

文章编号:1002-2082(2010)04-0617-03

矩形折射率分布长周期光纤光栅 特性中耦合精度的分析

王国东, 艾永乐

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 采用耦合模理论, 针对光纤芯层为矩形折射率分布的长周期光纤光栅, 分析不同模式间耦合对计算精度的影响。结果表明: 对于一阶低次包层模式, 偶次包层模式与光纤芯层基模的耦合常数要远远小于奇次包层模式与光纤芯层基模的耦合常数。因此, 在不影响计算精度的情况下, 可以采用忽略偶次包层模式的方法来提高计算速度。同时, 根据不同的计算波长范围和计算精度的要求, 可以选择合适的正弦折射率调制阶数范围来减小计算工作量。

关键词: 长周期光纤光栅; 模式耦合; 矩形折射率分布

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Analysis of coupled precision in characteristic calculation for long period fiber gratings with a rectangular index modulation

WANG Guo-dong, AI Yong-le

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: Based on the coupled-mode theory, the influences on coupled precision in characteristic calculation for different modes in long period fiber grating are analyzed. Calculated results show that for the low order cladding mode, the longitudinal coupling constants between the odd order cladding mode and the first core mode are smaller than that between even order cladding mode and the first core mode. So we can ignore the influence of odd order cladding mode in calculation without reducing the calculation precision. At the same time, we can select the suitable orders of sinusoidal index modulation to reduce the work of calculation according to the arrangement of wavelength and calculation precision.

Key words: long period fiber grating (LPG); mode-coupled; rectangle index modulation

引言

长周期光纤光栅是近年来光无源器件研究的热点, 它的周期一般为几百微米。周期在这个范围内的长周期光纤光栅表现为前向传播的光纤芯层基模与同向的各阶次包层模式之间的耦合, 从而将导波中某一波长的光耦合到光纤的包层中去损耗掉^[1]。长周期光纤光栅具有背向反射低、插入损耗

小以及易于制作等优点, 得到了越来越广泛的应用^[2-5]。

耦合模理论是分析长周期光纤光栅特性的有效方法。利用振幅掩膜法制作的长周期光纤光栅, 纤芯的折射率分布为矩形波。根据耦合模理论, 这一矩形波可以视为对光纤芯层折射率的微扰, 该微扰可以认为是由不同周期的正弦折射率调制叠加

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-02-25

基金项目: 河南省控制工程重点学科开放实验室开放基金(KG2009-16); 河南理工大学博士基金(648393)

作者简介: 王国东(1979-), 男, 河南焦作人, 博士, 副教授, 主要从事光电子器件模拟方面的研究工作。

E-mail: wgd@hpu.edu.cn

而成的^[6]。本文从耦合模理论出发,给出不同模式间的耦合系数,分析不同折射率调制阶数对耦合精度的影响,并给出了相应的模拟结果。

1 耦合模方程

用振幅掩膜法制作的长周期光纤光栅,其光纤芯层折射率分布为矩形波,如图1所示,可以表示为

$$\delta n(z) = \begin{cases} \delta n & m\Lambda \leq z \leq m\Lambda + p\Lambda \\ 0 & m\Lambda + p\Lambda \leq z \leq (m+1)\Lambda \end{cases} \quad (1)$$

式中: $m=0, \pm 1, \pm 2, \dots$; δn 为折变量; Λ 为光栅周期; $0 < p < 1$ 为占空比。

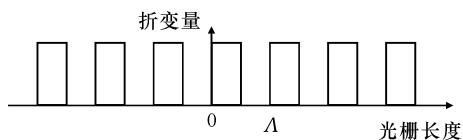


图1 光纤芯层矩形折射率分布示意图

Fig. 1 The rectangle index modulation in the fiber core

由文献[6]可知,此折射率分布可以认为是由周期分别为 $\Lambda, \Lambda/2, \Lambda/3, \dots$ 等一系列的正弦折射率分布叠加构成的,可分别称为第 i 阶折射率调制,且 i 越大,高阶分量的折射率调制深度越小。此时,长周期光纤光栅的耦合模方程可写为

$$\frac{dA^{co}}{dz} = jk_{01-01}^{co-co} A^{co} + \frac{j}{2} \sum_v \{ k_{1v-01}^{cl-co} A_v^{cl} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} [m_i \exp(-i\delta_{v,i} z)] \} \quad (2)$$

$$\sum_v \left\{ \frac{dA_v^{cl}}{dz} = \frac{j}{2} k_{1v-01}^{cl-co} A^{co} \sum_{i=1}^{\infty} [m_i \exp(+j\delta_{v,i} z)] \right\} \quad (3)$$

$$\delta_{v,i} = \beta_{01}^{co} - \beta_{1v}^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda_i}, \quad I = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中: k_{01-01}^{co-co} 为光纤芯层基模的自耦合常数; k_{1v-01}^{cl-co} 为光纤芯层基模与一阶包层模式的耦合常数,可分别表示为

$$k_{01-01}^{co-co} = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_1^2 b}{n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \left[1 + \frac{J_0^2(V \sqrt{1-b})}{J_1^2(V \sqrt{1-b})} \right] \quad (5)$$

$$k_{1v-01}^{cl-co} = \sigma(z) \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{\pi b}{Z_0 n_2 \sqrt{1+2b\Delta}} \right)^{1/2} \cdot \frac{n_1^2 u_1}{u_1^2 - V^2(1-b)/a_1^2} \left(1 + \frac{\sigma_2 \xi_0}{n_1^2} \right) \times \frac{E_{1v}^{cl} [u_1 J_1(u_1 a_1)] J_0(V \sqrt{1-b})}{J_1(V \sqrt{1-b})} \frac{V \sqrt{1-b}}{a_1} J_0(u_1 a_1) \quad (6)$$

(2)~(6)式中相关参数的具体含义可参见文献[1]。

2 分析与讨论

利用(6)式,选择如下光纤参数:芯层半径 $r_1 = 2.625 \mu\text{m}$,包层半径 $r_2 = 62.5 \mu\text{m}$,芯层折射率 $n_1 = 1.458$,包层折射率 $n_2 = 1.45$,空气折射率 $n_3 = 1.0$,计算得到芯层基模与一阶包层模式耦合常数如图2所示。从图中可以看出,在包层模式的次数较小时,偶次包层模式与芯层模式的耦合常数要明显小于奇次包层模式与芯层模式的耦合常数,而在长周期光纤光栅的特性计算中经常需要考虑的恰恰是次数较小(一般小于20)的包层模式与芯层模式之间的耦合作用。因此,利用耦合模方程对光纤光栅的特性进行模拟计算时,就可以只考虑奇次包层模式而忽略偶次包层模式的影响,在不影响计算精度的情况下减少计算量,提高模拟计算的速度。

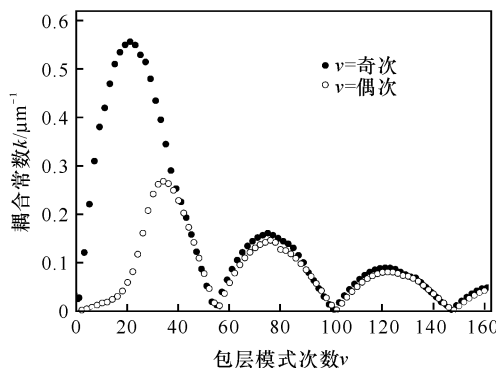


图2 一阶包层模式与芯层模式耦合常数

Fig. 2 The coupling constant between the fiber core mode and cladding mode

由耦合模方程(2)~(4)式可以看出,构成矩形折射率分布的多阶正弦折射率调制均对芯层与包层模式间的耦合有贡献。阶数越高,即越大,高阶分量的折射率调制深度越小,因此计算时需要根据计算波长的范围和计算需要的精度等因素来决定需要考虑的正弦折射率调制的阶数。

我们用一个具体的例子来说明上述情况。长周期光纤光栅的周期为 $600 \mu\text{m}$,在 $1.0 \mu\text{m} \sim 2.0 \mu\text{m}$ 的波长范围内,考虑光栅芯层导模分别与一阶包层模式之间的耦合作用。如图3所示,在长波长区域B区,只需考虑一阶正弦折射率调制作用下芯层导模与一阶包层模式的耦合;在短波长区域A区,则还需要考虑其他阶次正弦折射率调制作用对模式耦

合的影响。值得注意的是,阶次越大,其折射率调制深度越小,则其对模式耦合作用的贡献越小。图4给出了只考虑一阶正弦折射率调制和考虑到三阶正弦折射率调制时对应的长周期光纤光栅透射谱,由图可以看出在长波长范围内,两者吻合得较好,但是在短波长范围内,由于高阶正弦折射率调制的作用,出现了2个新的耦合峰。

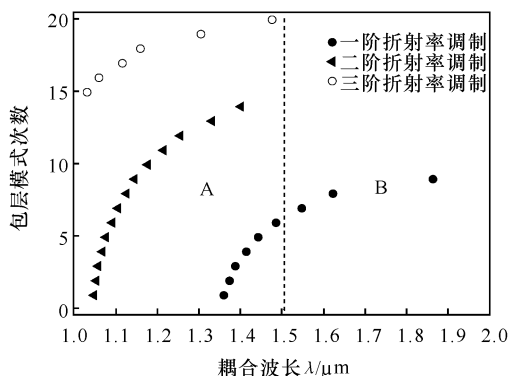


图3 不同阶数正弦折射率调制对应的耦合波长

Fig. 3 The coupled wavelength corresponding to the different order of sinusoidal index modulation

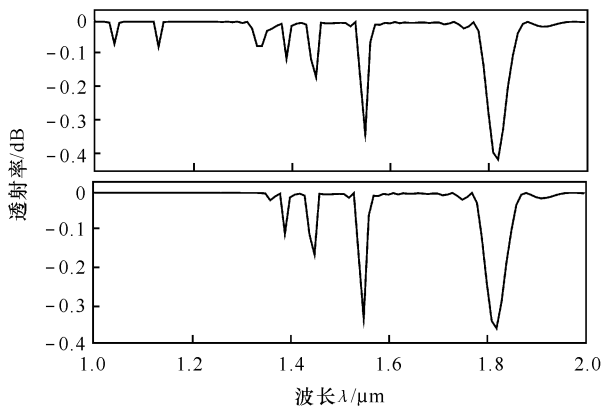


图4 长周期光纤光栅传输谱

Fig. 4 Transmission spectra of long period fiber grating

3 结论

本文主要采用耦合模理论,分析了矩形折射率分布的长周期光纤光栅中模式间的耦合对计算精度的影响。实际计算分析中,在不影响计算精度的情况下,可以采用忽略偶次包层模式的方法来提高计算速度。同时,根据不同的计算波长范围和需要的精度,可以选择合适的正弦折射率调制阶数范围来减小计算工作量。上述结论对长周期光纤光栅的

制作及理论分析具有一定的指导意义,并对如何设计长周期光纤光栅以达到实际应用要求有一定的应用价值。

参考文献:

[1] ERDOGAN T. Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1997, 14(8): 1760-1773.

[2] 王彦, 梁大开, 周兵. 基于光纤光栅光谱分析的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(11):2660-2664.
WANG Yan, LIANG Da-kai, ZHOU Bing. Measurement of steel corrosion in concrete structures by analyzing long-period fiber grating spectrum character[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008,28(11):2660-2664. (in Chinese with an English abstract)

[3] GU Zheng-tian, XU Yang-ping. Design optimization of a long period fiber grating with sol-gel coating for a gas sensor [J]. Measurement Science and Technology, 2007,18(11):3530-3536.

[4] 王子豪, 杨利. 改进长周期波导光栅折射率传感特性的研究[J]. 量子电子学报, 2007,24(4):500-504.
WANG Zi-hao, YANG Li. Study on improving the performance of the refractive index sensor based on long-period waveguide gratings[J]. Chinese Journal of Quantum Electronic, 2007, 24(4): 500-504. (in Chinese with an English abstract)

[5] 陈冠群, 纪荣栋, 施解龙. 相移长周期光栅长度切趾光谱特性[J]. 光子学报, 2007,36(6):1115-1119.
CHEN Guan-qun, JI Rong-dong, SHI Jie-long. Length apodization spectral characteristics of the phase-shifted long period fiber gratings [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(6): 1115-1119. (in Chinese with an English abstract)

[6] 徐新华, 崔一平. 矩形折射率调制型长周期光纤光栅传输谱的理论分析及数值计算[J]. 物理学报, 2003, 52(1):96-101.
XU Xin-hua, CUI Yi-ping. Theoretical analysis and numerical calculation for the transmission spectrum of long-period fiber gratings with a rectangular index modulation [J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(1): 96-101. (in Chinese with an English abstract)