

# 饱和长度对少模光纤光栅影响的数值仿真\*

杨 春 高 峰

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

**摘 要** 对折射率剖面非均匀的少模光纤 Bragg 光栅(FM-FBG)的反射特性进行了数值仿真,研究了光纤侧面紫外曝光法制作的光纤光栅中饱和长度的影响. 用试射法(shooting)数值求解了耦合模方程,得到 FM-FBG 的反射谱. 仿真结果表明,在纤芯和包层边界的最大光致折射率变化量和纤芯吸收因子不变的情况下,随着纤芯折射率变化的饱和长度的增大,LP<sub>01</sub> 和 LP<sub>11</sub> 模间的互耦合反射峰呈抛物线形变化,当饱和长度增大到一定值后,互耦合反射峰随饱和长度的增大而逐渐减小并最终消失;同阶 LP 模的自耦合反射峰随饱和长度的增大而增大.

**关键词** 光纤通信; 光纤 Bragg 光栅; 耦合模理论; 试射法

**中图分类号** TN25 **文献标识码** A

## 0 引言

近年来,单模光纤光栅在光纤光通信和传感器系统领域已获得了广泛的应用<sup>[1~3]</sup>. 多模光纤 Bragg 光栅(MFBG)近年来也受到关注,其在滤波器、激光器等很多领域有潜在的应用前景<sup>[4~6]</sup>. 目前,用相位掩模板通过光纤侧面曝光的方法已成为制作光纤光栅的标准方法<sup>[7]</sup>. 但由于多模光纤的芯径较大,用这种方法制作的 MFBG 的折射率剖面非均匀性比较显著. 折射率剖面非均匀性对 MFBG 性能的影响远大于对单模光栅的影响. 例如,用 MFBG 和 LD 构成外腔激光器,偏振特性就对锁模性能有很大的影响<sup>[5]</sup>. 目前,对多模和少模 FBG 的实验研究已经有报道<sup>[6]</sup>,对折射率剖面非均匀单模 FBG 的仿真也有报道<sup>[8]</sup>,但对折射率剖面非均匀的多模和少模 FBG 的仿真还无报道. 由于标准的通信多模光纤中模式非常多,其 FBG 的耦合模方程维数超过 200,数值求解非常耗时. 并且,如果要得到反射谱或透射谱,在光谱范围内每隔 0.01 nm 至 0.1 nm 波长就要重新求解耦合模方程,因而计算量非常大. 为了研究光纤光敏特性的饱和效应对 MFBG 反射特性的影响,本文中在考虑了曝光过程中饱和长度对折射率剖面分布的影响下,对多模光纤光栅的一个特例,即少模光纤 Bragg 光栅(FM-FBG)中各线偏振模的反射特性进行了数值仿真.

## 1 耦合模理论

MFBG 内电场和磁场可分别表示为

$$E_z = \sum_v [a_v(z)e^{-i\beta_v z} + b_v(z)e^{i\beta_v z}] e_{\alpha}(x, y) e^{i\omega z} \quad (1)$$

$$H_z = \sum_v [a_v(z)e^{-i\beta_v z} - b_v(z)e^{i\beta_v z}] h_{\alpha}(x, y) e^{i\omega z} \quad (2)$$

式中,  $a_v(z)$  为正向传播模式的幅度,  $b_v(z)$  为反向传播模式的幅度. 下标  $v$  是将所有的束缚模按照传播常数从大到小排列后重新定义的模式序数. MFBG 的耦合模方程可表示为<sup>[4]</sup>

$$\frac{da_{\mu}}{dz} = -i \sum_v ([a_v e^{i(\beta_{\mu} - \beta_v)z} + b_v e^{i(\beta_v + \beta_{\mu})z}] \cdot [\frac{\omega}{4} \int_{\infty} dA \cdot \Delta \epsilon e_{\alpha} e_{\mu}^*]) \quad (3)$$

$$\frac{db_{\mu}}{dz} = i \sum_v ([a_v e^{-i(\beta_{\mu} + \beta_v)z} + b_v e^{i(\beta_v - \beta_{\mu})z}] \cdot [\frac{\omega}{4} \int_{\infty} dA \cdot \Delta \epsilon e_{\alpha} e_{\mu}^*]) \quad (4)$$

