

一种带葡萄柚空气孔的高双折射 ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF 光子准晶光纤*

苏伟 姜淑琴† 邹辉 韩博琳

(北京交通大学电子与信息工程学院, 北京 100044)

(2014年1月6日收到; 2014年2月25日收到修改稿)

提出了一种具有二重对称性的 ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF (ZBLAN) 氟化物玻璃基的光子准晶光纤. 光纤结构是以 ZBLAN 氟化物玻璃为背景材料, 外包层由圆形空气孔以正方形与正三角形分布组成的基本单元构成, 在芯区两侧引入两个对称的葡萄柚空气孔, 以增加光纤的双折射. 应用全矢量有限元法, 研究了光纤的双折射和限制损耗特性与结构参数的关系. 通过优化光纤结构参数, 在 1800—2200 nm 的波长范围内获得了具有单模传输特性的高双折射光纤, 其模式双折射高达 10^{-2} , 比普通保偏光纤高出两个数量级, 与目前报道的采用椭圆空气孔微结构光纤获得的高双折射具有同样的量级. 但与具有椭圆空气孔微结构光纤相比, 提出的光纤结构更易于制作. 研究结果为开辟 2 μm 波段光器件的研究做出了有益的探索.

关键词: 光子准晶光纤, ZBLAN 玻璃, 高双折射, 葡萄柚空气孔

PACS: 42.81.Gs, 81.05.Pj, 78.20.Fm

DOI: 10.7498/aps.63.144202

1 引言

光子准晶光纤 (photonic quasicrystal fiber, PQF) 是在光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 的基础上发展起来的. 自 1996 年第一根光子晶体光纤问世以来, 光子晶体光纤以其独特的特性引起研究者的广泛关注, 各种新型光子晶体光纤陆续出现, 各种新的应用也陆续展开. 然而, 光子准晶光纤的研究却是刚刚兴起. 早在 20 世纪 80 年代中期, Shechtman 等^[1] 在检测急速冷却凝固的 Al-Mn 合金时, 首次发现了准晶体结构. 通过研究这种结构的对称性得知, 其格点的排列具有旋转对称性和长程指向性, 但没有平移周期性的晶体, 人们把它称为准晶体. 这种结构很快就被用于光学领域, 发明了光子准晶体. 光子准晶光纤是把光子准晶体的概念引入到光纤中^[2]. 光子准晶光纤的横截面的空气孔的排列呈二维准晶体结构, 最基本单元有一个正方形和正三角形组成, 而不同于传统光子晶体光

纤的周期排列结构. 虽然近年来关于光子准晶光纤的研究刚刚起步, 但近期的研究成果表明, 准晶体结构光纤具有普通光纤和传统光子晶体光纤所不具备的一些优良传输特性, 比如, 对单模操作具有较大的截止孔径比^[2]、近零的超平坦色散^[2]、两个低损耗波导的光子带隙^[3]、较大的负色散^[4,5]、较大的模场面积等^[6].

目前报道的高双折射光纤主要集中于光子晶体光纤, 所采用的背景材料大都是纯二氧化硅背景材料, 波长均集中于通讯波段^[7-12]. 见诸报道的有通过椭圆孔实现高双折射, 其高双折射数值上虽然高达 10^{-2} , 但制作难度高. 至今未有采用纯二氧化硅作为背景材料实现椭圆形空气孔光子晶体光纤的报道. 而对于葡萄柚型空气孔, 文献中已经有实验成功制作出具有此结构空气孔的光纤且已经实现商业化^[13,14]. 因此, 在本文提出的光纤结构中, 在纤芯两侧引入两个葡萄柚型空气孔来提高光纤的模式双折射在制作技术上是可行的.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61177082, 61205074) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4122063) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

由于石英材料熔点较高, 因此, 基于石英基的微结构光纤主要采用管束堆积法进行制作, 然而利用管束堆积法很难制作出石英基光子准晶光纤. ZBLAN ($\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$) 玻璃是一种重金属氟化物玻璃, 是氟化物玻璃中少数能拉制成光纤的、最稳定的一种, 有相对较好的机械强度, 在紫外、可见光、红外都有很高的透过率^[15-18], 而石英材料在大于 $2\ \mu\text{m}$ 波段的吸收损耗比 ZBLAN 玻璃要高得多^[15,19]. 近年来, 随着掺铥光纤激光器的输出功率不断提高, 成为继掺镱光纤激光器后光纤激光器中备受关注的新成员. 由于掺铥光纤的发射谱覆盖 $1.5\text{--}2.2\ \mu\text{m}$ 波长段, 涵盖两个大气窗口和一个水强吸收带, 位于眼安全区, 在军事、医疗、无线光通信、工业等领域应用前景广泛. 但 $2\ \mu\text{m}$ 光波段器件的发展相对滞后, 迫切需要研制 $2\ \mu\text{m}$ 波段的新颖光纤及器件. 由于 ZBLAN 玻璃在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的损耗比石英要低得多, 因此基于 ZBLAN 玻璃研发新型光纤及器件具有重要的意义.

本文针对 $2\ \mu\text{m}$ 波段的应用需求, 提出了一种基于 ZBLAN 玻璃的高双折射光子准晶光纤, 该光纤可以在很宽的波长范围内 ($1800\text{--}2200\ \text{nm}$) 保持单模传输特性, 其模式折射率差高达 10^{-2} , 双折射数值远高于普通保偏光纤, 与文献中报道的用椭圆孔实现的高双折射的光子晶体光纤的值相当. 由于采用葡萄柚型空气孔和圆空气孔结构, 与椭圆空气孔结构相比, 光纤的制作难度明显降低.

2 光纤结构与理论基础

提出的高双折射光子准晶光纤结构截面如图 1 所示, 背景材料为 ZBLAN 氟化物玻璃, 外包层采用圆形空气孔, 空气孔的排列采用正方形和正三角形排列组合, 在芯区两侧引入两个对称的葡萄柚空气孔, 使光纤呈现出二重对称性, 以获得高的双折射. 包层中相邻圆形空气孔间隔为 Λ , 圆形空气孔的孔径为 d , 中心缺失一个空气孔形成纤芯, 在纤芯两侧对称分布着两个葡萄柚形空气孔. 葡萄柚形空气孔为上下对称而左右不对称的类椭圆形, 每个葡萄柚空气孔是由一段半圆圆弧和一段二次贝塞尔曲线组成, 通过控制贝塞尔曲线和半圆的直径, 可以获得不同的葡萄柚形空气孔^[20]. 葡萄柚空气孔上下对称轴为线段 Q_1Q_2 , 端点 Q_2 为贝塞尔曲线的中心点, 该中心点临近纤芯. 半圆的直径为线段 P_1P_3 , 长度为 d_1 . 线段 P_1P_3 与线段 Q_1Q_2 垂直

相交于 O 点. 图 2 示说明了葡萄柚形空气孔的形成过程. 贝塞尔曲线 $P_1Q_2P_3$ 和 $P_1Q'_2P_3$ 的控制点分别是 P_2 和 P'_2 , 改变控制点位置得到不同的贝塞尔曲线. 其中 O 点是半圆形部分的圆心, 且该点和邻近的圆形空气孔间隔也为 Λ .

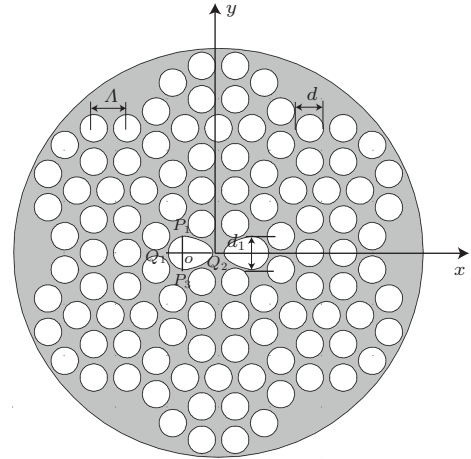


图 1 提出的光子准晶光纤的横截面示意图

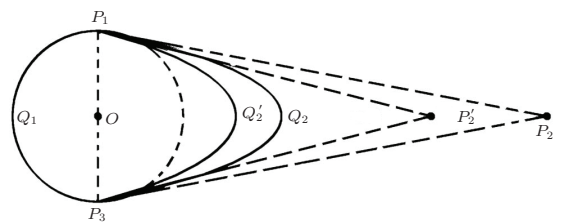


图 2 葡萄柚形空气孔的形成示意图

氟化物玻璃的材料折射率可由下列方程计算得到^[21,22]:

$$n_{\lambda}^2 - 1 = \frac{f_1 \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_1^2)} + \frac{f_2 \lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda_2^2)}, \quad (1)$$

