

文章编号: 2095-4980(2018)05-0921-05

机械写制 π 相移弯曲不灵敏光纤长周期光栅滤波器

石胜辉^{a,b}, 罗彬彬^{a,b}, 汤 斌^{a,b}, 陈立功^{a,b}, 赵明富^{*a,b}

(重庆理工大学 a.电气与电子工程学院; b.光纤传感与光电检测重庆市重点实验室, 重庆 400054)

摘 要: 采用 2 个交错放置的具有 π 相移的周期性刻槽板对弯曲不敏感光纤径向施力, 形成了机械写制 π 相移长周期光栅(LPGs)滤波器。实验研究了压力和子光栅个数对 π 相移光纤光栅的光谱影响以及光栅的偏振相关损耗(PDL)。结果表明: 两侧阻带的传输损耗由施加在光纤上面的压力决定, 子光栅的个数决定 π 相移光纤光栅的通带宽度, 但不影响通带中心波长; 对 LP_{13} 耦合模, 当 π 相移个数从 1 增加到 9 时, 滤波器通带带宽由 8.2 nm 增加到 53.8 nm。 LP_{13} 包层模具有最大 PDL, 其值约为 6.86 dB。该方法制作的 π 相移长周期光纤光栅(LPFG)具有可重构性, 结构简单, 易于操作, 在光纤通信和传感领域具有潜在的应用价值。

关键词: 光纤光学; 带通滤波器; π 相移长周期光纤光栅; 周期性压力

中图分类号: TN253

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201805.0921

Optical filters based on π phase-shifted LPG written in a bend-insensitive fiber

SHI Shenghui^{a,b}, LUO Binbin^{a,b}, TANG Bin^{a,b}, CHEN Ligong^{a,b}, ZHAO Mingfu^{*a,b}

(a.School of Electrical and Electronic Engineering; b.Chongqing Key Laboratory of Optical Fiber Sensor and Photodetector, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: The optical filter based on mechanically-induced π -phase-shifted Long-Period Gratings (LPGs) formed by pressing a bend-insensitive fiber from two sides with two identical periodically grooved plates are investigated. The influence of the sub-grating number and pressure on the spectrum characteristics of the π -phase-shifted LPG are investigated experimentally, together with the Polarization Dependent Loss(PDL). The results show that the depth of the two lateral rejection bands varies with the strength of pressure applied to the fiber; the pass-band width of the grating depends strongly on the number of the sub-grating, while the central wavelength of the pass-band is independent of it. For LP_{13} mode coupling, the pass band width varies from 8.2 nm to 53.8 nm when N increases from 2 to 9. A maximum PDL of about 6.86 dB for LP_{13} cladding mode is measured. It is believed that the mechanically-induced π -phase-shifted Long Period Fiber Gratings(LPFGs) with the merits of reconstructable, simple and easy operation have potential applications in fields of fiber-optic communications and fiber-optic sensing.

Keywords: fiber optics; band-pass filter; π -phase-shifted Long Period Fiber Grating; periodical pressure

长周期光纤光栅(LPFG)能够实现纤芯基模和同向传输的不同包层模之间的耦合, 是一种理想的传输型带阻滤波器, 具有附加损耗小、后向反射极低、插入损耗小、抗电磁干扰、与光纤兼容和结构简单等优点, 因此其应用非常广泛^[1-4]。近年来, 人们对 π 相移 LPFG 产生浓厚的研究兴趣。由于 π 相移的引入, 在满足相位匹配波长处的相消模式干涉转换成相长模式干涉, 结果在谐振损耗波长中心处产生一个通带, 故 π 相移 LPFG 的传输谱

收稿日期: 2017-01-16; 修回日期: 2017-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51276209, 61505017); 重庆市科委基础与前沿研究资助项目(cstc2014jcyjA0081); 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目资助项目(KJQN201801121)