式中,  $\beta_{\mu}$ 、 $\beta_v$  表示模式传播常数,  $z$  表示传播方向,  $\omega$  为角频率.  $\Delta \epsilon$  为光纤经紫外光照射后介电常数的变化. 若  $\Delta \epsilon$  在光纤横截面内均匀,则由模式正交性可知,式(3)、(4)右边的积分仅当两个电场强度矢量的下标相等的情况下才不为零,即下标只能取  $\mu$ ,因而只存在前向传播模与同阶反向传播模之间的耦合,前向传播模与不同阶反向传播模之间没有耦合. 如果  $\Delta \epsilon$  在光纤横截面内不均匀,前向传播模与不同阶反向传播模之间就有可能存在耦合.

## 2 折射率剖面非均匀 FM-FBG 的数值模型

设 FM-FBG 折射率变化的空间分布为

$$\delta n_{co} = \overline{\delta n_{co}}(z) \{1 + v_n \cos [\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z)]\} \cdot D_n(x, y) \quad (5)$$

式中,  $\overline{\delta n_{co}}$  为折射率变化的慢变包络;  $v_n$  为折射率变化的可见度;  $\phi(z)$  表示光栅的啁啾;  $D_n(x, y)$  表示光纤折射率变化的剖面分布,坐标  $z$  为光纤纵轴,光纤

\*国家自然科学基金(60007005)、江苏省创新人才项目(BK2003406)和国家留学基金(22832041)资助  
Tel: 025-83792469-803 Email: yangchun@seu.edu.cn  
收稿日期: 2005-07-08

的横截面为  $xy$  平面.

定义直流耦合系数  $\sigma_{\nu\mu}$  和交流耦合系数  $k_{\nu\mu}$

$$\sigma_{\nu\mu}(z) = \frac{\omega n_1 \epsilon_0}{2} \overline{\delta n_{co}}(z) \iint_{\text{core}} D_n(x, y) e_{\nu} e_{\mu}^* dx dy \quad (6)$$

$$k_{\nu\mu}(z) = \frac{v_n}{2} \sigma_{\nu\mu}(z) \quad (7)$$

式中,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数.

为便于数值求解, 定义新的变量  $R_{\mu}$  和  $S_{\mu}$ , 使得

$$a_{\mu} = R_{\mu} e^{i(\delta_{\mu} z - \frac{t}{2})} \quad (8)$$

$$b_{\mu} = S_{\mu} e^{-i(\delta_{\mu} z - \frac{t}{2})} \quad (9)$$

式中  $\delta_{\mu} = \beta_{\mu} - \frac{\pi}{\Lambda}$ .

令  $R_{\mu}^r$  和  $R_{\mu}^i$  分别表示  $R_{\mu}$  的实部和虚部, 由式(3)得

$$\frac{dR_{\mu}^r}{dz} = (\delta_{\mu} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}) R_{\mu}^r + \sum_{\nu} [\sigma_{\nu\mu} R_{\nu}^i + k_{\nu\mu} S_{\nu}^i] \quad (10)$$

$$\frac{dR_{\mu}^i}{dz} = -(\delta_{\mu} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}) R_{\mu}^i - \sum_{\nu} [\sigma_{\nu\mu} R_{\nu}^r + k_{\nu\mu} S_{\nu}^r] \quad (11)$$

同样, 令  $S_{\mu}^r$  和  $S_{\mu}^i$  分别表示  $S_{\mu}$  的实部和虚部, 由式(4)可得

$$\frac{dS_{\mu}^r}{dz} = -(\delta_{\mu} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}) S_{\mu}^r - \sum_{\nu} [\sigma_{\nu\mu} S_{\nu}^i + k_{\nu\mu} R_{\nu}^i] \quad (12)$$

$$\frac{dS_{\mu}^i}{dz} = (\delta_{\mu} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}) S_{\mu}^i + \sum_{\nu} [\sigma_{\nu\mu} S_{\nu}^r + k_{\nu\mu} R_{\nu}^r] \quad (13)$$

耦合模式(10)~(13)已是可用数值方法求解的形式.

