

文章编号 1004-924X(2012)05-0921-06

基于多模-单模-多模结构和光纤布拉格光栅 同时测量温度和折射率

童峥嵘, 郭 阳*, 杨秀峰, 曹 晔

(天津理工大学 薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384)

摘要:利用单模光纤(SMF)中的包层模与纤芯导模之间的干涉,提出了一种基于多模-单模-多模(MSM)结构与布拉格光栅(FBG)级联可同时测量温度和折射率的传感器。基于 MSM 结构的干涉谱和 FBG 的透射峰对温度和折射率具有不同响应灵敏度的特点,利用敏感矩阵实现了对温度和折射率的同时测量。实验测得 MSM 结构和 FBG 的温度灵敏度分别为 0.055 2 nm/°C 和 0.015 8 nm/°C,MSM 结构的折射率灵敏度为 109.702 nm/RIU,而 FBG 对折射率变化不敏感。温度和折射率的测量精度分别为 ± 0.32 °C 和 ± 0.0023 。实验显示提出的 MSM 结构的温度灵敏度比单模-多模-单模(SMS)结构传感器提高了 5 倍,同时由于 SMF 中的包层模对外界环境的变化较敏感,该 MSM 结构也可应用于其他传感领域。

关键词:光纤传感;同时测量;温度测量;折射率测量;多模-单模-多模(MSM)结构

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122005.0921

Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on MSM structure combined with FBG

TONG Zheng-rong, GUO Yang*, YANG Xiu-feng, CAO Ye

(Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, Tianjin University of Technology,
Tianjin 300384, China)

* Corresponding author, E-mail: guoyang_l@126.com

Abstract: A novel fiber sensor composed of a Multi mode fiber-Single mode fiber-Multi mode fiber (MMF-SMF-MMF, MSM) structure and a Fiber Bragg Grating(FBG) was proposed for simultaneous measurement of temperature and Refractive Index(RI) based on the interference between guided mode and cladding modes of a Single Mode Fiber(SMF). Due to the different responses of the MSM structure and FBG to temperature and RI variations, the proposed fiber sensor was used to measure the temperature and the RI simultaneously by utilizing a well-conditioned sensitivity matrix equation. The experimental measurement shows that the temperature sensitivity coefficients of the MSM structure and FBG are 0.055 2 nm/°C and 0.015 8 nm/°C, respectively. The RI sensitivity coefficient of the MSM structure is 109.702 nm/RIU, whereas the FBG is insensitive to RI change. Furthermore, obtained sensing resolution is ± 0.32 °C for the temperature and ± 0.0023 for the RI. Experiments also

收稿日期:2011-11-02;修订日期:2011-12-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61107052)

indicate that the temperature sensitivity coefficient of the MSM structure is five times over that of the SMS structure. Considering that the cladding mode nature of the SMF is more vulnerable to other parameters of the surrounding medium, the MSM structure can also be applied in other sensing fields.

Key words: fiber optic sensing; simultaneous measurement; temperature measurement; refractive index measurement; Multi mode fiber-Single mode fiber-Multi mode fiber (MMF-SMF-MMF, MSM) structure

1 引言

在生物、化学及医学等领域,常常需要对液体的折射率进行测量,液体的折射率作为反映液体本质的一个重要参数,在工业生产、环境监测、临床检验、食品检测等众多方面均有广泛应用。但折射率的测量不可避免地要受到温度变化的影响,因此实现折射率和温度的同时测量很有必要。光纤光栅由于具有体积小、成本低、熔接损耗低、耐腐蚀、易于埋入材料等优点而广泛应用于测量领域^[1-2]。目前,温度和折射率同时测量的方法很多,例如利用倾斜光栅的纤芯耦合和包层耦合形成的不同透射峰对温度和折射率的不同灵敏度,用敏感矩阵实现同时测量^[3];将 3 个长周期光栅(Long Period Grating, LPG)级联,利用导模与高阶模和低阶模分别耦合的不同透射峰对温度和折射率的不同灵敏度,用敏感矩阵实现同时测量^[4],这些方法操作简单,但灵敏度较低。Agostino 通过部分腐蚀光纤布拉格光栅(FBG)的栅区,使其透射谱分裂成 2 个峰,腐蚀部分的透射峰对温度和折射率的敏感度更高^[5];C. R. Liao 将 Mach-Zehnder 干涉仪(MZI)嵌入 FBG 中,利用 MZI 的干涉峰与 FBG 的透射峰对温度和折射率的不同灵敏度实现了二者的同时测量,并获得了较高的折射率灵敏度^[6],但这些传感器的制作较为复杂,不易操作。