*通信作者: 赵明富 email:zmf@cqut.edu.cn

表现出带通滤波特性,在光纤通信和光纤传感领域也得到了应用,例如:用作光分插复用器件^[5]、带通滤波器^[6]和折射率传感器^[7]。

目前, π 相移 LPFG 制作有多种方法,最常采用的是紫外曝光振幅掩膜法^[8],然而由于两侧阻带的传输损耗小于 10 dB,限制了带通滤波器的性能。采用高频 CO₂激光器和电弧放电方法^[9-10],虽然不需要掩膜,但需要用强激光或电弧放电在光纤上一点一点地写入光栅,而且一旦写入光栅,其光谱特性难以改变。相比采用上述写入方法制作 π 相移 LPFG^[8-10],采用机械的方法在光纤里形成 π 相移长周期光栅(LPG)更具有吸引力。这种方法不需要光纤具有光敏性,也不需要光纤进行剥离涂覆层和载氢等处理,因此可以在任何类型的光纤里形成 π 相移光栅;更为重要的是,由于采用周期性施压只是引起光纤暂时的应力分布变化,不会对光纤导光性能进行永久的改变,而且模式耦合强度和谐振波长可以很方便地通过周期性压力进行调谐;此外,该方法也不需要精密的定位设备,具有可重构性、简单廉价、易于操作的优点。因此,研究机械写制 π 相移 LPFG 的光谱特性具有重要的意义。

由于调谐过程中周期性压力引起的过度微弯效应会引起普通单模光纤纤芯基模向辐射模耦合,导致通带损耗变大。为了减小通带损耗,本文在弯曲不敏感光纤里利用周期性压力制作了 π 相移 LPFG,测试了其光谱特性。实验结果表明:弯曲不敏感光纤 π 相移光纤光栅较普通单模光纤 π 相移光纤光栅具有更低的通带损耗值,通带两侧阻带的传输损耗随施加在光纤上的压力增加而增大,通带宽度取决于子光栅的个数,且通带的中心波长不随着子光栅个数发生变化;偏振相关损耗随包层模的阶次增大而增大;使用不同 π 相移个数的 LPG 串联可以增加滤波器阻带带宽。

1 机械写制 π 相移 LPFG 原理与制作

相移 LPFG 是沿均匀 LPFG 轴向长度的某个或某些位置引入相位偏移而形成。图 1 给出了由周期相同的 N 段光栅组成的相移 LPFG 的折射率变化示意图。相邻 2 段光栅通过一段长度为 d 的未受扰动光纤相连,且 d 与相移 Φ 满足关系 $\Phi = (\beta_{co} - \beta_{cl})d$ 。根据相位匹配条件可得 $\Phi = (2\pi/\Lambda)d$,其中 β_{co} 与 β_{cl} 分别是纤芯基模和包层模的传播常数, Λ 为光栅周期,故通过改变 d 的值可以改变引入相移 Φ 的大小。

机械写制 LPFG 由弹光效应引起光纤折射率周期性调制而形成^[11],折射率调制使纤芯导模与同向传输的不同包层模发生耦合。图 2 给出了采用双面周期施力制作单个 π 相移 LPFG 的机械结构示意图。将带有涂覆层的弯曲不敏感光纤(YOFC: G657A)放置于 2 个相同的交替放置的 π 相移周期刻槽板之间。刻槽板的光栅周期 Λ 为 600 μm ,周期数为 200 个,其中槽宽 $a=400 \mu\text{m}$,凸齿的宽度为 $b=200 \mu\text{m}$ 。用重物在刻槽板上垂直施加压力,使光纤发生形变,周期性微弯效应及弹光效应^[12]引起光纤包层和纤芯的折射率周期性调制,在光纤中形成单个 π 相移 LPFG。与单面周期性施力方式相比^[11],这种方法可以用较小的压力使光纤发生较大的弯曲,且带外损耗相对更小。该光栅的周期与刻槽板的周期 Λ 相同,光栅总长度为 L 。如果把刻槽板平均分为 N 段,段与段之间引入 π 相移,这样便可以很方便制作 $(N-1)$ 个 π 相移 LPFG。通过改变刻槽板中相邻段刻槽间的距离 d 便可以引入不同大小的相移,使制作其他大小相移的 LPFG 也非常简单和灵活。

2 实验与结果分析

图 3 给出了机械写制 π 相移 LPFG 光谱的实验装置示意图。弯曲不敏感光纤的输入端连接超连续宽带光源(Koheras: Superk Compact),输出端连接光谱分析仪(Yokogawa: AQ6370B),用来观察 π 相移 LPFG 的传输谱。

