

单偏振双芯光子带隙光纤定向耦合器

李绪友¹ 许振龙^{1*} 凌卫伟¹ 刘攀¹ 夏琳琳² 杨汉瑞²

¹哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

²东北电力大学自动化工程学院, 吉林 吉林 132012

摘要 提出了一种基于双芯光子带隙光纤(PBF)的单偏振(SP)定向耦合器,利用全矢量有限元方法(FEM)对其耦合特性进行了研究。结果表明:通过适当调整纤芯间微孔的大小及掺杂折射率可在耦合器获得 SP 特性;而纤芯间微孔椭圆率的变化并不会对其 SP 特性造成干扰,耦合器具有较高的结构参数容错性;通过优化参数,最终获得了一种长度仅为 0.403 mm 的 SP 定向耦合器。该耦合器在全保偏 PBF(PM-PBF)谐振腔应用中,能同时起到分束器及起偏器的作用,可以破坏次本征偏振态(ESOP)的谐振条件,有效抑制次 ESOP 的传输。这种具有较短长度的 SP 定向耦合器模场可与之前提出的 PM-PBF 的模场相匹配,有利于搭建起全 PM-PBF 谐振腔,这对抑制谐振式光纤陀螺(RFOG)热致偏振串扰噪声、提高 RFOG 的长期稳定性具有重要意义。

关键词 光纤光学;光子带隙光纤;单偏振定向耦合器;谐振式光纤陀螺;热致偏振串扰

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0906002

Single-Polarization Directional Coupler Based on Dual-Core Photonic Bandgap Fiber

Li Xuyou¹ Xu Zhenlong¹ Ling Weiwei¹ Liu Pan¹ Xia Linlin² Yang Hanrui²

¹College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001

²School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, Jilin 132012

Abstract A single-polarization (SP) directional coupler based on dual-core photonic bandgap fiber (PBF) is proposed, and the coupling properties of the coupler are studied numerically using the full vector finite element method (FEM). Results show that by appropriately adjusting the size of the holes between the cores and the refractive index of doping, the SP property can be obtained in a coupler; however, the ellipticity of the hole between two cores has no effect on the SP property, which means that the coupler has high structure parameter error tolerance; an SP directional coupler with length of 0.403 mm is obtained by optimizing the parameters. In the application of the all polarization-maintaining PBF (PM-PBF) based resonant cavities, the coupler can serve as a beam splitter and a polarizer at the same time, break the resonant condition of secondary eigenstate of polarization (ESOP) and effectively inhibit its transmission. The mode field of SP coupler with short length matches with the PM-PBF proposed in former study, which is beneficial to the establishment of an all PM-PBF resonant cavities, and therefore has great significance in reducing the thermally induced polarization crosstalk noise of resonator fiber-optic gyroscopes (RFOG) and improving the long-term stability of RFOG.

Key words fiber optics; photonic bandgap fiber; single-polarization directional coupler; resonant fiber optic gyro; thermally induced polarization crosstalk

OCIS codes 060.5259; 060.1810; 140.4780; 060.2420; 060.2800

收稿日期: 2016-04-25; **收到修改稿日期:** 2016-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(61503073)、吉林省青年科学基金(20130522171JH)、吉林市科技发展计划资助项目(20156404)、东北电力大学博士科研启动基金资助课题(BSJXM-201419)

作者简介: 李绪友(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤陀螺、光纤传感技术方面的研究。

E-mail: lixuyou@hrbeu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: xzlsdlg@163.com

