

# 面向痕量气体检测的宽带空心布拉格光纤设计

尚 亮<sup>1,2</sup> 张立春<sup>1</sup> 齐丽梅<sup>1,2</sup>

(曲阜师范大学物理工程学院, 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 山东 曲阜 273165)

**摘要** 提出了一种包层周期呈线性啁啾分布的新型空心布拉格光纤(HC-BF)包层结构设计,旨在满足基于中红外吸收光谱的多组分痕量气体检测应用需求。数值研究了这种准周期包层结构 HC-BF 中近掠入射条件下 TE 和 TM 模的带隙结构和模式损耗特性,并与常规周期包层结构 HC-BF 进行了对比。结果表明,对于包层周期线性啁啾分布结构的 HC-BF,通过增大包层周期线性增加量和包层层数均可以有效拓展光子带隙(PBG)宽度,并且其展宽效果随两者增加而明显增强,同时 PBG 中心波长产生红移。在展宽的 PBG 波长范围内,该新型包层结构 HC-BF 依然能够保持 0.01 dB/m 量级的低传输损耗,表明其具有优良的中红外宽带低损耗传输特性。

**关键词** 光纤光学;空心布拉格光纤;中红外宽带传输;痕量气体检测

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0205004

## Design of Hollow-Core Bragg Fiber with Broadband Transmission for Trace-Gas Detection

Shang Liang<sup>1,2</sup> Zhang Lichun<sup>1</sup> Qi Limei<sup>1,2</sup>

(Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, School of Physics and Engineering, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

**Abstract** A novel design of hollow-core Bragg fibers (HC-BFs) with linearly-chirping distributed dielectric cladding is proposed, for demand of the multi-component trace-gas detection based on the mid-infrared (mid-IR) absorption spectrum. The photonic band-gap (PBG) structures and transmission-loss characteristics for the TE and TM modes under nearly glancing incidence condition in such a quasi-periodic HC-BF are numerically investigated and compared with a conventional one with periodic cladding. The results show that the quasi-periodic cladding can effectively enlarge the PBG width by increasing the linear increment of cladding period and dielectric-layer number. The enlargement effect enhances with the increment of both structure parameters. Meanwhile, the central wavelength of the PBG shifts to the longer wavelength. In the enlarged wavelength range of PBG, the HC-BF with linearly-chirping distributed dielectric cladding still has the low loss, in the order of 0.01 dB/m, showing the excellent performance of mid-IR low-loss broadband transmission.

**Key words** fiber optics; hollow-core Bragg fiber; mid-infrared broadband transmission; trace-gas detection

**OCIS codes** 060.2370; 060.2390; 060.2400; 060.4005

## 1 引 言

随着 3~5  $\mu\text{m}$  波段中红外激光光源的发展<sup>[1~3]</sup>,基于中红外吸收光谱的痕量气体检测技术在环境监测领域具有更为广阔的应用前景。目前,中红外气体检测系统中的探测光均是在自由空间中传输,所采用的多通气体吸收池都是体积较大的体

器件(如 White 型和 Herriott 型等),这距离实现痕量气体的小型化、多组分在线检测还有较大差距,而解决该问题的关键是为 3~5  $\mu\text{m}$  波段中红外光选择优良的传输介质。一维光子带隙(PBG)效应导光新机制的空心布拉格光纤(HC-BF)的出现<sup>[4,5]</sup>,为此带来了革命性机遇。由于利用 PBG 效应,这种采

收稿日期: 2012-08-29; 收到修改稿日期: 2012-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(61107030)和山东省高等学校科技计划项目(J12LJ03)资助课题。

作者简介: 尚 亮(1981—),男,博士,讲师,主要从事新型光子带隙光纤和光纤激光器等方面的研究。

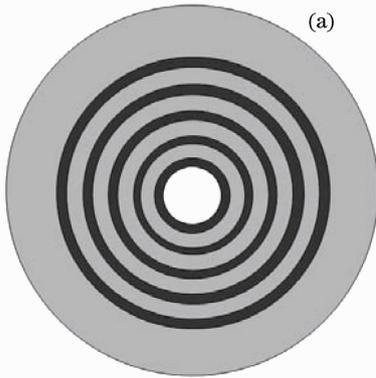
E-mail: shliang@mail.qfnu.edu.cn

用折射率呈周期性变化的多电介质层构建包层结构的空心光纤型波导,可以将一定频率范围(全向反射带隙)内、具有任意入射方向和偏振态的光波限制在低折射率的中空纤芯中传输,故又称为全向导波光纤<sup>[6]</sup>。与同样利用 PBG 效应传输机制的空芯光子晶体光纤<sup>[7,8]</sup>采用二维光子晶体结构相比,HC-BF 只需改变各电介质包层的厚度和折射率,即可实现 PBG 结构和模式传输特性的调控。