### 3 仿真结果与讨论

下面考虑了在模式均匀激励下, 数值求解耦合模方程, 对光纤侧面紫外曝光法制作的光纤光栅中折射率变化的饱和和长度对 FM-FBG 的各线偏振模反射特性的影响进行了仿真研究.

FBG 中折射率变化在横截面上可用折射率分布函数表示<sup>[8]</sup>

$$D_n(x, y) = \begin{cases} A\alpha & (l \leq \delta) \\ A\alpha \exp[-\alpha(l - \delta)] & (l > \delta) \end{cases} \quad (14)$$

式中各变量的定义如图 1, 紫外光沿  $X$  轴方向入射纤芯,  $a$  为纤芯半径.  $l = x + \sqrt{a^2 - y^2}$  为纤芯内点沿

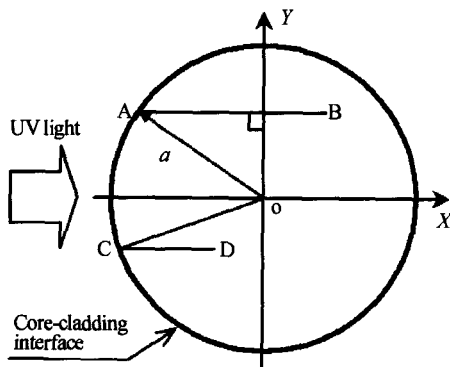


图 1 光纤芯横截面  
Fig. 1 Cross-section of fiber core

$x$  轴到纤芯和包层界面的距离, 对应于 B 点和 D 点分别是长度 AB 和 CD.  $\alpha$  为折射率剖面的非对称系数, 也可称为吸收因子. 乘积  $A\alpha$  为纤芯边界最大光致折射率变化;  $A$  与材料的光敏特性有关.  $\delta$  为饱和长度. 图 2 为  $A\alpha = 0.005$ ,  $\alpha = 0.2 \mu\text{m}^{-1}$ ,  $\delta = 3 \mu\text{m}$  时折射率变化横截面分布图.

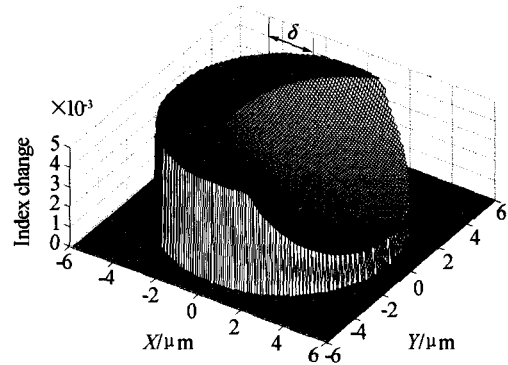


图 2 光纤光栅折射率变化横截面分布图  
Fig. 2 Cross-sectional profile of index change of FBG

FM-FBG 的仿真参数详见表 1. 在 1533.5 nm ~ 1538.5 nm 的波长范围内共有 6 个导模, 其中  $\text{HE}_{11}^x$  和  $\text{HE}_{11}^y$  简并成线偏振模  $\text{LP}_{01}$ ,  $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}^x$  和  $\text{HE}_{21}^y$  简并成线偏振模  $\text{LP}_{11}$  (上标  $x, y$  表示偏振方向). 在导模功率均匀激励的情况下, 用试射法 (shooting) 求解耦合模式(10)~(13)得到各导模的反射特性. 由于方程是常系数的, 用试射法经过一次迭代就可以得到边值问题的解.

