

# THz光子晶体光纤的模式及色散特性分析

刘頔威, 刘盛纲

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**利用等效折射率法得到了光子晶体光纤的特征方程, 该文讨论了光子晶体光纤在THz频段的模式分布及色散特性。结果发现: 光纤包层空气孔间距固定, 减小空气孔半径, 包层等效折射率增大, 高次模截止频率增大, 色散最大值减小, 零色散及最大色散对应的频率增大; 包层空气填充率固定, 增大空气孔半径, 包层折射率增大, 高次模截止频率增大, 色散最大值增大, 零色散及最大色散对应的频率减小。通过适当调节包层空气孔间距和空气孔大小, 可在很宽的频带内实现单模、零色散THz波传输。

**关键词** 色散特性; 等效折射率; 模式分布; 光子晶体光纤  
**中图分类号** TN818; O332 **文献标识码** A

## Study of Waveguide Mode and Dispersion Property in THz Photonic Crystal Fiber

LIU Di-wei and LIU Sheng-gang

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** The characteristic equation of THz photonic crystal fibers is obtained with effective refractive index method. The mode distribution and dispersion are discussed. It's found that when air hole pitch is fixed, the cladding effective refractive index of photonic crystal fiber (PCFs), the cut-off frequency of higher modes, and the frequency of maximum and zero dispersion will become larger, the maximum dispersion will become smaller if the air hole radius decreases; when air-filling fraction is fixed, the cladding effective refractive index, the cut-off frequency of higher modes, and the maximum dispersion will become larger, the frequency of maximum and zero dispersion will become smaller if air hole radius increases. The transmission with single-mode zero dispersion in THz region can be realized according to the changes of air hole pitch and the air hole radius.

**Key words** dispersion; effective refractive index; modes distribution; photonic crystal fiber

随着THz波产生和探测技术的巨大进步, 在紧凑THz设备和测量装置中, 迫切需要低损耗、色散可调的THz传输线。由于金属的有限电导率, 传统的金属波导在THz频段有很大的衰减, 不能作为THz频段的导波系统<sup>[1]</sup>。光子晶体光纤的许多独特的质, 如可在宽频带内单模传输、存在与普通光纤不同的色散特性且可根据需要调整其色散特性。近年来, 光子晶体光纤引起了人们的广泛兴趣<sup>[2-5]</sup>。与其他材料相比, 聚乙烯在0.1~2 THz介电常数的实部为常数, 虚部趋于零, 因此聚乙烯材料在THz频段的材料损耗很小<sup>[6]</sup>。本文利用有效折射率方法, 基于电磁场分布的标量近似原理<sup>[7]</sup>, 分析了以聚乙烯为材料的光子晶体光纤在THz频段的传播模式和色散特性。

## 1 模式及色散特性分析

### 1.1 包层的有效折射率和光纤的模式分析

当包层空气填充率较小时, 对包层的有效折射率计算, 可以利用电磁场分布的标量近似理论<sup>[8]</sup>。为简化计算, 可用面积相等的圆形单元胞代替六角形单元胞, 如图1所示。

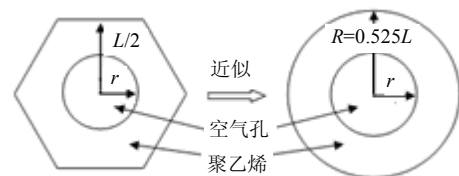


图1 光子晶体光纤六边形单元胞的圆形近似  
单元胞中圆形空气柱半径为  $r$ , 由等效面积公

收稿日期: 2006-11-19; 修回日期: 2007-06-20

基金项目: 自然科学基金重大基金子项目(10390160);自然科学基金面上项目(60472013)

作者简介: 刘頔威(1980-), 男, 博士, 主要从事THz功能器件及试验方面的研究。

式  $\pi R^2 = 0.5\sqrt{3}L^2$  得圆形单元胞的等效半径  $R = 0.525L$ ，其中  $L$  为包层空气孔间距。在圆柱坐标系中，电磁波横向场分布函数  $\varphi$  满足标量波方程<sup>[4]</sup>：

$$\frac{d^2\varphi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\varphi}{d\rho} + \left[ k^2 n_i^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right] \varphi = 0 \quad (1)$$

