

新型长周期光纤光栅的设计与研制进展

张伟刚 张严昕 耿鹏程 王标 李晓兰 王松 严铁毅

Recent progress in design and fabrication of novel long-period fiber grating

Zhang Wei-Gang Zhang Yan-Xin Geng Peng-Cheng Wang Biao Li Xiao-Lan Wang Song Yan Tie-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 070704 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.070704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.070704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于不同液晶填充光子晶体光纤传输特性的研究

Transmission characteristics of photonic crystal fibers based on filling different kinds of liquid crystals

物理学报.2015, 64(12): 120702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120702>

分布式本征型法布里-珀罗传感器的研究

Research on distributed intrinsic Fabry-Perot sensors

物理学报.2015, 64(5): 050704 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050704>

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber

物理学报.2014, 63(11): 110706 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.110706>

镀膜长周期光纤光栅的单峰宽带滤波特性

Broadband single-peak filtering characteristics of coated long-period fiber gratings

物理学报.2012, 61(20): 200702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.200702>

飞秒激光刻蚀非平行壁光纤微腔 Mach-Zehnder 干涉仪特性及其流体传感研究

Study on characteristics and fluid sensing of unparallel wall fiber micro-cavity Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining

物理学报.2012, 61(17): 170701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.170701>

专题: 光纤传感

## 新型长周期光纤光栅的设计与研制进展\*

张伟刚<sup>1)†</sup> 张严昕<sup>2)</sup> 耿鹏程<sup>3)</sup> 王标<sup>3)</sup> 李晓兰<sup>4)</sup> 王松<sup>1)</sup> 严铁毅<sup>1)</sup>

1)(南开大学现代光学研究所, 光学信息技术教育部重点实验室, 天津 300350)

2)(天津理工大学材料科学与工程学院, 天津 300384)

3)(中国电子科技集团公司第四十六研究所, 天津 300220)

4)(天津理工大学理学院, 天津 300384)

(2016年10月8日收到; 2016年12月8日收到修改稿)

长周期光纤光栅(long-period fiber grating, LPFG)是一种宽带的透射型无源光子器件,在光纤通信和光纤传感领域应用广泛.本文从折射率空间调制的角度,根据栅格周期长短、折射率调制深度和栅面法线取向三个特征参数,对LPFG进行了分类并分析了其不足,定义了新型长周期光纤光栅(novel long-period fiber grating, NLPFG)概念并指出了其研究意义;阐述了典型的LPFG写制新技术,建立了NLPFG模型和设计理论;提出了NLPFG正、反向设计流程,阐述了NLPFG典型设计方法;综述了近年来NLPFG的研制及典型应用,展望了NLPFG研究的发展趋势.

关键词: 光纤光栅, 长周期光纤光栅, 光栅设计, 光栅研制

PACS: 07.60.Vg, 07.60.Ly, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.66.070704

## 1 引言

## 1.1 光纤光栅

光纤光栅(fiber grating, FG)是以光导纤维为基质的光栅. FG是利用材料特性(如光纤光敏性等)以及加工技术(如激光刻制、化学腐蚀、机械压制、特殊加工等)建立在光纤上的一种空间结构类似衍射光栅的无源光子器件,其特征为在光纤上形成折射率空间周期性调制分布,其作用在于改变或控制光波在该区域的传输行为和方式<sup>[1]</sup>.对FG的深入研究及其广泛应用,深刻地影响着光纤器件的设计及研制,并极大地提升了光纤通信、光纤传感等系统的功能,使得长距离低损耗传输、多参量分布式传感以及网络实时动态调控成为可能,有效地拓宽了光纤技术的应用范围.

## 1.2 长周期光纤光栅

## 1.2.1 基本概念

长周期光纤光栅(long-period fiber grating, LPFG)是FG家族中的一个重要成员,其栅格周期一般为几十到几百微米,是一种透射型FG. LPFG并非将某个波长的光波进行反射,而是耦合到包层加以损耗,具有插入损耗低、带宽较宽、易制作、可集成等特点,是一种优异的波长选择器和损耗器件,可用于光纤放大器(fiber amplifier, FA)增益平坦和光纤系统的传感测量等<sup>[2,3]</sup>.

## 1.2.2 特征参数

栅格周期的长短、折射率调制深度和栅面法线取向是影响LPFG光学性质的三个重要特征参数.根据这三个特征参数的不同变化,LPFG可分为均匀型LPFG(uniform long-period fiber

\* 国家自然科学基金(批准号: 11274181, 10974100, 61405179)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120031110033)、天津市自然科学基金重点基金(批准号: 15JCZDJC39800)和校企产学研横向项目(批准号: C201605013)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn

grating, U-LPFG) 和非均匀型 LPFG (nonuniform long-period fiber grating, NU-LPFG) [4]. U-LPFG 是指栅格周期沿光纤轴向均匀、折射率调制深度为常数且栅面法线取向不变(三者无一发生改变)的一类 LPFG, 如常规 LPFG (general long-period fiber grating, GLPFG)、倾斜 LPFG (titled long-period fiber grating, TLPFG) 以及栅格周期达毫米级的超长 LPFG (ultra long-period fiber grating, ULPFG) [5,6]; 而 NU-LPFG 则是指上述三个特征参数至少有一发生改变的一类 LPFG, 如啁啾 LPFG (chirp long-period fiber grating, CLPFG)、螺旋 LPFG (helix long-period fiber grating, HLPFG)、相移 LPFG (phase-shifted long-period fiber grating, PS-LPFG)、扇形 LPFG (sector-shaped long-period fiber grating, SLPFG) [7-10] 等.

### 1.2.3 成就与不足

自从 1995 年 Vengsarkar 等 [11] 利用紫外曝光法成功写出 LPFG 以来, 科研工作者们在 LPFG 的模型构建、理论分析、结构设计、技术实现、应用探索等方面, 已经取得了诸多令人赞叹的成就 [12-16]. 其中, 具有代表性的工作包括 1998 年 Davis 等的 CO<sub>2</sub> 激光逐点写制技术 [17]、2001 年 Lin 等的周期性机械压制技术 [18]、2006 年 Miao 等声致成栅技术 [19]、2007 年 Bock 等的电弧放电技术 [20]、2013 年 Cui 等的非对称成栅技术 [21] 以及 2015 年 Zhou 的扇形光栅写制技术 [22] 等.

相对而言, U-LPFG 的发展较为成熟, 应用也较为广泛(如 GLPFG, TLPFG, ULPFG 等). 然而, LPFG 亦存在一些固有缺陷(如尺寸较大、无反射峰、带宽较宽、单面曝光偏振相关损耗较高等), 使得这类光栅的潜力尚未充分发挥, 其工程应用亦受到限制.

## 1.3 新型长周期光纤光栅

### 1.3.1 NLPGF 的定义

近些年来, 随着光纤控制技术的成熟和激光微加工技术的快速发展, 以 GLPFG 为基础, 在结构设计及性能探索方面不断创新, 许多具有新颖结构和优异性能的 LPFG 不断出现, 极大地丰富了 FG 的研究范畴, 进一步拓展了其应用领域 [23]. LPFG 属于可变参量较多的带阻型光纤滤波器, 并因其易受外界影响而具有多参数传感的价值. 对此, 需根

据 LPFG 的结构和光谱特性扬长避短, 探索新方法并开发新技术, 研制能够满足工程应用需求的新型 LPFG (novel long-period fiber grating, NLPFG).

目前, 有关 NLPFG 尚无明确定义. 我们根据 LPFG 研究现状, 按照“结构决定性质、性质决定应用”的科研思路, 将 NLPFG 定义为: 在 GLPFG 的基础上, 从成栅机理、栅格结构、制作材料、加工技术、应用性能等方面, 通过注入新的因素而实现的具有新结构和新特性的 LPFG [24].

### 1.3.2 NLPFG 研究的意义

研究 NLPFG 的意义在于: 克服上述 LPFG 在结构、性能及应用方面的不足, 改善并挖掘其真正可用之特性并实用化. 研究方法是通过栅格周期长短、折射率调制深度和栅面法线取向三个特征参量的合理设计和调配, 研制出结构新颖、性能优异并可工程化应用的 NLPFG 器件 [25]. 同时, NLPFG 的折射率调制不局限于单一维度, 传输损耗亦有所降低, 其丰富的空间结构和灵巧的实现方式, 为调控光波传输、耦合、变换及应用于光纤通信和光纤传感系统提供了广阔的创新空间和功能的实现可能 [26].

## 2 长周期光纤光栅写制新技术

目前, LPFG 写制技术可分为三类, 即全息相干技术 (holographic coherent technology, HCT)、掩模写制技术 (mask writing technology, MWT) 和逐点写制技术 (per point writing technology, PPWT) [27]. 其中, HCT 只适用于在光敏光纤上成栅, MWT 因每块掩模板的周期固定而缺乏灵活性. 与前二者相比, PPWT 则因无需掩模板和光纤增敏而具有较强的适应性, 特别是其应用的飞秒激光、二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 激光技术近年来不断进步和成熟, 使其广受欢迎.

探索并开发 LPFG 写制新技术, 目的在于制作结构丰富、类型多样、性能优异、应用所需的 NLPFG. 为此, 可将现有的成栅技术进行组合并改进, 通过衍生、交叉、组合而加以实现. 同时, 光源性质、写制装置以及光纤材料等因素, 也会对 NLPFG 写制产生重要影响. 以下是经我们归纳、提炼且具有鲜明特色的 LPFG 写制新技术.

### 2.1 多次曝光技术

多次曝光技术是指对光纤写制区域进行多次曝光, 以实现特殊需求的光栅制作技术. 该技术一般以二次曝光为主, 适用于制作均匀及非均匀的NLPG. 图1为多次曝光技术原理图. 其中, 图1(a)为掩模板二次扫描装置[28], 可调控扫描速度并实现均匀与非均匀曝光, 并对LPFG透射光谱整形; 图1(b)为采用 $\pm 180^\circ$ 双面曝光[29]以及互为 $120^\circ$ 三面激光曝光成栅的示意图[30,31], 这种技术有效地降低了偏振相关损耗, 可适应对偏振敏感的光纤通信和传感系统应用要求.

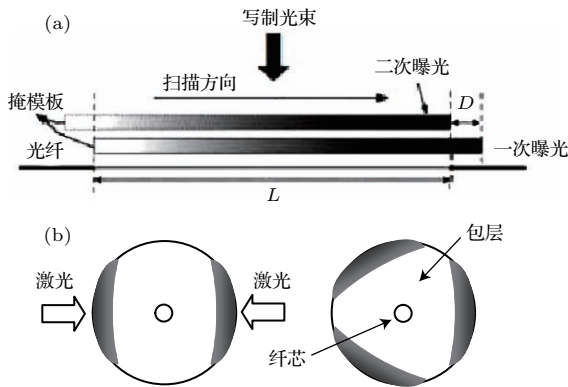


图1 多次曝光技术原理图 (a) 掩模板二次扫描装置; (b) 双面及三面激光曝光  
Fig. 1. Principle of multi-exposure technique: (a) Mask twice scanning device; (b) double and triple surface laser exposure.

### 2.2 变迹曝光技术

变迹曝光技术是指通过控制激光的输出功率以及曝光区域(纤芯或包层)的扫描方式, 实现对写制区域折射率分布的包络改变技术. 该技术适用于制作非均匀的NLPG, 但曝光光束的输出功率及扫描速率需精确调控. 图2为变迹曝光技术原理图, 其中, 图2(a)为相位掩模直线变迹曝光装置[32], 采用控制激光输出功率、相位模板变速扫描、点-点扫描等方法, 可以实现LPFG纤芯或包层折射率分布的调控; 图2(b)为CO<sub>2</sub>激光非对称双侧变迹曝光示意图[33], 采用这种技术可以对光栅的光谱进行调整与控制, 从而获得具有特殊通信或传感性能的NLPG.

### 2.3 外场作用技术

外场作用技术是指在光纤曝光的同时对其施加外场作用(如应力致拉伸或压缩、压力致形变或弯曲、力矩致扭曲或缠绕、温度致膨胀或收缩等),

实现对纤芯或包层折射率分布的周期性调控技术. 该技术适用于各种类型的光纤(如单模光纤、多模

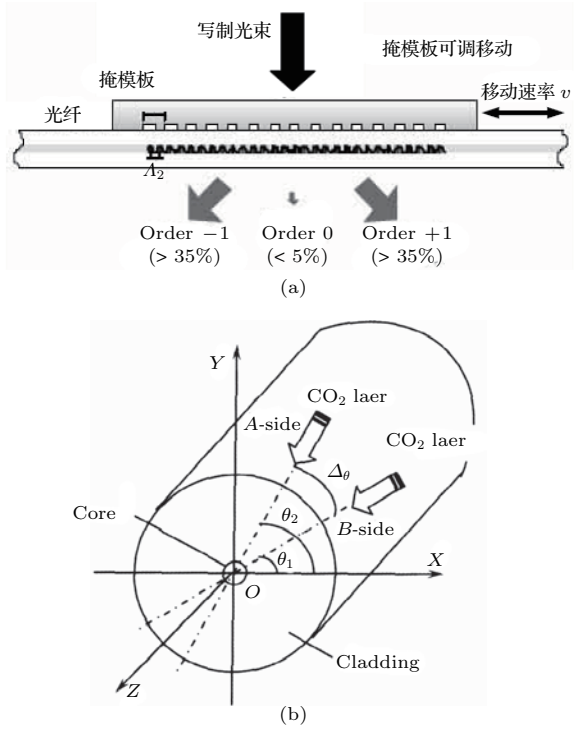
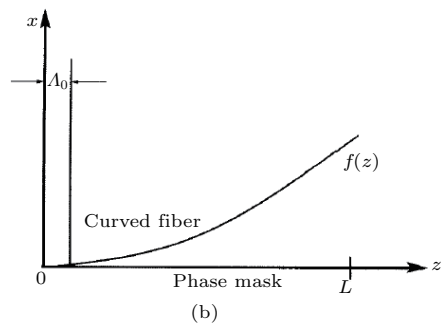
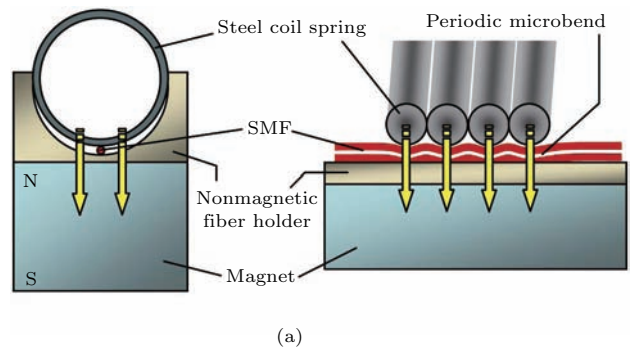


图2 变迹曝光技术原理图 (a) 相位掩模直线变迹曝光装置; (b) 非对称双侧变迹曝光  
Fig. 2. Principle of apodized exposure technique: (a) Phase mask linear apodized exposure device; (b) asymmetrical bilateral apodized exposure.



