

基于领结型多孔光纤的双芯太赫兹偏振分束器

汪静丽 刘洋 钟凯

Dual-core terahertz polarization splitter based on porous fibers with near-tie units

Wang Jing-Li Liu Yang Zhong Kai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 024209 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.024209

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.024209>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I2>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

通道调制型偏振成像系统的波段宽度限制判据

Imaging spectral bandwidth criterion equation of channeled modulated polarization imaging system

物理学报.2016, 65(7): 074210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074210>

雪崩倍增 GaAs 光电导太赫兹辐射源研究进展

Research progress on avalanche multiplication GaAs photoconductive terahertz emitter

物理学报.2015, 64(22): 228702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228702>

太赫兹人工电磁媒质研究进展

Progress of terahertz metamaterials

物理学报.2015, 64(22): 228701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228701>

血凝素蛋白及抗体相互作用的太赫兹光谱主成分分析

Principal component analysis of terahertz spectrum on hemagglutinin protein and its antibody

物理学报.2015, 64(16): 168701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168701>

空芯光子带隙光纤色散特性的实验研究

Experimental research on the dispersion property of hollow core photonic bandgap fiber

物理学报.2016, 65(19): 194212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194212>

基于领结型多孔光纤的双芯太赫兹偏振分束器*

汪静丽^{1)†} 刘洋¹⁾ 钟凯²⁾

1)(南京邮电大学光电工程学院, 南京 210023)

2)(天津大学, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2016年8月1日收到; 2016年10月18日收到修改稿)

领结型多孔光纤具有高双折射的特性, 本文基于此设计了一种新型的双芯太赫兹 (THz) 偏振分束器, 采用调整结构法实现了折射率反转匹配耦合, 达到偏振分离. 仿真结果表明: 该偏振分束器在 0.5—2.5 THz 频率范围内均可实现偏振分离, 最小分离长度仅为 0.428 cm, 且在整个频率范围内分离长度不超过 2.5 cm. 在 2.3 THz, x, y 两偏振模的吸收损耗均小于 0.35 dB; 消光比高达 22.9 和 19.2 dB. 此外, 与填充法实现折射率反转匹配耦合的双芯 THz 偏振分束器进行比较, 本文设计的偏振分束器实现简单, 运行的频率范围更宽, 分离长度更短, 吸收损耗更低.

关键词: 偏振分束器, 太赫兹, 调整结构, 多孔光纤

PACS: 42.81.Gs, 87.50.U-, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.66.024209

1 引言

偏振分束器是光学系统中一种重要器件, 可将光信号分离成两个相互正交的偏振光, 并沿着不同路径传输^[1,2]. 近年来, 科研工作者对光学波段的偏振分束器已进行了深入研究^[3-8], 而对 THz 波段偏振分束器的研究仍处于起步阶段^[9-12]. THz 波在电磁波谱中介于微波和红外波之间, 具有其他波段电磁波不具有的独特优异性能. 设计性能优良的 THz 偏振分束器对于 THz 器件的研究具有重要的意义^[13,14].

目前, 基于双芯光纤设计 THz 偏振分束器是 THz 领域的研究热点之一, 通常有两种实现方式: 第一种利用双折射效应, 通过调整光纤结构参数使 x, y 偏振模同时在双芯间进行耦合, 传输一定距离后实现偏振分离^[3-6]; 第二种利用谐振效应, 令某一偏振模满足谐振条件在双芯间来回耦合, 而另一

偏振模不满足该条件固定在某纤芯内传输, 当满足谐振条件的偏振模完全耦合至另一纤芯时, 实现偏振分离^[7,8].