其中 λ_1 和 λ_2 分别是紫外和红外本征吸收波长, f_1 和 f_2 为振子强度. 对于 ZBLAN 玻璃,

$$\lambda_1 = 0.08969\ \mu\text{m}, \quad \lambda_2 = 21.3825\ \mu\text{m},$$

$$f_1 = 1.22514, \quad f_2 = 1.52898.$$

模式双折射 B 是衡量光纤偏振特性的重要参数, 可表示为^[23]:

$$B = |\text{Re}(n_{\text{eff}}^y) - \text{Re}(n_{\text{eff}}^x)|, \quad (2)$$

其中, n_{eff}^x 和 n_{eff}^y 分别表示 x 偏振方向和 y 偏振方向基模的有效折射率, Re 表示实部.

通过模式有效折射率 n_{eff} 的虚部可以得到该模式所对应的光纤的限制损耗 (confinement loss,

CL)^[24,25] 为

$$\begin{aligned}
 CL &= \frac{20}{\ln 10} \text{Im}(\beta) \\
 &= \frac{20}{\ln 10} k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}) \text{dB/m}, \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中 $\kappa_0 = 2\pi/\lambda$ 表示自由空间的波数.

全矢量有限元方法具有计算精度高及光纤结构适应性等优点, 已经被广泛用到光子晶体光纤及光子准晶光纤的特性分析. 本文采用全矢量有限元分析方法, 结合完美匹配边界条件, 研究提出的光子准晶光纤的特性.

本文采用单模传输条件是依据模式损耗来分析, 通常在光纤中为了保证单模传输, 要求基模的损耗小于 0.1 dB/m, 二阶模的损耗大于 1 dB/m.

3 数值模拟与结果分析

在本文提出的光纤结构中, 光纤的结构参数的变化, 如圆形空气孔孔径 d 、葡萄柚形空气孔的大小、以及孔间距 Λ 的改变, 都将对光纤的双折射以及模式特性产生影响. 为了得到优化的光纤结构, 以获得高的双折射并保持单模运转特性, 本文重点研究了这些结构参数的改变对光纤的双折射及限制损耗的影响. 数值模拟中采用的初始参数为 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $d = 1.68 \mu\text{m}$, 线段 P_1P_3 的长度为 $1.8 \mu\text{m}$, 即 $d_1 = 1.8 \mu\text{m}$, 线段 Q_1Q_2 的长度为 $2.5 \mu\text{m}$, 包层空气孔和葡萄柚空气孔的占空比分别用 $f = d/\Lambda$ 和 $f_1 = d_1/\Lambda$ 表示. 在优化参数时, 调

节其中一个参数的大小, 固定其他结构参数, 考查该参数对结构的影响, 进而确定该参数一个统筹全局的最优值.

3.1 包层圆形空气孔对光纤特性的影响

当 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, 线段 Q_1Q_2 的长度为 $2.5 \mu\text{m}$, 线段 P_1P_3 的长度为 $1.8 \mu\text{m}$ 时, 改变包层圆形空气孔孔径, 研究不同占空比 $f = d/\Lambda$ 下光纤的双折射以及限制损耗的变化, 结果如图 3 所示. 由图 3(a) 可以看出, 随着 f 的增加, 模式双折射值增加, 这是由于随着包层圆形空气孔孔径的增加, 对传输模场的限制能力增强, 葡萄柚空气孔对模场的作用增强, 从而使双折射 B 的值增加. 图 3(b) 和 (c) 给出了不同 f 下的 x 和 y 偏振基模的模式损耗随波长变化关系. 可以看出, x 方向的基模损耗大于 y 方向的基模损耗, 这是因为葡萄柚空气孔对 x 偏振基模的模场的作用比对 y 偏振基模的模场强, 模场受到挤压后从孔间的高折射率背景材料向包层扩散, 导致 x 偏振基模的限制损耗增加. 图 4 给出了光子准晶光纤在 $2 \mu\text{m}$ 处的模场分布. 可以看出, 模场在 y 方向被很好地限制在芯区, 而 x 方向的模场有从芯区向包层扩散, 进而表现为 x 方向的基模损耗大于 y 方向的基模损耗; 双折射随着 f 的增加而增加, 而基模损耗随着 f 的增加而减小, 这有助于实现低限制损耗和高双折射特性. 综合双折射 B 的变化趋势、模式损耗的变化曲线以及实际设计尺寸的考虑, 选择 $f = 0.89$.

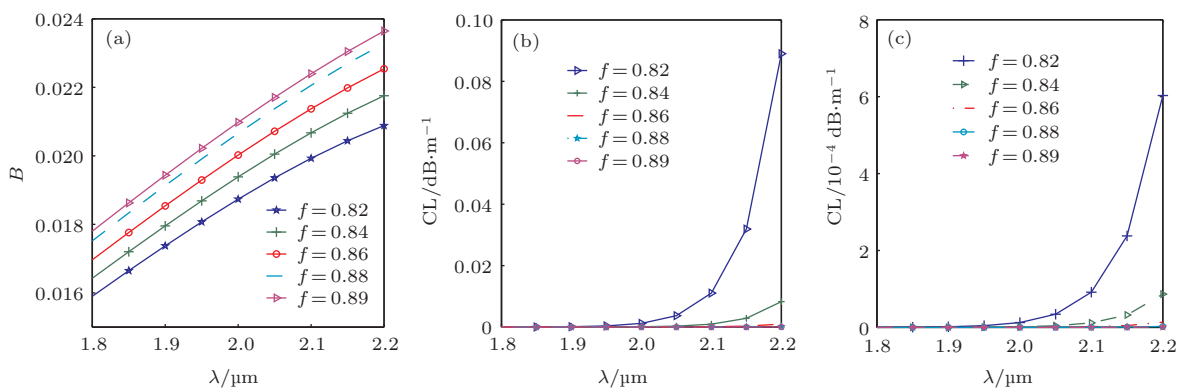


图 3 不同占空比 f 下光纤的双折射 (a), x 偏振基模 (b) 和 y 偏振基模 (c) 的限制损耗随波长的变化情况

3.2 葡萄柚空气孔对光纤特性的影响

接下来研究葡萄柚空气孔大小对光纤双折射以及损耗的影响. 首先研究半圆部分孔径的影响.

图 5(a) 给出了在结构参数为 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $f = 0.89$, $OQ_2 = 1.6 \mu\text{m}$ 时, 改变葡萄柚结构半圆部分的占空比 $f_1 = d_1/\Lambda$, 双折射与波长之间的关系. 可以看出, 随着葡萄柚半圆部分孔径的增大, 双折射值

增加. 图 5 (b) 和 (c) 给出了不同 f_1 下的 x 和 y 偏振基模的限制损耗随波长的变化关系. 和不同圆形空气孔孔径的模式损耗变化规律类似, x 偏振基模的限制损耗大于 y 偏振基模的限制损耗, 限制损耗随着 f_1 的增加而增加. 这主要是葡萄柚空气孔的增大加大了纤芯中模场的挤压, 使模场向包层扩散, 从而使模式的限制损耗增大. 由于双折射和基模的限制损耗均随着 f_1 的增加而增加, 不利于同时实现高双折射和低限制损耗特性. 综合双折射 B 的变化趋势, 模式损耗要求以及光纤截面实际设计尺寸的考虑, 选取 $f_1 = 0.9$. 最后考虑葡萄柚空气孔二次贝塞尔曲线构成的圆弧部分的影响. 这里定义葡萄柚空气孔的吊悬率 $e = OQ_2/OQ_1 = 2OQ_2/d_1$. 固定 $\Lambda = 2 \mu\text{m}$, $f = 0.89$ 及 $f_1 = 0.9$, 改变 OQ_2 的长度, 亦即改变吊悬率 e 的大小, 考察贝塞尔曲线圆弧部分的影响. 从图 6 (a) 可以看出, $e = 1.8$ 时双折射最大. 图 6 (b) 和 (c) 给出了不同吊悬率 e 对应的不同偏振态的限制损耗. 从图中可以看出, 限制损耗均随着 e 的增加而增加, x 偏振基模的损耗大于 y 偏振基模的损耗. 综合双折射 B 的变化趋势、基模限制损耗要求以及光纤截面实际设计尺寸考虑, 选择 $e = 1.8$, 此时对应的 $OQ_2 = 0.9d_1$.

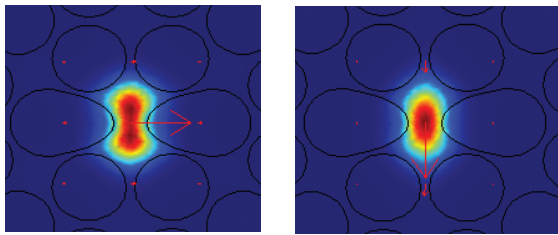


图 4 光子准晶光纤在 $2 \mu\text{m}$ 处的模场分布

3.3 孔距对光纤特性的影响

图 7 (a) 给出了在 $f = 0.89$, $f_1 = 0.9$, $e = 1.8$ 时, 孔间距 Λ 从 $1.8 \mu\text{m}$ 增加到 $2.2 \mu\text{m}$ 时, 双折射

随波长的变化曲线. 由图中可以看出, 双折射随着孔间距的增大而减小, 双折射效应随着波长增加而增加; 随着 Λ 的增大, 会导致纤芯面积变大, 从而使得模场与内层气孔的作用减弱, 双折射减小. 由图 7 (b) 和 (c) 可以看出, x 偏振方向的模式损耗远大于 y 偏振方向的偏振损耗, 模式损耗均随着孔间距的增大而减小. 此外, 随着波长的增加, 光场向包层延伸, 限制损耗增大. 当孔间距过小时, x 偏振方向的基模损耗过大, 有可能会被截止, 光纤进行单偏振模式传输. 双折射和基模损耗均随着 Λ 的增加而减小, 不利于同时实现高双折射和低限制损耗特性. 综合双折射 B 的变化规律和单模工作对基模损耗的要求, 选择 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$.

根据上述数值模拟的结果, 本文选取光子准晶光纤的一组最优结构参数:

$$\Lambda = 1.8 \mu\text{m}, \quad f = 0.89, \quad f_1 = 0.9, \quad e = 1.8,$$

此时 $OQ_2 = 0.9$, $d_1 = 0.81\Lambda$. 在该组结构参数下, 获得双折射、基模及二阶模随波长的变化情况如图 8 所示. 从图 8 可以看出, 在很宽的波长范围内 ($1800\text{--}2200 \text{ nm}$), 光纤的双折射值高达 10^{-2} 数量级, 该双折射值远高于普通保偏光纤, 且数值与文献中报道的用椭圆孔实现双折射取得的值相当^[9-12]. 但与椭圆孔微结构光纤相比, 提出的光子准晶光纤更易于制作. 限制损耗在两个偏振方向均小于 0.1 dB/m , 二阶模损耗在此波段均大于 1 dB/m , 满足单模传输条件. 尤其是在 $2 \mu\text{m}$ 波长处, 双折射 $B = 2.42 \times 10^{-2}$, 限制损耗在偏高的 x 偏振方向也低为 $2.24 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$. 据我们所知, 此双折射是有文献报道的在 $2 \mu\text{m}$ 波段的最大双折射值^[26]. 此光纤可用于制作相应的偏振器件和偏振相关应用, 填补了 $22 \mu\text{m}$ 光纤器件的空白.

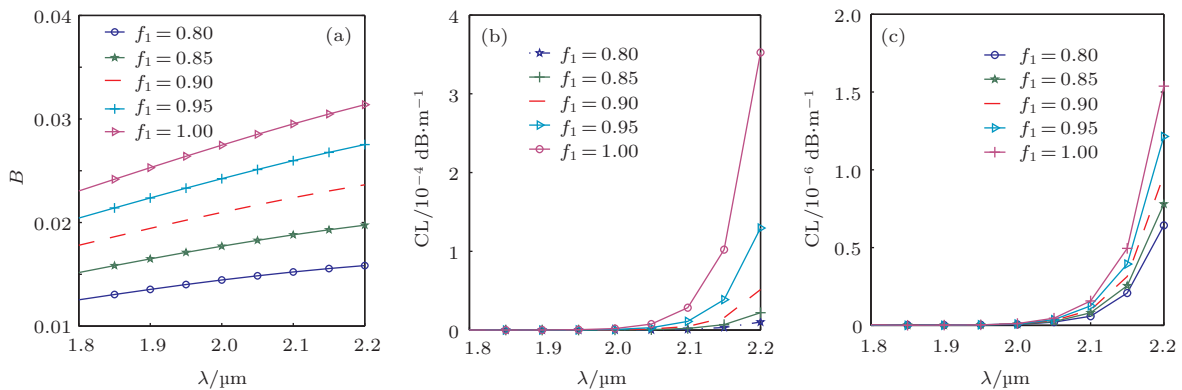


图 5 不同 f_1 下光纤的双折射 (a), x 偏振基模 (b) 和 y 偏振基模的限制损耗 (c) 随波长的变化情况

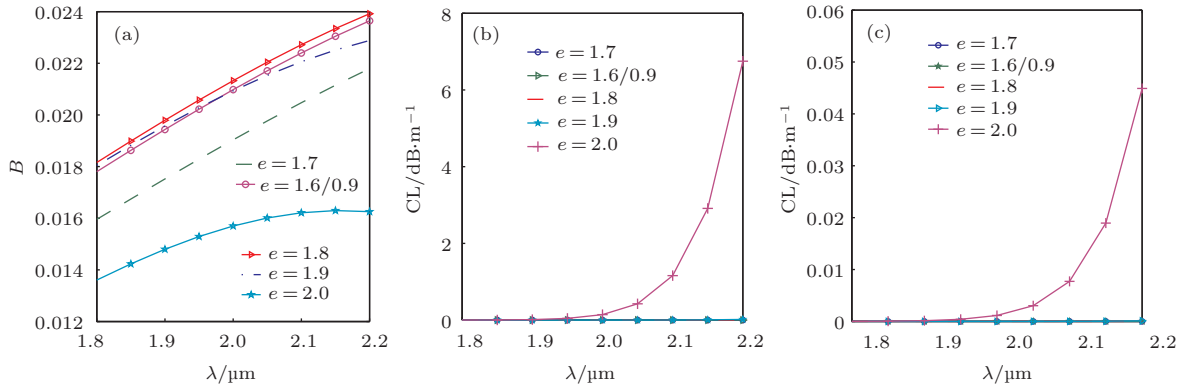


图6 不同 e 下光纤的双折射 (a), x 偏振基模 (b) 和 y 偏振基模的限制损耗 (c) 随波长的变化情况

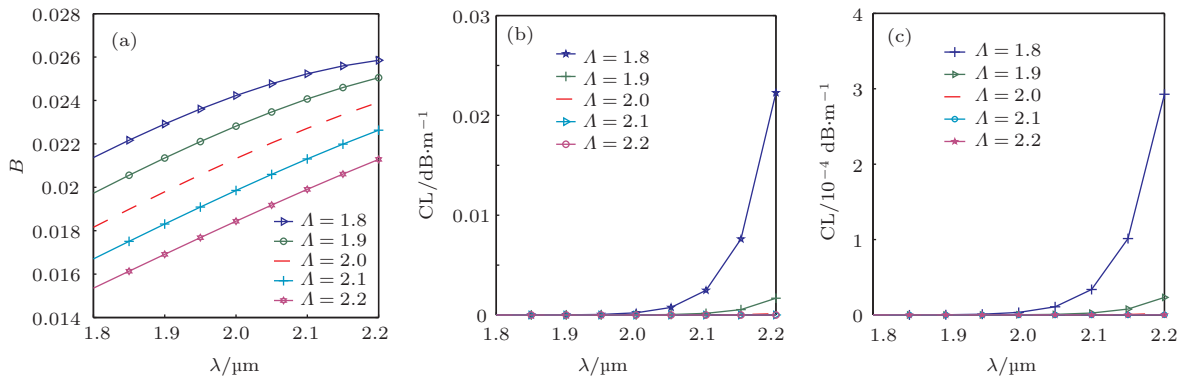


图7 不同孔间距下双折射 (a), x 偏振基模 (b) 和 y 偏振基模的限制损耗 (c) 随波长的变化情况

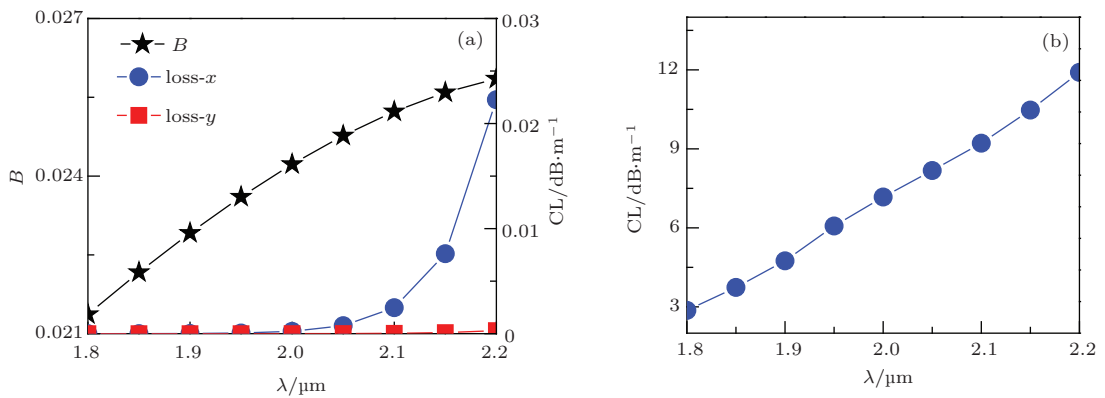


图8 双折射、 x 偏振方向的限制损耗和 y 偏振方向的限制损耗 (a) 和四个模式中最小的二阶模式损耗 (b) 随波长的变化, 其中 $\Lambda = 1.8 \mu\text{m}$, $f = 0.89$, $f_1 = 0.9$, $e = 1.8$

4 结 论

本文提出了一种 ZBLAN 氟化物玻璃基的光子准晶光纤, 外包层由圆形空气孔以正方形和正三角形分布组成的基本单元构成, 在芯区的两侧引入两个对称的类葡萄柚空气孔, 使光纤具有二重旋转对称性, 从而呈现出优异的双折射性能. 采用全矢量有限元方法研究了双折射和限制损耗特性. 改变不同的结构参数, 最后得到一组优化的结构参数. 该

光纤可以在很宽的波长范围内 (1800—2200 nm) 保持单模传输特性, 双折射为 10^{-2} 量级, 比普通保偏光纤高出两个数量级, 达到和椭圆孔微结构光纤一样的数量级, 但葡萄柚空气孔具有比椭圆形空气孔更容易实现的优良特点. 尤其是在 $2 \mu\text{m}$ 波长处, 此光纤的双折射 $B = 2.42 \times 10^{-2}$, 限制损耗在偏高的 x 偏振方向也低为 $2.24 \times 10^{-4} \text{ dB/m}$, 满足低损耗高双折射特性. 据我们所知, 此双折射是有文献报道的在 $22 \mu\text{m}$ 波段的最大双折射值. 此光纤可应用于制作保偏器件和偏振相关的应用.

参考文献

- [1] Shechtman D, Blech I, Gratias D, Cahn J W 1984 *Phys. Rev. Lett.* **53** 1951
- [2] Kim S, Kee C S, Lee J 2007 *Opt. Express* **15** 13221
- [3] Sun X, Hu D J J 2010 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **22** 607
- [4] Kim S, Kee C S 2009 *Opt. Express* **17** 15885
- [5] Sircilli F, Franco M A R, Eurocon S V A 2007 *The International Conference on "Computer as a Tool"*, War San, September 9–12, 2007 p1263
- [6] Sivabalan S, Raina J P 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 1139
- [7] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Wadsworth W J, Arriaga J, Mangan B J, Birks T A, Russell P S J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1325
- [8] Asiful Islam M, Shah Alam M 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3545
- [9] Kim S E, Kim B H, Lee C G, Lee S, Oh K, Kee C S 2012 *Opt. Express* **20** 1385
- [10] Liang W B, Liu N L, Li Z H, Lu P X 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 3381
- [11] Cao Y, Li R M, Tong Z R 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084215 (in Chinese) [曹晔, 李荣敏, 童峥嵘 2013 物理学报 **62** 084215]
- [12] Li D M, Zhou G Y, Xia C M, Wang C, Yuan J H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 044209
- [13] Wang Y T, Cai H W, Qu R H, Fang Z J, Marin E, Meunier J P 2008 *Appl. Opt.* **47** 3543
- [14] Wu C, Guan B O, Wang Z, Feng X H 2010 *J. Lightwave Technol.* **28** 1392
- [15] Swiderski J, Michalska M, Maze G 2013 *Opt. Express* **21** 7851
- [16] Yang W Q, Zhang B, Yin K, Zhou X F, Hou J 2013 *Opt. Express* **21** 19732
- [17] Qin G S, Huang S H, Feng Y, Shirakawa A, Ueda K I 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1818
- [18] Ramsay J, Dupont S, Johansen M, Rishøj L, Rottwitt K, Moselund P M, Keiding S R 2013 *Opt. Express* **21** 10764
- [19] Lambin-Iezzi V, Loranger S, Saad M, Kashyap R 2013 *J. Non-Cryst. Solids* **359** 65
- [20] Farin G 1997 *Curves and Surfaces for Computer-Aided Geometric Design* (4th Ed.) (San Diego: Elsevier)
- [21] Gan F X 1995 *J. Non-Cryst. Solids* **184** 9
- [22] Zhang L P, Gan F X, Wang P 1994 *Appl. Opt.* **33** 50
- [23] Yue Y, Kai G, Wang Z, Sun T, Jin L, Lu Y, Zhang C, Liu J, Li Y, Liu Y, Yuan S, Dong X 2007 *Opt. Lett.* **32** 469
- [24] Mortensen N A 2002 *Opt. Express* **10** 341
- [25] Kaneshima K, Namihira Y, Zou N, Higa H, Nagata Y 2006 *IEICE Trans. Electron.* **E89-C** 830
- [26] Su W, Lou S Q, Zou H, Han B L 2014 *Infrared Phys. Technol.* **63** 62s

Highly birefringent $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ photonic quasi-crystal fiber with twin grapefruits holes*

Su Wei Lou Shu-Qin[†] Zou Hui Han Bo-Lin

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

(Received 6 January 2014; revised manuscript received 25 February 2014)

Abstract

A novel design of highly birefringent photonic quasi-crystal fiber based on $\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2\text{-LaF}_3\text{-AlF}_3\text{-NaF}$ glass with twin grapefruit air holes near the core and twofold symmetry is proposed. The basic unit is composed of one square and its neighboring regular triangle. Using the finite element method, the birefringence and confinement loss are investigated simultaneously by changing the pitch of air holes and sizes of air holes. Numerical results show that the fiber maintains single mode operation in a wide wavelength range from 1.8 μm to 2.2 μm , and the birefringence is on the order of 10^{-2} , two orders of magnitude larger than that of the conventional polarization-maintaining fibers, which is largest (around 2 μm) ever reported to our knowledge and the same order of magnitude as that obtained by fiber using elliptic air holes. But this designed fiber is easy to fabricate compared with the fibers using elliptic air holes.

Keywords: photonic quasi-crystal fiber, ZBLAN glass, high birefringence, grapefruits air holes

PACS: 42.81.Gs, 81.05.Pj, 78.20.Fm

DOI: [10.7498/aps.63.144202](https://doi.org/10.7498/aps.63.144202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61177082, 61205074), and the Beijing Natural Science Foundation, China (Grant No. 4122063).

[†] Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn