

## 垂直双空芯宽带太赫兹偏振分离器

侯宇, 杨会静

(唐山师范学院 物理系, 河北 唐山 063000)

**摘要:** 针对太赫兹波的特点, 利用折射率匹配耦合原理, 设计了一种垂直双空芯结构的偏振分离器。与传统的分离器件相比, 它具有以下优点: (1) 双芯折射率匹配度高, 使得对应的偏振模式所需要的分离长度很短; (2) 采用双空气纤芯结构, 降低材料对太赫兹波的吸收损耗; (3) 通过设计, 令其发生耦合的两个纤芯相互垂直, 从而使  $y$  偏振模的折射率曲线部分重合, 大大扩展了工作带宽的范围, 其工作带宽达到了 0.17 THz。此外, 由于器件结构简单对称, 降低了光纤的设计和制备难度, 使其在太赫兹网络中具有很高的应用价值。

**关键词:** 偏振分离器; 折射率匹配; 太赫兹; 垂直双空芯

**中图分类号:** O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1225005

## Broadband terahertz polarization splitter based on orthogonal dual hollow core

Hou Yu, Yang Huijing

(Department of Physics, Tangshan Normal University, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** In terahertz frequencies, using refractive index matching coupling principle, a broadband polarization splitter based on orthogonal hollow core was designed. Compared with the traditional separation device, it has the following advantages: (1) the refractive index matching degree of dual-core is high, making the separation length of the corresponding polarization mode is very short; (2) the dual-core are filled with air, which can reduce the absorption loss to THz wave; (3) through the design, making the dual-core perpendicular, thus the refractive index curve of  $y$  polarization mode overlap with that of  $x$  polarization mode, greatly expanded the scope of bandwidth. Its working bandwidth reached 0.17 THz. In addition, because of its structure is simple and symmetry, the THz fiber is easy to fabricate, which has a high application value in the terahertz network.

**Key words:** polarization splitter; index matching; terahertz; orthogonal dual hollow core

收稿日期: 2016-04-12; 修订日期: 2016-05-14

基金项目: 河北省自然科学基金(E2015105079); 唐山师范学院博士基金(2014A07)

作者简介: 侯宇(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光学设计方面的研究。Email: 198468hy@163.com

## 0 引言

光纤偏振分离器是一种重要的光学元件,它可以将一束光信号分解成偏振态相互垂直的、分别在两个纤芯或多个纤芯中传输的光信号。随着光学技术的不断发展,偏振分离器已经在光通信系统、光纤传感、信号探测等领域得到了广泛的应用。这种器件的工作原理通常有两种:第一种是直接耦合,即通过改变光纤空气孔的尺寸、形状、结构,使得两个相互垂直的偏振模式具有不同的耦合长度<sup>[1-2]</sup>。当光波传输一段距离后,耦合长度短的偏振模式就会转移到其他纤芯中传输,从而实现偏振模式的分离。基于这种工作原理,最具代表性的器件结构可以参考文献[1]中的内容,它的工作带宽较宽,但是分离长度的长短却不好控制,一般需要几米的长度。对于 1 310 nm、1 550 nm 等波段的光来说,几米的长度不会产生较大的吸收损耗。但是,太赫兹光却很特殊,很多材料都对它有较强的吸收,尤其是水、硅等介质。所以对于太赫兹波段的偏振分离器来说,一定要减小分离长度;第二种是选择性耦合,相关的报道也比较多<sup>[3]</sup>,通常是通过对光纤结构的调整使得某一个偏振态的光发生强烈耦合,使其从一个纤芯转移到另一个纤芯中。而另一个偏振态的光却弱耦合或不耦合,从而还在原来的纤芯中传输,达到偏振分离的目的。这种器件的分离长度可控,能在很短的传输距离内实现偏振分离,但其工作带宽却很窄,只有在折射率匹配点附近很小的范围内才能满足要求。如参考文献[4]中的相关报道,所设计的偏振分离器的工作带宽只有 5 nm。