由于具有新颖导波机制和优良传输特性,中红外 HC-BF 在痕量气体检测中的应用价值日益引起国内外科研人员的重视。Charlton 等<sup>[9]</sup>进行了 HC-BF 应用于痕量气体检测的探索,即以  $10.3 \mu\text{m}$  的量子级联激光器为探测光源,利用长度为  $1 \text{ m}$ 、PBG 中心波长位于  $10.6 \mu\text{m}$  波段的 HC-BF 作为气体吸收池,可检测  $30 \times 10^{-12}$  浓度量级的氯乙烷气体。国内也先后设计并制备了 PBG 中心波长位于  $4.4 \mu\text{m}$  和  $3.3 \mu\text{m}$  波段的 HC-BF,分别可为  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  检测提供气体吸收池<sup>[10,11]</sup>。尽管如此,目前所设计利用的 HC-BF 在痕量气体检测系统中还只是作为特定目标气体吸收池使用,因此其 PBG 宽度相对较窄,无法满足多组分痕量气体同时检测的应用需求。为此,本文在常规 HC-BF 周期性结构包层基础上,提出了包层周期呈线性啁啾分布的新型 HC-BF 包层结构设计,并对其带隙结构和传输损耗特性进行了数值研究,结果表明这种准周期包层结构设计可以有效提升 HC-BF 的低损耗传输带宽,这将为构建小型化、多组分痕量气体在线检测系统开辟新的技术途径。

## 2 理论模型

图 1(a)为典型 HC-BF 的横向结构示意图。常



规 HC-BF(为方便表述,简称 BF-A)利用高、低折射率( $n_h$  和  $n_l$ )呈周期性分布[如图 1(b)所示]的两种电介质薄层(厚度分别为  $d_h$  和  $d_l$ )构建一维光子晶体结构包层(周期  $\Lambda = d_h + d_l$ ),从而将频率处于 PBG 范围内的光波限制在更低折射率的中空纤芯(折射率  $n_c = 1$ ,纤芯半径为  $a$ )中沿光纤轴向传输。为提升 HC-BF 的低损耗传输带宽,提出了包层周期呈线性啁啾分布的准周期 HC-BF 包层结构设计(简称 BF-B),其折射率径向分布如图 1(c)所示。与 BF-A 包层周期  $\Lambda$  为常数不同,BF-B 的包层周期沿光纤径向线性增大,增加量  $\Delta d = \Lambda_{j+1} - \Lambda_j$  ( $j$  为整数且  $j \geq 1$ )。为降低大芯径多模 HC-BF 的泄漏损耗,对 BF-A 和 B 均采用近掠入射条件下的四分之一波条件<sup>[6]</sup>优化各包层厚度,即每个周期中的介质层厚度  $d_h$  和  $d_l$  均需满足

$$\frac{d_h}{d_l} = \frac{\sqrt{n_l^2 - 1}}{\sqrt{n_h^2 - 1}} \quad (1)$$

根据传输矩阵法<sup>[12]</sup>,第  $k$  层电介质层的特征矩阵为

$$\mathbf{M}_k = \begin{bmatrix} \cos \delta_k & -\frac{i}{\eta_k} \sin \delta_k \\ -i\eta_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\delta_k = 2\pi n_k d_k \cos \theta_k / \lambda$ ,对于横电(TE)和横磁(TM)模,分别有  $\eta_k = n_k \cos \theta_k$  和  $\eta_k = \cos \theta_k / n_k$ ,其中  $n_k$  和  $d_k$  分别为介质层的折射率和厚度, $\theta_k$  为第  $k$  层介质层中的折射角, $\lambda$  为真空中的光波长。

对于多层介质组成的一维周期性结构,逐层应用单层介质的特征矩阵,可以得到  $N$  层电介质结构总的特征矩阵为

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_{N-1} \mathbf{M}_N. \quad (3)$$