基于双芯光纤的 THz 偏振分束器已有相关报道, 2012 年, 白晋军等^[9]提出一种低损耗、宽频段 THz 双芯光子带隙光纤定向耦合器用于偏振分离, 可实现 0.14 THz 范围内的定向耦合且耦合长度小于 15 cm. 2013 年, 姜子伟等^[10]设计了一种低损耗 THz 双芯光子带隙光纤定向耦合器, 这种光纤定向耦合器在 1.55—1.80 THz 范围内耦合长度小于 1.8 cm. 2014 年, Li 等^[11]提出了一种基于填充式多孔光纤的宽带双芯 THz 偏振分束器, 在 0.8—2.5 THz 频率范围内实现了偏振分离, 分离长度为 0.4—33.56 cm. 同年, 祝远峰^[12]提出两种 THz 偏振分束器, 一种基于悬浮芯光纤, 另一种基于十字架型纤芯光纤, 前者在 1 THz 的分离长度为 3.36 cm, 后者在 1 THz 的分离长度为 11.4 cm. 然而, 上述设计的器件分离长度随频率增长较快, 应

* 光电信息技术教育重点实验室(天津大学)开放基金(批准号: 2014KFKT003)、国家自然科学基金(批准号: 61571237)、国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 61405096)、区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室开放基金资助项目(批准号: 2015GZKF03006)和江苏省光通信工程技术研究中心资助项目(批准号: ZSF0201)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn

用的带宽相对较窄.

为解决该问题, 本文提出一种基于领结型多孔光纤^[15]的双芯 THz 偏振分束器, 通过调整双芯中某一纤芯结构实现折射率匹配耦合, 达到偏振分离的目的. 研究表明: 该类 THz 偏振分束器能够在较宽的频率范围 (0.5—2.5 THz) 内实现偏振分离, 且分离长度短, 均不超过 2.5 cm. 此外, 我们还将本文所设计的 THz 偏振分束器与目前较为流行的使用填充法实现折射率匹配耦合的偏振分束器进行了比较, 结果表明: 我们设计的结构制作方便, 操作简单, 且运行的频率范围更宽, 分离长度更短, 吸收损耗更低.

2 结构设计和仿真

本文设计的基于领结型多孔光纤的双芯 THz 偏振分束器, 采用谐振效应实现偏振分离. 要实现谐振条件, 可采用文献^[10]所提出的折射率反转匹配耦合 (ICMC) 法, 该方法的思路: 首先需要光纤具有高双折射特性, 即实现 x, y 两个偏振模的分裂; 其次, 为实现分离操作, 两根光纤纤芯结构应具有正交关系 (一般可将另一根完全相同的光纤旋转 90°), 再通过调整填充液的有效折射率实现 x 或者 y 偏振模式的匹配. 然而, 采用填充法需要给器件填充液体, 操作较为复杂; 且在 THz 波段中寻找到损耗低且折射率满足要求的液体, 非常困难. 基于此, 本文提出一种在双芯 THz 偏振分束器中实现偏振分离的新方法: 对某一纤芯进行隔行调整结构, 从而实现折射率匹配耦合.

本文对所设计的 THz 偏振分束器特性的分析与讨论均是基于全矢量有限元法 (finite element method, FEM) 计算而来, FEM 是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法^[16]. 提出的 THz 偏振分束器如图 1 所示, 它由两根多孔光纤 (纤芯为多孔结构, 包层为空气, 导光机理为全内反射) 构成, 光纤 A 为高双折射领结型多孔光纤; 光纤 B 是依据 ICMC 法, 由光纤 A 旋转 90° 并隔行调整结构为椭圆所成. 多孔光纤的基底为聚合物材料 TOPAS, 它在 THz 波段具有相对恒定的折射率, 且损耗较低. 光纤 A 和 B 的纤芯直径均为 $D_{\text{core}} = 490 \mu\text{m}$, 光纤 A 中领结型结构的两个大空气孔半径为 $r_2 = 13 \mu\text{m}$, 小空气孔半径为

$r_1 = 8 \mu\text{m}$, 孔间距 $\Lambda = 70 \mu\text{m}$, 光纤 B 中椭圆长轴 $r_3 = 15 \mu\text{m}$, 短轴 $r_4 = 13 \mu\text{m}$; 当纤芯 A 与 B 相切 ($L = 490 \mu\text{m}$) 时, 耦合现象最明显.