1 引 言

谐振式光纤陀螺(RFOG)是一种基于光纤环形谐振腔(FRR)中 Sagnac 效应发展起来的新一代光纤惯性器件^[1],通过测量 FRR 中沿顺时针、逆时针方向传播的光束的谐振频率差实现对外界旋转角速率的测量。与干涉式光纤陀螺(IFOG)相比,RFOG 所需的光纤长度要短得多,通常只有几米到几十米,这在减小系统体积的同时也显著降低了谐振腔中因温度不均匀带来的热致非互异性噪声,因此,RFOG 光纤环中骨架的影响也远远低于 IFOG,同时具有检测精度高、动态范围大、理论精度更高等优点^[2]。然而,谐振腔中偏振波动^[3-4]、光克尔效应^[5]、瑞利背向散射^[6]等噪声限制了 RFOG 的发展。其中,偏振波动噪声是影响 RFOG 长期稳定性的主要因素,也是限制 RFOG 性能的主要因素^[7]。目前为止,克服 RFOG 中的偏振波动噪声主要从以下方面着手^[8-11]:使用保偏光纤技术,增大两个本征偏振态(ESOP)谐振点的相位差,减小其重叠的几率以及相互之间的串扰;降低保偏光纤谐振腔双折射的温度敏感性,对于传统的保偏光纤可以使用双 90°偏振轴旋转熔接技术;使用具有偏振消光比的器件制作谐振腔,一般在保偏光纤谐振腔中集成在线起偏器或者使用单模单偏振光纤增加次 ESOP 的绕腔损耗,破坏谐振腔中次 ESOP 的谐振条件。然而,无论通过何种方案,普通保偏光纤的双折射总是不同程度地受到外界应力扰动、温度波动等因素的影响,温度波动引起的偏振串扰仍制约着 RFOG 的性能。而空芯带隙光子晶体光纤(PBF)^[12-14]的出现为解决这一问题提供了新的方法。与普通保偏光纤的应力双折射不同,保偏空芯带隙光子晶体光纤(PM-PBF)的双折射是由结构不对称引起的,对温度、磁场、辐射等敏感性较低,且设计自由度大。更重要的是,PBF 将光局限在空气中,但在非石英材料中可进行传输,其弯曲损耗、光克尔效应、舒珀(Shupe)效应等比实芯光纤小得多^[15-17],这也有助于谐振腔尺寸的小型化。鉴于 PM-PBF 在 RFOG 偏振波动噪声抑制中的重要价值,本课题组在前期提出了一种具有良好保偏特性和极低温度敏感性的 PM-PBF,这种具有极低拍长温度敏感系数的 PM-PBF 可以同时利用保偏光纤技术和降低谐振腔双折射温度敏感性的方案,有效降低 RFOG 中热致偏振不稳定带来的误差^[18]。

但是,将 PBF 应用在 RFOG 上,仍存在诸多问题,受工艺条件的限制,还无法制作出基于 PBF 的定向耦合器。到目前为止,基于 PBF 的 RFOG 采用空间耦合器件^[15]、传统保偏光纤耦合器^[16]、微透镜光学结构^[17]等进行闭合。然而,这些耦合器件由于不能与 PBF 做到模场匹配,在连接处存在很大的反射和损耗,故普遍存在精细度不高、损耗较大的问题。由于 PBF 以空气作为传输介质,因此与之配套的耦合器也必须以空气作为传输介质。而基于双芯 PBF 耦合器的出现为这一问题的解决提供了新的思路。2014 年,Ma 等^[7]提出了一种基于普通 PBF 结构的双芯 PBF 单偏振定向耦合器,在 PBF 谐振腔中,单偏振(SP)定向耦合器同时起到分束器和在线起偏器的作用,可以有效破坏次 ESOP 的谐振条件,进而抑制偏振波动噪声。然而,这种 SP 耦合器是基于普通 PBF,并无保偏(PM)设计,PBF 谐振腔性能仍需继续改进。

为了同时利用保偏光纤技术、降低谐振腔双折射温度敏感性和破坏次 ESOP 的谐振条件技术抑制 RFOG 热致偏振串扰噪声,在 PM-PBF^[18]方案基础上,本文进一步提出一种基于双芯 PBF 的 SP 定向光纤耦合器,并利用全矢量有限元方法(FEM)^[19]对耦合器特性进行了研究。

2 研究方法 with 结构模型

全矢量有限元法可以有效识别光纤中的传输模式,对不同光子晶体光纤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光子晶体光纤。因此,利用 FEM 研究在 PM-PBF^[18]基础上提出的 SP 定向耦合器特性。

PM-PBF 及定向耦合器截面结构如图 1 所示。图 1(a)为 PM-PBF 结构,结构参数见文献^[18]。图 1(b)为双芯 PBF 定向耦合器结构,由 PM-PBF 改进而来,两个纤芯结构及包层参数与图 1(a)相同。与本课题组之前提出的偏振分束器^[20]相类似,本文提出的双芯定向耦合器通过调整纤芯间微孔孔径及掺杂折射率获得良好性能。双芯间掺杂微孔 x 方向轴长和 y 方向轴长分别为 a 和 b ,定义椭圆率 $\eta=b/a$,在微孔为圆孔时,定义 $d_0=a=b$ 。微孔掺杂折射率为 n_0 ,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。