近年来,干涉型光纤传感器因其灵敏度高、动态响应宽、结构灵巧等优点,得到了广泛应用^[7]。常用的是单模-多模-单模(Single-multiple-single, SMS)型光纤传感器,即将一段多模光纤(Multiple-mode Fiber, MMF)熔入两根单模光纤(Single-mode Fiber, SMF)中间,光从 SMF 耦合进 MMF 时会激发一系列的高阶模式,利用 MMF 中高阶模式之间的干涉实现不同物理量的传感,该传感器现已广泛应用于温度、应变、折射率等传感领域^[8-10]。但该结构中的光场能量大多集中在

纤芯,外界环境的变化对纤芯中光场的影响很微弱,传感灵敏度较低。Jung^[11]和李恩邦^[12]等基于空心光纤多模干涉原理提出了一种新型的折射率传感器,由于空心光纤的引入,使得光的能量大多集中在光纤边缘部分,对外界折射率变化较敏感,从而获得了较高的灵敏度。Ding 等使用长周期光栅对(LPG Pair)形成了 MZI 干涉腔,利用 LPG 的纤芯基模和包层模之间的干涉,并通过减小中间 SMF 的直径来获得较高的折射率灵敏度^[13]。本文提出了一种多模-单模-多模(Multiple-single-multiple, MSM)结构的传感器,利用 SMF 中的包层模与纤芯导模之间的干涉,使得外界环境条件能够更加直接地作用于光纤内部的光场,从而获得了较高的灵敏度。由于 FBG 对折射率不敏感,而 MSM 结构和 FBG 对温度有不同的响应灵敏度,故可将两者结合,利用敏感矩阵实现对温度和折射率的同时测量。该实验结构紧凑、灵敏度高、成本低,且实验结果具有良好的线性度。

2 实验装置及原理

传感器的实验装置图如图 1 所示。该结构中,MMF 不仅可以使入射的单模光激发出高阶模式的光,也可以起耦合作用。宽带光源(BBS)发出的光进入入射端的 MMF,在 MMF 内激励起多个高阶模式,众多高阶模耦合进 SMF 的包层,激励起 SMF 的包层模。在 SMF 的各阶包层

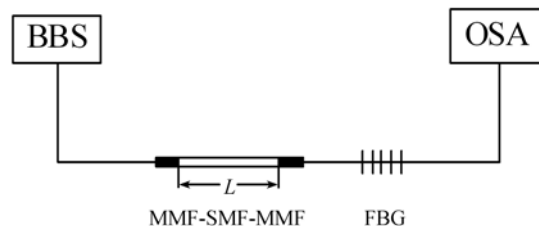


图 1 实验原理图

Fig. 1 Schematic diagram of sensor

模中,总有一个包层模处于主导地位,由于纤芯模和包层模的有效折射率之间的差异,在传输相同的距离之后,两种模式产生了光程差,从而在SMF中发生了干涉,产生能量的重新分布,从SMF中出射的光再次耦合到出射端的MMF中继续传播,经过FBG后,进入光谱仪(OSA)。