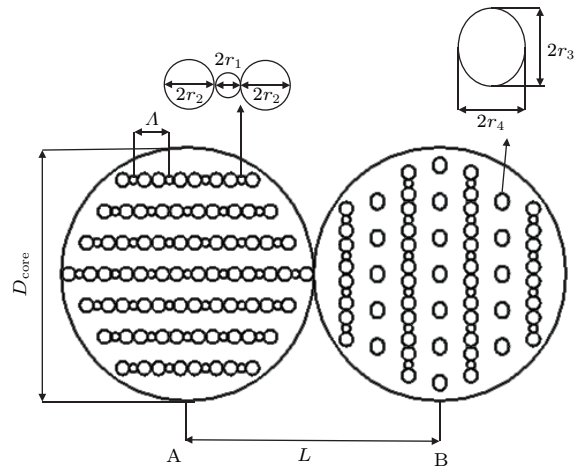


图 1 基于领结型多孔光纤的双芯 THz 偏振分束器的截面图

Fig. 1. Cross section of dual-core THz polarization splitter based on porous fibers with near-tie units.

如果光纤 B 仅仅是将光纤 A 旋转 90° , 那么由于 $n_{Ax} = n_{By} > n_{Ay} = n_{Bx}$ (其中 n_{Ax} 和 n_{Ay} 分别为光纤 A 中 x 和 y 偏振模的有效折射率; n_{Bx} 和 n_{By} 分别为光纤 B 中 x 和 y 偏振模的有效折射率), 无法实现偏振模匹配. 因此, 尝试对光纤 B 的结构进行改变, 通过隔行调整领结型结构为椭圆, 以实现 A, B 光纤中 x 偏振模的匹配. 仿真表明: 当椭圆参数设置为 $r_3 = 15 \mu\text{m}$, $r_4 = 13 \mu\text{m}$ 时, A 和 B 光纤中两个偏振模式的有效折射率分别满足 $n_{By} > n_{Bx}$ (如图 2(a) 所示) 和 $n_{Ax} > n_{Ay}$ (如图 2(b) 所示), 且此时 n_{Bx} 和 n_{Ax} 几乎完全相等 (如图 2(c) 所示). 因此, 在 0.5—2.5 THz 频率范围内, x 偏振模将会在两个纤芯间强烈耦合, 同时由于两个纤芯中 y 偏振模的有效折射率相差较大, 模式不匹配故不发生耦合.

图 3 给出了工作频率为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 THz 时, x, y 偏振奇模和偶模的稳态模场分布, 下标 o, e 分别表示奇模和偶模. 如图 3 所示, 在 0.5—2.5 THz 的频率范围内, A 和 B 光纤中的 x 偏振模因满足模式匹配条件, 在两芯之间始终发生耦合, 稳态模场同时分布于双芯中; 而对于 y 偏振模而言, 由于模式不匹配, 始终不会发生耦合, 稳态模场只存在于某一纤芯中.