(a) 磁场作用形成光纤微弯; (b) 弯曲光纤与相位掩模板几何关系  
Fig. 3. Principle of outfield action technique: (a) Magnetic field action leads to fiber micro bending; (b) geometrical relationship between curved fiber and phase mask.



光纤、锥形光纤、微结构光纤等), 可用于写制双波长、多波长均匀光纤光栅以及啁啾型、螺旋型等非均匀光纤光栅, 但外场的施加方式与强弱分布需精确调控. 图 3 为外场作用技术原理图, 其中, 图 3(a) 为 Sakata 等 [34] 利用磁铁对光纤周期性微弯形成 LPFG; 图 3(b) 为弯曲光纤与相位掩模板的几何关系 [35]. 通过弯曲或扭转光纤产生轴向或扭转应变, 利用掩模板或者高频脉冲激光逐点扫描光纤, 可实现具有特殊性能的 NLPFG 写制 [36].

### 2.4 涂覆填充技术

涂覆填充技术是指采用金属或者特殊介质对光纤的表面或内部进行周期性的涂覆或者填充处理, 对纤芯或包层折射率分布进行灵活控制而形成光栅的技术. 对于涂覆材料以及填充介质的选择, 则需根据 FG 的结构和性质来决定. 图 4 为涂敷填充技术原理图, 其中, 图 4(a) 为 Luís 等 [37] 制作的表面金属镀膜 LPFG, 它可以有效调控光栅的谐振波长及耦合特性; 图 4(b) 为 Lee 等 [38] 在空芯光纤填充单体聚合物 NOA65, 通过高压泵将紫外敏感材料注入空芯光纤, 再利用掩模板对其紫进行外曝光形成的 LPFG.

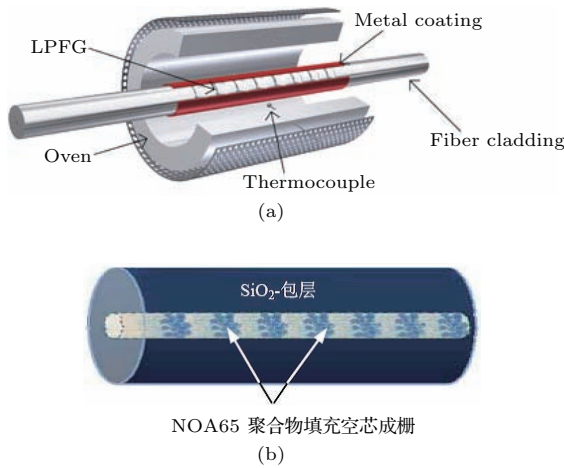


图 4 涂敷填充技术原理图 (a) LPFG 表面金属镀膜; (b) 空芯光纤填充介质曝光成栅

Fig. 4. Principle of coating and filling technique: (a) Metal coating of LPFG surface; (b) exposure in medium filled hollow core fiber to form LPFG.

### 2.5 腐蚀拉伸技术

腐蚀拉伸技术是指采用化学腐蚀的方法对光纤进行处理, 使其产生具有周期性的凹陷或形变, 从而改变光纤的折射率分布并在应力作用下形成

光栅的技术. 通过控制光纤腐蚀时间和区域, 以及对光纤轴向施加不同的应力作用, 可以调控 LPFG 的结构、机械强度和敏感特性. 图 5 为 Cui 等 [21] 利用该技术写制的波状 LPFG 原理及 LPFG 显微图. 其中, 利用 CO<sub>2</sub> 激光或者飞秒激光对光纤涂覆层横向扫描, 刻制出间距相等仅至包层表面的划痕; 将光纤划痕部分浸入腐蚀溶液 (如 HF 等) 形成较平滑的周期性微锥区域, 对腐蚀后的光纤施加轴向应力形成 LPFG.

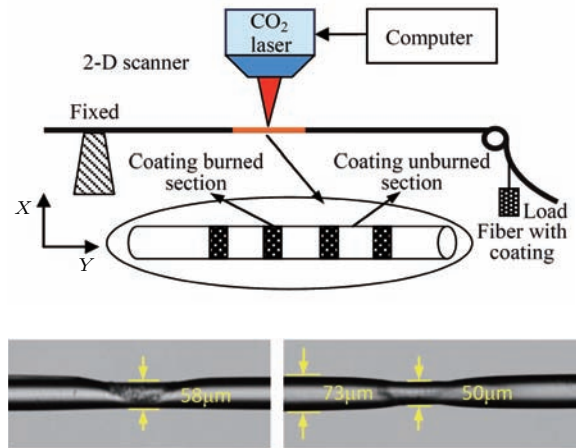


图 5 光刻腐蚀拉伸形成 LPFG 技术原理及光栅扫描电镜照片

Fig. 5. Principle and SEM micrographs of lithography etching strain technique to form LPFG.

### 2.6 切纤熔接技术

切纤熔接技术是指仅用精密切割方法将光纤进行微米级长度切割后, 再利用光纤熔接机精密轴向错位熔接或者轴向准直过熔焊接, 从而形成结构型光栅的技术. 该技术操作简便, 成栅效率高, 仅有几个周期的熔接结构即可出现光栅效应, 属于折射率强调制结构. 这是一种独特的光栅制作技术, 其优点是不需要激光刻制, 目前有错位型、过熔型两种制作技术, 图 6 为 Bai 等 [3,39] 利用该技术制作的错位型、过熔型 LPFG 制作原理示意图.

### 2.7 多维调制技术

多维调制技术是指利用激光技术对光纤的纤芯及包层折射率进行调制, 以形成二维或三维空间光栅的技术. 这是一种极具发展前途的光栅写制技术, 具有结构调制灵活、性能优化可控等优点. 图 7 为 Zhong 等 [40], Geng [41]、朱涛 [42] 及 Gao 等 [43] 利用 CO<sub>2</sub> 激光写制空间 LPFG 原理图.

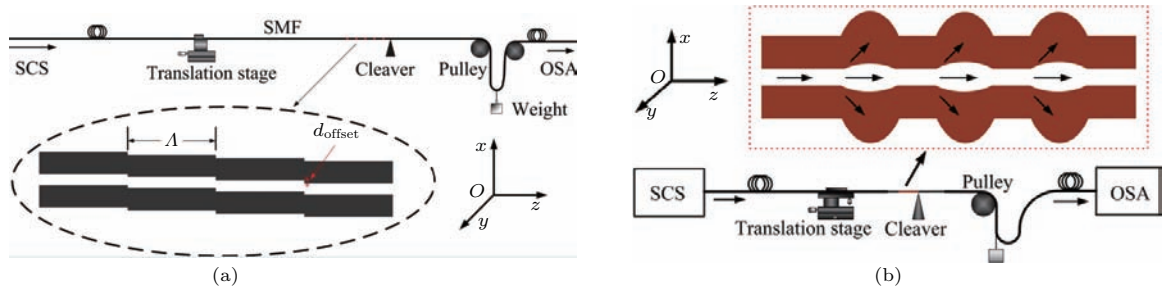


图6 切纤熔接技术制作 LPFG 技术原理 (a) 错位型 LPFG; (b) 过熔型 LPFG

Fig. 6. Principle of fiber incised and welded technique to form LPFG: (a) Mismatching LPFG; (b) over-melting LPFG.

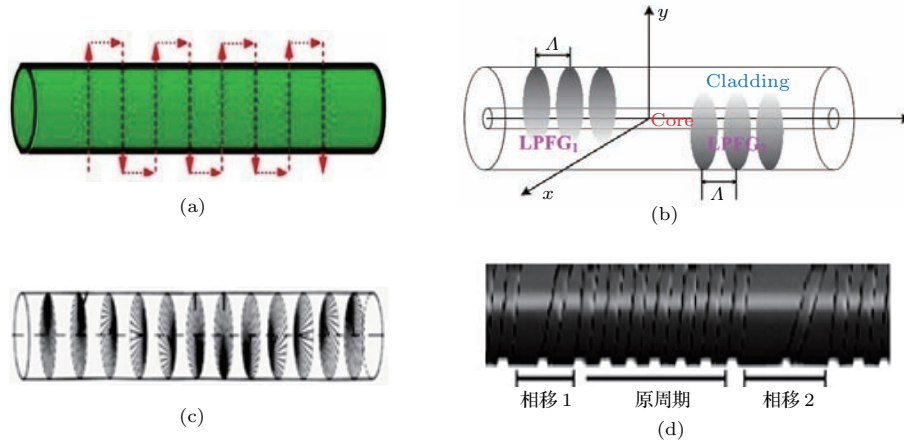


图7 多维调制技术制作 LPFG 技术原理 (a) 二维扫描调制结构; (b) 双侧交错写制结构; (c) 旋转变折调制结构; (d) 三维螺旋线写制结构

Fig. 7. Principle of multi-dimensional modulation technique to form LPFG: (a) Two-dimensional scanning modulated structure; (b) double-side stagger written structure; (c) rotary refractive index modulation structure; (d) three-dimensional helix curve written structure.

在上述光栅写制技术的基础上, 辅以打孔、刻腔、过熔、拉锥、涂覆、填充、腐蚀、封装等多种技术组合方式, 能够制作诸如嵌套型、并置型、交叉型、级联型等各类 NLPGF.

### 3 新型长周期光纤光栅设计

#### 3.1 NLPGF 模型构建

图8为我们提出的 NLPGF 模型示意图, 该模型将成栅范围由传统的局限于纤芯区域拓展至纤芯和包层的共同区域. 其中,  $\theta$  为栅面与  $z$  的夹角, 即波矢  $\mathbf{K}$  在  $xOz$  平面内的投影与光纤  $z$  轴的夹角, 即倾斜角 ( $0^\circ < \theta < 90^\circ$ );  $\varphi$  为栅面短轴与  $y$  轴的夹角, 即方位角 ( $0^\circ < \varphi < 90^\circ$ ); 折射率调制深度由区域颜色深浅表示. 当  $\theta = \varphi = 0^\circ$  时, 模型对应于一维 LPFG, 即“线型 LPFG”; 当  $\theta = 0^\circ$  而  $\varphi \neq 0^\circ$  或  $\theta \neq 0^\circ$  而  $\varphi = 0^\circ$  时, 对应于二维 LPFG, 即“平面 LPFG”; 当  $\theta \neq 0^\circ$  且  $\varphi \neq 0^\circ$  时, 对应于三维 LPFG,

即“空间 LPFG”.

进一步研究图8可知, 光纤折射率调制效果随倾斜角  $\theta$ 、方位角  $\varphi$ 、栅格周期  $\Lambda$  的不同而改变, 使 NLPGF 呈现对称或非对称分布. 于是, 改变  $\theta$ ,  $\varphi$ ,  $\Lambda$  的大小及均匀性, 可望设计结构新颖、性能优异的 NLPGF, 从而能够灵活控制纤芯中不同波长的光波以不同角度耦合到包层之中.

#### 3.2 NLPGF 设计理论

依据上述 NLPGF 模型, 可以建立 NLPGF 设计理论. 首先, 根据 NLPGF 对空间折射率调制的要求, 将纤芯折射率调制拓展至包层和纤芯全部区域; 其次, 探索并建立倾斜角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  与包层模耦合系数的关系式; 进而, 分析仅由倾斜角  $\theta$  和方位角  $\varphi$  引起的包层折射率倾斜调制分布对包层模耦合系数的影响; 最后, 将耦合系数代入耦合模方程, 求解耦合模方程并对光栅光谱特性进行分析, 实现 NLPGF 构建.

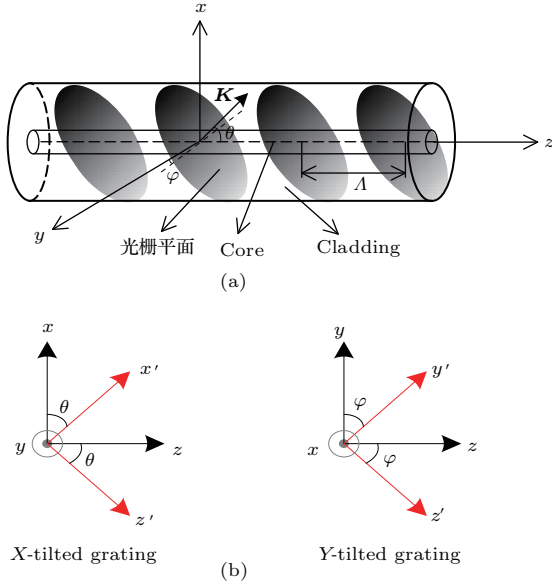


图8 NLPFG模型及坐标示意图 (a) 折射率空间调制; (b) 坐标示意图  
 Fig. 8. Diagram of NLPFG's model and coordinates: (a) Refractive index spatial modulation; (b) diagram of coordinates.

NLPFG中纤芯和包层的折射率多维调制分布函数可表示为

$$\begin{aligned} \Delta n(\theta, \varphi, z') &= \Delta n_{\text{co}} + \Delta n_{\text{cl}} \\ &= n_{\text{co}} \frac{\Delta \sigma_{\text{co}}(z')}{\cos \theta \cos \varphi} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda} z' \right) \right] \\ &\quad + n_{\text{cl}} \frac{\Delta \sigma_{\text{cl}}(z')}{\cos \theta \cos \varphi} \left[ 1 + \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda} z' \right) \right], \quad (1) \end{aligned}$$

式中,  $\Delta n_{\text{co}}$  为纤芯所受折射率改变,  $\Delta n_{\text{cl}}$  为包层所受折射率改变;  $\sigma_{\text{co}}(z')$  与  $\sigma_{\text{cl}}(z')$  分别对应于纤芯和包层折射率调制的慢变包络,  $z'$  表示沿栅面波矢方向建立的新坐标系,  $z' = z/(\cos \theta \sin \varphi)$ .