在MSM结构中,关键是在入射MMF中激发出高阶模式。实验采用同心耦合法对入射SMF和入射MMF进行熔接,MMF的长度和弯曲都将影响到高阶模式的阶数,在一定范围内,MMF越长,产生的高阶模式越多,阶数也越高,对外界环境变化越灵敏。两段MMF中间的SMF的干涉腔长 L 也会对灵敏度产生影响,在一定范围内, L 越长,光程差越大,干涉峰的灵敏度越高。

令单模光的入射光场为 $E(r,0)$,当光传输到MMF时,由于入射SMF的旋转对称结构,MMF中只有 LP_{0m} 模式被激发,令 $LP_{0m} = F_m(r)$,由MMF模式的表达式 $(\int_0^\infty |E(r,0)|^2 r dr = \int_0^\infty |F_m(r)|^2 r dr, m = 1, 2, \dots, M)$,并忽略MMF的辐射光,可得

$$E(r,0) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r), \quad (1)$$

其中, c_m 为模式的激励系数,可由 $E(r,0)$ 和 $F_m(r)$ 的重叠积分得到

$$c_m = \frac{\int_0^\infty E(r,0) F_m(r) r dr}{\int_0^\infty F_m(r) F_m(r) r dr}. \quad (2)$$

光在MMF中传输时,各阶高阶模发生干涉产生的场分布为

$$E(r,z) = \sum_{m=1}^M c_m F_m(r) \exp(i\beta_m z). \quad (3)$$

其中 β_m 为MMF中各阶模的传输常数, z 是传输距离。

光通过MMF后耦合进SMF中,激励起其包层模。光在SMF中传输时,其包层模和纤芯模的折射率差异引起光程差,从而发生干涉。当发生干涉时,满足:

$$(\beta_{\text{core}} - \beta_{\text{clad}}^m) L = 2\pi N, \quad (4)$$

其中 β_{core} 为纤芯模的传输常数, β_{clad}^m 为处于主导地位的包层模的传输常数。

干涉谱的波长间隔可用下式表示

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\Delta n_{\text{eff}} L}, \quad (5)$$

其中 λ 为工作波长, L 为干涉腔长, $\Delta n_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}^{\text{core}} - n_{\text{eff}}^{\text{clad}}$ 为纤芯模和包层模的有效折射率差。由上式可知, Δn_{eff} 越大, L 越长,波长间隔 $\Delta\lambda$ 越小。

纤芯模和包层模的相对相位 Ψ 可表示为

$$\Psi = 2\pi \Delta n_{\text{eff}} L / \lambda. \quad (6)$$

当温度和折射率发生变化时,引起光纤的长度 L 和有效折射率差 Δn_{eff} 的改变,相对相位的变化为

$$\Delta\Psi = \frac{2\pi [\Delta n_{\text{eff}} \Delta L + L \Delta(\Delta n_{\text{eff}})]}{\lambda}. \quad (7)$$

FBG的中心波长只对温度变化敏感,其波长随温度的变化可表示为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left[\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \Delta T \right]. \quad (8)$$

其中第一项表示热光效应,第二项表示热膨胀效应。

3 实验结果及分析

实验采用长度为40 mm的SMF-28单模光纤,其纤芯和包层直径与入射、出射单模跳线相同。MMF采用长飞公司生产的型号为SI2014-D、芯径为105 μm 的大芯径光纤,其长度为8 mm。将SMF同心熔接于两根MMF中间,由于MMF的数值孔径大于SMF,故当光由SMF向MMF耦合时,损耗可以忽略;当光由MMF向SMF耦合时,插入损耗为4.556 dB。光谱仪MS9710B的分辨率为0.07 nm,MSM结构的干涉谱图如图2所示。