为了与机械写制 π 相移 LPFG 比较,图 4 给出了相同参数的无相移机械写制 LPFG 在 4 种压力下的传输谱。对于采用机械方法写入的无相移 LPFG 而言,由于周期性压力通过弹光效应对光纤产生的微小形变关于光纤轴线

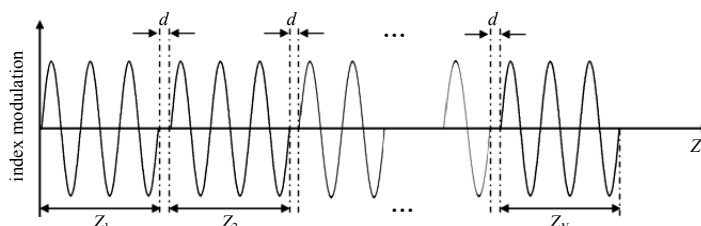


Fig.1 Schematic diagram of LPFG with multiple phase shifts
图 1 多个相移的 LPFG 原理图

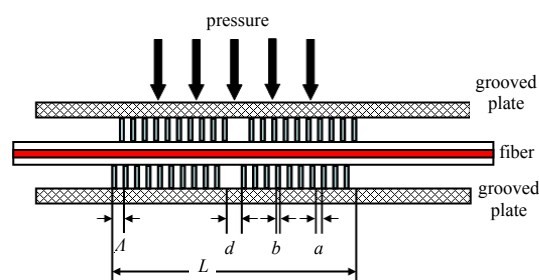


Fig.2 Experimental setup for mechanically-induced PS-LPFGs
图 2 机械写制单个 π 相移 LPFG 的制作示意图

是非对称性的,因此,纤芯基模 LP_{01} 和非轴对称包层模 LP_{1m} 在谐振波长处发生耦合^[13]。在所观察波长范围(1 450~1 700 nm)内纤芯基模与 3 个包层模发生耦合,从左至右分别为 LP_{11} 、 LP_{12} 和 LP_{13} 包层模。随着压力从 P_1 增大到 P_4 ,折射率调制增强,传输谱阻带深度不断增加,表明模式间的耦合不断增强。在欠耦合状态下^[11-12] ($\kappa L < \pi/2$, κ 为模式间的耦合系数, L 为光栅的长度),传输谱阻带的深度反映了纤芯基模与包层模之间的耦合强弱,所以,在相同光栅长度和压力的条件下,有 $\kappa_{12} > \kappa_{11} > \kappa_{13}$ 。图中还发现带外损耗也随着压力增加而不断增大。这是因为压力越大,光纤弯曲的程度越严重,将导致更多的纤芯基模能量被涂覆层吸收掉。值得注意的是,在欠耦合状态下所有模式的谐振波长并没有随着压力的增大而发生变化。

图 5 给出了 $N=10$ 个子光栅的机械写制 π 相移 LPFG 在不同压力下的传输谱。由图可知,无相移 LPFG 的阻带在引入 π 相移后变成了 π 相移光栅的通带,通带中心位于谐振波长处,且阻带由 1 个分裂为 2 个,对称地分布在谐振波长的两侧,这与理论计算的结果一致^[14]。两侧阻带的传输损耗与通带处的损耗均随着施加压力的增大而增大,这是因为在欠耦合的状态下,耦合强度随着压力的增加而增大。压力为 P_4 时, LP_{11} 、 LP_{12} 和 LP_{13} 包层模的消光比分别为 12.84 dB、14.78 dB 和 16.85 dB,最大通带损耗分别为 1.26 dB、1.62 dB 和 1.38 dB。与采用紫外光写入的 LPFG 传输谱中会出现一些旁瓣不同,采用该方法制作的无论是 π 相移还是无相移弯曲不敏感光纤 LPFG 的传输谱中都没有出现旁瓣(见图 4 和图 5),这是因为机械写制的光纤光栅折射率调制存在自切趾效应。此外,机械写制 π 相移 LPFG 的传输谱中阻带深度可以通过施加的压力进行调整,这对调整滤波器的性能非常方便。