通过合理设计光纤的包层结构和缺陷纤芯的排布,多芯 PBF 可以具有许多特殊的性质。对于具有两个

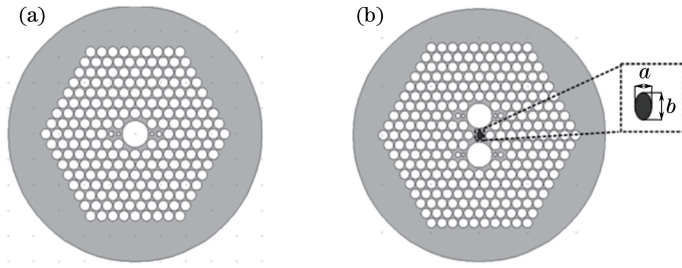


图 1 (a)PM-PBF 截面结构;(b)双芯 PBFSP 耦合器截面结构

Fig. 1 Cross section of (a) PM-PBF and (b) SP coupler based on dual-core PBF

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两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,双芯光纤的芯间功率耦合是由相同方向偏振模式的干涉引起的。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^[20]:

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

式中 $i = x, y$, $\beta_{\text{even}}^i, \beta_{\text{odd}}^i$ 分别是偶模式和奇模式的传播常数, $n_{\text{even}}^i, n_{\text{odd}}^i$ 分别是偶模式和奇模式的有效折射率; λ 是真空中光波长; $k = \pi |n_{\text{even}}^i - n_{\text{odd}}^i| / \lambda$, 为某个偏振态的耦合系数。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。

由(1)式可知,耦合器存在两个耦合长度,分别对应于 x, y 两个偏振态,且与耦合系数 k 成反比。由此可见,耦合器耦合特性是偏振相关的,通过调节结构参数,可以使某个偏振模式耦合系数 $k = 0$, 而另一偏振模式的 $k \neq 0$, 此时某个偏振方向耦合长度无穷大,而另一方向耦合长度保持常值,这样就获得了 SP 特性。在由 SP 耦合器闭合的 FRR 中,对次 ESOP 来说,无论耦合长度为多少,其耦合系数始终为 0%, 此时次 ESOP 处于失耦合或解耦合(decoupling)状态^[21-22], 这样次 ESOP 就被过滤在 FRR 之外,从而起到抑制偏振波动噪声的作用。

3 数值结果及分析

为了提高双芯 PBF 的耦合特性,降低耦合长度,在 PM-PBF^[18] 方案基础上进一步提出在双芯间微孔内掺杂低折射率材料的方案,研究微孔孔径 d_0 、掺杂折射率 n_0 及微孔椭圆率 η 变化对折射率及耦合长度的影响,并优选出具有较短长度的 SP 耦合器方案。此处只研究耦合器在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处的情况。

3.1 SP 耦合器的模场及传输特性

在研究结构参数变化对耦合特性影响之前,首先对耦合器的模场及传输特性进行简要介绍。图 2 为双芯 SP 光纤耦合器模场分布及传输特性,在 $1.55 \mu\text{m}$ 波长处,耦合器具有良好的模场特性,光主要集中在纤

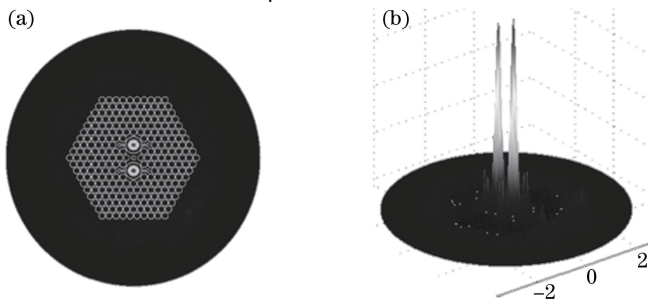


图 2 双芯 PBF SP 定向纤耦合器的(a)模场分布和(b)传输特性

Fig. 2 (a) Mode field distribution and (b) propagation property of SP directional coupler based on dual-core PBF

芯空气中传播,只有少量传导光在传输过程中由包层泄漏出去而产生光功率损耗,这是由于包层空气孔层数有限造成的,而 PBF 的包层空气孔层数每增加一层,限制损耗就可以降低大约 1 个数量级。从理论上来说,只有当包层空气孔层数达到无穷多时,耦合器才能够确保光完全没有泄漏,因此随着包层气孔层数的增加,光纤模场束缚能力不断增强,光能损耗会持续降低。