由此可得,当中空纤芯中的入射角为  $\theta_m$  时,多

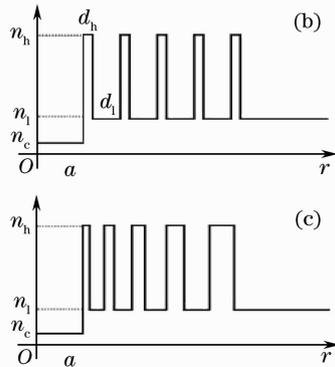


图 1 (a)典型 HC-BF 的横向结构示意图;(b) BF-A 和(c) BF-B 的折射率径向分布示意图  
Fig. 1 (a) Schematic diagram of cross section in a typical HC-BF; refractive index radial distribution for (b) BF-A and (c) BF-B

层介质结构的反射率为

$$R_{s,p}(\theta_m) = \left| \frac{(m_{11} + \eta_{N+1} m_{12}) \eta_0 - (m_{21} + \eta_{N+1} m_{22})}{(m_{11} + \eta_{N+1} m_{12}) \eta_0 + (m_{21} + \eta_{N+1} m_{22})} \right|^2, \quad (4)$$

式中,下标  $s$  和  $p$  分别表示 TE 和 TM 模;  $m_{11}, m_{12}, m_{21}$  和  $m_{22}$  为特征矩阵  $\mathbf{M}$  的 4 个元素;  $\eta_0$  和  $\eta_{N+1}$  对应的折射率分别为  $n_c$  和  $n_1$ 。当入射角一定时,由(4)式计算得到的反射谱,可以确定 HC-BF 的带隙结构<sup>[13]</sup>。在此基础上,定义归一化 PBG 宽度  $\Delta\omega/\omega_c$  为

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_c} = \frac{2(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 + \lambda_1}, \quad (5)$$

式中  $\Delta\omega$  和  $\omega_c$  分别表示带隙频宽和中心频率,  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  分别为利用反射谱所表示的 PBG 下带边和上带边对应波长。

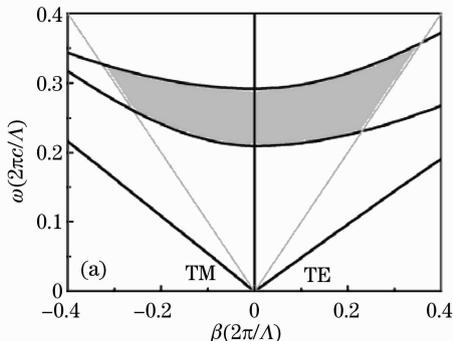
对于大芯径多模 HC-BF,传输损耗特性可以采用射线光学法分析<sup>[14]</sup>,其模式功率损耗系数为<sup>[15]</sup>

$$\eta_{\text{Loss}} = 4.34 \frac{1 - R \left[ \arccos \left( \frac{\lambda U_{nm}}{2\pi a n_c} \right) \right]}{2a \tan \left[ \arccos \left( \frac{\lambda U_{nm}}{2\pi a n_c} \right) \right]} \quad (\text{dB/m}), \quad (6)$$

式中  $U_{nm}$  为  $(m-1)$  阶贝塞尔函数的第  $n$  个根。对于 TE 和 TM 模,  $m=0$ ; 对于 HE 和 EH 混合模,  $m \neq 0$ 。对于 TE 和 TM 模, 分别有  $R = R_s$  和  $R = R_p$ , 而对于混合模则有  $R = (R_s + R_p)/2$ 。

### 3 结果与讨论

为定量描述传输矩阵法计算得到的 PBG 结构,首先将其与采用平面波展开法计算所得结果进行了对比。图 2(a) 为平面波展开法计算得到的不同折射率 [ $n_h = 2.74$  和  $n_l = 1.62$ , 分别对应于  $\text{As}_2\text{Se}_3$  和聚酰亚胺 (PEI) 材料] 介质交替变化构成的一维周期性结构中 TE 和 TM 模的带隙结构图,其中横坐标  $\beta$  表示纵向传播常数,  $c$  为光速。图中灰色区域表示基本(一阶)PBG,处于该频率范围内的光波可



以被限制在中空纤芯中沿光纤轴向以较低损耗传输。可以看出,正入射( $\theta_m = 0$ )时, PBG 频率区间为  $0.2096 \sim 0.2919 (2\pi c/\Lambda)$ , 故当周期  $\Lambda = 900 \text{ nm}$  时, 其对应的波长范围为  $3083 \sim 4294 \text{ nm}$ 。相同周期性包层结构下,正入射时的 TE 和 TM 模反射谱(两者相同)如图 2(b) 所示。计算时取介质层数  $N = 200$  (对应周期数为 100), 且为保持与平面波展开法计算条件一致, 此处  $\eta_{N+1}$  对应的折射率等于  $n_c$ 。由该图可以看出, 反射率不小于 99.9% 的波长范围为  $3084 \sim 4293 \text{ nm}$ , 以此确定的 PBG 范围与图 2(a) 所示结果完全相符。因此, 在下面的分析中, 就以反射率不小于 99.9% 的波长范围定量描述 PBG 宽度。

