

## 布里渊光子晶体光纤环形移频器

黄民双, 黄军芬

(北京石油化工学院 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102617)

**摘要:** 通过实验研究了一种光子晶体光纤环形移频器, 该移频器基于布里渊频移原理, 利用光子晶体光纤布里渊增益高、阈值低的特点, 同时利用光纤环形腔选频放大技术获得窄线宽高增益激光输出。实验结果表明: 在波长为 1 548 nm 单纵模光纤激光泵浦下, 10 m 长光子晶体光纤的受激布里渊散射阈值功率约为 457 mW, 环形腔输出的受激布里渊散射 Stokes 光相对于入射光移频量为 9.778 GHz、线宽 500 kHz, 并且移频量可以通过温度进行微调。该移频器可以用于分布式光纤布里渊传感器和微波发生器。

**关键词:** 光子晶体光纤; 光纤环形振荡器; 受激布里渊散射; 温度特性; 光纤移频器

**中图分类号:** TN248.1    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1007-2276(2012)08-2125-05

## Brillouin ring frequency shifter based on photonic crystal fiber

Huang Minshuang, Huang Junfen

(Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** A ring frequency shifter based on the photonic crystal fiber was proposed. Based on Brillouin frequency shift theory, the frequency shifter could achieve a narrow linewidth and high-gain laser output for the photonic crystal fiber which had high Brillouin gain and low threshold, using the frequency selecting amplification technology of fiber optic ring resonator. The experiment results show that the threshold power of stimulated Brillouin scattering (SBS) of photonic crystal fiber is 457 mW, the frequency shift of stimulated Brillouin scattering wave compared with the incident light is 9.778 GHz with linewidth less than 500 kHz, the frequency shift can be finely adjusted by temperature. The frequency shifter can be applied in the distributed fiber optic Brillouin sensor and microwave generator.

**Key words:** photonic crystal fiber; fiber optic ring oscillator; stimulated Brillouin scattering; characteristic of temperature; fiber optic frequency shifter

收稿日期: 2011-12-22; 修订日期: 2012-01-19

基金项目: 北京市自然科学基金(4073032)

作者简介: 黄民双(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事光纤传感、大地测量仪器等方面的研究。Email: huangminshuang@bipt.edu.cn

## 0 引言

作为新型的光波导,光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)具有全新的结构和导光机制、优越的导光特性和灵活的设计自由度等新颖独特的特性<sup>[1]</sup>,已经成为近些年光学和光电子学的研究热点,研究领域遍布光纤通信<sup>[2]</sup>、光纤激光<sup>[3]</sup>、光纤传感<sup>[4-10]</sup>等。高非线性 PCF 通过实心的二氧化硅纤芯导光,包层由周期性排列的带有空气孔的石英管构成,具有小模场高非线性的特点,这种光纤能够产生比在传统石英光纤中高 1~2 个数量级的布里渊增益,这意味着在短光纤情况下也容易实现受激布里渊散射。

在普通石英系单模光纤中,受激布里渊散射光相对于入射光存在一个频移<sup>[11]</sup>,在泵谱激光波长为 1 548 nm 处的频移量约为 10.8 GHz,因此光纤本身就可以构成一个移频器<sup>[12]</sup>。但是,在普通石英系单模光纤中产生的受激布里渊散射光线宽大于 30 MHz,并且为多模输出,因此不少文献利用光纤布里渊环形腔<sup>[13]</sup>的选频功能来获得窄线宽的受激布里渊散射光,但要获得非常窄线宽的单纵模激光,光纤环形腔长必须足够短(小于 10 m),而在短光纤中产生受激布里渊散射需要很高的入射激光功率,因此其应用受到很大的限制。为了解决上述问题,文中提出了利用高非线性光子晶体光纤组成的布里渊光纤环形移频器。

## 1 结构原理

如图 1 所示,光纤激光器波长  $\lambda=1\ 548\ \text{nm}$ ,输出激光功率为 50 mW,线宽为 3 kHz,经过掺铒光纤放大器 EDFA 后最大输出功率可以达到 1 W。光纤环形器、光纤耦合器和 PCF 组成一个光纤环形谐振腔。

