

1550 nm低损耗单模全固态光子带隙光纤研究*

程兰 罗兴 韦会峰 李海清 彭景刚 戴能利 李进延†

(武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

(2013年10月10日收到; 2013年11月26日收到修改稿)

全固态光子带隙光纤由于其独特的带隙和色散特性以及易于和传统光纤熔接的优势, 引起了国内外研究人员的广泛关注. 本文采用等离子体化学气相沉积工艺结合堆叠拉制法制备了全固态光子带隙光纤, 并运用频域有限差分法模拟了其损耗和色散特性. 该光纤 1550 nm 处有较低损耗且单模传输, 计算得到 1550 nm 处的有效模场面积和色散分别为 $191.81 \mu\text{m}^2$ 和 $16.418 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, 在测试范围 1500—1650 nm 内损耗小于 0.15 dB/m. 结合实验结果, 对光纤参数做了进一步模拟优化.

关键词: 全固态光子带隙光纤, 光子带隙, 损耗

PACS: 42.70.Qs, 42.81.Cn, 42.81.Dp

DOI: 10.7498/aps.63.074210

1 引言

全固态光子带隙光纤^[1](all-solid photonic bandgap fibers, ASPBFs)以其独特的光学和结构特点成为研究热点. 典型的全固态光子带隙光纤由高折射率棒嵌入到均匀背景材料中构成, 纤芯为周期结构中心缺陷^[2]. 由于其不含空气孔或存在少量空气孔, 具有容易拉制并进行结构参数精确控制的特点. 相比空芯光子带隙光纤^[3], ASPBFs 避免了表面模^[4]的存在、易于与传统光纤熔接、容易实现增益掺杂. 目前 ASPBFs 已用于激光器、放大器^[5-8]以及光纤光栅^[9-13]等领域中. 利用 ASPBFs 特有的带隙和带隙内色散特性, 可根据实际应用需要产生特定波长范围内的超连续谱输出^[14-16].

早期对全固态光子带隙光纤的研究显示, 虽然高阶带隙相对于低阶带隙有较低的限制性损耗, 但高阶带隙弯曲损耗比较大, 对变形比较敏感, 窄化传输窗口^[17]. 由于低阶带隙具有相对较大的带隙宽度, 因此设计具有低的限制性损耗和弯曲损耗且工作在低阶带隙的全固态光子带隙光纤具有极大

的研究意义.

本文制备了第一带隙中心在 1600 nm 的全固带隙光纤, 从模拟计算和实验测试两方面研究了光纤的性能. 结合工艺的可行性, 通过理论模拟对光纤参数进行了优化, 为 1550 nm 低损耗、宽带宽单模全固态光子带隙光纤制备提供了实验和理论依据.

2 光纤的制备与性能

采用等离子体化学气相沉积工艺 (Plasma Chemistry Vapor Deposition) 制备高掺锗预制棒. 折射率分布如图 1, 其折射率分布为渐变型, 掺杂区相对纯硅背景的最大折射率差为 0.0367, 掺杂区直径与整个预制棒直径的比值为 0.34. 在拉丝塔上拉成 1 mm 左右的毛细玻璃棒^[18], 将毛细玻璃棒堆积成六边形, 中心棒用纯二氧化硅玻璃棒代替, 之后套上套管在拉丝塔上拉丝、涂覆得到 ASPBF^[19].

图 2 为光纤的电子显微镜图, 光纤包层由五层高折射率棒组成, 外径为 $125 \mu\text{m}$, 在光纤拉制过程中高折射棒直径与高折射率棒之间间距的比值 d/A 与掺杂预制棒的占空比近似保持不变, 即为

* 国家自然科学基金 (批准号: 81100701) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lgy@mail.hust.edu.cn

0.34, 从电子显微镜图读出高折射率棒之间的间距 Λ 为 $8.87 \mu\text{m}$, 与预计的尺寸基本一致.

