

文章编号:1004-4213(2011)02-0174-4

低损耗大模面积 W 型布喇格光纤

闫培光¹, 赵健¹, 郭春雨¹, 赵俊清¹, 舒杰¹, 阮双琛¹, 李相², 陈胜平²

(1 深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

(2 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘 要:通过有限元法建立模型, 讨论了布喇格光纤设计参量对光子带隙的影响, 发现当增加掺锗玻璃环的厚度或折射率时, 会使带隙移向长波. 通过在紧邻纤芯处施加一层掺氟低折射率玻璃, 设计了一种大模面积 W 型布喇格光纤. 计算表明: W 型布喇格光纤可以有效减小限制损耗, 提高光纤的抗弯曲能力. 本文设计的布喇格光纤的纤芯直径为 30 μm , 在波长 1.06 μm 限制损耗约为 0.1 dB/km, 且维持单一横模传输.

关键词:布喇格光纤; 大模面积; 反共振反射型光波导

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20114002.0174

0 引言

布喇格光纤(Bragg Fiber, BF)^[1]是由在径向折射率呈周期分布的多层介质圆环构成的一种光纤. 它也被视作一维光子晶体处于带隙之内的光子不能穿透多层介质圆环所形成的周期结构, 此时多层介质圆环起到一种类似反射镜的作用, 将光子限制在纤芯内传导; 反之, 纤芯传导模式将与最内层的介质圆环的高阶模式发生共振耦合而无法传导, 形成带隙之外的“高损耗区”. 本质上, 这类光纤属于一种反共振反射型光波导(Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide, ARROW)^[2]. 与由空气孔和石英构成的光子晶体光纤类似, BF 可实现大模面积(Large Mode Area, LMA)^[3]、可控色散^[4-5]以及更好的抗弯曲特性等^[6].

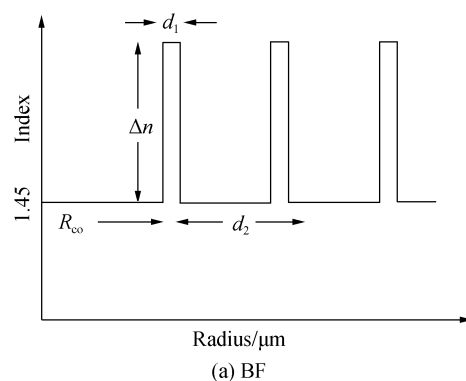
BF 的结构参量会影响光子带隙, 掌握其变化规律对光纤制作具有指导意义. 此外, 在高功率光纤激光器中, 增益光纤通常设计成低损耗、抗弯曲的 LMA 光纤. 光子晶体光纤一般通过减小空气孔的占空比来实现 LMA, 在牺牲光纤柔韧性后, 可实现上百微米芯径^[7]; “泄漏通道光纤”也能实现上百微米芯径^[8], 但这两类光纤的抗弯曲性能不好. 06 年法国 Limoges 大学报导了一种 LMA-BF, 提高纤芯折射率得到传输损耗在 0.81 μm 为 2.8 dB/km. 他们还制作了掺镱 BF 并实现了连续以及脉冲单模激

光输出^[9-10]. 因此设计带隙在 1.06 μm 处低损耗的 BF 对掺镱光纤激光器具有重要意义.

本文从理论上研究了 BF 不同结构参量对带隙的影响, 设计了一种 W 型芯子的 BF 结构(W-core BF, WBF), 紧邻纤芯引入一层厚度和折射率合适的低折射率的掺 F 玻璃环, 既确保光子带隙效应, 又可降低光纤的限制损耗(Confinement Loss, CL)并提高抗弯曲能力. 设计了一种纤芯直径 30 μm 的 WBF, 在波长 1.06 μm 处 CL 为 0.1 dB/km; 计算表明光纤维持单一横模传输.

1 光纤参量对 BF 带隙的影响

通常 BF 的折射率分布剖面(Refractive Index Profile, RIP)如图 1(a). BF 重要的参量包括: 掺锗玻璃圆环的宽度为 d_1 、周期为 d_2 、它与硅玻璃折射



基金项目:国家自然科学基金(No. 61007054, No. 10904173)、深圳市科技计划项目(No. 200718)和广东省自然科学基金(No. 9451806001002428)资助

第一作者:闫培光(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光子晶体光纤、光纤激光器与放大器. Email: yanpg@szu.edu.cn

通讯作者:阮双琛(1963—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光子晶体光纤、固体激光器、太赫兹波导与成像等. Email: scruan@szu.edu.cn

收稿日期:2010-09-13; **修回日期:**2010-10-25

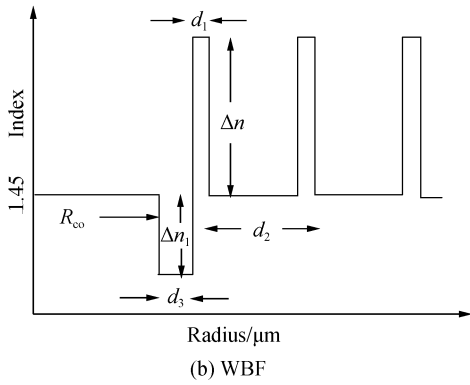


图 1 两类 BF 的 RIPs

Fig. 1 The RIPs of two types BF

率差为 Δn , 以及纤芯的半径 R_{co} ; WBF 的 RIP 如图 1(b), 在纤芯外侧多加入一层掺氟低折射率玻璃, 掺氟玻璃环的折射率下陷为 Δn_F , 宽度为 d_3 . 选取硅玻璃的折射率为 $n_{FS} = 1.45$.

采用有限元方法对 BF 进行建模, 并通过 Matlab 编程逐点扫描波长, 求解每个波长上的折射率, 然后通过折射率的虚部利用式(1)^[11] 可对应求解出 CL 的数值. 分析 CL 即可得到 BF 的带隙(损耗低的区域)、高损耗区.

$$CL = (2\pi \times 8.686 \times \text{imag}(n_{\text{eff}})) / \lambda \quad (1)$$

讨论的光纤参量列于表 1, 相应计算结果绘制在图 2 中, 其中图 2(a) 中 d_1 分别取三个不同数值, 对应同一根预制棒在不同出丝口径下得到的三段光纤, 所以 d_2, R_{co} 维持对 d_1 的倍数.

表 1 图 2 中涉及的光纤参量
Table 1 The used fiber data in Fig. 2

| Parameter Figure | $d_1 / \mu\text{m}$ | Δn | $d_2 / \mu\text{m}$ | $R_{co} / \mu\text{m}$ |
|---------------------|---------------------|------------|---------------------|------------------------|
| Fig. 2(a) | 1 | 0.02 | 8 | 11 |
| | 1.25 | | 10 | 12.5 |
| | 1.5 | | 12 | 16.5 |
| Fig. 2(b) | 1.5 | 0.02 | 12 | 16.5 |
| | | 0.025 | | |
| | | 0.03 | | |
| Fig. 2(c) | 1.5 | 0.02 | 9 | 16.5 |
| | | | 12 | |
| | | | 15 | |

从图 2(a) 和 (b) 可见, 随 d_1 或 Δn 增大带隙移向长波. 从 ARROW 理论来看, 增加 d_1 或 Δn , 都将增加掺锗高折射率反射镜在共振反射时的光程差, 其反射波长自然移向长波. 而从相位匹配的观点也可以理解成: 当增加 d_1 或增大 Δn 时, (与纤芯内基模发生共振的) 掺锗玻璃环内某高阶模的有效折射率相应增大, 但纤芯内基模的有效折射率却不变, 因此纤芯内基模和掺锗玻璃环内高阶模的耦合共振点将移向长波, 必然出现上述变化特点. 这一特点符合

带隙光纤的一般规律^[12], 因此控制出丝口径即可调控 BF 的带隙位置, 这对光纤制作中带隙的控制具有实际指导意义. 图 2(c) 显示 d_2 变化对带隙的中心位置影响弱, 但三种结构中以 $d_2 = 12 \mu\text{m}$ 时光纤的 CL 最低, 表明掺锗玻璃环的周期总存在一个最优化值.

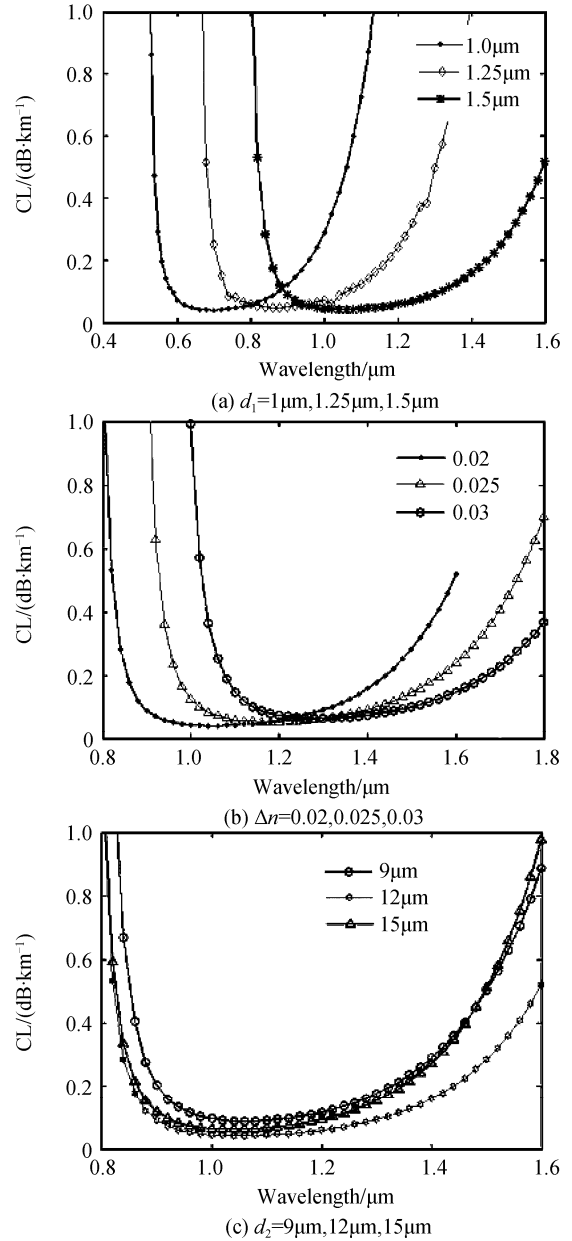


图 2 计算的 BF 参量对带隙的影响

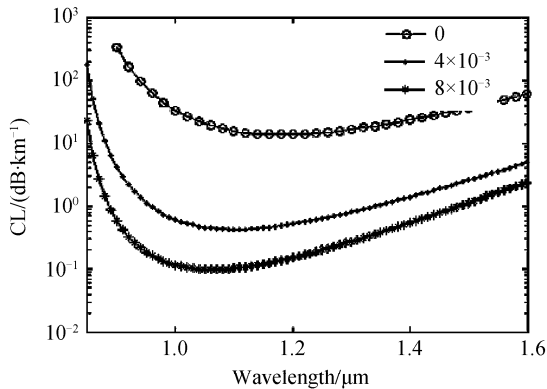
Fig. 2 The calculated influence of structure parameters on bandgap

2 WBF 的带隙特性、模式特性和弯曲损耗特性

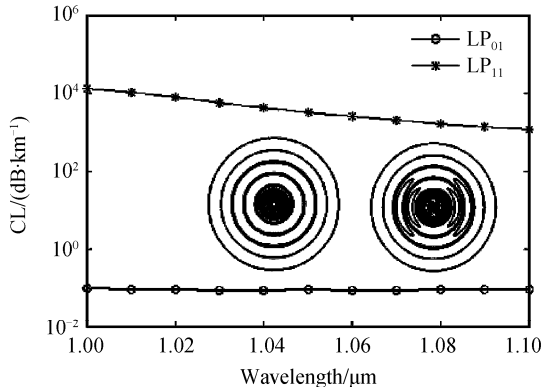
在 WBF 中, 掺氟玻璃环的引入会影响光纤的带隙特性. 它避免了纤芯内传导模与掺锗玻璃直接作用, 能增强对传导模式的限制; 但也要合理设计下陷层的宽度和 Δn_F , 防止它的限制作用太强只有全

内反射作用而无法形成光子带隙效应. 设计中取 $d_1 = 1.5 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0.025$, $d_2 = 12 \mu\text{m}$, $D_{\text{co}} = 30 \mu\text{m}$, 计算无折射率下陷层时光纤的 CL 曲线. 之所以取纤芯直径为 $30 \mu\text{m}$ 是考虑到普通的掺镱光纤有这样的产品, 便于兼容. 对 WBF, 在纤芯为 $30 \mu\text{m}$ 时, 掺氟玻璃环厚度设为 $d_3 = 3 \mu\text{m}$, 分别计算 $\Delta n_F = 4 \times 10^{-3}$ 和 8×10^{-3} 的 CL, 示于图 3(a). 计算结果显示 WBF 有两个明显特征: 1) 随着 Δn_F 的增加, CL 明显减小, $\Delta n_F = 8 \times 10^{-3}$ 比无下陷的情况 CL 可减小 2 个数量级. 当 $\Delta n_F = 8 \times 10^{-3}$, 波长 $1.06 \mu\text{m}$ 处 $\text{CL} = 0.1 \text{ dB/km}$, 模场直径为 $22 \mu\text{m}$. 很容易解释 CL 随 Δn_F 的增加而减小, 此时对纤芯模式的限制, 除了多层介质圆环的光子带隙效应之外, 还有掺氟玻璃所引入的全内反射效应, 在两种效应共同作用下, 其损耗会大幅度减小. 2) $\Delta n_F = 8 \times 10^{-3}$ 时仍存在光子带隙效应, 而且带隙边沿比无下陷层时更加陡峭, 这说明只要合理设置掺氟玻璃的参量, 不会因为引入的全内反射效应而将光子带隙效应抑制. 在带隙的边沿, 纤芯内模式仍然能穿越下陷层与掺镱玻璃环内的高阶模产生共振耦合, 形成导模的高损耗区.

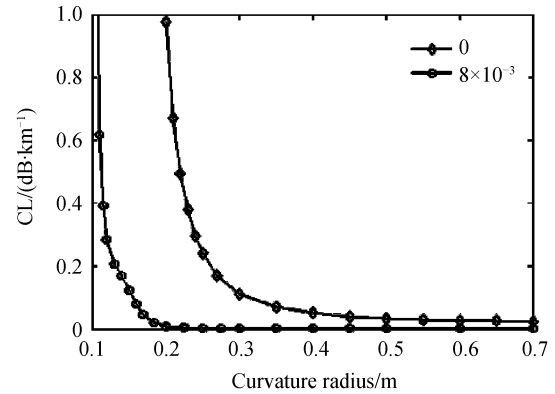
图 3(b) 计算了 $\Delta n_F = 8 \times 10^{-3}$ 光纤在波长 $1 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 范围内基模 LP_{01} 和二阶模 LP_{11} 的 CL, 结果表明 LP_{11} 比 LP_{01} 的 CL 要大 4 个数量级以上, 考虑



(a) The CL curve computed at different values of Δn_F



(b) The CL curve computed for LP_{01} and LP_{11} mode, the inset is mode distribution of LP_{01} and LP_{11} mode at $1.06 \mu\text{m}$



(c) CL of BF and WBF computed versus curvature radius

图 3 WBF 的带隙特性、模式特性和弯曲损耗特性

Fig. 3 The bandgap, mode and bending properties of WBF 到 LP_{11} 模从位置上更靠近掺镱玻璃环, 尽管加入了掺 F 下陷层, 它与掺镱玻璃环内的模式存在共振耦合更为强烈, 小插图是计算的 $1.06 \mu\text{m}$ 处 LP_{01} 和 LP_{11} 的场能量分布, 其中 LP_{11} 的能量部分被掺镱玻璃环共振耦合到纤芯外面, 而 LP_{01} 模则很好地限制在纤芯内, 因而两种模式之间的损耗差别很大, 光纤维持单模. 弯曲光纤时会在光纤内引入应力双折射, 破坏布喇格光纤的折射率对称性^[11], 如果沿着 x 方向弯曲半径为 R_c , 则折射率分布可用 $n(x, y) = 1.45 \times \exp(x/R_c)$ 表示. 而 WBF 能够有效提高布喇格光纤的抗弯曲能力. 图 3(b) 是 Δn_F 分别为 0.8×10^{-3} 时计算的光纤在不同弯曲半径下的 CL 曲线, 可见 WBF 具有更好的抗弯曲特性, 在 $R_c = 10 \text{ cm}$ 时光纤的弯曲损耗才开始突然增大, 在 $R_c = 15 \text{ cm}$ 时弯曲损耗不足 0.2 dB/m , 对于 $30 \mu\text{m}$ 芯径的增益光纤来说, 完全能满足实际的应用要求. 显然具有上述两个特点的 WBF 非常适合制作 LMA 增益光纤.

