

# 新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究\*

韩博琳 娄淑琴<sup>†</sup> 鹿文亮 苏伟 邹辉 王鑫

(北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

(2013年7月26日收到; 2013年9月18日收到修改稿)

提出了一种新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器. 应用全矢量有限元法, 系统地研究了光纤结构参数对偏振分束器带宽和偏振分束器长度的影响. 分析结果表明: 增加掺氟区折射率, 既能提高分束器带宽, 也能减少分束器长度; 增大光纤中空气孔的孔距及孔径与孔距比, 可以增加分束器的带宽, 但同时也会导致分束器的长度增大, 使得器件尺寸增大. 因此, 在设计中需兼顾分束器的带宽和长度来选取光纤的结构参数. 通过结构参数的优化, 设计出一种短长度、高消光比和超宽带的偏振分束器, 其长度为 7.362 mm, 消光比高于 20 dB 的带宽为 600 nm.

**关键词:** 光子晶体光纤, 偏振分束器, 超宽带, 全矢量有限元法

**PACS:** 42.81.Qb, 42.79.Fm, 33.70.Jg, 02.70.Dh

**DOI:** 10.7498/aps.62.244202

## 1 引言

偏振分束器<sup>[1,2]</sup>将一束光分解成相互正交的两束偏振光, 是光通信、光传感、光测量、光信息处理及集成光学中的一种重要的光器件. 光纤偏振分束器由于结构紧凑、易于与光系统中的其他光纤器件连接而得到广泛应用<sup>[3]</sup>, 其是光纤耦合器的主要部件<sup>[4]</sup>, 光纤耦合器主要是基于双折射原理制成. 但由于传统光纤的双折射小, 导致基于传统光纤的偏振分束器的长度过长, 通常在厘米量级<sup>[5]</sup>. 另外, 基于传统光纤的偏振分束器的波长依赖性强和带宽窄, 这限制了它的应用范围.

近年来, 光子晶体光纤以其无尽单模、高双折射、高非线性等独特的性能<sup>[6-9]</sup>, 引起了人们的高度重视. 灵活的结构为设计高双折射光子晶体光纤和多芯光子晶体光纤提供了新的途径, 并为进一步研制高性能的偏振分束器提供了基础. 2003年 Zhang 和 Yang<sup>[10]</sup>提出了一种基于光子晶体光纤的偏振分束器, 其长度为 1.7 mm, 消光比高于 11 dB 的带宽为 80 nm, 获得了比传统偏振分束器更优异的性能, 也显示出光子晶体光纤在设计高性能偏振分束器中的潜在优势. 2004年 Saitoh 等<sup>[11]</sup>提出了

基于三芯光子晶体光纤的偏振分束器, 其长度为 1.9 mm, 消光比高于 20 dB 的带宽为 37 nm. 2006年, Rosa 等<sup>[12]</sup>提出了方形格子排布的偏振分束器, 其长度为 20 mm, 消光比高于 23 dB 的带宽达到 90 nm. 2011年 Li 等<sup>[13]</sup>设计出基于双芯光子晶体光纤的偏振分束器, 其长度为 4.72 mm, 消光比高于 20 dB 的带宽达到了 190 nm. 2012年 Lu 等<sup>[2]</sup>设计的偏振分束器长度为 72.5 mm, 消光比高于 20 dB 的带宽已经达到 400 nm. 从上述研究工作可以看出, 在获得宽带偏振分束器的同时器件的尺寸也在增大. 因此, 探索新的偏振分束器结构, 即在扩展带宽的同时减小器件的尺寸, 仍是一个具有挑战性的课题.