太赫兹的波谱位置处于  $10^{12}$  Hz 左右,频率范围在 0.1~1 THz 之间。还有些时候,其被广义的定义为频率值超过 100 THz 的波<sup>[5-6]</sup>。这包括了整个中红外和远红外的大部分波段。由于其介于微波和红外光之间,所以它兼具了两者的独特光学性质。随着太赫兹源和探测技术的快速发展,太赫兹波已在无损探测、遥感传感、宽带通信等领域得到了广泛应用。但也正是因为它所处的特殊波谱范围,使得很多现有的材料对其都有很高的吸收损耗。所以,在设计太赫兹光纤器件时不能直接套用传统的光纤设计方法。在传统的光纤设计中,不需要考虑光纤器件的吸收

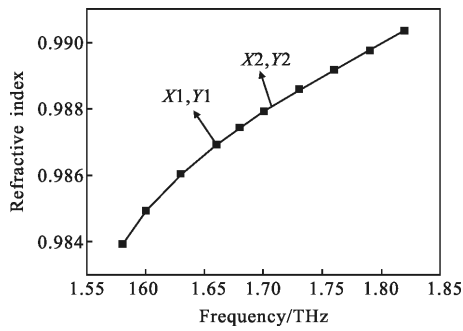
损耗和带宽问题。因为在 850、1 310、1 550 nm 3 个光通信波段,正好都处于  $\text{SiO}_2$  的低损耗窗口位置。而带宽问题也好解决,只要覆盖这三个通信波段或其中几个即可满足通信要求。但对于太赫兹器件来说,这两个指标是必须考虑的。

综上所述,针对太赫兹波的特点,利用折射率匹配耦合原理,文中设计了一款新颖的双空芯结构的太赫兹偏振分离器。与传统的分离器件相比,它具有以下优点:(1) 双芯折射率匹配度高,使得对应的偏振模式所需要的分离长度很短,分离长度的最小值为 1.8 cm;(2) 采用双空气纤芯结构,降低材料对太赫兹波的吸收损耗,在 1.7 THz 处,其传输损耗的最小值只有 0.28 dB/m;(3) 通过设计,令其发生耦合的两个纤芯相互垂直,从而使 y 偏振模的折射率曲线部分重合,大大扩展了工作带宽的范围,其工作带宽达到了 0.17 THz。此外,由于器件结构简单对称,降低了光纤的设计和制备难度,使其在太赫兹网络中具有很高的应用价值。

## 1 器件设计与特性分析

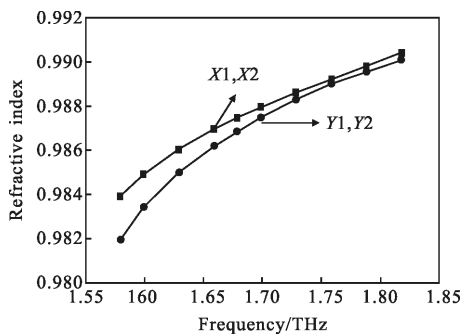
在太赫兹器件的设计过程中最重要的两个问题是带宽和材料的吸收损耗。下面分别来讨论这两个问题的解决方法。首先是带宽问题,传统的直接耦合方法带宽较大,但耦合长度长,且对偏振态的选择性较差,不易控制。而选择性耦合方法可以人为控制两个偏振态的移动方向,是现今被广泛应用的一种设计方法,但其工作带宽太窄,只能在折射率匹配点附近的频率范围内成功耦合。结合两种方法的优缺点,文中利用选择性耦合的方法,通过巧妙的设计使发生耦合的双芯呈垂直结构,从而使得两个纤芯的 y 偏振模的色散曲线部分重合,大大增加了工作带宽。图 1 中给出了其色散曲线图以及传统偏振分离器的色散曲线图。

图 1(a)中展示的是对称双芯直接耦合的偏振分离器。从图中可见,两个纤芯的色散曲线完全重合,所以在很宽的频率范围内都得实现较强的耦合。并且它的双芯是对称的,所以两个偏振态的色散曲线是简并的,反映在图上就只有一条曲线。图 1(b)中的分离器件的纤芯发生了变化,变成了两个非对称结构。它依然属于直接耦合,此时与图 1(a)最大的区别在于它的两个偏振态的色散曲线不在简并。但是因为两



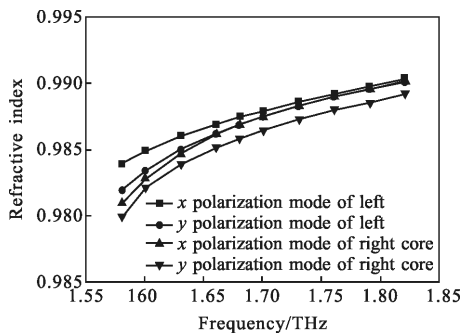
(a) 对称双芯结构

(a) Symmetrical dual core structure



(b) 非对称双芯结构

(b) Asymmetrical dual core structure



(c) 垂直双空芯结构

(c) Orthogonal dual hollow core structure

图 1 不同结构的双芯光纤对应的色散曲线图

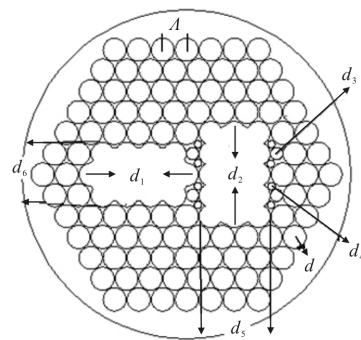
Fig.1 Different forms of index curve for the different fiber structures

个纤芯还是一样的, 所以其中的  $x$ 、 $y$  两条色散曲线仍然是重合的。图 1(c)中给出的是所设计的垂直双空芯结构偏振分离器的色散曲线图, 1 号光纤和 2 号光纤分别对应光纤的左侧纤芯和右侧纤芯。如图 2 所示, 两个纤芯都是类矩形结构, 分别有长轴和短轴。左边纤芯的长轴在  $x$  方向上, 所以在其两条色散曲线中,  $x$  模式的折射率较大, 有  $x_{左} > y_{左}$ 。而右边的纤芯与其垂直, 长轴在  $y$  方向上, 同理可知  $y_{右} > x_{右}$ 。

通过优化结构参数可以使得  $y_{左} \approx y_{右}$ , 从而使两条色散曲线部分重合, 达到扩大工作带宽的目的。

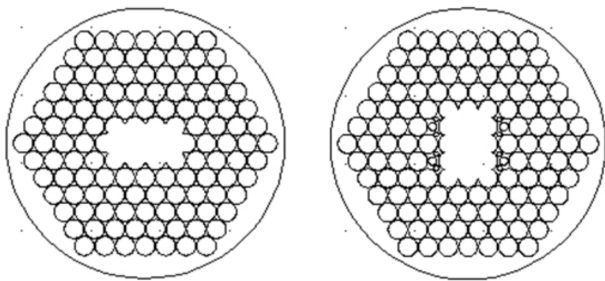
第二个问题是材料的吸收损耗问题。由于太赫兹波所处的波段非常特殊, 兼具了微波和红外光的特性, 很容易被其他材料吸收。为了解决这一问题, 采用如下三种方法: (1) 利用对太赫兹波吸收较小的材料作为光纤的基底, 此处选用的是聚合物 TOPAS<sup>[7-8]</sup>; (2) 将双芯设计成空芯结构, 使得太赫兹波大部分在空气中传输; (3) 基于选择性耦合原理设计偏振分离器件, 减小偏振模式的分离长度。

基于上面的讨论, 利用折射率匹配原理, 设计了垂直双空芯结构的太赫兹偏振分离器, 其端面结构在图 2 中给出。从图中可以看出, 两个纤芯均为类矩形结构, 呈垂直分布。为了便于分析两个纤芯的折射率曲线匹配情况, 可以将其等效为图 2(b)、(c)两种光纤的组合, 这种方法的正确性已在参考文献[9-10]中得到验证。值得注意的是, 在右侧纤芯附近有许多参数不同的小空气孔, 其主要是用来降低耦合过程中表面模的影响。表面模是在纤芯边缘部分形成的一种泄露模式, 它会降低纤芯中基模的能量, 破坏光纤的传输性质。在计算过程中也做了相应分析, 加入这些小空气孔后, 基模的损耗降低了 1~2 个数量级。除了小空气孔以外, 其他空气孔的尺寸均相同, 两个纤芯的大空气孔结构是多个空气孔组合叠加的结果。光纤的包层依然采用了传统的六角晶格结构, 基底材料选择的是聚合物 TOPAS, 它具有吸收较小、不吸水、透过率高等优点。光纤的具体参数在表 1 中给出。