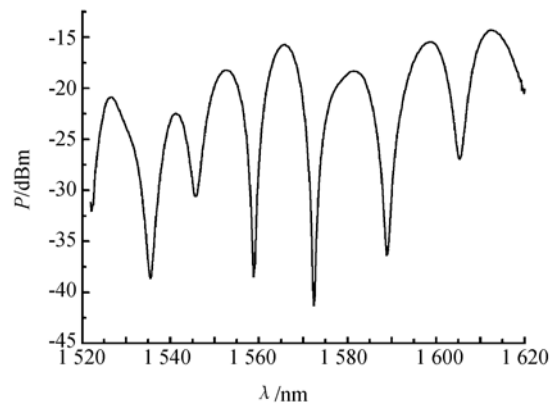


图2 MSM结构的干涉谱图

Fig. 2 Interference spectrum of MSM

实验采用的FBG的中心波长为1556.888

nm,选取干涉谱中波长为 1 568.06 nm 处的干涉极小值进行观察,传感器的透射谱如图 3 所示。

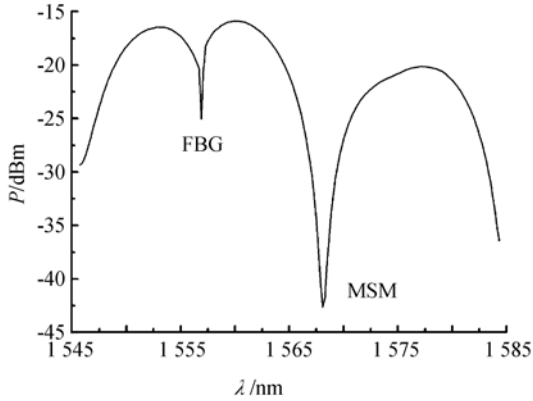


图 3 传感器的透射谱

Fig. 3 Transmission spectrum of sensor

为了防止弯曲等外界因素的影响,将 FBG 和 MSM 结构水平固定,放在型号为 MH-5800 的恒温箱中加热,对温度特性进行测量。从 25 °C 加热至 85 °C,每隔 5 °C 记录一次波长变化,其温度的响应曲线如图 4 所示。从图可见,MSM 结构和 FBG 随温度的升高都发生了红移。FBG 的透射峰从 1 556.888 nm 变化到了 1 557.836 nm,温度灵敏度为 0.015 8 nm/°C;MSM 结构的干涉极小值波长向长波方向漂移了 3.312 nm,温度灵敏度为 0.055 2 nm/°C,是 FBG 的 5 倍,与 SMS 结构相比,灵敏度也提高了近 5 倍,且具有良好的线性度。

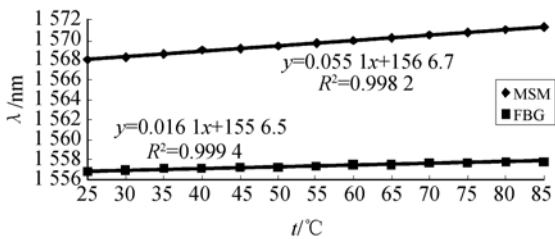


图 4 温度实验曲线

Fig. 4 Experimental curves of temperature

当室温保持恒定时,将 MSM 光纤结构拉直固定,对折射率传感特性进行测量。实验配制了 3%,5%,6%,10%,16%,20%,30% 7 种不同浓度的蔗糖溶液,其浓度 c 与折射率 n 的关系为^[14]

$$n=1.328+0.00184c \quad (9)$$

当液体的折射率由 1.333 5 向 1.383 2 变化

时,MSM 结构的干涉极小值波长从 1 568.56 nm 变化到 1 574.01 nm,向长波方向漂移了 5.45 nm,折射率灵敏度为 109.702 nm/RIU,且具有良好的线性度。而 FBG 对折射率变化不敏感,透射波长保持不变,如图 5 所示。

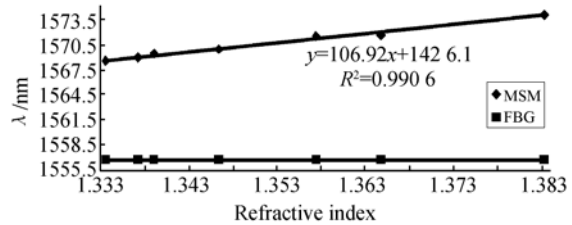


图 5 折射率实验曲线

Fig. 5 Experimental curves of refractive index

当温度和折射率同时变化时,MSM 结构和 FBG 的透射波长漂移按下式变化

$$\Delta\lambda_i = K_{T_i}\Delta t + K_{n_i}\Delta n, i=1,2, \quad (10)$$

其中, Δt 和 Δn 分别为温度和折射率变化, $i=1,2$ 分别对应 MSM 结构和 FBG,由此可得敏感矩阵方程

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{T2} & K_{n2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta n \end{bmatrix}. \quad (11)$$

K_{T1} 和 K_{T2} 分别为 MSM 结构和 FBG 的温度灵敏度系数, K_{n1} 和 K_{n2} 分别为 MSM 结构和 FBG 的折射率灵敏度系数,可由图 4、图 5 中的斜率分别得到。将式(11)转置并代入灵敏度系数,得

$$\begin{bmatrix} \Delta t \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{-1.7333} \begin{bmatrix} 0 & -109.702 \\ -0.0158 & 0.0552 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

从而可由 MSM 结构和 FBG 的波长变化得到温度和折射率的变化,实现对温度和折射率的同时测量。由于 1.3~1.4 的折射率变化在生化传感领域有广泛应用,故该 MSM 结构具有一定的实际应用价值。

温度和折射率同时测量的结果如图 6 所示,分别将温度固定在 25 °C,折射率从 1.333 5 增加至 1.383 2,以及将折射率固定在 1.346 4,温度从 25 °C 增大至 75 °C,得到了同时测量的传感特性。通过观察 MSM 结构和 FBG 的波长漂移,并利用式(12),得到温度和折射率的变化量。由图可知,温度和折射率的测量精度分别为 ± 0.32 °C 和 ± 0.0023 ,其测量精度受到 MMF 长度和 OSA 分辨率等因素的影响。

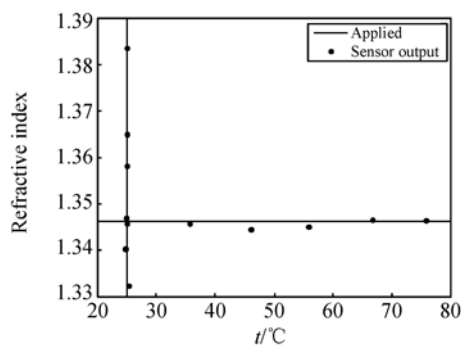


图6 温度和折射率同时测量的结果

Fig. 6 Sensor output obtained by Eq. (12) for applied RI at a fixed temperature of 25 °C and temperature variations under a constant RI of 1.3464, respectively

参考文献:

- [1] 王宏亮,宋娟,冯德全,等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J]. 光学精密工程,2011,19(3):545-551.
WANG H L, SONG J, FENG D Q, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 545-551. (in Chinese)
- [2] 何俊,周智,董惠娟,等. 灵敏度系数可调布拉格光栅应变传感器的设计[J]. 光学精密工程,2011,18(11):2339-2346
HE J, ZHOU ZH, DONG H J, *et al.*. Design of coefficient-adjustable FBG strain sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 18(11): 2339-2346. (in Chinese)
- [3] ZHAO C L, YANG X F, DEMOKAN M S, *et al.*. Simultaneous temperature and refractive index measurements using a 3° slanted multimode fiber Bragg grating[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(2): 879-883.
- [4] ZHANG A P, SHAO L Y, DING J F, *et al.*. Sandwiched long-period gratings for simultaneous measurement of refractive index and temperature [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(11): 2397-2399.
- [5] IADICICCO A, CAMPOPIANO S, CUTOLO A, *et al.*. Nonuniform thinned fiber Bragg gratings for simultaneous refractive index and temperature