本文提出了一种新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器, 系统地研究了结构参数对偏振分束器带宽和长度的影响, 并在此基础上设计出一种短长度、高消光比和超宽带的偏振分束器. 分束器长度为 7.362 mm, 消光比高于 20 dB 的带宽为 600 nm. 当工作波长为 1550 nm 时, 消光比达到了 46.63 dB. 与目前报道的带宽最宽的偏振分束器<sup>[2]</sup>相比, 提出的双芯光子晶体光纤偏振分束器的带宽还要宽 200 nm, 且分束器长度约缩短到文献 [2] 中

\* 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.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

的分束器长度的十分之一。

## 2 光纤结构和原理

本文提出的双芯光子晶体光纤的横截面如图 1 所示. 光纤背景材料为纯石英, 所有空气孔的中心按规则的三角格子结构排列, 孔距为  $\Lambda$ .  $a, a', b, b'$  位置所对应的四个空气孔用掺氟棒代替, 形成了相同的芯区  $A$  和  $B$ . 中心三个空气孔 1, 2 和 3 间的石英区域构成连接两芯区的桥路. 在该结构中掺氟棒直径为  $d'$ , 空气孔直径为  $d$ , 孔径与孔距比为  $d/\Lambda$ , 掺氟棒折射率和基底材料石英折射率之差的绝对值为  $\Delta$ . 为了减小制作的难度, 在光纤设计中采用相同尺寸的空气孔.

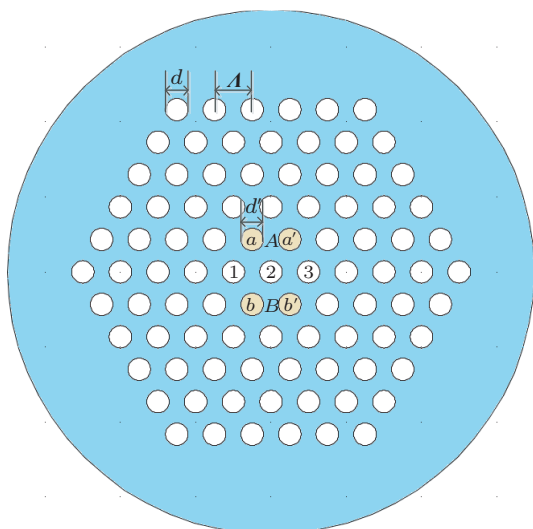


图 1 双芯光子晶体光纤的横截面

由于光纤设计中  $a, a', b, b'$  位置所对应的四个孔用掺氟棒代替, 形成了两个双折射纤芯  $A$  和  $B$ , 光纤对称性为两重对称,  $x$  偏振模和  $y$  偏振模不再简并. 因此, 在提出的光纤中存在 4 个非简并模<sup>[14]</sup>, 即  $x$  偏振奇模、 $x$  偏振偶模、 $y$  偏振奇模和  $y$  偏振偶模. 具有相同偏振态的偶模和奇模在传输过程中发生耦合, 使偏振光能量从一个纤芯向另一个纤芯传递, 当一个纤芯中某个偏振光的强度由极大值变为极小值而对应的另一个纤芯中该偏振光的强度由极小值变为极大值时, 对应的光纤长度即为该偏振光的耦合长度  $L_c$ , 可以表示为<sup>[2]</sup>

$$L_c^{x,y} = \frac{\lambda}{2(n_{e,\lambda}^{x,y} - n_{o,\lambda}^{x,y})}, \quad (1)$$

式中  $n_{e,\lambda}^{x,y}$  和  $n_{o,\lambda}^{x,y}$  分别代表偶模和奇模的有效折射率,  $x$  和  $y$  表示模式的偏振态,  $\lambda$  为真空中任意工作波长. 耦合长度为某个偏振光的光功率从一个芯区完全转换到另一个芯区的最短长度.

$x$  偏振光和  $y$  偏振光的耦合长度不同. 当一束光从一个纤芯入射时, 在光纤传输过程中, 芯区中的两偏振光将发生分离<sup>[2,10,13,15,16]</sup>. 分束器长度是光子晶体光纤偏振分束器的一个重要指标参数. 在忽略传输损耗的前提下, 光在光纤中的传输距离为  $L$ , 则在一个芯区出口处, 两个偏振光的归一化功率  $P_{x,y}$  可表示为

$$P_{x,y} = \cos^2 \left( \frac{\pi L}{L_c^{x,y}} \right). \quad (2)$$

当光纤的长度  $L$  达到  $L_s$  时, 该芯中的某个偏振光的归一化功率达到最小值, 同时另一个偏振光的归一化功率达到最大值, 则将  $L_s$  称为偏振分束器的长度.