式中  $k$  为自由空间波数； $n_i$  为介质折射率； $\beta$  为电磁波传播常数。

对于基模， $m = 0$ ，由圆形单元胞边界上的对称边界条件  $\partial\varphi/\partial\rho|_{\rho=R} = 0$  及单元胞内聚乙烯-空气界面上的  $\varphi$ 、 $\partial\varphi/\partial\rho|_{\rho=r}$  连续，可得色散方程：

$$k(\omega) \frac{I_1[k(\omega)r]}{I_0[k(\omega)r]} \left\{ J_0[k(\omega)r] - Y_0[k(\omega)r] \frac{J_1[\gamma(\omega)R]}{Y_1[\gamma(\omega)R]} \right\} = -\gamma(\omega) \left\{ J_1[k(\omega)r] - Y_1[k(\omega)r] \frac{J_1[\gamma(\omega)R]}{Y_1[\gamma(\omega)R]} \right\} \quad (2)$$

其中  $k(\omega)$ 、 $\gamma(\omega)$  满足关系：

$$\beta^2(\omega) - \frac{n_{\text{air}}^2 \omega^2}{c^2} = k^2(\omega) \quad (3)$$

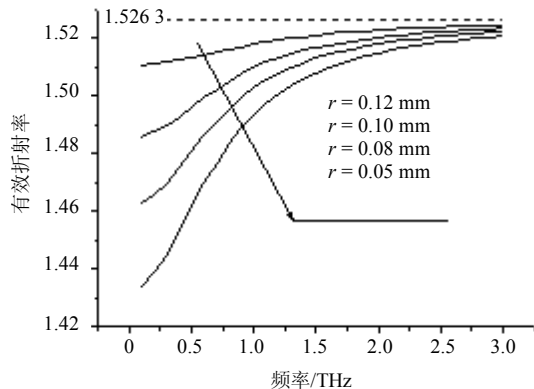
$$\frac{n_{\text{PE}}^2 \omega^2}{c^2} - \beta^2(\omega) = \gamma^2(\omega) \quad (4)$$

光纤包层的有效折射率为：

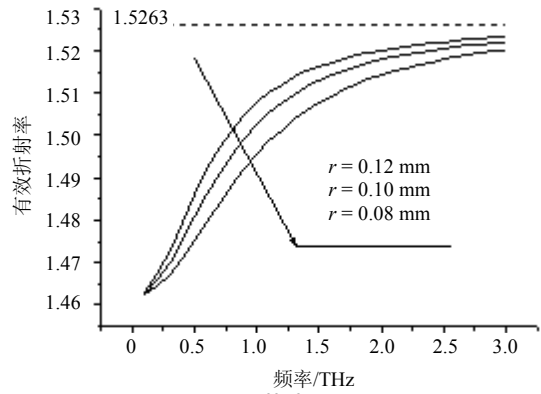
$$n_{\text{eff}}(\omega) = \beta(\omega)c/\omega \quad (5)$$

式中  $c$  为真空中的光速； $\omega$  为电磁波的角频率； $n_{\text{PE}}$  为聚乙烯的折射率。由式(2)、式(5)可得光纤包层的有效折射率随频率变化的关系，从而可以利用阶跃折射率光纤的原理计算其模式特性和色散关系。对纤芯是由中心去掉一个空气柱的实芯光子晶体光纤，纤芯的有效半径<sup>[9]</sup>  $r_c = L - r$ ；光纤的归一化频率为：

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} r_c (n_{\text{PE}}^2 - n_{\text{eff}}^2)^{0.5} \quad (6)$$

