

中红外高保偏硫系玻璃双芯光子晶体 光纤耦合特性研究*

刘 硕 李曙光† 付 博 周洪松 冯荣普

(燕山大学理学院, 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004)

(2010年4月6日收到; 2010年5月14日收到修改稿)

设计了一种中红外硫系玻璃双芯光子晶体光纤, 利用多极法和模式耦合基本理论研究了这种光纤的耦合特性. 数值模拟发现, 空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$, 空气孔半径为 $r = 1.35 \mu\text{m}$, 空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的光纤, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 2.04 \mu\text{m}$ 处双折射可以达到 0.551×10^{-2} , 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处 x 偏振方向的耦合长度为 $145.32 \mu\text{m}$, y 偏振方向的耦合长度为 $154.68 \mu\text{m}$. 本文将波段扩展到中红外, 将耦合长度与高保偏特性相结合的双芯光子晶体光纤对中红外波段光纤耦合器的研制具有重要意义.

关键词: 双芯光子晶体光纤, 硫系玻璃, 双折射, 耦合长度

PACS: 42.81.-i, 78.55.-m, 42.81.Gs, 42.82.Et

1. 引言

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 是一种基于光子晶体技术发展起来的新型光纤, 自从 1996 年 PCF 问世以来, 基于对 PCF 的研究一直是国际学术界的热门领域. 与传统光纤相比 PCF 拥有许多独特的性质: 高双折射^[1-7], 极大或极小的有效模场面积^[8-10], 可调色散特性^[11-14], 高非线性等^[15,16].

双芯光纤是光学系统中常用的耦合元件, 因此被广泛的研究, 朱日丹等对双芯 PCF 宽带定向耦合器进行研究^[17]; Varshney 等研究了掺氟双芯 PCF 耦合器的性质^[18]; Saitoh 等分析了双芯 PCF 不同波长光束的耦合长度特性^[19]; 任国斌等讨论了双芯 PCF 中的模式干涉^[20]; Zhang 等设计了基于 PCF 的偏振分束器^[21]; 在全光组件当中, 双芯光纤被用作全光开关^[22]. 因此, 双芯 PCF 具有极其广泛的应用前景.

目前, 双芯 PCF 的研究主要集中在可见和近红外波段, 其基质材料主要是石英. 硫系玻璃在中红外波段透明度非常高, 透光范围为 3—10 μm , 同时

硫系玻璃具有较高的线性和非线性折射率^[23,24]. Suzuki 等描述和制备了硫系玻璃光子晶体波导^[25]; Brilland 等制备了复杂结构的多孔硫系玻璃光纤^[26]; Oskooi 等分析了硫系玻璃多孔 PCF 的零群速度模式^[27]. 因此, 以硫系玻璃为基质材料有望设计高双折射、高非线性、在中红外波段具有更好的传输特性的 PCF. 本文设计了一种结构简单, 易于制作的硫系玻璃双芯 PCF, 利用光波导的模式耦合理论^[28] 对这种光纤的耦合性质进行分析.

2. 耦合基本理论与方法

当两个正规光波导互相平行靠近时, 它们光场的横向耦合可以用模式间的横向耦合来描述. 根据波导模式耦合理论^[28], 耦合长度 L 可以由下式得到^[29,30]:

$$L = \frac{\pi}{\beta_s - \beta_a}. \quad (1)$$

在双芯 PCF 中, 总模式可以看作四个模式的叠加^[20,31], 分别为 x 偏振方向的对称模 $E_{sx}(x, y)$, x 偏振方向的非对称模 $E_{ax}(x, y)$, y 偏振方向的对称模

* 国家自然科学基金 (批准号: 10874145), 高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20091333110010), 河北自然科学基金 (批准号: F2009000481), 中国博士后科学基金 (批准号: 20080440014, 200902046) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn

$E_{sy}(x, y)$, y 偏振方向的非对称模 $E_{ay}(x, y)$, 与其对应的传播常数和有效折射率分别为 $\beta_{sx}, \beta_{ax}, \beta_{sy}, \beta_{ay}$ 和 $n_{sx}, n_{ax}, n_{sy}, n_{ay}$. 可以认为两个对称模 $E_{sx}(x, y)$, $E_{sy}(x, y)$ 为光纤的基模, 而两个非对称模 $E_{ax}(x, y)$, $E_{ay}(x, y)$ 为光纤的二次模. 双芯 PCF 在两个偏振方向上的耦合长度为^[29]

$$L_x = \frac{\pi}{\beta_{sx} - \beta_{ax}} = \frac{\lambda}{2(n_{sx} - n_{ax})}, \quad (2)$$

$$L_y = \frac{\pi}{\beta_{sy} - \beta_{ay}} = \frac{\lambda}{2(n_{sy} - n_{ay})}, \quad (3)$$

式中 λ 是光的波长. 计算出对称模与非对称模的有效折射率, 然后根据上两式计算出耦合长度, 对于不同的偏振态, 对称模与非对称模的有效折射率不同, 从而使得耦合长度不同.

本文采用多极法计算出对称模与非对称模的有效折射率, 多极法是将电场和磁场分量在各个圆柱坐标系内表示为 Bessel 函数的形式, 利用边界条件, 求解 Helmholtz 方程. 这种方法最早是由 Kuhlmeiy 和 White 等^[32,33] 用于模拟计算 PCF, 这种方法比较适用于分析具有圆形空气孔的 PCF, 利用对称性来简化运算, 具有较高的精度和收敛快的优点, 因此被广泛应用于分析折射率引导型 PCF、空芯光子带隙型 PCF 的模式、色散和损耗等特性.

3. 结果分析讨论

图 1 为双芯 PCF 结构和基模模场分布图, 空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 、空气孔半径 $r = 1.35 \mu\text{m}$ 、空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处所对应的基模模式. 本文设计的双芯 PCF 为均匀空气孔正三角形结构, 横轴方向上的两个纤芯分别是去掉两个空气孔所致, 中间由三个气孔隔开而形成双芯, 背景材料由硫系玻璃 (GLS) 组成, 折射率为 2.41, 由于气孔具有统一的半径, 在拉制过程中各毛细管表面张力基本一致, 有利于减小材料应力对制造精度的负面影响, 同时空气填充率适中, 可以避免大空气孔的存在可能导致结构坍塌.

3.1. 保偏特性分析

保偏光纤是一种对线偏振光具有较强的偏振保持能力的光纤, 保偏的物理机理主要是提高光传输过程中的模式双折射. 本文中, 光纤双折射主要是由于最内层空气孔的不对称引起的. 图 2 给出了不同空气填充率下双芯 PCF 双折射随归一化波长

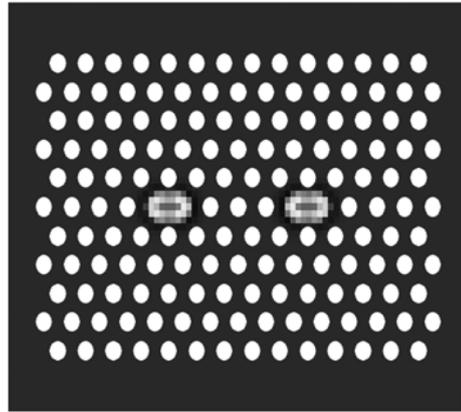


图 1 双芯 PCF 结构和基模模场分布图

的变化, 由图 2 可以看出, 当结构参数一定时, 双折射随归一化波长的增大而增大. 这是因为光纤的双折射是由 x 方向和 y 方向纤芯的不对称引起的, 光波在光纤中传输时, 主要是受到光纤最内层椭圆纤芯等非对称因素的影响.

对于空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$, 空气孔半径为 $r = 1.35 \mu\text{m}$, 空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的光纤, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 2.04 \mu\text{m}$ 处双折射可以达到 0.551×10^{-2} , 这比文献 [34—36] 报道的双折射大一个数量级. 由图 2 可以看出, 在空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 不变的情况下, 空气填充率 d/Λ 从 0.5 变化到 0.67 时, 当空气填充率 $d/\Lambda = 0.67$ 时, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 2.04$ 处双折射可以达到 0.014, 双折射随空气填充率 d/Λ 的增大而不断增大. 这是由于在归一化波长 λ/Λ 和空气孔间距 Λ 确定时, 增大空气填充率 d/Λ , 相当于增强包层空气孔对光波的限制作用, 致使内层空气孔的不对称性对光波的影响增大, 因此其双折射增大.

综上所述, 本文所设计的光纤具有较高的双折射, 这就决定了这种光纤具有很好的偏振保持特性.

3.2. 耦合长度分析

图 3 给出了不同空气填充率下双芯 PCF 耦合长度随归一化波长的变化, 由图 3 可以看出, 当空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 不变的情况下, 空气填充率 d/Λ 从 0.5 变化到 0.67 时, 随着空气填充率 d/Λ 的增大, 耦合长度减小, 这是因为: 对于本文所设计的双芯光纤, 随着空气填充率 d/Λ 的增大, 单个纤芯被纵向的压缩, 导致纤芯模场横向扩展, 使得光从一个纤芯耦合到另一个纤芯时变得更加容易, 从而

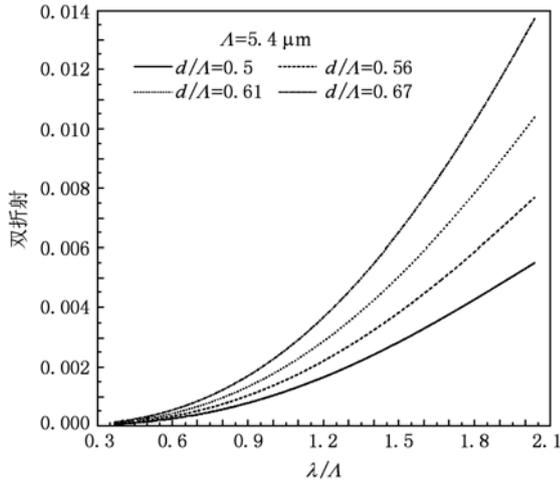


图2 双芯 PCF 双折射随归一化波长 λ/Λ 的变化

使耦合长度变短. 从图中可知, 空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的双芯 PCF, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处对应 x 偏振方向的耦合长度 $L_x = 145.32 \mu\text{m}$, 对应 y 偏振方向的耦合长度 $L_y = 154.68 \mu\text{m}$.

3.3. 归一化功率分析

本文所设计的双芯 PCF 在两个偏振方向的耦合长度不同, 利用两偏振方向耦合长度不同的其他位置点同样有望制备微型偏振分束器和偏振耦合器. 本文中光纤 x 方向的耦合长度 L_x 小于 y 方向的耦合长度 L_y , 只要光纤的长度满足^[29] $L = mL_x = nL_y$, 其中 m, n 均为正整数, 当用作与偏振方向无关耦合器时, 应使 m 和 n 具有相同的奇偶性; 当用作偏振分束器时, 应使 m 和 n 的奇偶性相反. 图 4 给出了空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的双芯 PCF 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处某一纤芯中归一化功率随传输距离的变化的规律, 从图 3 中可以看出, 该光纤在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处对应 x 偏振方向的耦合长度 $L_x = 145.32 \mu\text{m}$, 对应 y 偏振方向的耦合长度 $L_y = 154.68 \mu\text{m}$. 从图 4 中可以看出, 当 $L = 15L_x = 14L_y = 2170 \mu\text{m}$ 时实现两偏振光的分离, 可以作为偏振分束器; $L = 31L_x = 29L_y = 4495 \mu\text{m}$ 时两偏振光又一次在同一纤芯耦合, 可以用作与偏振无关的耦合器.

图 5 给出空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的双芯 PCF 归一化功率随波长的变化规律, 传输长度为 $2170 \mu\text{m}$. 波长从 $2 \mu\text{m}$ 变化到 $11 \mu\text{m}$. 从图中可以发现, x 偏振方向和 y 偏振方向的功率变化随波长做周期变化, 这与传统的方向耦合器是一致的. 图 6 中可以看

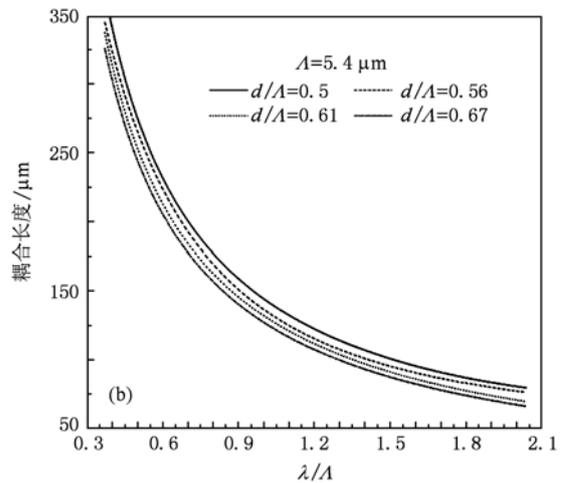
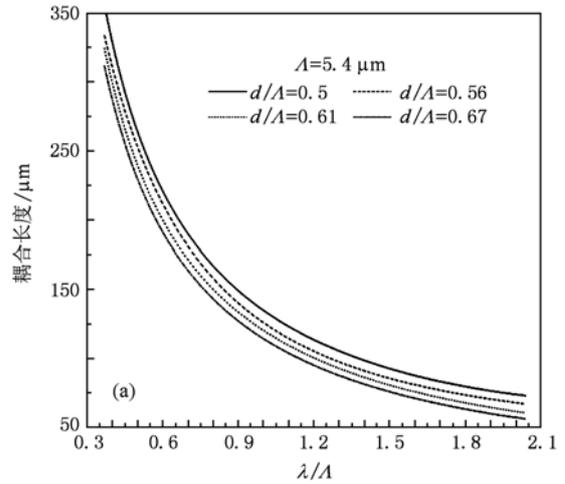


图3 耦合长度随归一化波长 λ/Λ 的变化 (a) x 偏振方向; (b) y 偏振方向

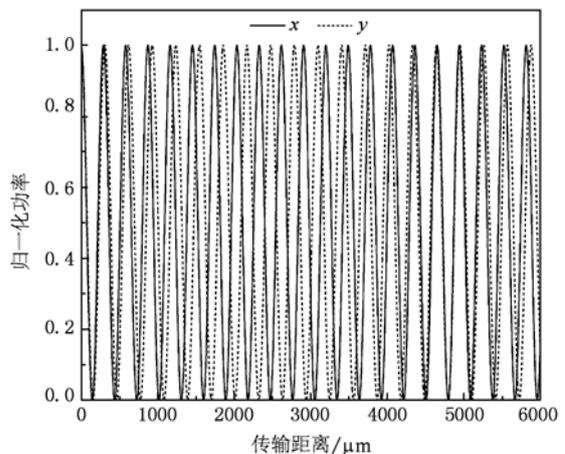


图4 归一化功率随传输距离的转移

出,在 $\lambda = 4.33 \mu\text{m}$ 最大的消光比可以达到 -53.48 dB ,波长从 $4.27 \mu\text{m}$ 到 $4.38 \mu\text{m}$ 消光比低于 -10 dB ,带宽范围是 110 nm .

