

文章编号: 1000-7032(2016)07-0845-07

## 双包层太赫兹光子晶体光纤的传输特性

胡守重, 侯尚林\*, 刘延君, 王道斌, 雷景丽

(兰州理工大学 理学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘要:** 为了在太赫兹波段实现远距离宽频带传输, 设计了一种具有低吸收损耗的环烯烃共聚物(COC)作为基底材料双包层太赫兹光子晶体光纤。利用全矢量有限元法及模式选择理论, 数值模拟了该光纤的单模传输范围、限制损耗、色散以及有效模场面积等特性。结果表明: 优化结构参数可使在 1~10 THz 范围内基模限制损耗小于 0.1 dB/m, 二阶模限制损耗大于 1 dB/m。因此可以获得 1~10 THz 的宽频带单模传输并且在 1.5~10 THz 内群速度色散可以控制在  $\pm 0.1$  ps/(THz·cm)。

**关键词:** 太赫兹波; 光子晶体光纤; 单模传输; 损耗; 色散

中图分类号: TN292.11 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20163707.0845

## Propagation Characteristics of Terahertz Wave Double-cladding Photonic Crystal Fiber

HU Shou-zhong, HOU Shang-lin\*, LIU Yan-jun, WANG Dao-bin, LEI Jing-li

(School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

\* Corresponding Author, E-mail: houshanglin@163.com

**Abstract:** In order to realize long distance and broadband transmission of terahertz wave, a double-cladding terahertz photonic crystal fiber was designed based on Topas cyclic olefin copolymer with low loss. The single-mode transmission range, confinement loss, dispersion and effective area of the double-cladding terahertz photonic crystal fiber were investigated by using the full-vector finite element method (FEM) and the mode choice theory. The results show that the confinement loss of the fundamental mode is far less than 0.1 dB/m and the confinement loss of second-order mode loss is larger than 1 dB/m at frequency range of 1–10 THz by tailoring the structure parameters. The broadband single mode transmission operates at bandwidth of 1–10 THz, and the group velocity dispersion (GVD) can be controlled at  $\pm 0.1$  ps/(THz·cm) in the range of 1.5–10 THz.

**Key words:** terahertz; photonic crystal fiber; single mode; confinement loss; dispersion

## 1 引 言

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 的电磁波, 是宏观电子学向微观光子学过渡的频段, 在成像、医疗、环境监测、通信等方面具有重要的

学术价值和广阔的应用前景<sup>[1-2]</sup>。但受空气中水蒸气的影响, THz 波在自由空间传输具有非常大的吸收损耗, 并且传输方向难以控制, 所以在波导中传输 THz 波成为长距离传输的重要手段<sup>[3-4]</sup>。

光子晶体光纤(PCF)具有结构设计的灵活性

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61167005, 61367007); 甘肃省自然科学基金(1112RJZA018, 1112RJZA017)资助项目

以及优异的传输性能<sup>[5-6]</sup>,在传输 THz 波方面也有独特的优势和潜在的应用。2007 年, Kim 等<sup>[7]</sup>模拟了标准 THz-PCF 的单模传输特性及其色散特性,实现了 0.5 ~ 2.5 THz 内的单模传输,同时波导色散在 0.5 ~ 2 THz 内为  $(-0.03 \pm 0.02)$  ps/(nm · km)。2011 年, 吴昊等<sup>[8]</sup>提出了包层由两种不同直径空气孔周期排列而成的 THz-PCF,在 46 ~ 54 μm 波长内可以将波导色散控制在  $\pm 0.5$  ps/(nm · km),在 47.5 μm 处损耗为 2.6 dB/km。2014 年, Rana 等<sup>[9]</sup>提出了多芯孔八边形低损耗 THz-PCF,在 1 THz 频率处具有单模传输特性,且材料损耗系数约为 0.2 dB/cm。汪静丽等<sup>[10]</sup>设计了一种新型的基于菱形空气孔的单偏振单模 THz-PCF,通过改变光纤中引入缺陷的个数、尺寸以及所处位置,实现了 1.07 ~ 1.36 THz 的单偏振单模运行。近年来,利用 PCF 传输 THz 波成为一个研究热点,实现宽带低损耗、低色散单模传输是学者们一致的目标。有研究表明,高密度聚乙烯、环烯烃共聚物等聚合物材料在 THz 波段具有极低的传输损耗<sup>[11-12]</sup>,因此用这些材料做基材的光子晶体光纤可以降低传输损耗。

基于以上分析,本文以环烯烃共聚物(COC)为基底材料,设计了一种新型双包层光子晶体光纤,研究了它在太赫兹波段的传输特性。通过优化设计光纤结构参数,实现了较低的基模限制损耗、低色散和超宽带单模传输。本文的研究为太赫兹波的远距离传输提供了一种可能的方法。

## 2 光纤结构和理论基础

双包层 THz-PCF 的横截面如图 1 所示。其中  $\Lambda_1$  为外包层空气孔周期,  $\Lambda_2 = 2/3\Lambda_1$  为内包层空气孔周期,  $d_1$  为外包层空气孔直径,  $d_2$  为内包层空气孔直径。灰色基底填充的是环烯烃共聚物(COC),文献[12]给出该材料的折射率在整个 THz 波段为 1.52 ~ 1.53 之间,文献[3, 13]设定其折射率为 1.525 8 和 1.53。参照以上文献,本文选其在 THz 波段的折射率为  $n_1 = 1.525 8$ ,空气的折射率  $n_0 = 1$ 。

有限元方法<sup>[14]</sup>相对于其他数值方法的优点是可以精确地分析任意结构和空气孔分布的 PCF。

由麦克斯韦方程组可以得到电场  $E$  的矢量波动方程:

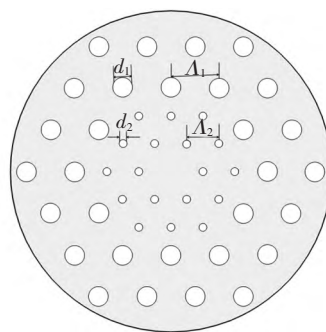


图 1 双包层 THz-PCF 的截面示意图

Fig. 1 Cross-section of the double-cladding terahertz photonic crystal fiber

$$\nabla \times (n^{-2} \nabla \times E) - k_0^2 E = 0, \quad (1)$$

式中  $n$  是介质折射率,  $E$  是电场强度矢量,  $k_0$  为真空中的波数。在光纤中  $E$  可以表述为

$$E(x, y, z) = E(x, y) \exp(-i\beta z), \quad (2)$$

式中  $\beta$  是传播常数。将方程(2)代入(1)并进行区域离散化可以得到本征值方程:

$$[K] \{E\} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 [M] \{E\}, \quad (3)$$

式中  $[K]$  和  $[M]$  为有限元矩阵,  $\{E\}$  为离散化的电场强度,  $n_{\text{eff}}$  为模式的有效折射率。求解方程(3)可以得到特征值和特征向量,进而得到相应的模式折射率。合理地设置参数并选择边界条件可以得到具有复数形式的模式有效折射率,利用实部可以计算群速度色散和波导色散,而利用虚部则可以获得有限包层下不同模式的限制损耗。另外,利用有限元分析软件还可以准确地获得光子晶体光纤的模场分布,进而通过有效模场面积计算公式分析有效模场面积的变化。

在光子晶体光纤中,有限的包层空气孔层数使得部分光能量泄露而造成光纤传输能量的损耗,这种损耗称为限制损耗。限制损耗的大小能够影响太赫兹波在光纤中的衰减程度。模式的限制损耗  $L_{\text{con}}$  可通过下式计算<sup>[15-16]</sup>:

$$L_{\text{con}} = \frac{20}{\ln 10} \frac{2\pi f}{c} \text{Im}(n_{\text{eff}}) \quad (\text{dB/m}), \quad (4)$$

式中  $f$  为工作频率,  $c$  代表真空光速,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  表示模式有效折射率的虚部。根据光子晶体光纤的模式选择理论<sup>[17-18]</sup>,基模限制损耗小于 0.1 dB/m、高阶模限制损耗大于 1 dB/m 时光子晶体光纤可实现单模传输。

色散会导致光信号在传输过程中脉冲展开,不利于远距离传输。由于环烯烃共聚物(COC)

在太赫兹波段的折射率近似为常数,材料色散可忽略不计,因此研究 THz-PCF 时只考虑群速度色散或波导色散<sup>[19]</sup>,即

$$\begin{cases} \beta_2 = \frac{1}{c} \left[ 2 \frac{d\text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\omega} + \omega \frac{d^2\text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\omega^2} \right] \\ D = -\frac{2\pi f^2 \beta_2}{c} \approx -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2\text{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $c$  为真空中的光速,  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  表示传播模式的有效折射率的实部,  $f$  为工作频率,  $\omega = 2\pi f$ 。

光纤的有效模场面积是光纤设计中的重要参量之一,它决定了光纤的非线性系数,而且它还与光纤的弯曲损耗有密切关系<sup>[20-21]</sup>。光子晶体光纤的模场面积  $A_{\text{eff}}$  和非线性系数  $\gamma$  定义为

$$\begin{cases} A_{\text{eff}} = \frac{\left[ \iint |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x,y)|^4 dx dy} \\ \gamma = \frac{2\pi n_2 f}{c A_{\text{eff}}} \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $E(x,y)$  为光子晶体光纤的电场分量,  $n_2$  为基底材料的非线性折射率,  $f$  为工作频率。

### 3 光纤的特性分析

#### 3.1 限制损耗及单模传输特性

对传统的阶跃型光纤,通常利用归一化频率法判断单模传输范围。对于光子晶体光纤,可以利用等效折射率模型将其等效为阶跃型光纤,进而利用归一化频率值判断单模范围。但是这种近似与光纤结构有关,在结构复杂的情况下误差较大。本文利用损耗理论判断单模传输情况,通过比较光纤各阶模式的限制损耗可以精确地知道哪些模式被限制在纤芯,而哪些模式随着传输被损耗殆尽。

为简化分析,我们选取高阶模中限制损耗最低的模式作为研究对象,通过参考以往文献及大量的仿真模拟发现二阶模( $\text{TE}_{01}$ 、 $\text{TM}_{01}$ 、 $\text{HE}_{21}$ )的限制损耗总是除基模( $\text{HE}_{11}$ )之外最小的,因此下面讨论选取二阶模中限制损耗最小的作为参考对象。

首先,给定外包层空气孔周期  $\Lambda_1 = 500 \mu\text{m}$ ,内包层空气孔直径  $d_2 = 50 \mu\text{m}$ ,令外包层空气孔直径  $d_1$  分别为 100、150、200、250  $\mu\text{m}$ 。外包层空气孔的大小对光纤限制损耗及单模传输带宽的影响如图 2 所示。

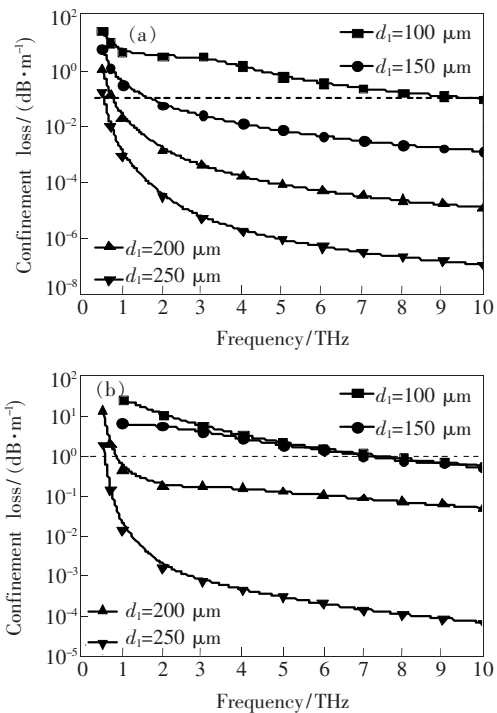


图 2 参数  $d_1$  的变化引起限制损耗随频率的变化曲线。(a) 基模限制损耗; (b) 二阶模限制损耗。

Fig. 2 Confinement loss of the fundamental mode (a) and second-order mode (b) as a function of frequency for different  $d_1$

比较基模与二阶模的损耗图可以发现,在结构与频率相同的条件下,光纤基模的限制损耗总是大于二阶模,下面的讨论都具有相同的特点,这也是实现单模传输的前提。而且光纤的基模与二阶模限制损耗都随外包层空气孔直径的增大而减小,这是由于随着  $d_1$  的增大,包层空气孔对光的限制能力增加,使更多的光聚集在纤芯。而当外包层空气孔直径为 150  $\mu\text{m}$ 、频率  $f = 2 \text{ THz}$  时,基模限制损耗约为 0.1  $\text{dB/m}$ 。随着频率的增加,光场能量向纤芯区域集中,泄露到包层的光能量减小,限制损耗减小。因此当  $f > 2 \text{ THz}$  时,基模限制损耗小于 0.1  $\text{dB/m}$ ,如图 2(a) 所示;同样由图 2(b) 可知,当  $f < 7 \text{ THz}$  时,二阶模限制损耗大于 1  $\text{dB/m}$ 。因此,单模传输可以在 2 ~ 7 THz 范围内实现。

其次,给定外包层空气孔周期  $\Lambda_1 = 500 \mu\text{m}$ ,外包层空气孔直径  $d_1 = 150 \mu\text{m}$ ,令内包层空气孔直径  $d_2$  分别为 30、50、70、90  $\mu\text{m}$ ,内包层空气孔的大小对光纤损耗及单模带宽的影响如图 3 所示。基模与二阶模限制损耗都随内包层空气孔直

径的增大而增大,而当内包层空气孔直径为 50  $\mu\text{m}$  和 70  $\mu\text{m}$  时,由图 3 可知,能够实现较大频段的单模传输。

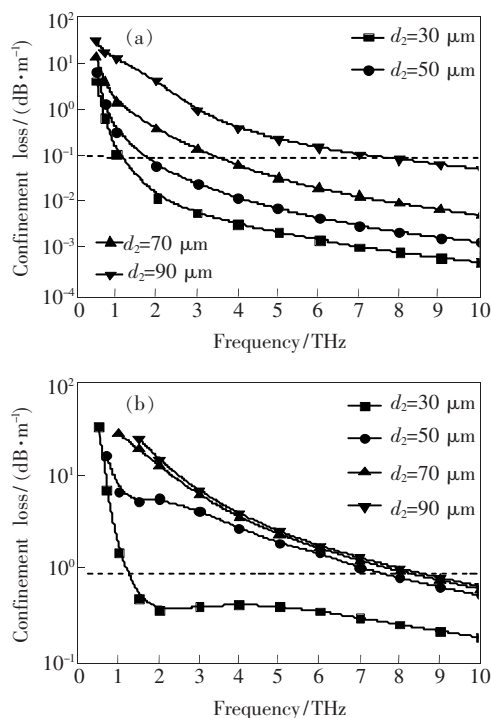


图 3 参数  $d_2$  的变化引起限制损耗随频率的变化曲线。(a) 基模限制损耗; (b) 二阶模限制损耗。

Fig. 3 Confinement loss of the fundamental mode (a) and second-order mode (b) as a function of frequency for different  $d_2$

最后,研究空气孔周期对光纤损耗及单模带宽的影响。固定外包层空气孔直径  $d_1 = 150 \mu\text{m}$ ,内包层空气孔直径  $d_2 = 50 \mu\text{m}$ ,令外包层空气孔周期  $\Lambda_1 = 300, 350, 400, 450, 500 \mu\text{m}$  结果如图 4 所示。

图 4 表明在整个 THz 波段,基模限制损耗随空气孔周期的增大而减小。二阶模限制损耗在低频段具有与基模相同的性质,随着频率的增大而减小。而当频率增大到一定程度后,二阶模限制损耗随空气孔周期的增大反而出现增大的趋势,这是由于内外包层空气孔对基模与二阶模的影响差异造成的。由此合理地调整空气孔周期,使得增大二阶模损耗的同时降低基模损耗,可以实现低损耗带宽单模传输。

综上所述,选取  $\Lambda_1 = 350 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 150 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 50 \mu\text{m}$ ,可以实现 1 ~ 10 THz 低损耗单模传输,如图 5 所示。基模限制损耗随频率的增加而减小,并逐渐趋于平坦。二阶模限制损耗随频率的增加