对于大芯径多模 HC-BF, 各导波模式的色散曲线大多分布在光辐射线附近<sup>[6]</sup> [如图 2(a) 中灰色斜线所示], 因此, 主要研究近掠入射条件下的 PBG 带宽特性。图 3(a) 和 (b) 分别给出了首周期  $\Lambda_1 = 900 \text{ nm}$ , 介质层数  $N = 61$  (高、低折射率介质层数分别为 31 和 30) 时, 近掠入射 ( $\theta_m = 85^\circ$ ) 条件下, BF-B 中 TE 模的带隙和归一化 PBG 宽度与周期增加量  $\Delta d$  的变化关系。由图可见, TE 模的 PBG 上带边和下带边对应波长均随  $\Delta d$  的增加而红移, 但是由于前者的增加速度明显大于后者, 从而使得 TE 模的归一化 PBG 宽度随  $\Delta d$  的增加而显著增大。如图 3 所示, 近掠入射 ( $\theta_m = 85^\circ$ ) 条件下,  $\Delta d = 8 \text{ nm}$  时的 TE 模归一化 PBG 宽度已高达 0.564 (相应波长范围为  $2075 \text{ nm}$ ), 比  $\Delta d = 0$  时的 0.434 (相应波长范围为  $1395 \text{ nm}$ ) 提高了约 30% (相应波长范围拓宽了约 48.7%)。因为  $\Delta d = 0$  时的 BF-B 实际为 BF-A, 由此可以看出, 包层周期线性啁啾分布结构设计较常规 HC-BF 包层结构设计能够有效拓展其 PBG 宽度。

当入射角较大时, 由于布儒斯特现象的存在而导致 TM 模的 PBG 宽度比 TE 模的窄<sup>[16]</sup>, 因此采

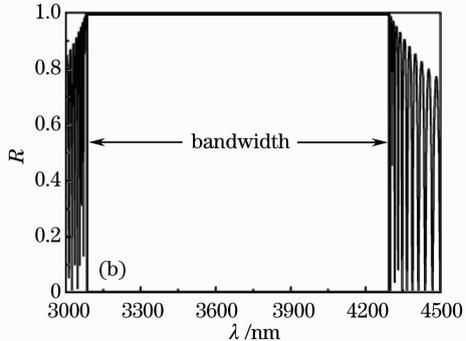


图 2 (a) 光子带隙结构图; (b)  $\theta_m = 0^\circ$  时的 TE/TM 模反射谱

Fig. 2 (a) Structure diagram of PBG; (b) reflectivity spectrum for TE/TM mode with  $\theta_m = 0^\circ$

用 TM 模的 PBG 宽度评估大芯径多模 HC-BF 的传输带宽更具有实用价值。为此,图 4(a)和(b)分别给出了  $\theta_{in}=85^\circ$  时 BF-B(结构参数  $\Delta_1$  和  $N$  与图 3 相同)中 TM 模的带隙和归一化 PBG 宽度与周期增加量  $\Delta d$  的变化关系。由该图可见,近掠入射条件下 BF-B 中 TM 模的 PBG 上带边和下带边对应波长也均随  $\Delta d$  的增加而红移,但与 TE 模相比, TM 模的带隙下带边随  $\Delta d$  的提升速度明显较高,从而使得 TM 模的 PBG 宽度虽然也随  $\Delta d$  的增加而增大,但是相同  $\Delta d$  值对 TM 模 PBG 宽度的拓展效果

没有对 TE 模显著。例如,  $\Delta d=8$  nm 时, BF-B 中 TM 模归一化 PBG 宽度为 0.265(相应波长范围为 942 nm),比  $\Delta d=0$  时的 0.224(相应波长范围为 695 nm)仅提高了约 18.3%(相应波长范围拓展了约 35.5%)。当然,若进一步增大  $\Delta d$  值, TM 模的 PBG 宽度还可获得更大拓展。与文献[17,18]中提出的包层结构设计相比,虽然包层周期性线性啾啾分布设计对 HC-BF 的 PBG 宽度拓展相对有限,但是该设计结构简单,制备难度相应降低且易于实现,因此更具有实用意义。