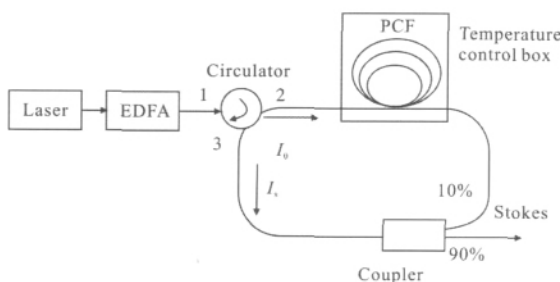


图 1 布里渊光子晶体光纤环形移频器

Fig.1 Experimental setup of the Brillouin ring oscillator

当 EDFA 输出的激光经光纤环形器入射 PCF 后,其背向布里渊散射光 10% 的部分在光纤环形谐振腔中循环振荡放大,90% 的部分经耦合器输出。并将 PCF 置于温控箱中。

在光纤中产生受激布里渊散射所需的阈值功率  $P_{th}$  为<sup>[14]</sup>:

$$P_{th} = \frac{GA_{eff}}{g_s L_{eff}} \quad (1)$$

式中: $G$  为阈值增益系数,在光纤长度一定的条件下近似为一常数; $A_{eff}=\pi\omega^2$  为光纤的有效纤芯截面积, $\omega$  为光纤的模场半径; $g_s$  为光纤布里渊增益系数; $L_{eff}=[1-\exp(-\alpha L)]/\alpha$  为光纤有效长度, $\alpha$  为光纤中的衰减系数, $L$  为光纤长度。

公式(1)说明了影响光纤中产生受激布里渊散射所需的阈值功率  $P_{th}$  的因素,可以看出:在不同材料光纤中,产生受激布里渊散射阈值功率  $P_{th}$  是不一样的,在光纤长度和光纤的模场半径一定的条件下,阈值功率  $P_{th}$  与光纤中的布里渊增益系数成反比。由于高非线性光子晶体光纤的布里渊增益系数比普通石英光纤高 1~2 个数量级,这表明在光子晶体光纤中产生受激布里渊散射的阈值很低,因此光子晶体光纤是研制性能优良的非线性光学器件和传感器的新型功能材料。

光纤中受激布里渊散射是声学声子对入射光的散射,散射光对入射光的频移  $\Delta\nu_B$  主要由介质的声学特性和弹性力学特性决定,即:

$$\Delta\nu_B = \nu_0 - \nu_B = \frac{2\nu_0 n}{C} \cdot u_a \quad (2)$$

式中: $\nu_0$ 、 $\nu_B$  分别为入射光和 Stokes 光频率; $n$  为介质折射率; $C$  为真空中光速; $u_a$  为介质中声速,与介质的杨氏模量  $E$ 、泊松比  $\kappa$  和密度  $\rho$  有关<sup>[15]</sup>:

$$u_a = \sqrt{\frac{(1-\kappa)E}{(1+\kappa)(1-2\kappa)\rho}} \quad (3)$$

由于温度的变化会引起介质折射率  $n$ 、杨氏模量  $E$ 、泊松比  $\kappa$  和密度  $\rho$  等参数的变化,因此布里渊频率移动量  $\Delta\nu_B$  是温度  $T$  的函数,即:

$$\Delta\nu_B(T) = \Delta\nu_B(T_0)[1 + \alpha \cdot \Delta T] \quad (4)$$

式中: $\Delta\nu_B(T_0)$  为温度为  $T_0$  时的布里渊频移; $\Delta\nu_B(T)$  为温度变化到  $T_0 + \Delta T$  的布里渊频移; $\alpha$  为温度频移系数。

