

文章编号: 0253-2239(2010)04-1153-05

基于闪耀光纤布拉格光栅功率检测折射计的理论分析

陆玉春¹ 黄卫平² 简水生¹

(¹ 北京交通大学光波技术研究所全光网与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044
² Department of Electrical and Computer Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario L8S 4K1, CA)

摘要 利用复模式耦合模理论分析了基于闪耀光纤布拉格(Bragg)光栅功率检测的折射计中不同设计参数对折射计性能的影响。利用完全匹配层(PML)技术简化了辐射模分析模型。分析结果表明,随着光栅倾斜角度的增大,折射计的感应范围向折射率较小的方向移动。随着光栅长度以及折射率调制强度的增大,折射计的灵敏度增大,但折射率感应范围不变。同时这种折射计具有偏振依赖性,随着光栅倾斜角的增大偏振依赖性提高。因此在这种传感系统中需要引入精确且稳定的偏振控制。

关键词 闪耀光栅; 折射计; 耦合模理论; 辐射模式

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103004.1153

Theoretical Investigation of Power-Referenced Refractometer Based on Tilted Fiber Bragg Gratings

Lu Yuchun¹ Huang Weiping² Jian Shuisheng¹

(¹ Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of EMC, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China
² Department of Electrical and Computer Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, L8S4K1, CA)

Abstract The power-referenced refractometer based on tilted fiber Bragg grating is investigated theoretically by complex mode coupled mode theory. The use of perfectly matched layer (PML) technique simplifies the radiation mode model. The numerical results show that with the increase of tilted angle, the sensing range shifts to smaller refractive index region. With the increase of the grating length and the index modulation strength, the sensitivity of the refractometer increases, but sensing range unchanged. This refractometer is polarization dependent, and the polarization dependency raise with the increase of grating tilted angle. Therefore, precise and stable polarization control is essential for such kind of sensing system.

Key words blazed gratings; refractometer; coupled mode theory; radiation mode

1 引言

随着紫外写入技术的成熟,光纤光栅已经被广泛应用到传感系统中^[1~6]。作为光纤光栅的一员,闪耀光纤布拉格光栅(TFBG)的光栅平面与光纤轴成一夹角。与光纤布拉格光栅(FBG)相比,TFBG中芯层模到包层模以及辐射模的耦合更强。由于包

层模与辐射模沿着靠近包层——环境之间的界面区域传播,因此对外界折射率变化非常敏感。利用TFBG将芯层模耦合到包层模及辐射模,通过检测芯层模的透射谱或者透射功率,可以实现高灵敏度的折射计^[7~12]。与基于磨抛光纤或者长周期光纤光栅(LPFG)的折射计相比,这种折射计更加稳定,

收稿日期: 2009-08-15; 收到修改稿日期: 2009-10-16

基金项目: 国家 863 计划(2008AA01Z215)和国家自然科学基金(60837002, 60707007)资助课题。

作者简介: 陆玉春(1983—),男,博士研究生,主要从事新型无源光纤器件、光纤激光器、光波导理论等方面的研究。

Email: 05111028@bjtu.edu.cn

导师简介: 简水生(1929—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事光纤通信、光电子器件、光纤传感、全光网络、空间光通信及电磁兼容等方面的研究。E-mail: ssjian@center.bjtu.edu.cn

对弯曲、温度等环境因素不敏感^[11]。当光栅倾斜角度较小时,利用残留的布拉格反射峰或者基于多模光纤的 TFBG,还可以实现折射率与温度的同时测量^[8,9,11]。

从解调技术上来分,基于 TFBG 折射计主要分为两类,即:基于检测透射谱(方案 A)^[7~10]和基于检测透射功率(方案 B)^[11,12]。方案 A 需要检测 TFBG 的透射谱的变化,因此需要复杂的波长检测单元及解调算法。方案 B 的原理是将由环境折射率引起的 TFBG 透射谱的变化直接转化为透射功率的变化,通过检测该功率变化实现折射率信息的解调。方案 B 中采用 SLED 作为宽带光源并且检测 TFBG 透射的功率,无需波长检测,易于解调,结构简单,成本较低。

