

# 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器

李绪友 许振龙\* 刘攀 凌卫伟 张志永

哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 提出了一种基于双芯光子晶体光纤(PCF)的具有短长度和超高消光比的偏振分束器,利用全矢量有限元法(FEM)对双芯PCF的耦合特性和偏振分束器的性能进行了数值研究。研究表明:增大纤芯间椭圆孔椭圆率、适当提高掺杂折射率可显著降低双芯PCF的耦合长度;基于该双芯PCF设计的偏振分束器在1.55  $\mu\text{m}$ 波长处,长度为0.58 mm时,可以实现 $x, y$ 偏振态的分离,消光比达到82.33 dB,消光比高于20 dB的带宽为70 nm,高于10 dB的带宽达到110 nm,覆盖了C+L波段。这为设计具有短长度、高消光比、宽带特性的PCF偏振分束器提供了一种新的结构。

**关键词** 光纤光学; 双芯光子晶体光纤; 偏振分束器; 全矢量有限元法; 超高消光比

中图分类号 TN253 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0605006

## Short Polarization Splitter Based on Dual-Core Photonic Crystal Fiber with Ultra-high Extinction Ratio

Li Xuyou Xu Zhenlong Liu Pan Ling Weiwei Zhang Zhiyong

College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

**Abstract** A polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber (PCF) with short-length and ultra-high extinction ratio is proposed, and the coupling property of the dual-core photonic crystal fiber and the performance of the splitter are studied numerically based on full vector finite element method (FEM). It is found that the coupling length of the dual-core PCF can be reduced obviously by enlarging the ellipticity of the hole between the two cores and adjusting the doped index properly, a polarization splitter based on the proposed dual-core PCF with a length of 0.58 mm is achieved that can separate the  $x$  polarized light and  $y$  polarization lights and the extinction ratio of the splitter can reach 82.33 dB at the wavelength of 1.55  $\mu\text{m}$ . Meanwhile, the bandwidth of extinction ratio more than 20 dB and 10 dB can be as wide as 70 nm and 110 nm, respectively, which covers the C+L wavelength bands. This proposed splitter provides a new structure for designing a splitter with short length, wide bandwidth and high extinction ratio.

**Key words** fiber optics; dual-core photonic crystal fiber; polarization splitter; full vector finite element method; ultra-high extinction ratio

**OCIS codes** 060.5259; 060.2300; 230.1360; 060.2330

## 1 引 言

偏振分束器是光学系统中的一种重要器件,可以将一束光分离为相互正交的两束偏振光,并能沿不同的路径传播,在光纤通信、光纤传感等领域中有重要的应用<sup>[1-2]</sup>。双芯光纤是光学系统中常用的偏振器件,然而普通双芯光纤在制作上较繁琐,且基于传统单模光纤的偏振分束器长度较长,通常在厘米量级,分光比较低,波长依赖性强,带宽窄<sup>[3]</sup>,这些弊端都限制了它的应用范围。小尺寸、高消光比、宽带宽一直是偏振分束器设计的目标<sup>[4]</sup>。而光子晶体光纤(PCFs)的出现为制作双芯光纤,设计新型的光纤偏振分束器提供了新思路<sup>[5]</sup>。光子晶体光纤又名微结构光纤或多孔光纤,是一种在光子带隙理论上发展起来的新型光纤<sup>[6-7]</sup>,由于结构设计的灵活性和独特的光学特性,自从20世纪末问世以来就得到了广泛的关注。通过调节包层与纤芯的结

收稿日期: 2015-01-09; 收到修改稿日期: 2015-02-12

作者简介: 李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺、光纤传感技术等方面的研究。E-mail: lixuyou@hrbeu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: xzslslg@163.com

构,可以使PCF具有无限单模传输,高双折射、高非线性,可调的色散特性等优点<sup>[8-10]</sup>。结构设计的灵活性为获得小尺寸、高消光比、宽带宽的PCF偏振分束器提供了可能。