消光比  $\xi$  是光子晶体光纤偏振分束器的另一个重要参数, 用于描述偏振光的分离程度.  $P_x$  和  $P_y$  分别表示某一芯区中  $x$  偏振光和  $y$  偏振光的功率, 在该芯区的出口处, 消光比<sup>[2]</sup> 定义为

$$\xi = -10 \lg \left( \frac{P_x}{P_y} \right), \quad (3)$$

消光比越高, 偏振分束器的性能越好. 在实际应用中, 当消光比的数值达到 20 dB 时, 意味着一个偏振光的光功率为另一个偏振光功率的 100 倍, 这足以实现两个偏振光的分离. 因此, 本文将消光比为 20 dB 所对应的波长范围称为分束器的带宽.

通常情况下, 偏振分束器的耦合长度随波长的变化而发生改变. 因此, 对于固定长度的偏振分束器的消光比也会随波长的变化而改变, 这是影响带宽的主要因素. 为了获得超宽带的分束器, 两偏振光的耦合长度应随波长的变化趋于平坦. 由耦合长度 (1) 式可知, 欲实现超宽带特性, 应要求  $(n_{e,\lambda}^{x,y} - n_{o,\lambda}^{x,y})$  随波长变化的斜率较小. 为此, 本文引入偏振光的相对耦合长度  $L_r$  来描述  $(n_{e,\lambda}^{x,y} - n_{o,\lambda}^{x,y})$  随波长的变化, 其表达式为

$$L_r^{x,y} = \frac{\lambda}{\lambda_0} \frac{n_{e,\lambda_0}^{x,y} - n_{o,\lambda_0}^{x,y}}{n_{e,\lambda}^{x,y} - n_{o,\lambda}^{x,y}}, \quad (4)$$

式中,  $\lambda_0$  表示工作波长 1550 nm,  $n_{e,\lambda_0}^{x,y}$  和  $n_{o,\lambda_0}^{x,y}$  分别表示工作波长为 1550 nm 时偶模和奇模的有效折射率. 相对耦合长度实质上是任意波长  $\lambda$  的耦合长

度与工作波长为 1550 nm 时的耦合长度之比. 相对耦合长度越接近 1, 则耦合长度随波长的变化越趋于平坦, 就越有利于获得超宽带分束器.

### 3 影响分束器带宽和分束器长度的因素分析

偏振分束器的带宽和长度是衡量偏振分束器特性的两个重要指标. 对于本文提出的光纤结构, 特征参数主要有掺氟区的折射率、孔距及孔径与孔距比, 这些特征参数的改变将对偏振分束器的带宽和长度产生影响. 因此, 本文利用有限元法 [2] 研究了这些参数对偏振分束器的带宽和长度的影响, 得出了一般规律. 这为设计超宽带和超短长度的光子晶体光纤偏振分束器结构提供了参考.

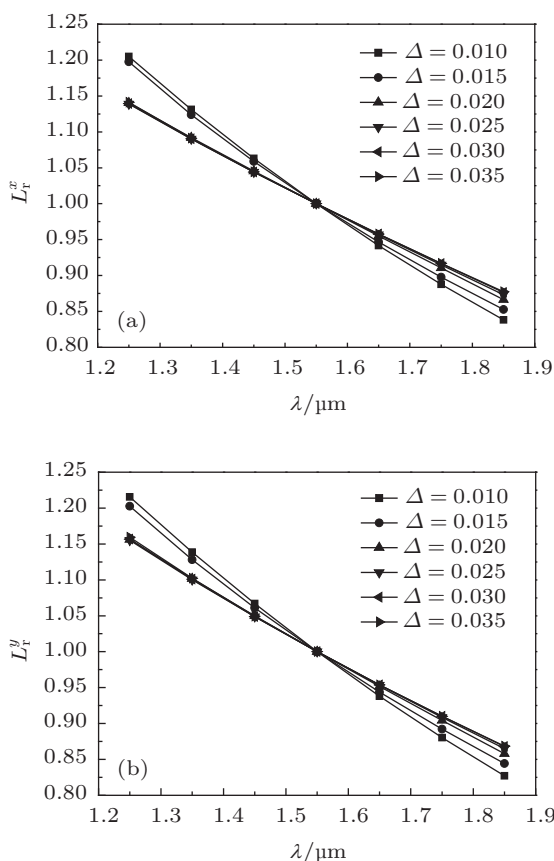


图2 当  $\Delta$  取不同值时,  $x$  偏振光的  $L_r^x$  和  $y$  偏振光的  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化 (a)  $L_r^x$  随  $\lambda$  的变化; (b)  $L_r^y$  随  $\lambda$  的变化

