

文章编号: 0253-2239(2001)05-0559-04

单模手征光纤研究*

董建峰

(宁波大学光纤通信与网络技术研究所, 宁波 315211)

摘要: 对圆芯和内外包层都为手征介质构成的双包层手征光纤(W型)进行了解析求解, 导出了模式场解及模式特征方程, 然后用数值计算的方法研究了手征参数对模式的色散曲线和截止频率的影响, 结果发现在双包层光纤的纤芯中引入手征或在单包层光纤的包层中引入手征, 都可以实现单模工作。

关键词: 双包层手征光纤; 手征波导; 单模; 模式特征方程

中图分类号: TN252 文献标识码: A

1 引 言

由于手征介质波导在新型光波导耦合器件、光纤传感技术、光纤通信等许多领域有潜在的应用前景, 目前人们已经对各种形状的手征介质波导如平面波导、圆芯和椭圆芯手征光纤等进行了广泛而深入的研究^[1-9]。研究表明, 手征介质波导有许多新颖独特的性质, 如模式分岔、模式耦合等, 在对称的平面波导结构的包层区引入手征介质, 利用最低阶模的非简并特性, 可以实现单模工作^[3]。本文首先在单包层手征光纤求解的基础上对双包层手征光纤(W型)进行了解析求解, 得到了模式场的精确解, 导出了模式特征方程, 并对模式特征方程进行了详细的数值计算, 给出了几个低阶模的色散关系和截止频率随手征参数的变化关系, 结果发现在双包层光纤的纤芯中引入手征或在单包层光纤的包层中引入手征, 都可以实现单模工作。

2 双包层手征光纤中的模式场解和模式特征方程

考虑圆芯和内外包层都是由各向同性的无损耗的互易手征介质组成的阶跃型双包层手征光纤, 设纤芯和内外包层的相对介电常数、相对磁导率与手征参数分别为 $\epsilon_{i1}, \mu_{i1}, \chi_1, \epsilon_{i2}, \mu_{i2}, \chi_2, \epsilon_{i3}, \mu_{i3}, \chi_3$, 相对介电常数满足 $\epsilon_{i2} < \epsilon_{i3} < \epsilon_{i1}$ (W型), 纤芯半径为 a_1 , 内包层半径为 a_2 , 外包层可视为无穷大。图 1 给出了 W 型双包层手征光纤的横截面和折射率分布

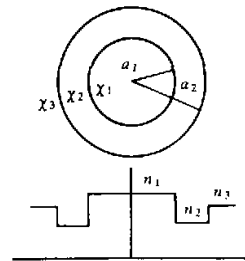


Fig. 1 The cross section and refractive index profile of a W-type double cladding chiral optical fiber

布, 其中 $n_i = \sqrt{\mu_{i1}\epsilon_{i1}}$, $i = 1, 2, 3$ 分别代表纤芯和内外包层。在各向同性的无损耗的互易手征介质中, 对时谐场变化 $\exp(j\omega t)$, 本构关系可写成^[2,7]:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0(\epsilon_r \mathbf{E} - j\chi Z_0 \mathbf{H}), \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mu_r \mathbf{H} + j\chi Y_0 \mathbf{E}), \quad (2)$$

式中 $Z_0 = 1/Y_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ 为真空的本征阻抗, χ 为手征参数。由麦克斯韦方程及上述本构关系, 通过和单包层手征光纤类似的求解^[7], 可以得到圆芯和内外包层的电磁场 \mathbf{E}, \mathbf{H} 的纵向分量为 [省略因子 $\exp(j\omega t)$]:

圆芯:

$$E_{1z} = [A_m J_m(h_{1+}, \rho) + B_m J_m(h_{1-}, \rho)] \times \exp(jm\varphi), \quad (3)$$

$$H_{1z} = \frac{j}{\eta_1} [A_m J_m(h_{1+}, \rho) - B_m J_m(h_{1-}, \rho)] \times \exp(jm\varphi); \quad (4)$$

内包层:

$$E_{2z} = [F_m K_m(h_2, \rho) + G_m I_m(h_2, \rho) + P_m K_m(h_2, \rho) + Q_m I_m(h_2, \rho)] \times \exp(jm\varphi), \quad (5)$$

