

文章编号: 0258-7025(2009)05-1129-05

旋转折变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量

宋韵¹ 朱涛^{1,2} 饶云江^{1,2} 史翠华¹ 朱永¹

¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
²成都电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 四川 成都 610054

摘要 提出一种基于旋转折变型长周期光纤光栅(R-LPFG)实现应变和温度同时测量的新方法。旋转折变型长周期光纤光栅是利用高频 CO₂ 激光在扭曲的普通单模通信光纤上制作的。这种特殊折变结构实现了纤芯基模与不对称包层模 L_{1k} 奇模和偶模的同时耦合, 从而导致 R-LPFG 的谐振峰发生分裂。通过对这种光栅的应变和温度特性进行实验研究发现, 当对它施加轴向应力时, 其传输谱的两个谐振峰会向不同方向漂移; 而当外界温度改变时, 两个峰则会向同一方向漂移且波长漂移灵敏度几乎相同, 大约为 0.07 nm/°C。

关键词 测量; 光纤传感; 长周期光纤光栅; 旋转折变; 应变; 温度

中图分类号 TN212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1129

Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using a Long-Period Fiber Grating with Rotary Refractive Index Modulation

Song Yun¹ Zhu Tao^{1,2} Rao Yunjing^{1,2} Shi Cuihua¹ Zhu Yong¹

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems of Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
²Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies of Education Ministry of China, University of Electronics Science & Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

Abstract A new method to realize simultaneous measurement of strain and temperature by using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation (R-LPFG) which fabricated in twisted common communication optical fiber by using high-frequency CO₂ laser pulses, is reported. The fundamental core mode of R-LPFG simultaneously couples to the odd and the even modes of the asymmetric cladding modes (L_{1k}) due to especial refractive index distribution, which leads to two separated resonant peaks of R-LPFG. The strain and temperature characteristics of R-LPFG are studied experimentally. The results show that the two split resonant peaks continue separating when the strain was applied to it, but shift to the same direction and almost have the same temperature sensitivity when the environmental temperature changes. The temperature sensitivities are about ~0.07 nm/°C.

Key words measurement; optical fiber sensors; long period fiber grating; rotary refractive index modulation; strain; temperature

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是一种新型光纤无源

器件^[1],它具有熔接容易、后向反射小、插入损耗低、比布拉格光纤光栅具有更大的阻带宽度等优点,现

收稿日期: 2008-07-01; 收到修改稿日期: 2008-09-10

基金项目: 国家自然科学基金面上及重点基金(60807019,60537040)和重庆大学优秀博士学位论文风险基金资助课题。

作者简介: 宋韵(1983-),女,硕士研究生,主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。

E-mail: songyun19830308@126.com

导师简介: 饶云江(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感及通信器件方面的研究。E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

已在光纤通信和光纤传感等领域发挥越来越重要的作用,例如在光纤通信方面^[2,3]被用作带阻滤波器、掺铒光纤放大器的增益平坦器、模式转换器等,在光纤传感方面^[4~6]被用于测量温度、应变、扭曲及外界折射率等物理和化学参数。然而,利用 LPFG 测量各种参数时往往会受到外界温度的影响,从而直接影响测量的准确性。最近有报道提出利用 LPFG 谐振峰的不同响应(如波长的漂移、幅值的变化等)来实现包括温度测量在内的多参数测量的方法^[7,8],但这类方法仍然不能完全消除测量时温度带来的影响;也有报道指出在光子晶体光纤上制作 LPFG 可实现对温度的不敏感性^[9],但由于光子晶体光纤价格昂贵,熔接困难而不能被广泛应用。本文利用高频 CO₂ 激光脉冲在扭曲光纤上写出了折射率旋转度较大的旋转折变型长周期光纤光栅(R-LPFG),其光纤轴向折射率旋转变化的特殊结构使得 R-LPFG 的谐振峰发生了分裂现象,并且这两个分裂峰的谐振波长漂移对外界温度的响应方向相同、大小相近,而对轴向应变的响应却方向相反。因此,基于 R-LPFG 这种独特的应变和温度特性,可用于实现温度和应变的同时测量,从而解决应变测量中的温度串扰问题。

2 实验及结果

R-LPFG 的写入装置如图 1 所示,装置主要由一个带旋转盘的三维微动台和一个由计算机控制的高频 CO₂ 激光脉冲扫描系统组成。首先通过调节三维微动台三个方向的控制器,使微动台上表面待放入光纤区域位于 CO₂ 激光脉冲的焦平面上,同时使激光焦点与分度盘的圆心轴线重合。制作光栅时,将光纤一端固定,另一端固定在旋转盘的中轴线上,然后将转盘顺时针(或逆时针)旋转 θ 后固定,这样图中长度为 L 的光纤就发生了扭曲率为 $\eta = \theta/L$ 的扭曲,再通过计算机控制激光脉冲利用单侧写入法在该扭曲光纤上写出设计周期为 Λ ,周期数为 N 的 LPFG,这时的 LPFG 折变主要发生在激光入射一侧(如图 2(a)所示)。写好光栅后,再把旋转盘重新旋回原来位置,即释放光栅使其处于自由状态,这时光栅每个周期横截面的折射率分布沿光纤轴向是呈现旋转变化的(如图 2(b)所示),该光纤光栅即为 R-LPFG,定义制作时光纤扭曲率 η 也为 R-LPFG 的旋转率。实验中使用康宁 SMF-28 普通通信单模光纤制作出数支周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$,周期数 $N = 60$,

旋转率 $\eta = 1.5 \text{ rad/cm}$ 的 R-LPFG,其扭曲状态及自由状态下的典型传输谱如图 3 所示。由图可知,当光栅由扭曲状态释放回自由状态后,一个中心波长为 $\lambda = 1569.2 \text{ nm}$ 的谐振峰分裂成了两个中心波长分别为 $\lambda_1 = 1556.9 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1586.3 \text{ nm}$ 的谐振峰。

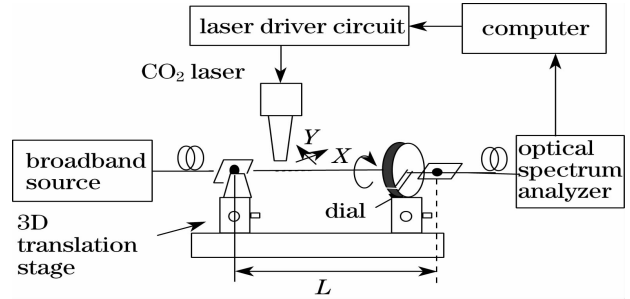


图 1 高频 CO₂ 激光制作 R-LPFG 装置图

Fig. 1 Set-up of R-LPFG fabricated by using high-frequency CO₂ laser

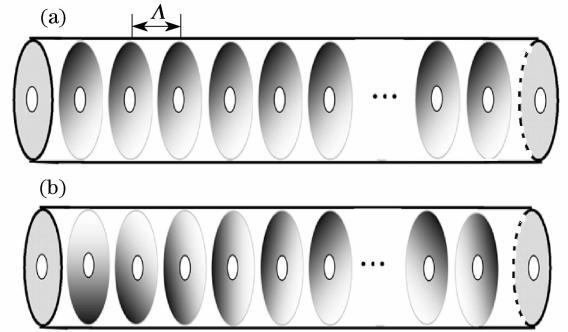


图 2 R-LPFG 在扭曲状态(a)和自由状态(b)的结构比较

Fig. 2 Comparison of structure between torsion (a) and free (b) R-LPFG

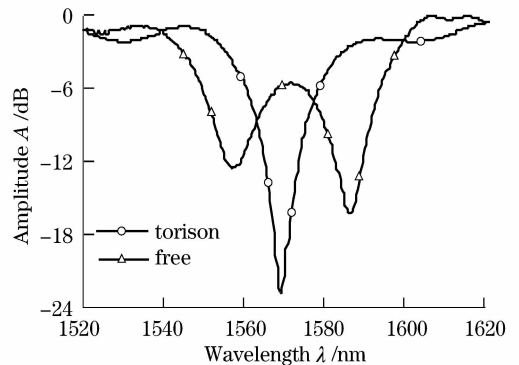


图 3 R-LPFG 在扭曲状态和自由状态的透射谱比较

Fig. 3 Comparison of transmission spectrum between torsion and free R-LPFG

轴向应变实验装置如图 4(a)所示,将呈自然拉伸状态的 R-LPFG 的左右两端分别固定在微动台上,实验时一端微动台保持静止不动,而通过调整另

一端微动台向光栅施加轴向应变。光栅两固定点间距为 L ，若微动台沿光栅轴向的移动量为 l ，则光栅的应变 $\epsilon = l/L$ 。通过实验发现，当对 R-LPFG 逐渐施加 $0 \sim 1000 \mu\epsilon$ 的轴向应力时，两个谐振峰会向两个不同方向漂移，波峰间距 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 逐渐增大。由图 4(b)可知， $\Delta\lambda$ 与轴向应变成良好的线性关系，灵敏度约为 $0.0053 \pm 0.0003 \text{ nm}/\mu\epsilon$ 。

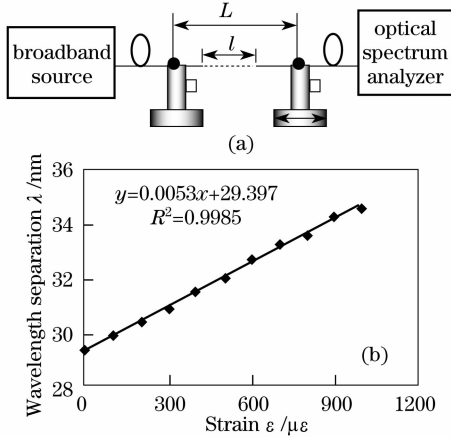


图 4 R-LPFG 的应变实验装置(a)和波长漂移与应变之间的关系(b)

Fig. 4 Setup (a) for strain test and relationship (b) between wavelength shift and strain of R-LPFG

在温度实验时，把 R-LPFG 的一端粘贴于高温交变湿热箱工作室的顶端，而另一端悬挂约 5 g 的轻物使光栅处于自由下垂状态，以便克服温度变化使光栅弯曲变形而引起的测量误差。温度实验从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 开始，逐步升高温度，每 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 测量一次，直至 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ；然后再逐渐降温，仍然每 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 测量一次，直至降温到 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。实验结果如图 5 所示，在 $20 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ 的温度变化过程中，两个分裂谐振峰随温度的升高向长波方向线性漂移，降温时向短波方向线性漂移，且升温降温时都具有较好的线性和重复性，波长灵敏均约为 $0.071 \pm 0.005 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

3 讨 论

由高频 CO_2 激光脉冲写入 LPFG 的原理可以知道^[10]，在扭曲光纤上单侧写出的 LPFG 折变主要发生在激光入射一侧，当扭曲释放后形成 R-LPFG 的每个光栅周期的折射率变化则在光纤轴向形成了旋转变化(如图 6 所示)，并且每个光栅周期的旋转度 $\varphi = \eta \cdot \Lambda$ 。

释放前扭曲光栅的相位匹配条件满足^[1]

$$\lambda_{\text{res}} = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \cdot \Lambda, \quad (1)$$

其中， λ_{res} 和 Λ 分别为扭曲光栅的谐振波长和光栅周

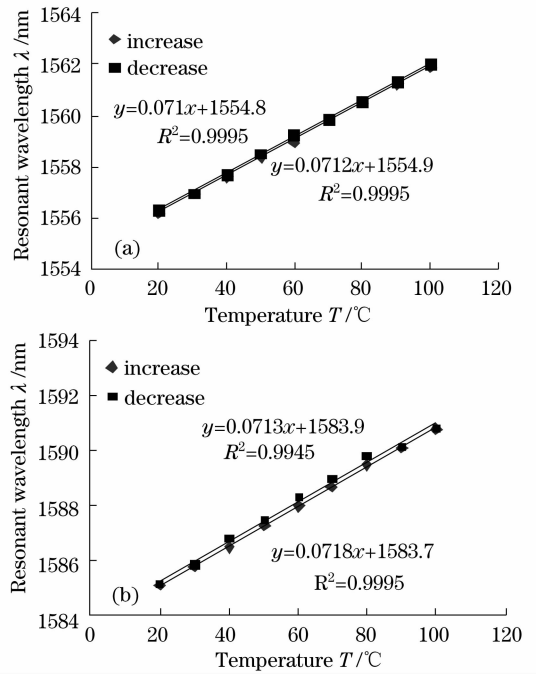


图 5 R-LPFG 的温度特性

(a) 左分裂峰；(b) 右分裂峰

Fig. 5 Temperature characteristics of R-LPFG.

(a) left split peak; (b) right split peak

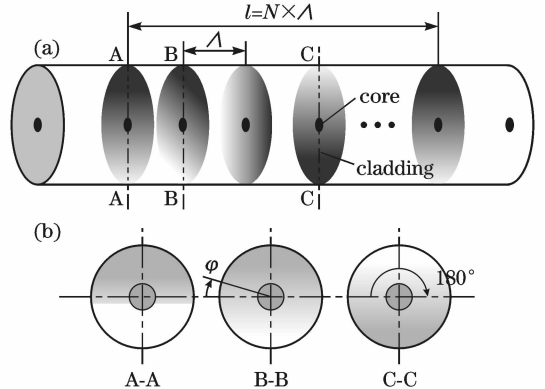


图 6 R-LPFG 折射率分布示意图

(a) 折变轴向分布；(b) 不同位置折变横截面分布

Fig. 6 Schematic of the refractive index of R-LPFG.

(a) along axial; (b) cross-section in different positions

期， $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 为纤芯基模和包层模的有效折射率。光纤扭曲后，沿光纤轴向产生了非均匀形变，使得均匀的纤芯基模只耦合到一阶非对称包层模 L_{1k} 中。当扭曲率较小的光栅释放后，得到的 R-LPFG 的纤芯基模只是与非对称包层模的奇模或偶模其中的一种发生有效耦合，所以谐振峰只发生了一定的漂移。而当光栅的扭曲率增大到一定程度后，纤芯基模会与非对称包层模的奇模和偶模同时发生耦合，因而原来单一的谐振峰就会得到两个分裂的谐振峰，这

与利用紫外写入法在光纤上写入倾斜光栅后扭曲光栅的情形类似^[11,12]。此外,由 R-LPFG 的制作过程可知,R-LPFG 是先将光纤扭曲后再利用高频 CO₂ 激光脉冲曝光,制作出光栅后再释放扭曲使光栅处于自由状态后得到的。在这一过程中会存在这样的状态,即光纤扭曲时产生的扭曲应力会在写入过程中因为激光的辐射而固化一部分在光栅中,即便是在最后还原光纤时释放掉了一部分扭曲应力,但是仍然有一部分还固化在光纤受辐射的部位,这将在 R-LPFG 中引入圆双折射,从而使得谐振峰发生变化。根据光纤光栅的扭曲响应可知^[13],当光纤扭曲率较低时(<1 rad/cm),纤芯基模和低阶对称包层模及高阶非对称包层模耦合形成的谐振峰波长漂移量较小,几乎不发生峰的分裂。R-LPFG 是光纤释放扭曲后得到的,残留在 R-LPFG 中的扭曲应力比未被释放前更低,所以由于残余扭曲应力使得 R-LPFG 光栅谐振波长发生漂移或者谐振峰发生分裂的作用相对较小,但却使 R-LPFG 的偏振相关损耗(PDL)不容易降得很低。

当对 R-LPFG 施加轴向应力时,受光栅的光弹性效应和双折射效应的影响^[14],应变带来的谐振峰波长变化式可表示为

$$\frac{d\lambda_{res}}{d\epsilon} = \lambda_{res} \cdot \gamma^{(\mu,k)} \cdot [1 + \Gamma_S^{(\mu,k)}], \quad (2)$$

其中, $\Gamma_S^{(\mu,k)}$ 表示光栅的应变灵敏度,它跟与纤芯基模耦合的包层模阶数相关; $\gamma^{(\mu,k)}$ 表示波导色散因子。由(2)式可知,光栅谐振峰波长应变灵敏度的大小和符号主要由 $\gamma^{(\mu,k)}$ 和 $\Gamma_S^{(\mu,k)}$ 两项决定,其中 $\gamma^{(\mu,k)}$ 不会影响谐振峰波长应变灵敏度的方向。由于 R-LPFG 的纤芯基模是与一阶非对称包层模的奇模和偶模同时发生耦合的,通过计算可得两个分裂谐振峰的应变灵敏度因子 $\Gamma_S^{(\mu,k)}$ 分别大于 1 和小于 1,所以两个分裂峰受到轴向应变时会移向不同的方向。基于光栅的热光效应可知,当外界温度改变时,谐振峰温度灵敏度主要受波导色散因子的影响,而波导色散因子在不同阶次的非对称包层模中的大小不同。但是 R-LPFG 的两个分裂峰是纤芯基模与同一个非对称包层模的奇模和偶模同时耦合而形成的,所以波导色散因子对两个分裂峰的影响是相同的,因此它们具有几乎相同的温度灵敏度。

由于 R-LPFG 两分裂峰谐振波长之间的距离几乎不受温度影响,而施加应变则可以改变这两个波长之间的距离,因此可利用 R-LPFG 设计一种无需温度补偿的应变传感器。另一方面,由于两个谐

