

长周期光纤光栅及其在通信传感领域的新应用

何万迅¹, 施文康¹, 叶爱伦²

(1. 上海交通大学信息检测技术与仪器系, 上海 200030;

2. 上海交通大学光纤技术研究所, 上海 200030)

摘要:长周期光纤光栅是一种新型光纤器件。介绍了长周期光纤光栅的耦合机理、制备方法以及应用。其耦合机理是前向传输的纤芯基模与前向传输的各阶包层模式之间的耦合。制备原理是对光纤横向曝光, 使光纤的折射率指数在轴向发生周期性变化。阐明了长周期光纤光栅用于带通滤波、光上下路复用、光纤光源、光纤耦合、偏振器件、新型传感等新技术领域的思路, 给出了具体实现方法。并通过对其他方案对比, 说明了基于长周期光纤光栅器件的优点, 肯定了长周期光纤光栅在通信传感领域的价值。

关键词:长周期光纤光栅; 谐振波长; 谐振双峰分离; 光纤通信

中图分类号: O436. 1; TN929. 11 **文献标识码:** A

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG: Long Period Fiber Grating)是一种新型的波长选择滤波器。1996年, Ashish M. Vengsarkar 等学者先后发表了三篇论文^[1-3], 标志着长周期光纤光栅作为一种新型光纤器件的诞生。

与光纤 Bragg 光栅一样, 长周期光纤光栅也是在光纤轴向产生折射率的周期性调制。但不同于短周期的光纤 Bragg 光栅, 长周期光纤光栅的周期一般大于 100 μm 。在耦合机理方面, 长周期光纤光栅是前向传输的纤芯基模与前向传输的各阶包层模式之间的耦合(或包层模式与纤芯基模之间的耦合), 这与光纤 Bragg 光栅有本质的区别: 光纤 Bragg 光栅是前向传输的纤芯基模与后向反射的纤芯模式之间的耦合(除非另加说明, 一般指单模光纤光栅)。耦合机理的不同, 使长周期光纤光栅有明显的优点——基本没有后向反射, 这在某些对后向反射要求严格的场合就非常有用, 如避免光纤激光器的后向反射等。

论文包括三大部分, 第一部分对长周期光纤光栅的模式耦合进行了阐明, 同时对长周期光纤光栅的制备方法进行了分类; 在第二部分, 介绍了长周期光纤光栅的应用, 尤其对新技术领域的应用进行了较为详细的陈述; 最后, 对长周期光纤光

栅进行了总体的回顾与展望。

2 长周期光纤光栅耦合机理

对于长周期光纤光栅, 纤芯基模与各阶包层模式之间的耦合满足相位匹配条件:

$$B_{\infty} - B_1^{(n)} = 2P/\Lambda \quad (1)$$

式(1)中, B_{∞} 为前向传输纤芯基模传播常数; $B_1^{(n)}$ 为各阶包层模式传播常数; Λ 为长周期光纤光栅的周期。相位常数 $B = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 为模式有效折射率指数; λ 为光的波长。由式(1)得:

$$n_{\infty} - n_{cl}^{(n)} = K^{(n)}/\Lambda \quad (2)$$

n_{∞} 为纤芯模式有效折射率; $n_{cl}^{(n)}$ 为各阶包层模式有效折射率; $K^{(n)}$ 为各阶谐振波长。

满足相位匹配条件的特定波长由纤芯耦合进包层, 很快被衰减掉。在谱图上表现出一个损耗峰。

长周期光纤光栅制备的原理是使光纤的光学特性(折射率指数)在轴向发生周期性变化。可以在光源与光纤之间放置一块幅值掩模, 对光纤横向曝光来实现周期性的调制(掩模法), 也可以在光纤表面刻槽并周期性释放应力来实现(刻槽法)。根据制备光栅的光纤几何属性是否明显变化, 可以分成基于非形变的 LPFG 制备方法和基于形变的 LPFG 制备方法。基于非形变方法制备的光栅以掩模法为代表; 基于形变方法制备的光

栅以刻槽法比较成熟。根据刻槽的方式不同, 又可细分为切割机刻槽法、激光器刻槽法、电弧刻槽法、腐蚀刻槽法等。

3 长周期光纤光栅的应用

长周期光纤光栅最典型用于三个方面: EDFA增益平坦、带阻滤波器、光纤传感。

3.1 EDFA 增益平坦

通信系统中, 如果掺铒光纤放大器(EDFA)增益谱分布不平坦, 则各个信道增益不同, 一方面限制了无中继跨接距离, 另一方面也造成接收端误码率的增大。

可以用 Blazed 光栅进行增益平坦, 此法的缺陷在于总存有一定程度的反射光, 长周期光纤光栅可以克服这一缺点。将两个具有不同工作波长的长周期光纤光栅组合进行 EDFA 增益平坦, 在 $25\text{nm} \sim 30\text{nm}$ 带宽内 EDFA 增益谱的起伏小于 0.2dB 。将之应用于 $20 \times 5\text{Gb/s}$ 的 WDM 通信系统中, 通信信道以 0.6nm 的间隔分布于 $1550.4\text{nm} \sim 1561.8\text{nm}$ 的带宽内, 增益平坦带宽提高了 3 倍^[2]。

3.2 带阻滤波器

长周期光纤光栅的耦合机理决定了它对特定的波长具有损耗的能力, 在谱特性曲线上表现为一个损耗波峰。特殊设计长周期光纤光栅的周期及长度, 可以使谐振波长强烈衰减, 而其余波长基本没有损耗的通过, 从而实现了基于光纤的光学带阻滤波。其中光栅周期与调制深度决定谐振波长, 而光栅长度决定阻带带宽。

3.3 应力或温度传感器

长周期光纤光栅用作传感器不仅具有光纤传感器的一切优点: 如体积小、重量轻、可重复性好等, 而且对温度、应力变化非常灵敏。因此, 它是一种比较理想的温度或应力敏感元件。研究表明^[4], 长周期光纤光栅温度灵敏度是光纤 Bragg 光栅的 7 倍。长周期光纤光栅的多个损耗峰可以同时进行多轴应力及温度测量, 也可以将级联的长周期光纤光栅作为传感器阵列进行多参数分布式测量。

随着研究逐渐深入, 长周期光纤光栅应用越来越广。就目前所知, 在通信领域中的带通滤波、光上下路复用、光纤光源、光纤耦合、偏振器件等方面都有相关的研究结果。在传感领域, 由于其谱特性对温度、应力、微弯及外部折射率变化相当灵

敏, 因此, 能够产生温度、应力、微弯及外部折射率变化的物理量就间接导致其谱特性变化。目前研究结果包括长周期光纤光栅用作温度传感、振动测量、磁场传感、载重传感器、液体气体传感器等。

3.4 带通滤波器

光纤 Bragg 光栅带通滤波器一个潜在缺点是产生光反馈或不希望的光谐振。利用长周期光纤光栅组合设计成光学带通滤波器件, 可以避免这一点。

原理如图 1a。在四端口的瞬逝型(evanescent)单模光纤耦合器两纤芯中分别写入一对相位相反的长周期光纤光栅。将光栅的周期与折射率调制深度设定为特定比率, 这样在耦合作用长度内, 特定波长的光耦合得到抑制, 而其它波长能够进行光耦合, 从耦合器纤芯 1 耦合进纤芯 2。只有希望的特定波长的光由于耦合极弱, 保留在纤芯 1 中, 由主端口 1 输出, 从而实现了波长选择的带通滤波。为增强纤芯 2 的衰减程度, 可以在外部环绕放置金属吸收物质或采用高吸收能力的光纤(图 1b 或 c)。这种带通滤波器的通带带宽与旁瓣抑制一定程度上取决于耦合器的长度(耦合作用长度)与第二纤芯的衰减能力。

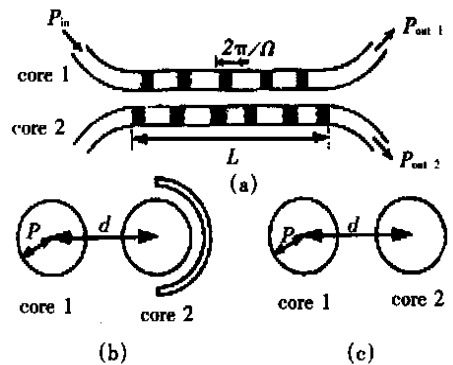


Fig. 1 Schematic diagram of the LPFG based band-pass filter

3.5 波长选择耦合器件及光上下路复用器(OADM)

基于长周期光纤光栅的波长选择耦合器件原理如图 2 所示。将两根光纤紧密接触。光进入光纤 1, 纤芯内的长周期光纤光栅 LPG1 将光栅谐振波长经模式耦合由纤芯基模转化为包层模式, 而其余波长不受影响, 在纤芯内传播。耦合的包层模式在两根光纤的接触区域内传播, 在光纤 2 包层激发出包层模式, 光纤 2 内的光栅(与光纤 1 内光栅完全相同)将光纤 2 内激发的包层模式耦合转化为纤芯基模, 从端口 2 输出。其余波长保持在光纤 1 纤芯, 由端口 1 输出。光栅应设计成谐振波

长等于欲处理的期望波长。

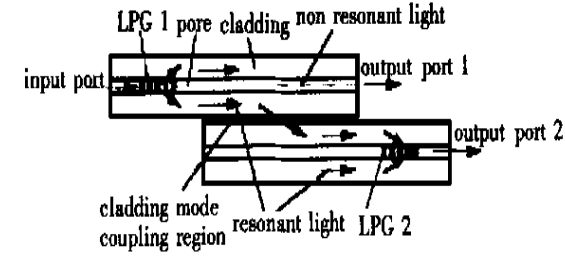


Fig. 2 Schematic diagram of the wavelength selective coupler composed of LPFGs

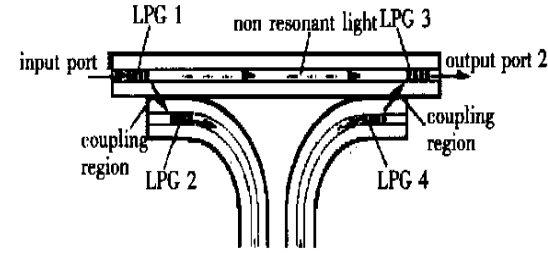


Fig. 3 OADM composed of two cladding-mode-couplers

使用两个以上所说的波长选择耦合器,可实现特定波长的光上下路复用方案。图3中,波长下路时,LPG1、LPG2起作用。多波长的光进入输入端口1,欲下路的波长在LPG1和LPG2作用下,经三态耦合(主光纤中的基模转化为包层模式,主光纤的包层模式激发LPG2所在光纤中的包层模式,LPG2所在光纤的包层模式转化为此光纤中的基模。),在LPG2所在光纤纤芯产生基模,经输出端口1输出。波长上路时,LPG4、LPG3起作用。欲上路的波长由输入端口2进入,经过三态耦合,由LPG4所在光纤纤芯基模转化为主光纤纤芯基模,与其它波长一起由输出端口2输出。

3.6 多波长光源

多波长光纤光源是目前波分复用系统光源发展新方向之一。将多个光纤 Bragg 光栅写入掺铒光纤是一种多波长光纤光源的生成方法。也可以把级联的长周期光纤光栅接续在掺铒超荧光光纤光源(super fluorescent fiber source)之后,利用级联的长周期光纤光栅的带阻滤波特性,得到多波长的光纤光源^[5]。但这种方法功率损耗较大。将级联的长周期光纤光栅写入双通后向(double pass backward)超荧光光纤光源之中,可以提高每个信道的功率,改善各个信道的信道消光比。图4中,来自980nm激光二极管的泵浦光通过一个波分复用器进入15m长的掺铒光纤,光纤的另一端也有一个波分复用器,用以隔离残余的泵浦信号和产生的前向信号,级联的长周期光纤光栅置于

第二个波分复用器之后,对前向信号进行滤波,具有双通功能的光纤镜面将前向信号反射为后向信号,60dB隔离度的隔离器用于防止输出端发生光反馈形成谐振腔。长周期光纤光栅轴向的折射率指数周期性调制使满足相位匹配条件的纤芯基模转化为包层模式,由于纤芯模式与包层模式有效折射率指数不同,因此传播同样长度后,两模式存有光程差。在第二个长周期光纤光栅作用下,包层模式重新又转化为纤芯模式,与纤芯原有的模式发生干涉,形成干涉图样,表现为输出谱上形成多波长带通结构。

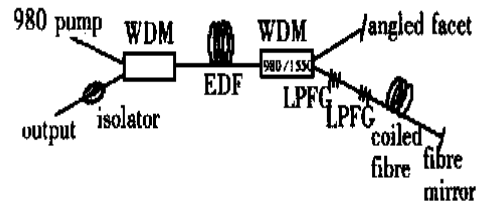


Fig. 4 Structure diagram of the multi-wavelength optical fiber source

3.7 两光纤之间的轴向耦合

传统上光纤之间的耦合采用诸如PC、SC等机械式连接器。这种方式对两根光纤轴向的工作距离及横向容差要求严格。在两根光纤之间采用GRIN棒、球面透镜等分离集成光学元件辅助耦合也是一种方法,相比而言,这种方法降低了对工作距离及横向容差的限制。一种新的延长工作距离,扩大容差范围的方法是:使用长周期光纤光栅,并将光纤的一端面设计成球面透镜。两根色散位移光纤分别为DSF1、DSF2,光束经光纤DSF1射出,经过长 Z_s 的轴向工作距离传播,光束被半径为 R_r 的半球状透镜端面光纤接收。光束中的大部分(具体与透镜半径有关)被激发为包层模式,在光纤中透镜之后的长周期光纤光栅辅助下,满足光栅相位匹配条件的特定波长由包层模式耦合转化为纤芯模式。光纤之间耦合的耦合效率与长周期光纤光栅透射损耗,激光器与光栅波长匹配误差,透镜与光栅之间的距离以及透镜直径有关系。

3.8 光纤偏振器

由于光纤能够产生双折射,在光纤中写入长周期光纤光栅,不同偏振状态的模式就有不同的有效折射率,满足相位匹配条件的谐振波长就不同。这样,光栅谱特性表现出波峰分离,就在一定波长使光的某个偏振状态能量高度损耗,即得到了光纤型偏振器件。将这种光纤型偏振器件应用

于光纤激光器或光纤荧光光源, 就获得了单一偏振状态的光源。

为提高这种光纤偏振器件的性能, 需要加强波峰分离, 也就是需要提高光纤的双折射能力。一种办法是采用特殊掺杂光纤, 如光敏的硼锆掺杂硅光纤^[6]; 也可以采用特种光纤, 如保偏光纤^[7]; 还可以对光纤截面特殊设计: 光纤纤芯为椭圆形, 包层圆形, 在包层中轴对称的形成两个边孔。在光纤中写入长周期光纤光栅, 谱图显示损耗峰发生明显分离, 达 43nm^[7]。

3.9 磁场传感器

根据弹性力学的有关理论, 光纤在外加轴向力的作用下, 将发生弹性形变, 弹光效应会引起材料光学折射率的改变, 使光纤中光栅的谱特性发生变化。在制备的长周期光纤光栅的外层涂一层磁性物质或将长周期光纤光栅固化入磁致伸缩材料, 或者在光纤光栅表面粘贴磁性薄膜。外界磁场使磁性物质发生磁致伸缩, 引起长周期光纤光栅轴向应变, 弹光效应使光纤内折射率变化, 影响光纤光栅的谱特性, 在谱图上表现为谐振峰移动。

以磁致伸缩效应比较典型的镍(Ni)为研究材料, 可得谐振波长变化量与磁场强度的关系:

$$\Delta \lambda_K = k \left[1 - \frac{n_{co}^2}{2} (P_{11} - 2LP_{12}) \right] \delta K_K \delta H^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式 3 中, $\Delta \lambda_K$ 为谐振波长变化量, k 为镍的磁致伸缩系数, n_{co} 为光纤纤芯折射率, L 为光纤材料泊松比, P_{11} 、 P_{12} 为光纤材料弹光系数张量, K_K 为初始谐振波长, H 为待测磁场强度。

随着外部磁场强度逐渐增大, 谐振波长变化量绝对值增大, 但值为负值(k 为负值), 即向短波长方向移动。

3.10 载重传感器

在光纤中写入长周期光纤光栅, 由于外加应力使光纤产生一定的双折射, 光纤光栅的谱特性发生变化, 发生损耗峰的分离, 双峰分离的程度就反映了外加的载重。将有光栅的光纤与另一根同样材质的光纤(无光栅)一起放在两块平板之间, 在上面平板施加载重。宽带 LED 光源产生的多波长非偏振光经光纤偏振分离器、偏振控制器, 形成一定偏振指向的偏振光, 进入写有长周期光纤光栅的光纤, 光谱分析仪对光纤出射光进行谱分析。

研究谱中 LP₀₅ 模式耦合产生的损耗峰。随外加载重逐渐增大, 两种偏振状态波峰谐振波长位移量逐渐变大, 两者保持良好线性关系。这种基于

长周期光纤光栅的载重传感器显示了极高的灵敏度, 达 500nm/(kg·mm), 是 Bragg 光栅载重传感器的 800 倍。

3.11 化学传感器

介绍一种测量液体浓度的高灵敏度化学传感器。长周期光纤光栅浸入蔗糖溶液, 光栅外部折射率的变化, 使谱特性出现谐振双峰分离, 通过测量谐振双峰分离的宽度, 便可获得相应光栅外部溶液的折射率, 就可获得蔗糖溶液的浓度。

两个中心波长为 1300nm 和 1500nm 的 LED 构成一对宽带光源, 经过宽带耦合器耦合输入光纤, 光纤中光栅由夹持件固定于一块铝板上, 浸入浓度可调的蔗糖溶液。用光谱分析仪分析长周期光纤光栅的透射谱特性。谐振双峰分离与浓度的关系如图 5。随蔗糖溶液浓度从 0 变化到 60wt%, 相应光栅外部折射率指数从 1.33 增加到 1.44, 谐振双峰分离增加 229.2nm, 双峰之间的宽度达 457.2nm。而且随溶液浓度的升高, 双峰分离速度加快。随波峰的分离, 两个谐振峰的幅值(高度)均逐渐减小。由图 5 还可知, 随蔗糖溶液浓度从 0 变化到 60wt%, 最小可测浓度从 0.09% 减小到 0.008%, 即敏感程度更高。两者之间基本保持线性。当蔗糖溶液浓度为 64wt% 时, 双峰分离可达 310nm。

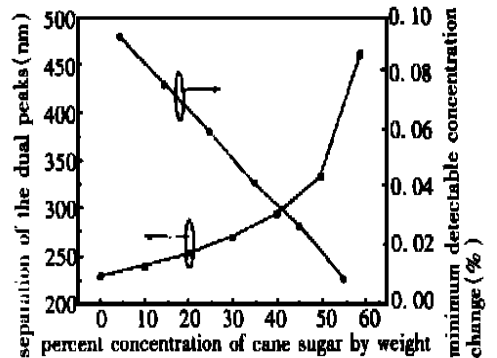


Fig. 5 Separation between dual resonant peaks (left) and minimum detectable concentration (right) against concentration of cane sugar

4 结 束 语

以上介绍了长周期光纤光栅的耦合机理、制备方法及应用。作为一种光纤器件, 长周期光纤光栅在带通滤波、光上下路复用、光纤光源、光纤耦合、偏振器件、新型传感等技术领域都有一定的应用价值。目前来看, 长周期光纤光栅只是处于一种探索性研究的实验室阶段, 距离实用化产品化还

有相当的距离。作为通信器件,其稳定性可调谐性的研究需要进一步实用化;用于传感领域,对被测量的敏感有待理想化。但是,无可否认,长周期光纤光栅是光纤器件研究的又一个重大突破。它的

出现,会对全光网络,密集波分复用等光通信技术及光纤传感技术的发展起重要的作用,其应用前景极为广阔。

参考文献:

- [1] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, et al. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. Journal of Light wave Technology, 1996, 14(1): 58- 65.
- [2] Vengsarkar A M, Pedrazzani J R, Judkins J B, et al. Long-period fiber-grating-based gain equalizers[J]. Opt. Lett, 1996, 21(5): 336- 338.
- [3] Bhatia V, Vengsarkar A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. Opt. Lett, 1996, 21(9): 692- 694.
- [4] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8), 1442- 1463.
- [5] Gu X J. Wavelength-division multiplexing isolation fiber filter and light source using cascaded long-period fiber gratings[J]. Opt. Lett, 1998, 23(7): 509- 510.
- [6] Ortega B, Dong L, Liu W F, et al. High-performance optical fiber polarizers based on long-period gratings in birefringent optical fibers[J]. IEEE Photonics Technol. Lett, 1997, 9(10): 1370- 1372.
- [7] Kurkov A S, Douay M, Duhem O, et al. Long-period fiber grating as a wavelength selective polarisation element[J]. Electron. Lett, 1997, 33(1): 616- 617.
- [8] Duhem O, Douay M. Effect of UV-induced birefringence on long-period-grating coupling characteristics[J]. Electron. Lett, 2000, 36(5): 416- 417.

Long period fiber grating and its new applications in communication and sensing

HE Wan-xun¹, SHI Wen-kang¹, YE Ai-lun²

(1. Department of Information Detection Technology and Instrumentation,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. Institute of Optical Fiber Technology,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Long period fiber grating(LPFG) is a new kind of optical fiber element. The paper presents its mode coupling mechanism, the fabrication methods as well as its applications. The coupling is between forward-propagating core fundamental modes and forward-propagating cladding modes. By transverse exposure, periodical modulation of refractive index is formed along the axis of optical fiber. Ideas about applications of LPFG to band-pass filters, optical add/drop multiplexing, optical fiber sources, coupling of fibers, optical fiber polarizers and novel sensing are illustrated. In comparison with other schemes, advantages of the LPFG based devices and an important role of the LPFG in communication and sensing technology are demonstrated in detail.

Key words: long period fiber gratings; resonant wavelength; separation between dual resonant peaks; optical fiber communication

作者简介:何万迅(1974-),男,河南洛阳人,上海交通大学博士研究生,主要从事光纤传感,光纤通信,信号检测方面的研究。