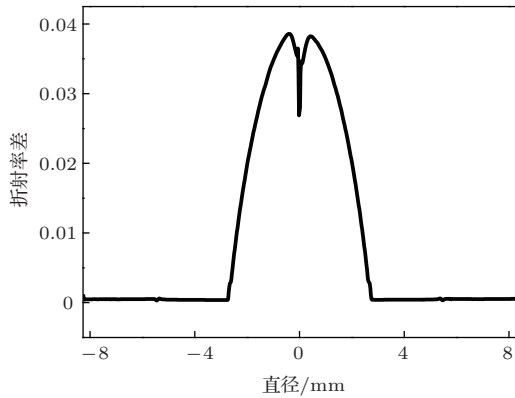


图1 预制棒折射率剖面

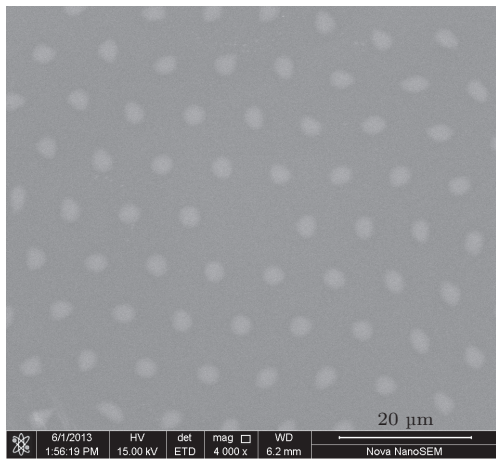


图2 ASPBF 的电镜扫描图

2.1 光纤特性模拟

利用频域有限差分^[20,21] (finite-difference frequency-domain, FDFD) 法结合完美匹配层^[22] (perfectly matched layer, PML) 边界对光纤进行模拟. 取背景折射率 1.457, 为了简化计算用阶跃折射率剖面代替渐变折射率剖面, 掺杂区与背景材料的折射率差 Δn 取 2.4%, 其他参数与制备的光纤一致, 计算得到光纤的复有效折射率和光纤的模场图. 依据复有效折射率的实部 (n_{effcore}^i) 与波导色散的关系为

$$D_w = -\frac{\lambda}{c} \times \frac{\partial^2 n_{\text{effcore}}}{\partial^2 \lambda}, \quad (1)$$

可以计算出波导色散, 将光子晶体光纤的总色散 D 写成材料色散 D_m 和波导色散 D_w 两部分^[23]:

$$D = D_w + D_m. \quad (2)$$

对于熔石英光子晶体光纤而言, 材料色散 D_m 由 Sellmeier 公式^[24] 来求, 即通过 (2) 式可以求出光纤的总色散. 依据复有效折射率虚部 (n_{effcore}^i) 与限制损耗 (CL) 的关系^[25] 为

$$\text{CL}(\text{dB/km}) = \frac{2 \times \pi \times 8.686 \times 1000 \times n_{\text{effcore}}^i}{\lambda}, \quad (3)$$

可以计算出限制损耗, (3) 式中 λ 的单位是 m.

全固态光子带隙光纤的导光机理一般用反谐振反射式光波导 (anti-resonant reflecting optical waveguide, ARROW) 模型^[26] 来解释. 该模型表明: 当在某一波长处包层高折射率棒支持新的模式, 在该波长处光纤有较大的传输损耗. 因此可以通过计算光纤中高折射率棒的截止波长近似计算全固态光子带隙光纤的带隙位置, 计算得到本文中光纤包层高折射率棒线偏振 LP 模式截止波长^[2] 如表 1. 从表 1 可以看出前三个带隙波长范围分别为 $[1293 \text{ nm}; \infty]$, $[790 \text{ nm}; 1293 \text{ nm}]$ 和 $[590 \text{ nm}; 750 \text{ nm}]$.

表 1 高折射率棒截止模式 (l 和 m 分别为角向和径向模式标号)

模式 l, m	模群 $2m + l$	截止波长/nm
0, 1	2	∞
1, 1	3	1293
0, 2	4	790
2, 1	4	750
3, 1	5	590

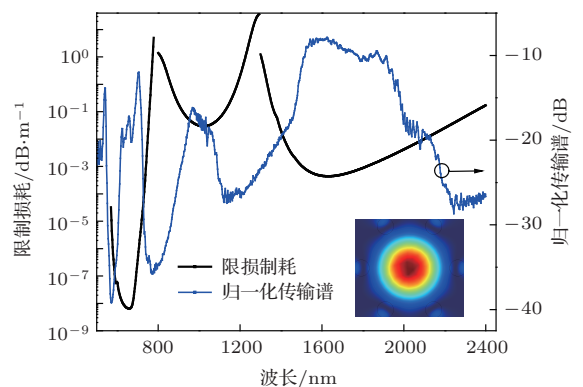


图3 (网刊彩色) 计算得到的限制损耗和 20 mASPBF 的归一化传输谱 (插图为 1550 nm 处基模 HE_{11} 的模场分布图)

