

带隙型光子晶体光纤的泄露谱分析*

刘建国 开桂云 薛力芳 张春书 王志 李燕 孙婷婷 刘艳格 董孝义

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要 利用光束传播法对带隙型光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 的泄露谱进行了数值分析. 结果表明: PCF 泄露谱往往具有多个带隙; 泄露谱对 PCF 结构的变化异常敏感, 泄露峰值波长和带隙波长不但与空气孔周期有关, 还受空气孔直径的影响; 由于 PCF 的空气孔内可填充液晶, 泄露特性对液晶折射率的变化极其敏感, 当液晶折射率增大时, 峰值泄露波长和带隙波长都向长波漂移.

关键词 纤维光学; 泄露谱; 数值模拟; 光子晶体光纤

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A

0 引言

PCF 自 1996 年^[1] 问世以来, 由于其独特的光学性质而备受关注^[2~4]. PCF 一般由未掺杂的 SiO₂ 和空气孔构成, 其横截面是周期性排列的沿轴向均匀的空气孔, 在纤芯的位置, 其周期性被破坏形成缺陷, 光可以沿缺陷传播. 这种新型的光波导按其导光机理通常可以分为两类: 一类为全反射型 PCF, 即纤芯由高折射率材料 (如 SiO₂) 构成, 外层是二维光子晶体包层结构; 另一类带隙型 PCF, 即纤芯的折射率低于包层的折射率, 由于二维光子晶体包层具有光子带隙效应, 可以将模场限制在纤芯区域^[5].

理论上 PCF 的损耗比传统光纤低, 但由于制造技术的限制使得现有的 PCF 的损耗比传统光纤高, 同时由于其昂贵的制作成本, 限制了 PCF 在远距离通信中的广泛应用, 但是基于 PCF 的各种可调谐功能器件却得到了飞速的发展^[6]. 这种功能器件首先被 Eggleton 报道^[6], 高折射率的液体被动态的填充到柚子型微结构光纤中, 得到了透射性能可调谐的功能器件. 后来, Bise 等人在单芯 PCF 中填充高折射率的油, 得到了带隙可调谐的功能器件^[7]. 最近液晶被填充到 PCF 中, 由于液晶具有独特的电特性和热敏特性, 可对 PCF 的导光特性进行开关调谐^[8,9].

本文利用光束传播法 (beam propagation method, BPM) 对 PCF 泄露谱进行了研究. 发现 PCF 泄露谱结构复杂, 往往有多个带隙, 根据这一特性, 可以根据需要设计多带滤波器; 泄露特性对结构的变化异常敏感, 泄露峰值波长和带隙波长不但与空气孔周期有关, 还受空气孔直径的影响; PCF

的泄露谱对所填充液晶的折射率极其敏感, 当液晶折射率增大时, 峰值泄露波长和带隙波长都向长波漂移, 根据这一特性, 可以利用控制外加电场或调谐温度的方法, 设计新型可调谐滤波器和光开关.

1 PCF 模型与数值计算方法

1.1 PCF 模型

图 1 是三角形 PCF 的截面图, 空气孔间距 $\Lambda = 5 \mu\text{m}$, 空气孔直径 $d = 2 \mu\text{m}$, 则纤芯直径为 $D = 2\Lambda - d = 8 \mu\text{m}$; 光纤由纯 SiO₂ 制成, 其折射率为 $n_{\text{Si}} = 1.4466$, 空气孔内填充液晶, 其折射率 n_{LC} 在 1.7466 ~ 1.8466 范围内可调; 由于此类 PCF 具有六面对称性, 仅对一个面进行研究. 宽为 Λ 的高斯光束在 XZ 平面内由 (0, 0) 点发射, 沿 Z 轴正向传播, 在空气孔的顶端放置一宽为 Λ 的探测器, 用来分析此 PCF 的泄露特性.