目前PCF偏振分束器的设计主要基于两种机制:利用双芯PCF结构不对称引起的双折射效应,获得不同的耦合长度,实现不同偏振态的分离<sup>[11]</sup>;利用三芯PCF的谐振现象,使一个偏振方向产生谐振,而另一个偏振方向不产生谐振,从而达到偏振模式分离的目的<sup>[12-13]</sup>。到目前为止,基于PCF的偏振分束器已有很多相关报道。李等<sup>[14]</sup>提出了一种双芯为椭圆形的PCF偏振分束器结构,其1.55 μm波长处的长度为0.544 mm,消光比达到了-43.75 dB,消光比小于-10 dB的带宽为80 nm;韩等<sup>[15]</sup>通过在六边形PCF中用4个掺氟棒代替4个空气孔形成双芯获得了一种超宽带的PCF偏振分束器,在1.55 μm波长处,其长度为7.362 mm,消光比达到了46.63 dB,消光比高于20 dB的带宽达到了600 nm;Fan等<sup>[16]</sup>设计了基于高双折射双芯碲玻璃PCF的双通讯波段的偏振分束器,在1.55 μm波长处,其长度为14.662 mm,消光比达到了-81.0 dB,消光比低于-10 dB的带宽达到13 nm;Sheng等<sup>[17]</sup>设计了基于双椭圆纤芯PCF的偏振分束器,在1.55 μm波长处,其长度为0.775 μm,消光比达到了50 dB,消光比高于20 dB的带宽达到了32 nm。这些设计都各有特色,但是却没有达到同时具备尺寸小、高消光比、宽带宽特性的要求,性能有待提高。

提出了通过在常见双芯PCF的纤芯间椭圆孔内掺杂低折射率材料来改善耦合特性的双芯PCF方案,利用全矢量有限元分析法研究了纤芯间掺杂折射率对耦合特性的影响。并在提出的双芯PCF基础上设计出一种具有短长度、超高消光比和宽带宽特性的偏振分束器。在1.55 μm波长处,该偏振分束器消光比达到82.33 dB,消光比高于20 dB的带宽为70 nm,高于10 dB的带宽达到110 nm,而长度只有0.58 mm。能很好地满足偏振分束器小尺寸、高消光比、宽带宽的设计要求。

## 2 研究方法 with 结构模型

利用全矢量有限元方法(FEM)<sup>[18]</sup>进行研究。FEM的优点在于可以有效地识别光纤中的传输模式,对不同PCF的模型进行网格化处理,求解精度高,适于研究各种复杂结构的PCF。

研究的PCF截面结构如图1所示。该结构以常见六边形双芯PCF为基础, $\Lambda$ 为空气孔间距, $d_1, d_2, d_3$ 分别为包层不同空气孔孔径, $a$ 为双芯间掺杂椭圆孔 $x$ 方向轴长, $b$ 为 $y$ 方向轴长,定义椭圆率 $\eta=a/b$ 。 $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$ , $d_1=1.0 \mu\text{m}$ , $d_2=1.8 \mu\text{m}$ , $d_3=1.2 \mu\text{m}$ , $a=0.6 \mu\text{m}$ , $b=0.4 \mu\text{m}$ ,椭圆孔掺杂折射率为 $n_c=1.3$ ,其余气孔折射率为1,基底材料为熔融石英,折射率设为1.444,忽略波长对石英折射率的影响。 $A, B$ 分别为左右纤芯。

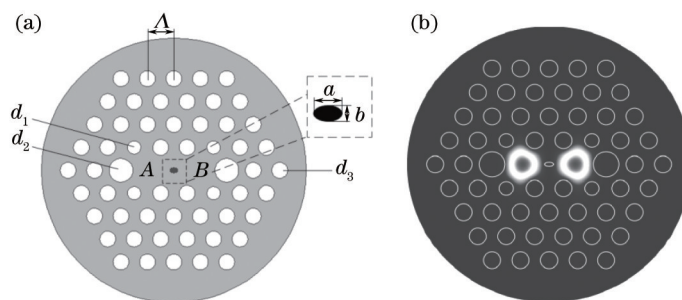


图1 (a) 双芯PCF结构; (b) 基模模场分布图

Fig.1 (a) Cross section of the dual-core PCF; (b) fundamental mode field at 1.55 μm of the PCF

通过合理设计光纤的包层结构和缺陷纤芯的排布,多芯PCF可以具有许多特殊的性质。对于具有两个相同纤芯的双芯光纤而言,耦合效应可以利用超模式的干涉来解释。当光从双芯光纤的一个纤芯入射时,在光纤中同时激起奇模、偶模两个超模式,每种模式在 $x$ 和 $y$ 两个偏振方向上同时存在,总的模场可以看作是二个偏振方向的偶模和奇模的叠加。

