

文章编号: 1001-3806(2006)03-0252-03

低损耗空芯布喇格光纤的优化设计

赖 燊^{1,2}, 杨华军^{1*}, 胡 渝¹, 刘长久¹

(1. 电子科技大学 物理电子学院, 成都 610054 2 西安通信学院, 西安 710106)

摘要: 应用光波导理论和矩阵理论建立了分析空芯布喇格光纤的光传输理论模型, 对具有不等周期的布喇格光纤结构, 以最小输出功率流为优化目标进行仿真, 设计出具有 8 个外包层的布喇格光纤, 并分析了其损耗特性。该结构具有外包层数小、结构简单、损耗低的特点, 有利于空芯布喇格光纤的制造和应用。

关键词: 光纤光学; 布喇格光纤; 传输矩阵; 径向输出流; 损耗

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

Optim um design of low-loss hollow-core Bragg fiber

LAI Fan^{1,2}, YANG Hua-jun¹, HU Yu¹, LIU Chang-ju¹

(1. College of Physical Electronics, UESTC, Chengdu 610054, China 2 Xi'an Communication Institute, Xi'an 710106, China)

Abstract Based on light waveguide and matrix theory the theoretical light transmission model is set up to analyse the hollow-core Bragg fiber. The unequal period Bragg fiber structure is simulated in order to get them inimum outflowing flux. The fiber with eight cladding layers is obtained through optim um design, and its loss characteristic is analyzed. This simple structure is very useful for the fabrication and application of Bragg fiber due to its low loss and small number of cladding layers.

Key words fiber optics; Bragg fiber; transfer matrix; radial outflowing flux; loss

引 言

随着近年来光纤加工技术的飞速发展, 布喇格光纤和光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 再次成为国际上研究热点^[1]。布喇格光纤因需要相对多的径向外包层数而延缓了其发展进程。目前的主要研究内容还限于对具有简单结构的等间距式介质包层研究, 这些研究理论上需要无穷多的径向包层, 由此限制了其实用化进程。为了简化计算, 美国加州理工大学 XU 等人提出对布喇格光纤渐进分析^[2], 使用渐进方法获得布喇格光纤的本征值方程, 对基模色散特性进行了研究, 但仍然使用等间距的介质包层结构, 未对光纤的结构进一步优化, 其包层数具有大量级而不利于实际加工。

尽管理论上传统的布喇格光纤需要无穷多层以实现对径向光信号的限制, 本文中对具有不等间距的径向型空芯布喇格光纤进行了计算机仿真分析, 优化介质包层结构后, 可以大大减少包层数量, 并对其损耗进行了分析, 表明此结构设计的合理性。

1 理论模型

根据布喇格光纤的结构, 选取柱坐标系进行建模。其径向折射率分布如图 1 所示, 周期 Λ 沿径向不断变化, 对其结构仿真优化可以得到周期序列。

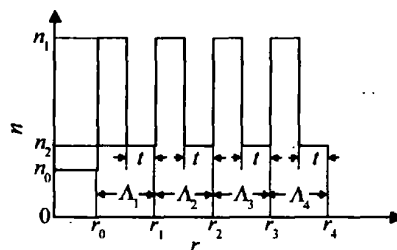


Fig 1 Distribution of radial refractive index

在折射率为 n 的光纤中电场 \vec{E} Helmholtz 方程 (磁场 \vec{H} 表达式类似) 为: $\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$ (1) 式中, k 为介质中波数, $k = n\omega/c$, ω 为光波角频率, c 为真空中光速。

选取波的传播方向 (光纤中心轴) 为 z 轴建立柱坐标系, 则各电磁场分量可以表示为^[3,4]:

$$\Psi(r, \theta, z, t) = \Psi(r, \theta) e^{i(\beta z - \omega t)} \quad (2)$$

式中, Ψ 可表示任一横向场分量 $E_r, E_\theta, H_r, H_\theta$ 和纵向场分量 E_z, H_z ; β 为纵向传播常数。与传统光纤分析类似, 根据光波导理论, 横向场分量可以用 E_r, H_r 来表示, 由此解出在第 i 层, E_r, H_r 的通解:

作者简介: 赖 燊 (1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事布喇格光纤、光子晶体光纤的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangh@uestc.edu.cn

收稿日期: 2005-04-17; 收到修改稿日期: 2005-05-27

$$E_{z,i} = [A_i J_m(k_i r) + B_i N_m(k_i r)] \cos(m\theta) \quad (3)$$

$$H_{z,i} = [C_i J_m(k_i r) + D_i N_m(k_i r)] \cos(m\theta) \quad (4)$$

式中, A_i, B_i, C_i, D_i 为系数, J_m, N_m 分别为 m 阶第一类贝塞尔函数和第二类贝塞尔函数, k_i 为横向传播常数, $k_i = k_0 \sqrt{n_i^2 - \beta^2} / k_0$, n_i 为第 i 层介质折射率, k_0 为真空中的波矢量, $m = 0, 1, 2, \dots$, 为贝塞尔函数的阶数。在柱坐标系中, 任一模式 (如 $TE_{\alpha b}, HE_{\alpha b}$ 等, α, b 为整数)

$$M_i(n_i, k_i, r_i) = \begin{bmatrix} J_m(k_i r) & N_m(k_i r) & 0 & 0 \\ \frac{i\omega \epsilon_i}{k_i} J_m'(k_i r) & \frac{i\omega \epsilon_i}{k_i} N_m'(k_i r) & -\frac{m\beta}{k_i r} J_m(k_i r) & -\frac{m\beta}{k_i r} N_m(k_i r) \\ 0 & 0 & J_m(k_i r) & N_m(k_i r) \\ -\frac{m\beta}{k_i r} J_m(k_i r) & -\frac{m\beta}{k_i r} N_m(k_i r) & -\frac{i\omega \mu_i}{k_i} J_m'(k_i r) & -\frac{i\omega \mu_i}{k_i} N_m'(k_i r) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $J_m'(k, r), N_m'(k, r)$ 分别表示 m 阶第一类贝塞尔函数和第二类贝塞尔函数的一阶导数, ϵ_i, μ_i 分别为光纤中的介电常数和磁导率。通过以上关系可知, 给出第 i 层的电磁场分布, 根据电场 \vec{E} 和磁场 \vec{H} 的切向分量 $E_\theta, E_z, H_\theta, H_z$ 在介质两侧连续边界条件, 得出第 $i+1$ 层的电磁场分布。在此建立如下系数矩阵关系:

$$\begin{bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{bmatrix} = T_{i,i+1} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $T_{i,i+1}$ 为第 i 层到 $i+1$ 层的传输矩阵, 表示为:

$$T_{i,i+1} = [M_{i+1}(n_{i+1}, k_{i+1}, r_{i+1})]^{-1} M_i(n_i, k_i, r_i) \quad (8)$$

2 结构设计及损耗特性分析

根据上述传输矩阵模型, 以较小输出功率流为目标进行优化仿真, 可以得到径向不等周期介电结构的布喇格光纤, 其基模损耗可低于 0.1 dB/km。

2.1 结构设计

布喇格光纤中, 沿径向的功率流用时间平均 Poynting 分量表示为^[3]:

$$S_r = (1/2) \text{Re}[E_\theta \times H_z^*] = (1/2) \text{Re}\{(-i\omega\mu/k) \times [C J_0'(k_i r) + D N_0'(k_i r)] [C^* J_0(k_i r) + D^* N_0(k_i r)]\} \quad (9)$$

由于在布喇格光纤最外层边界为空气, 不能形成布喇格反射, 边界只有径向输出功率流, 产生能量泄漏。对于任一给定的径向长度 L 和半径 r , 最外层径向输出功率流 S_{out} 可以表示为^[6]:

$$S_{out} = [C^2 + D^2] r 2\pi r L \frac{\omega\mu}{k} \quad (10)$$

束缚在 N 个外包层的布喇格光纤中的总功率流为:

$$S_{tot} = \sum_{i=1}^N S_{r_i} = \left[\sum_{i=1}^N (C^2 + D^2) \right] \frac{\omega\mu\beta}{k^2} \pi r^2 \quad (11)$$

电磁场可以用 m 阶贝塞尔函数及 k_0 准确描述^[5]。

则第 i 层的场分量可以用以下的矩阵形式给出:

$$\begin{bmatrix} E_{z,i} \\ H_{\theta,i} \\ H_{z,i} \\ E_{\theta,i} \end{bmatrix} = M_i(n_i, k_i, r_i) \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

由上面的分析可知, 对于任意给定的纤芯半径和包层数目, 可由系数传输矩阵模型从芯层开始计算场分布, 通过系数 $\eta = S_{out} / S_{in}$ 控制最外层径向输出功率流, 优化设计出不同外包层结构的布喇格光纤。

根据以上理论, 以 8 个外包层为例, 不断改变包层半径设计出一种低损耗不等周期布喇格光纤。为了简化计算, 选取折射率为 n_2 的介质层厚度 t 不变, 只改变高折射率介质层厚度。在数值计算中, $n_0 = 1.0$ (空气), $n_1 = 4.6, n_2 = 1.5, r_0 = 2.72 \mu\text{m}, t = 1 \mu\text{m}, \lambda = 1150 \text{nm}, \eta = 0.005$ 取值参考文献 [7]。用 MATLAB 编程优化, 得到半径 r (单位 μm) 的结果 (见表 1)。

Table 1 Radius series μm

r_0	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8
2.72	6.04	9.19	12.19	15.06	17.82	20.47	23.03	25.52

根据各半径取值, 得到布喇格光纤的周期 Λ (单位 μm) (见表 2)。

Table 2 Period series μm

Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ_5	Λ_6	Λ_7	Λ_8
3.32	3.15	3.00	2.87	2.76	2.65	2.56	2.49

其周期 Λ 及相邻周期的变化量 $\Delta\Lambda$ 均沿径向递减。图 2 为输出功率流沿径向变化的分布曲线, 图 3 为 TE_{01} 模场分布曲线。尽管理论上要使布喇格光纤达到良好的径向限制, 需要无穷多包层数, 通过不等周

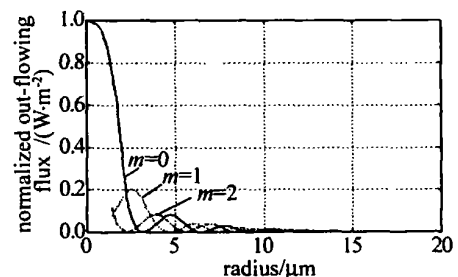


Fig 2 Normalized out flowing flux versus radius

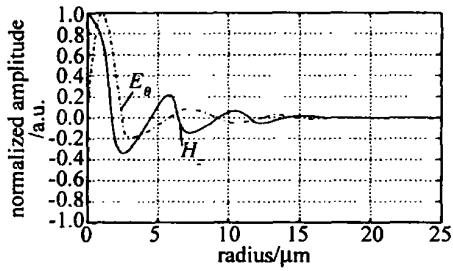


Fig 3 Radial field distribution of TE_{01} mode

期包层结构的优化设计,可以得到只含 8 个外包层就能把光场束缚在纤芯中形成导模的布喇格光纤。这与传统等周期布喇格光纤有明显区别,通过此设计方法简化了布喇格光纤的结构。

2.2 损耗特性分析

空芯布喇格光纤和传统光纤一样具有吸收损耗、瑞利散射、弯曲损耗以及随长度变化的结构损耗等。从图 2 及图 3 可以看出,由于布喇格反射形成的一维光子带隙,光场被很好地抑制在横向平面,所以与传统光纤相比,材料的非线性效应低,损耗小。布喇格光纤的传输损耗可以近似表达为^[8]:

$$\text{loss}(\text{dB}/\text{km}) = \frac{4\pi}{\lambda \ln 10} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (12)$$

式中, n_{eff} 为模式折射率, $n_{\text{eff}}^{\text{TE}_i} = \sqrt{1 - (x_{1i} \lambda / 2\pi r_0)^2}$, x_{1i} 为一阶贝塞尔函数的第 i 个零点。利用传输矩阵计算时在 n_1 和 n_2 中加入虚部表示损耗。在空芯布喇格光纤中传输的基模是 TE_{01} 模,根据菲涅耳反射效应,其 TE 分量比 TM 分量,损耗最小,阶次越高损耗越大^[9],这就是布喇格光纤的选模性质。图 4 为 $n_1 = 4.6 + 0.005i$, $n_2 = 1.5 + 0.005i$ 时,该优化结构的布喇格

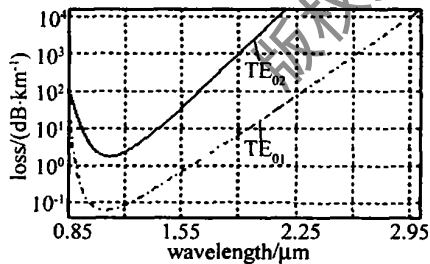


Fig 4 Loss versus wavelength

光纤中 TE_{01} 模和 TE_{02} 模的损耗曲线,从图中可看出, TE_{01} 模损耗小于 TE_{02} 模,在一定的工作频率范围低于 $0.1 \text{ dB}/\text{km}$,并且在 $850 \text{ nm} \sim 2600 \text{ nm}$ 宽带支持小于

$1 \text{ dB}/\text{m}$ 的低损耗传输,因此, TE_{01} 模能够远距离传输。虽然以 1150 nm 光波进行优化设计,图 4 表明,在 1550 nm 的损耗仍与通常工作在 1550 nm 的传统石英光纤损耗相当。

通过对 TE_{01} 模和 TE_{02} 模的分析可知,该不等周期布喇格光纤与文献 [9] 中应用的等周期结构一样具有良好的选模特性,以本文中所给设计方法优化的光纤结构具有较好的传输特性,对实际应用具有一定的指导意义。由于本文中主要讨论布喇格光纤的结构设计,其模式特性和色散分析将另文讨论。

3 结 论

根据光波导理论和矩阵理论建立了布喇格光纤中光传输的理论模型,以径向输出功率流为优化目标,设计了新型不等周期布喇格光纤。用此方法设计的布喇格光纤结构简单,8 个包层结构的布喇格光纤其基模损耗就可低于 $0.1 \text{ dB}/\text{km}$,非常有利于布喇格光纤的实际加工。而且其能量损失极少,可以在远距离通信中节省大量的光放大器和滤波器。

参 考 文 献

- [1] PAN Y, ZHANG J, HU G, *et al*. Photonic crystal fiber and laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 48~51 (in Chinese).
- [2] XU Y, OUYANG G X, LEE R K, *et al*. Asymptotic matrix theory of Bragg fibers [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(3): 428~440.
- [3] YEH P, YARIV A, MARO E. Theory of Bragg fiber [J]. JOSA, 1978, 68(5): 1196~1201.
- [4] GUO S, ALBIN S. Comparative analysis of Bragg fibers [J]. Optics Express, 2004, 12(1): 198~207.
- [5] YARIV A. Optical electronics in modern communications [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2004. 59~68 (in Chinese).
- [6] ARGYROS A, BASSETT J, MARYANNE C, *et al*. Ring structures in microstructured polymer optical fibers [J]. Optics Express, 2001, 9(13): 813~820.
- [7] OUYANG G X, XU Y, YARIV A. Comparative study of air core and coaxial Bragg fibers: single mode transmission and dispersion characteristics [J]. Optics Express, 2001, 9(13): 733~747.
- [8] XU Y, YARIV A, JAMES G, *et al*. Asymptotic analysis of silicon based Bragg fibers [J]. Optics Express, 2003, 11(9): 1039~1049.
- [9] JASON S G, IBANESCU M, WEISBERG O, *et al*. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core omniguided fibers [J]. Optics Express, 2001, 9(13): 748~779.