用倍频染料激光器(工作波长为 242 nm)在载氩增敏后掺镱光子晶体光纤中写入布拉格光栅<sup>[16]</sup>,研究表明采用的光子晶体光纤制作的光栅更容易耦合到高阶泄漏模。Groothoff 等在 2003 年报道了在纯二氧化硅纤芯光子晶体光纤中写入布拉格光栅<sup>[17]</sup>,花费了数个小时,光栅温度稳定性优于

在普通光敏光纤中制作的光栅。总的来说在光子晶体光纤中写入布拉格光栅比较困难,对实验条件要求较高,目前还尚未见到在高非线性光子晶体光纤中制作布拉格光栅的报道。本文给出在掺镱的高非线性光子晶体光纤中写入布拉格光栅的实验研究结果,对研究光纤布拉格光栅的非线性效应及其应用具有重要意义,可以降低产生非线性效应所需的光功率和长度要求。

## 2 实验装置

光纤布拉格光栅制作的实验装置如图 1 所示。工作波长为 248 nm 的窄带 KrF 准分子激光器作为紫外光源,它的输出脉冲的能量和重复频率可以由计算机控制,实验中将 KrF 准分子激光器输出脉冲的脉冲能量和重复频率分别设置为 120 mJ 和 10 Hz。将一段 4.5 cm 长的掺镱高非线性光子晶体光纤(模场直径约为  $2.4 \mu\text{m}$ ,非线性系数约为  $12 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$ )与两段单模光纤熔接,不通过载氩处理直接进行布拉格光栅写入。值得注意的是在固定光纤时要特别小心防止熔接点断开。紫外光束首先由扩束透镜扩束,反射镜改变光束方向,再由柱面透镜聚焦,穿过相位掩模版照射到光纤上。掩模版固定在光子晶体光纤的上面。相位掩模版的大小为  $20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,周期为 1 072 nm,零阶衍射光抑制  $< 2.9\%$  (248 nm 波长处)。在光栅写入过程中,由 EDFA 发出的自发辐射宽带光经光子晶体光纤进入光谱仪 (Agilent 86140B),可实时监测光栅输出谱的变化。

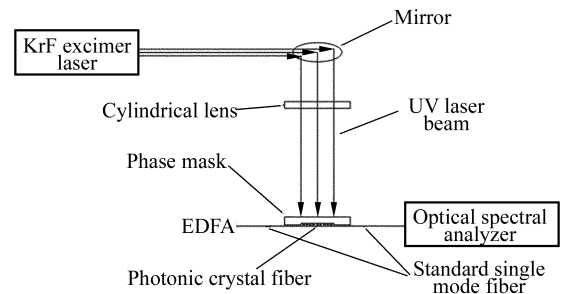


图 1 制作光纤布拉格光栅的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for fabricating fiber Bragg grating

### 3 实验结果

实验过程中,通过测量布拉格光栅的透射谱确定其反射率。布拉格光栅的反射率在高非线性光子晶体光纤中随曝光脉冲数的变化如图 2 所示。可以发现,与在单模光敏光纤中写入布拉格光栅相比<sup>[19]</sup>,光栅的反射率增长非常缓慢,在曝光到 5 000 脉冲时,光栅的反射率只有 5%;而在单模光敏光纤中 I 型光栅即将进入饱和阶段,反射率可以超过 99.9%。随着曝光脉冲数的增加,光栅的反射率增加,在脉冲数到达 50 000 时,它的反射率达到饱和,约为 44.4%。进一步增加曝光量,光栅的反射率开始逐渐下降,反射率下降的速度小于反射率增加的速度。在光纤曝光到 120 000 个脉冲时,光栅的反射率下降到 8%。实验中在相同的条件下制作了 3 条布拉格光栅,得到几乎完全相同的结果。在光栅的反射率进入饱和时,得到透射谱如图 3(a)所示。从透射谱可以看出,光栅的传输损耗为 2.55 dB,其对应的反射率约为 44.4%。在此情况下,采用 EDFA、环形器和光谱仪测量光栅的反射谱,结果如图 3(b)所示,它反映了光栅反射的消光比。

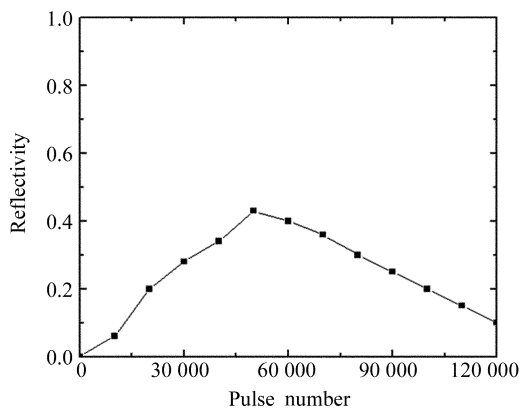
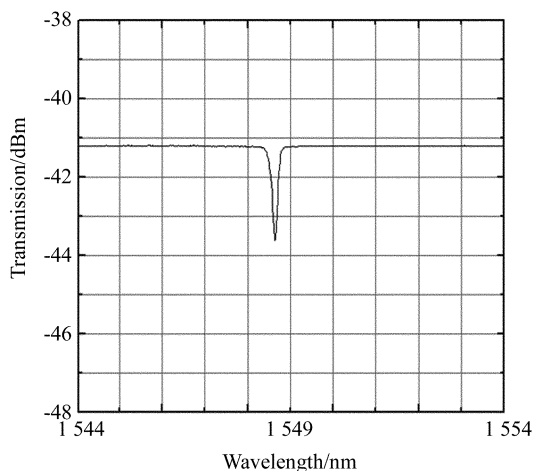


