

矩形波导近似计算椭圆应力包层单模 光纤的双折射

王子华 丛立方

(上海科学技术大学, 上海 201800)

提 要

提出矩形波导近似, 并分别采用 Marcatili 法和有效折射率法进行计算, 得出了数值结果, 并将其与大块光学材料近似、修正耦合波理论和微扰法以及精确求解特征方程的结果进行比较.

关键词 单模光纤, 双折射.

1 引 言

在高双折射单模光纤中, 有一种椭圆应力包层单模光纤, 其双折射来源于椭圆包层各向异性的应力. Kaminow 和 Ramaswamy^[1] 和 Eickhoff^[2] 采用大块光学材料近似计算这种光纤的双折射, 导出了非常简单的计算公式, 但是精度不高, 而且得到的双折射是不随光波长变化的常数. 另外也可以用修正耦合波理论^[3]和微扰方法^[4]进行计算, 对于椭圆应力包层单模光纤, 这两种方法所得到的结果是一样的. 虽然这两种方法考虑了场分布的影响, 计算得到的双折射随波长有变化, 但误差还是很大.

本文用单模光纤的导波理论, 即用特征方程直接求传播常数的方法, 求得椭圆应力包层单模光纤双折射的精确值, 并进一步用矩形介质波导近似, 使计算精度较高且简便. 文中还分别用 Marcatili 法^[5]和有效折射率法^[5]计算了矩形介质波导的传播常数.

2 椭圆应力包层单模光纤的双折射

椭圆应力包层光纤结构如图 1 所示. 由于光纤内包层和外包层热膨胀系数的一致, 产生了应力的各向异性. 这个各向异性的应力在纤芯和椭圆内包层中是均匀一致的, 假设内包层很大, 并忽略外包层的影响, 折射率的各向异性有如下关系:

$$n_{1x} - n_{1y} = n_{2x} - n_{2y} = \frac{1}{2}n^3(p_{11}-p_{12}) \frac{(a_1-a_2)\Delta T}{1-N^2} \frac{a-b}{a+b}, \quad (1)$$

式中 n_{1x} 和 n_{2x} 分别为 X 方向的纤芯和包层折射率, n_{1y} 和 n_{2y} 分别为 Y 方向的纤芯和包层折射率. n 是平均的折射率, p_{11} 和 p_{12} 是光弹系数, a 、 b 为椭圆包层的长短轴, a_1 、 a_2 分别为外包层和内包层材料的热膨胀系数, ΔT 为光纤材料软化温度和室温的差, N 为泊松比. 文献[2]采用

大块光学材料近似得出最直观和简单的双折射 B 的计算公式为

$$B = (\beta_x - \beta_y) / k_0 = n_{1x} - n_{1y}, \quad (2)$$

式中 $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为光波长, β_x 和 β_y 分别为沿 X 方向和 Y 方向偏振的 LP_{01} 模的传播常数.

(2) 式采用均匀平面波近似, 并忽略了导波场分布的不均匀性, 得到的双折射是不随波长变化的常数, 如图 2 所示, 无法反映光纤的偏振色散特性.

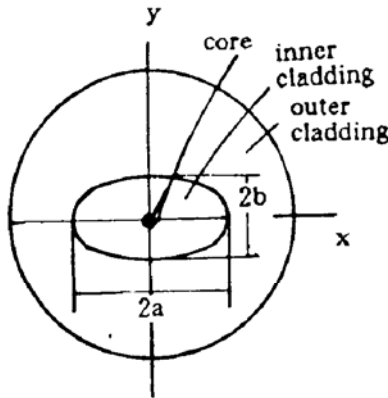


Fig. 1 Structure of an elliptical inner cladding fiber

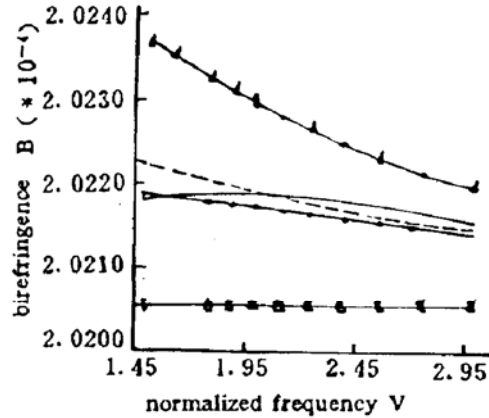


Fig. 2 Birefringence B as a function of normalized frequency V

精确的方法是求解单模光纤的特征方程

$$\frac{uJ_1(u)}{J_0(u)} = \frac{\omega k_1(w) n_{1x}}{k_0(w) n_{2x}}, \quad (3)$$

得到 LP_{01} 和 LP_{11} 模的传播常数 β_x 和 β_y . 式中 u 和 w 为横向纤芯传播常数和包层衰减常数, J_0, J_1 分别为零阶和一阶贝塞尔函数, k_0, k_1 分别为零阶和一阶修正贝塞尔函数. 在求 β_x 时

$$u = \rho [(k_0 n_{1x})^2 - \beta_x^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$w = \rho [\beta_x^2 - (k_0 n_{2x})^2]^{1/2} \quad (5)$$

式中 ρ 为纤芯半径. 在求 β_y 时, 只须将(3)(4)(5)式中的下标 x 换成 y . 最后根据定义 $B = (\beta_x - \beta_y) / k_0$ 就可得到双折射.