表 1 FM-FBG 仿真参数的选取

参数	取值
光纤半径 $a$	$5.0 \mu\text{m}$
包层半径 $r_{\text{clad}}$	$62.5 \mu\text{m}$
芯层折射率 $n_1$	1.456093
包层折射率 $n_2$	1.446734
光栅周期 $\Lambda$	530 nm
光栅长度 $L$	20 mm
折射率变化的慢变包络 $\overline{\delta n_{co}}$	$1.0 \times 10^{-2}$
可见度 $v_n$	0.8
步长 $\lambda_{\text{step}}$	0.05 nm

图 3 为模式均匀激励下 FM-FBG 的反射谱, 反射率为反射功率与前向导模总功率的比值. 图 4 为对应于图 3 参数的  $\text{LP}_{01}$ 、 $\text{LP}_{11}$  模各自的反射谱, 相当于光纤内只有一个前向线偏振模的情形. 由图 4 可见,  $\text{LP}_{01}$  模的反射谱中有前向  $\text{LP}_{01}$  模耦合到反向  $\text{LP}_{01}$  模的自耦合峰, 也有明显的前向  $\text{LP}_{01}$  模耦合到反向  $\text{LP}_{11}$  模的互耦合峰;  $\text{LP}_{11}$  模的反射谱中有前向  $\text{LP}_{11}$  模耦合到反向  $\text{LP}_{11}$  模的自耦合峰, 也有明显的前向  $\text{LP}_{11}$  模耦合到反向  $\text{LP}_{01}$  模的互耦合峰. 由图 3 可知, 在两个线偏振模都激励的情况下, 反射谱中出现全部的自耦合峰和互耦合峰. 图 3(a)中  $\delta = 0 \mu\text{m}$