通常,奇模式和偶模式的传播常数不同,在两个模式干涉下,光的能量沿光纤传播方向在两个纤芯之间周期性地转移。不同偏振态模式的干涉不会引起纤芯间的功率转移,双芯PCF的芯间功率耦合是由相同方向偏振模式的干涉引起的<sup>[19]</sup>。当某个偏振光的能量从一个纤芯完全转移到另一个纤芯时,即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,偏振光在光纤中

所传播的距离定义为耦合长度<sup>[20]</sup>:

$$L_c^i = \frac{\pi}{\beta_{\text{even}}^i - \beta_{\text{odd}}^i} = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}}^i - n_{\text{odd}}^i)}, \quad (1)$$

式中  $i=x, y$ ,  $\beta_{\text{even}}^i$ ,  $\beta_{\text{odd}}^i$  分别是奇模式和偶模式的传播常数,  $n_{\text{odd}}^i$ ,  $n_{\text{even}}^i$  分别是奇模式和偶模式的有效折射率,  $\lambda$  是真空中波长。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, 耦合长度越短, 表明两个纤芯之间的耦合作用越强。

在忽略传输损耗的前提下, 假设光由  $A$  芯中注入, 在光纤中的传输距离为  $L$ , 则在  $A$  芯输出端处, 两个偏振光输出功率可表示<sup>[21]</sup>为

$$P_{\text{out}}^i = P_{\text{in}}^i \cos^2\left(\frac{\pi L}{2 L_c^i}\right), \quad (2)$$

式中  $i=x, y$ ,  $P_{\text{in}}^i$  为入射光功率,  $L_c^i$  为  $x, y$  偏振对应的耦合长度。

消光比( $ER, E_R$ )是衡量偏振分束器性能的一个重要参数, 用于描述同一输出端口的不同偏振光的分离程度。消光比定义<sup>[22]</sup>如下:

$$E_R = 10 \lg \frac{P_{\text{out}}^y}{P_{\text{out}}^x}, \quad (3)$$

式中  $P_{\text{out}}^x$ ,  $P_{\text{out}}^y$  分别为  $x, y$  偏振光的功率。  $E_R$  绝对值越高, 表明两偏振光分离越彻底, 偏振分束器性能越好。实际中, 当  $E_R$  为 20 dB 时, 意味着一个偏振光功率是另一偏振光功率的 100 倍, 这足以实现两个偏振光很好的分离<sup>[14]</sup>。

### 3 数值结果及分析

为了提高双芯 PCF 的耦合特性, 降低耦合长度, 提出了在双芯间椭圆孔内掺杂低折射率材料的方案, 做了大量的仿真实验和计算, 研究了掺杂折射率  $n_c$  及椭圆孔椭圆率  $\eta$  变化对耦合长度的影响, 并优选出满足偏振分束器短长度、高消光比、宽带宽要求的方案, 并对偏振分束器的性能进行了研究。

#### 3.1 $n_c$ 及 $\eta$ 对耦合特性的影响

为了研究  $n_c$  及  $\eta$  对光纤耦合特性的影响, 设定  $d_1=1.4 \mu\text{m}$ ,  $d_2=1.8 \mu\text{m}$ ,  $d_3=1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Lambda=2.0 \mu\text{m}$ 。在  $a=0.6 \mu\text{m}$ ,  $b=0.4 \mu\text{m}$ , 即  $\eta=1.5$  情况下,  $n_c$  取不同值时耦合长度变化情况如图 2(a) 所示。在  $n_c=1.3$ ,  $a=0.6 \mu\text{m}$  情况下,  $b$  分别取  $0.3\sim 0.6 \mu\text{m}$ , 即  $\eta$  分别为 2.0、1.5、1.2、1.0 时耦合长度变化情况如图 2(b) 所示。由于  $y$  偏振方向的变化情况与  $x$  方向是相似的, 为此只给出了  $x$  偏振方向的耦合长度变化情况。