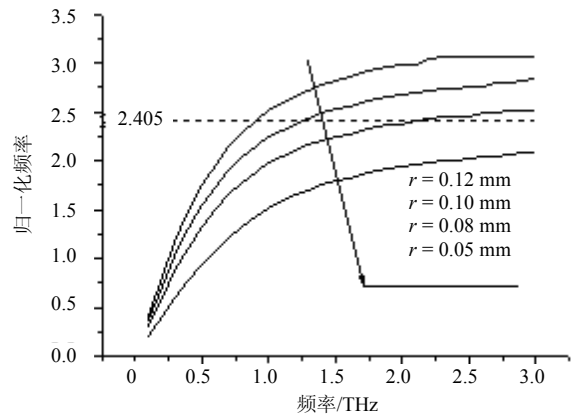


a. 包层空气孔间距  $L$  固定时，有效折射率随频率变化关系

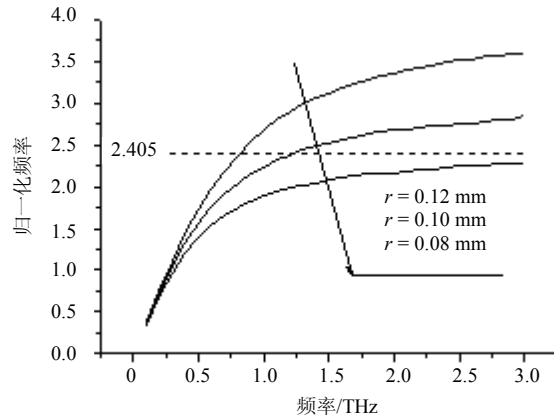


b. 包层空气填充率  $f$  固定时，有效折射率随频率变化关系

图2 光子晶体光纤的有效折射率随频率变化的关系



a. 包层空气孔间距  $L$  固定时，归一化频率  $V_{\text{eff}}$  随频率变化关系



b. 包层空气填充率  $f$  固定时，归一化频率  $V_{\text{eff}}$  随频率变化关系

图3 归一化频率  $V_{\text{eff}}$  随频率变化的关系

由阶跃折射率光纤的性质，当  $V \leq 2.405$  时，即可保证光纤单模传输。图2a、图2b分别为固定包层空气孔间距  $L = 0.5 \text{ mm}$ 、固定包层空气填充率  $f = \pi r^2 / 0.5\sqrt{3}L^2 = 14.5\%$  固定， $r$  分别为0.12、0.1、0.08、0.05 mm时光纤包层有效折射率随频率的变化关系。图3a、图3b分别为  $L$ 、 $f$  固定时光纤归一化频率  $V_{\text{eff}}$  随频率变化的关系。从图2、图3a中可以看出，当空气孔间距  $L$  固定时，随着空气孔半径的减小，包层的有效折射率增大，导致包层与纤芯的折

射率差减小, 高次模的截止频率增大。因此, 适当的减小空气孔半径  $r$ , 可实现在0.1~3 THz频段的单模传输。图2、图3b反映了光纤包层空气填充率  $f$  相同时, 空气孔半径  $r$  增大, 光纤包层的有效折射率增大。导致纤芯和包层的折射率差减小, 高次模的截止频率增大, 因此在包层空气填充率  $f$  固定的情况下, 要实现更大频率范围内的单模传输, 只需增大空气孔半径  $r$ 。

1.2 色散特性分析

从上面的分析可知, 光纤包层空气填充率较小时, 光纤纤芯与包层的折射率差较小, 符合弱导近似条件, 可用标量近似的方法计算光纤的模式特性。基模  $LP_{01}$  模满足特征方程<sup>[4]</sup>:

$$\frac{UJ_1(U)}{J_0(U)} = \frac{WK_1(W)}{K_0(W)} \tag{7}$$

其中  $U$ 、 $W$  满足如下关系:

$$U^2 = (k^2 n_{PE}^2 - \beta_1^2) \cdot r_c^2 \tag{8}$$

$$W^2 = (\beta_1^2 - k^2 n_{eff}^2) \cdot r_c^2 \tag{9}$$

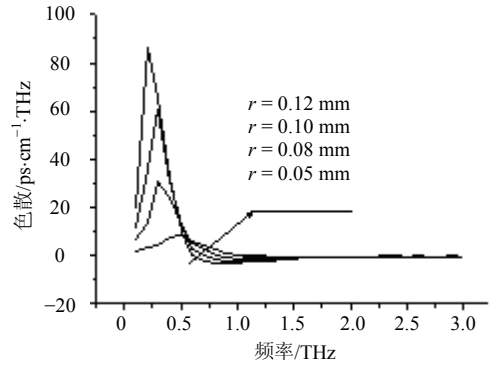
式中  $\beta_1$  为光子晶体光纤的传播常数。由式(7)~(9)可求出  $\beta_1$  随频率变化的关系。

对具有轴对称的单模光纤, 其色散主要是材料色散  $D_m$  和波导色散  $D_w$ <sup>[7]</sup>。对于由单一材料聚乙烯组成的光子晶体光纤, 由于聚乙烯的介电常数在THz频段(1~3 THz)为常数, 因此材料色散  $D_m$  可以忽略。总色散  $D_t$  可用波导色散  $D_w$  表示<sup>[10]</sup>:

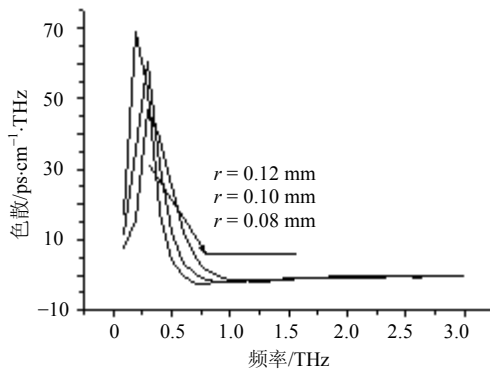
$$D_w = \frac{d^2 \beta_1}{d\omega^2} \tag{10}$$

图4a、图4b分别为固定包层空气孔间距  $L$ 、固定空气填充率  $f$ , 空气孔半径  $r$  变化时光纤基模色散随频率变化的关系。从图4a可以看出, 当包层空气孔间距  $L = 0.5$  mm时, 色散最大值随  $r$  的增大而增大, 色散最大值对应的频率随  $r$  的增大而减小, 零色散点频率随  $r$  增大而减小。空气孔半径  $r = 0.12$  mm时, 在0.65 THz时色散值为零, 在0.25 THz时色散最大, 其最大值为92 ps/THz·cm;  $r = 0.10$  mm时, 在0.83 THz时色散值为零, 在0.3 THz时色散最大, 其最大值为60.4 ps/THz·cm。从图4b可以看出, 当包层空气填充率  $f = 14.5\%$  时, 色散最大值随  $r$  增大而增大, 色散最大值对应频率随  $r$  增大而减小, 零色散点频率随  $r$  的增大而减小。空气孔半径  $r = 0.12$  mm时, 在0.65 THz色散值为零, 在0.2 THz色散值最大, 最大值为68.8 ps/THz·cm;  $r = 0.08$  mm时, 在0.86 THz色散值为零, 在0.3 THz色散值最大, 最大值为46.6 s/THz·cm。从图4还可以得出, 当频率高于1 THz

时, 色散值趋于零。



a. 包层空气孔间距  $L$  固定时, 基模色散随频率变化关系



b. 包层空气孔填充率固定时, 基模色散随频率变化关系

图4 光子晶体光纤基模色散随频率变化的关系

2 结 论

本文根据阶跃折射率光纤的导光原理, 利用有效折射率的方法, 基于标量近似的原理, 讨论了光纤包层空气填充率较小时聚乙烯光子晶体光纤在THz频段的模式和色散特性。发现在包层空气孔间距  $L$  或者包层空气填充率  $f$  一定时, 通过改变空气孔半径  $r$  的大小, 可以改变光纤的模式分布及色散特性, 实现在1~3 THz频段单模、低色散传输。本文的工作将为设计高性能的THz传输线提供一定的理论依据。