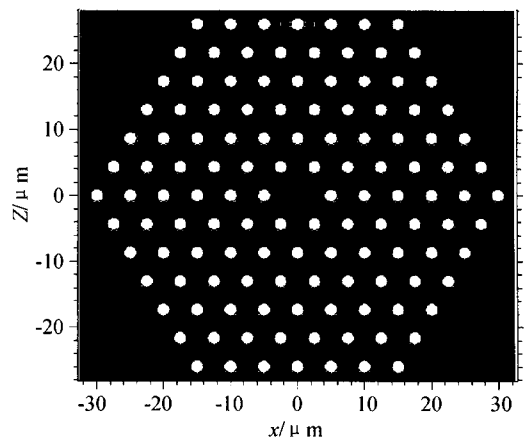


图 1 三角形 PCF 模型的截面图
Fig. 1 The section of triangular PCF

1.2 数值计算方法

光束传播法是为研究光波在波导中传输而设计的一种非常简便、直观的数值方法. 在笛卡儿坐标系中, 麦克斯韦的两个旋度方程可以表示为

* 国家科技部 973 计划 (No. 2003CB314906) 和国家自然科学基金 (No. 60407005) 资助
Tel: 022-23506424 Email: Luckyjgliu@163.com
收稿日期: 2005-07-19

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \right) \quad (2)$$

其他四个旋度方程与式(1)、(2)类似,式中 H_i, E_i ($i=x, y, z$)分别是磁场和电场分量. μ, ϵ 分别是磁导率和介电常量, t 表示时间. 可见电场和磁场的时域变化取决于磁场和电场的空域变化. 利用有限时域差分法, 方程(1)、(2)中的 H_x, E_x 可以表示为

$$H_{x(i,j,k)}^{n+1/2} = H_{x(i,j,k)}^{n-1/2} + \frac{\Delta t}{\mu \Delta z} (E_{y(i,j,k)}^n - E_{y(i,j,k-1)}^n) - \frac{\Delta t}{\mu \Delta y} (E_{z(i,j,k)}^n - E_{z(i,j-1,k)}^n) \quad (3)$$

$$E_{x(i,j,k)}^{n+1} = E_{x(i,j,k)}^{n+1/2} + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta y} (H_{z(i,j+1,k)}^{n+1/2} - H_{z(i,j,k)}^{n+1/2}) - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} (H_{y(i,j,k+1)}^{n+1/2} - H_{y(i,j,k)}^{n+1/2}) \quad (4)$$

式中, $\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ 分别是时间和空间步长, (i, j, k) 是空间网格点坐标, n 是时间步数. 在计算中, 利用迭代法对式(3)、(4)求解.

2 模拟结果及分析

2.1 泄露谱

当 $\Lambda = 5 \mu\text{m}, d = 2 \mu\text{m}, D = 8 \mu\text{m}, n_{\text{si}} = 1.4466, n_{\text{LC}} = 1.7466$ 时, 8 ps 的脉冲从 $(0, 0)$ 点沿 Z 轴正向发射. 所探测波长范围为 $1000 \sim 3000 \text{ nm}$ 的泄露频谱如图 2, 横坐标是波长, 纵坐标是监测的能量. 由图可知, 泄露谱结构很复杂, 往往会出现多个带隙, 在带隙内的光场, 被限制在纤芯内; 对于相邻带隙之间的波段, 不具禁带结构, 同时由于包层有效折射率高于纤芯有效折射率, 因此光场能量极易泄露, 很难在纤芯内传输. 例如在波长分别等于 $1358.4 \text{ nm}, 1553.9 \text{ nm}, 1684.5 \text{ nm}$ 时, 由于带隙效应, 监测能量极小, 在波长等于 1462.0 nm 处监测能量达到了最大值.

