

两类超宽带单偏振单模光子晶体光纤的设计

姜凌红*

唐山学院智能与信息工程学院, 河北 唐山 063000

摘要 基于模式截止法, 设计了两种超宽带单偏振单模方形阵列液晶填充光子晶体光纤, 利用全矢量有限元法分析了光纤纤芯中额外空气孔、纤芯孔间距及纤芯液晶填充孔径对单偏振单模传输特性的影响。所设计的带宽可调谐的超宽带单芯单偏振单模光子晶体光纤, 其单偏振单模传输可在 $0.75\sim 2.59\ \mu\text{m}$ 波段范围内调谐, 限制损耗低于 $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 对应的单偏振单模传输带宽为 $970\ \text{nm}$ 。所设计的另一种光纤是在 $0.98\sim 1.74\ \mu\text{m}$ 波段范围内具有单偏振单模传输特性的双芯光子晶体光纤, 将其应用于波分复用系统的波分解复用器中, 制备了一种长度仅为 $1.06\ \text{mm}$ 的光子晶体光纤波分器, 实现了具有单偏振单模传输特性的 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 光分束。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 单偏振单模; 模式截止法; 液晶填充; 限制损耗

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.040602

Design of Two Kinds of Ultra-Broadband Single Polarization Single Mode Photonic Crystal Fibers

Jiang Linghong*

Intelligence and Information Engineering College, Tangshan University, Tangshan, Hebei 063000, China

Abstract Two kinds of ultra-broadband single polarization single mode (SPSM) square-lattice photonic crystal fibers with liquid crystal infiltrating are designed based on the mode cut-off method. The effects of the additional holes, the pitches in the fiber core, and the diameters of the liquid crystal filled holes on the SPSM operation are investigated with the full vector finite element method. The designed band-tunable ultra-broadband SPSM single-core photonic crystal fiber is obtained. Its SPSM operation can be tuned from $0.75\ \mu\text{m}$ to $2.59\ \mu\text{m}$, and the widest SPSM bandwidth is $970\ \text{nm}$ under a confinement loss of less than $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$. Moreover, the designed dual-core photonic crystal fiber is achieved with SPSM operation within the wavelength range from $0.98\ \mu\text{m}$ to $1.74\ \mu\text{m}$, which can be applied in the wavelength division demultiplexer. In addition, a photonic crystal fiber wavelength splitter with a length of only $1.06\ \text{mm}$ is fabricated, which can be used to realize the splitting of $1.31\ \mu\text{m}$ and $1.55\ \mu\text{m}$ lights with SPSM operation.

Key words fiber optics; photonic crystal fiber; single polarization single mode; mode cut-off method; liquid crystal infiltrating; confinement loss

OCIS codes 060.5295; 060.2420; 060.2430; 230.2285

1 引言

单偏振单模 (SPSM) 光纤^[1] 是一种仅支持单一偏振态和单一模式传输的光纤, 可以有效消除偏振模式色散、偏振串扰以及偏振相关损耗, 能够保证偏振相关的光纤传输系统以及偏振相关器件的稳定性, 因此在未来相干光通信系统和超宽激光偏振光

源等领域具有广阔的应用前景。超宽 SPSM 传输是实现相干光通信系统超高传输速率和超大容量传输的前提之一, 高双折射是完成宽带 SPSM 传输的必要条件。传统的保偏光纤模式双折射主要是由材料内部应力的不均匀性、外界电磁场和椭圆形纤芯几何形状的不对称等原因形成, 其双折射值为 $10^{-4}\sim 10^{-6}$, 并且容易受压力、温度等的影响, 因此

收稿日期: 2018-07-24; 修回日期: 2018-08-24; 录用日期: 2018-09-04

基金项目: 唐山市科技计划项目 (17130254a)

* E-mail: nolshajia@163.com

难以满足当今偏振依赖光通信系统和光器件的需求。光子晶体光纤(PCF)^[2-5]包层由轴向结构不变的周期性分布空气孔组成,可通过改变光纤结构参数,以及在空气孔中填充各向异性材料实现更高的双折射,从而获得带宽更宽的单偏振单模光子晶体光纤(SPSM-PCF),因此被广泛应用于偏振相关的激光器^[6]、光纤陀螺仪^[7]、光纤传感器^[8]等中。2003年,Saitoh等^[9]首次设计了带宽为120 nm的 SPSM-PCF。为了获得带宽更宽的 SPSM 传输,在 PCF 纤芯或包层中引入方形阵列、椭圆孔、小空气孔等^[10-15]可以实现更高的双折射,从而提高 SPSM 传输带宽。Zhang等^[13]利用谐振耦合法设计了方形阵列的宽带 SPSM-PCF,得到了波长在 1.55~1.96 μm 范围内的 SPSM 传输。Lu等^[14]设计了带宽为 830 nm 的 SPSM-PCF,其包层由方形阵列的椭圆空气孔组成,增加了光纤拉制的难度。Lu等^[15]设计了纤芯由 3 个微小空气孔组成的带宽为 1600 nm 的 SPSM-PCF。另外,也有相关研究报道了双芯 SPSM-PCF,并将其应用于波分复用通信系统中。Yue等^[16]在 2006 年首次设计了带宽为 200 nm 的具有 SPSM 传输特性的双芯 PCF 耦合器。Zhang等^[17]设计了方形阵列的双芯 SPSM-PCF,得到了一种长度为 10.7 mm 具有 SPSM 传输特性的 1.31 μm /1.55 μm 分离的 PCF 波分器。汪徐德等^[18]设计了基于双芯 PCF 的 1.31 μm /1.55 μm , 0.85 μm /1.55 μm , 0.98 μm /1.55 μm 超微型波分复用器件,然而并没有考虑通信波长的 SPSM 传输特性。李丹^[19]设计了光纤长度为 11.395 mm 的具有 SPSM 传输特性的 1.31 μm /1.55 μm 分离的 PCF 波分器。Wang等^[20]设计了双芯 SPSM-PCF,