虽然基于 TFBG 的折射计已经有了大量的实验研究,以往报道仅仅给出了单一的实验结果。TFBG 结构参数(如光栅长度、调制深度、光栅的倾斜角度)对传感器性能影响的研究目前还鲜有报道。同时以往的研究忽视了 TFBG 的偏振依赖特性。由于 TFBG 中光栅倾斜角的存在打破了整个器件的圆对称性,因此 TFBG 自身是偏振依赖的。这种偏振依赖性尤其对于基于功率检测的折射计的性能会产生严重的影响。本文利用复模式的耦合模理论^[13~15],对基于 TFBG 功率检测的折射计进行了理论分析。揭示了 TFBG 参数如闪耀光栅的长度,折射率调制强度及倾斜角度的影响,同时给出了这种传感系统的偏振依赖特性,为基于 TFBG 折射计的设计、优化与实现提供了依据。

2 分析模型及基本原理

采用了复模式的耦合模理论对 TFBG 进行建模仿真。图 1 给出了基于复数模式的 TFBG 的理论模型以及相应参数的定义。光纤的复数模式由圆对称光波导的改进全矢量有限差分法求得^[13]。在该模型中,整个波导结构被完全匹配层(PML)包

围,最外层是全反射边界(PRB)。PRB 可以看成是一种理想金属层,从数学上讲就是零边界条件。由于 PML 以及 PRB 的使用,连续的辐射模式可以由一些离散类导模的复模式近似,从而极大地简化了辐射模的模型^[14]。利用复模式展开 TFBG 中的场,并且利用耦合模理论公式^[15],便可计算出 TFBG 在不同环境折射率下的透射谱。通过对透射谱的积分即可求出相应的透射功率。为了分析基于 TFBG 功率检测的折射计的偏振依赖特性,TFBG 中的场分别用两组相互正交的偏振态进行展开,即 p 偏振和 s 偏振。其偏振方向同光栅平面以及光纤横截面的相对关系,如图 1 所示,其中 p 偏振方向位于 xz 平面内且与 x 轴平行;s 偏振方向垂直与 xz 平面。p 偏振与 s 偏振的光相互正交,并且在 TFBG 中并不能发生耦合,因此它们可以分别予以考虑。光栅的折射率调制函数可以写成

$$\Delta n(z') = \bar{\sigma}(z') + 2\bar{\chi}(z') \cos[2K_g z' + \bar{\varphi}(z')] \approx \Delta n(z) = \sigma(z) + 2\chi(z) \cos[2K(z + x \tan \theta) + \varphi(z)], \quad (1)$$

其中 $\sigma(z) = \bar{\sigma}(z \cos \theta)$, $\chi(z) = \bar{\chi}(z \cos \theta)$, $\varphi(z) = \bar{\varphi}(z \cos \theta)$, $x = r \cos(z \cos \theta)$ 。在 TFBG 中,对于单个的谐振峰,其相位匹配条件为

$$\beta_{co} + \beta_{cl}^i = 2K = \frac{2\pi}{\Lambda} = \frac{2\pi}{\Lambda_g} \cos \theta, \quad (2)$$

其中 β_{co} 为芯层模的传输常数, β_{cl}^i 为该谐振峰所对应的包层模的传输常数。在 TFBG 中由于具有不同角向阶数的模式也可以产生耦合,因此单一的谐振峰可能对应着很多传输常数非常接近的包层模式。TFBG 透射谱包络的极小值点的位置可以由矢量相位匹配条件导出为

$$\lambda_{\min} = 2n_{\text{eff}} \Lambda \cos^2 \theta = 2n_{\text{eff}} \Lambda_g \cos \theta, \quad (3)$$

其中在弱导光纤中 $n_{\text{eff}} \approx n_{co} \approx n_{cl}$ 。(3) 式给出了光栅周期(Λ 或者 Λ_g)、光栅倾斜角度 θ 和 TFBG 透射谱包络的极小值点的位置 λ_{\min} 之间的关系,因此可以调整光栅周期或者倾斜角度使得 TFBG 的透射