4 结论

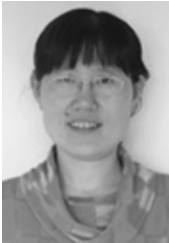
基于 MSM 结构和 FBG 对温度和折射率的不同响应灵敏度,设计了一种同时测量温度和折射率的传感器。实验测得 MSM 结构和 FBG 的温度灵敏度分别为 0.055 2 nm/°C 和 0.015 8 nm/°C, MSM 结构的折射率灵敏度为 109.702 nm/RIU,而 FBG 对折射率变化不敏感。温度和折射率的测量精度分别为 ± 0.32 °C 和 ± 0.0023 。MSM 结构较 FBG 和 SMS 结构相比,其 SMF 的包层模更易受到外界环境的影响,温度灵敏度提高了 5 倍,同时在折射率为 1.3~1.4 时获得了较高的折射率灵敏度,具有一定的实用价值。

measurements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1495-1497.

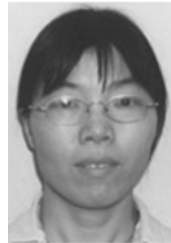
- [6] LIAO C R, WANG Y, WANG D N, *et al.*. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous refractive index and temperature measurement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(22): 1686-1688.
- [2] 范林勇,江微微,赵瑞峰,等. 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性[J]. 光学精密工程,2011,19(1):1-9.
FAN L Y, JIANG W W, ZHAO R F, *et al.*. Temperature characteristic of in-fiber Mach-Zehnder interferometer using twin-core fiber[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(1): 1-9. (in Chinese)
- [8] TRIPATHI S M, KUMAR A, VARSHNEY R K, *et al.*. Strain and temperature sensing characteristics of single-mode-multimode-single-mode structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2348-2356.
- [9] WANG Q, FARRELL G. All-fiber multimode-interference-based refractometer sensor: proposal and design[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(3): 317-319.
- [10] 王凯军,张建中,彭石军,等. 基于大芯径多模光纤模式干涉的光纤折射率测量[J]. 中国激光,2009, 36:125-128.
WANG K J, ZHANG J ZH, PENG SH J, *et al.*. Refractometry based on multimode optic fiber with large core[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36:125-128. (in Chinese)
- [11] JUNG Y, KIM S, LEE D, *et al.*. Compact three

- segmented multimode fibre modal interferometer for high sensitivity refractive-index measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17:1129-1133.
- [12] 李恩邦, 郑丹莹, 张晨亮, 等. 基于空心光纤多模干涉的折射率传感器研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(10):1439-1444.
- LI E B, ZHENG D Y, ZHANG CH L, *et al.*. A refractive index sensor based on the multimode interference in a hollow fiber[J]. *Journal of Opto·electronics Laser*, 2010, 21(10): 1439-1444. (in Chinese)
- [13] DING J F, ZHANG A P, SHAO L Y, *et al.*. Fiber-tapered seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(6): 1247-1249.
- [14] 白泽生, 刘竹琴, 徐红. 几种液体的折射率与其浓度关系的经验公式[J]. *延安大学学报*, 2004, 23(1):33-36.
- BAI Z SH, LIU ZH Q, XU H. An experienced formula about the connection of refraction index and consistence of several liquid[J]. *Journal of Yanan University*, 2004, 23(1): 33-36. (in Chinese)

作者简介:



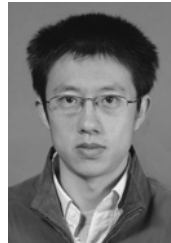
童峥嵘(1971—),女,天津人,博士,教授,硕士生导师,2003年于南开大学获得博士学位,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: zhrtong@sohu.com



杨秀峰(1964—),女,山东淄博人,博士,教授,硕士生导师,1998年于南开大学获得博士学位,主要从事光传感与激光器方面的研究。E-mail: yangxi-
bee@163.com



郭阳(1986—),女,河南安阳人,硕士研究生,主要从事光通信与光传感方面的研究。E-mail: guoyang_1@126.com



曹 晔(1976—),男,山东青岛人,博士,副教授,硕士生导师,2005年于南开大学获得博士学位,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: cynever@163.com