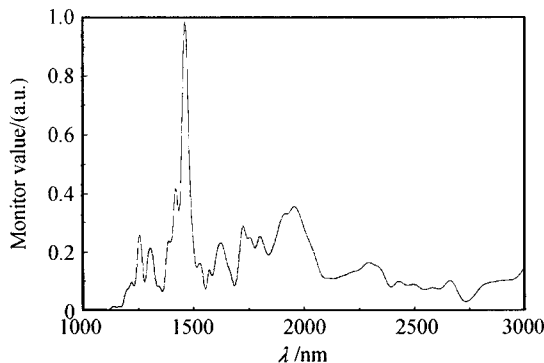


图 2 波长范围为 $1000 \sim 3000 \text{ nm}$ 的泄露谱

Fig. 2 The leaky spectrum in the wavelength range of $1000 \sim 3000 \text{ nm}$

图 3 给出不同波长的连续波传播时探测到的功

率. 横坐标中 C 表示真空中的光速, T 表示传播时间, 纵坐标表示监测功率. 由图可知, 对于不同波长的连续波所探测到的功率不等, 例如当波长为泄露谱峰值时, 所探测到的平均功率为 $\bar{P}_{\text{Peak}} = 0.5679 \text{ a.u.}$, 而当波长为泄露谱谷底值时 $\bar{P}_{\text{valley}} = 0.01209 \text{ a.u.}$, 即 \bar{P}_{Peak} 比 \bar{P}_{valley} 高 16.7 dB . 因此对于光波在带隙型 PCF 中传播时, 不同波长所泄露的能量不等, 并且往往有多个极小值, 即有多个带隙. 根据这一特性, 可以根据需要设计多带滤波器.

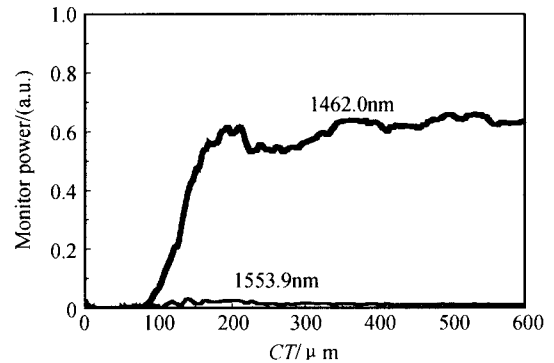


图 3 连续波传播时泄露谱峰值和谷底波长的探测功率

Fig. 3 The peak and valley detecting power of leaky spectrum for continuous wave propagating

2.2 PCF 结构对泄露谱的影响

当 $d = 2 \mu\text{m}, n_{\text{si}} = 1.4466, n_{\text{LC}} = 1.7466$ 时, 8 ps 的脉冲从 $(0, 0)$ 点沿 Z 轴正向发射, 当仅改变空气孔周期 Λ 时, 所得的泄露谱如图 4. 图中两条泄露谱分别对应 $\Lambda = 4 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}$ 时的情形. 结果表明, 当仅改变空气孔周期时, 泄露谱随空气孔周期的增大而向长波方向移动, 并且泄露带宽有展宽的趋势.

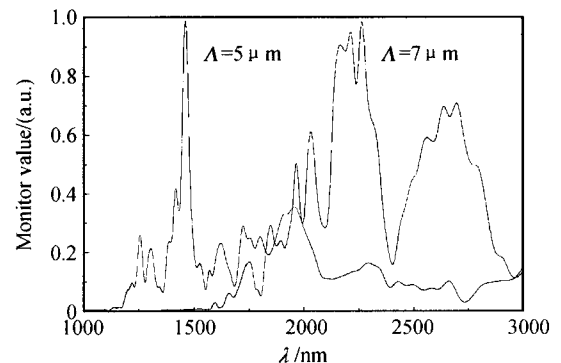


图 4 不同空气孔周期所对应的泄露谱

Fig. 4 The leaky spectrum of different air hole period

当 $\Lambda = 5 \mu\text{m}, n_{\text{si}} = 1.4466, n_{\text{LC}} = 1.7466$ 时, 8 ps 的脉冲从 $(0, 0)$ 点沿 Z 轴正向发射, 当仅改变空气孔直径时所得的泄露谱如图 5. 图中两条谱线分别是 $d = 2 \mu\text{m}, 3 \mu\text{m}$ 时的泄露谱, 由图可知, 泄露谱随空气孔直径的变化而变化, 当空气孔直径增大时, 泄露谱峰值泄露波长同样会向长波漂移, 同时有展宽的趋势.