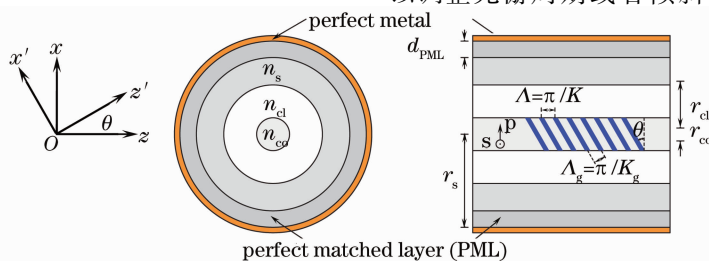


图 1 基于复数模式的闪耀光纤光栅的耦合模理论模型

Fig. 1 Coupled mode model for TFBG based complex mode

谱位于光通信窗口的波长区域。

基于 TFBG 功率检测的折率传感系统,如图 2 所示。该系统由超级发光二极管宽带 SLED 光源 (BBS), 3 dB 耦合器、两个光功率探测器 (PD_M 和 PD_T) 以及 TFBG 组成。3 dB 耦合器的作用是将 BBS 的光进行 1:1 分光, 一路送入 PD_M 获得参考功率, 另一路通过 TFBG 后进入 PD_T 获得 TFBG 的透射功率。当环境折射率较小时, 在 TFBG 透射谱比较短的波长范围内存在离散的谐振峰, 如图 3 所示。这些离散的谐振峰是由于芯层模耦合到包层模中所引起的。由于包层模沿着包层——外界环境之间的界面的区域传播, 因此它们的有效折射率对外界环境的折射率敏感。由于高阶包层模在环境介质中的消逝场的功率所占的比例更大, 因此阶数越高的包层模式对外界环境折射率的变化越敏感。随着环境折射率的增大, 高阶的包层模首先被影响并且逐步地截止后转化为辐射模。它们的谐振峰在波长上会产生红移, 并且逐渐平滑、减弱最后形成连续的宽带损耗谱, 如图 3 所示。随着环境折射率进一步增加, 更多的包层模被影响直到所有的谐振峰消逝。因此, TFBG 的透射谱随着环境折射率的变化而变化。透射谱的变化直接导致了透射功率的变化。透射总功率随着环境折射率的变化存在对应关系, 通过检测透射功率的变化便可以检测环境折射率的改变。为了方便讨论, 假设 PD_M 的接收功率为 P_M , PD_T 的接收功率为 P_T 。文献 [12] 中采用检测接收功率 P_T 的方法。这种方法的缺点是对于宽带光源的功率稳定性要求很高。采用检测归一化的相对功率 P_T/P_M 的方法可以克服这个缺点。另外文献 [11] 采用了检测归一化功率参数 $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 的方法。两种归一化的检测参数具有一一对应的关系, 因此二者是等价的。

$$P_M = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} G(\lambda) d\lambda, \quad P_T = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} T(\lambda) G(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

其中 λ_0 和 λ_1 为宽带光源的波长输出上下限, $T(\lambda)$ 为

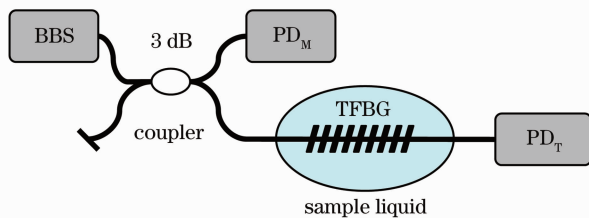


图 2 基于 TFBG 的折射率传感系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of TFBG based refractive index sensing system

