

平顶模式微纳光纤的色散特性

任卫红 赵楚军 文双春

(湖南大学计算机与通信学院微纳光电器件及应用教育部重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 基于光纤模式理论,研究了三层平顶模光纤的波导色散特性,分析了光纤折射率的分布和芯径大小的改变对其波导色散的影响。结果表明,平顶模式微纳光纤与常规微纳光纤及大芯径平顶模式光纤的波导色散特性均不同。在 $0.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段内,当光纤折射率分布发生变化时,其波导色散曲线唯一的极小值有规律地增大或减小,并出现蓝移或红移现象;而当芯径尺寸减小时,波导色散极小值明显减小,但极小值点位置都出现在 $0.6\ \mu\text{m}$ 处。无论是光纤折射率分布还是芯径大小发生变化,在 $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 长波段,其波导色散曲线增势均趋缓,且值渐趋于零,尤其当芯径大小发生变化时这种趋势更明显。

关键词 光电子学;微纳光纤;模式理论;平顶模;色散

中图分类号 TN248

OCIS 060.2400 160.4236

文献标识码 A

Dispersion Characteristics of Flattened Mode Micro/Nano Fibers

Ren Weihong Zhao Chujun Wen Shuangchun

(Key Laboratory of Micro/Nano Optoelectronic Devices, Ministry of Education, School of Computer and Communication, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract Based on the fiber mode theory, the electromagnetic wave propagation characteristics of the three-layer flattened mode micro/nano fiber have been investigated. The influences of the index and core size on the waveguide dispersion have been studied detailedly. Numerical simulations show that the dispersion of a flattened mode micro/nano fiber has different properties from conventional micro/nano fiber and flattened mode fiber. In the wavelength range of $0.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$, with the variation of the index, the waveguide dispersion curve's only minimum point increases or decreases regularly, and shows red shift or blue shift. While with the variation of the core size, the waveguide dispersion's minimum point reduces obviously, but the minimum point is located at the same position of $0.6\ \mu\text{m}$. Whether the changed condition is the index or core size, in $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ band, the waveguide dispersion increases slowly and its value tends to zero gradually. When the core size changes, this trend gets more significant.

Key words optoelectronics; micro/nano fiber; modal field theory; flattened mode; dispersion

1 引言

微纳光纤具有小尺寸、低光学损耗(包括传输和弯曲损耗)、强光场约束、倏逝波传输、高耦合效率、大波导色散等特性,并且可以保持传输光的相干性,在光通信、传感和非线性光学等领域具有潜在的应用价值,特别是在减小器件尺寸、提高器件性能和集成度等方面具有很好的应用前景。近几年,随着低损耗微纳光纤的成功制备^[1],相应的理论和实验研究也日趋深入。对于常规微纳光纤^[2,3]、空芯微纳光纤^[4~6]、液芯微纳光纤^[7]等的波导特性,研究者均已经进行了深入的理论研究。如果微纳光纤的折射率匹配得当,就有可能出现一种平顶模式的情况。常规平顶模式光纤已有很多报道^[8~10],但是在微纳尺度,这种光纤的导波特性和色散特性,至今还没有报道。本文基于电磁场理论^[11,12],详细讨论了平顶模式微纳光纤的参数设计,并在此基础上重点探讨了该种光纤的色散特性。

收稿日期: 2009-08-02; **收到修改稿日期:** 2009-10-02

作者简介: 任卫红(1984—),女,硕士研究生,主要从事微纳光纤方面的研究。E-mail: jan_eye@sina.com

导师简介: 文双春(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事超高速通信系统、光子材料与光通信器件、强激光技术等方面的研究。E-mail: scwen@hnu.cn (通信联系人)

2 理论模型

为了简化基本模型,假定光纤横截面为直径均匀的圆形,表面光滑,折射率呈轴对称分布,且光纤的包层延伸到无限远处,其横截面结构和折射率分布如图1所示,中心凹陷半径为 d ,纤芯半径为 a 。

各层折射率分布为

$$n(r) = \begin{cases} n_1, & |r| < d \\ n_2, & d \leq |r| < a \\ n_3, & a \leq |r| < \infty \end{cases} \quad (1)$$