分别获得了波长为 1.31 μm 或 1.55 μm 且带宽大于 200 nm 的 SPSM 传输。

液晶材料折射率远远高于石英材料,因此液晶的引入很大程度地保证了 PCF 的全内反射导光。本文通过在方形阵列 PCF 纤芯区域中分别引入一个和两个液晶填充孔,从而形成高保偏单芯 PCF 和双芯 PCF,利用模式截止法分别设计出单芯宽带 SPSM-PCF 和双芯宽带 SPSM-PCF。单芯 PCF 可获得限制损耗低于 0.1 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 、带宽为 1200 nm 的超宽 SPSM 传输,可将其应用于起偏器、检偏器和超宽激光偏振光源等领域。双芯 SPSM-PCF 保证了通信波长 1.31 μm 和 1.55 μm 同时具有 SPSM 传输特性,将其用于波分复用传输系统的波分器中,得到了一种通信波长 1.31 μm 和 1.55 μm 光分离的微型化双芯 SPSM-PCF 波分器。

2 理论模型

图 1 为两种类型的 SPSM-PCFs 横截面图,分别称之为 Type1-PCF 和 Type2-PCF。Type1-PCF 包层由方形阵列空气孔组成,其包层孔间距和空气孔大小分别为 Λ 和 d ,为了获得高双折射,纤芯附近有 4 个增大孔,其孔径为 d_2 ;纤芯区域由两个孔径 $d_1=d$ 的空气孔和一个中心液晶填充孔组成,其中黑色区域填充液晶,液晶填充孔径为 d_0 ,纤芯区域空气孔与液晶孔间距为 Λ_1 。Type2-PCF 包层结构、孔径、孔间距和 Type1-PCF 相同,在纤芯区域有 8 个增大孔,其孔径为 d_2 ,距离中心空气孔为 Λ_2 处的两处黑色区域是两个液晶填充孔,从而形成了双芯模式,且两个液晶填充孔和中心空气孔孔径都为 d_0 。



图 1 两种类型 SPSM-PCFs 横截面图。(a)类型一;(b)类型二

Fig. 1 Cross sections of two kinds of SPSM-PCFs. (a) Type 1; (b) type 2

Russell等^[21]在 2003 年报道了利用常规的堆积法制作工艺实现了方形阵列 PCF 的控制。这里

两种类型的方形阵列 PCF 光纤基底材料都由石英组成,其色散方程可以由石英材料的 Sellmeier 方程

表示^[22]。纤芯填充液晶材料为型号 E7 的向列相液晶,由柯西方程表示其非常光 n_e 和寻常光折射率 n_o ,不同液晶材料色散方程由对应的介电常数表示^[23]。图 2 为不同温度下的 E7 液晶 o 光(寻常光)和 e 光(非常光)折射率随波长的变化,由图可知,o 光和 e 光的折射率有很大的差距,表明液晶材料具有高双折射特性,通过在 PCF 纤芯中填充高双折射液晶,将两偏振方向纤芯基模模式的有效折射率有效分开,从而产生高双折射液晶填充的 PCF。利用高双折射特性和模式截止法,获得了宽带 SPSM 传输。在液晶填充的 PCF 中,向列型液晶分子的旋转角度为 90° 时,y 偏振方向纤芯基模有效折射率等于液晶旋转角度为 0° 时 x 偏振方向纤芯基模有效折射率^[23],只是改变了偏振转换,不影响 SPSM 传输带宽,因此文中固定向列型液晶分子的旋转角度为 90° ,并将温度固定为 $T=25^\circ\text{C}$ 。

利用有限元模拟可以获得 PCF 纤芯基模和包层模式有效传播常数。光纤纤芯模式损耗为

$$\alpha = \frac{20}{\ln 10} \times 10^9 \times \frac{2\pi}{\lambda} \text{Im } n_{\text{eff}}, \quad (1)$$

式中: λ 为光的传输波长; $\text{Im } n_{\text{eff}}$ 为模式有效折射率虚部。光纤损耗单位为 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 。

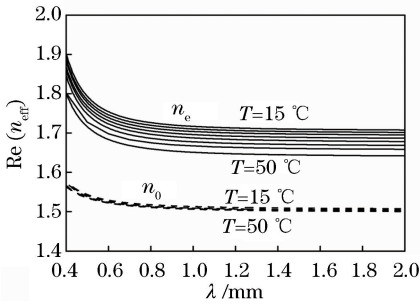


图 2 不同温度下的 E7 液晶 o 光和 e 光折射率随波长的变化
Fig. 2 Refractive index of o light and e light in E7 liquid crystal versus wavelength under different temperatures

3 数值模拟与结构分析

3.1 单芯 SPSM-PCF

基于模式截止法实现 SPSM 传输的原理是使纤芯模式折射率低于包层模式有效折射率的某一偏振方向被截止,纤芯模式折射率高于包层模式有效折射率的另一偏振方向被传输,从而保证单一线偏振态传输。包层模式有效折射率是根据包层基空间填充模(FSM)的等效折射率计算。图 3 为波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 的包层 FSM 模场分布图,由于方形列阵 PCF 两偏振方向是对称的,因此两偏振方向的 FSM

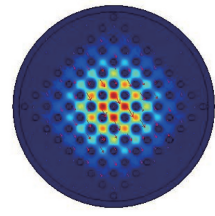


图 3 波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 处的 FSM 模场分布图
Fig. 3 Field distribution of FSM mode at $1.31\ \mu\text{m}$ wavelength

模式有效折射率简并。

图 4 为附加空气孔对液晶填充 PCF 有效折射率的影响,比较分析了 $d=1\ \mu\text{m}$, $\Lambda=2.5\ \mu\text{m}$, $d_2=2.2\ \mu\text{m}$ 时,纤芯区域仅有一个液晶孔 $d_0=0.7\ \mu\text{m}$ 和在液晶孔附近增加两空气孔 $d_1=1\ \mu\text{m}$ 时所产生的 SPSM 传输特性。为了获得单模传输特性,图中还添加了二阶模 LP_{11}^y 的有效折射率随波长的变化,通过计算可知,在高阶模中,y 偏振方向二阶模 LP_{11}^y 的有效折射率最大,因此只要二阶模 LP_{11}^y 被截止,就能满足基模的单模传输条件。由图可知,y 偏振方向纤芯模式的有效折射率远大于 x 偏振方向纤芯模式有效折射率,SPSM 传输带宽内仅存在 y 偏振方向纤芯模的导波模式。 $d_1=1\ \mu\text{m}$ 和 $d_1=0\ \mu\text{m}$ 的两种类型光纤二阶模 LP_{11}^y 的截止波长都低于 x 偏振纤芯模的截止波长,因此图中所示的单偏振区域内都具有单模传输特性。当纤芯区域仅有一个空气孔时,在 $1.75\sim 3.05\ \mu\text{m}$ 波段范围内具有 SPSM 传输特性。由图 4 可见,所有模式的有效折射率都随着波长的增大而减小,纤芯区域引入两个额外空气孔,有效地降低了纤芯模式的有效折射率,而包层 FSM 模式有效折射率保持不变,模式截止的波长,即两偏振方向纤芯模式有效折射率小于 FSM 模式有效折射率的截止波长点都向短波长方向移动,在纤芯

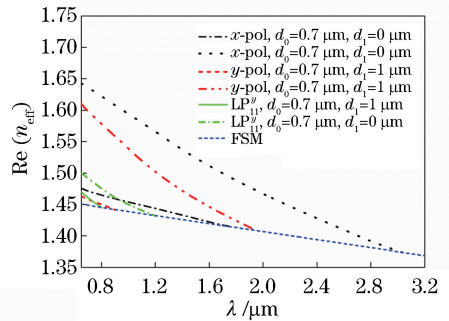


图 4 附加空气孔对液晶填充 PCF 有效折射率的影响
Fig. 4 Effect of additional air hole on effective index of liquid-crystal-filled PCF

区域额外增加两空气孔使其 SPSM 传输范围向短波长方向移动,其 SPSM 传输移至 $0.90\sim 1.95\ \mu\text{m}$ 波段范围内,因此通过增加额外空气孔可以有效地将 SPSM 传输波段移至通信波段范围内。

接着分析液晶孔的改变对光纤 SPSM 传输的影响。PCF 的 SPSM 传输特性如图 5 所示。光纤其他结构参数 $d=1\ \mu\text{m}$, $\Lambda=2.5\ \mu\text{m}$, $d_2=2.2\ \mu\text{m}$, $d_1=1\ \mu\text{m}$, $\Lambda_1=1.2\ \mu\text{m}$ 固定不变,图 5(a)为液晶孔径 d_0 分别为 $0.70, 0.85, 1.00\ \mu\text{m}$ 时 PCF 的 SPSM 传输特性。图 5(a)插图为二阶模 LP_{11}^y 、 x 偏振纤芯基模 LP_{01}^x 、 y 偏振方向纤芯基模 LP_{01}^y 截止波长随 d_0 的变化,由图可知,二阶模 LP_{11}^y 截止波长低于 LP_{01}^x 模的截止波长,所获得的单偏振传输区域都具有单模传输特性。随着液晶孔的增大,其 SPSM 传输波段分别为 $0.90\sim 1.95, 1.03\sim 2.26, 1.13\sim 2.59\ \mu\text{m}$, 对应的 SPSM 传输带宽分别为 $1050, 1230, 1460\ \text{nm}$ 。由此可知,随着液晶孔径的增大,PCF 的 SPSM 传输带宽增大且其传输波段移至长波长范围内。