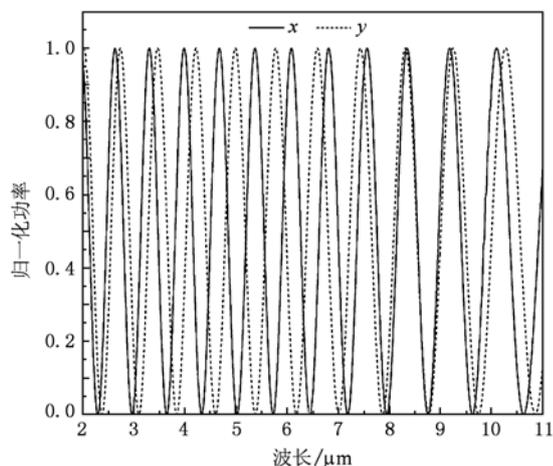


图5 归一化功率随波长的变化规律

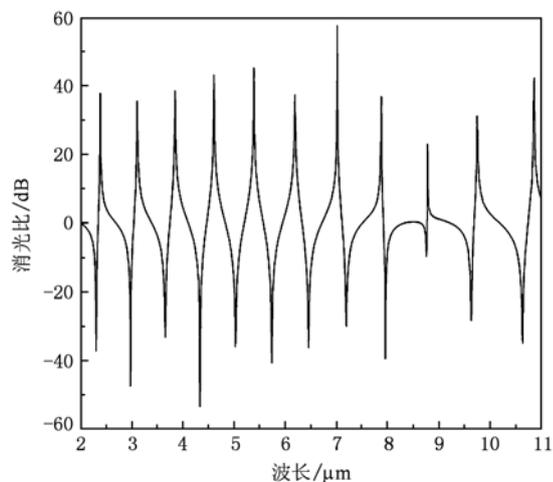


图6 消光比随波长的变化

4. 结 论

本文设计了一种硫系玻璃中红外双芯 PCF, 利用多极法和耦合基本理论研究了这种 PCF 的高保偏性特性和耦合特性. 可以得到以下结论:

1. 分析了这种光纤的高保偏性, 对于空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$, 空气孔半径为 $r = 1.35 \mu\text{m}$, 空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的双芯 PCF, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 2.04 \mu\text{m}$ 处双折射可以达到 0.551×10^{-2} , 这比文献[34—36]报道的双折射为 10^{-3} 量级的高双折射 PCF 的双折射大一个数量级; 双折射随空气填充率 d/Λ 的增大而不断增大.

2. 分析了这种光纤的耦合长度, 对于空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 、空气孔半径 $r = 1.35 \mu\text{m}$ 、空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的双芯 PCF, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处对应 x 偏振方向的耦合长度 $L_x = 145.32 \mu\text{m}$, 对应 y 偏振方向的耦合长度 $L_y = 154.68 \mu\text{m}$. 当结构一定时, 随着归一化波长的增加, 耦合长度逐渐减小; 随着空气填充率 d/Λ 的增大, 耦合长度逐渐减小.

3. 对于空气孔间距 $\Lambda = 5.4 \mu\text{m}$ 、空气孔半径 $r = 1.35 \mu\text{m}$ 、空气填充率 $d/\Lambda = 0.5$ 的双芯 PCF, 在归一化波长 $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$ 处, 当光纤长度为 $2170 \mu\text{m}$ 时, 可以实现两偏振光分离, 可以作为偏振分束器; 当光纤长度为 $4495 \mu\text{m}$ 时, 两偏振光再次在同一纤芯耦合, 可以作为与偏振无关的耦合器. 在 $\lambda = 4.33 \mu\text{m}$ 最大的消光比可以达到 -53.48 dB , 波长从 $4.27 \mu\text{m}$ 到 $4.38 \mu\text{m}$ 消光比低于 -10 dB , 带宽范围是 110 nm .

通过上述结论, 有助于我们更好的了解硫系玻璃中红外双芯光纤的性质, 将耦合长度与高保偏特性相结合的双芯 PCF 对中红外波段光纤耦合器的研制具有重要意义.