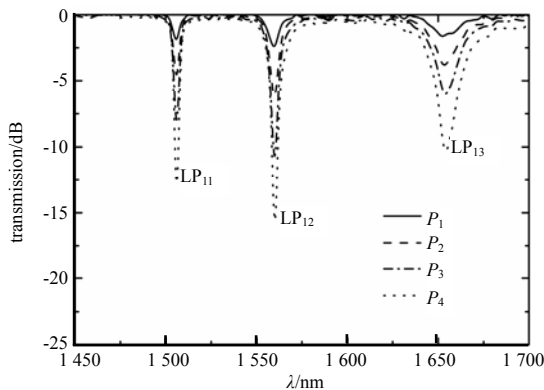


Fig.4 Transmission of the MI-LPFG with period of 600 μm
图 4 周期 600 μm 的机械 LPFG 的传输谱

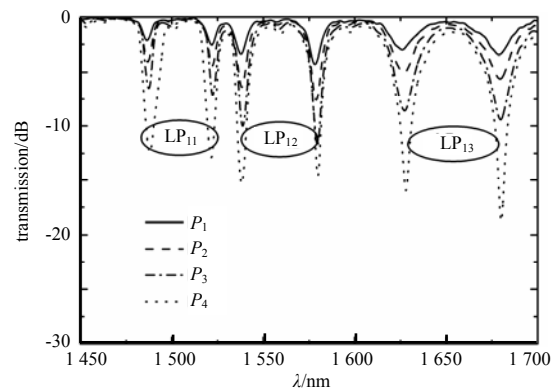


Fig.5 Transmission spectra of the π -shifted MI-LPFG for $N=10$
图 5 $N=10$ 时 π 相移 LPFG 的传输谱

为了研究子光栅的个数 N 对机械写制 π 相移 LPFG 光谱的影响,制作了 5 组光栅。图 6 给出了 π 相移 LPFG 通带带宽 $\Delta\lambda$ 与子光栅个数 N 的关系。由图 6 可知,纤芯基模与 3 个包层模耦合的通带宽度均随子光栅个数的增大而线性增加,这和理论计算结果吻合^[15],且包层模阶次越高,通带带宽越大。当 N 从 2 增加到 10 时, LP_{12} 和 LP_{13} 包层模的通带带宽分别从 6.5 nm 和 8.5 nm 增至 41.4 nm 和 53.0 nm。图 7 为通带中心波长 λ_c 随子光栅个数的变化关系图。由图 7 可知,通带中心波长并没有随着子光栅个数发生变化。

图 8 给出了压力为 P_4 时机械写制 π 相移 LPFG ($N=10$) 在不同偏振光入射时的传输谱和相应的偏振相关损耗 (Polarization Dependent Loss, PDL) 谱。该光纤光栅 LP_{13} 包层模具有最大偏振相关损耗,其值约为 6.86 dB。偏振相关损耗值随着包层模的阶次增加而增大。由此可知,采用机械方法制作的 π 相移 LPFG 是偏振相关的,对某些应用来说,这种偏振相关性是有益的,比如在偏振波分复用通信系统中制作偏振光纤激光器。然而,在其他偏振无关的应用中,应当使这种偏振相关性尽量地减小,例如可以通过采用双折射补偿的方法^[16]。

图 9 给出了通过刻槽板分别引入 6 个 π 相移和 9 个 π 相移制作的 LPFG 串联时 LP_{11} 包层模的传输谱,光栅总长分别为 127.8 mm 和 122.7 mm。由图可知,由于传输特性的叠加,经过串联后的 π 光纤光栅滤波器的阻带宽度明显增加。通过改变施加在光纤上的周期性压力,使滤波器通带两侧阻带的损耗强度也可以得到调节。因此,利用不同 π 相移个数的 LPFG 串联可以增加阻带宽度。

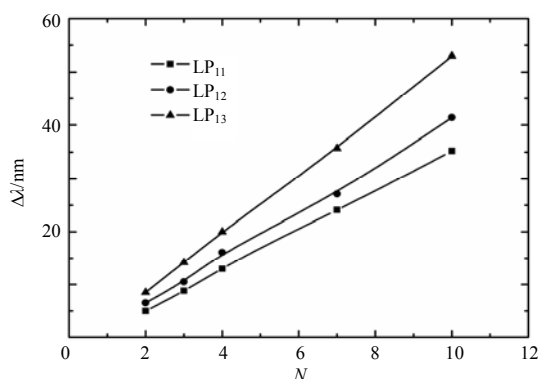


Fig.6 Relation between the pass-band width $\Delta\lambda$ and the sub-grating number N

图 6 通带带宽 $\Delta\lambda$ 与子光栅个数 N 的关系

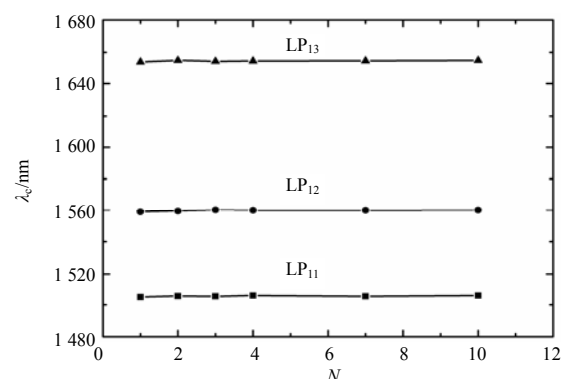


Fig.7 Relation between the central wavelength λ_c and the sub-grating number N

图 7 中心波长 λ_c 随子光栅个数 N 的变化规律

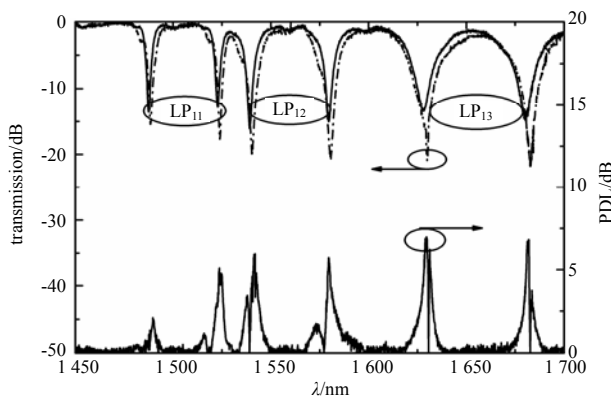


Fig.8 Transmission spectra and PDL of π -phase-shifted grating under pressure P_4 for $N=10$

图 8 压力为 P_4 时 $N=10$ 的 π 相移光栅的传输谱和 PDL

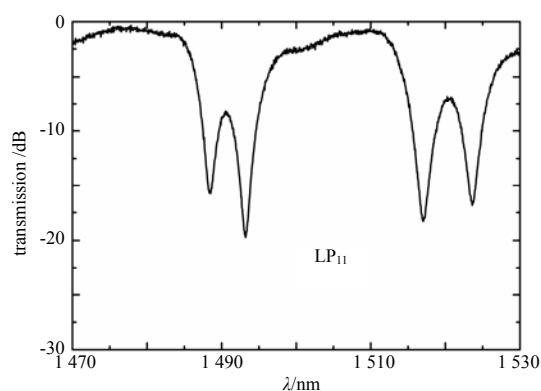


Fig. 9 Transmission spectra of two series of LPGs with six and nine π -phase-shifts, respectively

图 9 6 个和 9 个 π 相移 LPFG 串联时的传输谱

3 结论

对放置于 2 个相同的具有 π 相移的周期性刻槽板之间的弯曲不敏感光纤施力, 形成了机械写制 π 相移 LPG 滤波器。实验研究了压力和子光栅个数对 π 相移光纤光栅的光谱影响以及此光栅的偏振相关损耗。结果表明, 滤波器阻带的传输损耗受施加在光纤上面的周期性压力影响, 通带带宽随子光栅的个数增加而近似线性增加, 且中心波长不随子光栅的个数发生变化; 偏振相关损耗随包层模的阶次增大而增大。此外, 不同个数 π 相移的 LPFG 的串联使用, 使滤波器的通带两侧阻带带宽增加。这种机械写制的 π 相移 LPFG 在光纤通信和光纤传感领域具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] SAKATA H, NISHIO K, ICHIKAWA M. Tunable bandpass filter based on force-induced Long-Period Fiber Grating in a double cladding fiber[J]. Optics Letters, 2010, 35(7):1061–1063.
- [2] PETTERKA P, MARIA J, DUSSARDIER B, et al. Long Period Fiber Grating as wavelength selective element in double-clad Yb-doped fiber-ring lasers[J]. Laser Physics Letters, 2010, 6(10):732–736.
- [3] 顾铮先, 张江涛. 基于双峰谐振效应的镀金属长周期光纤光栅液体浓度传感器[J]. 光学学报, 2011, 31(3):21–27. (GU Zhengxian, ZHANG Jiangtao. Metal-coated Long Period Fiber Grating liquid sensor based on dual-peak resonance[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3):21–27.)
- [4] SMITANA M, BOCK W J, MIKULIC P, et al. Detection of bacteria using bacteriophages as recognition elements immobilized on Long Period Fiber Gratings[J]. Optical Express, 2011, 35(22):7971–7978.
- [5] 何谨琳, 孙小茜, 张明德, 等. 相移长周期光纤的光谱特性及其在光分插复用器中的应用[J]. 光学学报, 2000, 20(8):1106–1111. (HE Jinlin, SUN Xiaohan, ZHANG Mingde, et al. The transmission spectra of phase-shifted LPG and its application in OADM[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(8):1106–1111.)

