

文章编号: 0253-2239(2002)09-1088-04

环境折射率变化对长周期光栅特性影响的研究*

童 治 魏 淮 王目光 王 智 简水生
(北方交通大学光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 将长周期光纤光栅简化为三层阶跃折射率波导结构, 采用弱导标量近似和泄漏模式的概念结合耦合模理论较全面地、定量地分析了环境折射率变化对长周期光纤光栅谐振峰位置和深度等特性的影响, 获得了一些有益的结论, 与实验符合得很好。

关键词: 长周期光纤光栅; 标量近似; 泄漏模式; 耦合模

中图分类号: TN25 文献标识码: A

1 引 言

作为一种具有优秀品质的光纤型无源器件, 长周期光纤光栅受到了越来越多的重视和研究。长周期光纤光栅具有和布拉格光栅不同的耦合特性。由于其周期较长, 因此在模式耦合的相位匹配方程中 $2\pi/\Lambda$ 项很小, 传输常数相差很小的两模式之间就可以满足相位匹配条件^[2], 导致了基模和前向包层模式而不是与后向基模的耦合。正是这一不同决定了长周期光栅与布拉格光栅显著的差别。由于涉及到包层模式, 长周期光纤光栅的温度、应力特性相比短周期光栅都有了明显不同。特别是, 当外界折射率发生变化时, 长周期光栅的谐振峰的位置和深度都会发生较大的变化。针对这一现象的研究, 对于长周期光纤光栅的封装、二次涂覆乃至将其作为环境变化传感器的应用无疑具有重要的指导意义。

文献 4 报道了长周期光纤光栅谐振峰随环境折射率变化的现象。对一个特定的谐振峰, 当外界折射率从 1 逐渐变大时, 谐振峰向短波长移动并变浅, 直至消失, 当外界折射率高于一定值时, 谐振峰在稍长波长位置重新出现, 并随环境折射率的升高而变深。但文献中采用射线理论分析, 物理意义不清晰。

本文以三层阶跃折射率波导结构为基础, 用弱导标量近似和耦合模理论详细分析了环境折射率较小时其变化对长周期光纤光栅包层模式传播常数和耦合系数的影响, 对于外界折射率较高的情况用泄

漏模式理论进行了分析, 从而获得了长周期光栅不同谐振峰随外界折射率变化的关系, 与实验现象符合得很好。

2 理论模型与分析

长周期光纤光栅制作时需要剥去涂覆层, 形成裸光纤后再进行紫外写入。因此普通氢载长周期光栅可以看作以空气为外包层的三层阶跃折射率波导结构(如图 1), 这种波导结构可传输多个模式。根据文献 2 的结论, 在均匀折射率调制的长周期光纤光栅结构中, 只有阶次为 1 的前向混合模式(HE_{1v} 和 EH_{1v})能与基模发生耦合, 而低阶的 EH_{1v} 模由于在纤芯中功率分布很小, 不能形成有效的能量耦合, 因此在大多数情况下, 只考虑基模与 HE_{1v} 模(相当于 LP_{0v} 模)发生耦合的情况。

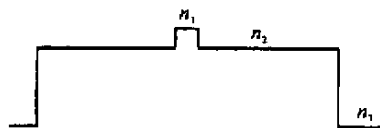


Fig. 1 Three-layer step index waveguide

根据文献 7 的结论, 三层阶跃波导结构不满足弱导条件, 但对于远离截止的模式其模场分布形式与弱导光纤的分布一致, 并且光场的纵向分量远小于横向分量, 因此我们可以采用标量线偏振近似法求解各模式的传播常数和场分布, 相比文献 2 采用严格的矢量法求解, 标量近似简洁明了, 便于数值求解, 并且可以得到足够的精度, 也可以用于更复杂的波导结构如 B-Ge 光纤的分析。

设波导中存在 $\{0, e_y, e_z, h_x, 0, h_z\}$ 的线偏振模

* 国家“863”计划(863-317-02-04-99)资助课题。

E-mail: zhtong@center.njtu.edu.cn

收稿日期: 2001-07-30; 收到修改稿日期: 2001-11-02

式 利用边界连续条件写出三层波导的特征方向^[1] , 并且只考虑零阶情况 , 可以得到 LP_{0v} 诸模式的传播常数 β_{0v} , 并可以获得波导中的场分布。从耦合模方向^[3] 可得长周期光纤光栅基模输出归一化功率(即透射谱) 的表达式 :

$$T = \cos^2\left(\sqrt{k_{01-0v}^2 + \delta^2} L\right) + \frac{1}{1 + k_{01-0v}^2/\delta^2} \sin^2\left(\sqrt{k_{01-0v}^2 + \delta^2} L\right), \quad (1)$$

式中 L 为光栅的长度 , δ 为相位失配度 , 不考虑包层的折射率改变和光栅的啁啾时 ,

$$\delta = \frac{1}{2}(\beta_{01} + \Delta\beta_{01} - \beta_{0v}) - \frac{\pi}{\Lambda}, \quad (2)$$

($v = 2, 3, 4, \dots$)

式中 $\Delta\beta_{01}$ 表示由于紫外光折变引起的基模传播常数的增加 , Λ 为长周期光栅的周期。当 $\delta = 0$ 时 , 即满足相位匹配条件 , 可确定光栅谐振峰的位置 :

$$\lambda_{\max} = (n_{\text{eff}}^{01} + \Delta n^{01} - n_{\text{eff}}^{0v})\Lambda, \quad (3)$$

($v = 2, 3, 4, \dots$)

式中 n_{eff}^{01} 和 n_{eff}^{0v} 表示基模和第 v 个包层模的有效折射率 , Δn^{01} 为由于紫外光折变引起的基模有效折射率的增加 , 因此求出各模式的传播常数后就可以确定谐振峰的位置。 k_{01-0v} 为基模和包层模间的耦合系数 , 用线偏振模形式表示为

$$k_{01-0v} = \left(\omega \varepsilon_0 n_1 \Delta n \int_{\text{core}} \mathbf{e}_{y,01} \cdot \mathbf{e}_{y,0v} r dr d\varphi \right) / 2, \quad (4)$$

式中 ω 为光频 , ε_0 为真空介电常数 , Δn 为光致折射率变化幅度 , $\mathbf{e}_{y,01}$ 和 $\mathbf{e}_{y,0v}$ 分别为基模和包层模的横向电场分布 , 它们满足功率归一化条件 :

$$P = \frac{1}{2} \text{Re} \int_{\text{core}} (\mathbf{e}_y \times \mathbf{h}_x^*) r dr d\varphi = 1, \quad (5)$$

通过标量法及 (5) 式求出场分布后就可以按 (4) 式求出耦合系数 , 至此长周期光纤光栅的特性就可以确定了。

当环境折射率从 1 逐渐增大时 , 即三层波导模型的最外层 n_3 折射率的变大 , 引起包层模式传输常数 β_{0v} 和场分布的变化(认为基模不发生变化 , 这也是布拉格光栅基本不受环境折射率影响的原因) , 从而导致了相位匹配条件和耦合系数的改变 , 最后改变了长周期光栅的谐振波长和透射峰深度。当环境折射率较大以致接近于包层折射率时 , 三层波导中的包层模式由大到小依次截止 , 此时表现为长周期光纤光栅的谐振峰依次消失。当环境折射率高于包层折射率时 , 此时在波导中不存在离散的包层模

式 精确的计算应当考虑基模到辐射模式的耦合。为简便起见 , 我们采用泄漏模式的概念^[6] 分析当环境折射率高于包层折射率时长周期光纤光栅的透射谱特性。

当 $n_3 \leq n_2$ 时 , 波导中除基模外只存在连续的辐射模 , 其能量向波导外辐射 ; 当外包层折射率较高 , 内外包层分界面的菲涅耳反射较大时 , 在波导中可以存在所谓的泄漏模式 , 此时对于特定入射角的光线 , 虽然在外包层分界面上不满足全反射条件 , 但依靠菲涅耳反射仍然可以以很小的损耗传输。泄漏模式仍然属于辐射模 , 但可以认为是高于截止条件的传导模式 , 具有离散的解 , 其传播常数为复数 , 实部代表相位 , 虚部代表损耗。因此当环境折射率高于包层折射率导致包层模截止时 , 利用泄漏模式的理论仍然可以建立相位匹配和耦合系数的概念。由于泄漏模式主要存在于包层中 , 忽略纤芯部分 , 将上述三层波导近似看作二层平面波导 , 利用射线理论 , 可以推导出波导中存在的 TE 模(即相当于 LP_{0v} 模) 的传播常数的实部近似为^[5]

$$\beta_r^m = [n_2^2 k^2 - (m\pi/d)^2]^{1/2}, \quad (6)$$

($m = 1, 2, 3, \dots$)

式中 , $k = 2\pi/\lambda$ 为光在真空中的波数 , d 为包层的直径 , 但在具体计算中对于精度要求高的地方还需要使用精确公式 , 详细情形参考文献 [5] 。由于泄漏模式并不是正规的传导模式 , 而且是动态的 , 因此要按照导模的方式写出其场分布并计算其耦合系数是很困难的。我们在这里通过实验估算了其耦合系数并定性地进行了分析。由于泄漏模式有损耗 , 导致在波导中的场强小于传导模式 , 因此其与基模的耦合系数也较小 , 相比与传导包层模的耦合具有较浅的透射谱深度 , 随着环境折射率的升高 , 在包层界面处的反射率增强 , 使泄漏模式的耦合变小 , 耦合系数变大 , 从而谐振峰深度加大。

以上我们建立了描述环境折射率变化对长周期光纤光栅耦合特性影响的模型 , 下面以此为基础进行具体的数值分析。

3 数值模拟和实验结果

这里我们按氢载普通单模光纤的参量进行计算。取 $n_1 = 1.4586$, $n_2 = 1.45$, 纤芯半径 $2.625 \mu\text{m}$, 紫外光致折射率变化 4×10^{-4} , 光栅长度 30 mm 。这里我们认为模式的有效折射率不随波长变化(或变化很小) , 这在本文所用波长变化范围

里是成立的。因此我们只计算了 1540 nm 波长处的各模式传输常数,进而计算了各模式的有效折射率。这种近似可以大大降低计算量,同时也具有足够的精度。

图 2 计算了当环境折射率分别为 1.33, 1.42, 1.50 时 LP₀₂ ~ LP₀₈ 诸包层模式谐振峰波长相对于环境为空气时的移动(以向短波长移动为正)。由图可见,当环境折射率小于包层折射率时,随着 n₃ 的增加,长周期光栅的各个谐振峰都向短波长移动,且谐振峰模式的阶次越高移动的越多;当环境折射率高于包层折射率的时候,此时应用泄漏模式理论计算传播常数,由(6)式可知,传播常数与 n₃ 无关,因此出现的谐振峰位置是固定的,不随环境折射率的变化而变化,这与我们下面的实验符合得很好。图 3 计算了 LP₀₂ ~ LP₀₆ 五个谐振峰在环境折射率为 1.00 和 1.42 时的形状。

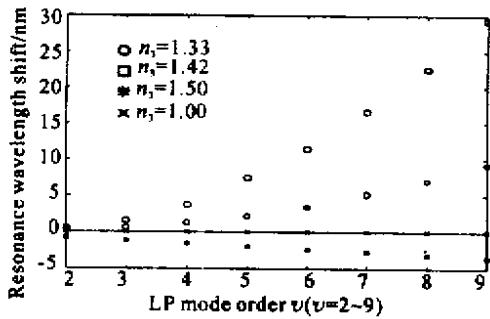


Fig.2 Calculated LPG's resonance wavelength shift versus LP mode order at different ambient refractive index (assume shifting to shorter wavelength is positive)

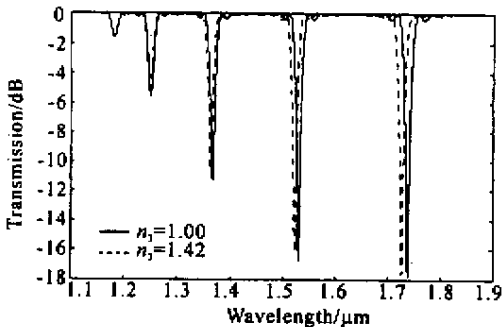


Fig.3 Calculated LPG's transmission spectrum at different ambient refractive index (LP₀₂ ~ LP₀₆)

图 4 计算了耦合到 LP₀₅ 包层模式的透射谱形状随环境折射率变化的情况。由图可见,当环境折射率为 1.33 时,谐振峰波长向短波长移动 3 nm 左右,而当折射率为 1.50 时,谐振波长向长波长移动 2.5 nm 左右。通过对耦合系数的计算,我们发现,当环境折射率小于包层折射率时,随着 n₃ 的增加,

耦合系数逐渐减小,当 $kn_3 \geq \beta_{0v}$ 时该包层模式截止,此时耦合系数为零,谐振峰消失,并且各谐振峰按包层模式阶次由高到低依次消失;当环境折射率高于包层折射率时,随着 n₃ 的增加,谐振峰在长波长处重新出现,并且耦合系数逐渐增大,这是由于反射系数变大导致泄漏模式损耗变小的缘故。

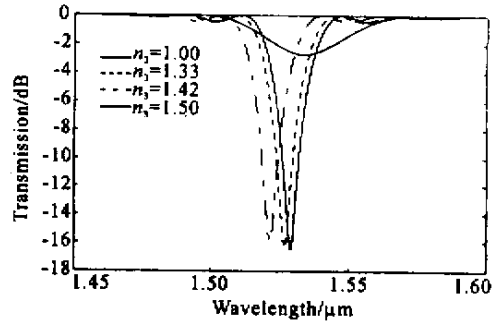


Fig.4 Calculated transmission spectrum of LP₀₅ cladding mode at different ambient refractive index

最后,我们进行了实验验证。将康宁 SMF-28 光纤氢载后,用 422 μm 幅度掩模板配合扫描平台,用 Lambda Physik 公司的准分子激光器写入长周期光纤光栅,退火后进行不同环境折射率的实验。由于没有合适的宽带光源,我们只对 LP₀₅ 模的谐振峰进行了观察。如图 5 所示,分别是将光栅浸入水中 and 折射率为 1.50 的油中谐振峰的变化,可见其与上述计算符合得非常好。图 6 是在不同的高折射率环境下的透射谱形状,可见折射率越高则谐振峰越深,且位置基本不变。特别地,文献 8 报道了在长周期光栅外镀铜的实验,其谐振峰可达 10 dB 以上,由于金属的高反射率,产生这样的效果是很容易理解的。

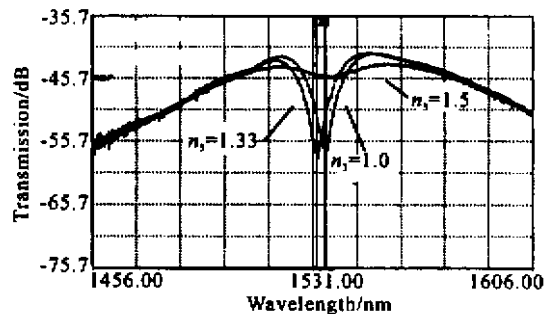


Fig.5 Experimental LPG's transmission spectrum at different ambient refractive index

通过以上的分析,当环境折射率较小或很大时,对于长周期光纤光栅的透射谱形状影响较小,只改变谐振峰位置,而当环境折射率接近包层折射率时,对透射谱形状的影响较大,这对长周期光栅的封

装和涂覆时必须注意, 尽量选择合适折射率的材料

以免破坏所需要的透射谱特性。

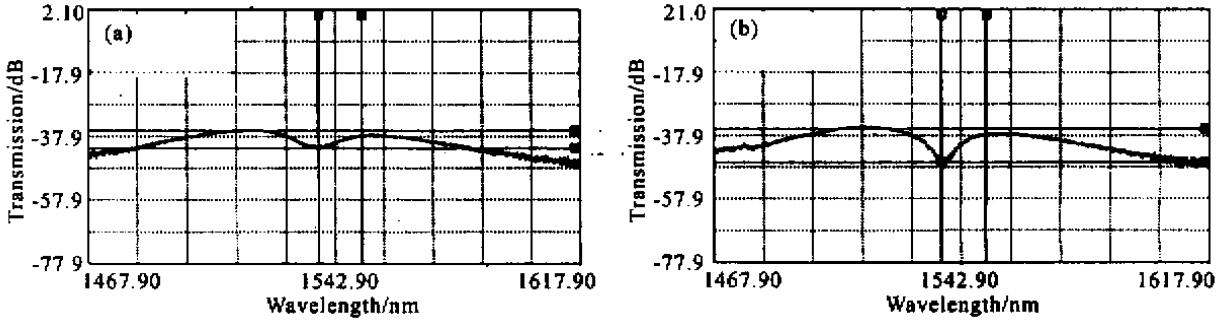


Fig.6 (a) Experimental LPG's transmission spectrum immersed in $n_3 = 1.5$ oil ;(b) Experimental LPG's transmission spectrum immersed in higher refractive index oil($n_3 = 1.7$)

结论 我们针对环境折射率对长周期光纤光栅的影响建立了理论模型, 进行了数值计算, 与实验结果符合得很好。通过计算和实验, 我们总结了长周期光纤光栅随外界折射率的变化规律, 这无疑对于指导长周期光纤光栅的二次涂覆、封装以及在传感中的应用有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Wu Chongqing. (光波导理论). Beijing: Tsinghua University Press, 2000.46 ~ 50
- [2] Erdogan T. Cladding-mode resonances in short-and long-period fiber grating filters. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(8):1760 ~ 1773
- [3] Erdogan T. Fiber grating spectra. *J. Lightwave Tech.*, 1997, **15**(8):1277 ~ 1294

- [4] Lee B H, Liu Y, Lee S B *et al.*. Displacements of the resonant peaks of a long-period fiber grating induced by a change of ambient refractive index. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23):1769 ~ 1771
- [5] Marcuse D. *Theory of Dielectric Optical Waveguides*. 2nd, ed. Boston: Academic Press, 1991. 31 ~ 43
- [6] Stegall D B, Erdogan T. Leaky cladding mode propagation in long-period fiber grating devices. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 1999, **11**(3):343 ~ 345
- [7] Kong Mei, Zhou Wen, Tang Weizhong. Analysis of guided-to-cladding mode coupling by long-period fiber gratings. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1999, **19**(3):369 ~ 373 (in Chinese)
- [8] Duhem O, Dacosta A, Heninot J *et al.*. Long period copper-coated grating as an electrically tunable wavelength-selective filter. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(12):1014 ~ 1016

Effect of Change of Ambient Refractive Index on Characteristics of Long-Period Fiber Gratings

Tong Zhi Wei Huai Wang Muguang Wang Zhi Jian Shuisheng
(Institute of Lightwave Technology, Northern Jiaotong University, Beijing 100044)

(Received 30 July 2001; revised 2 November 2001)

Abstract: A long-period fiber grating is simplified as a three-layer step-index waveguide. By using the concepts of scalar approximation and leaky-mode and the couple-mode theory, the influence of the change of ambient refractive index upon the LPG's characteristics such as resonance wavelength and peak loss in detail is analyzed. Some useful conclusions are obtained which agree with the experimental results very well.

Key words: long-period fiber grating; scalar approximation; leaky mode; couple-mode