#### 3.1 掺氟区折射率 $\Delta$ 的影响

考虑实际制作的可行性, 光纤的初始结构参数

为  $\Lambda = 5 \mu\text{m}$  和  $d/\Lambda = 0.6$ . 改变掺氟区的折射率  $\Delta$ ,  $x$  偏振光的相对耦合长度  $L_r^x$  和  $y$  偏振光的相对耦合长度  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 当  $\Delta$  增大时,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长的变化曲线均趋于平缓; 当  $\Delta$  在 0.02—0.035 之间时, 曲线已经重合在一起, 且  $L_r^x$  和  $L_r^y$  呈现出几乎相同的变化. 掺氟折射率  $\Delta$  对分束器长度  $L_s$  的影响如图 3 所示. 当  $\Delta$  增大时, 分束器长度  $L_s$  变短. 综上所述, 增大  $\Delta$  既能增加分束器带宽, 也能减少分束器长度. 然而  $\Delta$  不能一味地增大, 否则两芯区的模场会被挤压向中心, 并发生交叠, 从而导致在分束器的出口处两偏振光很难分离. 本文选定  $\Delta$  为 0.03.

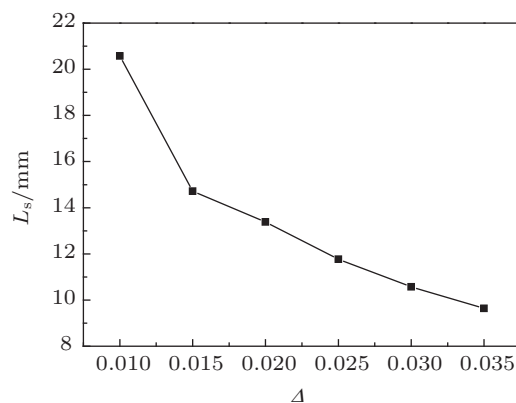


图3 分束器长度  $L_s$  随掺氟区折射率  $\Delta$  的变化

#### 3.2 孔距 $\Lambda$ 的影响

光纤结构参数为  $d/\Lambda = 0.6$  和  $\Delta = 0.03$ . 改变孔距  $\Lambda$ ,  $x$  偏振光的  $L_r^x$  和  $y$  偏振光的  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化情况如图 4 所示. 从图 4 可以看出: 当  $\Lambda$  逐渐增大时,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长的变化曲线趋于平缓; 当  $\Lambda$  由  $2 \mu\text{m}$  增大到  $5 \mu\text{m}$  时,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化曲线急剧变得平坦; 当  $\Lambda$  由  $5 \mu\text{m}$  增大到  $9 \mu\text{m}$  时, 相应的变化曲线趋于稳定. 分束器长度  $L_s$  随  $\Lambda$  变化的情况如图 5 所示. 当增大  $\Lambda$  时, 分束器的长度增加. 尤其是当  $\Lambda$  增加到  $7 \mu\text{m}$  后, 分束器的长度将快速增加. 综上分析可知, 增大  $\Lambda$  可以提高带宽, 但也会增加分束器的长度. 因此, 在设计偏振分束器的结构时, 孔距  $\Lambda$  的选择应兼顾考虑分束器带宽和分束器长度, 同时还应考虑过小的孔距将会增加制作难度, 所以孔距  $\Lambda$  选取在  $4\text{—}6 \mu\text{m}$  之间较为适宜, 本文选定  $\Lambda$  为  $5 \mu\text{m}$ .