式中 $n_2 > n_1 > n_3$ 。对于基模,在标量近似下,给定光纤参数 n_1, n_2, n_3, a ,运用边界条件,可以得到超越方程,并可以得到相应的 d 值(获得中心平顶模式)^[13]:

$$U \left[Y'_0(U) - \frac{Y'_0(Ud/a)}{J'_0(Ud/a)} J'_0(U) \right] / \left[Y_0(U) - \frac{Y_0(Ud/a)}{J_0(Ud/a)} J_0(U) \right] = \frac{WK'_0(W)}{K_0(W)}, \quad (2)$$

式中 $U = ak_0(n_2^2 - n_1^2)^{1/2}$ 为径向归一化相位常数; $W = ak_0(n_1^2 - n_3^2)^{1/2}$ 为径向归一化衰减常数。光纤的群速度 V_g 和波导色散 D_w ^[14]分别为

$$V_g = \frac{d\omega}{d\beta} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d\lambda}{d\beta}, \quad D_w = \frac{d(V_g^{-1})}{d\lambda}, \quad (3)$$

式中 λ 为真空中的波长, c 为真空中的光速, β 为传播常数, ω 为角频率。

3 数值模拟结果

3.1 平顶模式微纳光纤参数

在讨论平顶模式微纳光纤的色散特性之前,有必要明晰平顶模式光纤参数之间的关系。由(2)式得到了光纤中心凹陷半径 d 值和特定光纤参数折射率 n_1, n_3 ,纤芯半径 a 之间的关系,如图2所示。讨论过程中,始终保持 $n_2 = 1.46$ 不变。对于微纳光纤,为了保证光纤传输光的能力不受到极大限制,一般光纤直径不能小于某个阈值,一般这个阈值比波长小1个数量级,不然光纤损耗会急剧增加^[15]。我们计算了取值范围在410~500 nm区间内 a 相对应的 d 值。

图2(a)为中心凹陷半径 d 和纤芯半径 n_1 的关系图。计算时选取的光纤参数为 $n_2 = 1.46, n_3 = 1.43, a = 500$ nm, $\lambda = 1$ μ m。可以看出,凹陷半径 d 随着 n_1 的增大而减小,而且当 n_1 较大时,这种变化越明显。 d 和 n_3 的关系如图2(b)所示,计算时选取的光纤参数为 $n_1 = 1.43, n_2 = 1.46, a = 500$ nm, $\lambda = 1$ μ m。由图知, d 随着 n_3 的增大而增大,当 n_3 趋近于 n_1 时,这种变化越剧烈,且当 $n_1 - n_3 \rightarrow o(r)$ [$o(r)$ 表示无穷小量]时, d 渐逼近于纤芯半径 a 。图2(c)给出了 d 和 a 的关系图,光纤参数为 $n_1 = 1.43, n_2 = 1.46, n_3 = 1.43, \lambda = 1$ μ m。计算结果表明, d 随着 a 的增大而增大,且随着 a 进一步减小, d 减小得越快。

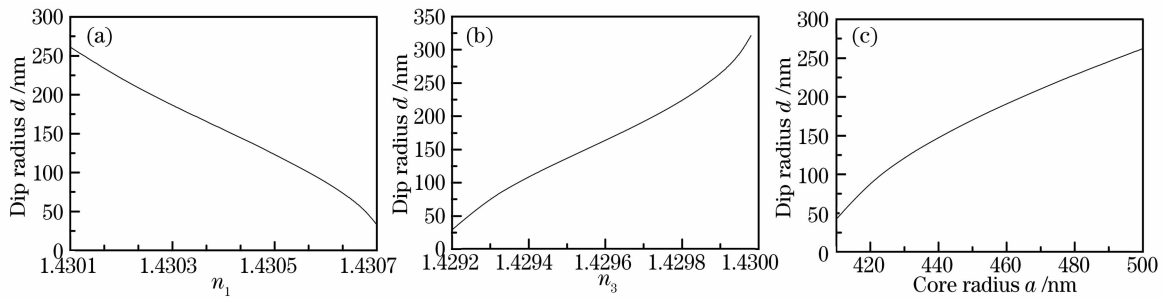


图2 光纤参数关系图。(a) n_1 不同时的 d 值,(b) n_3 不同时的 d 值;(c) a 不同时的 d 值

Fig. 2 Schematic of fiber parameters. (a) different n_1 , (b) different n_3 , (c) different a

3.2 色散特性

当光纤芯径减小到微纳量级,光纤的波导特性会发生比较大的变化,平顶模式微纳光纤的色散特性值得探讨。计算了不同参数下在 $0.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段内光纤的波导色散特性,如图 3 所示。

