

基于悬浮式双芯多孔光纤的太赫兹偏振分离器*

李珊珊¹⁾ 常胜江^{1)†} 张昊¹⁾ 白晋军²⁾ 刘伟伟¹⁾

1)(南开大学, 现代光学研究所, 天津 300071)

2)(天津工业大学, 电子与信息工程学院, 天津 300387)

(2013年12月30日收到; 2014年2月21日收到修改稿)

提出了一种基于悬浮式双芯多孔光纤的低损耗、宽带太赫兹偏振分离器。通过纤芯的多孔结构实现器件的低损耗特性, 利用两个纤芯微结构的正交关系实现宽带的单偏振模式匹配。结构参数设计采用折射率反转匹配耦合法; 数值计算采用全矢量有限元法; 光纤基底材料选择太赫兹波段低损耗环烯烃共聚物COC。首先对单芯高双折射悬浮式多孔光纤的色散、模式双折射、基模在空气中的能量分数、以及损耗等特性进行了分析, 在此基础上, 对悬浮式双芯多孔光纤偏振分离器的特性进行了详细研究。发现该偏振分离器的工作带宽超过1.5 THz (0.8 THz到2.3 THz)。其偏振分离长度和吸收损耗随频率的增大而增大, 在1 THz, 分离长度仅为0.66 cm; x, y 两偏振的消光比分别为-14.64 dB和-14.84 dB, 两偏振模式的实际吸收损耗均小于0.12 dB。相对于其他双芯光纤偏振分离器设计, 该结构具有宽带、低损耗、设计简单、控制容易、以及抗环境干扰等优点。

关键词: 偏振分离, 多孔光纤, 太赫兹, 悬浮结构

PACS: 07.60.Vg, 42.79.-e, 42.79.Gn, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.63.110706

1 引言

偏振分离器是一种能够把光信号分离成两个正交偏振态的基本光学元件, 在光学系统中有着广泛且重要的应用^[1-6]。在文献^[7]中我们曾经提出了一种折射率反转匹配耦合法(index converse matching coupling method, ICMC), 这种方法通过对色散曲线的调控, 利用纤芯结构的正交特性, 实现了双芯光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)对宽带太赫兹信号的偏振分离。相对于两种传统光纤偏振分离器——基于定向耦合器的偏振分离器和偏振选择耦合器^[1,5,6], 它具有更低的传输损耗和更宽的工作带宽, 因此能够很好地满足太赫兹应用^[8-11]的需求。然而, 该设计在实际应用中的可行性仍然值得我们进一步探讨, 存在的主要问题有: 1) 难于控制。PCF本身的周期性结构就难

于控制, 而纤芯的微结构更难以控制, 因此实际上我们很难得到色散曲线完全符合要求的结构。2) 分离长度长, 且随着频率的增大而显著增大。在实际应用时我们希望分离长度越短越好, 且需要其变化更缓慢, 这样才能够保证更低的损耗和更高的分离效率。3) 设计不够灵活。对于双芯PCF的设计, 为保证包层的完美周期性结构, 两芯间距只能是晶格常数的整数倍, 而无法做到任意间距。同时, 这种光纤一旦拉制完成, 结构参数就无法改变, 不够灵活。

多孔光纤由Atakaramian和Hassani等于2008年同时提出^[12,13], 一经提出就引起了研究人员的极大兴趣。这主要是因为多孔光纤能够把导模的大部分能量局限在光纤纤芯的微空气孔中传输, 这样就大大降低了基底材料的吸收损耗, 从而实现在太赫兹波段的低损耗传输。同时, 由于多孔光纤是以空气为包层, 仍然是基于全内反射原理导光, 因此

* 国家重点基础研究发展计划(973项目)(批准号: 2014CB339800)、国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2011AA010205, 2013AA014201)、国家自然科学基金(批准号: 61171027, 11274182, 11004110)、天津市科技计划项目(批准号: 13RCGFGX01127)和天津市高等学校科技发展基金计划项目(项目编号: 20120706)资助的课题。

† 通讯作者。E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

对纤芯微结构的周期性和形变都没有严格要求, 从而降低了控制的难度. 多孔光纤在传感和通讯领域有着很大的应用潜力^[14-19].