先减小后增大再减小,但始终大于 1 dB/m。在 10 THz 处,基模限制损耗为 0.012 7 dB/km,二阶模限制损耗为 1.065 dB/m 相差  $10^{-5}$  个单位。

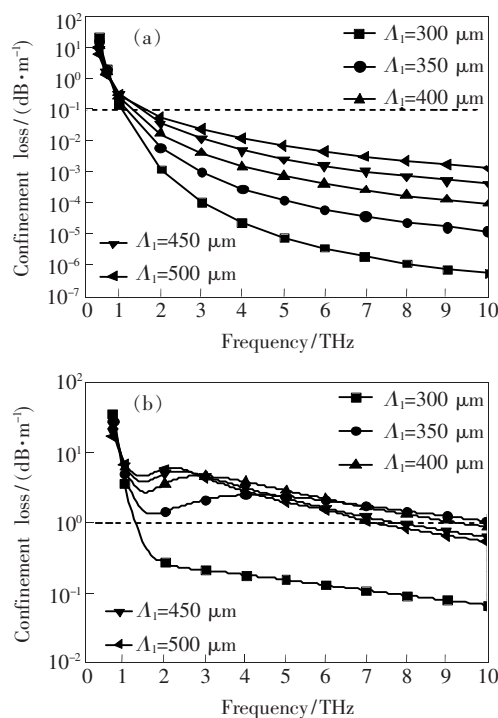


图 4 参数  $\Lambda_1$  的变化引起限制损耗随频率的变化曲线。(a) 基模限制损耗; (b) 二阶模限制损耗。

Fig. 4 Confinement loss of the fundamental mode (a) and second-order mode (b) as a function of frequency for different  $\Lambda_1$

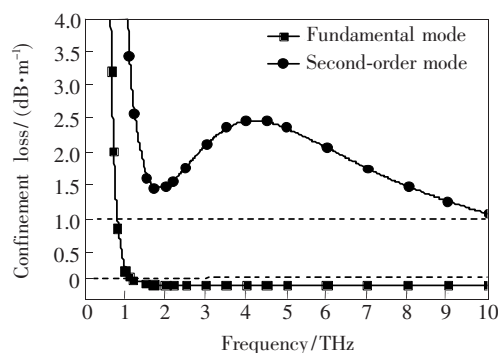


图 5 优化参数基模与二阶模限制损耗随频率的变化曲线

Fig. 5 Confinement loss of the fundamental mode and second-order mode as a function of frequency for  $\Lambda_1 = 350 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda_2 = 2/3\Lambda_1$ ,  $d_1 = 150 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 50 \mu\text{m}$ .

### 3.2 色散特性

取  $\Lambda_1 = 350 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 150 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 50 \mu\text{m}$ ,由式(5)可得群速度色散和波导色散随频率的变化曲线,如图 6(a)所示。随着频率的增加,群速度

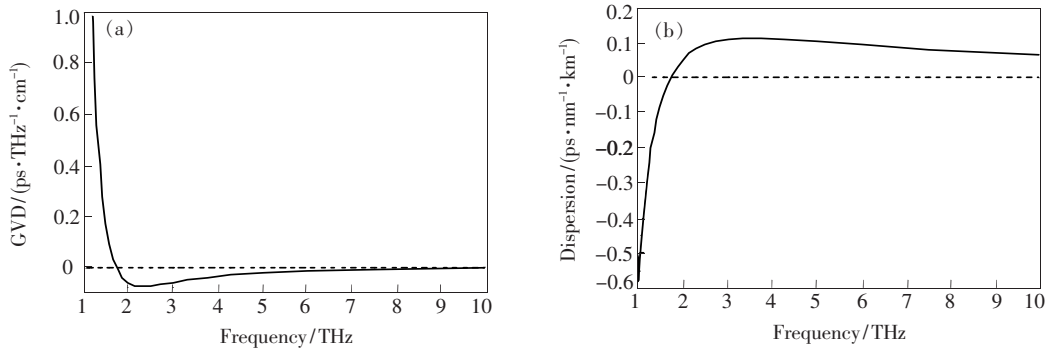


图 6 色散随频率的变化曲线。(a) 群速度色散; (b) 波导色散。

Fig. 6 GVD (a) and dispersion (b) as a function of frequency

色散先减小后增大, 在 2.5 THz 处达到最小值  $-0.1 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$  在 1.5 ~ 10 THz 内群速度色散值可以控制在  $\pm 0.1 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$ 。如图 6 (b) 所示, 随着频率的增加, 波导色散值先增大后减小, 在 2.5 THz 处达到最大值  $-0.12 \text{ ps}/(\text{km} \cdot \text{nm})$  这是由于波导色散与群速度色散成反比。色散频率大于零色散频率后是色散平坦区域, 在

高频段具有非常优良的色散特性。

### 3.3 有效模场面积及非线性系数

图 7 为  $\Lambda_1 = 350 \mu\text{m}$ 、 $d_1 = 150 \mu\text{m}$ 、 $d_2 = 50 \mu\text{m}$  对应的频率  $f = 5 \text{ THz}$  时的基模与二阶模的模场分布图和二维电矢量分布图。由图 7 可知, 基模大部分能量聚集在纤芯中心, 而二阶模大部分能量分布在包层, 基模的有效模场面积要远小于二

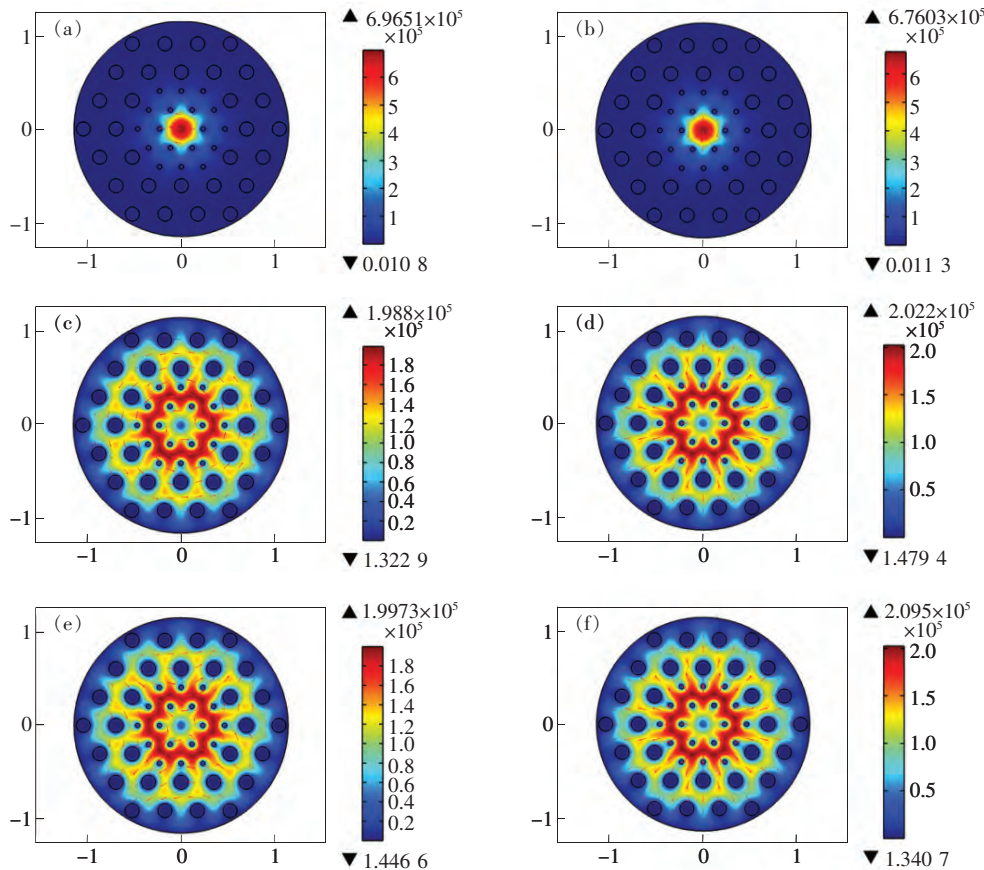


图 7 模场分布和二维电矢量分布图。(a) (b) 基模  $\text{HE}_{11}$  的两个简并模式; (c)  $\text{TE}_{01}$  模; (d)  $\text{TM}_{01}$  模; (e) (f)  $\text{HE}_{21}$  模。

Fig. 7 Mode field distributions and the two-dimensional electrical vector distribution. (a) , (b)  $\text{HE}_{11}$ . (c)  $\text{TE}_{01}$ . (d)  $\text{TM}_{01}$ . (e) , (f)  $\text{HE}_{21}$ .



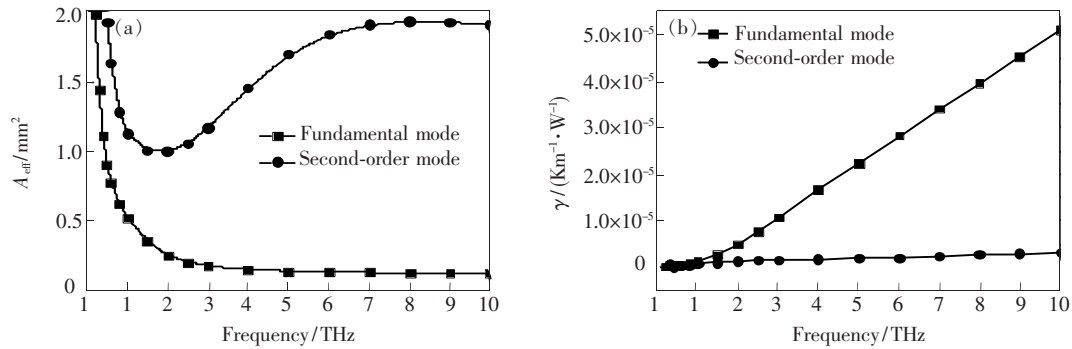


图 8 有效模场面积 (a) 与非线性系数 (b) 随频率的变化曲线

Fig. 8 Effective mode-field area (a) and nonlinear (b) as a function of frequency

阶模。这是因为 PCF 的模场面积由其截面的横向电场分布决定。横向电场分布越广, 光纤的有效模场面积越大。如图 8(a) 所示, 基模的有效模场面积随频率的增加而迅速减小并逐渐平坦, 二阶模的有效模场面积先减小后增大, 但始终在包层传输, 对模场的束缚能力较弱。基模的非线性系数随频率的增大而增大, 而且基模的非线性系数要大于二阶模, 这是因为非线性系数与有效模场面积成反比, 如图 8(b) 所示。

## 4 结 论

研究并设计了一种双包层太赫兹光子晶体光

纤, 在保证双包层光子晶体光纤优越的色散特性的同时, 实现了低损耗、宽频带的单模传输。单模传输范围为 1 ~ 10 THz。在 1.5 ~ 10 THz 的频率范围内, 群速度色散可以控制在  $\pm 0.1 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$ , 并且在高频段具有非常优越的色散特性。基模的限制损耗及有效模场面积随频率的增加逐渐趋于平坦。该光纤有益于宽带光信号传输。本文研究为光子晶体光纤在太赫兹波段的传输以及其在光通讯中的应用提供了参考依据。此外, 太赫兹光子晶体光纤比普通波段更易于加工制作, 而且该光纤设计简单, 可以采用钻孔法、毛细管堆积法等方法获得。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nat. Photon.*, 2007, 1(2): 97-105.
- [ 2 ] MIAO Q, WANG G, LI Y J. Research of landmine detection using terahertz technology [J]. *Appl. Mech. Mater.*, 2014, 644-650: 1313-1316.
- [ 3 ] 王豆豆, 王丽莉, 张涛, 等. 低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤 [J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 0606002-1-5.  
WANG D D, WANG L L, ZHANG T, *et al.*. Low loss and high birefringence Topas photonic bandgap fiber at terahertz frequency [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2014, 43(6): 0606002-1-5. (in Chinese)
- [ 4 ] CERQUEIRA JR S A. Recent progress and novel applications of photonic crystal fibers [J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2010, 73(2): 024401-1-21.
- [ 5 ] 程伟, 李九生. 基于光子晶体的双波长太赫兹波功率分器研究 [J]. *光子学报*, 2014, 43(1): 0123002.  
CHENG W, LI J S. A dual-wavelength terahertz wave power splitter based on photonic crystal [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2014, 43(1): 0123002. (in Chinese)
- [ 6 ] 桑新柱, 余重秀, 王葵如, 等. 高非线性光子晶体光纤中布拉格光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2005, 13(6): 633-636.  
SANG X Z, YU C X, WANG K R, *et al.*. Fabrication of Bragg grating in a highly nonlinear photonic crystal fiber [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 633-636. (in Chinese)
- [ 7 ] KIM S, KEE C S, LEE J M. Single-mode condition and dispersion of terahertz photonic crystal fiber [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2007, 11(3): 97-100.