模拟前三个带隙的特性发现第一带隙和第二带隙只能限制住基模 HE_{11} , 第三带隙除了限制住基模以外还可以限制住二次模. 光纤基模的限制损耗如图 3 中黑线所示, 前三个带隙的低损耗峰分别

在 1630, 1020 和 660 nm 附近, 1296 和 790 nm 附近第一、二带隙截止, 该结果与利用反谐振反射式光波导模型近似计算的带隙边界一致. 1550 nm 处基模 HE_{11} 的模场分布如图 3 插图, 虽然有部分光进入了纤芯周围的六个高折射棒中, 但绝大部分的光还是被限制在低折射纤芯中, 计算得到其有效模场面积为 $191.81 \mu\text{m}^2$. 660 nm 处的二次模的模场分

布和横电场图如图 4 其中 (a), (b), (c), (d) 为模场图, (e), (f), (g), (h) 分别为 (a), (b), (c), (d) 所对应的横电场图, 计算得到光纤模式与文献 [27, 28] 中略有区别, 只能从 (e), (f) 判断出 (a), (b) 分别对应着 TE_{01} 模和 HE_{21} 模, 而从 (g), (h) 不能判断出 (c), (d) 分别为何种模式, 我们猜测原因是模式进行了重新组合.

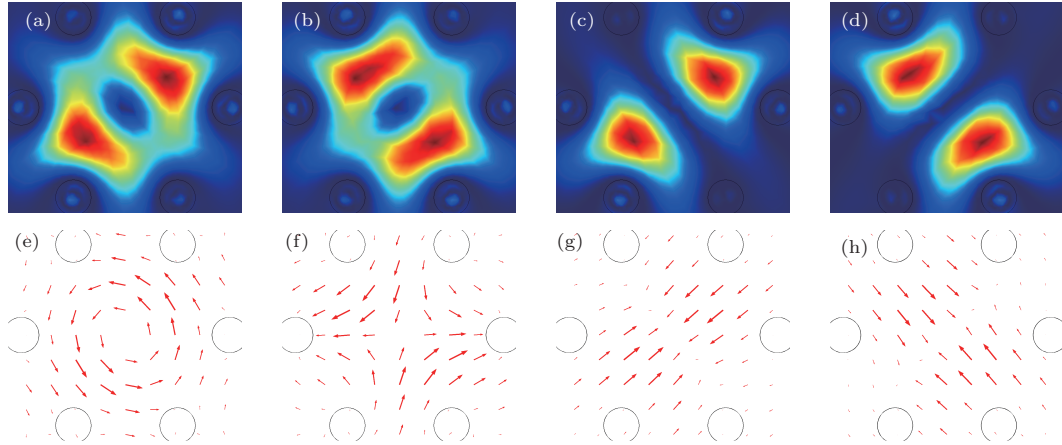


图 4 (网刊彩色) 660 nm 处 LP_{11} 模场分布和横电场图 (上排为模式图, 下排为上排对应的横电场图)

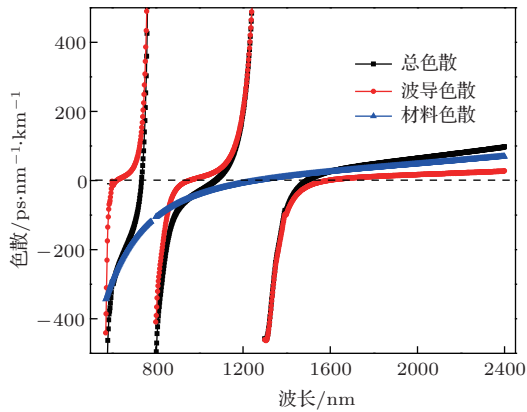


图 5 (网刊彩色) 色散图 (黑线表示总色散, 红线表示波导色散, 蓝线表示材料色散)

光纤的色散如图 5 所示, 在带隙的边缘有效折射率变化很快, 因此在每个带隙的短波边会出现极大的正常波导色散, 而长波边会出现极大的反常波导色散. 石英材料零色散点 $1.27 \mu\text{m}$, 靠近第二带隙的长波边, 第一带隙材料色散为反常色散, 第三带隙材料色散为正常色散, 加上材料色散使得第一带隙总色散的零色散点相对于波导色散向短波方向移动, 第二、第三带隙总色散的零色散点相对于波导色散向长波方向移动. 三个带隙总色散的零色散点分别为 735, 1074 和 1494 nm, 在 1550 nm 处光纤的总色散为 $16.418 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$.

2.2 光纤测试

我们使用光子晶体光纤宽带超连续光源, 测试了 ASPBF 的传输谱, 测试光纤长度为 20 m. 为了去掉高折射率棒中的包层模式, 在测试光纤的两端都熔接了 0.5 m 的单模光纤, 输出端通过光谱仪进行数据采集, 光谱仪采集数据的步长为 2 nm. 将测试传输谱和模拟的损耗谱进行对比, 归一化传输谱如图 3 蓝线所示, 从 500 到 2400 nm 波长范围内在 660, 1000 和 1600 nm 附近存在有三个明显的传输带, 1600 nm 处的传输带比较宽, 直到 1530 nm 还能保持高效的传输, 模拟和测试结果相当符合.

为了进一步研究 1550 nm 附近的传输性能, 采用截短法测试 100m 光纤的损耗谱如图 6. 在测试范围 1500—1650 nm 内损耗小于 0.15 dB/m, 损耗随波长增加呈减小趋势损耗的进一步减小可以通过改进制作工艺, 如增加酸洗和烘干等工艺, 从而减少杂质吸收, 在制作预制棒时尽量选取外径一致的玻璃棒, 以避免光纤结构缺陷带来本征损耗. 在测试范围 1500—1650 nm, 光纤绕一圈 (弯曲半径 10 mm), 引起的宏弯附加损耗小于 0.1 dB, 和常规通讯光纤相当, 可见光纤的抗弯曲的性能比较好.

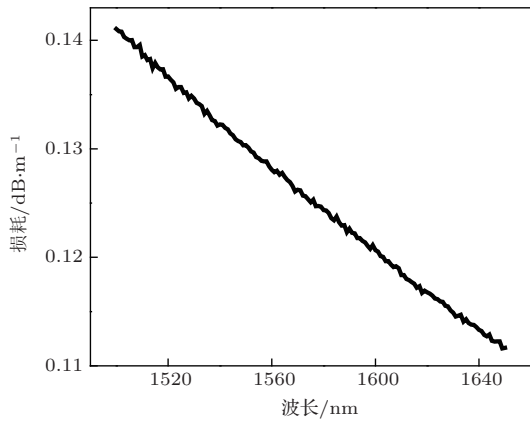


图6 1550 nm附近的损耗谱

3 光纤参数优化

ASPBFs带隙的宽带和位置不随高折射率棒层数的变化而变化, 光纤损耗随着层数的增加而减小[29]. 计算得到当高折射棒层数增加到六层和七层(其他参数与前面的模拟一致)时第一带隙的限制损耗如图7, 对比包层只有五层高折射率棒时的计算结果, 可以看出当包层层数增加时限制损耗显著减小, 当高折射棒层数增加到六层或者七层时, 带隙的低损耗峰附近600 nm的范围内损耗比五层时的损耗4%和0.24%小. 由于增加高折射棒的层数基本上不会增加制作工艺的难度, 采用这种方式能有效的降低光纤损耗.

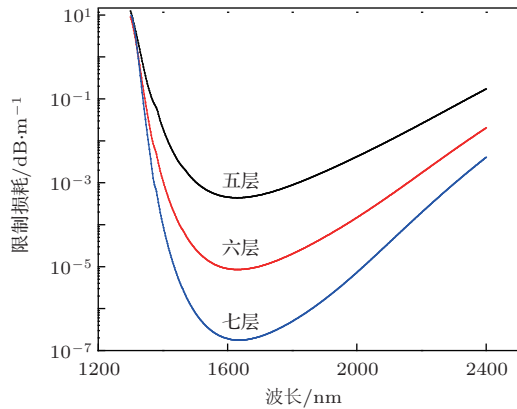


图7 (网刊彩色) 高折射率棒层数不同时的限制损耗

ASPBFs的带隙位置由高折射率棒性质决定, 增加高折射棒的折射率和尺寸都会使带隙红移[30]. 为了使光纤的带隙中心更接近1550 nm, 可以降低高折射率棒的折射率或者减小高折射棒的尺寸. 考虑到光纤拉丝过程中尺寸的控制比预制棒制作过

程折射率分布的控制要容易, 采用了减小高折射率棒的尺寸的方法. 计算得到微调高折射率棒直径时限制损耗的变化(图8) 计算时采用两种材料的折射率和高折射率棒之间的间距与前面的计算过程一致, 高折射率棒层数取五层, 高折率棒直径分别为3.02, 2.96, 2.90和2.83 μm 其中3.02 μm 是开始计算光纤特性时的参数. 虽然高折射率棒直径变小会使光纤的纤芯相对变大, 但模拟过程中光纤在第一带隙始终保持基模传输, 可以看出随着高折率棒直径的减小, 低损耗中心移向短波边, 低损耗中心的损耗减小. 当高折射棒直径取2.83 μm 时, 低损耗中心在1550 nm.

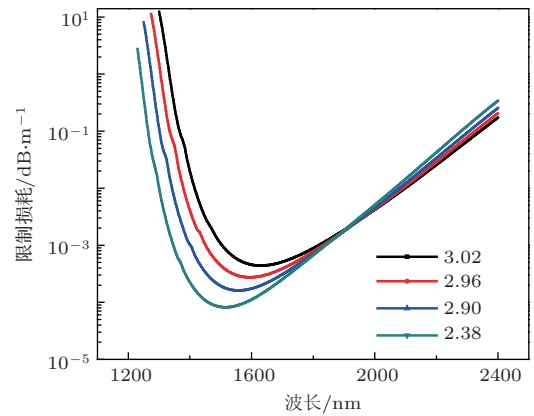


图8 (网刊彩色) 高折射率棒直径不同时的限制损耗

4 结论

本文制作了第一带隙中心在1600 nm附近的全固带隙光纤, 模拟计算和实验测试结果都表明该光纤在1550 nm处损耗比较低, 在第一带隙该光纤只能传输基模, 1550 nm处的有效模场面积和色散分别为191.81 μm^2 和16.418 ps/(km·nm), 模场面积比通讯单模光纤大, 色散相当根据模拟计算结果对结构参数参数进行优化, 增加高折射棒层数到六层或者七层, 其带隙中心损耗分别低于五层的4%和0.24%, 当掺杂区与背景材料的折射率差 Δn 为2.4%时, 为了使光纤第一带隙中心在1550 nm处, 高折射率棒的直径应取2.83 μm . 本文的研究结果对设计和制备不同波长带隙中心的全固态光子带隙光纤具有重要的参考意义.

感谢长飞光纤光缆公司和西安光机所在相关测试上面提供的帮助.

参考文献

- [1] Luan F, George A K, Hedley T D, Pearce G J, Bird D M, Knight J C, Russell P S J 2004 *Opt. Lett.* **29** 2369
- [2] Bouwmans G, Bigot L, Quiquempois Y, Lopez F, Provino L, Douay M 2005 *Opt. Express* **13** 8452
- [3] Mi Y, Hou L T, Zhou G Y, Wang K, Chen C, Gao F, Liu B W, Hu M L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3583 (in Chinese)[米艳, 侯蓝田, 周桂耀, 王康, 陈超, 高飞, 刘博文, 胡明列 2008 物理学报 **57** 3583]
- [4] Cheng S F, Peng J G, Li J Y, Cheng L, Jiang Z W, Li H Q, Dai N L, Jiang F G, Yang X B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244207 (in Chinese)[程胜飞, 彭景刚, 李进延, 程兰, 蒋作文, 李海清, 戴能利, 姜发刚, 杨晓波 2012 物理学报 **61** 244207]
- [5] Olausson C B, Shirakawa A, Chen M, Lyngsø J K, Broeng J, Hansen K P, Bjarklev A, Ueda K 2010 *Opt. Express* **18** 16345
- [6] Fan X, Chen M, Shirakawa A, Ueda K, Olausson C B, Lyngsø J K, Broeng J 2012 *Opt. Express* **20** 14471
- [7] Février S, Gaponov D D, Roy P, Likhachev M E, Semjonov S L, Bubnov M M, Dianov E M, Yashkov M Y, Khopin V F, Salganskii M Y 2008 *Opt. Lett.* **33** 989
- [8] Liu X, Lægsgaard J, Turchinovich D 2010 *Opt. Lett.* **35** 913
- [9] Jin L, Wang Z, Fang Q, Liu B, Liu Y G, Kai G Y, Dong X Y, Guan B O 2007 *Opt. Lett.* **32** 2717
- [10] Lee H W, Chiang K S 2009 *Opt. Express* **17** 4533
- [11] Sun Z L, Liu Y G, Wang Z, Tai B Y, Han T T, Liu B, Cui W T, Wei H F, Tong W J 2011 *Opt. Express* **19** 12913
- [12] Jin L, Wang Z, Fang Q, Liu Y G, Liu B, Kai G Y, Dong X Y 2007 *Opt. Express* **15** 15555
- [13] Jin L, Wang Z, Liu Y G, Kai G Y, Dong X Y 2008 *Opt. Express* **16** 21119
- [14] Bétourné A, Kudlinski A, Bouwmans G, Vanvincq O, Mussot A, Quiquempois Y 2009 *Opt. Lett.* **34** 3083
- [15] Kibler B, Martynkien T, Szpulak M, Finot C, Fatome J, Wojcik J, Urbanczyk W, Wabnitz S 2009 *Opt. Express* **17** 10393
- [16] Vanvincq O, Barviau B, Mussot A, Bouwmans G, Quiquempois Y, Kudlinski A 2010 *Opt. Express* **18** 24352
- [17] Ren G B, Shum P, Zhang L R, Yan M, Yu X, Tong W J, Luo J 2006 *IEEE Photonic Tech. L* **18** 2560
- [18] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4724 (in Chinese)[郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷, 简水生 2009 物理学报 **58** 4724]
- [19] Guo T Y, Lou S Q, Li H L, Jian S S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 6038 (in Chinese)[郭铁英, 娄淑琴, 李宏雷, 简水生 2009 物理学报 **58** 6038]
- [20] Zhu Z M, Brown T 2002 *Opt. Express* **10** 853
- [21] Guo S P, Wu F, Albin S, Tai H, Rogowski R 2004 *Opt. Express* **12** 3341
- [22] Margengo E A, Rappaport C M, Miller E L 1999 *IEEE Trans. Magn.* **35** 1506
- [23] Ferrando A, Silvestre E, Andres P, Miret J J, Andres M V 2001 *Opt. Express* **9** 687
- [24] Malitson I H 1965 *JOSA* **55** 1205
- [25] Chen X, Li M J, Koh J, Artuso A, Nolan D A 2007 *Opt. Express* **15** 10629
- [26] Litchinitser N M, Dunn S C, Usner B, Eggleton B J, White T P, Mcphedran R C, de Sterke C M 2003 *Opt. Express* **11** 1243
- [27] Xing W Q, Bai J X, Li Y F 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 821
- [28] Ren G B, Wang Z, Lou S Q, Jian S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1856 (in Chinese)[任国斌, 王智, 娄淑琴, 简水生 2004 物理学报 **53** 1856]
- [29] White T P, Mcphedran R C, Martijnde Sterke C, Litchinitser N M, Eggleton B J 2002 *Opt. Lett.* **27** 1977
- [30] Tan X L 2009 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [谭晓玲 2009 博士学位论文 (天津: 天津大学)]

Study of 1550 nm low loss single mode all-solid photonic bandgap fibers*

Cheng Lan Luo Xing Wei Hui-Feng Li Hai-Qing Peng Jing-Gang
Dai Neng-Li Li Jin-Yan[†]

(*Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074, China*)

(Received 10 October 2013; revised manuscript received 26 November 2013)

Abstract

All-solid photonic bandgap fiber shave attracted great attention of researchers due to their particular band gap and dispersion character as well as the merit of easily splicing the traditional optical fiber. We have fabricated the all-solid photonic bandgap fibers using the plasma chemical vapor deposition (PCVD) and a modified tack and draw technique, and the loss and dispersion characteristics were simulated by the finite-difference frequency-domain (FDFD) method. The fiber obtained by this method has a low-loss region at around 1550 nm and can be used as single-mode; its effective model field area and the dispersion of the fiber at 1550 nm are $191.81 \mu\text{m}^2$ and $16.418 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm})$, respectively. Combined with the experimental results, the fiber parameters are further optimized by simulation.

Keywords: all-solid photonic bandgap fibers, photonic band gap, loss

PACS: 42.70.Qs, 42.81.Cn, 42.81.Dp

DOI: [10.7498/aps.63.074210](https://doi.org/10.7498/aps.63.074210)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 81100701).

[†] Corresponding author. E-mail: l jy@mail.hust.edu.cn