3 结论

本文研究了掺镱玻璃环参量变化对 BF 的光子带隙特性的影响. 计算发现改变掺镱玻璃环宽度与折射率都能明显影响光子带隙的中心位置和带隙边沿, 增大掺镱玻璃环宽度或提高其折射率, 带隙会移向长波方向. 这对于实际 BF 制作中控制光子带隙位置具有一定参考意义. 合理设计掺镱玻璃环的周期, 能够有效减小 CL, 这在光纤设计中需予以重视. 本文同时提出一种新颖的 WBF, 通过引入合适的折射率下陷, 能有效减小 CL, 提高光纤的抗弯曲能力, 并设计了一种低损耗 LMA-WBF.

参考文献

- [1] YE H P, YARIV A, MAROM E. Theory of Bragg fiber[J]. JOSA, 1978, 68(9): 1196-1201.
- [2] WIKIPEDIA. ARROW waveguide [Eb/OL]. (2010-07-25) [2010-08-15]. <http://en.wikipedia.org/wiki/ARROW>

- waveguide.
- [3] JOHNSON S G, IBANESCU M, SKOROBOGATIY M, *et al.* Low-loss asymptotically single-mode propagation in large-core omniguide fibers[J]. *Optics Express*, 2001, **9**(13): 748-779.
- [4] CHEN W, LI S Y, LU P X. Dispersion-flattened Bragg photonic crystal fiber for large capacity optical communication system[J]. *Frontier of Optoelectronics*, 2009, **2**(3): 289-292.
- [5] ENGENESS T, IBANESCU M, JOHNSON S, *et al.* Dispersion tailoring and compensation by modal interactions in OmniGuide fibers[J]. *Optics Express*, 2003, **11**(10): 1175-1196.
- [6] FEVRIER S, JAMIER R, BLONDY J M, *et al.* Low-loss singlemode large mode area all-silica photonic bandgap fiber [J]. *Optics Express* 2006, **14**(2): 562-569.
- [7] TEODORO F D, HEMMAT M K, MORAIS J, *et al.* High peak power operation of a 100 μm -core Yb-doped rod-type photonic crystal fiber amplifier [C]. *SPIE*, 2010, **7580**: 758006.
- [8] SAITOH K, TSUCHIDA Y, ROSA L, *et al.* Design of all-solid leakage channel fibers with large mode area and low bending loss[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(6): 4913-4919.
- [9] FEVRIER S, GAPONOV D D, ROY P, *et al.* High-power photonic-bandgap fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(9): 989-991.
- [10] LECAPLAIN C, HIDEUR A, FEVRIER S, *et al.* Mode-locked Yb-doped Bragg fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(18): 2879-2881.
- [11] CHEN X, LI M J, KOH J, *et al.* Effects of bending on the performance of hole-assisted single polarization fibers[J]. *Optics Express* 2007, **15**(17): 10629-10636.
- [12] YAN P G, ZHAO J, RUAN S C, *et al.* Drawing an ultra-low loss all-solid photonic bandgap fiber for ytterbium ASE suppression[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2010, **52**(12): 2629-2632.

Low-loss Large Mode Area Bragg Fiber with a W-shape Core

YAN Pei-guang¹, ZHAO Jian¹, GUO Chun-yu¹, ZHAO Jun-qing¹, SHU Jie¹,
RUAN Shuang-chen¹, LI Xiang², CHEN Sheng-ping²

(1 College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

(2 College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The influence of Bragg fiber design parameters on photonic bandgap was discussed via the finite element method. The theoretical results show that the bandgap move to long wavelength when the thickness or the refractive index of the Ge-doped layers increases. A novel W-shape-core Bragg fiber was firstly proposed by introducing a F-doped low index layer adjacent of fiber core. The calculation demonstrates the W-shape-core Bragg fiber can reduce the confinement loss and improve the bending-resistant ability effectively. A W-shape-core Bragg fiber was designed with a core diameter of 30 μm , which has a loss of 0.1 dB/km at wavelength of 1.06 μm and is proved single mode propagation theoretically.

Key words: Bragg Fiber(BF); Large mode area; Anti-Resonance Reflecting Optical Waveguide(ARROW)