

文章编号: 1001-3806(2011)06-0748-04

双空芯光子晶体光纤表面模控制方法

马玲芳, 刘敏*, 董传培, 张敏, 贺冯良
(重庆大学通信工程学院, 重庆 400044)

摘要: 表面模与纤芯基模耦合是使双空芯光子晶体光纤产生无耦合点的根本原因。为进一步探究双空芯光子晶体光纤中表面模的产生及控制机理, 采用平面波展开和全矢量有限元法, 分析了纤芯周围石英环相对厚度和纤芯的截切半径对表面模和无耦合点的影响。结果表明, 纤芯截切半径固定时, 随着石英环相对厚度的增大, 无耦合点向长波长方向移动; 石英环相对厚度固定为1时, 纤芯最佳截切半径为 $0.9\lambda \sim 1.0\lambda$, 可以较好地抑制表面模。这为新型双空芯光子晶体光纤的结构设计和现实应用提供了理论依据。

关键词: 光纤光学; 表面模; 全矢量有限元法; 石英环相对厚度; 纤芯截切半径

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.06.007

Control of surface modes in hollow dual-core photonic crystal fibers

MA Ling-fang, LIU Min, DONG Chuan-pei, ZHANG Min, HE Feng-liang

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The coupling of the surface modes and the fundamental modes is the root of the disappearance of coupling points between the two cores of the hollow dual-core photonic crystal fibers. In order to study the mechanism of the appearance and control of surface modes, the full vector finite element method and the plane wave expansion method were used to study the effect of the silica ring or the core radius on the surface modes and the change of the uncoupling point. The numerical simulation shows that with the same core radius, the uncoupling point moves to longer wavelength with the increase of the normalized thickness of the silica ring. And the optimal range of core radius that is free of surface modes is from 0.9λ to 1.0λ when the normalized thickness of the silica ring is set to 1. The results provide theoretical evidence to design the novel hollow dual-core photonic crystal fibers, enriching and consummating the theoretical foundation for the hollow dual-core photonic crystal fibers.

Key words: fiber optics; surface modes; full vector finite element method; thickness of the silica ring; core radius

引言

光子晶体光纤是通过在无限的光子晶体内引入缺陷纤芯而形成的。根据纤芯引入缺陷方式的不同, 可分为全内反射型光子晶体光纤和光子带隙型光子晶体光纤^[1]。空芯光子晶体光纤是一种基于光子带隙效应的新型光纤, 理论上具有低损耗、低色散、低非线性, 可传输超强激光, 以及可成为液体或气体通道等优点。双芯光纤是光学系统中常见的耦合器件, 被广泛用做光纤定向耦合器^[2-3]、窄带滤波器^[4]、可变衰减器^[5]等。对于双空芯光子晶体光纤而言, 光能量集中在空芯中传播, 当光被耦合进入空

芯波导光纤中时没有菲涅耳反射^[6], 因此, 可作为高效率光耦合器件。随着对空芯光子晶体光纤研究的进一步深入, 双空芯光子晶体光纤必将成为光通信系统中十分重要的器件。

WANG 等人报告其设计的双空芯带隙光纤中, x 偏振方向存在无耦合点, y 偏振方向耦合特性与普通折射率引导型双芯光子晶体光纤类似。无耦合现象可由光子带隙光纤中表面模对纤芯传导模式的影响来解释^[7]。表面模的产生是由于无限的光子晶体被截断时引入了新的边界条件, 激发了满足这些边界条件的表面模。国内外已有不少研究者致力于了解表面模的特性以减少甚至消除它的影响^[8-11]。在大占空比空芯光子晶体光纤中, 纤芯和包层之间插入特定厚度的石英环可以抑制表面模。此外, 纤芯的截切半径也会对表面模产生影响。本文将采用平面波展开法和全矢量有限元法, 研究双空芯光子晶体光纤中, 石英环相对厚度及纤芯截切半径对表面模及纤芯无耦合特性的影响。

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (CDJXS11160005)

作者简介: 马玲芳 (1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事光子晶体光纤领域研究。

* 通讯联系人。E-mail: liumin@cqu.edu.cn

收稿日期: 2011-01-17; 收到修改稿日期: 2011-03-16

1 模型建立

作者研究的双空芯光子晶体光纤的截面几何结构如图 1a 所示。图中白色圆圈为空气孔,在光纤中心处引入两个相邻的大空气孔形成纤芯。包层为具有三角形晶格结构的 2 维光子晶体,光在两缺陷纤芯中传输。包层空气孔直径为 d ,纤芯直径为 d_c ,纤芯截切半径为 r_c ,孔间距为 Λ ,两纤芯间距 $C = 3\Lambda$,纤芯周围石英环厚度为 t_r 。本文中 $\Lambda = 2.2\mu\text{m}$, $d/\Lambda = 0.96$ 。光纤各个参量的表示方法和定义如图 1b 所示。定义石英环的相对厚度为: $T = t_r/(\Lambda - d)$ [12]。