- [8] 吴昊,施伟华,赵岩,等. 新型太赫兹波塑料光子晶体光纤的色散特性 [J]. 光通信研究, 2011, 37(1): 40-42.  
WU H, SHI W H, ZHAO Y, *et al.*. Dispersion properties of a novel THz plastic photonic crystal fiber [J]. *Study Opt. Commun.*, 2011, 37(1): 40-42. (in Chinese)
- [9] RANA S, HASANUZZAMAN G K M, HABIB S, *et al.*. Proposal for a low loss porous core octagonal photonic crystal fiber for T-ray wave guiding [J]. *Opt. Eng.*, 2014, 53(11): 115107-1-4.
- [10] 汪静丽,陈鹤鸣. 菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤 [J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0906002-1-5.  
WANG J L, CHEN H M. Single-polarization single-mode rhombic-hole terahertz photonic crystal fibers [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2014, 34(9): 0906002-1-5. (in Chinese)
- [11] HAN H, PARK H, CHO M, *et al.*. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 80(15): 2634-2636.
- [12] NIELSEN K, RASMUSSEN H K, ADAM A J L, *et al.*. Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [13] ISLAM R, HABIB M S, HASANUZZAMAN G K M, *et al.*. Extremely high-birefringent asymmetric slotted-core photonic crystal fiber in THz regime [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2015, 27(21): 2222-2225.
- [14] LI Y F, WANG C L, ZHANG N, *et al.*. Analysis and design of terahertz photonic crystal fibers by an effective-index method [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(33): 8462-8465.
- [15] WHITE T P, MCPHERDAN R C, DESTERKE C M, *et al.*. Confinement losses in microstructured optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, 26(21): 1660-1662.
- [16] HOU Y, FAN F, ZHANG H, *et al.*. Terahertz single-polarization single-mode hollow-core fiber based on index-matching coupling [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2012, 24(8): 637-639.
- [17] WONG W S, PENG X, MCLAUGHLIN J M, *et al.*. Breaking the limit of maximum effective area for robust single-mode propagation in optical fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(21): 2855-2857.
- [18] 陈艳,周桂耀,夏长明,等. 具有双模特性的大模场面积微结构光纤的设计 [J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014701-1-6.  
CHEN Y, ZHOU G Y, XIA C M, *et al.*. Analysis of a novel dual-mode large-mode-area micro-structured fiber [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2014, 63(1): 014701-1-6. (in Chinese)
- [19] HOO Y L, JIN W, JU J, *et al.*. Design of photonic crystal fibers with ultra-low, ultra-flattened chromatic dispersion [J]. *Opt. Commun.*, 2004, 242(4-6): 327-332.
- [20] MORTENSEN N A. Effective area of photonic crystal fibers [J]. *Opt. Express*, 2002, 10(7): 341-348.
- [21] 耿琰,王河林,陈中师. 基于 CdSe/ZnS 量子点薄膜结构的高双折射光子晶体光纤的色散与损耗控制 [J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0106006.  
GENG Y, WANG H L, CHEN Z S. Dispersion and loss control of high birefringence photonic crystal fiber with CdSe/ZnS quantum dots film [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2015, 44(1): 0106006. (in Chinese)



胡守重(1988-),男,河南南阳人,硕士研究生,2013年于郑州轻工业学院获得学士学位,主要从事光纤通信、太赫兹传输的研究。  
Email: hushouzhong123@163.com



侯尚林(1970-),男,甘肃天水人,博士,教授,2008年于北京邮电大学获得博士学位,主要从事光纤通信器件和传感技术的研究。  
E-mail: houshanglin@163.com