图 5(b)为仅有导模模式的 y 偏振方向纤芯模式损耗随着波长的变化,为了便于观察,其纵轴采用损耗的对数形式。由图可见, d_0 分别为 $0.70, 0.85, 1.00\ \mu\text{m}$ 时,对应 $\alpha\leq 0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 的截止波长分别为 $1.77, 1.96, 2.10\ \mu\text{m}$, 因此对应的限制损耗低于 $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 且能够保证 SPSM 传输的波段分别为 $0.90\sim 1.77, 1.03\sim 1.96, 1.13\sim 2.10\ \mu\text{m}$ 。另外,为了验证 PCF 的单偏振传输特性,图 5(b)中的插图给出了 $d_0=1\ \mu\text{m}$ 时被截止模 x 偏振方向纤芯模限制损耗随波长的变化。为了和 y 偏振方向纤芯模损耗作对比,其纵轴也采用损耗的对数形式。由图可见, x 偏振方向截止模损耗在单偏振传输波段内损耗大于 $10^4\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$, 而 y 偏振方向导波模损耗在单偏振传输波段小于 $10^{-1}\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$, 因此在所获得的单偏振传输波段范围内,两偏振方向纤芯模损耗比大于 10^5 , 其两偏振方向消光比超过 $20\ \text{dB}$, 足以实现两偏振光的分离,保证了单偏振传输特性。

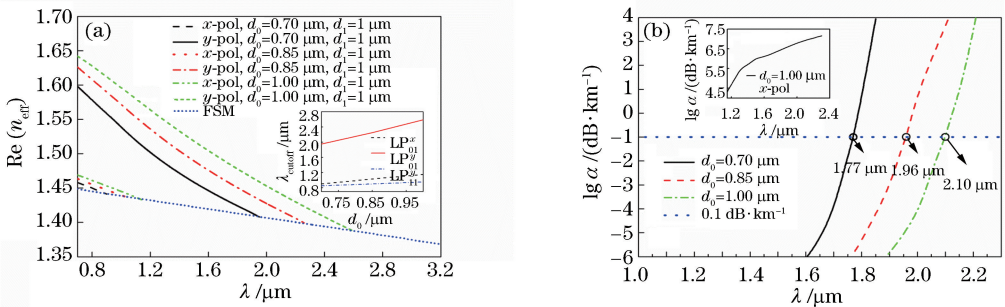


图 5 PCF 的 SPSM 传输特性。(a) 波长相关的光纤纤芯的有效折射率;(b) 波长相关的限制损耗随 d_0 的变化
Fig. 5 SPSM transmission characteristics of PCF. (a) Wavelength-dependent effective index of fiber core;
(b) wavelength-dependent confinement loss versus d_0

纤芯区域额外空气孔的引入可以很大程度地改变 SPSM 传输波段范围,而 Λ_1 的改变也必将影响 SPSM 传输。当其他结构参数固定为 $d=1\ \mu\text{m}$, $\Lambda=2.5\ \mu\text{m}$, $d_2=2.2\ \mu\text{m}$, $d_1=1\ \mu\text{m}$, $d_0=0.7\ \mu\text{m}$ 时,PCF 的 SPSM 传输特性如图 6 所示。图 6(a)分析了纤芯区域孔间距 Λ_1 的改变对光纤 SPSM 传输特性的影响,图 6(a)的插图给出了二阶模 LP_{11}^y 、 x 偏振纤芯基模 LP_{01}^x 、 y 偏振方向纤芯基模 LP_{01}^y 截止波长随 d_0 的变化, LP_{11}^y 模的截止波长低于 LP_{01}^x 模的截止波长,所获得的单偏振传输区域同样都具有单模传输特性。由图可见, Λ_1 分别为 $1.0, 1.1, 1.2\ \mu\text{m}$ 时,PCF 的 SPSM 传输波段分别为 $0.75\sim 1.75, 0.84\sim 1.85, 0.9\sim 1.95\ \mu\text{m}$, 对应的 SPSM 传输带宽分别为 $1000, 1001, 1005\ \text{nm}$ 。由此可知,随着纤芯

区域孔间距 Λ_1 的增大,SPSM 传输波段向长波长方向移动,但其 SPSM 传输带宽几乎不变。图 6(b)给出了对应的 SPSM 传输波段的 y 偏振方向纤芯模损耗随波长的变化。由图可见, Λ_1 分别为 $1.0, 1.1, 1.2\ \mu\text{m}$ 时,对应 y 偏振方向纤芯模式损耗小于等于 $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 的截止波长分别为 $1.60, 1.70, 1.77\ \mu\text{m}$, 因此对应的限制损耗低于 $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 且能够保证 SPSM 传输的波段分别为 $0.75\sim 1.60, 0.84\sim 1.70, 0.90\sim 1.77\ \mu\text{m}$ 。相比文献[11-14]报道的方形阵列 SPSM-PCF 和椭圆孔 SPSM-PCF,文中所设计的 SPSM-PCF 利用液晶本身所具有的高双折射获得了带宽更宽的 SPSM 传输,当 $\Lambda=2.5\ \mu\text{m}$, $d_0=d_1=d=1\ \mu\text{m}$ 时,PCF 中仅需要有两个不同的结构参数即能获得带宽高达 $1460\ \text{nm}$ 的