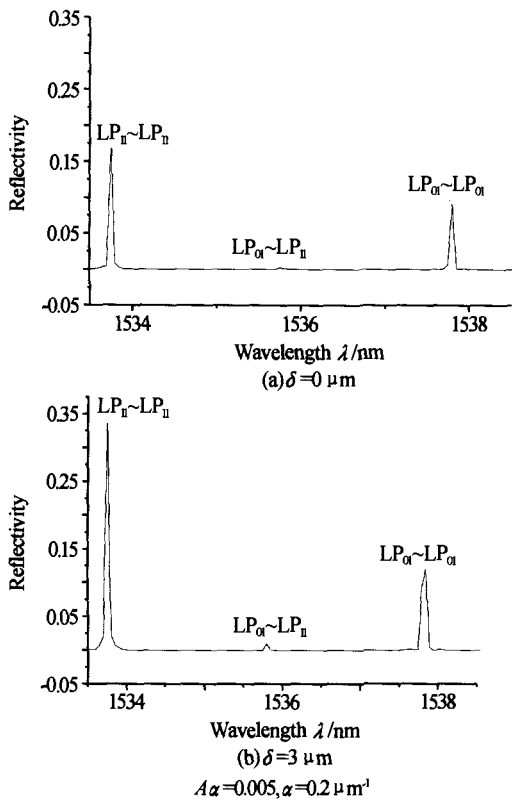


图 3 FM-FBG 的反射谱  
Fig. 3 Reflection spectrum of FM-FBG

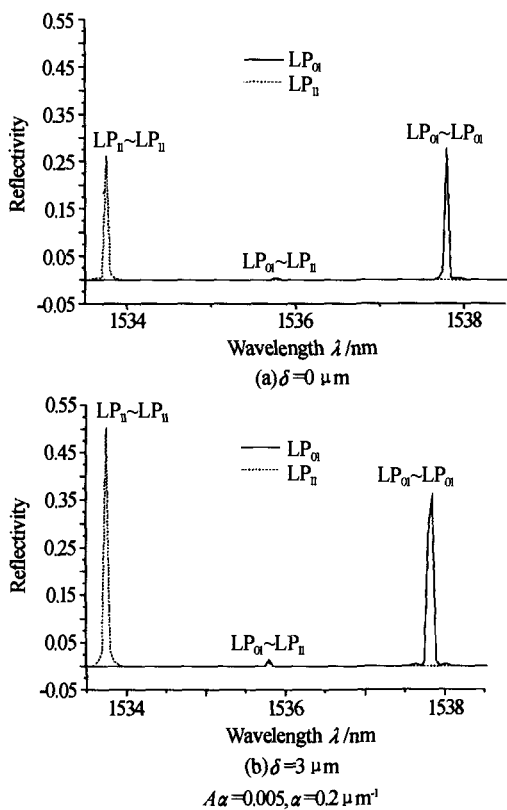


图 4 线偏振模的反射谱  
Fig. 4 Reflection spectrum of LP modes

时,  $LP_{01}$  模在 1537.85 nm 波长的自耦合反射峰为 0.09132,  $LP_{11}$  模在 1533.75 nm 波长的自耦合反射峰为 0.17371,  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模在 1535.75 nm 波长的

互耦合反射峰为 0.0022. 图 3(b) 中  $\delta = 3 \mu\text{m}$  时,  $LP_{01}$  模的自耦合反射峰为 0.11948,  $LP_{11}$  模的自耦合反射峰为 0.33495,  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的互耦合反射峰为 0.00968. 由上面结果可见, FM-FBG 的自耦合和互耦合反射峰的幅度与光纤芯折射率变化的饱和长度  $\delta$  有关.

发生互耦合的模式间都要满足相位匹配条件:  $\beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\Lambda$ , 其中  $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为前向和后向传播模的传播常数. 对于前向模反射到同阶反向模的情况(自耦合),  $\beta_1 = -\beta_2 = \beta$ . 相位匹配条件可简写成  $\beta = \pi/\Lambda$ . 根据导模的有效折射率  $n_{\text{eff}} = \beta(\lambda/2\pi)$ , 导模自耦合反射峰波长可以表示为

$$\lambda = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (15)$$

式中,  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率.  $LP_{01}$  模的  $n_{\text{eff}}$  约为 1.4534, 反射峰预测在 1540 nm 附近,  $LP_{11}$  模的  $n_{\text{eff}}$  约为 1.4495, 反射峰在 1536 nm 附近. 而仿真中由于考虑了材料色散, 故各反射峰都向短波长方向平移了约 2 nm.

图 5 是模式均匀激励条件下  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的自耦合反射峰值随饱和长度  $\delta$  的变化关系. 随着  $\delta$  的增大,  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的自耦合反射峰值也随之增加. 由耦合系数式(6)可知, 同阶模电场的共轭点乘  $(e_{\mu} \cdot e_{\mu}^*)$  在光纤横截面一定非负, 又由于  $\delta$  的增大导致折射率分布函数  $D_n(x, y)$  的变化在横截面内处处非负, 因此同阶模自耦合的直流耦合系数  $\delta_{\mu\mu}$

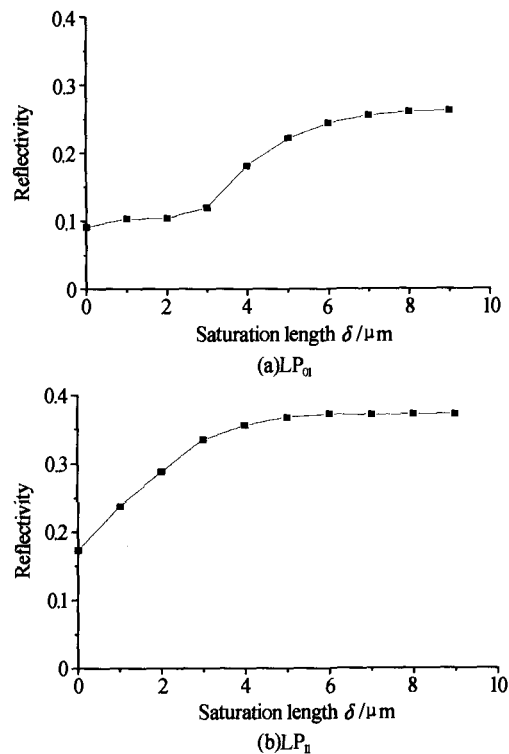


图 5 FM-FBG 的自耦合反射峰与饱和长度  $\delta$  的关系  
Fig. 5 The self-coupling reflectivity of FM-FBG vary with saturation length  $\delta$

和交流耦合系数  $k_{\mu}$  随  $\delta$  的增大而单调增大,这与图5的仿真结果是一致的。

图6是  $LP_{01}$  模和  $LP_{11}$  模的互耦合峰与饱和长度  $\delta$  的关系图。当  $\delta$  从零逐渐增大时,互耦合反射率也逐渐增大。当  $\delta$  增大到约  $3\ \mu\text{m}$  时,互耦合反射率达到最大值。当  $\delta$  继续增大到光纤芯径时,互耦合反射率逐渐减小至零。上述结果可以用耦合系数式(6)进行解释,不同阶模电场的共轭点乘 ( $e_x \cdot e_x^*$ ) 在光纤横截面不一定处处非负,因此互耦合系数与折射率分布函数  $D_n(x, y)$  有关,也与相互耦合的两个模式的场分布有关。首先,当  $\delta$  趋近于芯径时,  $D_n(x, y)$  趋于均匀分布,由模场的正交性可知互耦合系数趋于零,这与互耦合反射率趋于零的仿真结果一致。类似的现象也出现在单模FBG中  $D_n(x, y)$  不均匀导致的  $LP_{01}$  模的双折射与  $\delta$  的关系上<sup>[8]</sup>,如图4,当  $\delta$  趋于光纤芯径时,  $LP_{01}$  模的双折射逐渐减小至零。另外,互耦合反射率的极值条件则较为复杂,由于FM-FBG中模式互耦合和自耦合存在竞争,互耦合反射率的大小不仅仅取决于模式互耦合系数的大小,还与模式自耦合系数的大小有关,因此很难用解析的方法确定,而数值仿真的方法是确定互耦合反射率极值条件的有效方法。

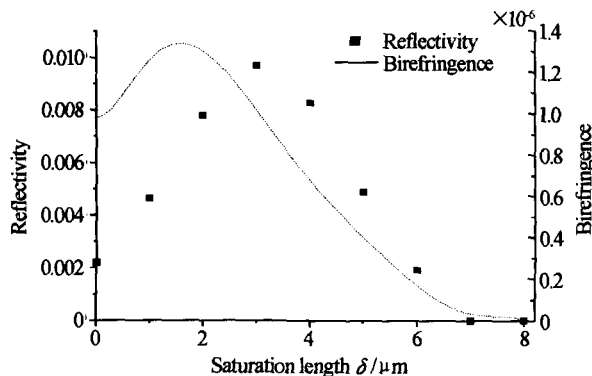


图6  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  的互耦合反射峰与饱和长度  $\delta$  的关系,  $LP_{01}$  的双折射与饱和长度  $\delta$  的关系

Fig. 6 The cross-coupling reflectivity of  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  vary with saturation length  $\delta$ , and the birefringence of  $LP_{01}$  varies with saturation length  $\delta$

## 4 结论

用试射法数值求解了折射率剖面非均匀的少模光纤 Bragg 光栅,得到  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的自耦合和互耦合反射峰值与折射率变化饱和长度  $\delta$  的关系。 $\delta$  在芯径范围内逐渐增大时,  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  模的自耦合