参 考 文 献

[1] WANG Kang-lin, DANIEL M M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. Nature, 2004, 432: 376-379.  
 [2] 张德生, 董孝义, 张伟刚, 等. 用阶跃有效折射率模型研究光子晶体光纤色散特性[J]. 物理学报, 2005, 54(3): 1235-1240.  
 [3] 冀玉领, 李曙光, 周桂耀, 等. 光子晶体光纤的色散特性[J]. 激光杂志, 2005, 26(1): 40-41.  
 [4] 贾俊明, 陈明阳, 向阳, 等. 光子晶体光纤的纤芯等效半径分析[J]. 光子学报, 2005, 34(1): 102-105.  
 [5] 朱洪涛, 楼祺洪, 董景星, 等. 空心光子晶体光纤[J]. 光学与光电技术, 2004, 2(5): 34-36.  
 [6] NAOTO, FUKASAWA N R. Abnormal dispersion of polymer films in the THz frequency region[J]. Chemical

Physics Letters, 2004, 388: 479-482.

- [7] LI Shu-guang, LIU Xiao-dong, HOU Lan-tian. The study of waveguide mode and dispersion property in photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(11): 2811-2817.
- [8] LIAO Yan-biao. Fibers optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [9] KNIGHT J C, ARRIAGA J, BIRKS T A, et al. Anomalous

dispersion in photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 807-809.

- [10] LOU Shu-qin, Fang Hong, Jian Shui-sheng. Polyethylene photonic crystal fibers as terahertz waveguides[J]. Proc of SPIE, 2005, 601941.1-601941.5.

编辑 税红

(上接第413页)

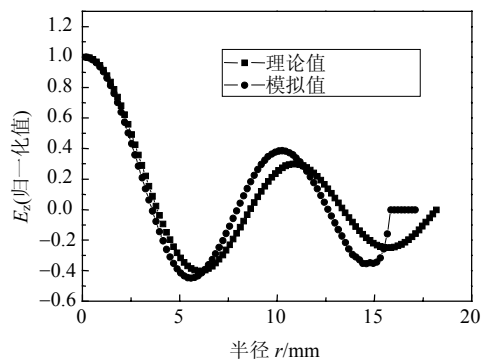


图9  $E_z$ 在 $r$ 方向的变化关系

## 4 结论

本文利用高频仿真软件和粒子模拟的方法对具有反射器的相对论绕射辐射振荡器进行了分析。结果表明,反射器对频率在31.5~34.5 GHz的对称模式具有较好的反射作用。粒子模拟发现,选择合适的反射器位置,器件输出功率及效率能得到有效提高。在反射器处于最佳位置时,慢波结构腔中的电子群聚电荷密度高,谐波分量小,因此效率高,频谱好。

### 参考文献

- [1] BUGAEV P S, CHEREPENIN V A, KANAVETS V I, et al. Investigation of a millimeter-wavelength-range relativistic diffraction generator[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1990, 2(1): 518-524.

- [2] BUGAEV S P, VLASOV A N, KANAVETS V I, et al. Relativistic diffraction oscillators in the millimeter-wave region[J]. Radiotekhnika i elektronika, 1990, 11: 21-28.
- [3] 范菊平, 刘国治, 陈昌华, 等. 带有反射腔的相对论返波管初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(3): 349-352.
- [4] VLASOV A N, SHKVARUNETS A G, RODGERS J C, et al. Over moded GW-class surface-wave microwave oscillator[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2000, 28(3): 550-560.
- [5] 李家胤, 于善夫, 李明光, 等. 8毫米相对论行波管的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1990, 2(1): 114-121.
- [6] 王浩英, 杨梓强, 史宗君, 等. 毫米波段高功率绕射辐射振荡器的研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1159-1162.
- [7] 王浩英, 梁正, 杨梓强. 高功率毫米波绕射辐射振荡器高频特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 489-492.
- [8] WANG Hao-ying, YANG Zi-qiang, ZHAO Lin-xin, et al. Numerical computation of dispersion curves for symmetric and asymmetric modes in an arbitrary cylindrical metal SWS[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2005, 33(1): 111-118.
- [9] WANG Hao-ying, ZHENG Liang, YANG Zi-qiang. Interaction of electron beams with electromagnetic waves in cherenkov devices[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 539: 37-34.
- [10] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2001.

编辑 张俊