考虑到激光单侧曝光及倾斜折射率调制特点, NLPFG中纤芯基模、包层模式的自耦合系数  $K_{01-01}^{\text{co-co}}$  及二者交叉耦合系数  $K_{01-lv}^{\text{co-cl}}$  可分别表示为

$$\begin{aligned} K_{01-01}^{\text{co-co}} &= (\omega \varepsilon_0 n_1 \Delta n_{\text{co}} / 2) \int_0^\pi d\varphi \times \int_{a_1}^{a_2} r dr \\ &\quad \times \mathbf{E}_{01}(r) \mathbf{E}_{01}^*(r), \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_{01-lv}^{\text{co-cl}} &= (\omega \varepsilon_0 n_2 \Delta n_{\text{cl}} / 2) \int_0^\pi d\varphi \times \int_{a_1}^{a_2} r dr \\ &\quad \times \exp \left( i \frac{2\pi}{\Lambda} r \cos \varphi \tan \theta \right) \\ &\quad \times \mathbf{E}_{lv}(r, \varphi) \cdot \mathbf{E}_{01}^*(r), \quad (3) \end{aligned}$$

式中,  $\Delta n_{\text{co}}$  为纤芯所受折射率扰动,  $\omega$  为光波的圆频率,  $\varepsilon_0$  为真空中的介电常数,  $0-\pi$  为角向积分区间,  $a_1-a_2$  为径向积分区间。

### 3.3 NLPFG设计流程

对于NLPFG的结构设计,可采用正向设计与反向设计相结合的方法进行,主要步骤和流程如下所述。

#### 3.3.1 NLPFG正向设计

正向设计的要点是:根据上述建立的NLPFG模型及设计理论,从给定的参数出发,设计具有纤芯和包层折射率多维调制结构的光栅;根据光栅功能需要并基于纤芯和包层折射率调制的差异性、局域性以及非对称等因素,在选定类型的光纤(如保偏型、微结构型等)纤芯和包层上进行均匀及非均匀光栅设计。图9为我们提出并设计的典型NLPFG结构,分析表明它们均具有一些新奇的光谱特性。

#### 3.3.2 NLPFG反向设计

反向设计的要点是:根据预期的光栅功能或特定的光谱波形,重构LPPFG的长度、周期、折射率调制深度等参数,以实现在选定类型的光纤(如保偏型、微结构型等)纤芯和包层上进行均匀及非均匀光栅设计。图10为我们构建的一种NLPFG反向设计流程。

将正向设计与反向设计结合,我们称之为正反结合设计,它可以为实现具有特定功能的新型光纤光子器件的设计提供新的研究思路 and 有效方法。

### 3.4 典型设计方法

在设计NLPFG时,需要考虑光栅的几何结构、制作材料、涂覆介质以及写制技术、应用需求等诸多因素<sup>[25]</sup>。在参考国内外同行研究的基础上,我们结合本课题组的研究成果进行归纳和提炼,创设出多种NLPFG设计方法。下面简介其中几种典型的设计方法。

#### 3.4.1 几何结构改变法

几何结构改变法是指通过改变原有光栅空间结构或者拓扑形状的方式,以获得结构新颖、功能优异的NLPFG的设计方法。该法主要包括四种典型的方式,即栅格周期改变法(周期线性或非线性增大或减少)、折射率调变法(均匀或非均匀调制)、栅面位置改变法(栅面一致倾斜或扇形倾斜)和光栅断续连接法(均匀间断或非均匀间断),其典型示例如图11所示<sup>[44,45,10,46]</sup>。



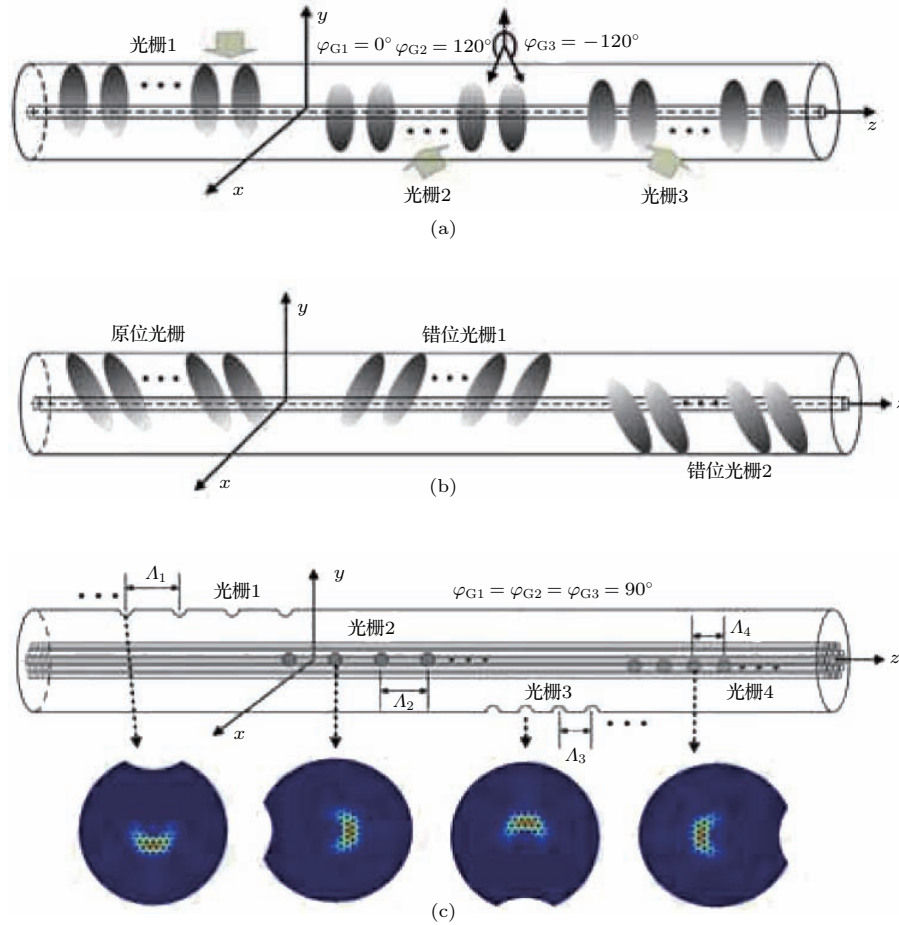


图9 几种典型的NLPFG结构及其模场图 (a)非对称错位光栅; (b)非对称倾斜光栅; (c)微结构空间正交光栅及模场图  
 Fig. 9. Structure and mode field figure of several typical NLPFGs: (a) Asymmetrical mismatched grating; (b) asymmetrical titled grating; (c) micro-structure spatial perpendicular grating and its mode field diagram.

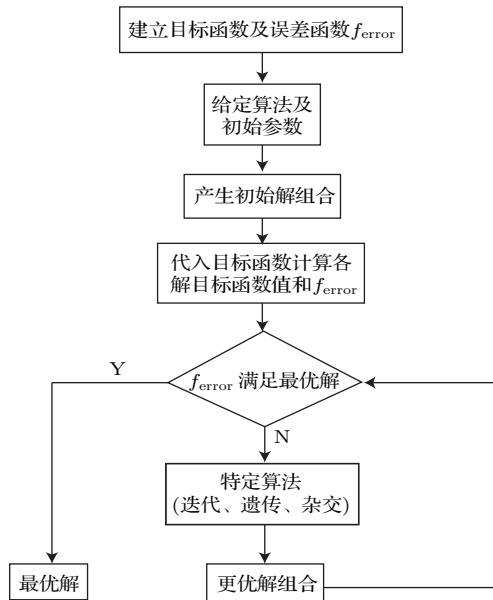


图10 NLPFG反向设计流程图

Fig. 10. Process of inverse design for NLPFG.

### 3.4.2 制作材料调换法

制作材料调换法是指通过对原有光栅制作材料进行部分或全部调换的方式, 以获得结构新颖、功能优异的NLPFG的设计方法. 该法主要包括三种典型的方式, 即材料完全调换法(如以聚合物替换玻璃拉制光纤等)、材料部分调换法(如填充、涂敷增敏材料等)、制作材料拼接法(如异类光纤拼接等), 其典型示例如图12所示<sup>[47,48]</sup>.

### 3.4.3 介质涂覆嵌入法

介质涂覆嵌入法是指通过将特殊介质(液体或固体)在光栅表面涂覆或者内部嵌入等方式, 以获得结构新颖、功能优异的NLPFG的设计方法. 该法主要包括三种典型的方式, 即介质表面涂覆法、介质内部嵌入法、端面选择处理法, 其典型示例如图13所示<sup>[49,50,51]</sup>.



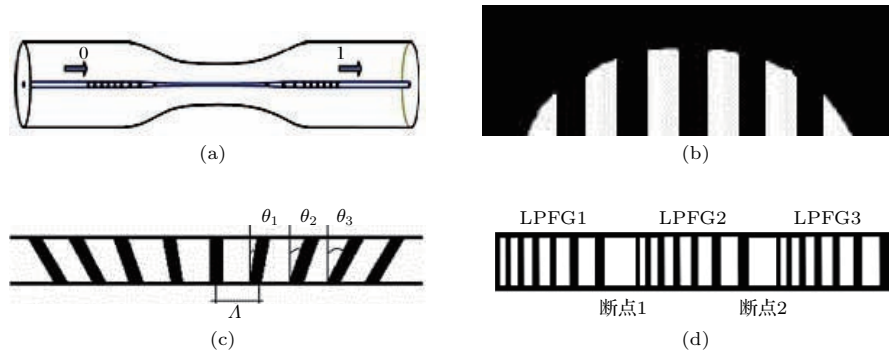


图 11 几何结构改变法设计 NLPFG 典型示例 (a) 栅格周期渐变; (b) 折射率弧形调制; (c) 栅面逐渐倾斜; (d) 多光栅啁啾级联  
 Fig. 11. Typical examples of designing NLPFG with geometrical structure changed method: (a) Gradual changed grating period; (b) arc-modulated refractive index; (c) gradual tilted grating plane; (d) chirp-cascaded multiple grating.

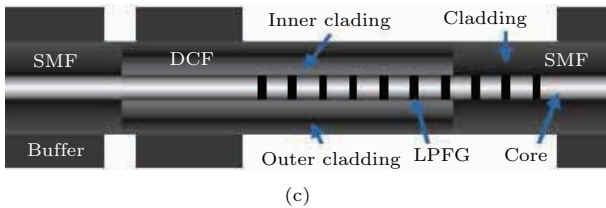
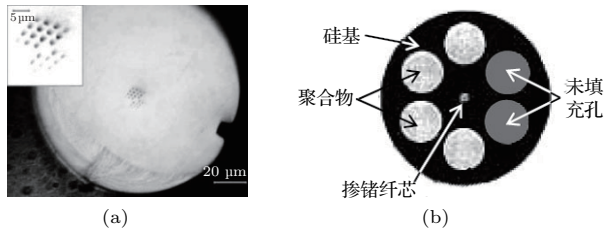


图 12 制作材料调换法设计 NLPFG 典型示例 (a) 聚合物光纤; (b) 介质定位填充; (c) 异类光纤拼接  
 Fig. 12. Typical examples of designing NLPFG with materials changed method: (a) Polymer fiber; (b) medium located filling; (c) disparate fibers splicing.

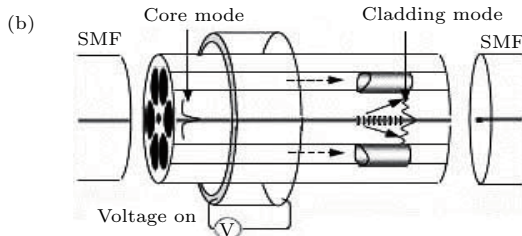
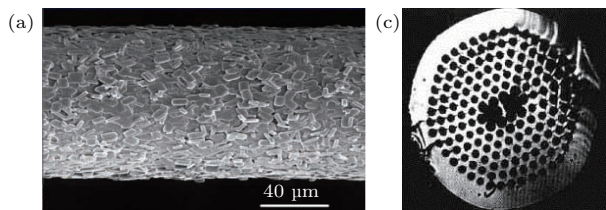


图 13 介质涂敷嵌入法设计 NLPFG 典型示例 (a) 纳米膜表面涂敷; (b) 介质内部嵌入; (c) 端面腐蚀处理  
 Fig. 13. Typical examples of designing NLPFG with medium coated and embedded method: (a) Nano film surface coating; (b) internal medium embedding; (c) end face corroding process.

## 4 新型长周期光纤光栅研制及应用

设计并研制 NLPFG 的目的, 在于获得可用的性能并有效地加以应用. 以下是几种典型的 NLPFG 研制及应用实例.

### 4.1 偏芯型 LPFG 器件

偏芯型 LPFG 器件是指在偏芯光纤中写入 LPFG 并制作的光子器件. Guan 等<sup>[52]</sup> 利用高频 CO<sub>2</sub> 激光技术在一种大空孔偏芯光纤上写入 LPFG 并制成器件, 其成栅原理、透射光谱以及折射率感测应用如图 14 所示.

### 4.2 多芯型 LPFG 器件

多芯型 LPFG 器件是指在双芯、三芯及以上的光纤中写入 LPFG 并制作的光子器件. Wang 等<sup>[53]</sup> 利用高频 CO<sub>2</sub> 激光技术在一种双芯光纤上写入双芯型 LPFG 并制成器件, Safari 等<sup>[54]</sup> 利用紫外曝光技术在由 120 个单模芯组成的多芯光纤上写入多芯型 LPFG 并制成器件, 它们的成栅原理、透射光谱以及弯曲矢量感测应用如图 15 和图 16 所示.

### 4.3 少模型 LPFG 器件

少模 LPFG 器件是指在少模光纤中写入 LPFG 并制作的光子器件. Wang 等<sup>[55]</sup> 利用高频 CO<sub>2</sub> 激光技术在一种能够容纳 4 个低阶模 (LP<sub>01</sub>, LP<sub>11</sub>, LP<sub>21</sub>, LP<sub>02</sub>) 的光纤上写入少模型 LPFG 并制成器件, 其成栅原理、透射光谱以及温度、轴向应力感测应用如图 17 所示.