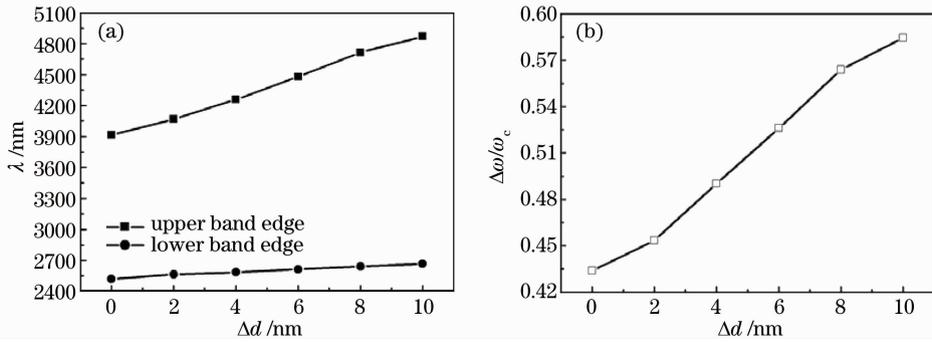


图 3 BF-B 中 TE 模(a)带隙和(b)归一化 PBG 宽度与  $\Delta d$  的变化关系

Fig. 3 (a) Band-gap and (b) normalized PBG width in BF-B as a function of  $\Delta d$  for TE modes

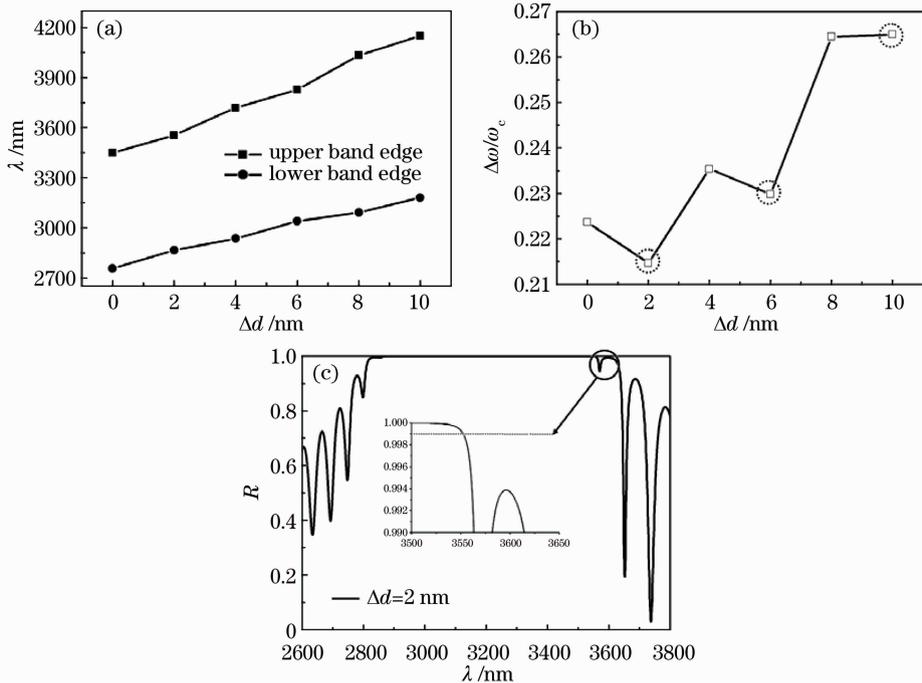


图 4 BF-B 中 TM 模(a)带隙和(b)归一化 PBG 宽度与  $\Delta d$  的变化关系;(c)  $\theta_{in}=85^\circ$  时的 TM 模反射谱

Fig. 4 (a) Band-gap and (b) normalized PBG width in BF-B as a function of  $\Delta d$  for TM modes;

(c) reflectivity spectra for TM modes with  $\theta_{in}=85^\circ$

值得说明的是,图 4(b)所示的 TM 模归一化 PBG 宽度随  $\Delta d$  的增加并不是单调增大,而是呈振荡上行变化趋势,这主要是由于线性啾啾分布包层