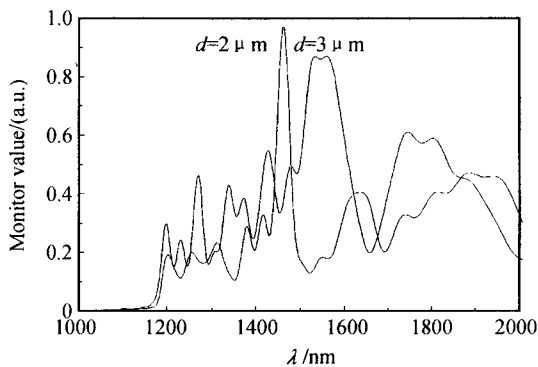


图5 不同空气孔直径所对应的泄露谱

Fig. 5 The leaky spectrum of different air hole diameter

由以上讨论可知,当光波在带隙型 PCF 中传播时,其泄露特性对结构的变化异常敏感,泄露峰值波长和带隙波长不但与空气孔周期有关,还受空气孔直径的影响.因此在实际应用中应该根据需要合理的设计 PCF 的结构.

2.3 泄露谱的折射率敏感性

本课题组于 2004 年成功地向 PCF 的空气孔内填充了液晶.由于液晶独特的电特性和折射率的温度敏感性,因此对其折射率可在一定范围内进行控制.图 6 是当 $\Lambda=5 \mu\text{m}$, $d=2 \mu\text{m}$, $D=8 \mu\text{m}$, $n_s=1.4466$ 时,仅改变空气孔内液晶的折射率所得到的泄露谱.图中三条谱线分别对应液晶折射率 $n_{LC}=1.7466$, 1.7966 , 1.8466 时的情况.结果表明:当液晶折射率增加时,峰值泄露波长向长波漂移,例如对应 $n_{LC}=1.7466$, 1.7966 , 1.8466 时的峰值泄露波长 λ_{peak} 分别等于 1461.3 nm , 1505.5 nm , 1544.4 nm ;同时带隙波长也发生了漂移,图中峰值泄露波长右侧第一个带隙波长在三种情况下分别为 $\lambda_{\text{valley}}=1551.9 \text{ nm}$, 1569.2 nm , 1587.5 nm .可见当液晶折射率变化 0.1 时,带隙波长会漂移 35.6 nm .因此根据泄露谱对液晶折射率极其敏感的特性,可通过控制温度或电压调谐液晶折射率设计一种新型可调谐滤波器;同时可以通过调谐液晶的折射率,使某一 n_{LC} 下的峰值泄露波长恰好等于另一 n_{LC} 的带隙波

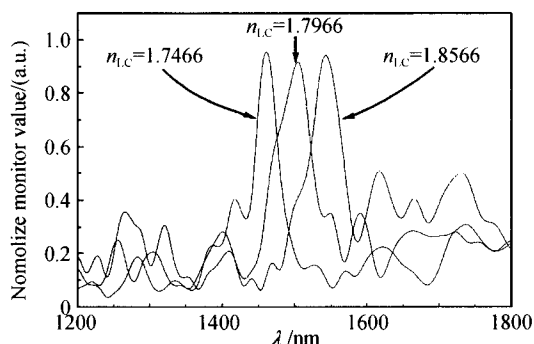
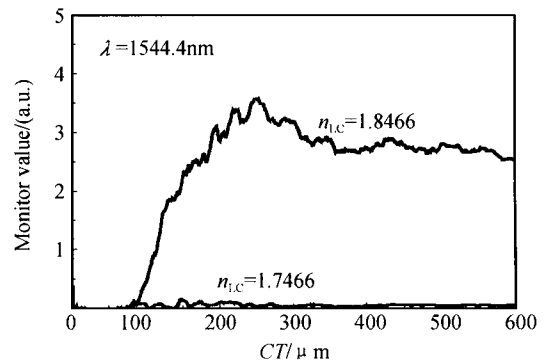


图6 泄露谱随液晶折射率的变化

Fig. 6 The change of leaky spectrum versus liquid crystal refractive index

长,实现光开关功能.例如当 $n_{LC}=1.8466$ 时的峰值泄露波长 $\lambda_{\text{peak}}=1544.4 \text{ nm}$ 与 $n_{LC}=1.7466$ 的带隙波长 $\lambda_{\text{valley}}=1551.9 \text{ nm}$ 接近,则可以通过控制 n_{LC} 在 $1.7466 \sim 1.8466$ 间转换,实现光开关功能.

图 7 是当波长为 1544.4 nm ,不同液晶折射率所监测到的功率,两条谱线分别对应于 $n_{LC}=1.7466$ 和 1.8466 ,两种情况下的平均泄露功率的差值为 18.4 dB .

图7 $\lambda=1544.4 \text{ nm}$, $n_{LC}=1.7466$ 和 1.8466 时监测到的泄露功率Fig. 7 The detecting leaky power for $\lambda=1544.4 \text{ nm}$, $n_{LC}=1.7466$ and 1.8466

由以上讨论可知,PCF 的泄露谱对所填充液晶的折射率极其敏感,当液晶折射率增大时,峰值泄露波长和带隙波长都向长波漂移.根据这一特性,可以通过调谐液晶所受电场或温度的方法,实现一种新型可调谐滤波器和光开关.

3 结论

由于带隙型 PCF 具有复杂泄露谱特性,且泄露谱对 PCF 的结构参量 Λ 和 d 极为敏感,因此可根据需要对 PCF 结构进行合理设计.当在 PCF 的空气孔内填充液晶后,由于泄露特性对液晶折射率的变化极其敏感,当液晶折射率增大时,峰值泄露波长和带隙波长都向长波漂移,这为基于带隙型光子晶体光纤可调谐滤波器和光开关的设计提供了理论参考.由于微结构光纤结构灵活、空气孔可填充等特点,因此在可调谐功能器件的研发中具有乐观、广泛的应用前景.

参考文献

- 1 Knight J C, Birks T A, Russell P S J, *et al.* All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Opt Lett*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 杨广强,张霞,林健飞,等.高双折射光子晶体光纤偏振模色散测量. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1133~1136
Yang G Q, Zhang X, Lin J F, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1133~1136
- 3 贾俊明,陈明阳,向阳,等.光子晶体光纤的纤芯等效半径

- 分析. 光子学报, 2005, **34**(1):102~105
- Jia J M, Chen M Y, Xiang Y, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1):102~105
- 4 Yu Y Q, Ruan S C, Du C L, *et al.* Spectral broadening in the 1.3 μm region using a 1.82 m long photonic crystal fiber by femtosecond pulses from an optical parametric amplifier. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):481~484
- 5 Russell P. Photonic crystal fibers. *Science*, 2003, **229**(17):358~362
- 6 Eggleton B J, Kerbage C, Westbrook P S, *et al.* Microstructured optical fiber devices. *Opt Express*, 2001, **9**(13): 698~713
- 7 Bise R T, Windeler R S, Kranz K S, *et al.* Tunable photonic band gap fiber[A], in OSA Trends in Optics and Photonics (TOPS) 70, Optical Fiber Communication Conference Technical Digest, Post conference Edition (Optical Society of America, Washington, DC, 2002. 466~468
- 8 Larsen T T, Bjarklev A, Hermann D S, *et al.* Optical devices based on liquid crystal photonic bandgap fibres. *Opt Express*, 2003, **11**(20): 2589~2596
- 9 李春雷, 盛秋琴. 光子晶体光纤非线性系数与其结构参量及光波长的关系. 光子学报, 2006, **35**(5):734~737
- Li C L, Sheng Q Q. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5): 734~737

The Leaky Spectrum of Bandgap Photonic Crystal Fibers

Liu Jianguo, Kai Guiyun, Xue Lifang, Zhang Chunshu, Wan Zhi, Li Yan,
Sun Tingting, Liu Yange, Dong Xiaoyi

The Modern Optics Institute of NanKai University, Tianjin 300071

Received date: 2005-07-19

Abstract The leaky spectrum of Photonic crystal fibers (PCF) was simulated with beam propagation method. The results showed that the leaky spectrum usually had several bandgaps, which would provide theoretical reference for designing a novel multi-band filter. Furthermore, the leaky spectrum was very sensitive to the PCF structure, the spectrum was affected not only by the period of the air hole but also by its dimension. Finally, the liquid crystal (LC) could be infiltrated in the air holes of the PCF, because the refractive index of LC could be tuned by controlling the voltage and the temperature. The peak leaky wavelength and bandgap wavelength would red shift with the LC refractive index increasing, which would provide reference for designing a novel tunable filter and optical switch by controlling the voltage or tune the LC temperature.

Keywords Fiber optics; Leaky spectrum; Numerical simulating; Photonic crystal fiber



Liu Jianguo was born in 1975. He is a Ph. D. student in Modern Optics Institute of Nankai university. At present, his interests are modern optics communication and functional device.