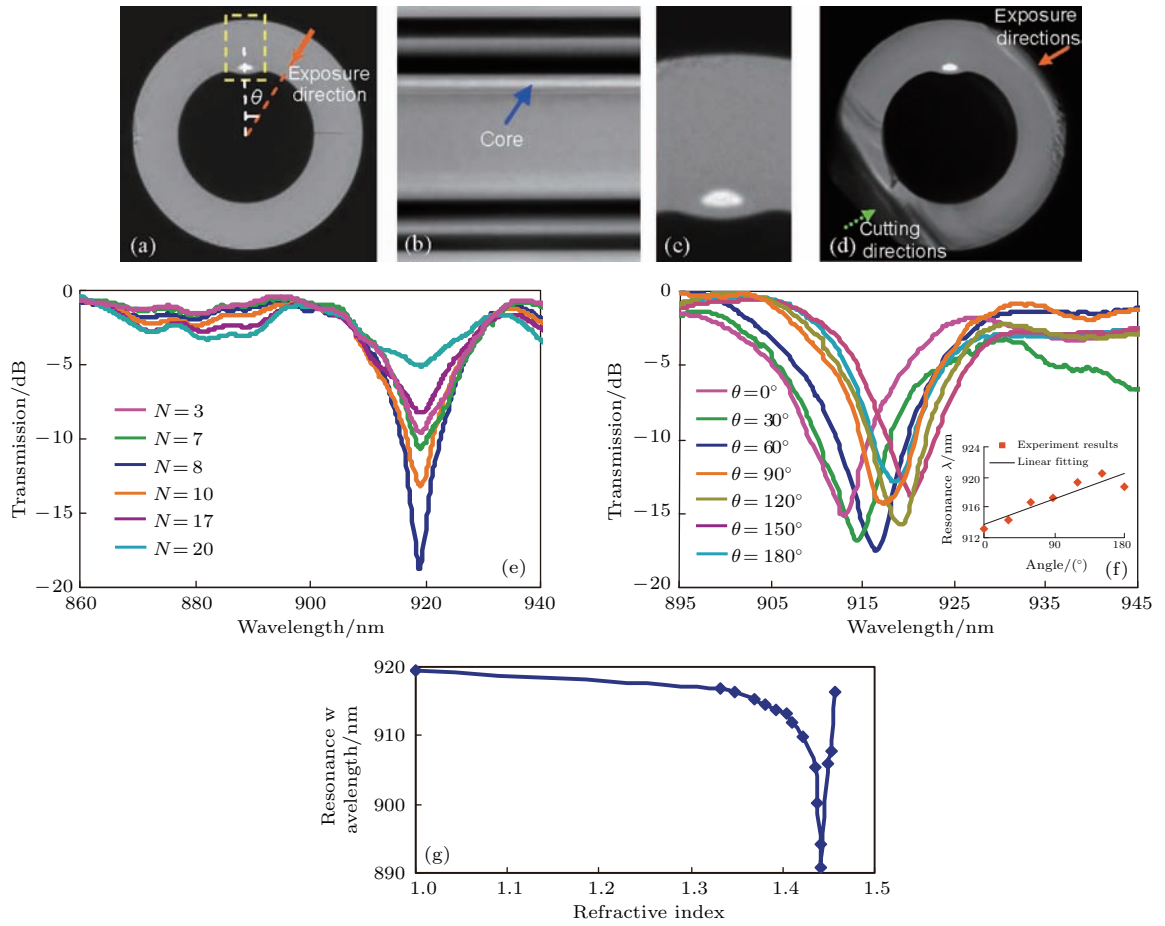


图 14 偏芯型 LPFG 器件的研制及折射率感测应用 (a) 光纤横截面; (b) 光纤侧面; (c) 纤芯; (d) CO<sub>2</sub> 激光写栅; (e) 扫描周期不同; (f) 扫描方向不同; (g) 折射率感测

Fig. 14. Developing and refractive index sensing application of excentric core LPFG device: (a) Cross-section of fiber; (b) side-section of fiber; (c) fiber core; (d) grating written by CO<sub>2</sub> laser; (e) different scanning period; (f) different scanning direction; (g) refractive index sensing.

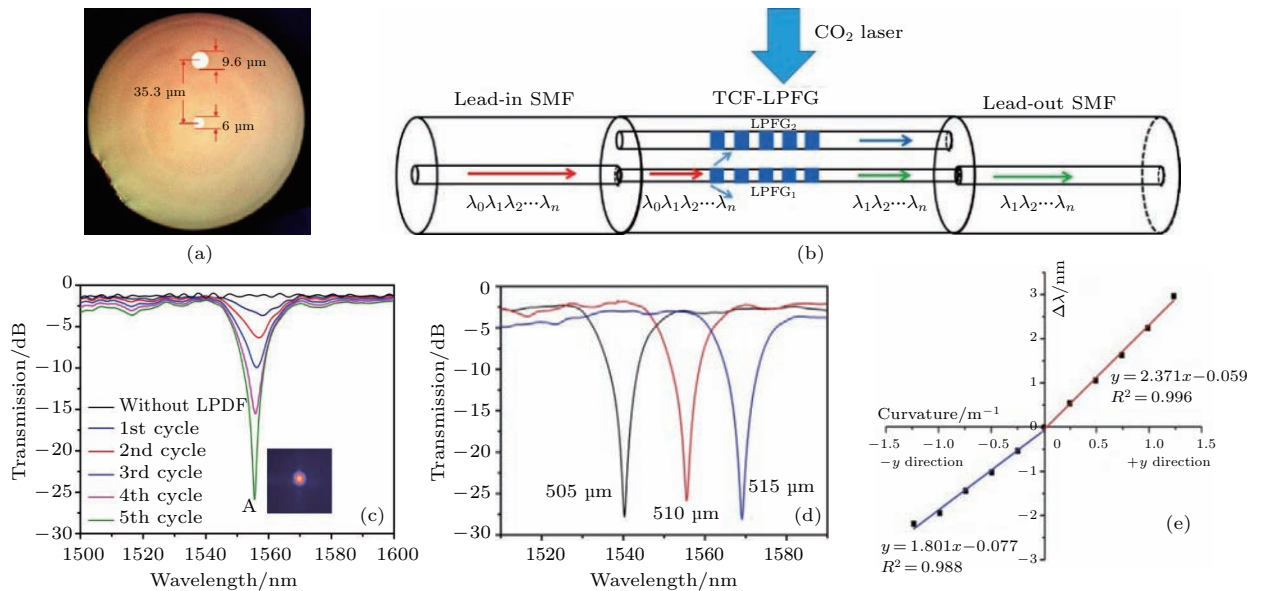


图 15 双芯型 LPFG 写制、光谱及弯曲传感应用 [53] (a) 双芯光纤截面; (b) 双芯型 LPFG 写制原理; (c) 扫描次数不同光谱; (d) 栅格周期不同光谱; (e) 曲率及方向感测结果

Fig. 15. Fabrication, spectra and bending sensing application of two-core LPFG [53]: (a) Cross-section of two-core fiber; (b) writing principle of two-core fiber; (c) spectra of different scanning times; (d) spectra of different grating period; (e) results of curvature and direction sensing.

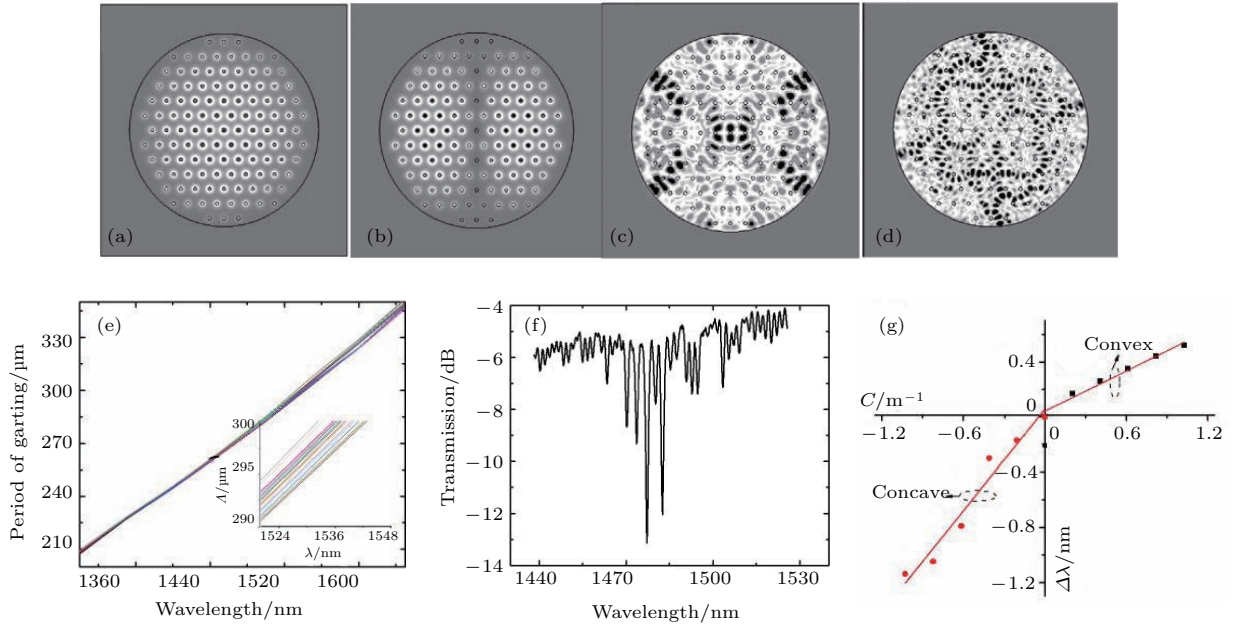


图 16 多芯型 LPFG 器件的研制及弯曲感测应用 (a) 纤芯模 1; (b) 纤芯模 2; (c) 包层模 1; (d) 包层模 2; (e) 栅格周期与谐振波长关系; (f) 写制的 LPFG 实验光谱; (g) 曲率及方向感测结果

Fig. 16. Developing and bending sensing application of multi-core LPFG device: (a) Core mode 1; (b) core mode 2; (c) cladding mode 1; (d) cladding mode 2; (e) relation between grating period and syntony wavelength; (f) experimental spectrum of written LPFG; (g) results of curvature and direction sensing.

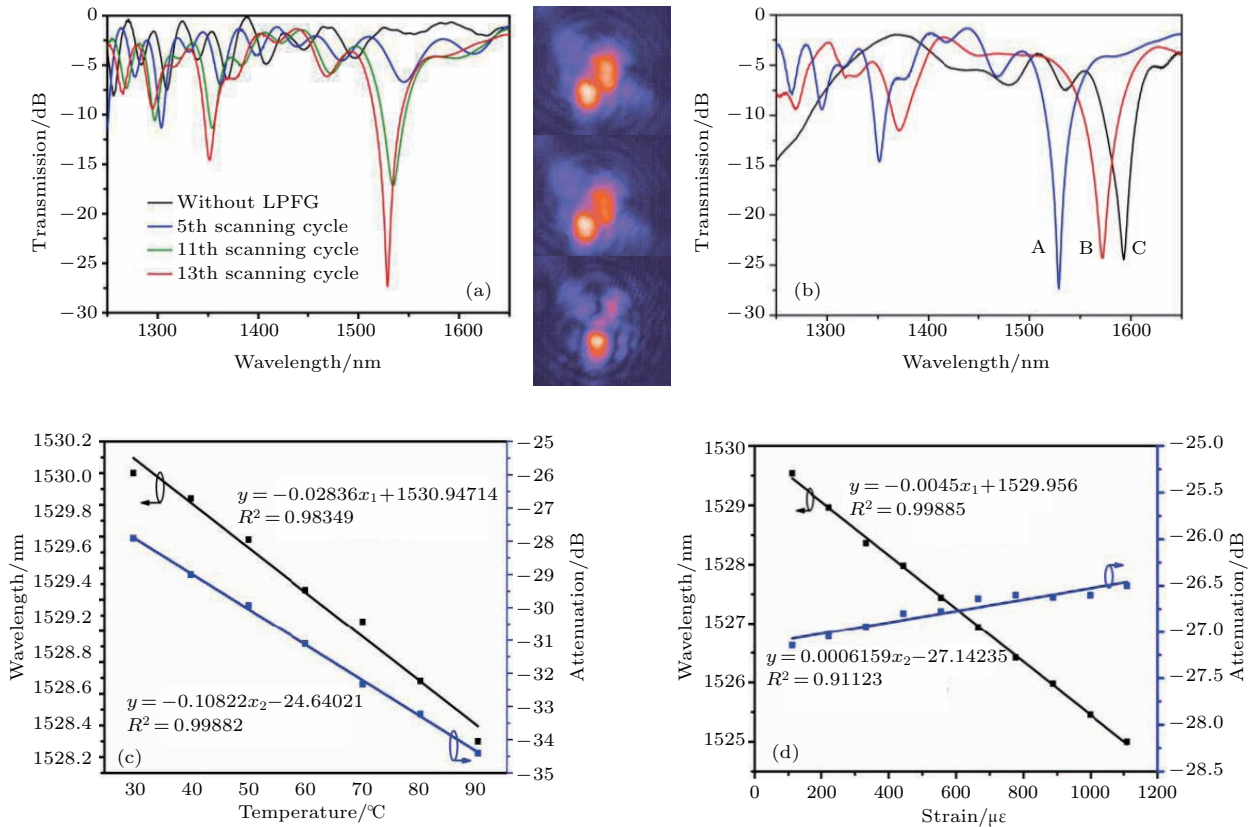


图 17 少模型 LPFG 器件的研制及温度、应力感测应用 (a) 少模型 LPFG 透射谱及模场; (b) 栅格周期不同光谱; (c) 温度感测结果; (d) 轴向应力感测结果

Fig. 17. Developing and temperature and stress sensing application of few-mode LPFG device: (a) Transmission spectra and mode field of few-mode LPFG; (b) spectra of different grating period; (c) results of temperature sensing; (d) results of axis-direction strain sensing.

#### 4.4 交错型 LPFG 器件

交错型 LPFG 器件是指在同一根光纤上沿同一平面交错平移栅格, 或者在两个垂直平面内交错移动栅格形成的两个及以上结构相同或不同的组合 LPFG 并制作的光子器件. 利用高频 CO<sub>2</sub> 激光技术, Fan 等 [56] 成功写出平行交错型 LPFG, Geng 等 [57] 成功写出垂直交错型 LPFG. 相应传感器件的成栅原理、透射光谱以及弯曲矢量感测应用如图 18 [56] 和图 19 [57] 所示.

#### 4.5 错位型 LPFG 器件

错位型 LPFG 器件是指由若干个微小分段光纤沿纤轴平行错位移动熔接而形成的 LPFG 并制作的光子器件, 这种光栅还可用于超长

LPFG(ULPFG, 栅格周期为 mm 级) 的设计和制作. Bai 等 [58] 设计并制作出一种错位型 LPFG 器件, 该结构由一根光纤分段切割后错位熔接而成, 其成栅原理、透射光谱以及高温感测应用如图 20 所示.

#### 4.6 过熔型 LPFG 器件

过熔型 LPFG 器件是指采用精密切割方法将光纤切割成微米级长度, 再利用光纤熔接机对其进行轴向准直过熔焊接, 从而形成结构型 LPFG 并制作的光子器件. 这种光栅可通过控制放电来调节 LPFG 的峰值位置及光谱形状. Bai 等 [59] 设计并制作出一种过熔型 LPFG 器件, 该结构由一根光纤分段切割后过准直过熔而成, 其成栅原理、透射光谱以及轴向微位移传感应用如图 21 所示.

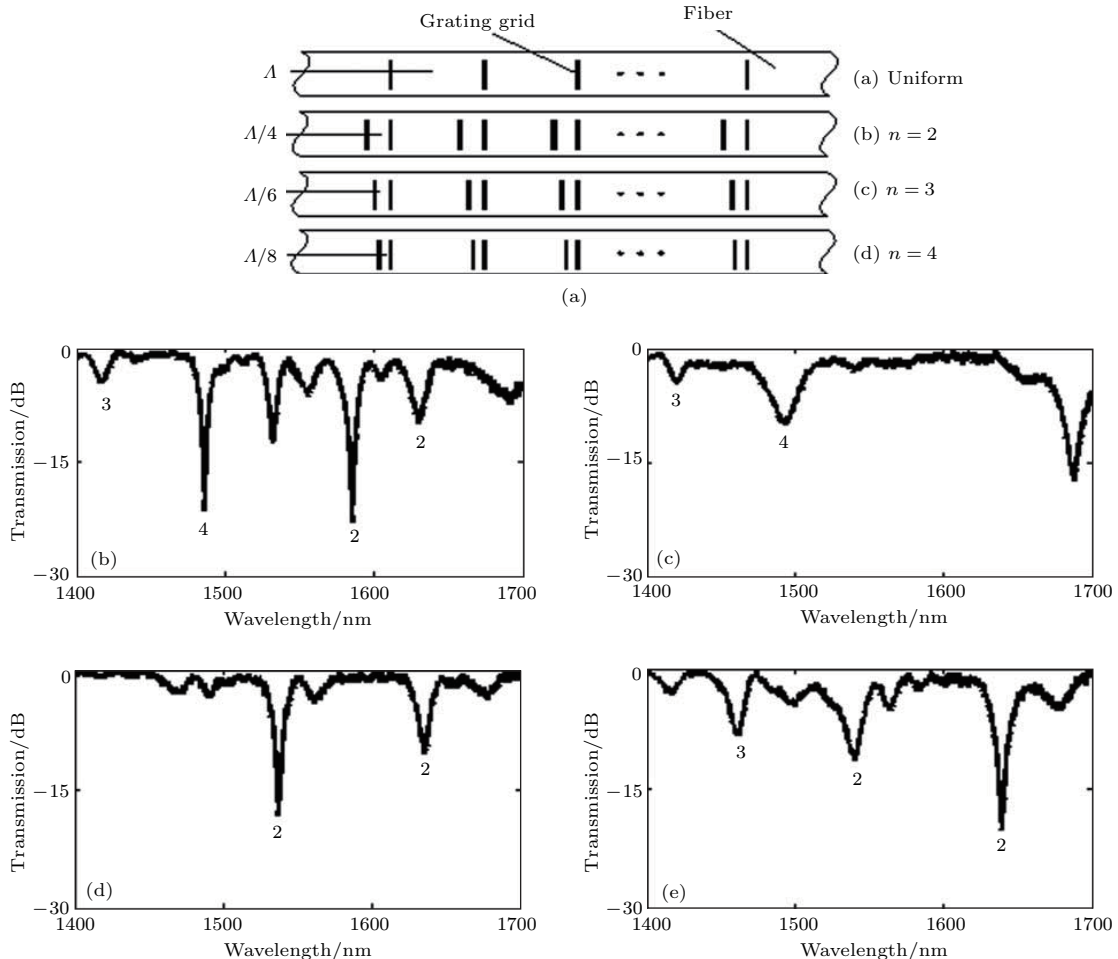


图 18 平行交错型 LPFG 结构及实验透射谱 (a) 单方向平行交错型结构; (b) uniform; (c)  $n=2$ ; (d)  $n=3$ ; (e)  $n=4$

Fig. 18. Structure and experimental transmitted spectra of parallel stagger LPFG: (a) Single-direction parallel stagger structure; (b) uniform; (c)  $n=2$ ; (d)  $n=3$ ; (e)  $n=4$ .



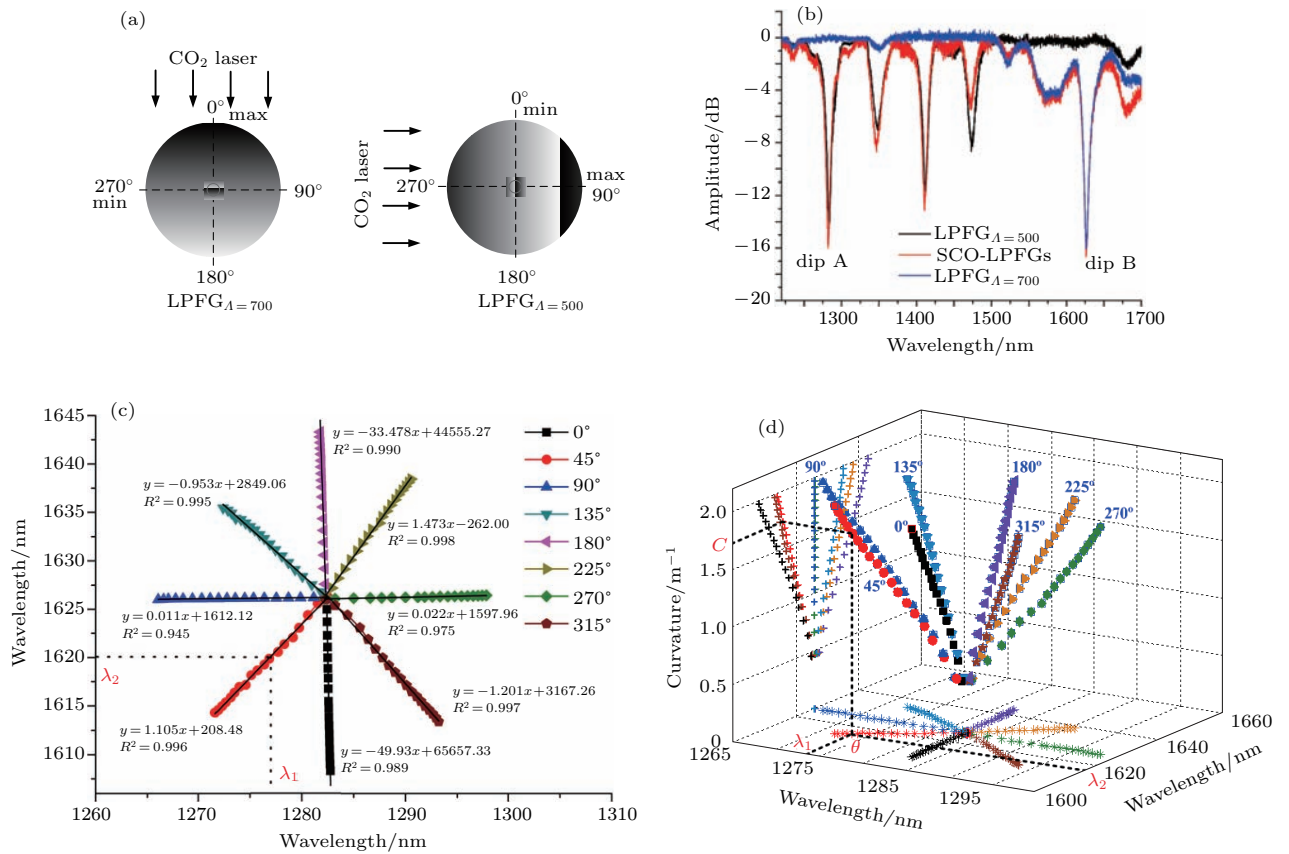


图 19 垂直交错型 LPFG 器件的研制及弯曲矢量感测应用 (a) 光纤垂直曝光截面; (b) 垂直交错型 LPFG 实验透射谱; (c) 弯曲方向辨识; (d) 三维坐标系传感表征

Fig. 19. Developing and bending vector sensing application of perpendicular stagger LPFG: (a) Cross-section of perpendicular exposures; (b) experimental transmission spectrum of perpendicular staggered LPFG; (c) identification of bending directions; (d) sensing characterization in three-dimensional coordinate system.

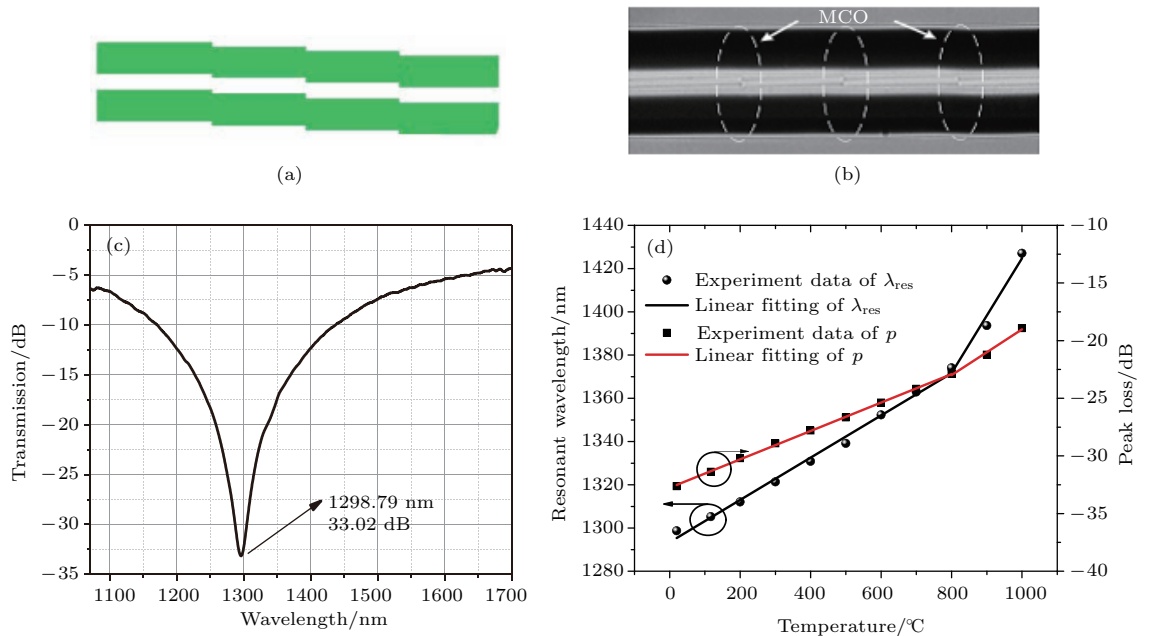


图 20 错位型 LPFG 器件的研制及高温感测应用 (a) 光栅错位结构; (b) 光栅实物显微照片; (c) 光栅测量透射谱; (d) 高温感测测量结果

Fig. 20. Developing and high temperature sensing application of mismatched LPFG device: (a) Grating mismatched structure; (b) grating photo under microscopy; (c) transmission spectrum of grating measurement; (d) result of high temperature sensing.

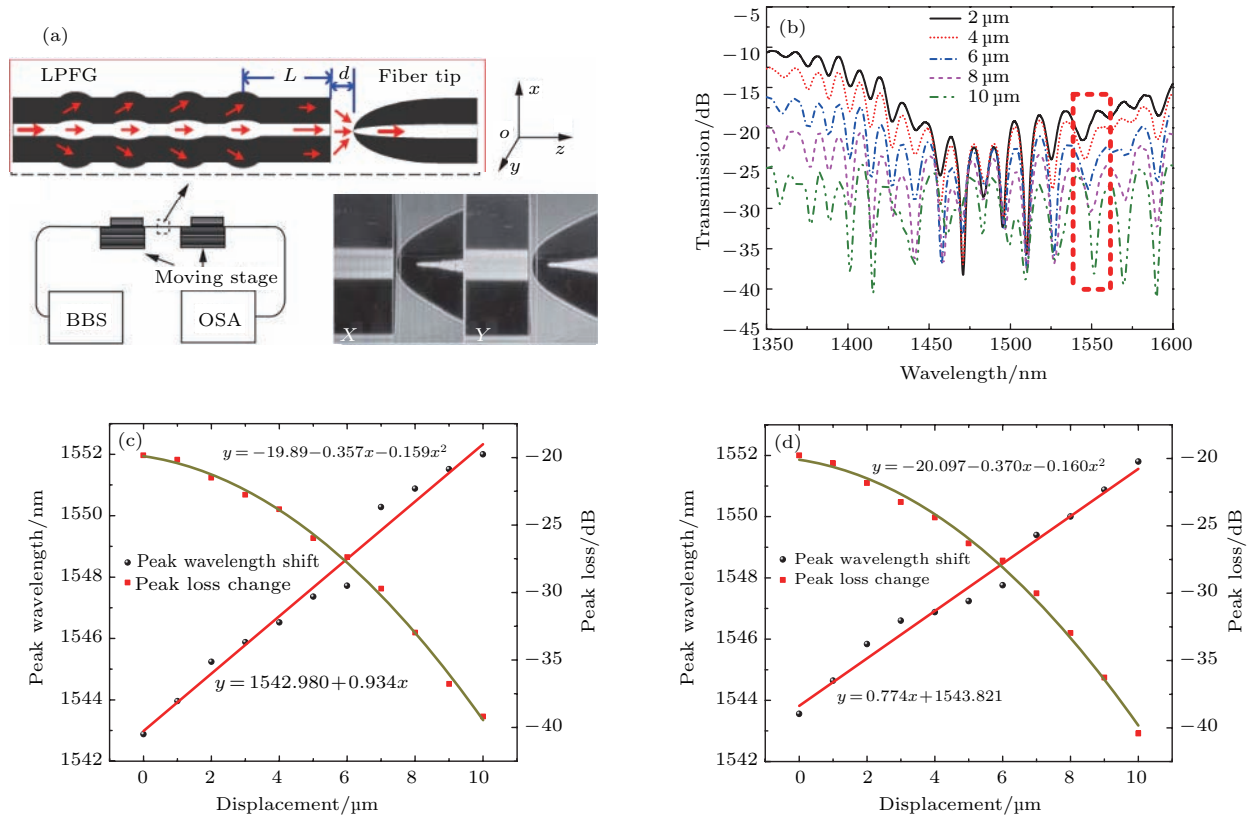


图 21 过熔型 LPFG 器件的研制及微位移感测应用 (a) LPFG 与光纤锥组合测量装置; (b) LPFG-光纤锥干涉测量谱; (c)  $d = 10 \mu\text{m}$  时微位移感测结果; (d)  $d = 20 \mu\text{m}$  时微位移感测结果  
 Fig. 21. Developing and micro-displacement sensing application of over-melted LPFG device: (a) Measure equipment combined with LPFG and fiber-cone; (b) interference measure spectra of LPFG-fiber-cone; (c) result of micro-displacement sensing when  $d = 10 \mu\text{m}$ ; (d) result of micro-displacement sensing when  $d = 20 \mu\text{m}$ .