公式(4)表明通过调节光子晶体光纤的温度,可以调节光纤环形移频器的输出激光相对于入射激光的频移量。

受激布里渊散射 Stokes 增益曲线具有 Lorentz 线型,其半宽度  $\Delta\omega$  与声波的阻尼时间或声子寿命  $\tau_a$  有关,即:

$$\Delta\omega = \frac{1}{\tau_a} \approx \alpha_a u_a \quad (5)$$

式中:  $\alpha_a$  为声子的衰减系数。在石英晶体中,声子寿命约为 10 ns,可以估算出 Stokes 增益曲线半宽度约为 30 MHz。

为了获得较窄的 Stokes 增益线宽,在图 1 中设计了一个光纤环形腔。由光学共振腔的模式理论,对于长度为  $L$  的光纤环形腔,激光的纵模间隔(即自由光谱范围)为:

$$FSR = \frac{c}{nL} \quad (6)$$

公式(6)说明了在光纤环形谐振腔中产生受激布里渊散射光的频率条件。也就是说,只有 Stokes 光频率  $\nu_B$  相对于入射光频率  $\nu_0$  的频率差  $\Delta\nu_B$  满足:

$$\Delta\nu_B = N \cdot FSR = N \cdot \frac{c}{nL} \quad (7)$$

时,才能产生受激布里渊激光,其中  $N$  为整数。这意味着光纤环形谐振腔起着频率滤波器的作用,在纵模频带内的可以放大通过,而纵模频带外的不能通过。对于光纤环形腔来说,纵模带宽是由环形腔的自由光谱范围  $FSR$  和精细度  $F = 4R/(1-R)^2$  决定的,这里  $R = \sqrt{1-\delta} \sqrt{1-\gamma} \exp(-\alpha L/2)$ ,式中  $\delta$  和  $\gamma$  分别是光纤耦合器的附加损耗和光强耦合系数,通过合理选取  $\delta$ 、 $\gamma$  和光纤环长度  $L$  等参数,可以获得非常窄的纵模带宽。而公式(5)说明只有在光纤布里渊增益曲线内的纵模才能得到布里渊增益放大<sup>[14]</sup>。因此在光纤布里渊增益带宽内,Stokes 频谱可能是单纵模,也可能是多纵模。设 PCF 的长度为 10 m,由公式(6)计算出对应的光纤环形器的自由光谱范围  $FSR$  为 15 MHz,则在布里渊增益带宽内只能产生一个个纵模,因此利用光纤环形腔可以压缩 Stokes 光的带宽。

## 2 实验结果

实验在如图 1 所示布里渊光子晶体光纤环形移

频器原理的基础上进行。PCF 为 NL-1550-POS-1 正色散高非线性光子晶体光纤,光纤长 10 m,纤芯直径 2.1  $\mu\text{m}$ ,模场直径 2.8  $\mu\text{m}$ ,在 1550 nm 处的非线性系数为  $11 \text{ W}^{-1}\text{km}^{-1}$ ,损耗小于 9 dB/km,在 PCF 的两端各熔接长度为 1 m、芯径为 9  $\mu\text{m}$  的标准单模光纤,熔接损耗为 1.33 dB。从耦合器的 90% 部分 Stokes 光入射进入 25 GHz 的超快速光电探测器进行光电转换和 22 GHz 的宽带放大器放大后,送 HP8566A 微波分析仪观测。

图 2 为在微波分析仪上观测到的光子晶体光纤环形腔的输出信号,它是光子晶体光纤背向受激布里渊散射 Stokes 光和背向 Rayleigh 散射光的差频信号。图中横坐标表示差频频率,纵坐标为光强。在室温 20  $^{\circ}\text{C}$ ,入射光子晶体光纤的激光功率为 457 mW 时(在环形器 3 端输出的光功率为 650 mW,测得的光子晶体光纤的布里渊频移(即差频)为 9.778 GHz,线宽约为 500 kHz)。

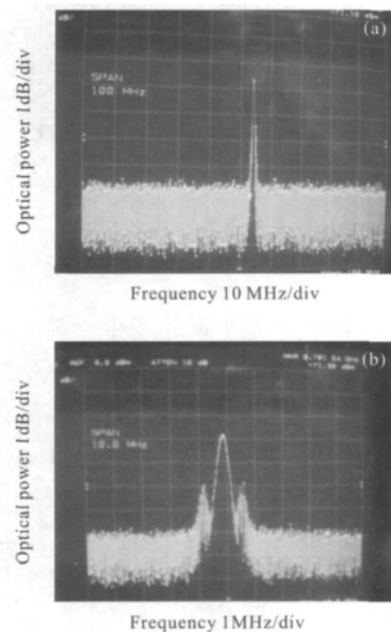


图 2 PCF 布里渊环形谐振腔输出光谱  
Fig.2 Spectrum of the Brillouin ring oscillator

这里需要指出的是:由于光纤环形器、光纤耦合器、光子晶体光纤都带有一段尾纤(标准单模光纤),实际的环形腔长约 22 m。若缩短腔长或优化环形腔的参数,可以获得非常窄线宽的单模激光输出。

为了比较光子晶体光纤背向布里渊散射谱和环

形腔输出的布里渊散射谱,将光纤环行器 3 端与耦合器断开,从光纤环行器 3 端观测光子晶体光纤 BSBS 光与背向 Rayleigh 散射光的差频信号,观测结果如图 3 所示,图中的横坐标为 100 MHz/div,其线宽约为 15 MHz,比普通标准单模光纤的布里渊散射谱线宽要窄。但是,由于入射光子晶体光纤的激光功率为 457 mW,刚好是受激布里渊散射的阈值功率,因此 Stokes 光较弱。比较图 2 和图 3 可以看出,利用光纤环形腔不仅能够放大受激布里渊散射光,而且能够获得线宽较窄的单纵模激光输出。同时,由于 10 m 标准单模石英光纤的受激布里渊散射理论阈值为 2 W,而实验在 10 m 光子晶体光纤中只用 457 mW 的入射光功率就产生了受激布里渊散射,可见光子晶体光纤的阈值是非常低的。

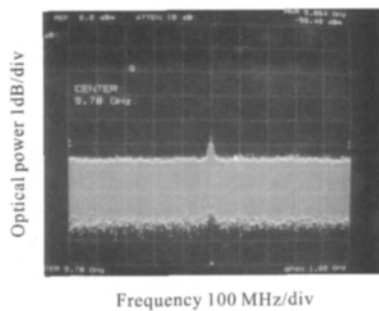


图 3 PCF 受激布里渊散射光谱  
Fig.3 Spectrum of PCF stimulated Brillouin

将光子晶体光纤置于温控箱中,调节温控箱的温度分别为 25 °C、35 °C、45 °C、55 °C,分别测量布里渊频移量,结果如图 4 所示,可以计算出温度频移系数为 1.5 MHz/°C。因此,布里渊光子晶体光纤环形移频器还可以通过调节温度来微调输出频率。

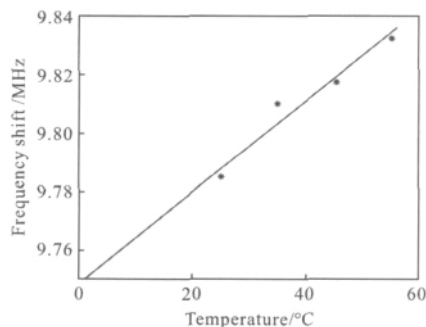


图 4 光子晶体光纤布里渊频移与温度关系  
Fig.4 Relationship of PCF Brillouin frequency and temperature

### 3 结 论

通过对布里渊光子晶体光纤环形移频器进行研究,结果表明:光子晶体光纤产生受激布里渊散射的阈值低,采用环形腔后可以对受激布里渊散射光进行放大和选频,从而获得线宽较窄、输出激光较强的单纵模激光,并且光子晶体光纤环形移频器的输出频率可以通过温度进行微调。下一步研究的重点是优化环形腔结构参数,提高受激布里渊散射光转换效率和获得更窄的激光线宽。另外,由于受目前光子晶体光纤制造工艺的影响,其损耗还很大(在波长 1.55 nm 时损耗为 9 dB/km),如果光子晶体光纤的损耗能够降低到目前标准单模光纤的水平,其受激布里渊散射阈值还可显著降低,因此,研究基于受激布里渊散射的光子晶体光纤环形腔移频技术具有重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Bin, Tan Xiaoling, Xue Ruiqiu, et al. Polarization splitter based on double rectangular-core photonic crystal fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (3): 203-207. (in Chinese)  
张斌, 谭晓玲, 薛睿秋, 等. 双矩形纤芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3): 203-207.
- [2] Kurokawa K, Ieda K, Tajima K, et al. Visible high-speed optical transmission over photonic crystal fiber [J]. *Opt Exp*, 2007, 15(2): 397-401.
- [3] Harun S W, Aziz S N, Tamchek N, et al. Brillouin fiber laser with 20 m-long photonic crystal fiber [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(18): 1065-1066.
- [4] Hassani A, Skorobogatiy M. Design of the microstructured optical fiber-based surface plasmon resonance sensors with enhanced microfluidics [J]. *Opt Exp*, 2006, 14 (24): 11616-11621.
- [5] Zou L, Bao X, Chen L. Brillouin scattering spectrum in photonic crystal fiber with a partially germanium-doped core [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(21): 2022-2024.
- [6] Cristiano M B Cordeiro, Eliane M dos Santos, C H Brito Cruz, et al. Lateral access to the holes of photonic crystal fibers-selective filling and sensing applications [J]. *Opt Exp*, 2006, 14(18): 8403-8412.
- [7] Bertrand Gauvreau, Alireza Hassani, MajidFassi Fehri, et al.