周期结构的相对复杂性加剧了光波入射到多层结构包层时的干涉效应,从而导致 BF-B 中利用反射谱所表示的 TE 和 TM 模的 PBG 上带边附近均出现

剧烈的振荡现象<sup>[17]</sup> [如图 4(c)所示  $\Delta d=2$  nm 时], 其中 TM 模表现更为明显。在以固定反射率 (99.9%) 定量表征 PBG 的情况下, 对于部分  $\Delta d$  值 (如 2, 6, 10 nm 等), 因为振荡而导致带边附近反射率的微降 [如图 4(c)插图中所示], 将会使所得 PBG 上带边对应波长 ( $\lambda_2$ ) 值偏小, 从而引起归一化 PBG 宽度的计算值也随之偏小, 但这并不影响包层周期线性啁啾分布结构对 PBG 宽度的拓展作用。

对于包层周期线性啁啾分布结构设计的 HC-BF, 当  $\Delta d$  值一定时, 增加介质包层数  $N$  也可以有效拓展其 PBG 宽度。图 5(a) 和 (b) 分别给出了近掠入射 ( $\theta_m=85^\circ$ ) 条件下, 不同  $\Delta d$  值时 BF-B 中 TM 模的带隙和归一化 PBG 宽度与介质包层数  $N$  的变化关系。由图 5(b) 可见,  $\Delta d=5$  nm 时 BF-B 中 TM 模的归一化 PBG 宽度随着  $N$  的增加而显著增大。例如, 当  $N$  由 41 增加到 81 时, TM 模的归一化 PBG 宽度由 0.195 增大到 0.286, 提高了约 46.7%。

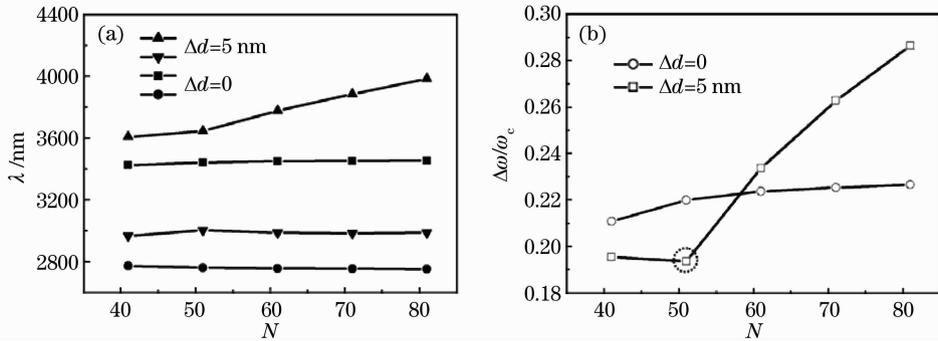


图 5 不同  $\Delta d$  值时 BF-B 中 TM 模 (a) 带隙和 (b) 归一化 PBG 宽度与  $N$  的变化关系

Fig. 5 (a) Band-gaps and (b) normalized PBG widths in BF-B as a function of  $N$  for TM modes with different  $\Delta d$

如前所述, 包层周期线性啁啾结构设计可以有效拓展 HC-BF 的 PBG 宽度, 但是还需要考虑带隙内导波模式的传输损耗, 为此考察了  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  和  $HE_{11}$  模的损耗特性。图 6(a)~(c) 分别为首周期  $\Lambda_1=900$  nm, 介质层数  $N=61$ , 纤芯半径  $a=200$   $\mu\text{m}$ , 不同  $\Delta d$  值时 BF-B 中  $TE_{01}$ ,  $TM_{01}$  和  $HE_{11}$  模的传输损耗谱。由该图可见, 若以 0.01 dB/m 为参考值 (如图中灰色线所示), 当  $\Delta d$  由 0 增加到 10 nm 时,  $TE_{01}$  模的低损耗传输带宽由 1396 nm 提高到 2185 nm, 同时中心波长红移约 550 nm; 而  $TM_{01}$  模的低损耗传输带宽由 684 nm 提高到 917 nm, 同时中心波长红移约 570 nm。混合模的损耗主要取决于其 TM 分量<sup>[6]</sup>, 因此,  $HE_{11}$  模的传输损耗谱变化与  $TM_{01}$  模类似, 但由于其损耗小于纯 TM 模, 故其低损耗传输带宽略大于  $TM_{01}$  模。图 6 所示再次验证了包层周期线性啁啾分布结构设计对