(a) 垂直双芯太赫兹光纤的端面结构图

(a) Cross section of the terahertz fiber based on orthogonal dual-core PCF



(b) 左侧纤芯等效的光纤端面图 (c) 右侧纤芯等效的光纤端面图  
 (b) Fiber corresponding to the left fiber core in figure (a) (c) Fiber corresponding to the right fiber core in figure (a)  
 图 2 太赫兹光纤端面结构和左右纤芯等效光纤图  
 Fig.2 Gross section of the terahertz fiber and the equivalent fibers of the left and right cores in figure (a)

表 1 光纤参数表(单位:  $\mu\text{m}$ )

Tab.1 Parameter of the fiber(Unit: $\mu\text{m}$ )

Parameter	Value
$\Lambda$	292
$d$	280
$d_1$	1 448
$d_2$	1 448
$d_3$	150
$d_4$	90
$d_5$	864
$d_6$	864

所设计的光纤是空芯结构,纤芯内为空气,所以它的导光机制不同于传统的实芯光纤,利用的是带隙结构将光限制在纤芯中传输。又因为带隙的形状、大小只与光纤包层的结构有关,而对于所等效的两种光纤(图 2(b)、(c))具有相同的包层和结构参数,所以它们具有相同的带隙。图 3 展示了所设计光纤的

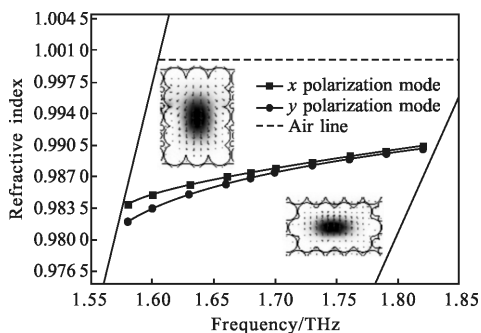


图 3 太赫兹光纤的带隙图

Fig.3 Bandgap of THz fiber

带隙结构,内部插图为 1 号和 2 号两种等效光纤在 1.7 THz 处的模场分布情况。从图中可以看出,带隙范围在 0.3 THz 左右。对于带隙型光纤来说,其损耗值与带隙分布密切相关,入射光频率在带隙中心处时损耗最小。而入射光的频率在带隙两侧边缘附近时损耗会迅速增加。所设计的太赫兹偏振分离器在 1.7 THz 处,其损耗的最小值只有 0.28 dB/m。

图 4 展示了不同频率处,  $x$ 、 $y$  两个偏振态的耦合情况。当太赫兹波从左侧纤芯入射时,随着入射频率的变化,  $y$  偏振模式在两个纤芯中发生强烈的耦合作用,能量也随之发生转移。而  $x$  偏振模式,由于不满足折射率匹配条件,并未发生耦合,依然保持在左侧纤芯中传输。从而当达到  $y$  偏振模式的分离长度时两种偏振模式就可以完全分开。分离长度是指某一种偏振模式的能量从一个纤芯完全转移到另一个纤芯时传递的长度。对于所设计的这种选择性耦合器件来说就是指  $y$  偏振模式的耦合长度。耦合长度可以表示为:  $L_c = \lambda/2|n_e - n_o|$ ,  $n_e$  和  $n_o$  是指某种偏振态的偶模和奇模。其分离长度与入射频率之间的关系由图 5 给出,从图中可知,在 1.66 THz 处,分离长度的最小值只有 1.7 cm。