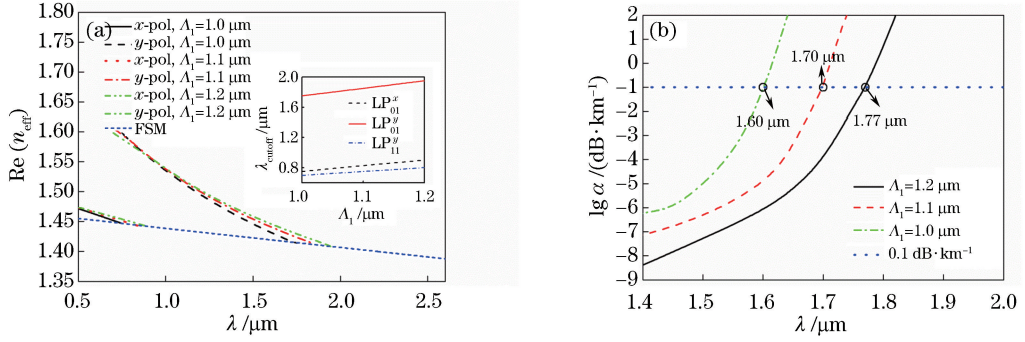


图6 PCF的SPSM传输特性。(a)波长相关的光纤纤芯的有效折射率;(b)波长相关的限制损耗随 Λ_1 的变化
Fig. 6 SPSM transmission characteristics of PCF. (a) Wavelength-dependent effective index of fiber core;
(b) wavelength-dependent confinement loss versus Λ_1

SPSM传输,而且纤芯区域的空气孔的引入有效地将SPSM传输波段移至短波段范围内,使其具有灵活可调谐的SPSM传输特性。

纤芯区域附近大孔 d_2 的引入是为了获得更高的双折射并且形成更低的限制损耗,但 d_2 的增大会给拉制带来困难。图7为光纤SPSM传输特性随 d_2 的变化,其中 y 偏振纤芯模的截止波长点的限制损耗低于 $0.1 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 。由图可知,随着 d_2 的增大,两偏振纤芯基模的截止波长都向短波长方向移动,这是由于 d_2 的增大降低了两偏振方向纤芯模式有效折射率。当 d_2 分别为 $1.0, 1.6, 2.2 \mu\text{m}$ 时,限制损耗低于 $0.1 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 的SPSM传输波段分别为 $1.46\sim 2.30, 1.21\sim 2.15, 1.13\sim 2.10 \mu\text{m}$ 。因此,为了增大制备PCF的可行性, d_2 选取和包层孔径相同的尺寸($d_2 = d = 1 \mu\text{m}$),此时,也能获得限制损耗低于 $0.1 \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 、带宽为 840 nm 的SPSM传输特性。

3.2 双芯 SPSM-PCF

在单芯 SPSM-PCF 的基础上改变纤芯区域孔间距为 $\Lambda_2 = \sqrt{2}\Lambda_1/2$,在两个额外空气孔中填充液晶,从而形成纤芯 A 和纤芯 B。结构参数 Λ_2, d_1, d_0 的改变对单芯和双芯 PCF 的 SPSM 传输带宽的影响相

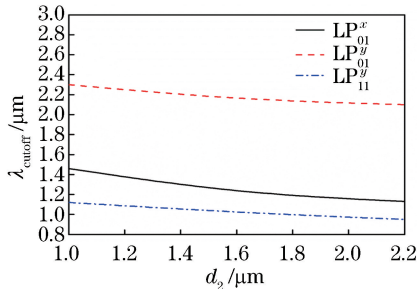


图7 光纤 SPSM 传输特性随 d_2 的变化

Fig. 7 SPSM transmission characteristic of PCF versus d_2

同。而双芯 PCF 传输模式和单芯 PCF 传输不同的是:双芯模式光纤会产生 4 个超模,分别是 x 偏振方向的纤芯奇模 $E_x^{\text{odd}}(x, y)$ 和偶模 $E_x^{\text{even}}(x, y)$, y 偏振方向的纤芯奇模 $E_y^{\text{odd}}(x, y)$ 和偶模 $E_y^{\text{even}}(x, y)$,even模和odd模分别指偶模和奇模。为了满足在单一偏振方向的奇模和偶模能够发生模式耦合,要求某一偏振方向的奇模和偶模有效折射率都低于包层 FSM 模式有效折射率而被截止,另一偏振方向的奇模和偶模有效折射率都应该大于包层 FSM 模式有效折射率而继续传输,从而实现双芯 PCF 的单偏振传输,这种双芯 SPSM-PCF 判定的标准与文献[20]一致。这里双芯 PCF 在波长 $1.31 \mu\text{m}$ 处的 $E_x^{\text{even}}(x, y)$ 和 $E_x^{\text{odd}}(x, y)$ 的有效折射率分别为 1.426398 和 1.420691 , $E_y^{\text{even}}(x, y)$ 和 $E_y^{\text{odd}}(x, y)$ 的有效折射率分别为 1.456048 和 1.455431 ,包层 FSM 有效折射率为 1.435424 ,因此 x 偏振方向的超模有效折射率由于低于包层 FSM 有效折射率都被截止,而 y 偏振方向的超模有效折射率因都高于 FSM 有效折射率而可继续传输。

图8为双芯 PCF 两偏振方向的奇模和偶模。图8(a)为 $d = 1 \mu\text{m}, \Lambda = 2.5 \mu\text{m}, \Lambda_2 = \sqrt{2}\Lambda_1/2, d_2 = 1.6 \mu\text{m}, d_0 = 0.55 \mu\text{m}$ 时,双芯 PCF 的 4 个超模模式有效折射率随波长的变化,由图可知, x 偏振方向奇模和偶模的截止波长分别是 $0.93 \mu\text{m}$ 和 $0.98 \mu\text{m}$,而 y 偏振方向的奇模和偶模的截止波长分别是 $1.74 \mu\text{m}$ 和 $2.0 \mu\text{m}$ 。双芯 PCF 类似单芯 PCF,其二阶模截止波长都低于 x 偏振方向超模截止波长,所获得的单偏振区域都具有单模传输特性。为了满足 SPSM 传输,必须使 x 偏振方向的奇模和偶模都截止,而 y 偏振方向的两个超模都能够传输,因此双芯 PCF 的 SPSM 传输波段在波长 $0.98 \mu\text{m} \sim 1.74 \mu\text{m}$ 范围内,其 SPSM 传输带宽达到 760 nm 并

且同时包括 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 两个光通信窗口。图 8(a)插图给出了波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 处仅存的导模模式 y 偏振方向奇模和偶模模场分布图,两种模式均被很好地限制在纤芯内传播。图 8(b)给出了双芯 SPSM-PCF 的限制损耗随波长的变化,由图可知, y 偏振方向奇模和偶模的限制损耗低于 $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$

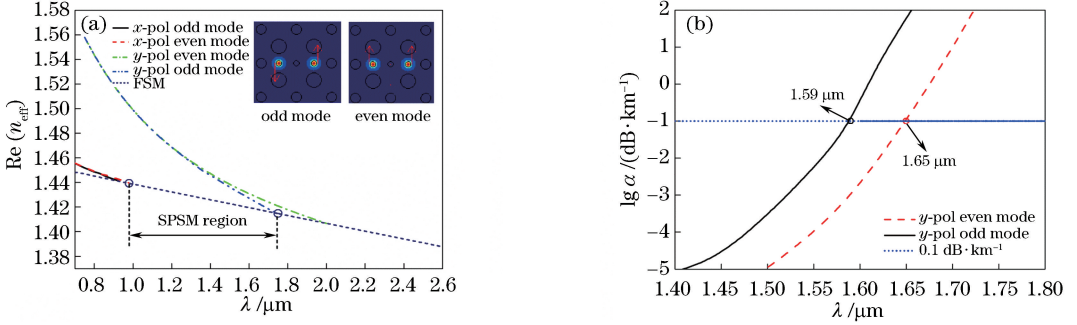


图 8 双芯 PCF 两偏振方向的奇模和偶模。(a)有效折射率随波长的变化;(b)限制损耗随波长的变化

Fig. 8 Even and odd modes of dual-core PCF in two polarization directions. (a) Effective refractive index versus wavelength; (b) confinement loss versus wavelength

耦合长度方程^[17]为

$$L_c^y = \frac{\lambda}{2(n_{\text{even}}^y - n_{\text{odd}}^y)}, \quad (2)$$

式中: n_{odd}^y 和 n_{even}^y 分别表示 y 偏振方向奇模和偶模的有效折射率。通过耦合方程可分别计算出通信波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 处仅存的 y 偏振方向奇模和偶模的耦合长度。当光纤长度满足 $z = mL_c^y(\lambda_1) = nL_c^y(\lambda_2)$,且正整数 m 和 n 满足奇偶性相反的条件时,就可以制成 PCF 波分器。

表 1 分别给出了 $d = 1\ \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.5\ \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = \sqrt{2}\Lambda_1/2$ 固定不变时, d_2 和 d_0 为不同值时对应的两通信波长谐振耦合长度比值。由表 1 可知,随着液晶孔 d_0 的增大,通信波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 的耦合长度都增大,且两个波长的耦合长度比值也随之增大。随着纤芯附近大孔 d_2 的增大,通信波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 耦合长度增大而通信波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 的耦合长度减小,且两通信波长处的耦合长度比值增大。为了获得器件长度更短的具有 SPSM 传输特性的

表 1 d_2 和 d_0 对波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 处谐振耦合长度的影响

Table 1 Effects of d_2 and d_0 on coupling lengths at resonance wavelengths of $1.31\ \mu\text{m}$ and $1.55\ \mu\text{m}$

$d_2/\mu\text{m}$	$L_c^y(1.31)/L_c^y(1.55)$	$d_0/\mu\text{m}$	$L_c^y(1.31)/L_c^y(1.55)$
1.4	3.94 (1.053/0.267)	0.5	3.25 (0.569/0.175)
1.5	4.02 (1.061/0.264)	0.55	4.02 (1.061/0.264)
1.6	4.14 (1.067/0.258)	0.6	4.85 (1.973/0.407)
1.7	4.37 (1.070/0.245)	0.65	5.65 (3.579/0.634)

的截止波长分别为 $1.62\ \mu\text{m}$ 和 $1.69\ \mu\text{m}$ 。通信波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的限制损耗远远低于 $0.1\ \text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 。利用模式耦合理论,将两个通信波长具有 SPSM 传输特性的双芯 PCF 用于波分复用通信系统的波分器中,可同时实现避免偏振相关损耗和偏振模式色散的 $1.31\ \mu\text{m}/1.55\ \mu\text{m}$ 波长光分离。

PCF 波分器,选定 $d = 1\ \mu\text{m}$, $\Lambda = 2.5\ \mu\text{m}$, $\Lambda_2 = \sqrt{2}\Lambda_1/2$, $d_2 = 1.6\ \mu\text{m}$, $d_0 = 0.55\ \mu\text{m}$,通过耦合方程(2)式计算可得两通信波长在 y 偏振方向耦合长度分别为: $L_c^y(1.31) = 1.061\ \text{mm}$, $L_c^y(1.55) = 0.264\ \text{mm}$ 。波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的 y 偏振方向耦合长度正好满足 $L_c^y(1.31) = 4L_c^y(1.55)$,当光纤长度设置为 $z = L_c^y(1.31) = 4L_c^y(1.55) = 1.06\ \text{mm}$ 时,可实现在保证 SPSM 传输的条件下两通信波长分别在两个纤芯传输。根据通信波长在两个纤芯对应的归一化功率判断其波分状态,由于两个纤芯是完全对称的,因此只需要考虑某一纤芯处 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 归一化功率随传输长度的改变。归一化功率可表示为^[17]

$$P_{\text{out}, A} = P_{\text{in}} \cos^2 \left[\frac{\pi}{2} \frac{z}{L_c^y(\lambda_i)} \right]. \quad (3)$$

图 9 为波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 处双芯 SPSM-PCF 分波器的归一化功率随 z 的变化,由图可知,当光纤传输距离为 $1.06\ \text{mm}$ 时,波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 的归一化功率最小,而波长 $1.55\ \mu\text{m}$ 处的归一化功率达到最大。当包含通信波长 $1.31\ \mu\text{m}$ 和 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光同时进入纤芯 A 传输 $1.06\ \text{mm}$ 后, $1.31\ \mu\text{m}$ 的光完全耦合到另一个纤芯 B 中,而 $1.55\ \mu\text{m}$ 的光继续在纤芯 A 中传输,从而实现了两个通信波长的光分离,可将其用于波分复用系统的波分器中。相比文献^[17]和^[19]中所报道的 SPSM-PCF 波分器,这里制备所得 SPSM-PCF 波分器器件长度更短,实现

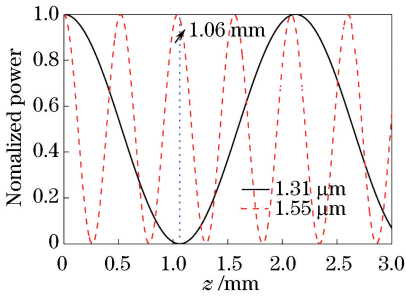


图9 波长 1.31 μm 和 1.55 μm 处双芯 SPSM-PCF 分波器的归一化功率随 z 的分布

Fig. 9 Normalized power of dual-core SPSM-PCF wavelength splitter at 1.31 μm and 1.55 μm versus z

了光纤器件的微型化。

3.3 容差性分析

表 2 为两种类型 PCF 结构的容差性分析,分析

表 2 两种类型 PCF 结构的容差性分析

Table 2 Tolerance analysis of two kinds of PCFs

Structure parameter variation	SPSM operation bandwidth of single-core PCF	SPSM operation bandwidth of dual-core PCF
$\Delta d_2 = 0, \Delta d_0 = 0, \Delta \Lambda_1 = 0$	1460 nm (1.13-2.59 μm)	760 nm (0.98-1.74 μm)
$\Delta d_2 / d_2 = +1\%$	1450 nm (1.13-2.58 μm)	750 nm (0.98-1.73 μm)
$\Delta d_2 / d_2 = -1\%$	1450 nm (1.15-2.60 μm)	770 nm (0.98-1.75 μm)
$\Delta d_0 / d_0 = +1\%$	1470 nm (1.15-2.62 μm)	780 nm (0.98-1.76 μm)
$\Delta d_0 / d_0 = -1\%$	1430 nm (1.12-2.55 μm)	750 nm (0.98-1.73 μm)
$\Delta \Lambda_1 / \Lambda_1 = +1\%$	1450 nm (1.15-2.60 μm)	750 nm (0.98-1.73 μm)
$\Delta \Lambda_1 / \Lambda_1 = -1\%$	1460 nm (1.12-2.58 μm)	740 nm (0.98-1.72 μm)
$\Delta \Lambda_1 / \Lambda_1 = +1\%, \Delta d_2 / d_2 = +1\%, \Delta d_0 / d_0 = +1\%$	1460 nm (1.15-2.61 μm)	690 nm (1.05-1.74 μm)
$\Delta \Lambda_1 / \Lambda_1 = -1\%, \Delta d_2 / d_2 = -1\%, \Delta d_0 / d_0 = -1\%$	1440 nm (1.11-2.55 μm)	670 nm (1.06-1.73 μm)

4 结 论

通过在方形阵列 PCF 纤芯中填充各向异性材料液晶,提高了 PCF 的偏振保持能力。基于模式截止法原理和利用有限元法设计了两种类型的带宽可调谐的超宽带 SPSM-PCF:一种是单芯 SPSM-PCF,可在 0.75~2.59 μm 波段范围内实现 SPSM 传输带宽的转移,通过改变液晶孔和纤芯孔径的大小,可以实现 0.75~1.75 μm 、1.13~2.59 μm 的 SPSM 传输,模拟了 SPSM-PCF 损耗特性,限制损耗低于 0.1 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$ 的 SPSM 传输带宽可达 970 nm,该光纤可应用于起偏器、检偏器和新型激光超宽偏振光源等领域;另一种是在 0.98~1.74 μm 波段范围内具有 SPSM 传输特性的双芯 PCF,且通信波长 1.31 μm 和 1.55 μm 处的限制损

