

用薄膜光学理论研究布拉格光纤的传输特性

肖柳平, 杨华军, 严一民, 张海涛, 刘小静
(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要:用薄膜光学的等效导纳方法和阶跃光纤的几何光学理论研究布拉格光纤的传输特性。①设计出了反射率达99.99%包层的厚度、层数;②分析了传输效果随波长、层数、入射角的变化;③得出光束的数值孔径小于0.15时,反射率大于99.99%。这一研究对布拉格光子晶体光纤的实际加工及与阶跃光纤耦合具有重要理论意义。

关键词:布拉格光纤;薄膜光学;光传输特性

中图分类号:O484.4⁺1 **文献标识码:**A

Research for Light Propagation Characteristics of Bragg Fiber with Film Optics Theory

XIAO Liu-ping, YANG Hua-jun, YAN Yi-min, ZHANG Hai-tao, LIU Xiao-jing

(College of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: With equivalent conductance method, the geometry optics theory of step fiber, the light propagation characteristics of Bragg fiber structures have been researched in this paper. First, the thickness and layer number, the reflectivity of which reaches 99.99%, have been designed; Second, the propagation effect which follows the change of wavelength, layer number and the angle of incidence have been analyzed. Third, it have been concluded when the NA of beam of light is less than 0.15 (the incident angle is 81.37°), the reflectivity reaches 99.99%. This research possesses an important meaning for the manufacture of Bragg fiber and the coupling of step fibre.

Key words: Bragg fibers; film optics; light propagation characteristics

1 引言

布拉格光纤径向折射率呈周期分布,其径向包层结构使得布拉格光纤具有与普通光纤不同的特性^[1-2]。普通光纤利用全反射原理进行光传输,而布拉格光纤利用布拉格反射原理进行光传输^[3]。布拉格光纤可以选取纤芯为低折射率的空芯结构,也可选取纤芯为高折射率的同轴布拉格光纤结构^[4-6]。

本文应用多层薄膜反射理论对布拉格光纤的结构进行深入分析,建立了系统的仿真模型,设计了布拉格光子晶体仿真软件。这一研究对多波长和一定范围的数值孔径的光束的传输具有重要的理论意义和参考价值。

2 布拉格光纤结构

布拉格光纤介质包层折射率分布为:

$$n(r) = \begin{cases} n_{co} & 0 \leq r < r_1 \\ n_1 & r_1 \leq r < r_2 \\ n_2 & r_2 \leq r < r_3 \\ n_1 & r_3 \leq r < r_4 \\ n_2 & r_4 \leq r < r_5 \\ \dots & \end{cases} \quad (1)$$

基金项目:国家杰出青年基金(No. 60588502);国家自然科学基金(No. 41001020401)资助。

作者简介:肖柳平(1982-),男,硕士,主要从事 Bragg 光纤理论及仿真方面的研究工作。E-mail: xiaolp@uestc.edu.cn

收稿日期:2008-05-05; **修订日期:**2008-06-24

布拉格光纤折射率径向分布图如图1所示。

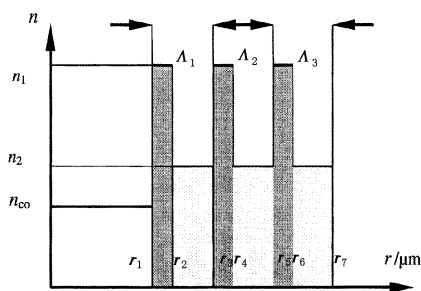


图1 布拉格光纤折射率径向分布

本文讨论的是空芯 Bragg 光纤 $n_{co} = 1$, 包层的折射率 $n_1 = 2.1$, $n_2 = 1.46$ 。子午光线^[7]在光纤中的反射如图2所示。CCITT(国际电报电话咨询委员会)规定阶跃光纤要求传输光束的数值孔径 NA 的取值范围为 $0.15 \sim 0.24$ ^[7], 这里取阶跃光纤数值孔径 $NA = 0.15$, 为了数值孔径匹配, 光束入射到布拉格光纤纤芯的入射角为 $\theta_0 = 81.37^\circ$, 中心波长取 $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ 。

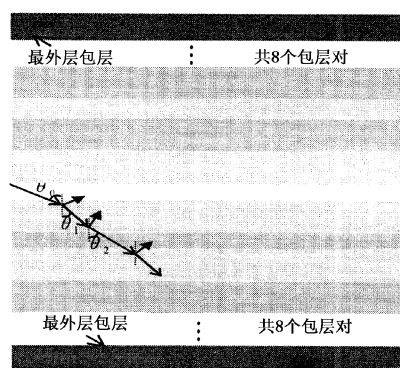


图2 Bragg 光纤反射轴向截面示意图

根据边界条件得 $\theta_1 = 28.09^\circ$, $\theta_2 = 42.62^\circ$ 。把布拉格光纤的包层等效为多层薄膜的堆叠, 布拉格的反射可以等效成多层薄膜的反射。

当光束由折射率为 n_2 的介质射入折射率为 n_1 介质, 由菲涅耳公式画出图3, 可知, $R_{//}(P \text{ 光}) < R_{\perp}(S \text{ 光})$, 只要 P 光的反射达到高反射率要求, S 光就能达到, 故本文只研究 P 光的反射率。

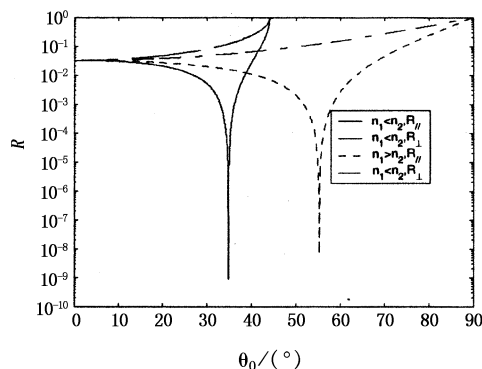


图3 两种偏振态光的反射率

3 应用薄膜光学理论研究 Bragg 光纤

3.1 单层介质膜的反射率

等效界面即将一个多界面的薄膜系统, 等效地看作一个单一界面。其中, 将等效界面看作是入射介质与薄膜、基底组合形成的等效介质之间的界面。即等效界面两侧的介质分别是入射介质和等效介质。因此, 光学薄膜系统的反射率就是等效界面的反射率。先找到单层介质膜与基底组合的等效光学导纳与介质膜层及基底结构参数之间的定量关系。

经过单层薄膜的等效光学导纳为 Y , 满足 $H_2 = Y(k_0 \times E_2)$, 根据电磁场的边界条件及电磁波理论, 得^[8-9]:

$$k_0 \times E \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} k_0 \times E_2 \quad (2)$$

令:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} n d_1 \cos \theta$

则:

$$k_0 \times E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} k_0 \times E_2 \quad (4)$$

$$Y = C/B \quad (5)$$

3.2 单层介质膜的反射特性

单层介质膜的反射率的计算公式为:

$$R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + \left(\frac{\eta_0 \eta_2}{\eta_1} - \eta_1 \right)^2 \sin^2 \delta_1}{(\eta_0 + \eta_2)^2 \cos^2 \delta_1 + \left(\frac{\eta_0 \eta_2}{\eta_1} + \eta_1 \right)^2 \sin^2 \delta_1}$$

$$\frac{dR}{dd_1} = 4n_0 n_2 \left\{ \left(\frac{n_0 n_2}{n_1} \right)^2 + n_1^2 - \left[\left(\frac{n_0 n_2}{n_2} \right)^2 + n_2^2 \right] \right\} \sin 2d_1 \quad (6)$$

由 $\frac{dR}{d\delta_1} = 0$, 可得:

当 $\delta_1 = m\pi/2, (m = 0, 1, 2, 3, \dots)$ 时, R 有极值。

当 $n_2 < n_1$ 时,

1) 当 m 为奇数时, 有:

$$\frac{m\pi}{2} - \frac{\pi}{4} < \delta_1 < \frac{m\pi}{2}, \sin 2\delta_1 > 0, \frac{dR}{d\delta_1} > 0$$

$$\frac{m\pi}{2} + \frac{\pi}{4} > \delta_1 > \frac{m\pi}{2}, \sin 2\delta_1 < 0, \frac{dR}{d\delta_1} < 0$$

R 在 $\delta_1 = m\pi/2$ 上有极大值:

$$R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 = \frac{(\eta_0 \eta_2 - \eta_1^2)^2}{(\eta_0 \eta_2 + \eta_1^2)^2} \quad (7)$$

所以单层膜的反射率 R 在 $\delta_1 = m\pi/2$ 上有最大值。多层膜是由单层膜堆叠而成的, 由反射率最大的单层膜构成的多层膜系必然具有最大反射率。

$$2) \text{ 当 } m \text{ 为偶数时, } R = \left| \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right|^2 = \frac{(\eta_0 - \eta_2)^2}{(\eta_0 + \eta_2)^2} \text{ 与}$$

n_1 无关。此时膜和没有一样。

对由 k 层膜组成的膜系, 应用边界条件, 最后可得如射介质和出射介质的电磁场的关系方程:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

可得:

$$(\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_0) \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} (\mathbf{k}_0 \times \mathbf{E}_{k+1}) \quad (9)$$

所以, $Y = C/B$ 。

该膜系的光波能量的反射率为:

$$R = \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right) \left(\frac{\eta_0 B - C}{\eta_0 B + C} \right)^* \quad (10)$$

布拉格光纤是由多层重复的基本周期构成, 及最外层折射率为 $\eta_{k+1} = 1.47$ 的包层构成, 而基本周期是由两层包层组成, 那么 S 层基本周期的特征矩阵。

$$\begin{bmatrix} B' \\ C' \end{bmatrix} = \left\{ \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & \frac{i}{\eta_2} \sin \delta_2 \\ \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & \frac{i}{\eta_1} \sin \delta_1 \\ \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \right\}^S \quad (11)$$

其中, $\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_j d_j \cos \theta_j, (j=1, 2)$ 。

对高反射 Bragg 包层堆栈, 包层厚度 $d_1 = r_2 - r_1$, 满足 $\Delta = n_1 d_1 \cos \theta_1 = m\lambda_0/4$, Δ 为有效厚度; 包层厚度 $d_2 = r_3 - r_2$, 满足 $n_2 d_2 \cos \theta_2 = m\lambda_0/4$; 其中 m 为奇数。

根据上面的分析, 由上面的理论进行仿真, 得出反射率随光波长、折射率 n_1 变化的三维图, 如图 4 所示。由图 4 可知 $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ 是反射率约等于 1 的中心波长, 在中心波长两边的波长在一定范围内的具有高的反射率。这个范围随 n_1 的增大而变宽。和前面的理论结果相吻合。

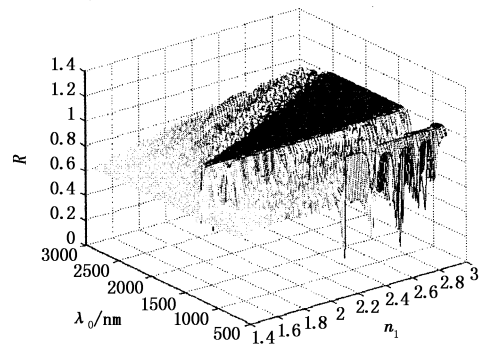


图 4 反射率、光波长、 n_1 折射率的关系

4 反射率与光波长的关系

图 5 为中心 $\lambda_0 = 1550\text{nm}$, 包层为 8 个基本周期, $d_1 = 0.2092\mu\text{m}$, $d_2 = 0.3607\mu\text{m}$ 时, 布拉格光纤反射率随波长的变化曲线, 可见在中心波长附近, 反射率接近于 1。

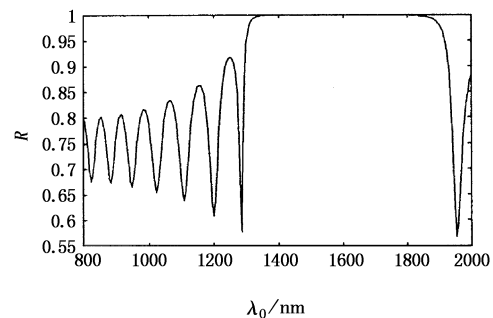


图 5 反射率与波长的关系

5 反射率与包层周期数的关系

图 6 为 6 到 20 个基本周期的布拉格反射图, 由

图3可见包层为8个基本周期布拉格光纤在 $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ 处就达到好的反射效果。

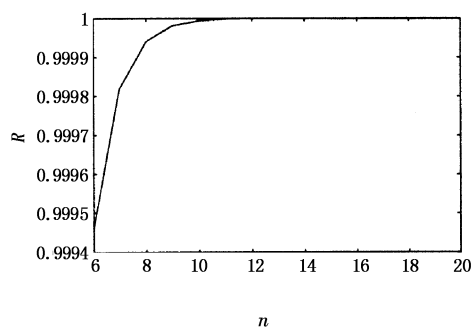


图6 反射率与包层周期数的关系

6 反射率与纤芯入射角、波长的关系

图7为包层为8个基本周期, $d_1 = 0.2092\mu\text{m}$, $d_2 = 0.3607\mu\text{m}$ 时,反射率随纤芯入射角、波长的变化图像,可见随入射角减小,高反射峰向长波长移动,且有小幅度降低。

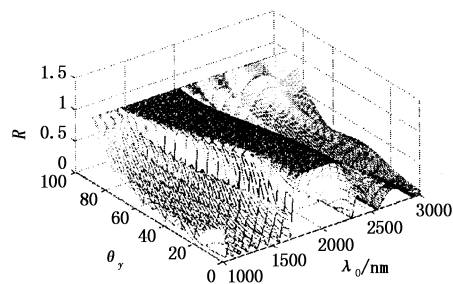


图7 反射率与入射角、波长的关系

图8为 $\lambda_0 = 1550\text{nm}$,包层为8个基本周期, $d_1 = 0.2092\mu\text{m}$, $d_2 = 0.3607\mu\text{m}$ 时,布拉格光纤反射率随角度的变化曲线,可见当入射角大于 81.37° 时,反射率大于99.99%。这就是说发散角小于 81.37° 的光束能在纤芯内几乎无损耗的传输。

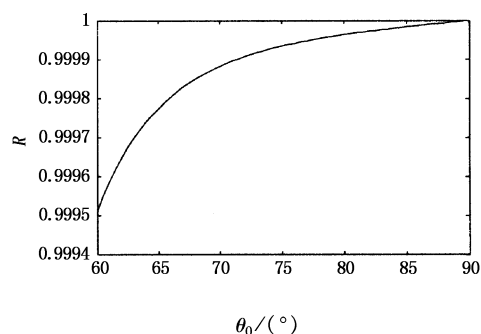


图8 反射率与入射角的关系

7 结论

应用薄膜光学理论进行研究布拉格光纤这种方法在分析多波长传输、不同发散角光束的传输比传统的传输矩阵法优越。通过对不同波长的光在布拉格光纤内反射进行仿真,得出在中心波长附近一定范围内有很高的反射率。这对多波长传输具有重要意义。分析了光束不同发散角的传输特性,得出光束的在发散角小于某一值时,光束能够很好的传输。根据阶跃光纤的参数,设计出一套可以和阶跃光纤数值孔径匹配的布拉格光纤的参数。这对实际加工具有重要的参考意义。

参考文献:

- [1] P Yeh, A Yariv. Theory of Bragg fiber [J]. Opt. Soc. Am, 1978, 68: 1196 - 1201.
- [2] Xu Y. Asymptotic analysis of Bragg fibers [J]. Opt. Lett., 2000, 25(24): 1756 - 1758.
- [3] Xu Y, G X Ouyang. Asymptotic matrix theory of Bragg fibers [J]. J. Lightwave Tech., 2002, 20(3): 428 - 440.
- [4] Monsoriu J A. High-index-core Bragg fibers: dispersion Properties [J]. Optics Express, 2003, 11(12): 1401 - 1405.
- [5] Liu X Y, F D Zhang. Polarization properties of high-index elliptical-core Bragg fibers [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1319 - 1324.
- [6] Yang Hua-Jun, Hu Yu, Liu Jing-Xian, et al. Research for light propagation characteristics of Bragg fiber [J]. Optoelectronics · Laser, 2007, 18(12): 1410 - 1414. (in Chinese)
- [7] 王延恒, 王黎明. 光纤通信系统与光纤网 [M]. 天津: 天津大学出版社, 2007: 8 - 8.
- [8] 廖延彪. 光学原理与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 333 - 344, 145 - 146.
- [9] 卢进军, 刘卫国. 光学薄膜技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2005: 5 - 11.