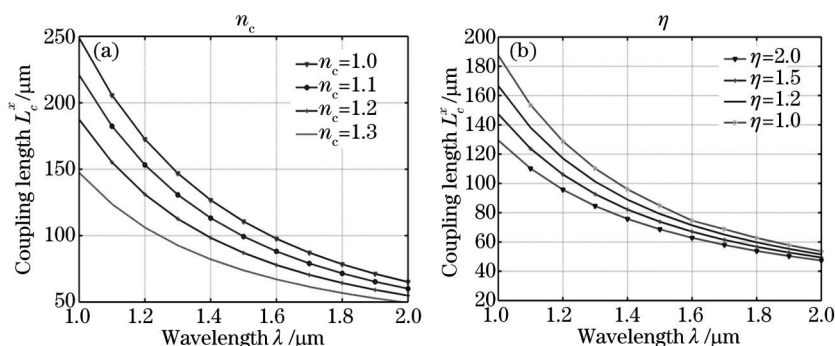


图 2 (a)  $n_c$  对光纤耦合长度的影响; (b)  $\eta$  对光纤耦合长度的影响

Fig.2 (a) Influence of  $n_c$  on the coupling length; (b) influence of  $\eta$  on the coupling length of the proposed dual-core PCF

由图 2(a) 可知, 在结构参数确定的情况下, 耦合长度随波长的增大而减小, 这是因为随着波长的增大, 纤芯能量向外扩散, 双芯间耦合变得容易, 双芯间耦合作用增强, 耦合长度减小; 在同一波长处, 耦合长度随  $n_c$  的增大而减小, 这是因为低折射率材料的掺杂降低了纤芯与包层的折射率差, 纤芯的束缚能力下降, 双芯间耦合作用增强, 因而耦合长度下降。由此可见, 纤芯间气孔低折射率材料的掺杂显著改善了光纤的耦合特性, 减小了耦合长度。但是掺杂折射率不宜太大, 否则光纤的双芯作用减弱, 直至消失。通过进一步的仿真

研究发现,在椭圆芯中掺杂折射率达到 1.32 时,大量的能量聚集在椭圆芯周围,能量损耗严重,光纤的双芯作用严重减弱,折射率继续增大时,这种现象更加明显。特别地,当掺杂折射率接近基底折射率时,能量全部集中在椭圆芯中,双芯作用彻底消失。因此,椭圆芯中的掺杂折射率不宜过高。

由图 2(b)可知,在结构参数确定的情况下,耦合长度随波长的增大而减小,现象及机理与图 2(a)中相似;而在同一波长处,耦合长度随椭圆率 $\eta$ 的增大而减小,这是因为, $\eta$ 的增加意味着双芯间小孔更“扁”,由于 PCF 双芯是沿  $x$  轴方向排列,双芯间的耦合是横向耦合,小孔越“扁”越有利于双芯间进行能量交换,因而随着椭圆率 $\eta$ 的增加,耦合作用增强,耦合长度减小。

由以上分析可知,提高双芯间小孔的椭圆率或适当提高掺杂折射率,均有利于提高耦合特性,降低耦合长度。

### 3.2 耦合长度

经过大量的仿真实验和计算发现,当 $\Lambda=2.0\ \mu\text{m}$ , $d_1=1.0\ \mu\text{m}$ , $d_2=1.8\ \mu\text{m}$ , $d_3=1.2\ \mu\text{m}$ , $a=0.6\ \mu\text{m}$ , $b=0.4\ \mu\text{m}$ , $n_c=1.3$ 时,双芯 PCF 具有较短的耦合长度,此时  $x, y$  偏振方向对应的耦合长度随波长变化情况如图 3 所示。

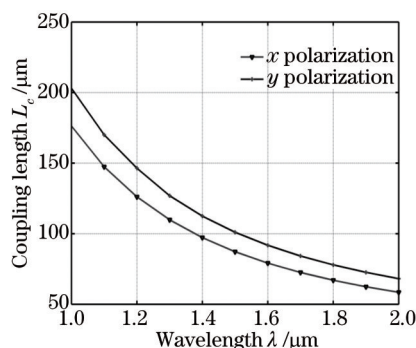


图 3  $x$  偏振方向及  $y$  偏振方向耦合长度随波长变化曲线

Fig.3 Variation of the coupling lengths of  $x$ -polarization and  $y$ -polarization with wavelength