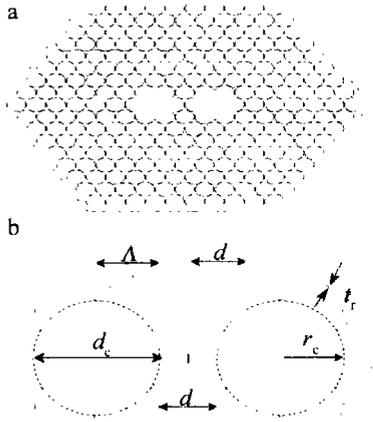


Fig. 1 a—schematic of the hollow dual-core photonic crystal fiber b—the parameters of the schematic

2 数值分析

2.1 石英环相对厚度对表面模的影响

空芯光子晶体光纤只允许特定频率的光在纤芯

中传输,即存在带隙范围。本文中采用平面波展开法求解光纤的带隙结构。在数值分析过程中,包层空气孔的折射率设为常数 1,背景材料为纯石英,忽略材料色散,其折射率设为常数 1.444。采用全矢量有限元法计算光子带隙中的缺陷模式。在带隙边缘处,由于表面模与基模耦合十分严重,导致光场能量泄漏较大。为使得偶模和奇模均位于光子带隙中,取带隙中间 $0.49\Lambda \sim 0.63\Lambda$ 的波长范围进行研究。

在双芯光纤中,耦合长度表征了两纤芯之间能量的周期性变化规律[13],是双芯光纤研究中的一个重要物理量,可根据下式进行计算:

$$L_c = \frac{\pi}{k_{ze} - k_{zo}} = \frac{\pi}{k(n_{\text{even}} - n_{\text{odd}})} \quad (1)$$

式中, k_{ze} 和 k_{zo} 分别表示光纤中偶模和奇模沿光纤轴向的传播常数, n_{even} 和 n_{odd} 表示相应模式的有效折射率, $k = 2\pi/\lambda$, 为自由空间的波数, λ 表示自由空间光波长。耦合长度越短,表明双芯间的耦合越容易,耦合特性越强。在双空芯光子晶体光纤中,特定传输波长处表面模与基模耦合,出现纤芯偶模和奇模的传播常数相同的情况,此时耦合长度将趋于无穷大,出现无耦合现象,此点即称作无耦合点。能够激发表面模的因素有两个:(1)纤芯和包层之间引入石英环的厚度;(2)纤芯截切半径 r_c 的大小。通过对这两个参量的优化,可以减少甚至消除表面模。

纤芯截切半径 r_c 满足 $r_c/\Lambda = 1.05$,在图 1 所示光纤结构中, T 分别为 0.3, 0.5, 0.7 时,光纤 x 和 y 偏振方向的有效折射率如图 2 所示。

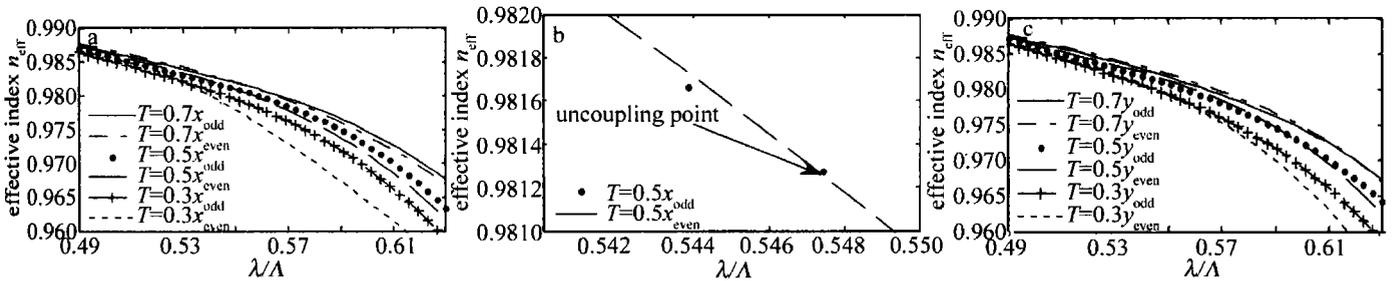


Fig. 2 a—the refractive index for the x-polarization b—the refractive index for the x-polarization when $T = 1$ c—the refractive index for the y-polarization

图 2a 为 T 变化时, x 偏振方向模式有效折射率随归一化传输频率的函数曲线;图 2b 为 $T = 0.5$ 时, x 偏振方向在无耦合点附近的有效折射率曲线;图 2c 为 T 变化时 y 偏振方向模式有效折射率随归一化传输频率的函数曲线。图注中 $T = 0.7x_{\text{odd}}$ 表示石英环相对厚度 $T = 0.7$ 时,光纤 x 偏振方向奇模特性, x_{odd} 代表 x 偏振方向奇模, x_{even} 代表 x 偏振方向偶模, y_{odd} 代表 y 偏振方向奇模, y_{even} 代表 y 偏振方向偶模。从图中可以看出,在带隙范围内,随着传输波长的增大,偶模和奇模的有效折射率均逐渐减小。值得关

注的是,光纤的偶模和奇模的有效折射率曲线存在交点。在图 2b 中可以清晰地看到曲线的交点。交点之前,偶模的有效折射率大于奇模;交点之后,偶模的有效折射率小于奇模。在交点处,模式的有效折射率相同。在这一点所对应的传输波长处,两个纤芯之间不会发生能量交换,这个点即是无耦合点。从图 2a 和图 2c 两图中可以清晰地看到,随着 T 的增大,两偏振方向无耦合点均向长波长方向移动。经研究发现, $T = 0.8$ 时,在带隙范围内, y 偏振方向上无耦合点已经消失,其耦合特性与普通折射率引

导型双芯光纤类似; x 偏振方向的无耦合点移至波长为 0.5981λ 处。由此可见,通过调节石英环相对厚度 T ,可以控制表面模从而控制无耦合点的位置。

无耦合点的出现是由于表面模与纤芯基模发生耦合,使得能量泄露到石英环中所致。因此理论上应有,在无耦合点附近,纤芯能量比较小。 T 变化时, y 偏振方向偶模的纤芯能量随归一化传输频率的变化情况如图3所示。

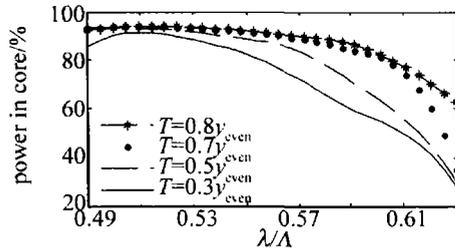


Fig. 3 Fraction of core-confined energy of FM

图3中, $T=0.8y_{\text{even}}$ 表示石英环相对厚度 $T=0.8$ 时, y 偏振方向偶模特性, y_{even} 代表 y 偏振方向偶模。从图3可以看出, $T=0.8$ 时,纤芯中能量分布曲线较为平坦,且纤芯能量较高。在 $0.49\lambda \sim 0.6\lambda$ 的波长范围内,纤芯能量均在90%左右,这是因为 $T=0.8$ 时, y 偏振方向纤芯周围表面模相对较少,大部分光场能量都集中在纤芯中传输。 $T=0.7$ 时,无耦合点约在波长为 0.61847λ 处。从图3可以清晰地看到,随着波长逐渐接近无耦合点,纤芯中光场能量迅速下降。这是因为,在无耦合点附近,表面模变得十分严重,与纤芯基模发生了耦合,导致大部分能量泄露到石英环中。 $T=0.5$ 和 $T=0.3$ 时,纤芯中的能量分布机理与 $T=0.7$ 时类似。随着 T 的变化,无耦合点出现的位置也随之变化,因此,纤芯能量开始下降的起始位置也有所不同。在接近带隙边缘处,纤芯能量都比较低。这是由于纤芯基模与包层模式发生了耦合,导致大部分能量泄露到包层中所致。由以上分析可得,石英环相对厚度 T 与光纤中是否激发表面模、出现无耦合点有紧密的联系。 $T < 0.8$ 时, x 和 y 偏振方向均会出现无耦合现象; $T > 0.8$ 时, y 偏振方向无耦合现象消失,且可以较好地抑制表面模。

2.2 纤芯截切半径对表面模的影响

影响纤芯中表面模式及无耦合点位置的另一个因素是纤芯截切半径 r_c 的值。光纤中没有纤芯时只有块体模即布洛赫模^[14-15],包层中3个相邻空气孔相交处称为角,两气孔相距最近处称为膜。角和膜的定义和表示方法如图4所示。从图4中可以清晰地看出,块体模主要分布在角处,而膜处几乎没有。由于纤芯是通过截切周围包层空气孔而形成的,如果包层空气孔是在膜处被截断,则理论上不会与块

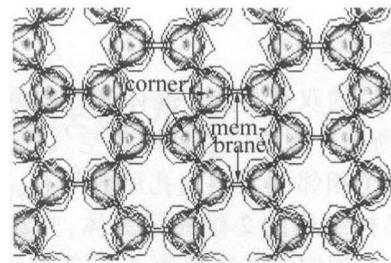


Fig. 4 Representative electric field contours of the bulk modes

体模相干扰,不会激发表面模。在传输波长为 $0.57\lambda = 1.254\mu\text{m}$ 处,石英环相对厚度 T 为定值1时,随着纤芯截切半径 r_c 的变化, y 偏振方向偶模的能量分布曲线如图5所示。

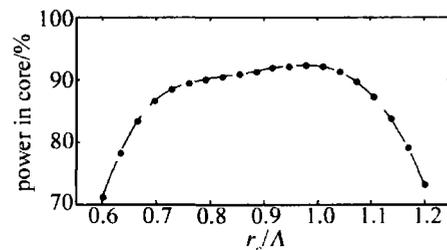


Fig. 5 Fraction of core-confined energy of the fundamental modes

从图5中可以看出, r_c 在 $0.6\lambda \sim 1.2\lambda$ 之间变化时,纤芯能量从70%逐渐增大至93%后又逐渐减小,这正是表面模从有到无再到有的过程。 r_c 在 $0.9\lambda \sim 1.0\lambda$ 之间时,纤芯能量分布较高,光场能量大部分集中在纤芯中传输,纤芯半径的截切点在膜处附近;在其它值处,纤芯能量都比较低。这是由于纤芯半径截切点靠近角处,与块体模相互作用,导致了表面模的产生。表面模与纤芯基模耦合,使光场能量泄露到石英环及包层中。纤芯半径截切点距角处越近,则与块体模的相互作用越强烈,泄露出去的能量越多。当 r_c 分别在 0.6λ 及 1.2λ 处,纤芯中能量只有70%左右。仿真中可以观察到,此时的纤芯光场强度分布发生了扭曲,变得十分不规则。由以上分析可知,纤芯半径截切点应避免在角处,而应选在膜处附近。本文中所述光纤结构下,纤芯最佳截切半径应在 $0.9\lambda \sim 1.0\lambda$ 之间,可以较好地抑制表面模,使得大部分能量都集中在纤芯中传输。

3 结论

研究了一种包层为三角晶格结构的双空芯光子晶体光纤中表面模的产生及控制机理。通过对不同石英环相对厚度及纤芯截切半径下光纤连续带宽、纤芯能量分布的分析,得到在纤芯截切半径为定值时,随着石英环相对厚度的增大,受表面模的影响,纤芯无耦合点向长波长方向移动。通过调节石英环相对厚度,可以控制带隙内表面模的产生,进而控制无耦合点的变化。在石英环相对厚度为定值1时,

通过适当调节纤芯截切半径的值,可以避免出现表面模。在文中所述光纤结构下,能够抑制表面模的纤芯最佳截切半径为 $r_c = 0.9\lambda \sim 1.0\lambda$ 。这为双空芯光子晶体光纤中表面模的控制提供了理论依据,丰富和完善了空芯光子晶体光纤的理论基础。

参 考 文 献

- [1] HUANG J J, LI G, CHEN M, *et al.* Simulation dispersion properties of photonic crystal fiber[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 432-435 (in Chinese).
- [2] MANGAN B J, KNIGHT J C, BIRKS T A, *et al.* Experimental study of dual-core photonic crystal fibre[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(16): 1358-1359.
- [3] LEE B H, EOM J B, KIM J, *et al.* Photonic crystal fiber coupler[J]. *Optics Letters*, 2002, 10(27): 812-814.
- [4] PAVEL P, KANKA J. Erbium-doped twin-core fibre narrow-band filter for fibre lasers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2001, 33(4-5): 571-581.
- [5] GAUDEN D, MECHIN D, VAUDRY C, *et al.* Variable optical attenuator based on thermally tuned Mach-Zehnder interferometer within a twin core fiber[J]. *Optics Communications*, 2004, 231(1/6): 213-216.
- [6] DAI J. Researches on the photonic-bandgap fibers and the application of photonic-bandgap fibers[R]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2009: 16-17 (in Chinese).
- [7] WANG Zh. Study on functional devices of photonic crystal fibers [R]. Tianjin: Nankai University, 2007: 24-26 (in Chinese).
- [8] WEST J A, SMITH C M, BORRELLI N F, *et al.* Surface modes in air-core photonic band-gap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1485-1496.
- [9] KIM H K, SHIN J, FAN S, *et al.* Designing air-core photonic-bandgap fibers free of surface modes[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(5): 551-556.
- [10] AMEZCUA-CORREA R, GEROME F, LEON-SAVAL S G, *et al.* Control of surface modes in low loss hollow-core photonic bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2008, 16(2): 1142-1149.
- [11] ROBERTS P J, WILLIAMS D P, MANGAN B J, *et al.* Realizing low loss air core photonic crystal fibers by exploiting an antiresonant core surround[J]. *Optics Express*, 2005, 13(20): 8277-8285.
- [12] ZHANG H, WANG Q G, YANG B J. Design of core-cladding interface of hollow-core photonic-bandgap fibers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 28(3): 543-548 (in Chinese).
- [13] YU R J, XIANG Y, CHEN M Y, *et al.* Research on coupling lengths of twin-core photonic crystal fiber[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(7): 775-777 (in Chinese).
- [14] COUNY F, BENABID F, ROBERTS P J, *et al.* Identification of Bloch-modes in hollow-core photonic crystal fiber cladding[J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 325-338.
- [15] MICHEL J F D, KIM H K, SHIN J, *et al.* Simple geometric criterion to predict the existence of surface modes in air-core photonic-bandgap fibers[J]. *Optics Express*, 2004, 12(9): 1864-1872.

(上接第 747 页)

干输出是可行的。

参 考 文 献

- [1] CHENG Y, MAO S Q, WANG Z H, *et al.* Avoidance adjust solid state laser[J]. *Laser Technology*, 1999, 23(2): 68-70 (in Chinese).
- [2] CHENG Y, WANG X B, SUN B, *et al.* Study of directional prism cavity character[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, A27(6): 537-541 (in Chinese).
- [3] MAO S Q, CHENG Y, WANG X B, *et al.* A kind of highly stabilized solid-state lasers with directional prism reflector[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3862: 210-214.
- [4] ZHOU G S, ALFREY A J, CASPERSON L W. Modes of a laser resonator with a retroreflecting corner cube mirror[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(9): 1670-1674.
- [5] GAO W Q, YAO G M, XU L X, *et al.* Passively Q-switched Nd³⁺:YAG laser with corner cube[J]. *Chinese Optics Letters*, 2006, 4(6): 332-335.
- [6] LU C Y, LI L, LIU X, *et al.* Laser diode-pumped passively Q-switched laser with corner-cube resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1228-1231 (in Chinese).
- [7] LU C Y, WANG X B, GUO Y L, *et al.* Study on directional prism improving the output stability of Q-switched by Cr⁴⁺:YAG[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(2): 187-189 (in Chinese).
- [8] LIU X, LU C Y, WANG X B, *et al.* Passively Q-switched intracavity optical parametric oscillator with corner-cube resonator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(4): 485-490 (in Chinese).
- [9] CHEN B, CHENG Y. Consolidated design of eye-safe OPO laser[J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 91-93 (in Chinese).
- [10] SHEN M X, WANG S M, HU L G, *et al.* Mode properties produced by a corner-cube cavity[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(20): 4091-4094.
- [11] CHENG Y, SUN B, WANG X B, *et al.* Military laser maintainability[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(3): 229-230 (in Chinese).
- [12] WANG X B, SUN B, CHENG Y, *et al.* Properties of flattened Gaussian beam in directional prism cavity[J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 117-119 (in Chinese).
- [13] CHENG Y. Development and progress of adjust-free solid state laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 297-301 (in Chinese).
- [14] LIU W B, ZHONG M, XIA H J, *et al.* Experimental study on the Nd:glass laser with corner cube array resonator[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2009, 26(2): 168-172 (in Chinese).
- [15] YUAN X D, JIANG X Y, ZHENG J G, *et al.* Output properties of cube corner array resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(6): 813-816 (in Chinese).
- [16] FOX A G, LI T. Resonant modes in a maser interferometer[J]. *Bell System Technology Journal*, 1961, 40(2): 453-488.