3.2 纤芯间微孔孔径对耦合器耦合特性的影响

为了研究双芯间微孔孔径 d_0 对光纤耦合器耦合特性的影响,设定 $n_0=1.33$ 。在 $a=b$,即 $\eta=1$ 的情况下, d_0 取不同值时耦合器折射率及耦合长度变化情况如图 3 所示。

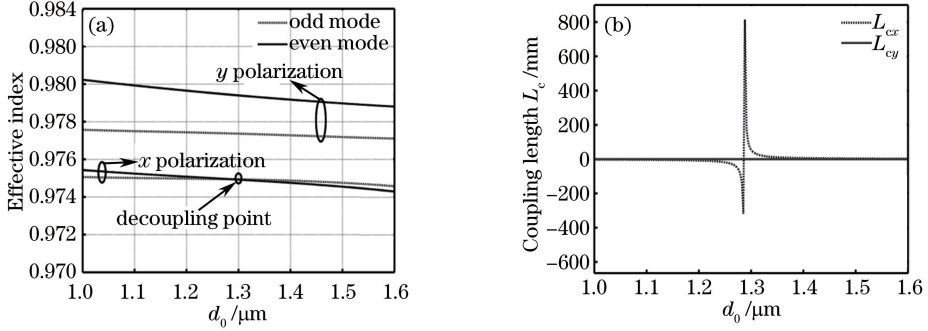


图 3 d_0 对耦合器(a)有效折射率和(b)耦合长度的影响

Fig. 3 Influence of d_0 on (a) effective refractive index and (b) coupling length of the coupler

由图 3(a)可知,在微孔掺杂折射率确定的情况下,4 个超模式的有效折射率均随 d_0 增大而减小,这是因为纤芯间掺杂微孔折射率比基底材质折射率低,掺杂微孔的存在降低了最内层包层的有效折射率,随着 d_0 的增大,这一效果更加明显; y 偏振态的两个超模式折射率均高于 x 偏振, y 偏振态的偶模式折射率高于奇模式;特别地,当 d_0 小于 $1.3 \mu\text{m}$ 时, x 偏振态的偶模式折射率高于奇模式折射率,而 d_0 大于 $1.3 \mu\text{m}$ 时则相反。两超模式折射率曲线在 $1.3 \mu\text{m}$ 处发生交叉,此时 $n_{\text{even}}^x = n_{\text{odd}}^x$, $k_x=0$,该点被称为解耦点。由(1)式可知,在 $1.3 \mu\text{m}$ 处 x 偏振方向耦合长度无穷大,而 y 偏振方向耦合长度保持常值,如图 3(b)所示,这样定向耦合器就获得了 SP 特性。

由以上分析可知,通过适当调整耦合器双芯间微孔孔径大小,可以使耦合长度出现解耦点,使耦合器获得 SP 特性。

3.3 纤芯间微孔掺杂折射率对耦合器耦合特性的影响

为了研究双芯间微孔掺杂折射率 n_0 对光纤耦合器耦合特性的影响,设定 $a=1.1 \mu\text{m}$, $b=1.6 \mu\text{m}$, $\eta=1.45$ 。 n_0 取不同值时耦合器折射率及耦合长度变化情况如图 4 所示。

由图 4(a)可知,与图 3 不同,在微孔掺杂折射率确定的情况下,4 个超模式的有效折射率均随 d_0 增大而增大,这是因为纤芯间掺杂微孔折射率比基底材质折射率低,掺杂微孔的存在降低了最内层包层的有效折射率,而 n_0 的增大降低了这一效果;与图 3(a)相似, y 偏振态的两个超模式折射率均高于 x 偏振, y 偏振态的偶模式折射率高于奇模式折射率;特别地, x 偏振态两超模式折射率曲线也出现交叉,即 x 偏振也出现了解耦点。