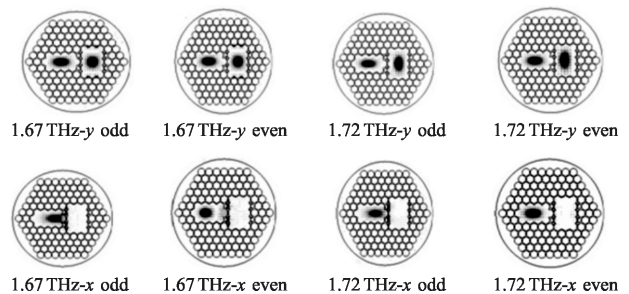


图 4  $x$ 、 $y$  两偏振模式在不同入射频率时的稳态模场分布

Fig.4  $x$ 、 $y$  polarization mode in different incident frequencies

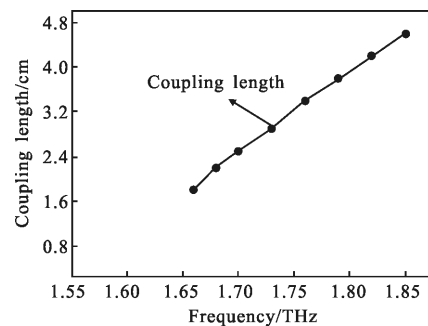


图 5 耦合长度与入射频率之间的关系

Fig.5 Relation between coupling length and different incident frequencies

## 2 结 论

损耗和带宽是衡量一个太赫兹器件好坏的关键。与传统的实芯太赫兹偏振分离器、多孔结构的偏振分离器相比,器件的工作带宽由于带隙范围的限制要小于上述两种器件。但经过巧妙的设计,其带宽范围与空芯结构的光纤器件相比已经被扩大了数倍。而且与前两种分离器件相比,在损耗方面具有很大优势。太赫兹在空气中传输的损耗是最低的,即使多孔结构在纤芯中引入了许多空气孔,但还是无法降低空气孔四周的材料对太赫兹波的吸收。权衡利弊,所设计的空芯结构太赫兹偏振分离器既具有较宽的工作频带,又具有较小的损耗,揭示了太赫兹器件设计与发展的一种新方向。

在器件的制备方面,文中的光纤器件也具有一些优势。实芯结构的太赫兹光纤由于损耗太大,现在已少有科研机构进行拉制。而与多孔光纤相比,所设计的大空气孔光纤器件更容易制备。多孔光纤通过在纤芯中引入大量小空气孔来降低材料对太赫兹波的吸收损耗。虽然小空气孔排布均匀且有一定规律,但是在已经很小的纤芯范围内再引入一系列小孔,无疑增大了光纤拉制过程中的困难,很容易发生坍塌粘连,严重影响光纤的导光性质。而所设计的大空气孔光纤,其中心大孔尺寸较大,便于拉制过程中的控制。即便有所变形也不会对光纤中传输的模式产生严重影响。下面的工作就是尝试制备这种光纤,考虑到光纤的材料性质和结构尺寸,传统的拉丝技术并不适用。故准备采用制备模具,再对模具进行浇注或拉制的方法。现已正在积极进行准备工作。

### 参考文献:

- [1] Lee B H, Eom J B, Kim J, et al. Photonic crystal fiber coupler[J]. *Opt Lett*, 2002, 27(10): 812-815.
- [2] Guo Shiliang, Huang Hui, Tong Kai, et al. Polarization splitter based on highly birefringent dual-core photonic crystal fibers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1864-1868. (in Chinese)  
郭士亮, 黄惠, 童凯, 等. 高双折射双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1864-1868.
- [3] Fan Fei, Chen Sai, Wang Xianghui, et al. Terahertz refractive index sensing based on photonic column array [J]. *IEEE Photonic Tech Lett*, 2015, 27(5): 478-481.
- [4] Li J, Mao Y, Lu C, et al. Polarization splitting of photonic crystal fiber with hybrid guidance mechanisms [J]. *IEEE Photon Technic Lett*, 2014, 23(8): 1358-1361.
- [5] Yang Jing, Zhao Jiayu, Liu Weiwei, et al. Study of terahertz radiation from filamentation induced by ultrafast laser pulses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 996-1007. (in Chinese)  
杨晶, 赵佳宇, 刘伟伟, 等. 超快激光成丝产生太赫兹波的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 996-1007.
- [6] He Xiaoyang, Yang Chun, Chen Qi, et al. Design of terahertz photonic crystal fiber and antenna [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 535-538. (in Chinese)  
何晓阳, 杨春, 陈琦, 等. 太赫兹光子晶体光纤与天线设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 535-538.
- [7] Nielson K, Rasmussen H K, Adam A J, et al. Bendable, low loss Topas fibers for the terahertz frequency range [J]. *Opt Express*, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [8] Atakaramians S, Afshar S, Heidepriem H E, et al. THz porous fibers: design, fabrication and experimental characterization[J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 14503-14062.
- [9] Chen M Y, Zhang Y K. Improved design of polarization-maintaining photonic crystal fibers[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(5): 2542-2544.
- [10] Fini J M. Aircore microstructure fibers with suppressed higher-order modes [J]. *Opt Express*, 2006, 14(2): 11354-11361.
- [1] Lee B H, Eom J B, Kim J, et al. Photonic crystal fiber