图 3(a)为光纤波导色散 D_w 特性与 n_1 关系的曲线,选取的光纤参数为 $n_2 = 1.46, n_3 = 1.43, a = 500\ \text{nm}, \lambda = 1\ \mu\text{m}, d$ 由(2)式求得。图 3(a)表明,对于每一个 n_1 ,其波导色散曲线都有一个极小值,光纤色散曲线随着 n_1 的增大红移,但红移现象越来越不明显,同时整个曲线幅度变大。比如,对于 $n_1 = 1.4301, 1.4303, 1.4305, 1.4307$,曲线极小值点分别大致位于 $0.6, 0.69, 0.71, 0.72\ \mu\text{m}$ 左右,波导色散值分别约为 $-125, -155, -172, -187\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,红移现象越来越弱,极小值变化趋势越来越缓,而且曲线下降部分的斜率随 n_1 的变化而变化。 n_1 值越大曲线极小值减小,且下降部分延长、斜率绝对值越大。结合图 2(a),可以初步认为,随着凹陷半径 d 的减小,其波导色散曲线出现红移现象。

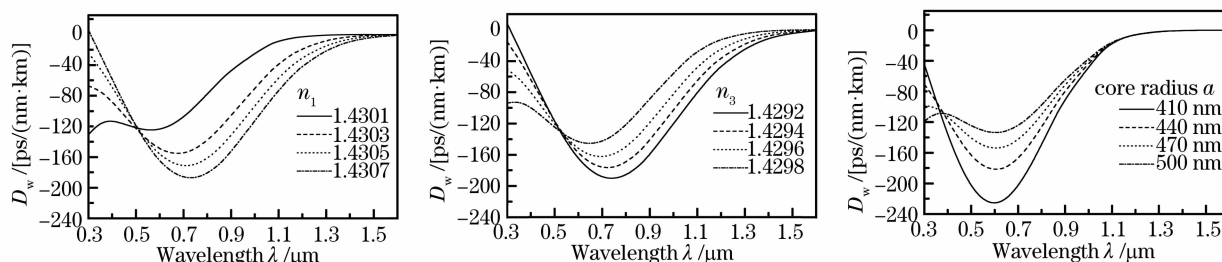


图 3 不同 n_1 (a), n_3 (b), a (c) 时的光纤色散曲线

Fig. 3 Wavelength-dependent waveguide dispersion of fundamental modes of fiber. (a) different n_1 , (b) different n_3 , (c) different a

图 3(b)为光纤波导色散 D_w 特性与 n_3 关系的曲线。计算时选取的光纤参数为 $n_1 = 1.43, n_2 = 1.46, a = 500\ \text{nm}, \lambda = 1\ \mu\text{m}, d$ 由(2)式求得。不难看出, D_w 与 n_3 的关系和图 3(a)所示的正好相反。但在 n_1, n_3 变化范围一致的情况下(均为 6×10^{-4}),图 3(b)曲线极小值变化幅度[约为 $46\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$]不及图 3(a)[约为 $62\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$]。结合图 2(b)可知,随着凹陷半径 d 的增大,其波导色散曲线出现蓝移现象。

图 3(c)为 D_w 与 a 关系的曲线。计算时选取的光纤参数为 $n_1 = 1.43, n_2 = 1.46, n_3 = 1.43, \lambda = 1\ \mu\text{m}, d$ 由(2)式求得, a 从 $410\ \text{nm}$ 到 $500\ \text{nm}$ 变化。图 3(c)与图 3(a), (b)不同,随着纤芯半径 a 的减小,色散曲线极小值点出现在同一波长 $0.6\ \mu\text{m}$ 处,保持不变,这和文献[4]中随着值 a 减小,极小值点蓝移的规律也不同。结合图 2(c),这点可从 d 减小引起的波导色散曲线红移和 a 减小引起的蓝移恰好抵消给出初步解释。同时,光纤色散曲线随着 a 的减小,整个曲线幅度变大,曲线下降部分延长、斜率绝对值增大,色散极小值明显减小。如图 3(c)所示, a 增加 $90\ \text{nm}$,色散减小约 $93\ \text{ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,即得到了更大的负色散。且从各条曲线的极小值可看出,色散增幅随着 a 同等幅度的减小而明显变大,这点可在波长 $0.6\ \mu\text{m}$ 处易观察到。可推知,纤芯半径减小到一定值后,光纤波导色散值可达到 $\text{ns}/(\text{nm}\cdot\text{km})$ 量级。这和文献[4]中所研究的单模亚波长直径光纤的色散特性一致。实际中可根据需要选择相应的光纤纤芯参数,获得较大的负色散,而通过改变色散特性控制光纤传输特性在许多领域已经得到了应用,比如光通信、非线性光学等^[16,17]。