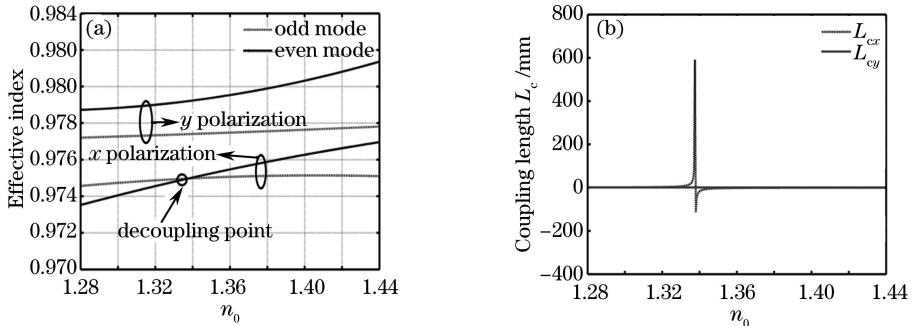


图 4 n_0 对耦合器(a)折射率和(b)耦合长度的影响

Fig. 4 Influence of n_0 on (a) effective refractive index and (b) coupling length of the coupler

耦点。此时,定向耦合器也获得了 SP 特性,如图 4(b)所示。

因此,通过适当调整耦合器双芯间微孔掺杂折射率,也可以使耦合长度出现解耦点,使耦合器获得 SP 特性。

3.4 纤芯间微孔椭圆率对耦合器耦合特性的影响

研究发现,调整纤芯间微孔椭圆率可以改善双芯光纤耦合特性^[20],为了探究纤芯间微孔椭圆率对耦合器耦合特性的影响,设定 $n_0 = 1.33, b = 1.6 \mu\text{m}$,当 a 在 $1.2 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 范围变化时,耦合器耦合长度变化情况如图 5 所示。

由图 5(a)可知, x 偏振耦合长度随椭圆率的增大先增大后减小,在 $\eta = 1.2$ 附近,耦合长度达到极值,然而 x 偏振耦合长度受椭圆率变化影响并不大,耦合长度随椭圆率的变化在 $3.0 \sim 4.3 \text{ mm}$ 范围内波动。更重要的是, x 偏振耦合长度没有出现极值点,即通过调整纤芯间微孔椭圆率并没有使 x 偏振模式出现解耦点。椭圆率变化对 y 偏振耦合长度的影响如图 5(b)所示,由图可知,椭圆率变化对 y 偏振耦合长度影响更小,耦合长度随椭圆率变化在 0.47 mm 附近波动。与 x 偏振类似, y 偏振模式也没有出现解耦点。

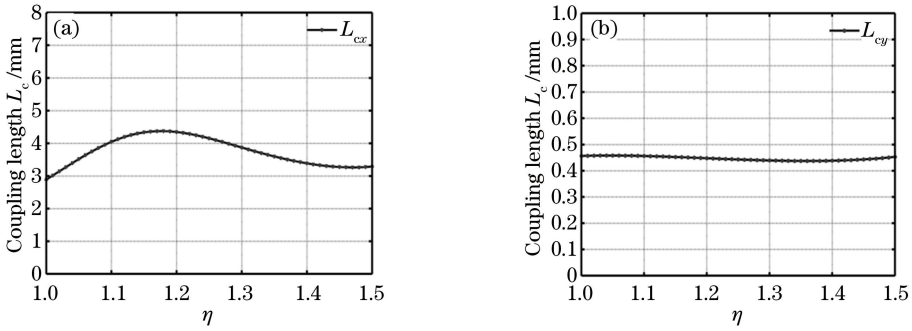


图 5 η 对耦合器(a) x 偏振模式和(b) y 偏振模式耦合长度的影响

Fig. 5 Influence of η on coupling length for (a) x -polarization and (b) y -polarization of the coupler

综上所述,纤芯间掺杂微孔椭圆率变化对耦合器耦合特性影响较小,调整椭圆率并不会使耦合器出现 SP 特性,因此纤芯间微孔可设计为圆孔,且耦合器具有较高的结构参数容错性。

3.5 优化参数获得短长度单偏振定向耦合器

上述研究表明,通过调整纤芯间掺杂微孔孔径及掺杂折射率均可使耦合器出现 SP 特性,而微孔椭圆率变化对耦合器特性影响较小,因此微孔可不考虑椭圆设计。经过大量的仿真实验和计算发现,在 $d_0 = 1.35 \mu\text{m}, n_0 = 1.34$ 时,耦合器 x 偏振耦合长度无穷大,而 y 偏振耦合长度只有 0.403 mm ,从而获得了一种具有长度较短的 SP 定向耦合器。