由图 3 可知,在  $1.55\ \mu\text{m}$  波长处, $L_c^x=82.9\ \mu\text{m}$ , $L_c^y=96.7\ \mu\text{m}$ ,这意味着若光从  $A$  芯中射入,只需传输  $82.9\ \mu\text{m}$  的距离, $x$  偏振方向的光就能完全转移到  $B$  芯中,而只需传输  $96.7\ \mu\text{m}$  的距离, $y$  偏振方向的光就能完全转移到  $B$  芯中。同时,由图 3 可以看出,在同一波长处, $L_c^y$  始终大于  $L_c^x$ ,利用  $L_c^x$  与  $L_c^y$  的差值可以实现  $x$  偏振态和  $y$  偏振态的分离。当传输距离  $L$  满足<sup>[23]</sup>:

$$L = mL_c^x = nL_c^y, \quad (4)$$

式中  $m, n$  均为正整数,且  $m, n$  奇偶性相反时,可以实现  $x, y$  偏振态的分离,制成偏振分束器。依据此结构设计了偏振分束器。

### 3.3 偏振分束器长度

为了确定能实现  $x, y$  偏振光分离的偏振分束器传输长度  $L$ ,首先按照常见的方法,依据(2)式绘制了  $1.55\ \mu\text{m}$  波长处,在偏振分束器纤芯  $A$  输出端口中  $x, y$  偏振光的归一化功率随传输距离的变化情况,如图 4(a)所示。

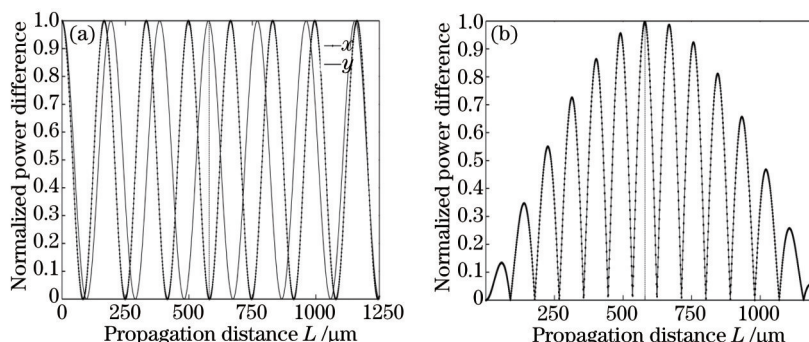


图 4 (a) 偏振光归一化功率随传输距离的变化曲线; (b) 归一化功率差值随传输距离的变化曲线

Fig.4 (a) Variation of the normalized power of  $x$ -polarization and  $y$ -polarization lights; (b) variation of the normalized power difference between  $x$ -polarization and  $y$ -polarization with propagation distance



由图4(a)可知,在 $L$ 为579~582  $\mu\text{m}$ 附近,实现 $x, y$ 偏振态的分离,可以经过计算找到满足(4)式的 $m, n, L$ 的解,这是通常所用的方法。然而这种方法具有缺陷,按照(4)式计算出来的偏振分束器长度,旨在追求中心波长处的高消光比,但是要想找到两个整数使得(4)式严格成立并不容易,实际中只能求得两个整数使得公式大约成立,因此这种方法繁琐且准确度不高。为了解决这一问题,运用另外一种更为简便而准确的方法来确定 $L$ 。

当 $x, y$ 偏振光实现分离时, $x, y$ 偏振光的归一化输出功率同时达到极值,一个达到极大值,另一个达到极小值,而两束光的归一化功率之差也达到极大值,因此可以用归一化功率差的峰值来确定分束器的长度,如下式<sup>[24]</sup>所示:

$$\Delta P = \left| \cos^2\left(\frac{\pi L}{2 L_c^x}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi L}{2 L_c^y}\right) \right|. \quad (5)$$

根据(5)式绘制的偏振光归一化功率差随传输长度变化曲线如图4(b)所示。由图4(b)可知,在 $L=580 \mu\text{m}$ 时,功率差曲线取得峰值, $x$ 偏振光功率取得极大值, $y$ 偏振光功率极小值。此时, $L=580 \mu\text{m} \approx 7L_c^x \approx 6L_c^y$ , $x$ 偏振光在 $B$ 芯中, $y$ 偏振光在 $A$ 芯中,实现了偏振光的分离,同时还满足了(4)式,验证了此方法的可行性,且与以往的方法相比,更为简便、准确。至此,得到了长度为0.58 mm的偏振分束器。

### 3.4 偏振分束器性能

下面对得到的PCF偏振分束器的性能进行研究。偏振分束器在1.55  $\mu\text{m}$ 附近消光比随波长变化的曲线如图5所示。

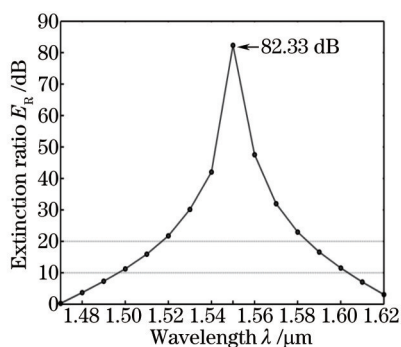


图5 PCF偏振分束器消光比随波长变化曲线

Fig.5 Variation of extinction ratio with wavelength in PCF polarization splitter

由图5可知,在1.55  $\mu\text{m}$ 波长处,消光比达到82.33 dB,消光比高于20 dB的带宽覆盖了1515~1585 nm之间的70 nm的带宽,高于10 dB的范围为1495~1605 nm,带宽宽达110 nm,覆盖了C+L波段,而长度只有0.58 mm。文中得到的偏振分束器,与文献[14,17]中报道的方案相比,在尺寸接近的情况下,具有更高的消光比,更宽的带宽;与文献[15-16]报道的方案相比,消光比更高,尺寸更小;同时该偏振分束器包层气孔只有4层,结构更为简单。由此可见,得到了一种具有小尺寸、高消光比、宽带特性的偏振分束器。

另外,由于常见的低折射率材料,如 $\text{MgF}_2$ 、 $\text{CaF}_2$ 等的折射率都要高于空气的折射率1,如 $\text{MgF}_2$ 在1.55  $\mu\text{m}$ 处折射率为1.39,单纯的掺杂氟化物不能得到低至1.1、1.2、1.3的折射率,而负折射率材料、超低折射率材料的出现,将此变为可能。2001年,美国加州大学的Shelby等<sup>[25]</sup>成功合成了负折射率材料,又称作左手材料,负折射率介质材料作为一种新型的人工电磁材料,近几年来引起了人们极大的兴趣。很多研究也已经将负折射率和零折射率的左手材料应用于光纤中,得到了特殊的性能<sup>[26-27]</sup>。因此也可以将负折射率材料与正折射率的氟材料相结合得到需要的低折射率1.1、1.2、1.3。

## 4 结 论

偏振分束器是光学系统中的一种重要器件,可以将一束光分离为相互正交的两束偏振光,并能沿不同的路径传播,在光纤通信、光纤传感等领域中有重要的应用。小尺寸、高消光比、宽带宽一直是偏振分束器设计的目标。设计了一种基于双芯PCF的偏振分束器,偏振分束器在1.55  $\mu\text{m}$ 波长处,消光比达到82.33 dB,消光比高于20 dB的带宽为70 nm,高于10 dB的带宽达到110 nm,覆盖了C+L波段,而长度只有0.58 mm,具

有短长度、超高消光比和宽带特性。这为设计具有短长度、高消光比、宽带特性的 PCF 偏振分束器提供了一种新的结构。

## 参 考 文 献

- 1 Galan J V, Sanchis P, Garcia J, *et al.*. Study of asymmetric silicon cross-slot waveguides for polarization diversity schemes[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(14): 2693-2696.
- 2 Lee Y W, Han K J, Lee B, *et al.*. Polarization independent all fiber multiwavelength-switchable filter based on a polarization-diversity loop configuration[J]. *Opt Express*, 2003, 11(25): 3359-3364.
- 3 Peng G D, Tjugiarto T, Chu P L. Polarisation beam splitting using twin elliptic core optical fibres[J]. *Electron Lett*, 1990, 26(10): 682-683.
- 4 Feng Ruijuan, Lou Shuqin, Lu Wenliang, *et al.*. Ultra-short polarization splitter based on dual-elliptical-core photonic crystal fiber [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 506-510.  
冯睿娟, 娄淑琴, 鹿文亮, 等. 超短双芯光子晶体光纤偏光分束器[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 506-510.
- 5 Mangan B J, Knight J C, Birks T A, *et al.*. Experimental study of dual-core photonic crystal fibre[J]. *Electron Lett*, 2000, 36(16): 1358-1359.
- 6 Philip R. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- 7 Jonathan C K. Photonic crystal fibers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 847-851.
- 8 Lu S, Li W, Guo H, *et al.*. Analysis of birefringent and dispersive properties of photonic crystal fibers[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(30): 5798-5802.
- 9 Liao J, Sun J, Du M, *et al.*. Highly nonlinear dispersion-flattened slotted spiral photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26(4): 380-383.
- 10 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.*. Numerical simulation and analysis of photonic crystal fibers with high nonlinearity and flattened-dispersion[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0505003.  
李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0505003.
- 11 Geng Kaisheng, Guan Jianfei. Coupling characteristics of dual-core photonic crystal fiber with rectangular lattice [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305007.  
耿开胜, 关建飞. 矩形晶格双芯光子晶体光纤的耦合特性[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305007.
- 12 Saitoh K, Sato Y, Koshiba M. Polarization splitter in three core photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(17): 3940-3946.
- 13 Ning Xiangping, Zhao Chunliu, Lang Tingting, *et al.*. Photonic crystal fiber polarizer based on coupling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060601.  
宁向平, 赵春柳, 郎婷婷, 等. 基于谐振耦合原理的光子晶体光纤偏振器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060601.
- 14 Li Rongmin, Cao Ye, Tong Zhengrong. Short length polarization splitter based on dual elliptical core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1005004.  
李荣敏, 曹 晔, 童峥嵘. 短长度的双椭圆纤芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1005004.
- 15 Han Bolin, Lou Shuqin, Lu Wenliang, *et al.*. Novel ultra-broadband polarization beam splitter based on dual-core photonic crystal fiber[J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62(24): 244202.  
韩博琳, 娄淑琴, 鹿文亮, 等. 新型超宽带双芯光子晶体光纤偏振分束器的研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(24): 244202.
- 16 Fan Z K, Li S G, Zhang W, *et al.*. Analysis of the polarization beam splitter in two communication bands based on ultrahigh birefringence dual-core tellurite glass photonic crystal fiber[J]. *Opt Commun*, 2014, 333: 26-31.
- 17 Sheng Z F, Wang J S, Feng R J. Design of a compact polarization splitter based on the dual-elliptical-core photonic crystal fiber[J]. *Infrared Phys Techn*, 2014, 67: 560-565.
- 18 Rahman B M A, Kejalakshmy N, Agrawal A, *et al.*. Characterizations of photonic crystal fibers by using a full-vectorial finite element method[C]. *The International Society for Optical Engineering*, 2006, 6369: 636904.
- 19 Wang Zhi, Jian Shuisheng, Lou Shuqin, *et al.*. Modal interference in dual-core photonic crystal fibers[J]. *Acta Physics Sinica*, 2004, 53(8): 2600-2606.  
王 智, 简水生, 娄淑琴, 等. 双芯光子晶体光纤中的模式干涉[J]. *物理学报*, 2004, 53(8): 2600-2606.
- 20 Zhang S S, Zhang W G, Geng P C. Design of single-polarization wavelength splitter based on photonic crystal fiber[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(36): 6576-6582.

- 21 Rosa L, Poli F, Foroni M, *et al.*. Polarization splitter based on a square-lattice photonic crystal fiber[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(4): 441-443.
- 22 Saitoh K, Sato Y, Koshiba M. Polarization splitter in three-core photonic crystal fibers[J]. *Opt Express*, 2004, 12(17): 3940-3946.
- 23 Fu Bo, Li Shuguang, Yao Yanyan, *et al.*. Coupling characteristics of dual-core high birefringence photonic crystal fibers[J]. *Acta Physics Sinica*, 2009, 58(11): 7708-7715.  
付 博, 李曙光, 姚艳艳, 等. 双芯高双折射光子晶体光纤耦合特性研究[J]. *物理学报*, 2009, 8(11): 7708-7715.
- 24 Feng Ruijuan. Investigation of Polarization Splitter Based on Photonic Crystal Fiber[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013: 28-30.  
冯睿娟. 基于光子晶体光纤的偏振分束器的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013: 28-30.
- 25 Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(5514): 77-79.
- 26 Hou Shanglin, Zhang Shujun, Li Suoping, *et al.*. Investigation on transmission characteristics of doubly cladding fiber with an inner cladding made of negative refractive-index material[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0506004.  
侯尚林, 张书军, 黎锁平, 等. 内包层为负折射率介质双包层光纤的传输特性的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0506004.
- 27 Huang Zhenyong. Dispersion and equal-inclination interference characteristics of left-handed materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 091602.  
黄振永. 左手材料的色散和等倾干涉[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 091602.

栏目编辑: 张浩佳