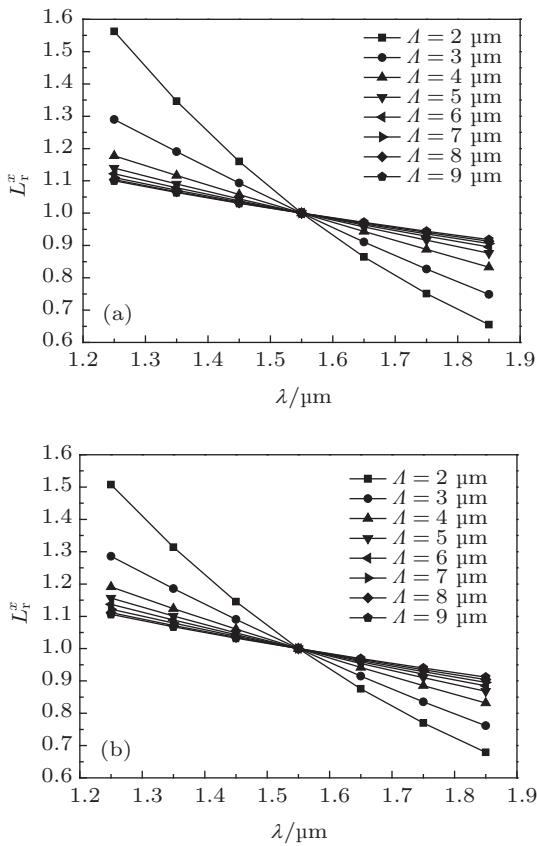


图4 当  $\Lambda$  取不同值时,  $x$  偏振光的  $L_r^x$  和  $y$  偏振光的  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化 (a)  $L_r^x$  随  $\lambda$  的变化; (b)  $L_r^y$  随  $\lambda$  的变化

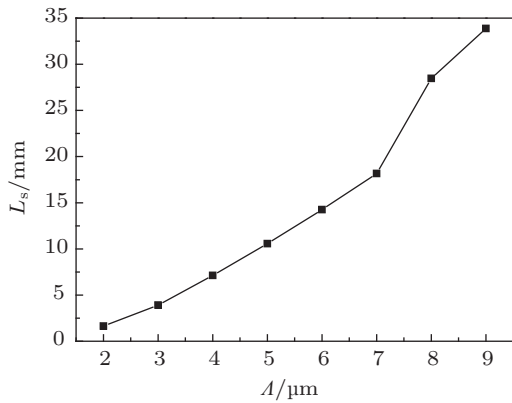


图5 分束器长度  $L_s$  随孔距  $\Lambda$  的变化

### 3.3 孔径与孔距比 $d/\Lambda$ 的影响

光纤结构参数为  $\Lambda = 5 \mu\text{m}$  和  $\Delta = 0.03$ . 改变  $d/\Lambda$ ,  $x$  偏振光的  $L_r^x$  和  $y$  偏振光的  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化如图6所示, 分束器长度  $L_s$  随  $d/\Lambda$  的变化如图7所示. 从图6和7可以看出: 当  $d/\Lambda$  增大时,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化曲线的斜率的绝对值并非线

性增大; 当  $d/\Lambda$  由 0.5 增加到 0.65 时,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化曲线的斜率的绝对值由大变小, 分束器长度基本保持不变; 当  $d/\Lambda$  由 0.65 增加到 0.8 时,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化曲线的斜率的绝对值由小变大, 分束器长度逐渐增大. 但当  $d/\Lambda$  高于 0.7 后,  $L_r^x$  和  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化曲线越来越陡峭, 分束器长度急剧增大. 上述现象的主要原因是随着  $d/\Lambda$  增大, 两芯区之间的耦合桥路变窄, 使两芯区中光的

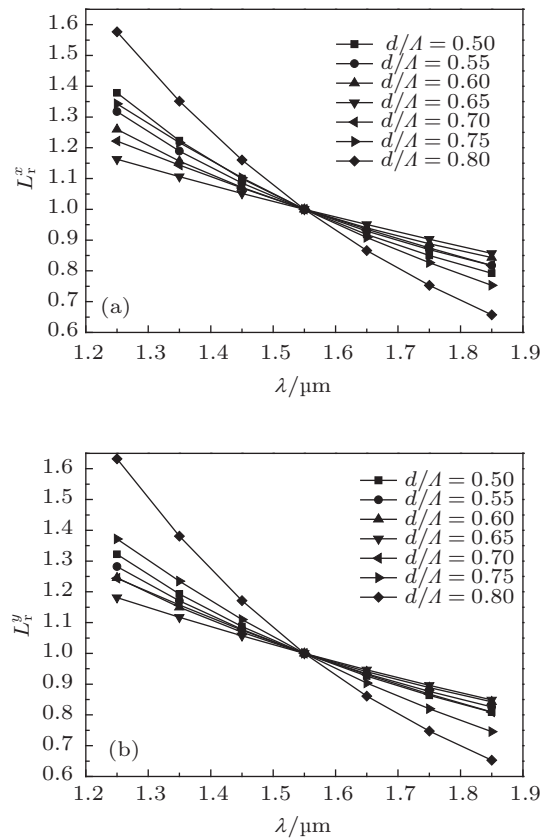


图6 当  $d/\Lambda$  取不同值时,  $x$  偏振光的  $L_r^x$  和  $y$  偏振光的  $L_r^y$  随波长  $\lambda$  的变化 (a)  $L_r^x$  随  $\lambda$  的变化; (b)  $L_r^y$  随  $\lambda$  的变化

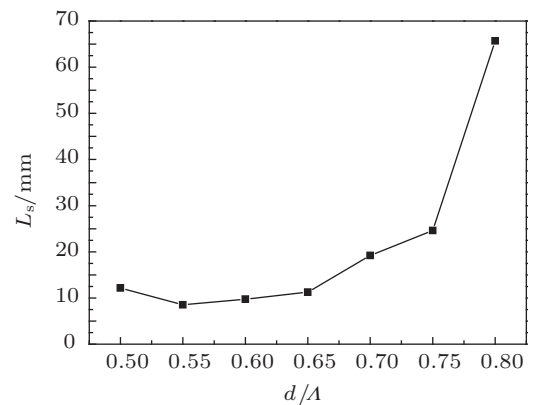


图7 分束器长度  $L_s$  随孔径与孔距比  $d/\Lambda$  的变化

耦合减弱,从而导致分束器长度增大. 综上所述可知,增大  $d/\Lambda$  可以提高带宽,但同时也会增加分束器长度. 因此  $d/\Lambda$  选在 0.6—0.7 之间比较合适,本文选定  $d/\Lambda$  为 0.6.

### 4 分束器的设计与优化

依据上述分析,选取光纤结构参数为  $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.6$ ,  $\Delta = 0.03$ . 在此基础上,调节  $a, d', b, b'$  位置掺氟棒的直径,得到相对耦合长度和分束器长度的变化如图 8 和图 9 所示. 当  $d'/\Lambda$  在 0.65—0.69 之间时,  $L_c^x$  和  $L_c^y$  随波长  $\lambda$  的变化曲线最为平坦,同时分束器长度较短且变化不大,此时可以得到最优的结构. 在上述结构参数下,消光比  $\xi$  随波长  $\lambda$  变化的曲线如图 10 所示. 从图 10 可以看出,当  $d'/\Lambda = 0.69$  时,消光比高于 20 dB 的带宽为 600 nm,在波长为 1550 nm 处消光比达到了 46.63 dB. 因此最优的结构参数为  $\Lambda = 5 \mu\text{m}$ ,  $d/\Lambda = 0.6$ ,  $\Delta = 0.03$ ,  $d'/\Lambda = 0.69$ . 工作波长为 1550 nm 时,归一化功率  $P_{x,y}$  随传输距离  $L$  的变化曲线如图 11 所示,在垂直

的虚线 ( $L = 7.362 \text{ mm}$ ) 处两束光可实现分离,对应的是分束器长度  $L_s$  为 7.362 mm. 由此可知,通过参数的优化设计,基于提出的双芯光子晶体光纤可以设计出带宽为 600 nm、长度为 7.362 mm 的超宽带偏振分束器. 与目前报道的最宽的偏振分束器 [2] 相比,本文提出的双芯光子晶体光纤偏振分束器的带宽还要宽 200 nm,并且分束器长度约缩短至文献 [2] 中的偏振分束器长度的 1/10.

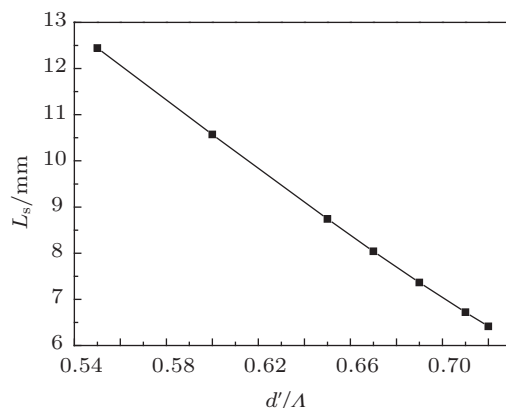


图 9 分束器长度  $L_s$  随  $d'/\Lambda$  的变化

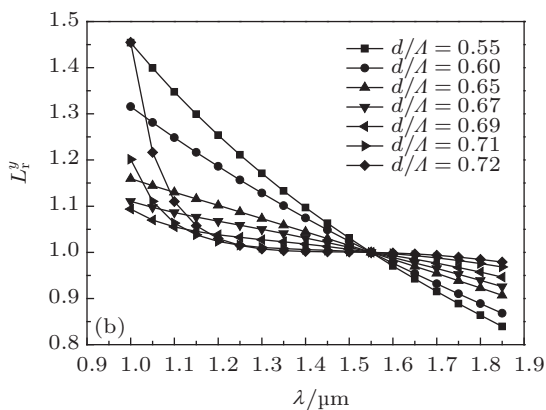
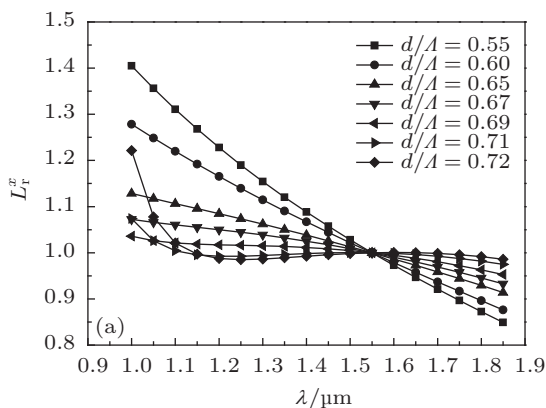


图 8 当  $d'/\Lambda$  取不同值时, x 偏振光的  $L_c^x$  和 y 偏振光的  $L_c^y$  随波长  $\lambda$  的变化 (a)  $L_c^x$  随  $\lambda$  的变化; (b)  $L_c^y$  随  $\lambda$  的变化

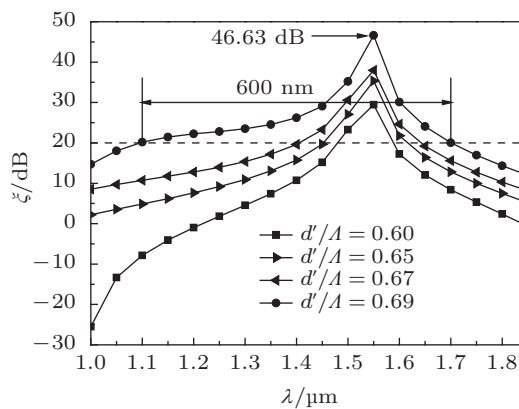


图 10 当  $d'/\Lambda$  取不同值时,消光比  $\xi$  随波长  $\lambda$  的变化

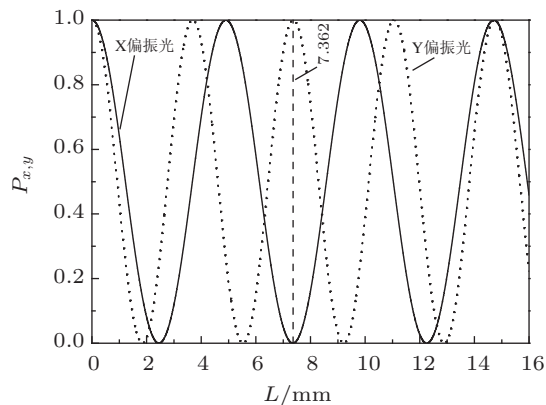


图 11 偏振光的归一化功率  $P_{x,y}$  随传输距离  $L$  的变化

## 5 结论

本文提出了一种新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器,并研究了掺氟区折射率、孔距和孔径与孔距比对偏振分束器的带宽和长度的影响,设计出一种短长度、高消光比和超带宽的偏振分束器.该分束器长度为 7.362 mm,消光比高于 20 dB

的带宽达到 600 nm,并且在波长为 1550 nm 时,消光比达到了 46.63 dB.所设计的偏振分束器与目前报道的最宽的偏振分束器<sup>[2]</sup>相比,此分束器的带宽还要宽 200 nm,且分束器长度相应缩短至文献 [2] 中的偏振分束器长度的十分之一.研究成果将在超宽带光通信系统、相干光通信系统及集成光学研究领域具有重要的应用.