* 浙江省教委科研基金和宁波市青年科学基金资助项目。

收稿日期: 1999-12-06; 收到修改稿日期: 2000-03-20

$$H_{2z} = \frac{j}{\eta_2} [F_m K_m(h_{2-}, \rho) + G_m I_m(h_{2-}, \rho) - P_m K_m(h_{2-}, \rho) - Q_m I_m(h_{2-}, \rho)] \times \exp(jm\varphi); \quad (6)$$

外包层:

$$E_{3z} = [C_m K_m(h_{3+}, \rho) + D_m K_m(h_{3-}, \rho)] \times \exp(jm\varphi), \quad (7)$$

$$H_{3z} = \frac{j}{\eta_3} [C_m K_m(h_{3+}, \rho) - D_m K_m(h_{3-}, \rho)] \times \exp(jm\varphi), \quad (8)$$

式中,

$$h_{1\pm} = \sqrt{\gamma_1^2 - \beta^2}, \quad h_{2\pm} = \sqrt{\beta^2 - \gamma_2^2},$$

$$h_{3\pm} = \sqrt{\beta^2 - \gamma_3^2}, \quad \gamma_i = k_0(n_i \pm x_i),$$

$$k_0 = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0},$$

$$\eta_i = \sqrt{\mu_n \mu_0 / \epsilon_n \epsilon_0} \quad (i = 1, 2, 3),$$

J_m 为 m 阶第一类贝塞尔函数, I_m^+ 、 K_m 分别为 m 阶第一类和第二类变形贝塞尔函数, m 为整数, φ 为角向坐标, 其中 β 是传播常数, A_m 、 B_m 、 F_m 、 G_m 、 P_m 、 Q_m 、 C_m 、 D_m 是待定常数, 它们之间的关系可由边界条件决定。再利用电磁场 E 、 H 的横向分量和纵向分量之间的关系, 可以得到 E 、 H 的横向分量 $E_{1\varphi}$ 、 $H_{1\varphi}$ 、 $E_{2\varphi}$ 、 $H_{2\varphi}$ 、 $E_{3\varphi}$ 、 $H_{3\varphi}$ 的表达式(限于篇幅, 本文从略)。根据 $\rho = a_1$ 、 $\rho = a_2$ 处场的切向分量连续的边界条件, 并进行化简, 可得到模式特征方程为

$$\begin{vmatrix} g_{11} & g_{12} & g_{13} & g_{14} \\ g_{21} & g_{22} & g_{23} & g_{24} \\ g_{31} & g_{32} & g_{33} & g_{34} \\ g_{41} & g_{42} & g_{43} & g_{44} \end{vmatrix} = 0 \quad (9)$$

行列式中各个元素为

$$g_{11} = \zeta_{1+} (b_{51} b_{15} - b_{11} b_{55}),$$

$$g_{12} = \zeta_{1+} (b_{51} b_{16} - b_{11} b_{56}),$$

$$g_{13} = \zeta_{1-} (b_{51} b_{17} + b_{11} b_{57}),$$

$$g_{14} = \zeta_{1-} (b_{51} b_{18} + b_{11} b_{58}),$$

$$g_{21} = \zeta_{1-} (b_{52} b_{15} - b_{12} b_{55}),$$

$$g_{22} = \zeta_{1-} (b_{52} b_{16} - b_{12} b_{56}),$$

$$g_{23} = \zeta_{1+} (b_{52} b_{17} + b_{12} b_{57}),$$

$$g_{24} = \zeta_{1+} (b_{52} b_{18} + b_{12} b_{58}),$$

$$g_{31} = \zeta_{2+} (b_{63} b_{25} - b_{23} b_{65}),$$

$$g_{32} = \zeta_{2+} (b_{63} b_{26} - b_{23} b_{66}),$$

$$g_{33} = \zeta_{2-} (b_{63} b_{27} + b_{23} b_{67}),$$

$$g_{34} = \zeta_{2-} (b_{63} b_{28} + b_{23} b_{68}),$$

$$g_{41} = \zeta_{2-} (b_{64} b_{25} - b_{24} b_{65}),$$

$$g_{42} = \zeta_{2-} (b_{64} b_{26} - b_{24} b_{66}),$$

$$g_{43} = \zeta_{2+} (b_{64} b_{27} + b_{24} b_{67}),$$

$$g_{44} = \zeta_{2+} (b_{64} b_{28} + b_{24} b_{68}).$$

各参数定义为

$$\zeta_{1\pm} = 1 \pm \eta_1 / \eta_2, \quad \zeta_{2\pm} = 1 \pm \eta_3 / \eta_2,$$