### 4.7 相移型 LPFG 器件

相移型 LPFG 器件是指在光栅上某一点或多个点引入相位改变, 使其透射谱分裂形成变化丰富的 PS-LPFG 并制作的光子器件. 相移可采用多种方法引入, 如相位突变法、折射率累积法和光栅调制法<sup>[60]</sup>等. Li 等设计了多种 PS-LPFG 器件, 并利用光栅重叠法及电弧放电法加以实现, 其成栅原理、透射光谱以及扭转感测应用如图 22<sup>[61]</sup>和图 23<sup>[62]</sup>所示.

### 4.8 调谐型 LPFG 器件

调谐型 LPFG 器件是指通过巧妙的结构设计, 使制作的光栅谐振峰位置或者强度连续可调(或可控)的光子器件, 它是光纤通信、光纤传感等系统中不可或缺的器件之一. Sakata 等利用周期性机械压力以及扭应力作用, 在双包层光纤(double cladding fiber, DCF)及保偏光纤(polarization

maintain fiber, PMF) 上形成 LPFG 并制成全光纤带通滤波器, 通过调节压力及扭应力可控制其输出波长和振幅, 其成栅原理、透射光谱、调谐特性及典型应用如图 24<sup>[63]</sup>和图 25<sup>[64]</sup>所示.

### 4.9 耦联型 LPFG 器件

耦联型 LPFG 器件是将两个或多个具有不同特性的光栅通过耦合或级联方式组合形成的光子器件. Fang 等<sup>[65]</sup>设计了由单模 LPFG(SMF-LPFG)和少模 LPFG(FMF-LPFG)构成的耦合器件, 理论分析了 SMF-LPFG 中的基模  $LP_{01}$  耦合至 FMF-LPFG 转换为包层高阶模  $LP_{0m}$  的过程, 其器件结构、模式耦合与转换、模式复用及上下载过程如图 26 所示.

Caucheteur 等将 FBG 叠加在 LPFG 上并涂覆  $WO_3$  敏感层, 用于空气中  $H_2$  的传感检测, 其传感结构、透反谐振峰光谱、 $H_2$  浓度检测如图 27 所示<sup>[66]</sup>.

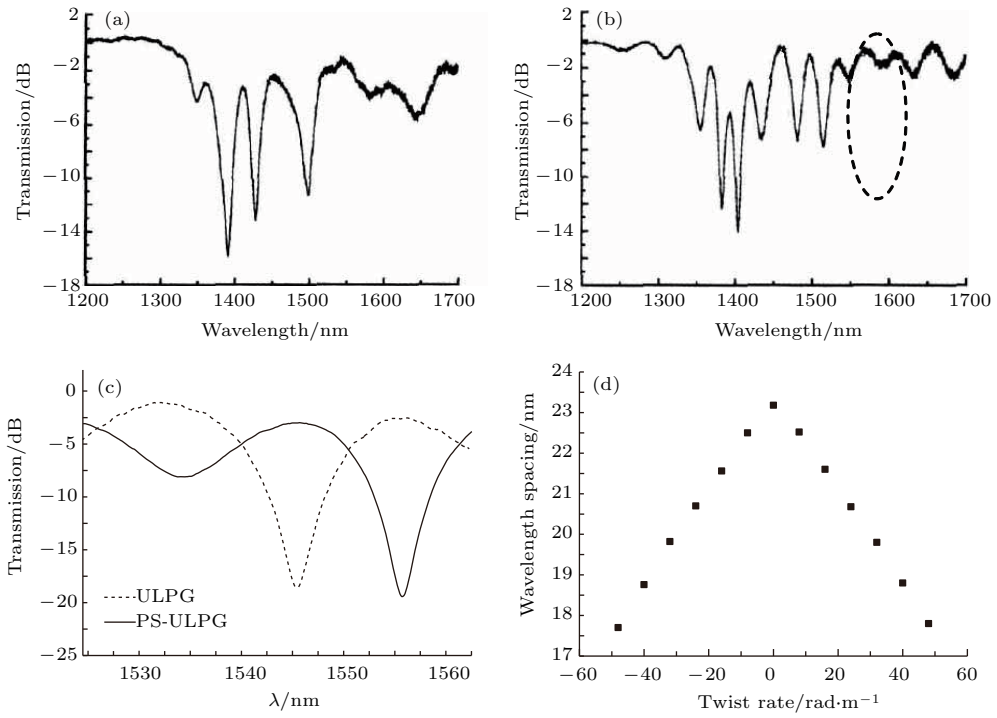


图 22 光栅重叠法制作 PS-LPFG 器件及扭转感测应用 (a) 短光栅调制前光谱; (b) 短光栅调制后光谱; (c) 引入相移前后实验光谱; (d) 扭转感测结果

Fig. 22. Grating-overlap formed PS-LPFG device and its torsion sensing application: (a) Spectrum of short grating before modulated; (b) spectrum of short grating after modulated; (c) experimental spectra before and after imported phase-shift; (d) result of torsion sensing.

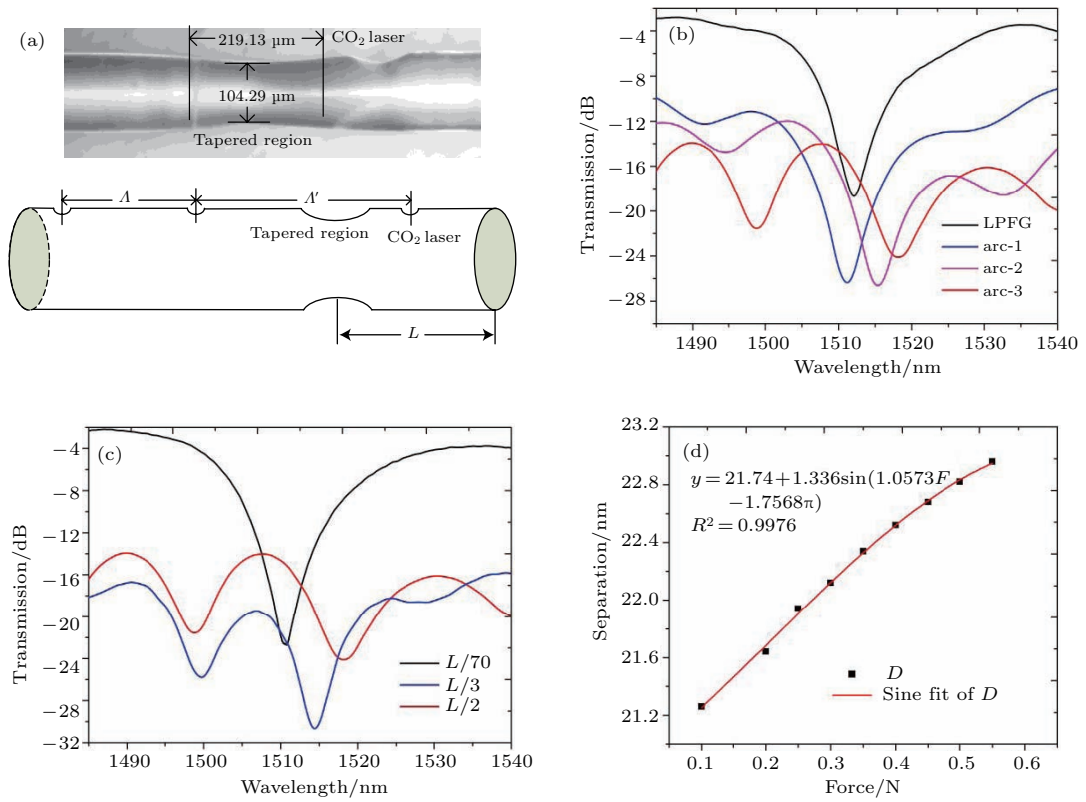


图 23 电弧放电法制作 PS-LPFG 器件及应力感测应用 (a) PS-LPFG 结构及器件; (b) 放电调控光栅光谱; (c) 放电位置调控光栅光谱; (d) 应力感测结果

Fig. 23. Arc discharge formed PS-LPFG device and its stress sensing application: (a) Structure and device of PS-LPFG; (b) FG regulated by discharge; (c) FG regulated by discharge position; (d) result of force sensing.

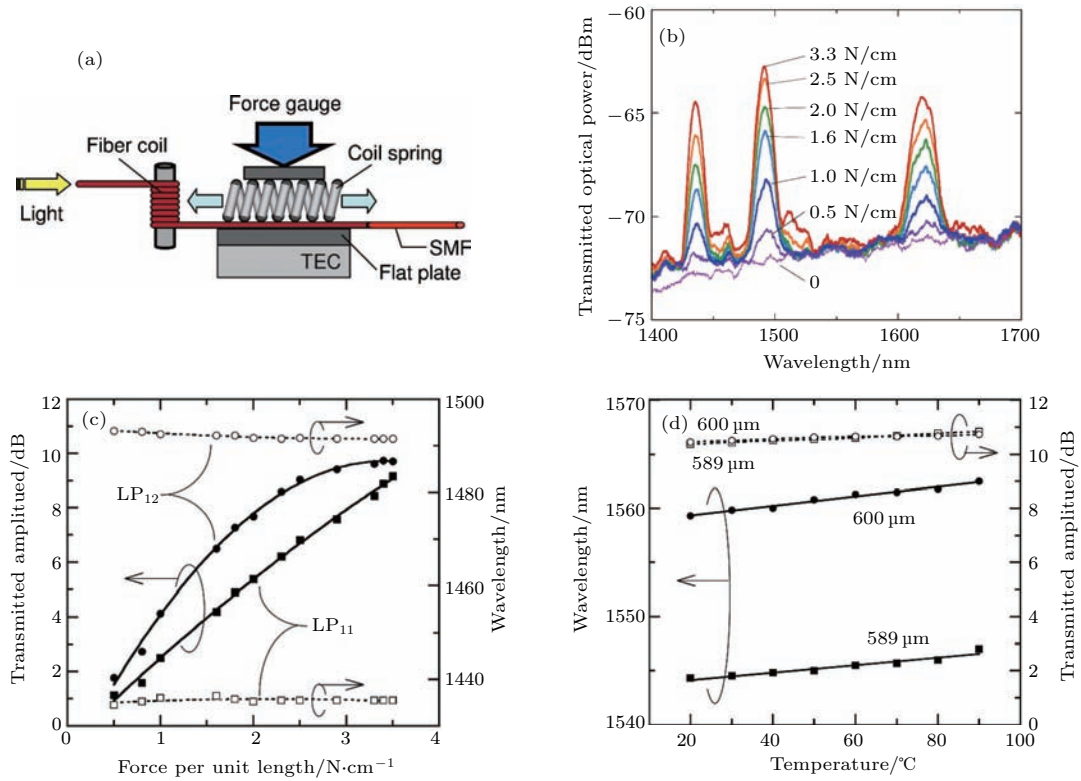


图 24 压力调谐型 LPFG 器件的研制及调谐应用 (a) DCF-LPFG 压力调谐机构; (b) 光谱随周期性压力的变化; (c) 压力调谐测量结果; (d) 温度调谐测量结果

Fig. 24. Developing and tuning application of pressure tuning LPFG device: (a) DCF-LPFG tuning mechanism; (b) spectra changing with periodic pressure; (c) measurement of pressure tuning; (d) measurement of temperature tuning.

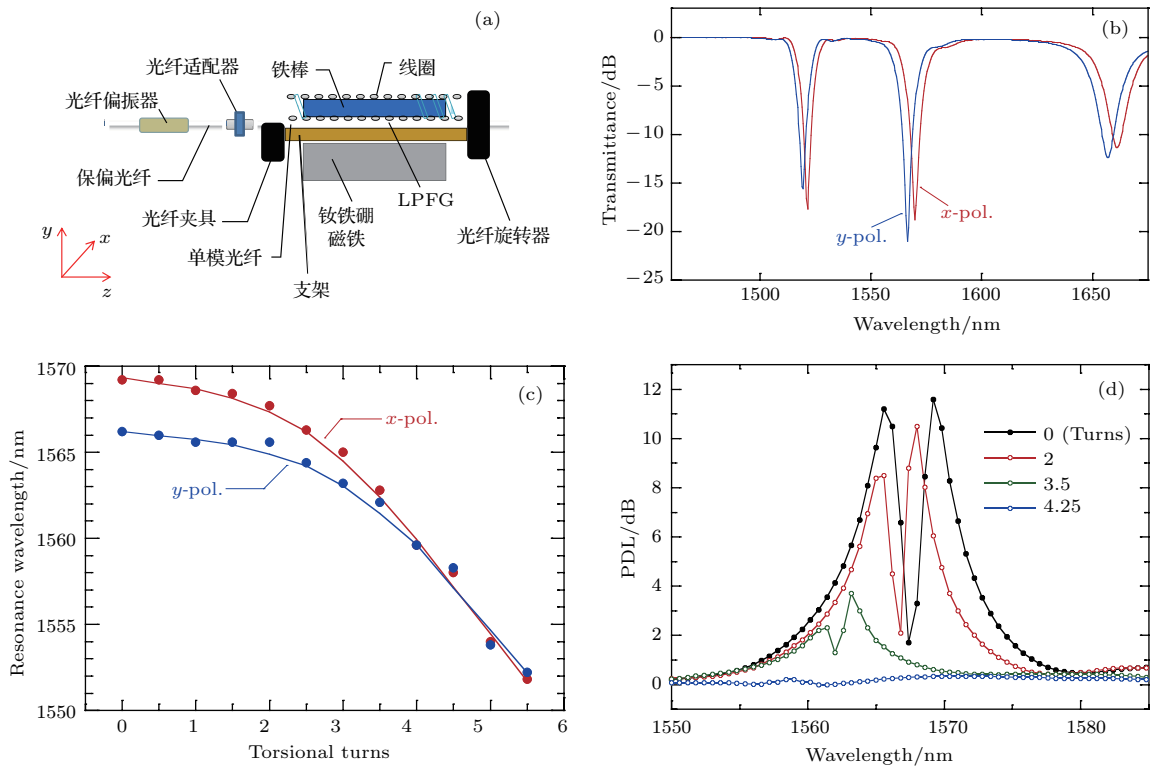


图 25 扭转调谐型 LPFG 器件的研制及调谐应用 (a) PMF-LPFG 调谐机构; (b) 调谐器件两个偏振态光谱; (c) 扭转调谐偏振测量结果; (d) 扭转调谐 PDL 测量结果

Fig. 25. Developing and tuning application of torsion tuning LPFG device: (a) PMF-LPFG tuning mechanism; (b) spectra of two polarized states of tuning device; (c) measurement of torsion tuning; (d) measurement of torsion tuning PDL.



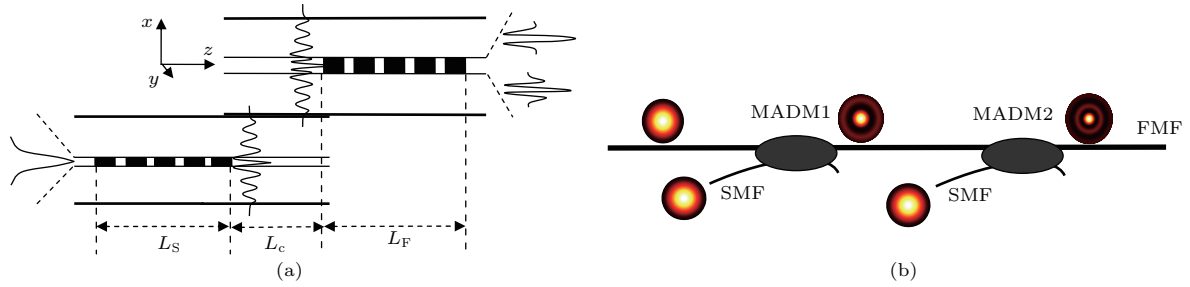


图 26 双 LPFG 耦合型器件的研制及模式转换与复用 (a) 双 LPFG 耦合型器件结构及模式耦合原理; (b) 上下载复用器的设计 (LP<sub>01</sub>, LP<sub>02</sub> 及 LP<sub>03</sub>)

Fig. 26. Fabrication of coupled SMF-LPFG and FMF-LPFG device and its application in mode conversion and multiplexing: (a) Structure and principle of SMF-LPFG and FMF-LPFG device; (b) design of mode add/drop multiplexers (multiplexing modes LP<sub>01</sub>, LP<sub>02</sub> and LP<sub>03</sub>).

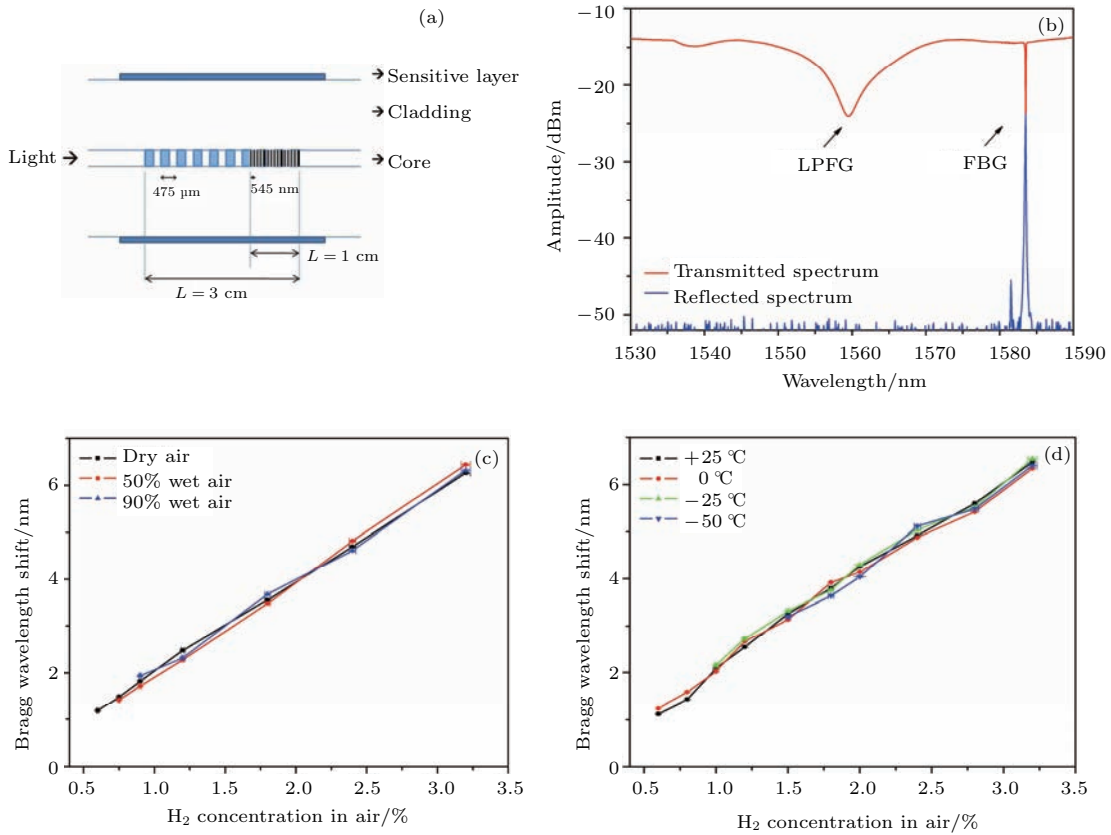


图 27 FBG 与 LPFG 耦合型器件的研制及气体传感应用 (a) 用于 H<sub>2</sub> 检测的 FBG 与 LPFG 叠加结构; (b) 传感器的透射和反射谐振峰光谱; (c) 不同湿度下 FBG 波长随 H<sub>2</sub> 浓度测量的关系曲线; (d) 不同温度下 FBG 波长随 H<sub>2</sub> 浓度测量的关系曲线

Fig. 27. Fabrication of cascaded FBG and LPFG device and its application in gas sensing: (a) Superimposed structure of FBG and LPFG for H<sub>2</sub> sensing; (b) harmonic peaks in the transmitted and reflected spectra of the sensor; (c) relation curve of the Bragg wavelength shift and the H<sub>2</sub> concentration under different humidity; (d) relation curve of the Bragg wavelength shift and the H<sub>2</sub> concentration under different temperatures.

Dandapat 等设计并制作了一种可激发 LP<sub>06</sub>, LP<sub>09</sub> 高阶模的双 LPFG 组合器件, 并利用其进行水中大肠杆菌的检测. 该生物传感器具有结构紧

凑、性价比高及温度不敏感等特性, 其传感结构、谐振峰光谱、细菌浓度及检测光谱漂移如图 28 所示 [67].

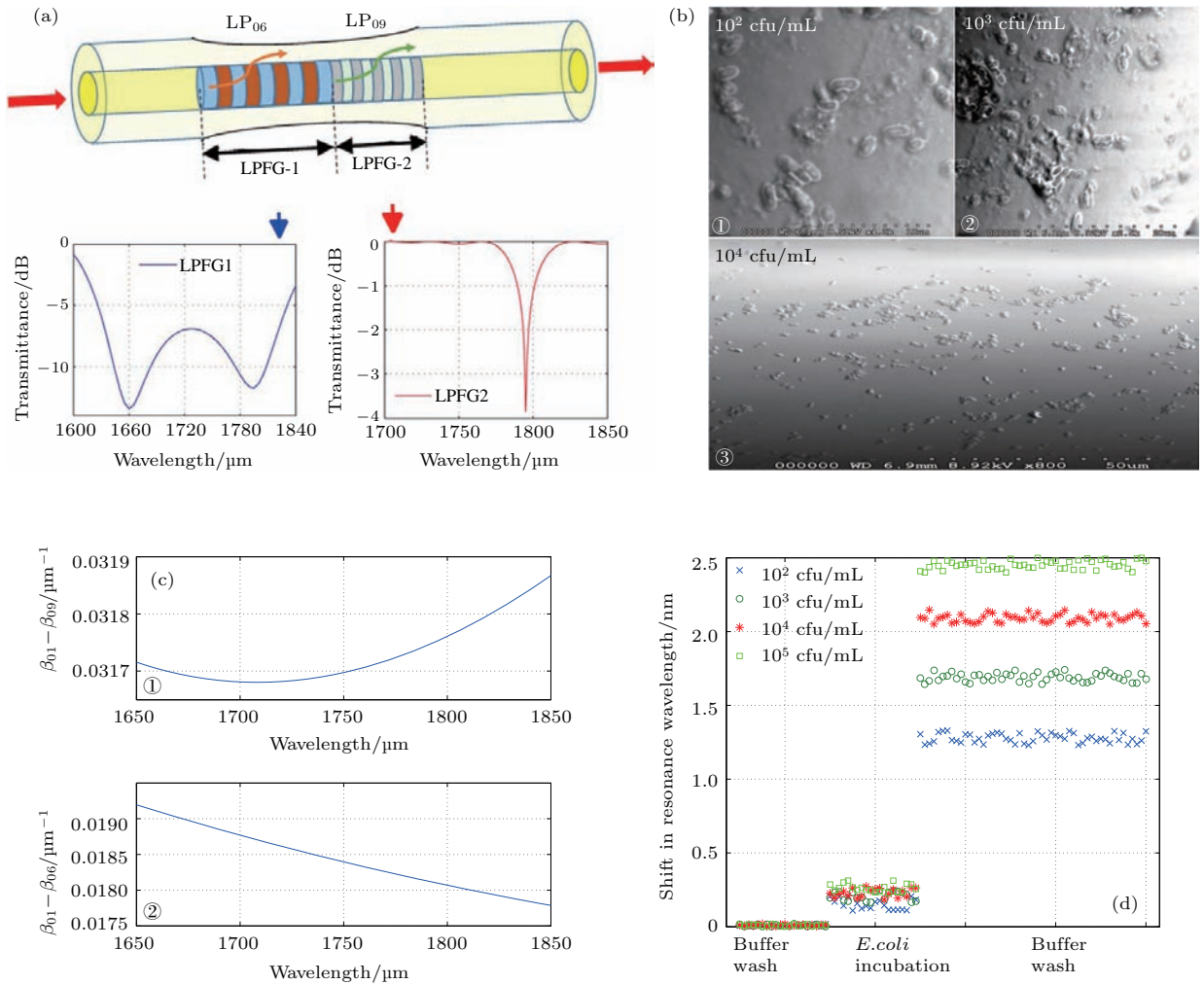


图 28 双 LPFG 耦联型器件的研制及生物传感应用 (a) 双 LPFG 生物传感器结构及谐振峰光谱; (b) 传感器表面细菌浓度扫描电镜照片 (①  $10^2$  cfu/mL, ②  $10^3$  cfu/mL, ③  $10^5$  cfu/mL); (c)  $\text{SiO}_2$  中纤芯掺杂 3.1 摩尔%  $\text{GeO}_2$  的锗硅光纤的色散曲线 (①  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{09}$  模式耦合, ②  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{06}$  模式耦合); (d) 该传感器在不同阶段对大肠杆菌浓度检测的光谱漂移  
 Fig. 28. Fabrication of cascaded double-LPFG device and its application in biosensing: (a) structure and resonance spectrum of double-LPFG biosensor; (b) SEM micrographs of bacterial concentration on the sensor's surface: ①  $10^2$  cfu/mL, ②  $10^3$  cfu/mL, ③  $10^5$  cfu/mL; (c) Dispersion curves of the germanio-silicate optical fiber with a  $\text{SiO}_2$  core doped 3.1 mol%  $\text{GeO}_2$ : ①  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{09}$  mode coupling, ②  $\text{LP}_{01}$ - $\text{LP}_{06}$  mode coupling; (d) spectral shift of the sensor at different stages of *E. coli*'s concentration.

## 5 结 论

NLPFG 器件有许多独特的优势, 具有解决许多传统电磁测量器件所无法解决的关键问题的潜力. NLPFG 器件的设计方法和实现技术具有相当程度的挑战性, 并展现出良好的发展前景. 探索设计新方法, 开发研制新技术, 稳步推进工程化应用, 需要提出 NLPFG 分析新理论并突破其技术难点, 这对于实现 NLPFG 器件的高分辨率、大测量范围、多光栅复用、网络化系统以及远程监测等功能, 无疑具有重要的科学意义和应用价值.

展望 NLPFG 及其器件的研究和发展趋势, 我

们提出如下建议: 一是创新光栅新结构, 可从栅格周期长短、折射率调制深度、栅面法线取向三个特征参数入手, 从单因素改变或者多因素复合的角度进行 NLPFG 结构创新, 从而获得新奇性能并加以工程化实现; 二是探索设计新方法, 通过光纤的材质调换、介质嵌入、表面涂覆、形貌修饰等手段, 研制出结构新颖、功能优良的 NLPFG 器件; 三是开发成栅新技术, 即在干涉、掩模、逐点等写制技术基础上, 采用衍生、交叉、组合等多种手段开发 NLPFG 写制新技术, 实现高质量 NLPFG 器件的批量生产. 相信通过广大科研工作者及工程师们的共同努力, 对 NLPFG 的理论及应用研究必将更为广泛及深

入。同时,根据实际需求,NLPG器件也将朝着网络化、智能化方向推进,使其在结构健康监测、航空航天传感、远程医学诊断等领域发挥更加重要的作用。

## 参考文献

- [1] Zhang W G 2012 *Principle and Applications of Fiber Optics* (Beijing: Tsinghua University Press) p164 (in Chinese) [张伟刚 2012 光纤光学原理及应用 (北京:清华大学出版社) 第164页]
- [2] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, et al. 1996 *Opt. Lett.* **21** 336
- [3] Bai Z Y, Zhang W G, Gao S C, Zhang H, Wang L, Liu Y J, Yan T Y 2014 *J. Opt.* **16** 045401
- [4] Zhang W G 2012 *Principle and Applications of Fiber Optics* (Beijing: Tsinghua University Press) pp165–166 (in Chinese) [张伟刚 2012 光纤光学原理及应用 (北京:清华大学出版社) 第165—166页]
- [5] Wei S L, Zhang W G, Fan H J, Geng P C, Shang J B, Yin L M, Xue X L 2011 *Acta Opt. Sin.* **31** 0806006 (in Chinese) [魏石磊, 张伟刚, 范弘建, 耿鹏程, 尚佳彬, 殷丽梅, 薛晓琳 2011 光学学报 **31** 0806006]
- [6] Zhu T, Rao Y J, Mo Q J 2005 *Acta Photon. Sin.* **34** 1697 (in Chinese) [朱涛, 饶云江, 莫秋菊 2005 光子学报 **34** 1697]
- [7] Wu Z G, Dong X Y, Zhang W G, Yuan S Z 2002 *Acta Nankai Univ.* **35** 10 (in Chinese) [武志刚, 董孝义, 张伟刚, 袁树忠 2002 南开大学学报 **35** 10]
- [8] Shang R B, Zhang W G, Zhu W B, Geng P C, Li X N, Cao Q X, Zen X 2013 *J. Opt.* **15** 075402
- [9] Li X L, Zhang X L, Chen L, Yan T Y 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 1946
- [10] Chiaiaoli F, Trono C, Baldini F 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 231109
- [11] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *Tech. Dig. OFC'95*, paper PD4-2
- [12] Zhang W G, Dong X Y 2003 *J. Optoelectron. Laser* **14** 939 (in Chinese) [张伟刚, 董孝义 2003 光电子·激光 **14** 939]
- [13] Fan H J, Zhang W G, Yan A D, Jiang M, Qu K N, Wang S W, Wang K 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1547 (in Chinese) [范弘建, 张伟刚, 颜爱东, 姜萌, 屈柯楠, 王思文, 王恺 2010 中国激光 **37** 1547]
- [14] Yoon M S, Kim H J, Kim S J, Han Y G 2013 *Opt. Lett.* **38** 2669
- [15] Tan Y Z, Sun L P, Jin L, Li J, Guan B O 2013 *Opt. Exp.* **21** 154
- [16] Fu M Y, Lin G R, Liu W F, Wu C W 2011 *Opt. Rev.* **18** 93
- [17] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N, et al. 1998 *Electron. Lett.* **34** 302
- [18] Lin C Y, Wang L A, Chern G W 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 1159
- [19] Miao R, Zhao J H, Dai Y T 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1949
- [20] Bock W J, Chen J H, Mikulic P 2007 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **56** 1176
- [21] Cui Z Q, Zhang W G, Liu F, Zhang H, Bai Z Y, Geng P C, Gao S C 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 1961
- [22] Zhou Q, Zhang W G, Chen L, Bai Z Y, Zhang L Y, Wang L, Wang B, Yan T Y 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 713
- [23] Zhang W G 2012 *Principle and Applications of Fiber Optics* (Beijing: Tsinghua University Press) pp198–199 (in Chinese) [张伟刚 2012 光纤光学原理及应用 (北京:清华大学出版社) 第198—199页]
- [24] Zhang W G 2016 *Novel Fiber Grating: Design, Technology and Application* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press) p120 (in Chinese) [张伟刚 2016 新型光纤光栅——设计、技术及应用 (上海:上海交通大学出版社) 第120页]
- [25] Zhang W G 2007 *Prog. Phys.* **27** 449 (in Chinese) [张伟刚 2007 物理学进展 **27** 449]
- [26] Zhang W G, Tu Q C, Sun L, Kai G Y, Yuan S J, Dong X Y 2004 *Prog. Phys.* **24** 398 (in Chinese) [张伟刚, 涂勤昌, 孙磊, 开桂云, 袁树忠, 董孝义 2004 物理学进展 **24** 398]
- [27] Zhang W G 2016 *Novel Fiber Grating: Design, Technology and Application* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press) pp32–36 (in Chinese) [张伟刚 2016 新型光纤光栅——设计、技术及应用 (上海:上海交通大学出版社) 第32—36页]
- [28] Lu S H, Feng S C, Ning T G 2011 *Int. Conf. Electron. Optoelectron.* **4** V4247
- [29] Wang R K, Rao Y J, Zhu T, Gu Y J 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 1409 (in Chinese) [王若崑, 饶云江, 朱涛, 谷彦菊 2007 光学学报 **27** 1409]
- [30] Grubsky V, Feinberg J 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 2296
- [31] Zhu T, Rao Y J, Wang J L 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1971
- [32] Melo M, Marques P V S 2013 *Photon. Sens.* **3** 81
- [33] Wang X, Yang J, Yuan L B 2010 *Chin. J. Lasers* **37** 1473 (in Chinese) [王雪, 杨军, 苑立波 2010 中国激光 **37** 1473]
- [34] Sakata H, Yamahata K 2012 *Opt. Lett.* **37** 1250
- [35] Li B, Liu Y, Tan Z W, Xu O, Lu S H, Jian S S 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 414 (in Chinese) [李彬, 刘艳, 谭中伟, 许鸥, 鲁韶华, 简水生 2008 光学学报 **28** 414]
- [36] Shang R B, Zhang W G, Zhu W B, Geng P C, Li X N, Cao X, Zen X 2013 *J. Opt.* **15** 075402
- [37] Luís C, José L S, Diana V, José M 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 2533
- [38] Lee C L, Liu L W 2009 *8th Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics* Shanghai, China, August 31–September 3, 1
- [39] Bai Z Y, Zhang W G, Gao S C, Geng P C, Zhang H, Li J L, Liu F 2013 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **25** 2111
- [40] Zhong X Y, Wang Y P, Liao C R, Yin G L, Zhou J T, Wang G J, Sun B, Tang J 2014 *IEEE Photons. J.* **6** 2201508

- [41] Geng P C 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [耿鹏程 2013 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [42] Zhu T, Song Y, Rao Y J, Zhu Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4738 (in Chinese) [朱涛, 宋韵, 饶云江, 朱永 2009 物理学报 **58** 4738]
- [43] Gao R, Jiang Y, Jiang L 2014 *Opt. Exp.* **22** 15697
- [44] Yin B, Bai Y L, Qi Y H, Feng S C, Jian S S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 214213 (in Chinese) [尹彬, 柏云龙, 齐艳辉, 冯素春, 简水生 2013 物理学报 **62** 214213]
- [45] Zhang W G 2016 *Novel Fiber Grating: Design, Technology and Application* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press) p92 (in Chinese) [张伟刚 2016 新型光纤光栅——设计、技术及应用 (上海: 上海交通大学出版社) 第 92 页]
- [46] Zhang W G 2016 *Novel Fiber Grating: Design, Technology and Application* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press) p93 (in Chinese) [张伟刚 2016 新型光纤光栅——设计、技术及应用 (上海: 上海交通大学出版社) 第 93 页]
- [47] Westbrook P S, Eggleton B J, Windeler R S 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 495
- [48] Han Q, Lan X. W, Huang J, Kaur A, Wei T, Gao Z, Xiao H 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1130
- [49] Zhang J, Tang X L, Dong J H, Wei T, Xiao H 2008 *Opt. Exp.* **16** 8317
- [50] Kerbage C, Windeler R S, Eggleton B J, Mach P, Dolinski M, Rogers J A 2002 *Opt. Commun.* **204** 179
- [51] Li J, Zhang W G, Du J B, Jiang M, Zhang Q, Liu Y P, Liu Z L, Qu K N, Liu Y G, Wang Z 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 705 (in Chinese) [李靖, 张伟刚, 杜江兵, 姜萌, 张琦, 刘亚萍, 刘卓琳, 屈柯楠, 刘艳格, 王志 2009 中国激光 **36** 705]
- [52] Guan C Y, Tian X Z, Li S Q, Zhong X, Shi J H, Yuan L B 2013 *Sens Actuator B: Chem.* **188** 768
- [53] Wang B 2016 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [王标 2016 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [54] Saffari P, Allsop T, Adebayo A, Webb D, Haynes R, Roth M 2014 *Opt. Lett.* **39** 3508
- [55] Wang B, Zhang W G, Bai Z Y, Wang L, Zhang L Y, Zhou Q, Chen L, Yan T Y 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 145
- [56] Fan H J, Zhang W G, Li X L, Wei S L, Yan A D, Wang K 2011 *Microw. Opt. Technol. Lett.* **53** 1470
- [57] Geng P C, Zhang W G, Gao S C, Zhang H, Li J L, Zhang S S, Bai Z Y, Wang L 2012 *Opt. Exp.* **20** 28557
- [58] Bai Z Y, Zhang W G, Gao S C, Zhang H, Wang, Liu F 2015 *Opt. Fiber Technol.* **21** 110
- [59] Bai Z Y, Zhang W G, Gao S C, Wang L 2014 *Optoelectron. Lett.* **10** 0176
- [60] Zhang W G 2016 *Novel Fiber Grating: Design, Technology and Application* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press) p108 (in Chinese) [张伟刚 2016 新型光纤光栅——设计、技术及应用 (上海: 上海交通大学出版社) 第 108 页]
- [61] Li X L, Zhang W G, Ruan J, Zhang S S 2012 *Electron. Lett.* **48** 235
- [62] Li X L, Zhang W G, Chen L, Yan T Y 2015 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 1946
- [63] Sakata H, Nishio K, Ichikawa M 2010 *Opt. Lett.* **35** 1061
- [64] Sakata H, Wakamiya K, Sasaki S 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 904
- [65] Fang L, Jia H Z 2014 *Opt. Exp.* **22** 11488
- [66] Caucheteur C, Debliquy M, Lahem D, Mégret P 2008 *Opt. Exp.* **16** 16854
- [67] Dandapat K, Tripathi S M, Chinifooroshan Y, Bock W J, Mikulic P 2016 *Opt. Lett.* **41** 4198



## SPECIAL TOPIC — Optical Fiber Sensor

Recent progress in design and fabrication of novel  
long-period fiber grating\*Zhang Wei-Gang<sup>1)†</sup> Zhang Yan-Xin<sup>2)</sup> Geng Peng-Cheng<sup>3)</sup> Wang Biao<sup>3)</sup> Li Xiao-Lan<sup>4)</sup>  
Wang Song<sup>1)</sup> Yan Tie-Yi<sup>1)</sup>

1) (Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China)

2) (School of Material Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

3) (46th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Tianjin 300220, China)

4) (School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

( Received 8 October 2016; revised manuscript received 8 December 2016 )

## Abstract

Long-period fiber grating (LPFG) is a kind of wide-range transmission passive photonic device with extensive applications in the field of fiber communication and fiber sensing. In this review, from the angle of refractive index spatial modulation, we extract three characteristic parameters of LPFG: grating period length, index modulated depth and normal orientation of grating plane, and classify LPFG as two types: uniform LPFG (none of these three parameters changes) and nonuniform LPFG (at least one of them changes), and analyze the deficiency of LPFG, including larger size than fiber Bragg grating, no reflection peak, too large bandwidth, polarization loss from single-side exposure, etc. We define the concept of novel LPFG (NLPFG) as the LPFGs based on general LPFG but having new structures and new characters by importing new factors from different aspects, like grating formed mechanism, grating structure, making material, processing technique, application performance, etc. Then we point out that the research significance of NLPFG lies in improving and exploring its real usable property, and making it practical by overcoming the defects of general LPFG in structure, property and application. We expound new techniques of LPFG fabrication, such as multi-exposure, apodized exposure, outfield action, coating and filling, fiber incised and welded, multi-dimensional modulation, and show some NLPFG examples written with these techniques. We build the spatial model of NLPFG to expand the refraction index modulation region from only fiber core to both core and cladding, and to correctly mark the direction of grating plane with tilted angle and azimuth angle. On this basis, we propose the design theory of NLPFG by adding those two angles into the coupling mode coefficient and solving the coupling mode equation. We also expound three different NLPFG design processes, as the direct design to start from given factors of grating, the reserve design to calculate the factors back from expected function or spectrum, and the direct-reserve design combined by them. Meanwhile, we introduce some typical design methods of NLPFG, like geometrical structure changed method, materials changed method, medium coated and embedded method, etc. In addition, we review the recent fabrication and typical application of NLPFG, then introduce different LPFG devices based on excentric core LPFG, multi-core LPFG, few-mode LPFG, stagger LPFG, mismatched LPFG, over-melted LPFG, phase-shift LPFG, tuning LPFG, coupled LPFG and cascaded LPFG, and show their sensing applications in strain, twisting, bending, temperature, displacement, gas concentration and biology. Finally, we provide a developing prospect of the research on NLPFG and give three possible means to improve the research, as innovating new gating structures, exploring new design methods and developing new fabrication techniques.

**Keywords:** fiber grating, long-period fiber grating, grating design, grating fabrication**PACS:** 07.60.Vg, 07.60.Ly, 07.07.Df**DOI:** 10.7498/aps.66.070704

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274181, 10974100, 61405179), the Doctoral Scientific Fund Project of the Ministry of Education, China (Grant No. 20120031110033), the Key Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 15JCZDJC39800), and the Development Project Cooperated Between University and Enterprise, China (Grant No. C201605013).

† Corresponding author. E-mail: zhangwg@nankai.edu.cn