相比之下,  $\Delta d=0$  时 (实质为 BF-A) TM 模的归一化 PBG 宽度随  $N$  的增加而缓慢增大, 并且此时 PBG 宽度的微增主要是因为增加  $N$  可以提高包层反射率, 一旦  $N$  足够大以致几乎不影响包层反射率时, TM 模的 PBG 宽度将与  $N$  的变化无关。由此表明, 相比于常规包层结构设计, 包层周期线性啁啾结构设计的 HC-BF 能够通过增加包层数  $N$  有效地拓展 PBG 宽度。需要指出的是, 图 5(b) 所示  $N=51$  时的归一化 PBG 宽度值偏小的原因与图 4(b) 中所示相同。对比图 4(a) 和图 5(a) 可以看出, 尽管增加  $\Delta d$  和  $N$  均可以有效拓展 HC-BF 的 PBG 宽度 (中心波长同时发生红移), 但是两种情况下的展宽原因却有不同。  $N$  一定时, 随着  $\Delta d$  的增加, BF-B 的 PBG 上带边和下带边对应波长均随之以不同增长速度红移; 而  $\Delta d$  一定时, 随着  $N$  的增加, 仅有 PBG 上带边对应波长随之产生红移, 而下带边对应波长基本不变。

拓展 HC-BF 低损耗传输带宽的有效性。此外, 由图 6 所示的传输损耗谱也可以看出, 在 BF-B 低损耗传输带的长波长附近有振荡产生以致出现损耗突升尖峰, 这与包层反射谱中 PBG 上带边附近的反射率突降尖峰是相对应的。

## 4 结 论

为满足 3~5  $\mu\text{m}$  波段中红外光宽带低损耗传输要求, 在常规包层结构的 HC-BF 基础上, 提出了包层周期呈线性啁啾分布的新型 HC-BF 包层结构设计。采用传输矩阵法和射线光学法, 理论研究了这种准周期包层结构 HC-BF 中近掠入射条件 ( $\theta_m=85^\circ$ ) 下 TE 和 TM 模的带隙结构和模式损耗特性, 并与常规周期包层结构的 HC-BF 进行了对比分析。结果表明, 包层周期线性啁啾分布结构设计可以有效拓展 HC-BF 的 PBG 宽度, 且其展宽程度与

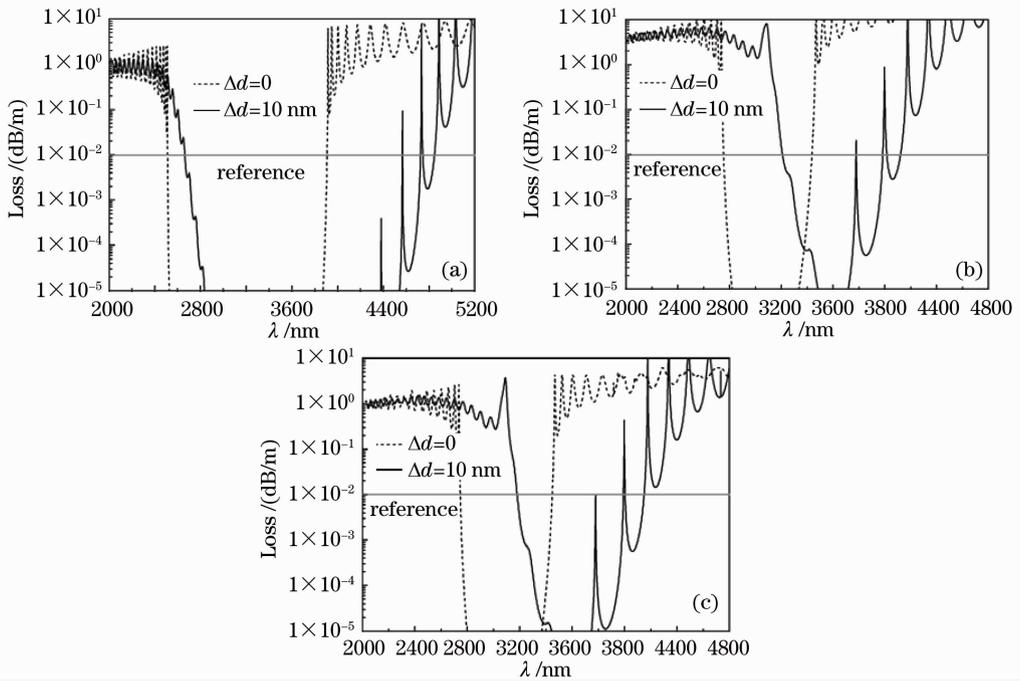


图 6 不同  $\Delta d$  时 BF-B 中 (a)  $TE_{01}$ , (b)  $TM_{01}$  和 (c)  $HE_{11}$  模损耗谱