耗远远低于 0.1 $\text{dB} \cdot \text{km}^{-1}$,根据双芯 SPSM-PCF 的模式耦合理论,设计了一种器件长度仅为 1.06 mm 的双芯 SPSM-PCF 分波器,可用于通信波长 1.31 μm /1.55 μm 的光分离,并将其应用到了波分复用系统的解复用器中。

参 考 文 献

- [1] Okamoto K. Single-polarization operation in highly birefringent optical fibers [J]. Applied Optics, 1984, 23(15): 2638-2642.
- [2] Knight J C. Photonic crystal fibers [J]. Nature, 2003, 424(6950): 847-851.
- [3] Gu Q Z, Li Q H. Novel photonic crystal fiber with high birefringence and low loss [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060603.

谷芊志, 励强华. 一种高双折射、低损耗的新型光子

- 晶体光纤[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060603.
- [4] Li S S, Hao X, Bai J J, *et al.* Terahertz single-polarization single-mode photonic crystal fiber with tunable polarization[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0901005.
李珊珊, 郝霞, 白晋军, 等. 偏振可调的太赫兹单偏振单模光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0901005.
- [5] Li W, Chen H, Chen M. High symmetry of the mode field distribution photonic crystal fiber with high birefringence [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(2): 0205002.
黎薇, 陈辉, 陈明. 高对称性模场分布的高双折射光子晶体光纤[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0205002.
- [6] Zhang F, Zhang H K, Chen T, *et al.* Nd-doped double-clad large-mode-area polarization-maintaining photonic crystal fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(2): 0201020.
张峰, 张海鹏, 陈涛, 等. 掺钕双包层大模场保偏光子晶体光纤激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201020.
- [7] Yang Y H, Yang F L, Lu L, *et al.* Research on interferometer photonic crystal fiber optic gyroscope technology[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3):0328004.
杨远洪, 杨福铃, 陆林, 等. 干涉型光子晶体光纤陀螺技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328004.
- [8] Li X Y, Xu Z L, Yang H R, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0405003.
李绪友, 许振龙, 杨汉瑞, 等. 保偏空芯带隙光子晶体光纤温度特性研究[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0405003.
- [9] Saitoh K, Koshiba M. Single-polarization single-mode photonic crystal fibers [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(10): 1384-1386.
- [10] Lu D K, Zhang X D, Chang M, *et al.* Endlessly single-polarization single-mode holey fibers with low confinement loss[J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2915-2918.
- [11] Chen M Y, Sun B, Zhang Y K. Broadband single-polarization operation in square-lattice photonic crystal fibers[J]. Journal of Lightwave Technology, 2010, 28(10): 1443-1446.
- [12] An L, Zheng Z, Li Z, *et al.* Ultra-wideband single-polarization single-mode, high nonlinearity photonic crystal fiber[J]. Optics Communications, 2009, 282(16): 3266-3269.
- [13] Zhang W, Li S G, Bao Y J, *et al.* A design for single-polarization single-mode photonic crystal fiber with rectangular lattice[J]. Optics Communications, 2016, 359: 448-454.
- [14] Lu D K, Zhang X D, Chang M, *et al.* Single-polarization single-mode photonic crystal fibers with rectangular-lattice and elliptical-hole arranged perpendicular to each other [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(17): 3026-3028.
- [15] Lu D K, Liu J. Broadband single-polarization single-mode operation in photonic crystal fibers with hexagonally latticed circular airholes[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(10): 2452-2458.
- [16] Yue Y, Kai G, Wang Z, *et al.* Broadband single-polarization single-mode photonic crystal fiber coupler [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2006, 18(19): 2032-2034.
- [17] Zhang S S, Zhang W G, Geng P C, *et al.* Design of single-polarization wavelength splitter based on photonic crystal fiber[J]. Applied Optics, 2011, 50(36): 6576-6582.
- [18] Wang X D, Zhou Z, Luo A P, *et al.* Design of twin core photonic crystal fiber coupler using WDM [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(8): 875-879.
汪徐德, 周正, 罗爱平, 等. 波分复用双芯光子晶体光纤耦合器的设计[J]. 激光与红外, 2011, 41(8): 875-879.
- [19] Li D. Study on the characteristics of single-polarization single-mode photonic crystal fibers [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013: 37-45.
李丹. 单偏振单模光子晶体光纤特性的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2013: 37-45.
- [20] Wang G C, Wang Z P, Yu F. Design of single-polarization single-mode coupler based on dual-core photonic crystal fiber[J]. Optical Engineering, 2016, 55(2): 027101.
- [21] Russell P S J, Marin E, Diez A, *et al.* Sonic band gaps in PCF preforms: Enhancing the interaction of sound and light[J]. Optics Express, 2003, 11(20): 2555-2560.
- [22] Agrawal G P. Fiber-optic communication systems [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [23] Hameed M F O, Obayya S S A, El-Mikati H A. Highly nonlinear birefringent soft glass photonic crystal fiber with liquid crystal core [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(20): 1478-1480.