

# 强光致光纤布拉格光栅光谱特性变化机理

李晓丽 陈 娜 陈振宜 王廷云

(上海大学上海市特种光纤与光接入网重点实验室, 通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘要** 强光致光纤布拉格光栅(FBG)光谱的变化是由非线性效应和光热效应共同作用的结果。基于 FBG 传感模型,利用非线性薛定谔方程和一维稳态热传导方程分析了非线性效应和光热效应各自对于光谱变化的贡献比例。通过分析波长漂移量与相位改变的关系,建立了基于 FBG 的非线性折射率系数计算模型;通过理论仿真光纤内温度分布情况,分析了光热效应对光谱啁啾化和波长漂移量的影响。理论与实验研究结果表明,对于普通单模光纤,当注入抽运光功率较小时,FBG 光谱的变化主要是由光热效应造成的,而非线性效应则贡献较小。

**关键词** 光栅; 啁啾; 非线性; 波长漂移; 光热效应

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0105005

## Mechanism of Fiber Bragg Grating Spectral Characteristics Change Induced by Intense Light

Li Xiaoli Chen Na Chen Zhenyi Wang Tingyun

(Shanghai Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, School of Communication and Information Engineering Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract** The change of the fiber Bragg grating (FBG) spectrum induced by intense light is caused by the nonlinear effect together with the photo-thermal effect. Based on the sensing model of FBG, the contribution of nonlinear effect and the photo-thermal effect on the FBG spectrum change is analyzed by using the nonlinear refractive index coefficient and one-dimensional steady state heat equation. By analyzing the relationship between the wavelength shift and phase change, nonlinear refractive index coefficient calculation model is built. And the photo-thermal effect on the spectrum chirp and wavelength shift is confirmed by theoretical simulation of temperature distribution. As the theoretical and experimental results show, for conventional single mode fiber, FBG spectrum change is mainly caused by the photo-thermal effect rather than the nonlinear effect when a relatively lower power pump is injected to single mode optical fiber.

**Key words** gratings; chirp; nonlinearity; wavelength shift; photo-thermal effect

**OCIS codes** 060.2430; 060.4370; 140.5560; 140.6810

## 1 引 言

随着激光技术的发展,光纤布拉格光栅(FBG)在强光条件下的应用越来越广泛,如激光诱导间质热疗法(LITT)治疗恶性肿瘤和子宫癌<sup>[1]</sup>、级联相移 FBG 制作光时延干涉仪<sup>[2]</sup>等。不论是作为传感器<sup>[3]</sup>、滤波器<sup>[4]</sup>还是光纤激光器的腔镜<sup>[5]</sup>,只要当强光与 FBG 作用时,FBG 的光谱特性都会发生不同程度的改变,而影响到实际应用结果。因此,弄清楚

它们之间的相互作用和影响就变得尤为重要<sup>[6-7]</sup>。通常,对于该现象的解释有两种观点:1)由强光引起的非线性效应而导致纤芯有效折射率发生改变;2)由热扩散或热应力而引起的波长漂移。但实际上,强光作用时应该是两者的共同作用。因此,在研究非线性折射系数时,无论是采用自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)还是干涉的方法,都应考虑不同抽运光功率下热效应的影响,分析其所

**收稿日期**: 2013-06-27; **收到修改稿日期**: 2013-08-29

**基金项目**: 国家自然科学基金(61107076,61177088,61227012)、上海市重点学科建设资助项目(S30108)

**作者简介**: 李晓丽(1989—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: lixiaoli623356@163.com

**导师简介**: 陈 娜(1982—),女,博士,副教授,主要从事特种光纤及光纤传感等方面的研究。

E-mail: Na.Chen@shu.edu.cn(通信联系人)

占的贡献比例,而不应一概归于非线性的作用结果。

本文实验研究了 980 nm 强光抽运下,FBG 对 1550 nm 信号光反射谱的变化,结合 FBG 的传感模型和一维稳态热传导方程分析了非线性效应和光热效应对 FBG 光谱变化的贡献量,可为非线性研究及传能传感一体化应用等提供预补偿参考。

## 2 原理与实验

### 2.1 FBG 传感模型

光纤光栅是利用光敏光纤的光致折射率变化,在光纤纤芯内形成的空间相位光栅。在 FBG 中,前向传输的  $LP_{01}$  模 ( $\beta_1 = \beta_{01}$ ) 与反向传输的  $LP_{01}$  模 ( $\beta_2 = \beta_{01}$ ) 相耦合,而使前向传输的纤芯模式的能量传递给后向传输的纤芯模式,从而形成对入射光波的反射。其反射波长即布拉格波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中  $\Lambda$  为光栅的周期, $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率。当有强光注入 FBG 时,考虑到非线性引起的折射率改变,折射率的纵向剖面可表示为

$$n(z) = \bar{n} + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}\right) + n_2 I, \quad (2)$$

式中  $\bar{n}$  为纤芯的平均折射率, $\Delta n$  为折射率调制幅度, $z$  为沿光纤的纵向距离, $n_2$  为非线性克尔系数, $I$  为注入信号光的光强。当环境参数发生改变时,纤芯有效折射率会发生相应的改变,从而引起布拉格波长的红移或蓝移,通过信号解调就可以知道环境参数的变化量。

### 2.2 实 验

为了分析强光对 FBG 光谱的影响,将传光和传感在一根光纤光栅中同时实现,其实验装置如图 1 所示。实验中,利用一个  $2 \times 2$  的耦合器将超辐射发光二极管(SLED)发出的信号光(1550 nm)和激光器发出的抽运光(980nm)耦合到一根单模光纤中,

由光谱仪(OSA)记录下经过 FBG 后的反射谱。其中光栅长度为 10 mm,半峰全宽(FWHM)小于 0.3 nm,反射率大于 90%,最大反射率处的中心波长为 1546.95 nm。该光栅经过  $-20\text{ }^\circ\text{C}$  到  $100\text{ }^\circ\text{C}$  梯度升降温退火后,最终标定为  $10.7\text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。观察注入抽运光前后 FBG 反射谱的变化,并记录不同抽运光功率下的光谱以便进行后续分析。

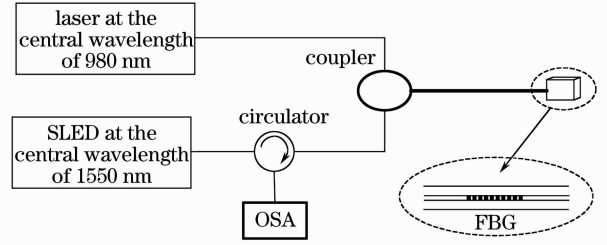


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment

### 2.3 实验结果

为了分析抽运光功率的影响,并保证实验的一致性和可靠性,在不同实验温度( $T_1: 13.5\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_2: 17.3\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_3: 23.8\text{ }^\circ\text{C}$ )下做了对比实验,同时对同一实验温度( $T_{1\text{-up}}$  和  $T_{1\text{-down}}$  均为  $13.5\text{ }^\circ\text{C}$ )下,增大和减小抽运光功率的实验数据进行了对照。当有抽运光作用于 FBG 时,其反射光谱如图 2(a)所示。

由图 2 可知,光谱的形状和中心波长都发生了变化,而光在光栅中的非线性传输<sup>[8-9]</sup>和热效应<sup>[10-11]</sup>形成的非均匀温度场都会导致这两种现象的产生。首先分析中心波长的漂移,得到 5 组实验数据对应的反射光谱中心波长漂移量随抽运光功率变化的情况如图 2(b)所示。进一步对图中的实验数据进行线性拟合,得到拟合后的直线斜率在  $5.11 \times 10^{-4} \sim 5.37 \times 10^{-4}\text{ nm/mW}$  范围内,误差为  $2.6 \times 10^{-5}\text{ nm/mW}$ 。即当注入 220 mW 的抽运光时,仅有 5.72 pm 的误差,其重复性和一致性都很高。

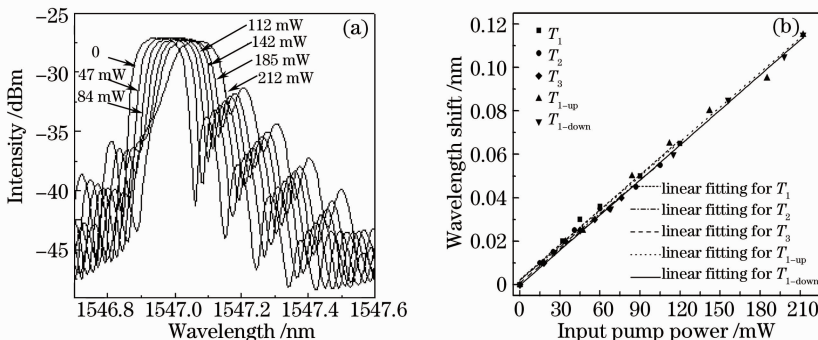


图 2 抽运光作用时(a)FBG 反射谱的变化和(b)波长漂移量的变化

Fig. 2 Changes of (a) FBG reflection spectrum and (b) wavelength shift when pump light is injected into the FBG

对于实验中 FBG 光谱形状的变化,分析其 FWHM 的变化情况发现,FWHM 随注入抽运光功率的增大而增大,也即 FBG 由均匀光纤光栅向啁啾光栅<sup>[12]</sup>发生了转化。针对该实验现象,分两个方面分析:1) 非线性作用引起纤芯有效折射率改变;2) 光热效应引起光纤内部温度上升形成非均匀的温度场。下文具体分析这两方面对实验结果的贡献。

### 3 理论分析

#### 3.1 非线性效应

在线性光学范围内,介质折射率与入射光强无关。而在强光光学中,强光通过光学介质时也会引起折射率感应变化。这种折射率变化主要是由三阶非线性电极化效应所决定的,折射率变化量的大小与作用光强成正比。对于非线性折射率系数的定义,可表示为

$$n_2 = \frac{\lambda_p A_{\text{eff}} \gamma}{2\pi}, \quad (3)$$

式中  $\gamma$  为非线性参量,  $\lambda_p$  为抽运光的中心波长。

由非线性薛定谔方程<sup>[13]</sup>出发,分析 FBG 的非线性特性。一般的,  $\lambda_p \neq \lambda_B$ ,  $\lambda_B$  为布拉格波长,抽运光在 FBG 中传输时,会在光纤的纤芯中形成一个折射率的微扰,其与抽运光功率  $P_p$  成正比。对于波数  $k$  有

$$\frac{\Delta k}{k} = \frac{n_2 P_p}{n_0 A_{\text{eff}}}. \quad (4)$$

因此,由抽运光所引起的波长变化量可表示为

$$\Delta \lambda_{\text{NL}} = \frac{2bn_2 P_p}{n_0 A_{\text{eff}}} \lambda_B, \quad (5)$$

式中  $b$  为克尔效应的极化系数,其值在  $1/3 \sim 1$  之间,由抽运光和信号光之间的偏振态来决定;  $A_{\text{eff}}$  为有效模场面积,值为  $76.8 \mu\text{m}^2$ ;  $n_0$  为纤芯平均折射率。对于普通单模光纤,其非线性系数约为  $3 \times 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ ,代入(5)式可得在  $220 \text{ mW}$  时,波长漂移量最多也仅有  $1.73 \times 10^{-7} \text{ nm}$  ( $b=1$ )。因此在本实验中非线性效应对波长漂移的贡献量较小。

#### 3.2 光热效应

当光学介质对入射光呈现一定形式的光能吸收如单光子或双光子共振吸收时,一部分被吸收的光能通过介质粒子的非辐射跃迁而转换为介质的热

能,从而引起光通过区域的局部温升和介质密度变化,而介质密度的变化将直接导致折射率的变化,且该过程的响应时间较快。设光纤热容密度  $Q_0$  为

$$Q_0 = \alpha_0 I_p \left[ \frac{I_p}{I_p + I_{\text{sat}}} (\epsilon - \xi) + \xi \right], \quad (6)$$

式中  $\alpha_0$  为材料在抽运光波长处的吸收系数,  $I_p$  为抽运光在光纤中的光强,  $I_{\text{sat}}$  为抽运光饱和光强,  $\epsilon$  为激发态吸收损耗,  $\xi$  为斯托克斯损耗<sup>[14]</sup>。

利用一维稳态热传导方程分析,得到光纤内部温度分布情况为

$$T_{\text{I}}(r) = T_c + \frac{Q_0 r_1^2}{4\kappa} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 \right] + \frac{Q_0 r_1^2}{4\kappa} \left[ 2 \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{2\kappa}{r_2 h} \right], \quad 0 \leq r \leq r_1, \quad (7)$$

$$T_{\text{II}}(r) = T_c + \frac{Q_0 r_1^2}{2r_2 h} - \frac{Q_0 r_1^2}{2\kappa} \ln \left( \frac{r_2}{r} \right), \quad r_1 \leq r \leq r_2, \quad (8)$$

式中  $r$  为光纤端面以圆心为原点的径向距离,光纤纤芯半径  $r_1 = 4.5 \mu\text{m}$ ,光纤包层半径  $r_2 = 62.5 \mu\text{m}$ ,对流热传递系数  $h = 10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,热导率  $\kappa = 1.38 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。由于光栅初始温度  $T_c$  为  $287 \text{ K}$ ,通入约  $220 \text{ mW}$  的  $980 \text{ nm}$  抽运光后,按(7)式和(8)式理论仿真得到光纤内部温度分布如图 3 所示。

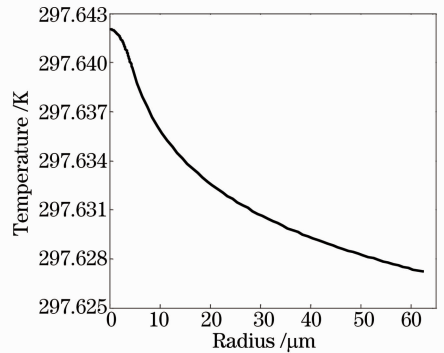


图 3 光纤内温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution in optical fiber

由仿真结果可知,光纤内温度约为  $297.64 \text{ K}$ ,比初始温度上升了约  $10.64 \text{ }^\circ\text{C}$ 。这与实验数据对应的波长漂移  $0.115 \text{ nm}$  (折合温度  $10.69 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 基本吻合。对非均匀温场中 FBG 反射谱进行仿真,将仿真得到的 FWHM 与实验得到的 FBG 反射谱的 FWHM 进行对比,得到结果如表 1 所示。

表 1 仿真和实验所得半峰全宽变化情况对比

Table 1 Comparison of FWHM change by simulation and experiment

Power /mW	0	47	84	112	142	185	212
Simulation FWHM /nm	0.177	0.179	0.265	0.316	0.320	0.324	0.402
Experiment FWHM /nm	0.177	0.179	0.266	0.316	0.321	0.326	0.404

由表 1 可知,实验数据和仿真结果基本吻合,也即在本实验中,光栅啁啾的非均匀程度<sup>[15]</sup>反映的是 FBG 中光热效应的作用,非线性效应可看作是一个均匀作用的过程,不会引起光谱形状的变化。

### 3.3 贡献比例

当从实验中得到一组光谱时,首先可以通过分析光谱的啁啾化得到光热效应的作用成分,继而得到对应的温度变化  $\Delta T$ ,同时该部分温度的变化也会引起 FBG 光谱中心波长的漂移,得到漂移量  $\lambda_T$ 。因为非线性效应和光热效应都会使光谱中心波长发生漂移,设其总漂移量为  $\lambda_{\text{FBG}}$ ,这样就可以利用  $\lambda_{\text{NO}} = \lambda_{\text{FBG}} - \lambda_T$  得到非线性效应产生的漂移量  $\lambda_{\text{NO}}$ 。即可以通过分析 FBG 啁啾的非均匀程度得到非线性效应和光热效应的贡献比例为  $\lambda_{\text{NO}}/\lambda_T$ 。

FBG 的写制可有多种方法或技术,常见的是利用光纤光敏性导致光致折射率变化在纤芯形成空间相位光栅,或将光纤载氢后利用相位掩模板法写制成栅。而近几年随着飞秒激光器的广泛应用,利用飞秒激光写制 FBG 的技术得到了推广<sup>[16]</sup>,并已相对成熟,但飞秒激光致光纤折射率调制的内在机理仍没有定论。对于光敏和非光敏性光纤写制的 FBG,当强光作用于 FBG 时,都有两种效应产生:光热效应和非线性效应。但在进行两种效应的分析时需要对一些参数进行重新设置,因为不同材料和写制方法得到的 FBG,其光热系数、温度灵敏度系数、波导结构参数、非线性效应等都不尽相同。因此,应用本模型分析不同制作方法不同掺杂类型的 FBG 时,应视具体情况作具体分析。如对一个芯径为  $1.42 \mu\text{m}$ ,在  $980 \text{ nm}$  处吸收系数为  $0.024 \text{ cm}^{-1}$  的掺铒光纤注入  $70 \text{ mW}$  的光,其光谱不仅发生漂移而且产生啁啾化,通过分析光谱啁啾的非均匀化程度得到光热效应引起的温升约为  $18 \text{ }^\circ\text{C}$ ,在实验测量得到该光栅温度灵敏度系数的情况下,可得到光热效应引起的波长漂移量,然后在总的波长漂移量中扣除热效应的作用成分就得到了非线性效应所引起的波长漂移量。也即通过啁啾的非均匀程度,可分析引起 FBG 光谱特性变化的非线性效应及光热效应的贡献比例。另外,近年来对于非线性系数的研究多采用级联长周期光纤光栅(LPG)等光纤干涉仪<sup>[17]</sup>方法来进行,但却忽略了热效应的影响,本文的分析可为其提供参考补偿。

## 4 结 论

实验发现,当  $980 \text{ nm}$  抽运光注入普通单模光

纤 FBG 中时,会引起 FBG 光谱特性发生相应的改变。对实验所得数据进行分析,得到波长漂移量与抽运光功率呈线性变化。由于外界环境并没有发生改变,利用非线性薛定谔方程和温度一维稳态热传导方程分析了非线性效应和光热效应对于光谱变化的贡献量,通过计算非线性引起的波长漂移量,并对光纤内温度分布进行理论仿真,得出结论:对于普通单模光纤,当抽运光功率较小时,热效应是引起其光谱变化的主要影响因素。

### 参 考 文 献

- Paola Saccomandi, Emiliano Schena, Michele Arturo Caponero, *et al.*. Theoretical analysis and experimental evaluation of laser-induced interstitial thermotherapy in *ex vivo* porcine pancreas[J]. Transactions on Biomedical Engineering, 2012, 59(10): 2958–2964.
- Tae-Young Kim, Masanori Hanawa, Sun-Jong Kim, *et al.*. Optical delay interferometer based on phase shifted fiber Bragg grating with optically controllable phase shifter[J]. Opt Express, 2006, 14(10): 4250–4255.
- Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun, *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(1): 0105004.  
张晓丽, 梁大开, 芦吉云, 等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105004.
- Dong Xinyong, Kong Lingjun, Zhao Chunliu, *et al.*. Multifunctional devices based on fiber Bragg grating Fabry-Perot structures[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(12): 120604.  
董新永, 孔令浚, 赵春柳, 等. 基于法布里珀罗结构的光纤光栅功能型器件[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(12): 120604.
- Liu Wei, Chen Tao, Dai Jianning, *et al.*. All-fiberized Yb fiber laser with passively generated sub-nanosecond pulse output[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(12): 1214003.  
刘伟, 陈滔, 戴建宇, 等. 全光纤化的被动式亚纳秒脉冲 Yb 光纤激光器研究[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1214003.
- Irina V Kabakova, Therese Walsh, C M de Sterke, *et al.*. Performance of field-enhanced optical switching in fiber Bragg gratings[J]. J Opt Soc Am B, 2010, 27(7): 1343–1351.
- V V Gainov, O A Ryabushkin. Effect of optical pumping on the refractive index and temperature in the core of active fiber[J]. IEEE J Quantum Electron, 2011, 41(9): 809–814.
- Mohammad Karimi, Majid Lafouti, Ali Asghar Amidiyan, *et al.*. All-optical flip-flop based on nonlinear effects in fiber Bragg gratings[J]. Appl Opt, 2012, 51(1): 21–26.
- Andrea Melloni, Marco Chinello, Mario Martinelli. All-optical switching in phase-shifted fiber Bragg grating[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(1): 42–44.
- David C Brown. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(2): 207–217.
- Yang Jingwei, Wang Li, Wu Xianyou, *et al.*. Numerical simulation and experimental study on thermal effects of  $2.94 \mu\text{m}$  Er:YAG laser[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(6): 0614002.  
杨经纬, 王礼, 吴先友, 等.  $2.94 \mu\text{m}$  Er:YAG 激光热效应数值模拟及实验研究[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 0614002.
- Guo Bingxia, Li Qianghua. Influence of grating parameters on polarization properties of linearly chirped fiber Bragg gratings[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(s1): s105004.  
郭炳霞, 励强华. 光栅参数对线性啁啾光纤光栅偏振特性的影响

- [J]. 中国激光, 2012, 39(s1): s105004.
- 13 Benjamin J Eggleton, C Martijn de Sterke, R E Slusher. Nonlinear pulse propagation in Bragg gratings[J]. J Opt Soc Am B, 1997, 14(11): 2980—2993.
- 14 Yu O Barmenkov, A V Kir'yanov, M V Andrés. Resonant and thermal changes of refractive index in a heavily doped erbium fiber pumped at wavelength 980 nm[J]. Appl Phys Lett, 2004, 85(13): 2466—2468.
- 15 Guo Tuan, Liu Bo, Zhang Weigang, *et al.*. Research on optical fiber grating chirp-sensing technology[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(5): 828—834.
- 郭 团, 刘 波, 张伟刚, 等. 光纤光栅啁啾化传感研究[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 828—834.
- 16 Jens Thomas, Christian Voigtlander, Ria G Becker, *et al.*. Femtosecond pulse written fiber gratings: a new avenue to integrated fiber technology[J]. Laser Photon Rev, 2012, 6(6): 609—723.
- 17 Y H Kim, B H Lee, Y Chung, *et al.*. Resonant optical nonlinearity measurement of Yb<sup>3+</sup>/Al<sup>3+</sup> codoped optical fibers by use of a long-period fiber grating pair[J]. Opt Lett, 2002, 27(8): 580—582.

栏目编辑: 王晓琪