TFBG 的透射谱, $G(\lambda)$ 为光源的输出谱。假设光源为平坦宽带光源, 即 $G(\lambda)$ 在 (λ_0, λ_1) 范围内为常数。

3 仿真结果及分析

通过计算归一化功率响应参数 P_T/P_M , $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 在不同 TFBG 参数和输入光偏振条件下随着环境折射率的变化, 从而揭示 TFBG 参数以及输入光的偏振态对传感器性能的影响。TFBG 写在普通单模光纤中, 其中光纤参数为 $n_{co} = 1.4713, n_{cl} = 1.4660, r_{co} = 4.1 \mu\text{m}, r_{cl} = 62.5 \mu\text{m}, r_s = 80 \mu\text{m}$ (参数定义如图 1 所示)。计算网格为 $\Delta r = 0.08 \mu\text{m}$, PML 参数为 $m = 2, d_{\text{PML}} = 10 \mu\text{m}, R = 10^{-12}$ [13, 14]。为了保证程序的收敛, 复矢量模的角向阶数在 $0 \leq \mu \leq 15$ 范围内, 每一个角向阶数选择 10 个模式, 即总共 160 个复矢量模式被用来展开 TFBG 中的场。同时假设 TFBG 为均匀光栅, 折射率调制的直流分量为 $\sigma = 2\chi$, 光栅周期由公式给出, 同时为了保证 TFBG 工作在通信窗口波段 $\lambda_{\min} = 1.545 \mu\text{m}$ 。

图 3 给出了倾斜角为 5° 和 10° 的 TFBG 的透射谱随着外界折射率增加的演化, 其中相邻的透射谱之间存在 20 dB 的偏移量。TFBG 长度为 $L = 8 \text{ mm}$, 调制深度为 $\chi = 5 \times 10^{-4}$ 。图 3 中仅仅给出了 s 偏振输入条件下的透射谱。对于 p 偏振条件下的透射谱, 其形状与 s 偏振条件下的类似, 只是透射谱的幅度稍微降低。由图 3 可见, 随着环境折射率的增加, 位于短波长附近的对应高阶包层模的谐振峰逐渐的平滑消逝并且被宽带的连续的损耗谱所取代。随着环境折射率进一步增加 (即: 环境折射率逐渐接近包层折射率时), 更多的包层模被影响直到所有的谐振峰消逝, 整个 TFBG 的透射谱呈现宽带的

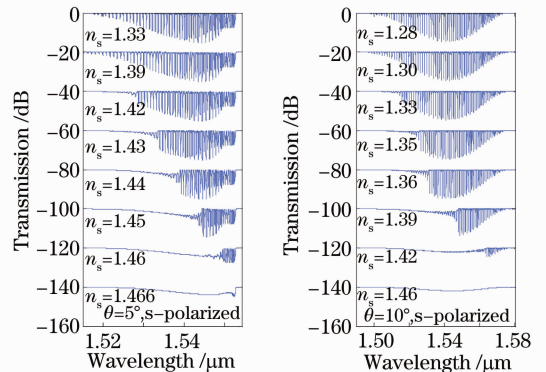


图 3 TFBG 的透射谱随着环境折射率变化的演化

Fig. 3 Evolution of the transmission spectrum of TFBG versus surrounding index n_s

连续的损耗谱。

图 4 给出了倾斜角为 5° ，调制深度为 $\chi = 5 \times 10^{-4}$ 的 TFBG 的归一化功率响应参数 P_T/P_M ， $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 在不同光栅长度条件下，随着环境折射率变化情况。图 3 表明在 1.42 ~ 1.45 折射率范围内归一化的功率参数对环境折射率存在线性响应，即： P_T/P_M 线性减小，且整个曲线随着光栅长度增加向下平移； $\frac{P_M - P_T}{P_M + P_T}$ 线性增加，且整个曲线随着光栅长度增加向上平移。随着光栅长度的增加，传感器的感应范围不变，而敏感度提高（即： P_T/P_M 和 $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 曲线的斜率增大）。

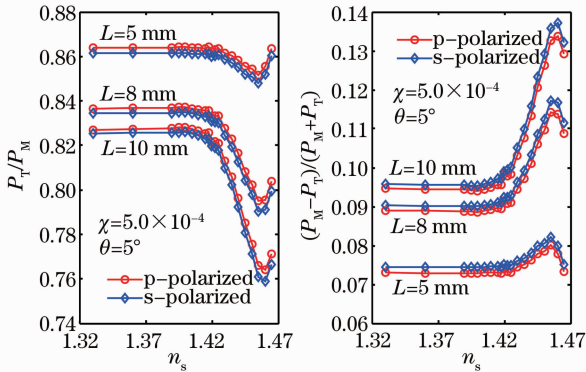


图 4 不同长度的 TFBG 的归一化功率对 n_s 响应

Fig. 4 Normalized power response of TFBG with different length versus n_s .

图 5 给出了倾斜角为 5° ，长度为 8 mm 的 TFBG 的归一化功率响应参数 P_T/P_M ， $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ ，在不同光栅折射率调制深度条件下，随着环境折射率变化情况。图 5 表明折射率调制强度的影响同光栅长度的影响类似。在 1.42 ~ 1.45 折射率范围内归一化的功率参数对环境折射率存在线性响应，即 P_T/P_M 线性减小，且整个曲线随着调制强度的增加向下平移； $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 线性增加，且整个曲线随着调制强度的增加向上平移。随着光栅调制强度的增加，折射计的感应范围不变，而敏感度提高[即 P_T/P_M 和 $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 曲线的斜率增大]。

图 6 给出了光栅倾斜角度为 5° 和 10° 的 TFBG 的归一化功率响应参数 P_T/P_M ， $(P_M - P_T)/(P_M + P_T)$ 随着环境折射率的变化情况。图 6 表明，当光栅倾斜角增大时，传感器的感应范围向折射率较小的范围移动（倾斜角 5° 时为 1.42 ~ 1.45；倾斜角 10° 时为 1.325 ~ 1.425）。在光栅倾斜角大时，p 偏振态和 s 偏振态的感应曲线的差别更大，说明此时传感器

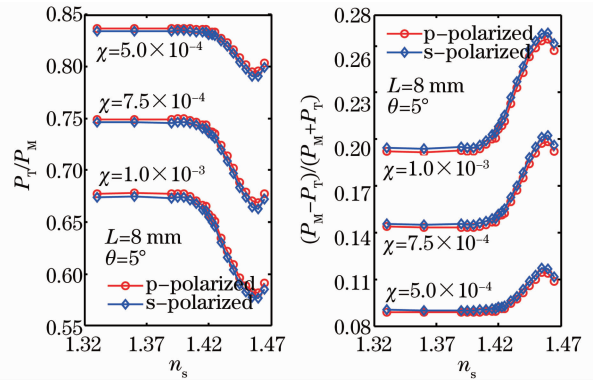


图 5 不同调制深度的 TFBG 的归一化功率对 n_s 响应

Fig. 5 Normalized power response of TFBG with different grating strength versus n_s .

对于输入光的偏振态更加敏感。

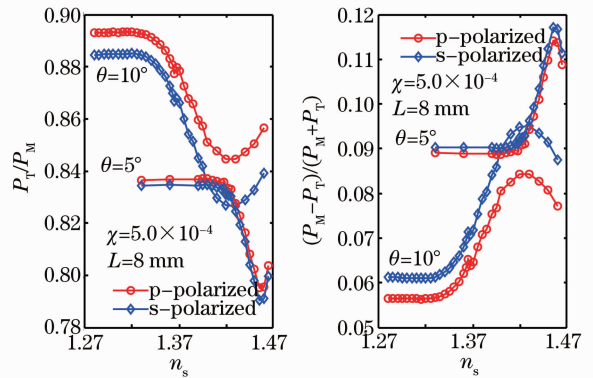


图 6 不同倾斜角度的闪耀光纤 Bragg 光栅的归一化功率对 n_s 响应

Fig. 6 Normalized power response of TFBG with different tilted angle versus n_s .

由图 4 ~ 图 6 可知，对于 p 偏振和 s 偏振的输入光，它们的感应曲线不同，说明这种折射计是偏振依赖的。两种偏振态感应曲线的差异越大偏振依赖性越高，这种偏振依赖性并不因光栅长度及光栅调制强度的变化而变化。同时图 6 表明，虽然通过增加光栅的倾斜角度可以使折射计的感应范围向折射率较小的方向移动，但代价是增加了其对输入光偏振态的敏感程度。对于任意偏振的输入光，其实际的感应曲线位于 p 偏振和 s 偏振输入的感应曲线之间，其与二者的靠近程度与 p 偏振光和 s 偏振光在实际输入光中所占的比例大小有关。当 p 偏振光所占的比例大的时候，它更靠近 p 偏振态的感应曲线；当 s 偏振光所占的比例大的时候，它更靠近 s 偏振态的感应曲线。另外，输入光偏振态的抖动将直接导致实际的感应曲线在 p 偏振和 s 偏振感应曲线之间发生抖动，这将会严重地限制折射计的精度。因此在这类折射计的实现过程中，对输入 TFBG 的光

进行精确而且稳定的偏振控制是必不可少的。

4 结 论

利用复模式耦合模理论对基于 TFBG 功率检测的折射计进行了理论分析。结果表明,随着光栅倾斜角度的增大折射计的感应范围向折射率较小的方向移动。随着光栅长度以及折射率调制强度的增大,折射计的灵敏度增大,但折射率响应范围不变。同时基于闪耀光纤光栅功率检测的折射计具有偏振依赖性,随着光栅倾斜角的增加这种偏振依赖性变大。因此,在这种传感器系统中需要引入精确且稳定的偏振控制。

参 考 文 献

- 1 Li Kuo, Zhou Zhenan. A high sensitive fiber Bragg grating strain sensor with automatic temperature compensation[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(3): 191~193
- 2 Li Kuo, Zhou Zhenan, Liu Aichun *et al.*. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor at high temperature[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 249~251
李 阔,周振安,刘爱春等. 一种高温下高灵敏光纤光栅温度传感器的制作方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 249~251
- 3 Kuo Li, Zhenan Zhou, Aichun Liu. A high sensitive fiber Bragg grating cryogenic temperature sensor [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(2): 121~123
- 4 Yang Jian, Zhao Yong, Ni Xingjie. Development of novel fiber Bragg grating underwater acoustic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1575~1579
杨 剑,赵 勇,倪行洁. 新型光纤光栅水声传感器的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1575~1579
- 5 Xu Junjiao, Li Jie, Rong Huabei *et al.*. Analysis and measurement on refractive index sensing of few mode fiber Bragg gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 565~568
徐俊娇,李 杰,戎华北等. 少模光纤布拉格光栅折射率传感的分析与测量[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 565~568
- 6 Fan Ruoyan, Chen Zhe, Liu Linhe *et al.*. Optical fiber refractive sensor with double reflective wavelengths based on side polished fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1134~1139
范若岩,陈 哲,刘林和等. 基于侧边抛磨光纤光栅双反射峰的折射率传感器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1134~1139
- 7 G. Laffont, P. Ferdinand. Tilted short-period fibre-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 765~770
- 8 C. Caucheteur, P. Megret. Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer[J]. *Photonics Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2703~2705
- 9 C. L. Zhao, X. Yang, M. S. Demokan *et al.*. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber Bragg grating[J]. *J. Lightw. Technol.*, 2006, **24**(2): 879~883
- 10 X. Chen, K. Zhou, L. Zhang *et al.*. Optical chemsensor based on etched tilted Bragg grating structures in multimode fiber[J]. *Photonics Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 864~866
- 11 T. Guo, C. Chen, A. Laronche *et al.*. Power-referenced and temperature-calibrated optical fiber refractometer[J]. *Photonics Technol. Lett.*, 2008, **20**(8): 635~637
- 12 Y. Miao, B. Liu, Q. Zhao. Refractive index sensor based on measuring the transmission power of tilted fiber Bragg grating [J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2009, **15**(3): 233~236
- 13 Y. C. Lu, L. Yang, W. P. Huang *et al.*. Improved full-vector finite-difference complex mode solver for optical waveguides of circular symmetry[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(13): 1868~1876
- 14 Y. C. Lu, L. Yang, W. P. Huang *et al.*. Unified approach for coupling to cladding and radiation modes in fiber Bragg and long-period gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**: 1461~1468
- 15 Y. C. Lu, W. P. Huang, S. S. Jian. Full vector complex coupled mode theory for tilted fiber gratings[J]. *Opt. Exp.*, 2010, **18**(2): 713~726