- 
- [1] Florous N J, Saitoh K, Koshiha M 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1231
- [2] Lu W L, Lou S Q, Wang X, Wang L W, Feng R J 2013 *Appl. Opt.* **52** 449
- [3] Zhang X, Liao Q H, Chen S W, Hu P, Yu T B, Liu N H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 104215 (in Chinese) [张旋, 廖清华, 陈淑文, 胡萍, 于天宝, 刘念华 2011 物理学报 **60** 104215]
- [4] Wang L W, Lou S Q, Chen W G, Lu W L, Wang X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 154207 (in Chinese) [王立文, 娄淑琴, 陈卫国, 鹿文亮, 王鑫 2012 物理学报 **61** 154207]
- [5] Peng G D, Tjugiarto T M, Chu P L 1990 *Electron. Lett.* **26** 682
- [6] Broderick N G R, Monro T M, Bennett P J, Richardson D J 1999 *Opt. Lett.* **24** 1395
- [7] Knight J C, Birks T A, Cregan R F, Russell P S J, de Sandro P D 1998 *Electron. Lett.* **34** 1347
- [8] Birks T A, Knight J C, Russell P S J 1997 *Opt. Lett.* **22** 961
- [9] Lou S Q, Fang H, Guo T Y, Jian S S 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 860
- [10] Zhang L, Yang C X 2003 *Opt. Express* **11** 1015
- [11] Saitoh K, Sato Y, Koshiha M 2004 *Opt. Express* **12** 3940
- [12] Rosa L, Poli F, Foroni M, Cucinotta A, Selleri S 2006 *Opt. Lett.* **31** 441
- [13] Li J H, Wang J Y, Wang R, Liu Y 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 795
- [14] Ren G B, Wang Z, Jian S S, Lou S Q 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2600 (in Chinese) [任国斌, 王智, 简水生, 娄淑琴 2004 物理学报 **53** 2600]
- [15] Lou S Q, Tang Z W, Wang L W 2011 *Appl. Opt.* **50** 2016
- [16] Guo H, Wu P, Yu T B, Liao Q H, Liu N H, Huang Y Z 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5547 (in Chinese) [郭浩, 吴评, 于天宝, 廖清华, 刘念华, 黄永箴 2010 物理学报 **59** 5547]

# Novel ultra-broadband polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber\*

Han Bo-Lin Lou Shu-Qin<sup>†</sup> Lu Wen-Liang Su Wei Zou Hui Wang Xin

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

(Received 26 July 2013; revised manuscript received 18 September 2013)

## Abstract

A novel broadband polarization beam splitter (PBS) based on dual-core photonic crystal fiber is proposed. With a full-vector finite element method, the effects of structural parameters of fiber on the bandwidth and length of PBS are systematically investigated in detail. Numerical results indicate that an increase in the index of fluorine-doped region can not only broaden the bandwidth but also shorten the length of PBS. An increase in the diameters of air hole and hole pitch in an optical fiber can broaden the bandwidth of PBS, however, lengthen the length of PBS at the same time. Thus, it is necessary to balance the bandwidth and length of PBS when selecting the fiber structure parameters. Through optimizing the fiber structure parameters mentioned above, a kind of ultra-broadband PBS is achieved. When the extinction ratio is greater than 20 dB, the length of PBS is as short as 7.362 mm and its bandwidth is more than 600 nm.

**Keywords:** photonic crystal fiber, polarization beam splitter, ultra-broadband, full-vector finite element method

**PACS:** 42.81.Qb, 42.79.Fm, 33.70.Jg, 02.70.Dh

**DOI:** 10.7498/aps.62.244202

---

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

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn