

一种新的长周期光纤光栅制作方法

艾 江 叶爱伦 刘宇乔

(区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海交通大学, 上海 200030)

陈益新 李昌敏

(上海交通大学应用物理系, 上海 200030)

摘 要 提出了长周期光纤光栅的一种新的制作方法, 通过对光纤周期性刻槽并加热位伸引入纤芯形变, 而使得纤芯折射率产生周期性变化。文中给出实验结果, 并对其基本原理进行理论分析。这种长周期光纤光栅可应用于需要宽阻带滤波器的波分复用系统。

关键词 长周期光纤光栅, 传播常数, 纤芯折射率。

1 引 言

自 1978 年 Hill 等人^[1]首次发现掺锗光纤中的光敏性发来, 对其研究与应用得到了很大的发展。最初, 人们主要研究短周期光纤光栅, 并取得了许多成果。基于耦合基模光到包层模的长周期光栅, 由于具有低插入损耗、低反向反射, 开始受到人们的关注。目前长周期光栅的制作大多采用在掺锗载氢光纤中, 通过紫外光对纤芯进行照射, 而引入大的折射率周期性变化, 这种长周期光纤光栅的性能, 包括应力、温度、弯曲等^[2], 易受外界环境的影响。另一种制作长周期光纤光栅工艺, 是使用 CO₂ 激光器产生光纤纤芯的周期性变化。这种方法可获得较大的有效折射率变化 ($\Delta n \approx 0.1$), 器件性能稳定, 对环境变化较不敏感^[3, 4]。然而这种方法工艺复杂、成本昂贵, 不适于大规模生产。

本文提出了一种新的长周期光纤光栅制作方法, 通过对光纤周期性机械刻槽并加热拉伸引入纤芯形变, 而使得纤芯折射率产生周期性变化。

2 基本原理

光纤光栅的最基本原理是相位匹配条件:

$$\beta_1 - \beta_2 = 2\pi/\Lambda$$

式中 Λ 为模式 1 耦合到模式 2 所要求的光栅周期。在单模光纤中, 基模 LP₀₁ 传播常数用 β_{01} 表示。若要将正向传播导波模式耦合到反向传播导波模式, 从前面给的相位匹配条件可得:

$$2\pi/\Lambda = \beta_1 - \beta_2 = \beta_{01} - (-\beta_{01}) = 2\beta_{01}$$

如图 1 所示, 即要求一小的光栅周期 ($\Lambda < 1 \mu\text{m}$), 这些称为光纤布拉格光栅, 即短周期光纤

光栅。若要将正向传播导波模式耦合到正向传播包层模式，包层模传播常数用 $\beta_{cl}^{(n)}$ 表示，其中 n 为模的阶数，则根据相位匹配条件有：

$$2\pi/\Lambda = \beta_1 - \beta_2 = \beta_{01} - \beta_{cl}^{(n)},$$

正向传播导波模式和正向包层模式的传播常数

$\beta_{cl}^{(n)}$ 都为正，则 $\beta_{01} - \beta_{cl}^{(n)}$ 的差使得 $2\pi/\Lambda$ 很小，导致 Λ 很大，一般为几百微米。

为求解基模和一系列包层模的传播常数，利用数学工具直接对特征方程：

$$U \frac{J_{m+1}(U)}{J_m(U)} = W \frac{K_{m+1}(W)}{K_m(W)} \tag{1}$$

求解。考虑到为求解包层模式的复传播常数，需要在特征方程式中对第一类贝塞尔函数 $J_m(U)$ 和第二类变态贝塞尔函数 $K_m(W)$ 中的变量 U 、 W 代入复数，用 (r) 、 (i) 标记实、虚部，则定义： $\beta = \beta^{(r)} + i\beta^{(i)}$ ； $U = U^{(r)} + iU^{(i)}$ ； $W = W^{(r)} + iW^{(i)}$ 。而在第一类贝塞尔函数和第二类变态贝塞尔函数中的变量只允许使用实数，所以引用第一类贝塞尔函数和第二类变态贝塞尔函数的积分形式为

$$\left. \begin{aligned} J_m(z) &= \frac{i^m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp(-iz \cos \theta) \cos(m\theta) d\theta \\ K_m(z) &= \int_0^\infty \exp(-z \cosh t) \cosh(mt) dt \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