图 2 反射率随曝光脉冲数的变化

Fig. 2 Evolution of reflectivity against pulse number

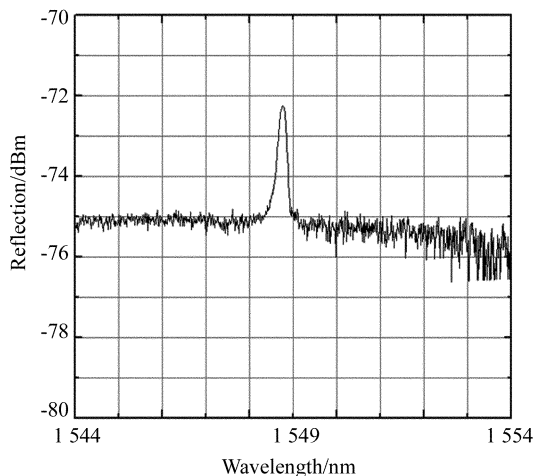
### 4 结 论

近年来已经开展了在光子晶体光纤中制作光栅的研究,由于制作布拉格光栅的难度比较大,很多特性和应用方面的研究还尚未开展。本文研究



(a)透射谱

(a) Transmission spectra



(b)反射谱

(b) Reflection spectra

图 3 反射率进入饱和状态时布拉格光栅的谱

Fig. 3 Spectra of the Bragg grating at saturated reflectivity phase

了掺锗高非线性光子晶体光纤制作布拉格光栅。实验成功地写入了布拉格光栅,但花费的时间很长,得到的光栅的反射率比较低。这主要是由于光纤的包层中的空气孔将部分紫外光返回,光纤的纤芯比较小,进入光纤纤芯中的紫外光比较少,紫外光的利用率比较低。此外,实验中采用的光子晶体光纤的光敏性比较低,即使光栅的反射率达到饱和,2 cm 长的布拉格光栅的反射率也只有 44.4%。如何增加光纤的光敏性并提高写入光的利用率是以后研究中需要解决的问题。高非线性

光子晶体光纤中制作布拉格光栅对于研究光纤布拉格光栅的非线性效应及其应用具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] RUSELL P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299:358-362.
- [2] PETROPOULOS P, MONRO T M, BELARDI W, *et al.* 2R-regenerative all-optical switch based on a highly nonlinear holey fiber[J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(16):1233-1235.
- [3] SHARPING J E, FIORENTINO M, KUMAR P, *et al.* All-optical switching based on cross-phase modulation in microstructure fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, 14(1):77-79.
- [4] ABEDIN K S, MIYAZAKI T, KUBOTA F. Wavelength-conversion of pseudorandom pulses at 10 Gb/s by using soliton self-frequency shift in a photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, 16(4):1119-1121.
- [5] SHIAHLO A I, OXENLOWE L K, BERG K S, *et al.* A high-speed demultiplexer based on a nonlinear optical loop mirror with a photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, 15(8):1147-1149.
- [6] 何万迅, 施文康, 叶爱伦. 长周期光纤光栅及其在通信传感领域的新应用[J]. *光学精密工程*, 2001, 9(2):104-108.  
HE W X, SHI W K, YE A L. Long period fiber grating and its new applications in communications and sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, 9(2):104-108. (in Chinese)
- [7] 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1):79-83.  
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg sensing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1):79-83. (in Chinese)
- [8] WINFUL H G, MARBURGER H Y, GARMIRE E. Theory of bistability in nonlinear distributed feedback structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, 35(5):379-381.
- [9] HERBERT C J, MALCUIT M S. Optical bistability in nonlinear periodic structures[J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18(21):1783-1785.
- [10] LAROCHELLE S, HIBINO Y, MIZRAHI V, *et al.* All-optical switching of grating transmission using cross-phase modulation in fibres[J]. *Electron. Lett.*, 1990, 26(18):1459-1460.
- [11] PERLIN V E, WINFUL H G. Nonlinear pulse switching using cross-phase modulation and fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, 13(9):960-962.
- [12] CHRISTODOULIDES D N, JOSEPH R I. Slow Bragg solitons in nonlinear periodic structures[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, 62(15):1746-1749.
- [13] DE STERKE C M, SIPE J E. Gap solitons[J]. *Progr. Optics*, 1994, 33:203-260.
- [14] EGGLETON B J, SLUSHER R E, DE STERKE C M, *et al.* Bragg grating soliton[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, 76(10):1627-1630.
- [15] MAK W C K, MALOMED B A, CHU P L. Interaction of a soliton with a local defect in fiber Bragg grating[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2003, 20(4):725-735.
- [16] EGGLETON B J, WESTBROOK P S, WINDELER R S, *et al.* Grating resonances in air-silica microstructured optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1999, 24(21):1460-1463.
- [17] GOOTHOFF N, CANNING J, BUCKLEY E, *et al.* Bragg gratings in air-silica structured fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(4):233-235.
- [18] SANG X Z, CHU P L, YU C X, LAI R. Novel growth phenomena in fibre Bragg gratings under low irradiation power[J]. *Opt. Commun.*, 251(1-3):94-99.

作者简介: 桑新柱(1977—), 男, 山东菏泽人, 讲师, 博士, 主要从事基于光纤的光电子器件和安全光纤通信等方面的研究。Email: xzsang@126.com