[1] Zhou H S, Li S G, Fu B, Yan Y Y, Zhang L 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 014208
 [2] Zhang L, Li S G, Yao Y Y, Fu B, Zhang M Y, Zheng Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1101 (in Chinese) [张磊、李曙光、姚艳艳、付博、张美艳、郑义 2010 物理学报 **59** 1101]
 [3] Yan F P, Li Y F, Wang L, Gong T R, Liu P, Liu Y, Tao P L, Qu M X, Jian S S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5735 (in Chinese) [延凤平、李一凡、王琳、龚桃荣、刘鹏、刘洋、陶沛琳、

曲美霞、简水生 2008 物理学报 **57** 5735]
 [4] Zhang Y N, Miao R C, Ren L Y, Wang H Y, Wang L L, Zhao W 2007 *Chin. Phys.* **16** 1719
 [5] Li S G, Xing G L, Zhou G Y, Hou L T 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 0238 (in Chinese) [李曙光、邢光龙、周桂耀、侯蓝田 2006 物理学报 **55** 0238]
 [6] Kim S, Kee C S, Lee C G 2009 *Opt. Express* **17** 7952
 [7] Yang Q Q, Hou L T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8345 (in

- Chinese) [杨倩倩、侯蓝田 2009 物理学报 **58** 8345]
- [8] Zhang C, Hu M L, Song Y J, Zhang X, Chai L, Wang Q Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7727 (in Chinese) [张弛、胡明列、宋有建、张鑫、柴路、王清月 2009 物理学报 **58** 7727]
- [9] Liu B W, Hu M L, Song Y J, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6921 (in Chinese) [刘博文、胡明列、宋有建、柴路、王清月 2008 物理学报 **57** 6921]
- [10] Healy N, Sparks J R, Petrovich M N, Sazio P J A, Badding J V, Peacock A C 2009 *Opt. Express* **17** 18076
- [11] Jiang L H, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1095 (in Chinese) [姜凌红、侯蓝田 2010 物理学报 **59** 1095]
- [12] Cui Y L, Hou L T 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2571 (in Chinese) [崔艳玲、侯蓝田 2010 物理学报 **59** 2571]
- [13] Liu J, Yang C X, Claire G, Jin G F 2006 *Acta Opt. Sin.* **26** 1569 (in Chinese) [刘洁、杨昌喜、Claire G、金国藩 2006 光学学报 **26** 1569]
- [14] Zhang D S, Dong X Y, Zhang W G, Wang Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1235 (in Chinese) [张德生、董孝义、张伟刚、王志 2005 物理学报 **54** 1235]
- [15] Liao M S, Chaudhari C, Qin G S, Yan X, Kito C, Suzuki T, Ohishi Y, Matsumoto M, Misumi T 2009 *Opt. Express* **17** 21608
- [16] Dong L, Thomas B K, Fu L 2008 *Opt. Express* **16** 16423
- [17] Zhu R D, Luo A P, Wang X D, Xu W C 2008 *Acta Photon. Sin.* **37** 1810 (in Chinese) [朱日丹、罗爱平、汪徐德、徐文成 2008 光子学报 **37** 1810]
- [18] Varshney S K, Florous N J, Saitoh K, Koshiba M 2006 *Opt. Express* **14** 1982
- [19] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 3188
- [20] Ren G B, Wang Z, Lou S Q, Jian S S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2600 (in Chinese) [任国斌、王智、姜淑琴、简水生 2004 物理学报 **53** 2600]
- [21] Zhang L, Yang C X 2003 *Opt. Express* **11** 1015
- [22] Peterka P, Kasik I, Kanka J, Honzatko P, Matejec V, Hayer M 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 1656
- [23] Isidro J R, Mairaj A K, Pruneri V, Hewak D W, Netti M C, Baumberg J J 2003 *J Non-Cryst. Solids.* **317** 241
- [24] Hall D W, Newhouse M A, Borrelli N F, Dumbaugh W H, Weidman D L 1989 *Appl. Phys. Lett.* **54** 1293
- [25] Suzuki K, Hamachi Y, Baba T 2009 *Opt. Express* **17** 22393
- [26] Brilland L, Smektala F, Renversez G, Chartier T, Troles J, Nguyen T N, Traynor N, Monteville A 2006 *Opt. Express* **14** 1280
- [27] Oskooi A F, Joannopoulos J D, Johnson S G 2009 *Opt. Express* **17** 10082
- [28] She S X 2002 *Quided wave optics basis* (Beijing: Beijing Jiaotong University Press) 400—407 (in Chinese) [余守宪 2002 导波光学物理基础(北京:北方交通大学出版社)第 400—407 页]
- [29] Fu B, Li S G, Yao Y Y, Zhang L, Zhang M Y, Liu S Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7708 (in Chinese) [付博、李曙光、姚艳艳、张磊、张美艳、刘司英 2009 物理学报 **58** 7708]
- [30] Cherif R, Zghal M, Chatta R, Nneila CB 2006 *SPIE* **6182** 61888k.1
- [31] Wen K, Wang J Y, Wang R 2007 *Chin. J. Quantum Electronics* **25** 505 (in Chinese) [文科、汪井源、王荣 2007 量子电子学报 **25** 505]
- [32] White T P, Kuhlmeij B T, McRhedran R C, Maystre D, Renversez G, Martijn de Sterke C, Botten L C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2322
- [33] Kuhlmeij B T, White T P, Renversez G, Maystre D, Botten L C, Martijn de Sterke C, McPhedran R C 2002 *J. Opt. Soc. Am. B* **19** 2331
- [34] Zhang X J, Zhao J L, Hou J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **56** 4668 (in Chinese) [张晓娟、赵建林、侯建平 2005 物理学报 **56** 4668]
- [35] Lou S Q, Wang Z, Ren G B, Jiang S S 2004 *Chin. Phys. Phys.* **13** 1493
- [36] Fang H, Lou S Q, Guo T Y, Jian S S 2007 *Acta Opt. Sin.* **27** 202 (in Chinese) [方宏、姜淑琴、郭铁英、简水生 2007 光学学报 **27** 202]

Analysis of coupling characteristics of midinfrared high polarization chalcogenide glass dual-core photonic crystal fiber^{*}

Liu Shuo Li Shu-Guang[†] Fu Bo Zhou Hong-Song Feng Rong-Pu

(Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(Received 6 April 2010; revised manuscript received 14 May 2010)

Abstract

A kind of chalcogenide glass midinfrared dual-core photonic crystal fiber has been proposed in this paper. The coupling characteristic of this fiber has been studied by multipole method using the basic theory of coupling. It is found that the birefringence of dual-core PCF with pitch $5.4 \mu\text{m}$, air-hole radius $1.35 \mu\text{m}$ and air-filling fraction 0.5 is 0.551×10^{-2} at normalized frequency $\lambda/\Lambda = 2.04 \mu\text{m}$. At normalized frequency $\lambda/\Lambda = 0.93 \mu\text{m}$, coupling lengths are $145.32 \mu\text{m}$ and $154.68 \mu\text{m}$ for x -polarized mode and y -polarized mode, respectively. The band extended to midinfrared. This dual-core photonic crystal fiber with coupling length and high polarization is useful for manufacturing midinfrared band optical fiber coupler.

Keywords: dual-core photonic crystal fiber, chalcogenide glass, birefringence, coupling length

PACS: 42.81.-i, 78.55.-m, 42.81.Gs, 42.82.Et

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10874145), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20091333110010), the Nature Science Foundation of Hebei Province (Grant No. F2009000481), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 20080440014, and 200902046).

[†] Corresponding author. E-mail: shuguangli@ysu.edu.cn