在求解特征方程隐函数时，对应同一 m 值，可以求得无限多个解(模)，这是由于函数 $J_n(x)$ 属于伪周期函数。对于能给出相同归一化传输系数

(β/k) 的归一化频率 ν 的解，从低的方向顺次附以 $l = 1, l = 2, \dots$ 等脚标，作为模的第二个序号，而称为 TM_{0l} 、 TE_{0l} 、 EH_{ml} 和 HE_{ml} 模，对于弱导阶跃型剖面光纤，可简并为 LP_{ml} 模。考虑到上述原因，在求解时，赋予恰当的初始值是至关重要的。为此，经过大量的计算，寻找到恰当的求解 LP_{ml} 模的各初始值，可求得基模和几个低阶包层模式的归一化传播常数 $\beta^{(n)}/k$ 与归一化频率 ν 之间的关系如图 2 所示。从图中可看出， $\beta_{cl}^{(n)}$ 随 n 增加而减小，并且随着归一化频率的增加，包层模式的归一化传播常数也逐渐增加，则包层模式的

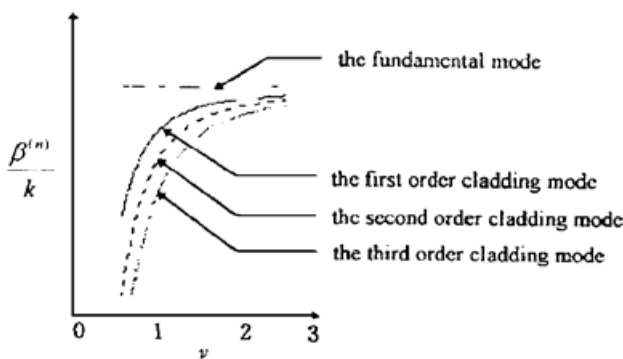


Fig. 2 The normalized propagation constant of cladding modes $\beta_{cl}^{(n)}/k$, as function of the normalized frequency ν

传播常数 $\beta_{cl}^{(n)}$ 也逐渐增加。从图 2 中基模与包层模传播常数的差 $\beta_{01} - \beta_{cl}^{(n)}$ 与归一化频率 ν 之间关系可看出基模应在更高的频率与高阶包层模耦合。即存在另一个光频率 ω' ($\omega' > \omega$)，其基模的传播常数用 β'_{01} 表示 ($\beta'_{01} > \beta_{01}$)，对于光栅周期为 Λ 、光频率为 ω 时，支持耦合 β_{01} 模式

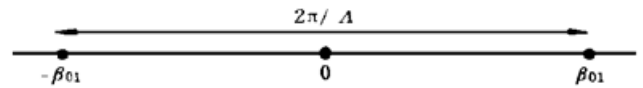


Fig. 1 Phase matching consideration for short-period gratings

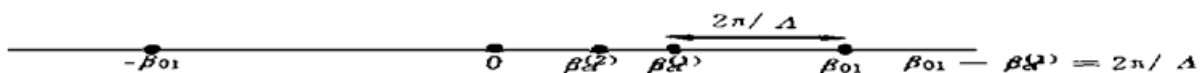


Fig. 3 Phase matching consideration coupling from a forward-propagating guided mode to first-order forward-propagating cladding mode

到第 1 阶包层模式 $\beta_{cl}^{(1)}$ 的相位匹配条件, 如图 3 所示; 当光频率为 ω' 时, 支持 β_{01} 耦合到第 2 阶包层模式 $\beta_{cl}^{(2)}$ 的相位匹配条件, 如图 4 所示。所以对于一给定光栅周期, 可以导致基模和几个不同包层模式间的模式耦合, 且基模在更高的频率与高阶包层模耦合, 反映为存在一系列不同波长和大小尖锐损耗峰。

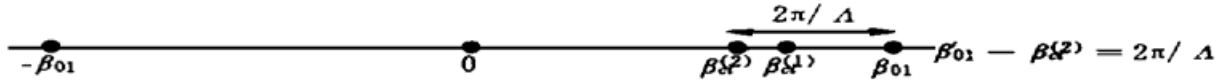


Fig. 4 Phase matching consideration coupling from a forward-propagating guided mode to second-order forward-propagating cladding mode