当一个偏振模式处于失耦合状态时,其耦合比始终为 0,此时改变耦合器长度,只对另一偏振模式的输出有调节作用。在光学谐振腔中,根据绕腔损耗的不同,一般需要主 ESOP 具有 $5\% \sim 10\%$ 的耦合比。根据耦合系数的不同,耦合器长度 L_{c0} 可以通过

$$L_{c0} = \frac{2L'_c \arcsin \sqrt{k_c}}{\pi} \quad (2)$$

获得^[7],式中 L'_c 为主 ESOP 对应偏振模式耦合长度, k_c 为主 ESOP 对应耦合系数。

在主 ESOP 耦合比为 5% 时,耦合器耦合长度只需要 0.058 mm ;在耦合比为 10% 时,耦合长度只需要 0.083 mm 。由此可见,通过改变耦合器长度即可获得所需的耦合比,该耦合器具有很高的灵活性。

传统保偏光纤耦合器能与传统保偏光纤做到模场匹配,是因为耦合器与保偏光纤纤芯结构相同。本文提出的 SP 耦合器纤芯结构与 PM-PBF 的相同,模场也能做到匹配,因而在实芯光纤及其他耦合器件与空芯光纤耦合的方案中所产生的损耗及菲涅耳反射等能够得到很好的抑制。

如前文所述,在 PBF 谐振腔中,该 SP 定向耦合器同时起到分束器和在线起偏器的作用,可以有效破坏次 ESOP 的谐振条件。PM-PBF^[18] 包层气孔层数对保偏特性影响并不大,保偏性能与纤芯结构有关,因此可以将 PM-PBF 包层层数减小,这使尺寸变小,与双芯耦合器中的一个纤芯尺寸相近,进而可以使两个纤芯

分别与两个 PM-PBF 进行匹配耦合,构成基于全 PM-PBF 的 FRR,能够同时利用保偏光纤技术、降低谐振腔双折射温度敏感性和破坏次 ESOP 的谐振条件技术有效抑制 RFOG 热致偏振串扰噪声。

另外,本文 PBF 结构仍可以通过毛细管堆栈、拉制工艺得到,所不同的是纤芯毛细管需要由特制的外部为六边形、内部为圆形的石英管拉制而成。2010 年,Désévéday 等^[23]通过改进的毛细管堆栈、拉制工艺得到了类似于本文结构的硫系玻璃空芯光纤,拉制结果表明,这种结构空芯光纤包层及纤芯气孔能保持良好的形状而不塌陷。这种结构空芯光纤的成功拉制,为双芯 PBF SP 定向耦合器的制造提供了很好的借鉴。

4 结 论

为了同时利用保偏光纤技术、降低谐振腔双折射温度敏感性和破坏次 ESOP 的谐振条件技术抑制 RFOG 热致偏振串扰噪声,在 PM-PBF 方案基础上,提出了一种基于双芯 PBF 的 SP 定向光纤耦合器,利用 FEM 方法对其耦合特性进行了研究。结果表明:通过适当调整耦合器的纤芯间微孔的大小及掺杂折射率,可使某个偏振方向耦合长度无穷大,而另一方向耦合长度保持常值,因而获得 SP 特性。最终通过优化结构,获得了一种长度仅为 0.403 mm 的 SP 耦合器,可以只对 y 偏振态进行准确耦合。该 SP 耦合器在 PBF-FRR 中,能同时起到分束器和起偏器的作用,可以破坏次 ESOP 的谐振条件、有效抑制次 ESOP 的传输,且可以通过调整耦合器长度获得所需的耦合比。这种具有较短长度的 SP 耦合器能与 PM-PBF 做到模场匹配,搭建起全 PM-PBF FRR,对有效抑制 RFOG 偏振波动噪声、进一步提高 RFOG 的长期稳定性具有十分重要的意义。

参 考 文 献

- 1 Chow W W, Gea-Banaciloche J, Pedrotti L M. The ring laser gyro[J]. Rev Mod Phys, 1985, 57: 61-103.
- 2 Yu Xiujuan, Liao Yanbiao, Zhang Min, *et al.* Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro using a hollow-core photonic band-gap fiber[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(3): 430-435.
于秀娟, 廖延彪, 张 敏, 等. 谐振式空心光子带隙光纤陀螺中的光克尔效应[J]. 中国激光, 2008, 35(3): 430-435.
- 3 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Eigenstate of polarization in a fiber ring resonator and its effect in an optical passive ring-resonator gyro[J]. Appl Opt, 1986, 25(15): 2606-2612.
- 4 Ma H, Chen Z, Yang Z, *et al.* Polarization-induced noise in resonator fiber optic gyro[J]. Appl Opt, 2012, 51(28): 6708-6717.
- 5 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Kerr effect in an optical passive ring-resonator gyro[J]. J Lightwave Technol, 1986, 4(6): 645-651.
- 6 Iwatsuki K, Hotate K, Higashiguchi M. Effect of Rayleigh backscattering in an optical passive ring-resonator gyro[J]. Appl Opt, 1984, 23(21): 3916-3924.
- 7 Ma H L, Chen Z, Jin Z H. Single-polarization coupler based on air-core photonic bandgap fibers and implications for resonant fiber optic gyro[J]. J Lightwave Technol, 2014, 32(1): 46-54.
- 8 Takiguchi K, Hotate K. Evaluation of the output error in an optical passive ring-resonator gyro with a 90° polarization-axis rotation in the polarization-maintaining fiber resonator[J]. IEEE Photon Technol Lett, 1991, 3(1): 88-89.
- 9 Wang X, He Z, Hotate K. Reduction of polarization fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator with twin 90° polarization axis rotated splices[J]. Opt Express, 2010, 18(2): 1677-1683.
- 10 Ma H L, Yu X H, Jin Z H. Reduction of polarization-fluctuation induced drift in resonator fiber optic gyro by a resonator integrating in-line polarizer[J]. Opt Lett, 2012, 37(16): 3342-3344.
- 11 Yan Y C, Ma H L, Jin Z H. Reducing polarization-fluctuation induced drift in resonant fiber optic gyro by using single-polarization fiber[J]. Opt Express, 2015, 23(3): 2002-2009.
- 12 Song Jingming, Sun Kang, Xu Xiaobin. Scattering loss analysis and structure optimization of hollow-core photonic bandgap fibers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(11): 1105003.
宋镜明, 孙 康, 徐小斌. 空芯光子带隙光纤散射损耗特性及结构优化研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1105003.
- 13 Huang Chongde, Chen Dijun, Cai Haiwen, *et al.* Laser frequency stabilization technology based on hollow-core photonics crystal fiber gas cell[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0802006.
黄崇德, 陈迪俊, 蔡海文, 等. 空芯光子晶体光纤吸收池的激光稳频技术[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0802006.
- 14 Kim H K, Digonnet M J F, Kino G S. Air-core photonic bandgap fiber-optic gyroscope[J]. J Lightwave Technol, 2006,

- 24(8): 3169-3174.
- 15 Sanders G A, Strandjord L K, Qiu Tiejun. Hollow core fiber optic ring resonator for rotation sensing[C]. Optical Fiber Sensors, 2006, ME: ME6.
- 16 Terrel M A, Michel Digonnet J F, Fan S H. Resonant fiber optic gyroscope using an air-core fiber[J]. J Lightwave Technol, 2012, 30(7): 931-937.
- 17 Feng Lishuang, Deng Xuewen, Ren Xiaoyuan, *et al.* Researcher on hollow core photonic bandgap fiber ring resonator based on micro-optics structure[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0806002.
冯丽爽, 邓学文, 任小元, 等. 基于微光学结构的空芯光子带隙光纤环形谐振腔研究[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0806002.
- 18 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Yang Hanrui, *et al.* Analysis of thermal properties in a polarization-maintaining air-core photonic bandgap fiber[J]. Chinese J 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.
- 19 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.
- 20 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Liu Pan, *et al.* Short polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605006.
李绪友, 许振龙, 刘攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605006.
- 21 Wang Z, Kai G, Liu Y, *et al.* Coupling and decoupling of dual-core photonic bandgap fibers[J]. Opt Lett, 2005, 30(19): 2542-2544.
- 22 Wang Z, Taru T, Birks T A, *et al.* Coupling in dual-core photonic bandgap fibers: Theory and experiment[J]. Opt Express, 2007, 15(8): 4795-4083.
- 23 Désévéday F, Renversez G, Troles J, *et al.* Chalcogenide glass hollow core photonic crystal fibers[J]. Opt Materials, 2010, 32(11): 1532-1539.