3 矩形波导近似计算椭圆应力包层单模光纤的双折射

精确解必须解一个复杂的特征方程, 这是一个其中含有贝塞尔函数的超越方程, 因此求解相当困难. 由光纤的弱导性质, 可以用边长为 2ρ 的正方形介质波导近似圆形的光纤. 求解矩形介质波导的传播常数, 可以用 Marcattili 法^[5]. 它将一个矩形波导看成是两个独立的相互垂直的薄膜波导的组合, 对于沿 x 方向偏振的 E_{y1} (对应于光纤的 LP_{01}) 模的传播常数 β_x 可由下式求得

$$\beta_x^2 = k_0^2 n_{1x}^2 - k_x^2 - k_y^2, \quad (6)$$

式中 k_x 和 k_y 由下面两个薄膜波导特征方程求得

$$k_x \rho = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left(\frac{n_2^2 k_x}{n_1^2 k_x'} \right), \quad k_y \rho = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} (k_y / k_y') \quad (7)$$

$$k_x'^2 = k_0^2 (n_{1x}^2 - n_{2x}^2) - k_x^2, \quad k_y'^2 = k_0^2 (n_{1y}^2 - n_{2y}^2) - k_y^2. \quad (8)$$

将(6)–(8)式中的下标 x 和 y 互换就得到 Y 方向偏振 E_{x1} (LP_{01}) 模的传播常数 β_y .

求解矩形波导的传播常数也可以用有效折射率法^[5]. 有效折射率法也是把矩形介质波导

看成是两个互相垂直的薄膜波导的组合,但这两个薄膜波导不是相互独立的. 第一个薄膜折射率仍为 n_1 , 第一个薄膜的存在只是影响了第二个薄膜的折射率,使之变为 N_1 . 这第二个薄膜波导的传播常数就是矩形介质波导的传播常数.

本文用不同方法计算了椭圆应力包层单模光纤的双折射 B 随光纤的归一化频率 V 的变化示于图 2. 图中----线是 Marcatili 法求得的, \rightarrow 线是用有效折射率法求得的, ——线是精确解, \blacktriangle 线是修正耦合波方程和微扰法求得的, \oplus 线是用大块光学材料近似方法的(3)式求得的. 由图 2 可见, 矩形介质波导近似比其他近似方法的精度高, 另外同样用矩形波导近似的方法, $V > 1.788$ 时, Marcatili 法比有效折射率法精确, $V < 1.788$ 时, 有效折射率法更精确.

4 结论

本文指出大块光学材料近似计算椭圆应力包层型单模光纤双折射的不足之处, 提出用矩形波导近似计算双折射, 给出了数值结果, 并对各种近似方法的精度作了比较, 矩形波导近似具有既精度高又简单的优点, 此外, 它还可以进一步推广应用到多包层单模光纤, 如用多层矩形波导近似计算多包层光纤的双折射.

参 考 文 献

- [1] I. P. Kaminow, V. Ramaswamy, Single-polarization optical fibers; Slab model. *Appl. Phys. Lett.*, 1979, **34** (4): 268~270
- [2] W. Eickhoff, Stress-induced single-polarization single-mode fiber. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(12): 629~631
- [3] J. Sakai, T. Kimura, Birefringence and polarization characteristics of single-mode optical fiber under elastic deformations. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1981, **QE-17**(6): 1041~1051
- [4] D. F. Clark and I. Dunlop, Simple method for analyzing the birefringence of an elliptical-core fiber by an equivalent rectangular waveguide. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(20): 1149~1151
- [5] 方俊鑫, 光电子技术基础. 上海: 上海交通大学出版社, 1988: 267

Calculating the birefringence of an elliptical inner cladding fiber by rectangular waveguide approach

WANG Zihua CONG Lifang

(Shanghai University of Science and Technology, Shanghai 201800)

(Received 13 April, 1992; revised 8 June, 1992)

Abstract

In this paper, we presented a rectangular waveguide method to calculate the birefringence of an elliptical inner cladding single mode fiber. The fiber is approximated by a rectangular waveguide, then Marcatili and effective index method were applied respectively to calculate the birefringence caused by the elliptical cladding. Numerical example was given and calculated results were compared with that obtained by plane wave approximation, modified coupled mode theory and perturbation method as well as exact values by solving the eigen value equation. It is shown that rectangular waveguide method is not only accurate but simple.

Key words Single mode fiber, birefringence.