- [6] DEPARIS O, KIYAN R, POTTIEZ O, et al. Bandpass filters based on π -shifted Long Period Fiber Gratings for actively mode-locked erbium fiber lasers[J]. Optics Letters, 2002, 26(16):1239–1241.
- [7] FALATE R, FRAZAO O, REGO G, et al. Refractometric sensor based on a phase-shifted Long Period Fiber Grating[J]. Applied Optics, 2006, 45(21):5066–5072.
- [8] BAKHTI F, SANSONETTI P. Realization of low back-reflection, wideband fiber bandpass filters using phase-shifted Long Period Gratings[C]// IEEE Conference on Optical Fiber Communication. Dallas, TX, USA: IEEE, 1997:349–350.
- [9] GU Y, CHIANG K S, RAO Y J. Writing of apodized phase-shifted Long Period Fiber Gratings with a computer-controlled CO₂ laser[J]. IEEE Photo. Technol. Lett., 2009, 21(10):657–659.
- [10] HUMBERT G, MALKI A. High performance bandpass filters based on electric arc-induced π -shifted Long Period Fiber Gratings[J]. Electron. Lett., 2003, 39(21):1506–1507.
- [11] 姜明顺, 冯德军, 隋青美. 高精度机械感生长周期光纤光栅横向压力传感系统[J]. 光学学报, 2010, 30(10):2855–2858. (JIANG Mingshun, FENG Dejun, SUI Qingmei. High-precision transverse-pressure sensing system utilizing mechanically-induced Long Period Fiber Grating[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10):2855–2858.)
- [12] 陈成金, 周晓军, 兰岚, 等. 基于微弯效应的长周期光纤光栅的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(7):1955–1959. (CHEN Chengjin, ZHOU Xiaojun, LAN Lan, et al. Study of Long Period Fiber Grating based on micro-bend effect[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(7):1955–1959.)
- [13] IVANOV O V. Wavelength shift and split of cladding mode resonances in micro-bend Long Period Fiber Gratings under torsion[J]. Optics Communications, 2004, 232(1):159–166.
- [14] ZHU Y, LACQUET B M, SWART P L, et al. Device for concatenation of phase-shifted Long Period Fiber Gratings and its application as gain-flattening fiber filter[J]. Optical Engineering, 2003, 42(5):1445–1450.
- [15] KE H, CHIANG K S, PENG J H. Analysis of phase-shifted Long Period Fiber Gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998, 10(11):1596–1598.
- [16] CHO J Y, LEE K S. A birefringence compensation method for mechanically induced Long Period Fiber Gratings[J]. Optics Communications, 2002, 213(4):281–284.

作者简介:



石胜辉(1980–), 男, 重庆市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为光纤光栅传感技术. email: shshill@cqut.edu.cn.

罗彬彬(1981–), 男, 广西壮族自治区柳州市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤传感技术、光信号处理.

汤 斌(1985–), 男, 重庆市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为环境光谱学.

陈立功(1981–), 男, 河南省信阳市人, 博士, 讲师, 主要研究方向为全光信号处理.

赵明富(1964–), 男, 重庆市人, 博士, 教授, 主要研究方向为光纤生物化学传感技术、信息获取技术与处理.