$$b_{11} = J_m(h_{1+}, a_1), \quad b_{12} = J_m(h_{1-}, a_1),$$

$$b_{15} = K_m(h_{2+}, a_1), \quad b_{16} = I_m(h_{2+}, a_1),$$

$$b_{17} = K_m(h_{2-}, a_1), \quad b_{18} = I_m(h_{2-}, a_1),$$

$$b_{23} = K_m(h_{3+}, a_2), \quad b_{24} = K_m(h_{3-}, a_2),$$

$$b_{25} = K_m(h_{2+}, a_2), \quad b_{26} = I_m(h_{2+}, a_2),$$

$$b_{27} = K_m(h_{2-}, a_2), \quad b_{28} = I_m(h_{2-}, a_2),$$

$$b_{51} = \frac{\beta m}{h_{1+}^2 a_1} J_m(h_{1+}, a_1) - \frac{\gamma_{1+}}{h_{1+}} J_m(h_{1+}, a_1),$$

$$b_{52} = \frac{\beta m}{h_{1-}^2 a_1} J_m(h_{1-}, a_1) + \frac{\gamma_{1-}}{h_{1-}} J_m(h_{1-}, a_1),$$

$$b_{55} = -\frac{\beta m}{h_{2+}^2 a_1} K_m(h_{2+}, a_1) + \frac{\gamma_{2+}}{h_{2+}} K_m(h_{2+}, a_1),$$

$$b_{56} = -\frac{\beta m}{h_{2+}^2 a_1} I_m(h_{2+}, a_1) + \frac{\gamma_{2+}}{h_{2+}} I_m(h_{2+}, a_1),$$

$$b_{57} = \frac{\beta m}{h_{2-}^2 a_1} K_m(h_{2-}, a_1) + \frac{\gamma_{2-}}{h_{2-}} K_m(h_{2-}, a_1),$$

$$b_{58} = \frac{\beta m}{h_{2-}^2 a_1} I_m(h_{2-}, a_1) + \frac{\gamma_{2-}}{h_{2-}} I_m(h_{2-}, a_1),$$

$$b_{63} = -\frac{\beta m}{h_{3+}^2 a_2} K_m(h_{3+}, a_2) + \frac{\gamma_{3+}}{h_{3+}} K_m(h_{3+}, a_2),$$

$$b_{64} = -\frac{\beta m}{h_{3-}^2 a_2} K_m(h_{3-}, a_2) - \frac{\gamma_{3-}}{h_{3-}} K_m(h_{3-}, a_2),$$

$$b_{65} = -\frac{\beta m}{h_{2+}^2 a_2} K_m(h_{2+}, a_2) + \frac{\gamma_{2+}}{h_{2+}} K_m(h_{2+}, a_2),$$

$$b_{66} = -\frac{\beta m}{h_{2+}^2 a_2} I_m(h_{2+}, a_2) + \frac{\gamma_{2+}}{h_{2+}} I_m(h_{2+}, a_2),$$

$$b_{67} = \frac{\beta m}{h_{2-}^2 a_2} K_m(h_{2-}, a_2) + \frac{\gamma_{2-}}{h_{2-}} K_m(h_{2-}, a_2),$$

$$b_{68} = \frac{\beta m}{h_{2-}^2 a_2} I_m(h_{2-}, a_2) + \frac{\gamma_{2-}}{h_{2-}} I_m(h_{2-}, a_2).$$

3 数值计算结果和讨论

对模式特征方程(9)式进行数值求解, 可得到归一化传播常数 β/k_0 。本文着重研究双包层手征光纤中纤芯和外包层的手征参数对模式色散曲线、截止频率等特性的影响(所有情况下取 $\mu_{r1} = \mu_{r2} = \mu_{r3} = 1$ 保持不变, 对双包层光纤取 $n_1 = 1.472$, $n_2 =$

1.440, $n_3 = 1.460$, $a_2/a_1 = 1.5$).