综上,无论 n_1, n_3 还是 a 发生变化,波导色散值在 $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 长波长波段增势都比较平稳,且值渐趋于零,尤其是 a 改变时这种趋势更明显。这和文献[13]中给出的普通阶跃型光纤和平顶模式光纤的波导色散曲线在长波段色散值逐渐减小有所不同。

4 结 论

通过合理地设计相应参数,给出了平顶模微纳光纤的设计准则,并着重研究了光纤的色散特性。结果表明,在 $0.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 波段内,当改变光纤中心凹陷部分折射率取值时,其波导色散曲线随着折射率的增大红移,而且曲线极小值减小;包层折射率值变化时的规律与图 3(a)正好相反;当改变光纤芯径大小时,其波导色散曲线极小值的减小幅度随芯径的增大呈逐渐增大趋势,但未有曲线移动现象,极小值点均出现在 $0.6\ \mu\text{m}$ 波长处。但不管改变光纤的折射率还是芯径大小,在 $1.3\sim 1.6\ \mu\text{m}$ 长波长范围内,其波导色散曲线

增势趋于平稳,值渐趋于零,尤其芯径大小发生变化时,这种趋势更明显。以上所述规律有利于对平顶模式微纳光纤的色散进行设计,并为微纳光纤的制备及其器件应用提供一些依据。

参 考 文 献

- 1 Limin Tong, Rafael R. Gattass, Jonathan B. Ashcom *et al.*. Subwavelength-diameter silica wires for low-loss optical wave guiding[J]. *Nature*, 2003, **426**(6968): 816~819
- 2 M. Němec, H. Jelínková, M. Fibrich *et al.*. Mid-infrared radiation spatial profile delivered by COP/Ag hollow glass waveguide[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2007, **4**(10): 761~767
- 3 Sui Kerong, Zhu Xiaosong, Tang Xiaoli *et al.*. Study on material dispersion of dielectric layer in hollow fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2062~2064
隋可融, 朱晓松, 汤晓黎 等. 空芯光纤中介质层材料色散的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2062~2064
- 4 Limin Tong, Jingyi Lou, Mazur Eric. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(6): 1025~1035
- 5 Jingyi Lou, Limin Tong, Zhizhen Ye. Dispersion shifts in optical nanowires with thin dielectric coatings[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(16): 6993~6998
- 6 Chujun Zhao, Zhixiang Tang, Yunxia Ye *et al.*. Field and dispersion properties of subwavelength-diameter hollow optical fiber [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(11): 6629~6634
- 7 R. Altkorn, I. Koev I, R. P. van Duyne *et al.*. Low-loss liquid-core optical fiber for low-refractive-index liquids: fabrication, characterization, and application in Raman spectroscopy[J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(34): 8992~8998
- 8 Ravi K. Varshney, A. K. Ghatak, I. C. Goyal *et al.*. Design of a flat field fiber with very small dispersion slope[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**(4): 189~198
- 9 Chuncan Wang, Fan Zhang, Yuchun Lu *et al.*. Single-mode operations in the large flattened mode optical fiber[J]. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, 2009, **11**(6): 065402~065406
- 10 Chujun Zhao, Zhixiang Tang, Yunxia Ye *et al.*. Design guidelines and characteristics for a kind of four-layer large flattened mode fibers[J]. *Optik*, 2008, **119**(15): 749~754
- 11 Wu Chongqing. Optical Waveguide Theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 25~80
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 25~80
- 12 Liao Yanbiao. Fibers Optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 13~67
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 13~67
- 13 A. K. Ghatak, I. C. Goyal, Rajeev Jindal. Design of a waveguide refractive index profile to obtain flat modal field[C]. *SPIE*, 1999, **3666**: 40~44
- 14 Bahaa E. A. Saleh, Malvin Carl Teich. Fundamentals of Photonics, Second Edition[M]. New York: John Wiley & Sons, 2008. 30~60
- 15 M. Sumetsky. How thin can a microfiber be and still guide light? [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(7): 870~872
- 16 P. P. Bishnu. Fundamentals of Fibre Optics in Telecommunication and Sensor Systems[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993. 52~124
- 17 T. A. Birks, W. J. Wadsworth, P. S. J. Russell. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(19): 1415~1417