Fig. 6 Loss spectra of (a)  $TE_{01}$ , (b)  $TM_{01}$  and (c)  $HE_{11}$  modes with different  $\Delta d$  in BF-B

包层周期线性增加量  $\Delta d$  和包层层数  $N$  有关。随着  $\Delta d$  或  $N$  的增加, HC-BF 的带隙宽度明显增大, 同时中心波长产生红移, 并且在中红外带隙波长范围内依然能够保持 0.01 dB/m 量级的低传输损耗。这种具有宽带低损耗传输特性的中红外 HC-BF 对于构建小型化、多组分痕量气体在线检测系统将具有重要应用价值。

### 参 考 文 献

- 1 Tang Yuanyuan, Liu Wenqing, Kan Ruifeng *et al.*. Rapid and sensitive measurements of motor vehicle exhausts using quantum cascade lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1215003  
汤媛媛, 刘文清, 阚瑞峰等. 基于量子级联激光器高灵敏快速检测机动车尾气排放气体浓度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1215003
- 2 A. J. Henderson, P. M. Roper, L. A. Borschowa *et al.*. Stable, continuously tunable operation of a diode-pumped doubly resonant optical parametric oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(17): 1264~1266
- 3 Wang Liusan, Cao Zhensong, Wang Huan *et al.*. A widely tunable mid-infrared difference frequency generation laser and its detection of atmospheric water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0414003  
汪六三, 曹振松, 王欢等. 宽调谐中红外差频激光及大气水汽浓度探测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(4): 0414003
- 4 P. Yeh, A. Yariv, E. Marom. Theory of Bragg fiber[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1978, **68**(9): 1196~1201
- 5 Y. Fink, D. J. Ripin, S. Fan *et al.*. Guiding optical light in air using an all-dielectric structure[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(11): 2039~2041
- 6 S. G. Johnson, M. Ibanescu, M. Skorobogatiy *et al.*. Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core OmniGuide fibers[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 748~779
- 7 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.*. Single-mode photonic band gap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999,

- 285(5433): 1537~1539
- 8 Zhang Guang, Zhou Qinling, Hu Lili *et al.*. A large core phosphate crystal fiber made by a stack-and-draw technique[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0106003  
张光, 周秦岭, 胡丽丽等. 堆积法制作大芯径磷酸盐光子晶体光纤[J]. *中国激光*, 2011, **38**(1): 0106003
- 9 C. Charlton, B. Temelkuran, G. Dellemann *et al.*. Midinfrared sensors meet nanotechnology: trace gas sensing with quantum cascade lasers inside photonic band-gap hollow waveguides[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(19): 194102
- 10 Xing Wenxin, Zhang Wei, Shi Lichao *et al.*. Mid-infrared hollow-core Bragg fiber for trace gas detection[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(12): 8640~8645  
刑文鑫, 张巍, 石立超等. 用于气体痕量检测的中红外空芯布拉格光纤[J]. *物理学报*, 2010, **59**(12): 8640~8645
- 11 L. Shi, W. Zhang, J. Jin *et al.*. Hollow-core Bragg fiber and its application in trace gas sensing[C]. *SPIE*, 2011, **7990**: 799008
- 12 D. Lusk, I. Abdulhalim, F. Placido. Omnidirectional reflection from Fibonacci quasi-periodic one-dimensional photonic crystal[J]. *Opt. Commun.*, 2001, **198**(4-6): 273~279
- 13 Q. G. Du, G. Alagappan, H. V. Demir *et al.*. Geometrically distributed aperiodic circular photonic crystals with broad and isotropic photonic band gaps[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(8): 2239~2241
- 14 T. Katagiri, Y. Matsuura, M. Miyagi. Photonic bandgap fiber with a silica core and multilayer dielectric cladding[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(6): 557~559
- 15 M. Miyagi. Waveguide-loss evaluation in circular hollow waveguides and its ray-optical treatment[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(2): 303~307
- 16 Y. Fink, J. N. Winn, S. Fan *et al.*. A dielectric omnidirectional reflector[J]. *Science*, 1998, **282**(5394): 1679~1682
- 17 A. Husakou, J. Herrmann. Chirped multilayer hollow waveguides with broadband transmission[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3025~3035
- 18 D. J. J. Hu, G. Alagappan, Y. Yeo *et al.*. Broadband transmission in hollow-core Bragg fibers with geometrically distributed multilayered cladding[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 18671~18684

栏目编辑: 王晓球