本文提出采用两根相互靠近且纤芯微结构满足正交关系的多孔光纤来实现偏振分离功能, 包层采用一圈聚合物空心波导管环绕的方式, 构成悬浮结构. 该结构包层的有效折射率仍然小于纤芯, 因此不仅具备了多孔光纤低损耗、对结构形变要求不高的优势, 同时还避免了环境对器件性能的影响. 纤芯结构参数的确定采用折射率反转匹配耦合法(ICMC); 数值计算采用全矢量有限元法(FEM); 基底材料选择在太赫兹波段低损耗、且折射率相对恒定的环烯烃共聚物COC(商品名: TOPAS)^[20-22], 体吸收系数采用最新测定的宽带实验数据^[20]. 仿真结果表明该偏振分离器在0.8 THz到2.3 THz的频率范围都能够实现偏振分离, 分离长度和材料吸收损耗随频率的增大而增大. 在1 THz频率处, 其偏振分离长度仅为0.66 cm, 对于 x, y 两个偏振模式, 消光比分别为 -14.64 dB和 -14.84 dB, 实际吸收损耗均小于0.12 dB. 相对于以往双芯光子晶体光纤偏振分离器的设计, 该结构具有宽带、低损耗、设计简单、控制容易、实验可行, 以及抗环境干

扰等优势.

2 器件设计和特性分析

ICMC方法是一种通过调整色散曲线的位置, 来构建宽带的选择性耦合器的方法. 它通过具有正交关系的结构来实现色散曲线的反转和重合, 在双芯结构中实现一个偏振模式在很宽的工作频段发生耦合, 而另一个偏振态的耦合被有效抑制^[7], 此时, 器件的分离长度等于发生耦合偏振态的耦合长度.

本文提出的悬浮式双芯多孔光纤偏振分离器的结构如图1(a)所示. 纤芯为亚波长多孔结构, 两个纤芯的微结构在横截面上具有正交关系. 包层为一圈空心聚合物波导管. 实际上包层波导管不需要和纤芯一同控制, 因为它在实验中只起到固定和防止环境干扰的作用, 所以我们只需采用适当方法把包层和纤芯固定或粘合到一起即可. 由于该光纤为折射率引导型光纤, 只需满足纤芯的有效折射率大于包层即可, 而对纤芯微结构以及包层波导管的形变都没有严格要求. 为研究方便, 该结构可以等效为如图1(b)所示的单芯悬浮光纤A和B.

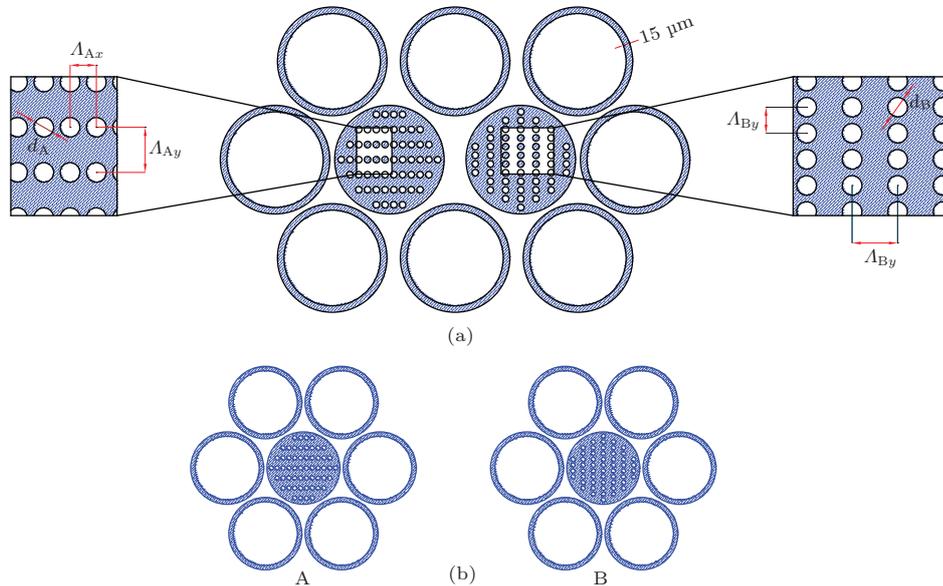


图1 (a) 悬浮式双芯多孔光纤偏振分离器的横截面; (b) 等效光纤A和B

该偏振分离器包层波导管的外径 $D_e = 250$ μm , 内径 $D_i = 220$ μm , 壁厚 $h = 15$ μm ; 左芯的直径 $D_A = 250$ μm , 纤芯微空气孔采用四方晶格排列, 直径 $d_A = 15$ μm , 沿 x 方向的晶格常数 $\Lambda_{Ax} = 20$ μm , 沿 y 方向的晶格常数 $\Lambda_{Ay} = 34.64$

μm . 沿 x 方向空气孔直径与晶格周期之比为 $d_A/\Lambda_{Ax} = 0.75$, 沿 y 方向 $d_A/\Lambda_{Ay} = 0.43$; 多孔度 $P_A = \frac{\pi r^2 \times 56}{\pi R^2} \approx 20.16\%$. 用ICMC方法调控色散曲线需要两个步骤, 即反转和重合. 对应到结构上, 就需要右芯与左芯的微结构具有正交关系. 在

实际设计时, 我们只需要把左芯(等价光纤 A) 旋转 90° 就得到了右芯(等价光纤 B). 再调整右芯微空气孔的尺寸, 使得 y 偏振的色散曲线发生重合即可. 这样, 就得到了右芯的结构参数: 纤芯 $D_B = 250 \mu\text{m}$, 沿 x 方向的晶格常数 $\Lambda_{Bx} = 34.64 \mu\text{m}$, 沿 y 方向的晶格常数 $\Lambda_{By} = 20 \mu\text{m}$. 为了实现两芯 y 偏振色散曲线的重合, 调整右芯空气孔的直径 $d_B = 13.96 \mu\text{m}$. 沿 x 方向空气孔直径与晶格周期之比为 $d_B/\Lambda_{Bx} = 0.40$, 沿 y 方向 $d_B/\Lambda_{By} = 0.70$; 多孔度 $P_B \approx 17.5\%$. 两纤芯的间距 $L_{AB} = 300 \mu\text{m}$.

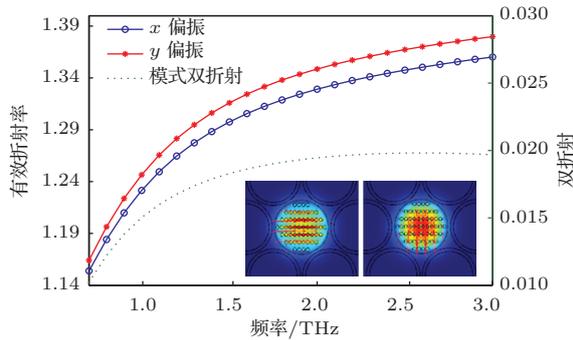


图2 等价光纤 A 的色散曲线和模式双折射 (右下角插图为 2.5 THz, 模式双折射达到最大值 0.02 时 x, y 两偏振的模场分布)

等价光纤 A 和 B 都为悬浮式高双折射多孔光纤, 目前对这种光纤的相关研究较少, 因此我们首先对单芯悬浮高双折射多孔光纤的特性进行分析. 图 2 给出了等价光纤 A 的色散曲线和模式双折射. 可以看出, x, y 两个偏振的有效折射率随着频率的增大而增大, y 偏振的有效折射率始终大于 x 偏振. 这是因为光纤纤芯的微结构是非对称的, y 方向的空气填充比要小于 x 方向. 光纤的模式双折射随着频率的增大先增大而后缓慢降低, 在我们讨论的频率范围内始终在 10^{-2} 量级, 在 2.5 THz 附近达到最大值 0.02. 右下角插图给出了在 2.5 THz, 模式双折射达到最大值时 x 和 y 两偏振的模场分布图.

对于等价光纤 A, 基模的总能量可以分为三部分: 纤芯空气孔中的能量, 基底材料中的能量和空气包层中的能量. 图 3 给出了多孔光纤基模在空气中的能量分数. 其中红色圆圈曲线表示 x 偏振在空气包层和纤芯空气孔中的总能量分数, 红色菱形曲线表示 x 偏振在纤芯空气孔中的能量分数; 蓝色方块曲线表示 y 偏振在空气包层和纤芯空气孔中的总能量分数, 蓝色三角曲线表示 y 偏振在纤芯空气孔中的能量分数. 随着频率的增大, 基模在空气中的

总能量分数是单调递减的, 但趋势越来越平缓. 这和光纤的吸收损耗特性(图 4) 有一个对应关系. 我们假设干燥空气对太赫兹波来说是透明的, 也就是说能量在空气中无损传输. 那么, 随着基模能量在空气中所占百分数的降低, 在基底材料中所占百分数的增大, 光纤的归一化材料吸收损耗系数也是增大的, 如图 4 所示. 而图 3 进一步表明, 纤芯空气孔

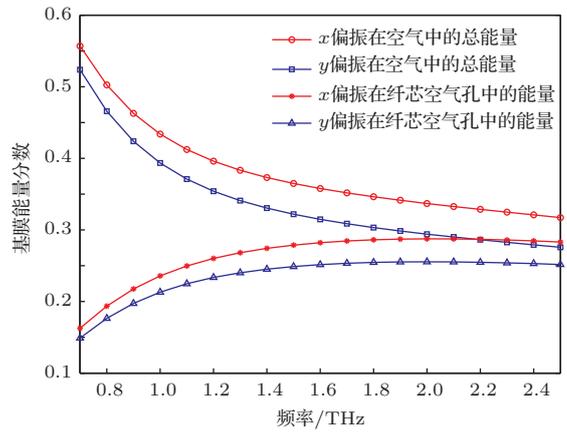


图3 等价光纤 A 基模在空气中的能量分数

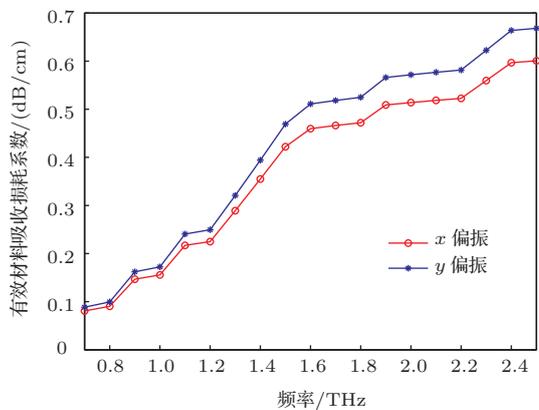
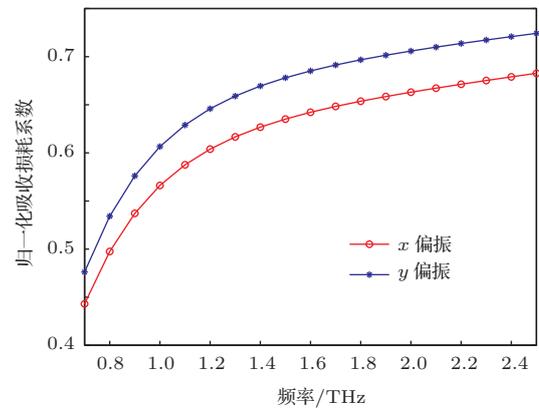


图4 等效光纤 A 的归一化损耗和有效材料吸收损耗系数

中的能量分数先变大后趋于稳定,再缓慢变小,越来越接近于空气中的总能量分数.这表明随着频率的增大,能量由空气包层逐渐向纤芯的微空气孔中转移.太赫兹波的频率越高光纤对导模的限制能力就越好. x, y 两个偏振能量分数的变化具有同样的趋势,但 y 偏振在空气中的能量分数要小于 x 偏振.这同样是由于纤芯的非对称结构决定的.在1 THz,对于 x, y 两个偏振,基模能量在空气中的能量分数分别为43.38%和39.34%,在纤芯空气孔中的能量分数分别为23.58%和21.30%.

图4给出了等效光纤A的归一化损耗和材料的有效吸收损耗系数.归一化损耗系数随着频率的增大而增大,并逐渐趋于稳定. y 偏振的归一化损耗大于 x 偏振,最终两个偏振的归一化损耗值稳定在0.7附近.光纤A的有效损耗系数由下式给出[13,23]:

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{(\varepsilon_0/\mu_0)^{1/2} \int_{A_{\text{background}}} n(r)\alpha_m(r) |E|^2 dA}{\text{Re} \left| \int_{A_\infty} E \times H^* \cdot \hat{z} dA \right|},$$

其中, $\alpha_m(r)$ 是光纤基底材料的体吸收系数,该数据来自于文献[20]测得的环烯烃共聚物COC宽带实验数据; $A_{\text{background}}$ 和 A_∞ 分别表示光纤横截面的基底材料和整个平面的面积; $n(r)$ 是基底材料的有效折射率.如图所示,光纤A的有效材料吸收损耗系数随着频率的增大而不断增大.在1 THz附近,对于 x, y 两个偏振,归一化损耗分别为0.52和0.57,器件的吸收损耗系数分别为0.16 dB/cm和0.17 dB/cm.

图5给出了等效悬浮式多孔光纤A和B的色散曲线.从图中可以看出,由于光纤A和B都

是高双折射光纤,纤芯微结构具有非对称性,因此 x 偏振和 y 偏振是非简并的.对于光纤A, $n_{Ax} < n_{Ay}$;而对于光纤B,由于它相当于光纤A的纤芯做了 90° 的旋转,所以 n_x 和 n_y 两条色散曲线发生了反转,也就是说,在每一个工作频率,有 $n_{Bx} > n_{By}$.为实现两根光纤 y 偏振的耦合,我们调整光纤B空气孔的尺寸,使得有效折射率满足: $n_{Ax} < n_{Ay} = n_{By} < n_{Bx}$ (如图5所示).这样,在一个很宽的工作频率范围内, y 偏振模将会在两个纤芯间强烈耦合,同时,由于两个纤芯 x 偏振有效折射率有较大的差值,导致模式不匹配而不会发生耦合.

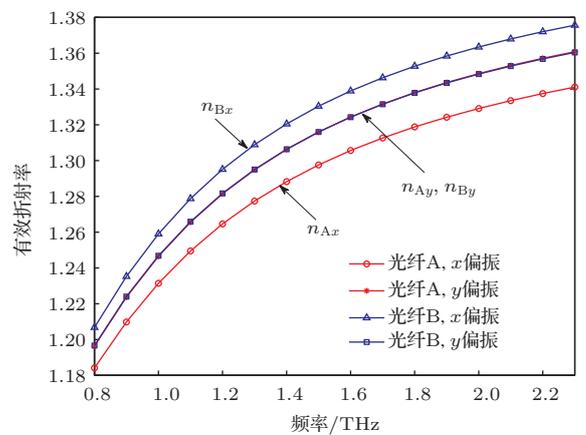


图5 等效光纤A和B的色散曲线

图6给出了在我们讨论的工作频率范围内 x, y 偏振奇模和偶模稳态的模场分布.可以看到,由于模式匹配,在很宽的工作频段, y 偏振在两芯之间始终发生耦合;而对于 x 偏振,由于两个纤芯之间的有效折射率存在较大的差值,模式不匹配,因此始终不发生耦合.

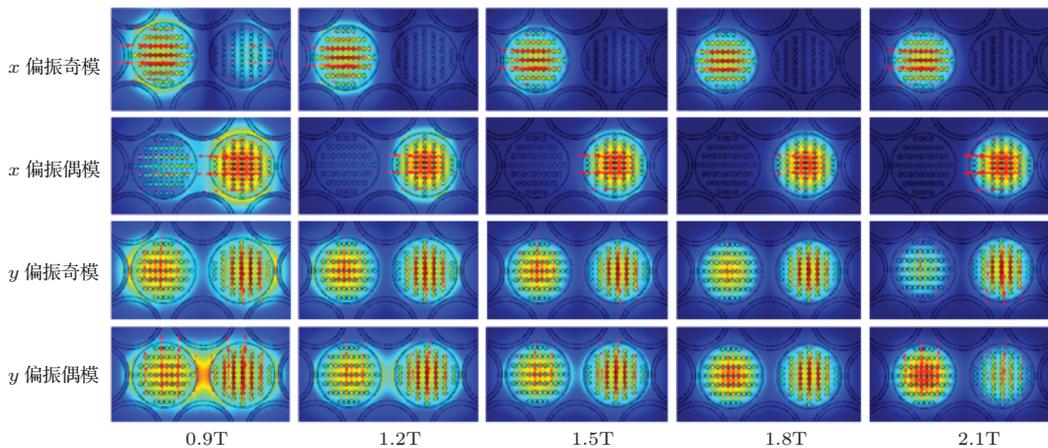


图6 x, y 两偏振奇模和偶模在不同工作频率时稳态的模场分布

图7给出了器件的分离长度. 分离长度由下式给出^[1,7]:

$$L_c = \lambda / (2|n_{ye} - n_{yo}|),$$

其中 n_{ye} 和 n_{yo} 分别是 y 偏振偶模和奇模的有效折射率, λ 是入射波长. 如图所示, 随着频率的增大, 分离长度也增大. 对于文献^[7]中提出的双芯PCF偏振分离器, 在0.4—0.7 THz频率范围内, 分离长度为1.83—25 cm之间; 而本文提出的悬浮式双芯多孔光纤偏振分离器, 工作频率为0.8—2.3 THz, 分离长度为0.4—10.32 cm, 工作频率更宽, 分离长度更短, 且变化更为平缓.

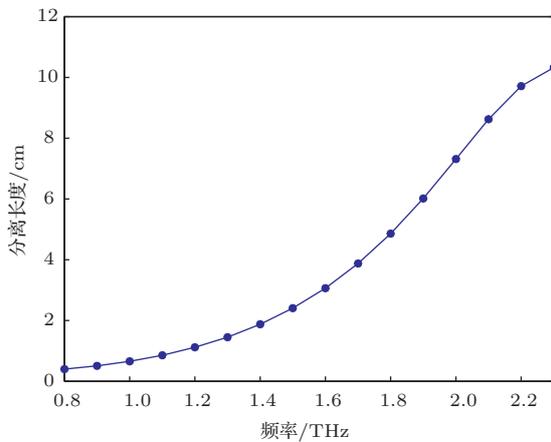


图7 分离长度随频率的变化曲线

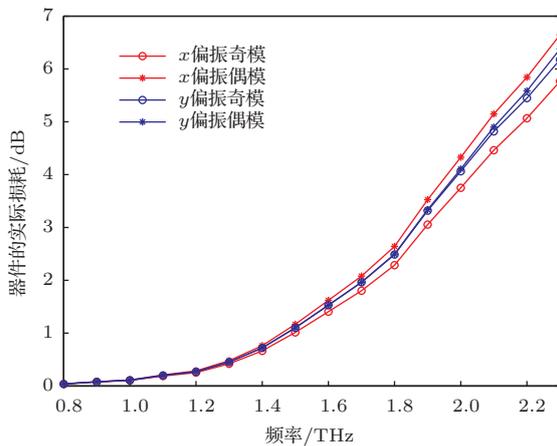


图8 (网刊彩色) 器件的实际吸收损耗

图8给出了器件的实际材料吸收损耗随频率的变化曲线. 该参数由下式给出:

$$M_{\text{loss}} = L_c \times \alpha_{\text{eff}},$$

其中 L_c 是器件的分离长度; α_{eff} 是前文所述的材料有效吸收损耗系数. 器件的实际损耗随频率的

增大而增大. 在1 THz频率处, x, y 两个偏振奇模和偶模的实际吸收损耗均小于0.12 dB. 在0.8—1.8 THz, 两偏振的实际吸收损耗都小于3 dB.