振峰具有完全不同的应变灵敏度,假设温度和应变使得 λ_{left} 和 λ_{right} 分别漂移 $\Delta\lambda_{left}$ 和 $\Delta\lambda_{right}$,则利用这两个谐振峰波长不同的应变和温度灵敏度可实现对两个参量的同时测量。计算方法为

$$\begin{bmatrix} \Delta\epsilon \\ \Delta T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{left}^{\epsilon} & K_{left}^T \\ K_{right}^{\epsilon} & K_{right}^T \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_{left} \\ \Delta\lambda_{right} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, K_{left}^{ϵ} 和 K_{right}^{ϵ} 分别表示应变单独作用于 R-LPFG 时谐振波长 λ_{left} 和 λ_{right} 的应变灵敏度; K_{left}^T 和 K_{right}^T 分别表示温度单独作用于 R-LPFG 时谐振波长 λ_{left} 和 λ_{right} 的温度灵敏度。由矩阵论可知,只要系数矩阵满足 $K_{left}^{\epsilon} K_{right}^T \neq K_{left}^T K_{right}^{\epsilon}$,式(3)就有解。因此当应变和温度同时作用于 R-LPFG 时,只要测出 R-LPFG 的谐振波长 λ_{left} 和 λ_{right} 对应的变化量 $\Delta\lambda_{left}$ 和 $\Delta\lambda_{right}$,就可由式(3)解出应变变量 $\Delta\epsilon$ 和温度变化 ΔT ,从而达到用一根 R-LPFG 实现应变和温度同时测量的目的。从 R-LPFG 应变实验结果可以知道,在一定应变范围内,分裂出的两个谐振波长的漂移方向是相反的,可见相对于单个分裂峰利用两分裂峰之间的距离实现对应变的测量具有更大的测量灵敏度。

4 结 论

利用高频 CO₂ 激光脉冲在扭曲的普通单模通信光纤上写出了旋转度较大的 R-LPFG,其谐振峰在扭曲光纤释放后会发生峰的分裂。实验结果表明,随着轴向应变的增加,两个谐振峰会不断向两边分离;而当外界温度改变时,两个分裂峰会向同一方向漂移且波长漂移灵敏度几乎相同。利用 R-LPFG 这些特性,可制作高灵敏度的温度和应变同时测量的光纤光栅传感器。此外,R-LPFG 还可用于制作滤波器、光纤偏振器及各种光纤传感器等,因此这种器件在未来的光纤通信和传感领域将具有较大的潜在应用价值。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1):58~65
- 2 Rao Yunjiang, Zhu Tao, Ran Zhengling *et al.*. An all-fibre dynamic gain equalizer based on a novel long-period fibre grating written by high-frequency CO₂ laser pulses [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(12):1822~1824
- 3 Y. J. Rao, T. Zhu, Z. L. Ran *et al.*. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **229**:209~221
- 4 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao *et al.*. Refractive index characteristic for edge-written long - period fiber gratings induced by CO₂ laser pulses [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**

- (10):1730~1734
王久玲, 饶云江, 朱 涛等. CO₂ 激光脉冲边缘写入的长周期光纤光栅折射率特性研究[J]. 光学学报, 2007, **27**(10):1730~1734
- 5 Rao Yunjiang, Mo Qiuju, Zhu Tao. A novel-high sensitivity refractive index sensor with temperature self-compensating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):264~268
饶云江, 莫秋菊, 朱 涛. 一种新型温度自补偿高灵敏度折射率计[J]. 光学学报, 2006, **26**(2):264~268
- 6 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):389~392
王久玲, 饶云江, 朱 涛. 截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性[J]. 中国激光, 2007, **34**(3):389~392
- 7 Tao Zhu, Yunjiang Rao, Qiuju Mo. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a single ultralong-period fiber grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12):2700~2702
- 8 G. Rego, R. Falate, O. Ivanov *et al.*. Simultaneous temperature and strain measurements performed by a step-changed arc-induced long-period fiber grating [J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(9):1392~1396
- 9 H. Dobb, K. Kalli, D. J. Webb. Temperature-insensitive long period gratings sensors in photonic crystal fibre [J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(11):657~658
- 10 Wang Yiping, Rao Yunjiang. A technique fabricating long period fiber gratings by high-frequency CO₂ laser pluses [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(8):1322~1325
王义平, 饶云江. 高频 CO₂ 激光脉冲写入长周期光纤光栅的方法[J]. 电子学报, 2004, **32**(8):1322~1325
- 11 K. S. Lee, T. Erdogan. Transmissive tilted gratings for LP₀₁-to-LP₁₁ mode coupling [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10):1286~1288
- 12 R. B. Walker, S. J. Mihailov, P. Lu *et al.*. Shaping the radiation field of tilted fiber Bragg gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(5):962~974
- 13 O. V. Ivanov. Propagation and coupling of hybrid modes in twisted fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(4):716~723
- 14 U. L. Block, V. Dangui, M. J. F. Digonnet *et al.*. Origin of apparent resonance mode splitting in bent long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(2):1027~1034