首先计算了双包层非手征光纤(W型) ($\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 0$) 几个低阶模的色散曲线, 如图2所示,

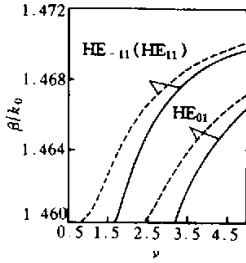


Fig. 2 Dispersion curves of several lower order modes of double cladding optical fibers. ($\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 0$, $n_1 = 1.472$, $n_2 = 1.440$, $n_3 = 1.460$, solid curves: $a_2/a_1 = 1.5$, dashed curves: $a_2/a_1 = 1.0$)

其中, $\nu = (2\pi/\lambda)a_1\sqrt{n_1^2 - n_3^2}$, 为归一化频率, 虚线表示相应的单包层非手征光纤的色散曲线(令 $a_2/a_1 = 1.0$ 或 $n_2 = n_3 = 1.460$ 即可)。从图中可以发现, 双包层非手征光纤比相应的单包层非手征光纤的色散曲线下移, 基模 HE_{-11} (HE_{11}) 的截止频率增大, 但都不分岔, 也即模式简并。计算还发现, 内包层的折射率越小, 色散曲线下移得越多, 各个导模的截止频率越大。图3表示双包层手征光纤中只有纤芯有手征时几个低阶模典型的色散曲线 ($\chi_1 = 0.005$), 图中也画出了纤芯没有手征时的色散曲线,

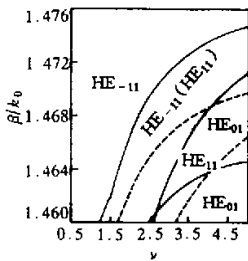


Fig. 3 Dispersion curves of several lower order modes in the double cladding W-type fibers ($a_2/a_1 = 1.5$, $n_1 = 1.472$, $n_2 = 1.440$, $n_3 = 1.460$, solid curves: $\chi_2 = \chi_3 = 0$, $\chi_1 = 0.005$, dashed curves: $\chi_1 = \chi_2 = \chi_3 = 0$)

如虚线所示。从图中可以看出, HE_{-11} 和 HE_{11} 模的色散曲线发生分岔, 截止频率也分开, 即 HE_{-11} 和 HE_{11} 模的简并被完全解除, 而且 HE_{11} 模和 HE_{01} 模的色散曲线有交叉。双包层手征光纤中几个低阶模的归一化截止频率 ν_c [为 $(2\pi/\lambda_c)a_1\sqrt{n_1^2 - n_3^2}$] 随纤芯中手征参数 χ_1 的变化关系如图4所示, 随着手征参数 χ_1 的增大, HE_{-11} 模的截止频率变小, HE_{11} 模

的截止频率变大, 而 HE_{01} 模的截止频率反而变小。因此, 只要在纤芯中引入手征, 就可以使得双包层手征光纤实现单模工作, 即只有一个基模 HE_{-11} 在其中传播, 而第一个高阶模随手征参数的不同而不同, 可以是 HE_{11} 模, 也可以是 HE_{01} 模。

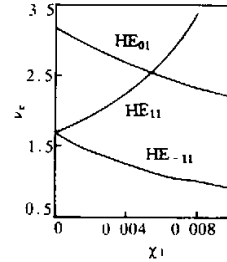


Fig. 4 Normalized cut-off frequency ν_c versus chirality χ_1 in the core of the double cladding chiral optical fiber for several lower order modes

图5给出了只有外包层有手征时双包层 ($\chi_3 = 0.005$) 和相应的单包层手征光纤的色散曲线, 当包层有手征时, 单包层的 HE_{-11} 模和 HE_{11} 模不再简并,

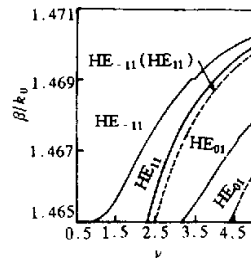


Fig. 5 Dispersion curves of several lower order modes for the cladding chiral optical fiber ($\chi_1 = \chi_2 = 0$, $\chi_3 = 0.005$, $n_1 = 1.472$, $n_2 = 1.440$, $n_3 = 1.460$, solid curves: $a_2/a_1 = 1.0$, dashed curves: $a_2/a_1 = 1.5$)

色散曲线分岔, 截止频率也分开, 但对于双包层手征光纤, 内包层的存在虽然使得模式的截止频率增大, 但 HE_{-11} 和 HE_{11} 模的色散曲线没有分开。单包层手征光纤中 HE_{11} 模和 HE_{01} 模的归一化截止频率 ν_c 随包层中手征参数 χ_2 的增大而增大, 如图6所示, 而基模 (HE_{-11} 模) 不截止, 因此, 只要在包层中引入手征, 在单包层手征光纤中也同样可以实现单模工作, 第一个高阶模总是 HE_{11} 模, 而且只要选择合适的手征参数, HE_{11} 模的归一化截止频率 ν_c 可以很大, 也即单模工作的频率范围可以很大。最后应该指出, 在单包层手征光纤中, 当只有纤芯有手征时, 虽然 HE_{-11} 和 HE_{11} 模的色散曲线发生分岔, 但都不截止^[7], 也即不能在只有纤芯有手征的单包层手征光纤中实现单模工作。

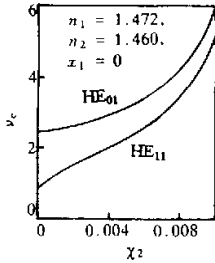


Fig. 6 Normalized cut-off frequency ν_c versus chirality χ_2 in the cladding of the single clad chiral optical fiber for several lower order modes

结论 解析求解了圆芯和内外包层都是手征介质组成的双包层手征光纤,得到了模式场解,推出了模式特征方程,并对模式特征方程进行了数值计算,给出了手征光纤中几个低阶模的色散曲线和截止频率随纤芯和外包层的手征参数的变化关系。结果表明,在双包层手征光纤中,当纤芯中的手征参数增大时, HE_{-11} 和 HE_{11} 模的简并被完全解除,且 HE_{-11} 模的截止频率变小, HE_{11} 模的截止频率变大,所以只要在纤芯中引入手征,就可以在双包层光纤中实现单模工作,即只有一个基模 HE_{-11} 在其中传播。而对单包层光纤,只有当包层中引入手征时,

才可以实现单模工作。两者的单模工作频率范围可以用手征参数来调节。

参 考 文 献

- [1] Chien M, Kim Y, Grebel H. Mode conversion in optically active and isotropic waveguides. *Opt. Lett.*, 1989, **14** (15):826~828
- [2] Pavia C R, Topa A L, Barbosa A M. Semileaky waves in dielectric chirowaveguides. *Opt. Lett.*, 1992, **17** (23): 1670~1672
- [3] Flood K M, Jaggard D L. Single-mode operation in symmetric planar waveguides using isotropic chiral media. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7):474~476
- [4] Singh A K, Singh K S, Khashtgir P *et al.*. Model cut-off condition of an optical chiral fiber with different chiralities in the core and the cladding. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1994, **11**(7):1283~1287
- [5] Qiu R C, Lu I T. Guided waves in chiral optical fibers. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1994, **11**(12):3212~3219
- [6] Qiu R C, Lu I T. Dispersion in chiral optical fibers. *IEE Proc. Optoelectron*, 1998, **145**(3):155~158
- [7] 董建峰. 手征参数对光纤中模式特性的影响. *光学学报*, 1997, **17**(4):476~481
- [8] 董建峰, 李 勇. 手征光纤中导模的色散特性. *量子电子学报*, 1998, **15**(3):283~288
- [9] 董建峰. 椭圆芯手征光纤的基模特性研究. *光学学报*, 1998, **18**(10):1385~1389

Study of the Single-Mode Operation in Chiral Optical Fibers

Dong Jianfeng

(The Institute of Optical Fiber Communication and Network Technology,
Ningbo University, Ningbo 315211)

(Received 6 December 1999; revised 20 March 2000)

Abstract: Analytical solutions of a double cladding (W-type) chiral optical fiber which both core and claddings are chiral media have been presented. The solutions of guided modes and modal characteristic equation are derived. The effects of chirality on dispersion curves and cut-off frequencies of guided modes are studied by numerical method. The single-mode operation can be supported by using chiral core material in the double cladding optical fiber or using chiral cladding material in the single cladding optical fiber.

Key words: double cladding chiral optical fiber; chirowaveguide; single-mode; modal characteristic equation