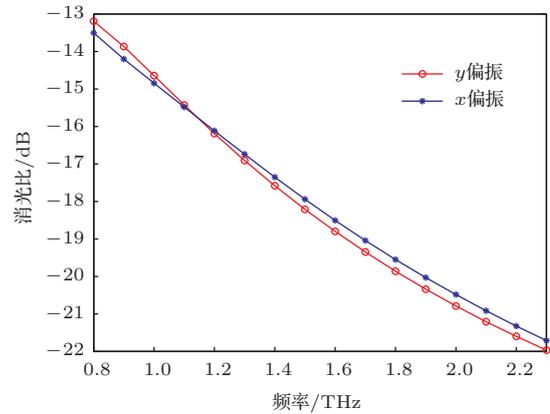


图9 (网刊彩色) x, y 偏振的消光比

图9给出了 x, y 两个偏振的消光比随频率的变化曲线. 消光比通常被定义为检偏器的最小透过光强与最大透过光强之比. 对应到偏振分离器, x 偏振的消光比应该是在 x 偏振输出端口处 y 偏振与 x 偏振的光强之比; y 偏振的消光比是在 y 偏振输出端口处 x 偏振与 y 偏振的光强之比. 从图9可以看出, 两个偏振消光比的变化具有同样的趋势. 随着频率的增大, 消光比越来越好. 这是因为随着频率的增大, 光纤对能量的限制更好, 因此偏振分离更彻底, 在1 THz, x, y 两个偏振模的消光比分别为-14.64 dB和-14.84 dB.

3 结 论

本文提出了一种基于悬浮式双芯多孔光纤的宽带太赫兹偏振分离器. 首先对单芯高双折射悬浮式多孔光纤的色散、模式双折射、基模在空气中的能量分数、以及损耗等特性进行了分析, 发现该光纤的模式双折射能够达到 10^{-2} 量级; 基模在空气中的总能量分数随频率增大而减小, 损耗随频率增大而增大, 能量逐渐由包层转移到纤芯. 随后, 对悬浮式双芯多孔光纤偏振分离器的特性进行了详细研究. 发现该偏振分离器的工作带宽超过1.5 THz (0.8 THz到2.3 THz). 分离长度和吸收损耗随频率的增大而增大. 在1 THz, 分离长度仅为0.66 cm; x, y 两偏振的消光比分别为-14.64 dB和-14.84 dB, 实际吸收损耗均小于0.12 dB. 相对于其他双芯光纤偏振分离器设计, 该结构具有宽带、

低损耗、设计简单、控制容易、以及抗环境干扰等优点. 本文对于相关器件设计和实际应用具有重要指导意义.

参考文献

- [1] Li J, Mao Y, Lu C, Tam H Y, Wai P 2011 *Photonics Technology Letters, IEEE* **23** 1358
- [2] Saulnier J, Ramus C, Huet F, Carre M 1991 *Photonics Technology Letters, IEEE* **3** 926
- [3] Li M Y, Gu P F 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2363 (in Chinese) [李明宇, 顾培夫 2005 物理学报 **54** 2363]
- [4] Li Y Y, Gu P F, Li M Y 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3893 (in Chinese) [厉以宇, 顾培夫, 李明宇 2005 物理学报 **54** 3893]
- [5] Lou S Q, Ren G B, Yan F P, Jian S S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1229 (in Chinese) [娄淑琴, 任国斌, 延凤平, 简水生 2005 物理学报 **54** 1229]
- [6] Zhang B, Tan X L, Xue R Q, Yan J, Pan B, Jiang W X 2012 *Infrared and Laser Engineering* **41** 745 (in Chinese) [张斌, 谭晓玲, 薛睿秋, 严俊, 潘播, 蒋文晓 2012 红外与激光工程 **41** 745]
- [7] Li S, Zhang H, Hou Y, Bai J, Liu W, Chang S 2013 *Appl. Opt.* **52** 3305
- [8] Ferguson B, Zhang X C 2003 *Physics* **32** 286 (in Chinese) [Ferguson B, 张希成 2003 物理 **32** 286]
- [9] Deng Y Q, Lang L Y, Xing Q R, Cao S Y, Yu J, Xu T, Li J, Xiong L M, Wang Q Y, Zhang Z G 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7747 (in Chinese) [邓玉强, 郎利影, 邢岐荣, 曹士英, 靖于, 涛徐 2008 物理学报 **57** 7747]
- [10] Liu J L, Zhang X C 2010 *Physics* **39** 6 (in Chinese) [刘晶乐, 张希成 2010 物理 **39** 6]
- [11] Zhang X B, Shi W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4984 (in Chinese) [张显斌, 卫施 2008 物理学报 **57** 4984]
- [12] Atakaramians S, Afshar Vahid S, Fischer B M, Abbott D, Monro T M 2008 *Optics Express* **16** 8845
- [13] Hassani A, Dupuis A, Skorobogatiy M 2008 *Applied Physics Letters* **92** 071101
- [14] Dupuis A, Allard J F, Morris D, Stoeffler K, Dubois C, Skorobogatiy M 2009 *Opt. Express* **17** 8012
- [15] Dupuis A, Mazhorova A, Desevedavy F, Skorobogatiy M 2010 *35th International Conference on*
- [16] Li M J, Shi Z D, Lin J Q, Ge Q 2010 *Acta Optica Sinica* **30** 1950 (in Chinese) [李铭佳, 石志东, 林建强, 葛泉 2010 光学学报 **30** 1950]
- [17] Wang D, Wang L 2011 *Optics Communications* **284** 5568
- [18] Chen N N, Liang J, Ren L Y 2013 *Applied Optics* **52** 5297
- [19] Wang D, Zheng Y 2013 *Acta Optica Sinica* **33** 0806005 (in Chinese) [王丹, 郑义 2013 光学学报 **33** 0806005]
- [20] Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, Hayden L M, Polishak B, Zhou X H, Luo J, Jen A K Y, Williams J C, Twieg R J 2011 *Journal of Applied Physics* **109** 043505
- [21] Emiliyanov G, Jensen J B, Bang O, Hoiby P E, Pedersen L H, Kjær E M, Lindvold L 2006 *Presented at Optical Fiber Sensors*
- [22] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J, Planken P C, Bang O, Jepsen P U 2009 *Optics Express* **17** 8592
- [23] Snyder A W, Love J D 2000 *Optical Waveguide Theory (Section 11–22)* (Kluwer Academic Publishers) p232

A THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber*

Li Shan-Shan¹⁾ Chang Sheng-Jiang^{1)†} Zhang Hao¹⁾ Bai Jin-Jun²⁾ Liu Wei-Wei¹⁾

1) (*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China*)

2) (*School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China*)

(Received 30 December 2013; revised manuscript received 21 February 2014)

Abstract

A low loss broadband THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fiber is proposed. The property of low loss is due to the porous structure of the fiber, and the match of single polarization mode is achieved by the orthogonal relationship of the microstructure in the two fiber cores. Structure of the fiber is designed by using index converse matching coupling method. Numerical simulation is carried out by employing full vector finite element method. The background material is cyclo olefin polymer COC with low loss property in THz region. Firstly, the properties of a suspended porous fiber with a single core has been analyzed in detail, including the effective refractive index, birefringence, fraction of modal power in air, and material absorption loss in the fundamental mode. Moreover, the properties of THz polarization splitter made from suspended dual-core porous fibers have been investigated theoretically. Numerical simulation results show that the operation bandwidth is 1.5 THz (from 0.8 THz to 2.3 THz). At 1 THz, the splitting length is only 0.66 cm. The extinction ratios for x and y polarization modes can reach -14.64 dB and -14.84 dB, respectively. The practical material absorption loss is less than 0.12 dB for both x and y polarization modes. Compared with other dual-core-PCF-based polarization splitters, the dual-core porous fiber has several advantages such as simplicity for structure designing, ease of fabrication, better feasibility in practical applications, low transmission loss, and wide operation frequency bandwidth.

Keywords: polarization splitter, porous fiber, THz, suspended structure

PACS: 07.60.Vg, 42.79.-e, 42.79.Gn, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.63.110706

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339800), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. 2011AA010205, 2013AA014201), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61171027, 11274182, 11004110), the Science and Technology Program of Tianjin, China (Grant No. 13RCFGX01127), and the Tianjin City High School Science & Technology Fund Planning Project, China (Grant No. 20120706).

† Corresponding author. E-mail: sjchang@nankai.edu.cn