3 实 验

3.1 长周期光纤光栅的制作

1) 用精密切割机在光纤表面上刻周期性的 V 型槽, V 型槽的周期数和间距取决于所需滤波器的共振波长和带宽等。V 型槽的深度及形状将影响光纤光栅的折射率分布轮廓, 并从而决定光栅的效率。

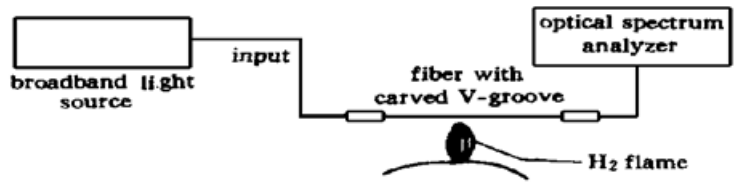


Fig. 5 Experimental setup for long-period fiber grating fabrication

2) 把刻好周期性 V 型槽的光纤置于“光纤拉锥机”上, 如图 5 所示, 光纤一端与光源连接, 另一端连接光学光谱分析仪进行监测, 用氢气火焰对光纤 V 型槽区域进行拉伸退火, 由于受熔融玻璃表面应力影响,

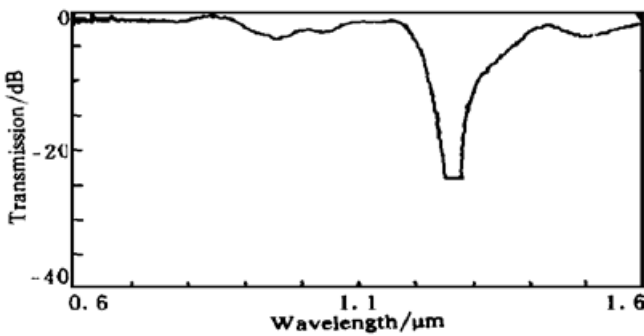


Fig. 6 Transmission spectrum of long-period grating fiber

被刻 V 型槽一边光纤纤芯的不平衡等因素, 而使得纤芯产生周期性畸变, 导致纤芯折射率的周期性变化。图 6 显示了使用上述方法研制长周期光纤光栅(周期 $\Lambda = 500 \mu\text{m}$) 的实验结果。研制成功的长周期光纤光栅的传输谱特性: 最大吸收的峰值波长 $\lambda = 1270 \text{ nm}$, 吸收大于 25 dB, 阻带宽为 30 nm。图中最大吸收区的频谱峰值被截断是由于测量的光源强度不够, 光谱分析仪达到测量极限所致。初步实验所得光纤光栅的插入损耗为 2 dB, 通过改善工艺可以进一步降低损耗。

结 论 本文提出了一种新的长周期光纤光栅的制作方法: 用精密切割机对光纤周期性机械刻槽, 并对 V 型槽区加热拉伸。研制成功的这种长周期光纤光栅具有宽阻带特性(30 nm)可应用于需要宽阻带滤波器的波分复用系统。

本文研制的光纤光栅实验样品是在上海交通大学薄膜与微细技术国家教委部门开放实验室进行精密机械刻槽, 并得到了冯建智同志热诚协助, 特此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides application to reflection filter fabrication. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(8) : 647~ 649
- [2] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1) : 58~ 65
- [3] Narayanan C, Presby H M, Vengsarkar A M. Band-rejection fibre filter using periodic core deformation. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(4) : 280~ 281
- [4] Davis D D, Gaylord T K, Glytsis E N *et al.*. Long-period fiber grating fabrication with focused CO₂ laser pulses. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3) : 302~ 303

A Novel Fabrication Technique of Long Period Fiber Gratings

Ai Jiang Ye Ailun Liu Yuqiao

(*The State Key Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks and
Advanced Optical Fiber Communication Systems,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030*)

Chen Yixin Li Changmin

(*Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 20030*)

(Received 23 January 1998; revised 5 June 1998)

Abstract A Novel fabrication technique of long-period fiber gratings is proposed, which are fabricated with periodic modulation of the refractive index of the core by heating and tapering fiber with carved periodic V-grooves. The experimental results are presented, and their fundamental principle is analysed. The most common use of the long-period fiber gratings is as a broadband rejection filter for WDM systems.

Key words long-period fiber grating, propagation constant, refractive index of the core.