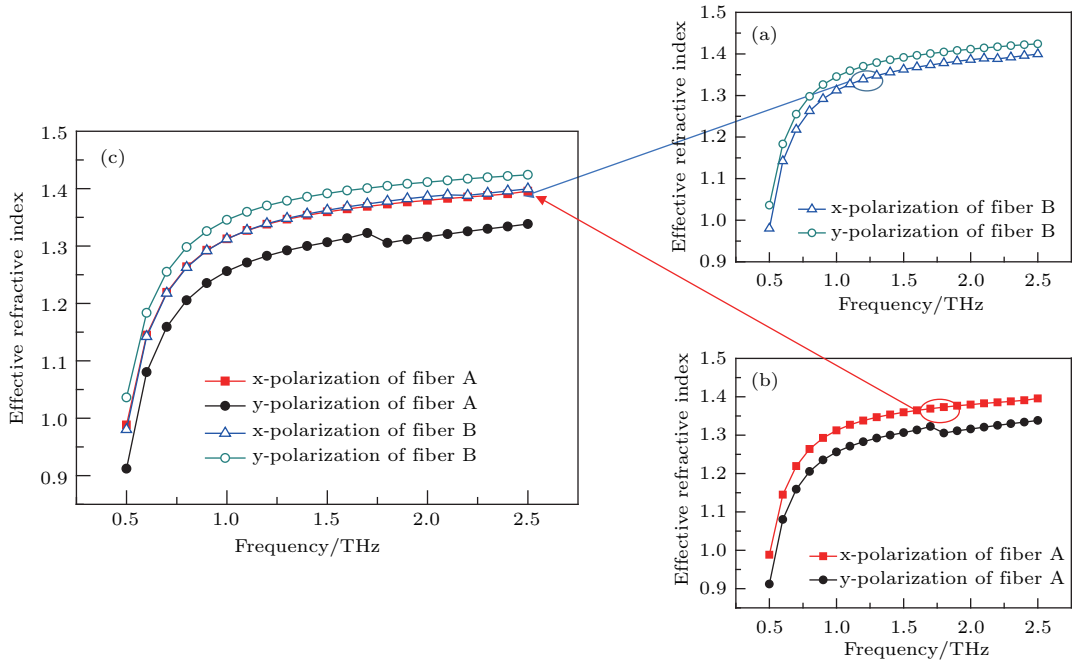


图2 光纤中 x 和 y 偏振模的有效折射率随频率的变化 (a) 光纤 B; (b) 光纤 A; (c) 光纤 A 与 B

Fig. 2. Effective refractive index of x and y polarization modes versus frequency: (a) Fiber B; (b) fiber A; (c) fiber A and B.

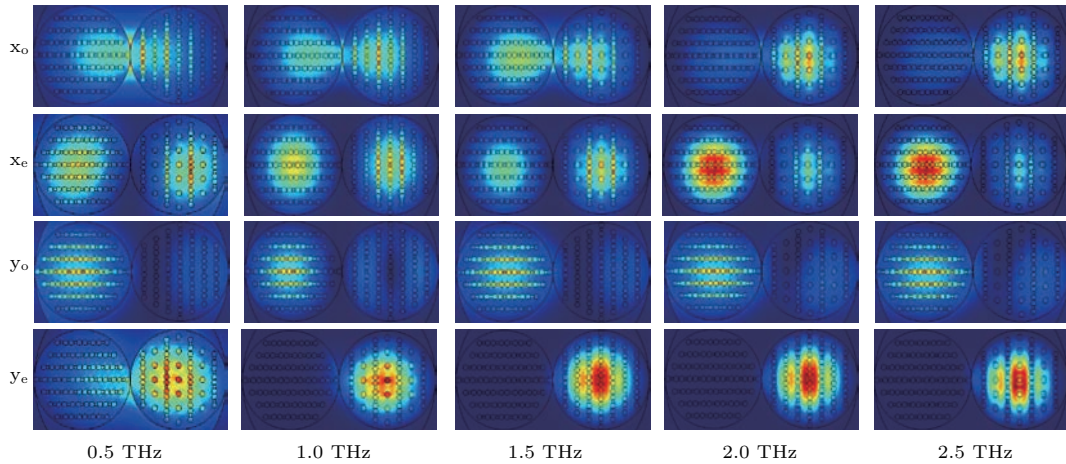


图3 (网刊彩色) x, y 偏振奇模和偶模在不同工作频率时稳态模场分布

Fig. 3. (color online) Modal distributions in steady state of even and odd modes for x and y polarization modes at different frequencies.

偏振分束器的分离长度是衡量该类器件性能的一个重要指标, 定义如下:

$$L_c = \lambda / (2|n_{xe} - n_{xo}|), \quad (1)$$

式中 L_c 表示分离长度, n_{xe} 和 n_{xo} 分别是 x 偏振偶模和奇模的有效折射率, λ 是入射波长. 由图 4(b) 可见: 采用调整结构法的 THz 偏振分束器, 其分离长度先随着频率的增加而增加, 在 $f = 1.5$ THz 的时候达到峰值 ($L_c = 2.5$ cm), 之后随着频率的增加而减小, 并且在整个频率范围内, 分离长度变化较

为缓慢, 控制在一个较小的范围内 (0.428—2.5 cm). 为了便于比较, 我们还对基于领结型多孔光纤的双芯 THz 偏振分束器进行了填充 (如图 4(a) 所示, 仿真计算表明对 B 芯进行隔行填充折射率为 1.28 的液体时, 也可达到偏振分离), 填充法是目前实现折射率匹配耦合的常用方法. 如图 4(b) 所示, 采用填充法的 THz 偏振分束器, 其分离长度的变化趋势和调整结构法的 THz 偏振分束器相似, 但在高频处 ($f > 1.7$ THz), 本文所设计的偏振分束器的分离长度明显优于用填充法设计的偏振分束器.

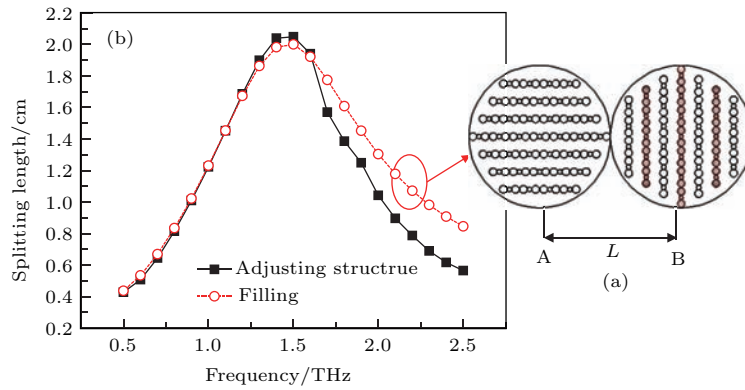


图4 (a) 采用填充法的THz 偏振分束器结构; (b) 填充法和调整结构法所设计的THz 偏振分束器的分离长度随频率的变化

Fig. 4. (a) The structure of THz polarization splitter with filling methods; (b) splitting length of polarization splitter with two methods versus frequency.

损耗是衡量偏振分束器性能的另一重要指标. 图5(a) 首先给出了器件的吸收损耗系数随频率的变化, 该参数定义如下:

$$\alpha_{\text{eff}} = \frac{\int_{A_{\text{background}}} n(r)\alpha_m(r)|E|^2 dA}{\text{Re} \left| \int_{A_{\infty}} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^* dA \right|}, \quad (2)$$

式中 α_{eff} 是器件的损耗系数; $\alpha_m(r)$ 是光纤基底材料的体吸收系数; $A_{\text{background}}$ 和 A_{∞} 分别是表示光纤横截面区域和整个平面的面积; $n(r)$ 是基底材料的有效折射率; \mathbf{E} 和 \mathbf{H} 分别是电场强度和磁场强度. 由图5(a) 可见: 不管填充法还是调整结构法设计的THz 偏振分束器, 其吸收损耗系数均随着频率的增加而单调增加; 在0.5 THz处, 对于x, y 偏振模而言, 两器件的吸收损耗系数都小于0.1 dB/cm.

图5(b) 给出了器件的吸收损耗随频率的变化, 该参数定义如下:

$$M_{\text{loss}} = L_c \alpha_{\text{eff}}, \quad (3)$$

其中 M_{loss} 是器件的吸收损耗, L_c 器件的分离长度. 如图5(b) 所示: 在整个频率范围内, 两种方法所设计的THz 偏振分束器的吸收损耗变化趋势一致, 在低频处均随着频率的增加而增加, 到达峰值后逐渐减小. 且正如图4(b) 和图5(a) 所示, 由于低频处两种方法所设计的THz 偏振分束器, 其分离长度和器件吸收损耗系数差别很小, 所以器件的吸收损耗也相差不大. 但是, 随着频率的增加, 两者的器件长度均缩短, 从而吸收损耗也随之减少. 其中, 当频率大于1.7 THz 后, 调整结构法设计的THz 偏振分束器的吸收损耗明显小于填充法设计的偏振分

束器, 且在2.3 THz 频率处, x, y 两个偏振的吸收损耗均小于0.35 dB.

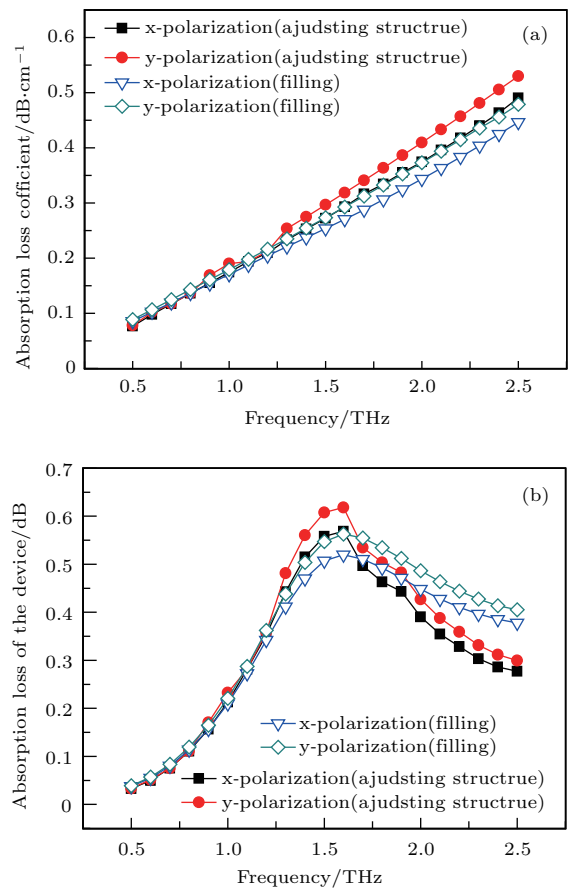


图5 采用填充法和调整结构法设计的THz 偏振分束器的损耗特性 (a) 器件的吸收损耗系数随频率的变化; (b) 器件的吸收损耗随频率的变化

Fig. 5. Loss characteristics of THz polarization splitter with filling method and adjusting structure method: (a) Absorption loss coefficient versus frequency; (b) absorption loss of the device versus frequency.

图6给出了两种方法设计的THz偏振分束器的x, y偏振模的消光比随频率的变化曲线. 偏振模的分离程度可用消光比来衡量, 其公式为

$$ER = 10 \left| \log \left(\frac{p_x}{p_y} \right) \right|, \quad (4)$$

式中ER表示消光比, p_x 和 p_y 分别表示x, y偏振模的输出功率. 由图6可知, 采用填充法的THz偏振分束器, 其x, y偏振模的消光比随着频率的增加而增加(即: 随频率的增加, 偏振模分离越彻底); 当 $f = 2.3$ THz, x, y偏振模的消光比最大, 分别为25.15和24.92 dB. 采用调整结构法的THz偏振分束器, x偏振模的消光比随着频率的增加而增加, 最大为22.94 dB ($f = 2.3$ THz); 而y偏振模的消光比先随着频率的增加而增加, 在 $f = 2.1$ THz达到峰值20.51 dB, 随后变小. 其中, 在2.3 THz处, x, y偏振模的消光比均较好, 分别达到22.94和19.2 dB. 在整个频率范围内, 填充法的THz偏振分束器的消光比要比调整结构法的优越.

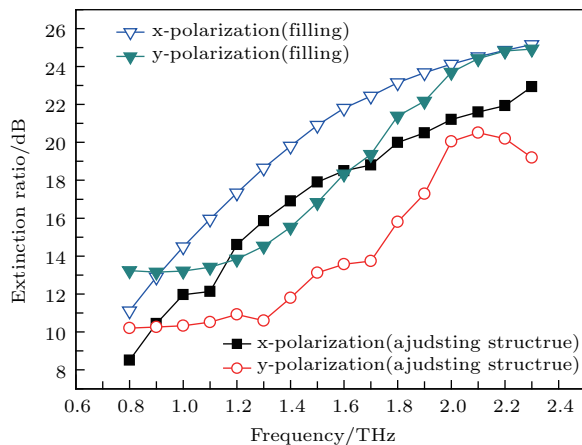


图6 (网刊彩色) 基于填充法和调整结构法的THz偏振分束器中, x, y偏振模的消光比随频率的变化

Fig. 6. (color online) THz polarization splitter with filling method and adjusting structure method, extinction ratios for x, y polarization modes versus frequency.

3 结 论

本文基于领结型多孔光纤设计双芯THz偏振分束器, 采用调整结构法实现折射率反转匹配耦合. 分别讨论了分离长度、损耗及消光比随频率的变化, 研究表明: 其分离长度和损耗的变化趋势一致, 均先随频率的增加而增加, 达到峰值后减小; 并且在整个频率范围内, 分离长度变化较为缓慢, 控制在一个较小的范围内(0.428—2.5 cm); x,

y偏振模的吸收损耗较小(10^{-1} 数量级), 最小值分别为0.0327和0.0334 dB ($f = 0.5$ THz); x, y偏振模消光比大致是随频率的增加而增加, 在2.3 THz处分别达到22.94和19.2 dB. 此外, 与采用填充法的THz偏振分束器进行比较, 除去操作方便, 制作简单外, 在高频处的性能指标(分离长度和损耗)更具优势. 而且所设计的THz偏振分束器由两根聚合物光纤构成, 目前制作聚合物多孔光纤的方法较多, 常用的有: 堆积法, 挤压法, 打孔法^[17]等, 故而加工方便, 较易实现.

参考文献

- [1] Galan J V, Sanchis P, Garcia J, Blasco J, Martinez A, Martí J 2009 *Appl. Opt.* **48** 2693
- [2] Yong L, Han K, Lee B, Jung J 2003 *Opt. Express* **11** 3359
- [3] Florous N, Saitoh K, Koshiba M 2005 *Opt. Express* **13** 7365
- [4] Zhang S, Zhang W, Geng P, Li X, Ruan J 2011 *Appl. Opt.* **50** 6576
- [5] Jiang H, Wang E, Zhang J, Hu L, Mao Q, Li Q 2014 *Opt. Express* **22** 30461
- [6] Mao D, Guan C, Yuan L 2010 *App. Opt.* **49** 3748
- [7] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M 2004 *Opt. Express* **12** 3940
- [8] Wen K, Wang R, Wang J Y, Li J H 2008 *Chinese Journal of Lasers* **35** 1962 (in Chinese) [文科, 王荣, 汪井源, 李建华 2008 中国激光 **35** 1962]
- [9] Bai J J, Wang C H, Hou Y, Fan F, Chang S J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 108701 (in Chinese) [白晋军, 王昌辉, 侯宇, 范飞, 常胜江 2012 物理学报 **61** 108701]
- [10] Jiang Z W, Bai J J, Hou Y, Bai X H, Chang S J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 028702 (in Chinese) [姜子伟, 白晋军, 侯宇, 王湘晖, 常胜江 2013 物理学报 **62** 028702]
- [11] Li S S, Zhang H, Bai J, Liu W 2014 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **26** 1399
- [12] Zhu Y F 2014 *Ph. D. Dissertation* (ZhenJiang: Jiangsu University) (in Chinese) [祝远锋 2014 博士学位论文 (镇江: 江苏大学)]
- [13] Hou Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [侯宇 2013 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [14] Wang C H 2013 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Nankai University) (in Chinese) [王昌辉 2013 博士学位论文 (天津: 南开大学)]
- [15] Wang J L, Yao J, Chen H, Zhong K, Li Z 2011 *J. Opt.* **13** 994
- [16] Wang J L 2011 *Ph. D. Dissertation* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [汪静丽 2011 博士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [17] Ma J R 2007 *M. S. Thesis* (Hebei: Yanshan University) (in Chinese) [马景瑞 2007 硕士学位论文 (河北: 燕山大学)]

Dual-core terahertz polarization splitter based on porous fibers with near-tie units*

Wang Jing-Li^{1)†} Liu Yang¹⁾ Zhong Kai²⁾

1) (Department of Opto-Electronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

2) (Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 1 August 2016; revised manuscript received 18 October 2016)

Abstract

Terahertz (THz) radiation, which is defined as the electromagnetic wave with a frequency ranging from 0.1 THz to 10 THz, has attracted widespread attention in recent years because of its unique possibilities in many fields. High-performance THz polarization splitter, a key device in THz manipulation, is of great significance for studying the THz devices. In the present paper, a novel dual-core THz polarization splitter is proposed, which is based on porous fiber with near-tie units. The introduction of near-tie units into the fiber core can enhance asymmetry to realize high mode birefringence. And the results show that the porous THz fiber exhibits high birefringence at a level of 10^{-2} over a wide frequency range. An index converse matching coupling (ICMC) method, which exhibits several advantages (such as short splitting length, high extinction ratio, low loss, and broad operation bandwidth), is used to allow for the coupling of one polarization mode within a broad operation band, while the coupling of the other polarization component is effectively inhibited. The splitting length is equal to one coupling length of x- or y-polarization component for which inter-core coupling occurs, and short splitting length means low transmission loss. Unlike the reported filling method, an adjusting structure method is proposed in the paper to satisfy the condition of index converse matching coupling. The full vector finite element method (FEM), which is based on the variational principle and the subdivision interpolation, is used to analyze the guiding properties of the proposed THz polarization splitter. The FEM is a widely used numerical method in physical modeling and simulation. Simulation results show that the THz polarization splitter operates within a wide frequency range of 0.5–2.5 THz. The splitting length does not exceed 2.5 cm in the whole frequency range and the minimum is only 0.428 cm. At 2.3 THz, the material absorption losses of x- and y-polarization are both less than 0.35 dB, and the extinction ratios for x- and y-polarization are 2.9 and 19.2 dB, respectively. Moreover, by comparing with a THz polarization splitter with filling method, the proposed THz polarization with adjusting structure method is easier to realize, the operating frequency range is wider, the splitting length is shorter, and the material absorption loss is lower. Finally, we note that the fabrication of such THz porous fiber designs could be realized by several methods, such as a capillary stacking technique, a polymer casting technique, a hole drilling technique, etc.

Keywords: polarization splitter, terahertz, adjusting structure, porous fiber

PACS: 42.81.Gs, 87.50.U–, 42.81.Qb

DOI: 10.7498/aps.66.024209

* Project supported by the Key laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education(Tianjin University), China (Grant No. 2014KFKT003), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61571237), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61405096), the Open Fund of State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Shanghai Jiao Tong University, China (Grant No. 2015GZKF03006), and the Research Center of Optical Communications Engineering & Technology, Jiangsu Province, China (Grant No. ZSF0201).

† Corresponding author. E-mail: jlwang@njupt.edu.cn