反射峰值单调增大,互耦合反射峰值先增大,然后逐渐减小至零。表明在用光纤侧面曝光的方法刻制光栅时,通过选择适当的饱和长度  $\delta$ ,模式互耦合峰能得到很好的控制。这对 FM-FBG 在光纤通信系统、传感器方面潜在应用很有利。

## 致谢

感谢加拿大 McMaster 大学 Chang-qing Xu 教授的支持和合作。感谢 NSERC(Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada)、OPC(the Ontario Photonics Consortium)和 CFI(the Canada Foundation for Innovation)的资助。

## 参考文献

- 赵春柳,马宁,董新永,等. 基于光纤光栅的可调谐半导体激光器. 光子学报,2002,31(12): 1514~1517  
Zhao C L, Ma N, Dong X Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002,31(12): 1514~1517
- 董兴法,付圣贵,姜莉,等. 用于结构损伤诊断的实用型光纤光栅传感器研究. 光子学报,2004,33(1):28~30  
Dong X F, Fu S G, Jiang L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(1):28~30
- 刘波,曹晔,罗建花,等. 光纤光栅水听器技术实验研究. 光子学报,2005,34(5): 686~689  
Liu B, Cao Y, Luo J H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005,34(5):686~689
- Ramachandran S, Mikkelsen B, Cowsar L C, et al. All-fiber grating-based higher order mode dispersion compensator for broad-band compensation and 1000 km transmission at 40 Gb/s. *IEEE Photon Technol Lett*, 2001,13(6):632~634
- Xinhuan Feng, Yange Liu, Shenggui Fu, et al. Switchable dual-wavelength ytterbium-doped fiber laser based on a few-mode fiber grating. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004,16(3): 762~764
- Mizunami T, Djambova T V, Niiho T. Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers. *J Lightwave Technol*, 2000,18(2):230~235
- 范万德,项阳,许兆文,等. 利用光敏光纤制作少模光纤布喇格光栅. 光子学报, 2004,33(5): 564~566  
Fan W D, Xiang Y, Xu Z W, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004,33(5): 564~566
- Kokou D, Sophie L, Marie F. Numerical analysis of the contribution of the transverse asymmetry in the photo-induced index change profile to the birefringence of optical fiber. *J Lightwave Technol*, 2002,20(8):1463~1470

## Numerical Simulation on Effect of Saturation Length for Few-Mode Fiber Grating

Yang Chun, Gao Feng

*Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096*

Received date: 2005-07-08

**Abstract** The reflection characteristics of few mode fiber Bragg grating (FM-FBG) with non-uniform profile of index change were numerically studied. The reflection spectrum of FM-FBG was obtained by solving the coupled mode equation using shooting method. Under the condition that the maximum index change at the core-cladding interface and absorption coefficient were constant, the numerical results indicated that the reflectivity of cross-mode coupling peak between  $LP_{01}$  and  $LP_{11}$  modes varies parabolically with the saturation length of index change. When saturation length was small, the reflectivity of cross-mode coupling increased with saturation length and reached a maximum value. With the further increasing saturation length, the reflectivity of cross-mode coupling decreased gradually to zero when saturation length increased to the diameter of fiber core. It was also indicated that the peak reflectivities, which correspond to forward modes coupled to the same order back-ward modes, increased monotonically with saturation length.

**Keywords** Optical fiber communication; Fiber Bragg grating; Coupled mode theory; Shooting method



**Yang Chun** was born in Jiangsu, China, in 1970. He received the B. S. degree in automatic control and Ph. D. in testing technology and instruments, both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1992 and 1999, respectively. From 1999 to 2001, he was a Postdoctoral researcher in the Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, China. Since 2001, He has been an associate professor in Southeast University. He was a visiting professor in the Department of Engineering Physics of McMaster University, Canada, from Jan. 2004 to July 2005. His interests, publications and patents are in the areas of fiber-optics based sensors, local networks, parallel optical interconnection and supporting component technologies.