- Photonic bandgap fiber-based surface plasmon resonance sensors[J]. *Opt Exp*, 2007, 15(18): 11413–11426.
- [8] Lars Rindorf, Jesper B.Jensen, Martin Dufva, et al. Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing[J]. *Opt Exp*, 2006, 14(18): 8224–8231.
- [9] Yang Yuanhong, Duan Weiqian, Ye Miao, et al. Technology of photonic crystal fiber gyroscope [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 1143–1147. (in Chinese)  
杨远洪, 段玮倩, 叶淼, 等. 光子晶体光纤陀螺技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 1143–1147.
- [10] Yao Jianquan, Di Zhigang, Jia Chunrong. Photonic crystal fiber SERS sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(01): 96–106.
- [11] Huang Minshuang, Zeng Li, Tao Baoqi, et al. BSBS F-shift depended on doped silica core single-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(12): 1107–1110.  
黄民双, 曾励, 陶宝祺, 等. 掺杂石英系单模光纤对 BSBS 频移的影响[J]. 光子学报. 1998, 27(12): 1107–1110.
- [12] Duffy C J, Tatam R P. Optical frequency shifter technique based on stimulated Brillouin scattering in birefringent optical fiber[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(30): 5966–5972.
- [13] Kalli K, Culverhouse D O, Jackson D A. Fiber frequency shifter based on generation of stimulated Brillouin scattering in high-finesse ring resonator [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(19): 1538–1540. (in Chinese)
- [12] Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin, et al. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(4): 497–500. (in Chinese)  
沈一春, 宋牟平, 章献民, 等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 497–500.
- [14] Huang Minshuang, Zeng Li, Tao Baoqi, et al. Parameter calculation of distributed optical fiber strain sensor based on Brillouin scattering [J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 1999, 20(2): 137–140. (in Chinese)  
黄民双, 曾励, 陶宝祺, 等. 分布式光纤布里渊散射应变传感器参数计算[J]. 航空学报, 1999, 20(2): 137–140.
- [15] Nicati P A, Toyama K, Shaw H J. Frequency stability of a Brillouin fiber ring laser [J]. *Lightwave Technol*, 1995, 13(7): 1445–1451.

## 下期预览

# 投射式 LED 汽车近光灯自由曲面透镜设计

王 洪<sup>1,2</sup>, 王丽君<sup>1</sup>, 叶菲菲<sup>1</sup>, 黄华茂<sup>1</sup>, 罗婉霞<sup>3</sup>

(1. 华南理工大学 理学院 广东高校半导体照明工程研究中心, 广东 广州 510640 ;

2. School of Materials Science & Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta 30332 USA ;

3. 广州广日电气设备有限公司, 广东 广州 511447)

**摘 要:** 根据 LED 光源的发光特性, 设计了一种由椭球反射器、挡板和自由曲面透镜所组成的投射式 LED 近光灯系统。文中基于非成像光学理论, 建立 LED 光源经椭球反射器后的出射光线角度与照明平面上坐标的对应关系, 结合折反射定律计算透镜自由曲面上的点坐标, 通过建模软件将坐标点拟合成曲面实体而得到自由曲面透镜模型。采用蒙特卡洛光线追迹法进行仿真, 结果表明: 其配光结果完全满足 GB4599–2007 标准, 而且其体积小, 视野广阔, 边缘区域光能也较高, 光线利用率达到 95.92%。