

太赫兹双空芯光纤定向耦合器*

姜子伟¹⁾ 白晋军²⁾ 侯宇¹⁾ 王湘晖¹⁾ 常胜江^{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)

(2012年5月8日收到; 2012年6月26日收到修改稿)

设计了一种低损耗太赫兹双芯光子带隙光纤定向耦合器. 采用全矢量有限元法对光纤的耦合特性、损耗和色散进行了理论分析. 结果表明, 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, 能够实现 0.07 THz 范围内窄带耦合, 且其损耗系数低于 0.02 cm^{-1} . 这种耦合器将在太赫兹窄带滤波、波分复用、开关和偏振分离等技术中有潜在应用价值.

关键词: 太赫兹, 双芯光子带隙光纤, 光纤耦合器, 耦合长度

PACS: 87.50.U-, 42.81.Qb, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.62.028702

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率处于 0.1 THz 到 10 THz 之间的电磁波, 在电磁波谱上介于微波和光波之间, 既有微波的良好穿透性又有光波的优异操控性, 并具有很多独特的性质, 比如宽瞬时带宽、高信噪比、低辐射能量、对非极化物质有较强的穿透性. 而且很多大分子的振动和转动频率、以及凝聚态体系的元激发均落于此波段. 这些特性决定了太赫兹波可以广泛应用于物体成像、光谱分析、医疗诊断、材料分析测试以及无线通信等技术领域^[1-9], 具有重要的学术价值和重大的应用前景, 已形成一个快速发展的前沿研究领域.

发展太赫兹技术的应用, 需要低损耗的 THz 波导结构以实现 THz 波的高效传输, 同时也需要高速开关、调制器、耦合器等关键功能器件. 近年来, 低损耗多孔光纤和空心光子带隙光纤的迅速发展, 为基于光纤结构的低损耗太赫兹功能器件的研究提供有力的技术手段. 迄今为止, 关于太赫兹高双折射光纤^[10-12]和单模单偏振光纤^[13]的研究已被广泛报道, 然而对太赫兹光纤定向耦合器的研究还

比较少见. 2009年, Dupuis等^[14]通过将两根亚波长聚合物光纤紧贴放置实现定向耦合, 由于太赫兹导模能量与吸收介质重叠面积较小, 介质对太赫兹的吸收损耗较低. 但是, 由于这种耦合器中, 光纤是以空气为包层, 极易受到外界的干扰产生极大的散射损耗, 特别是受空气中水蒸气的影响较大. 为了克服这一缺点, 2010年 Nielsen等^[15]设计了一种双微结构纤芯的光子晶体光纤定向耦合器, 可以实现宽带定向耦合. 然而这种双芯耦合器耦合长度较大, 导模的大部分能量与背景材料重叠, 造成较大的吸收损耗, 且结构复杂, 不易加工实现. 2011年白晋军等^[16]提出一种双圆芯光子带隙光纤定向耦合器, 光纤的包层由亚波长尺度呈三角晶格排列的空气孔组成, 两个纤芯分别由去掉的7个空气孔构成, 其耦合长度约 13.5cm, 相比于双微结构耦合器, 耦合长度约缩短到 1/4. 然而这个长度仍能导致较大的传输损耗.

基于空芯光子带隙光纤, 本文提出了一种低损耗双芯光纤定向耦合器. 该耦合器选择高密度聚乙烯 (HDPE) 作为基底材料, 包层由亚波长尺度呈三角晶格排列的空气孔阵列构成, 两个纤芯分别由去掉4个空气孔组成类菱形结构. 理论研究分析发现

* 国家高技术研究发展计划项目 (批准号: 2011AA010205)、国家自然科学基金 (批准号: 61171027)、天津市自然科学基金重点项目 (批准号: 10JCZDJC15200) 和教育部博士点基金 (批准号: 20090031110033) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: sjchang@nankai.edu.cn

这种耦合器的耦合长度约为 1.35 cm, 是现有报道的太赫兹耦合器的耦合长度的十分之一. 且其损耗系数低于 0.02 cm^{-1} , 能有效的减小传输损耗.

2 光纤结构和理论分析

光纤结构如图 1 所示, 包层由呈三角晶格结构的空气孔构成, 通过去掉光纤中心的 8 个空气孔形成双芯结构. 为了增强耦合效果, 纤芯设计成如图中所示类菱形形状. 取 $\Lambda = 292 \mu\text{m}$ (Λ 为包层晶格周期, 即包层中相邻两空气孔中心之间的距离), 空气孔直径与晶格周期之比 $d/\Lambda = 0.96$, 空气折射率为 1, 背景材料 HDPE 的折射率为 1.534^[16,17].

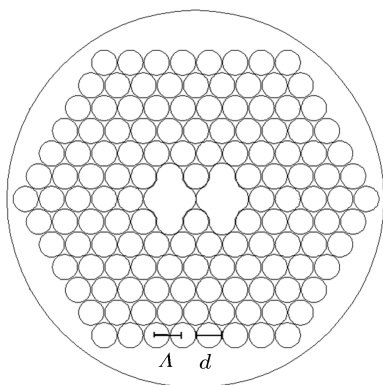


图 1 太赫兹双芯光子带隙光纤的端面示意图

采用全矢量有限元法对光纤耦合器进行数值分析. 全矢量有限元法是从 Maxwell 方程出发, 得到矢量波动方程

$$\nabla \times (\nabla \times E) - k_0^2 n^2 E = 0, \quad (1)$$

其中 E 是电场强度矢量, k_0 是真空中波数, n 是介质折射率. 由于光纤在纵向具有平移不变性, 可以将 E 表述为

$$E(x, y, z) = E(x, y) \exp(-i\beta z), \quad (2)$$

其中 β 是传播常数. 将求解区域离散化, 由方程 (1) 和 (2) 可以得到本征值方程

$$[K]\{E\} = k_0^2 n_{\text{eff}}^2 [M]\{E\}, \quad (3)$$

其中 $[K]$ 和 $[M]$ 为有限元矩阵, $\{E\}$ 为离散化电场强度, n_{eff} 为模式的有效折射率. 求解本征值方程 (3) 得到特征值和特征向量, 进而得到光纤的模场分布及相应的模式折射率, 分析光纤的传输特性、损耗特性和群速度色散.

3 传输特性分析

3.1 带隙结构与基模有效折射率

太赫兹双芯光子带隙光纤的光子带隙结构和基模有效折射率随频率的变化曲线如图 2 所示. 为了方便表述, 取双芯连线的方向为 x 轴方向, 垂直于 x 轴的为 y 轴方向. 由于引入两个纤芯, 基模在两个偏振方向上不再简并, 而是在每个偏振方向上出现了两个本征模式, 分别为偶模和奇模. 由图可见, 四种模式的有效折射率都小于空气折射率 1, 表明这些传导模式都是由光子带隙效应产生的. 由于带隙的影响, 模式在低频和高频都存在截止. 另外, 四种传导模式的有效折射率都是随着频率的增大而逐渐增大, 两个偏振方向上偶模式的折射率要高于奇模式的折射率, 奇模和偶模色散曲线不存在交点, 所以不发生去耦合现象, 说明两个纤芯中的能量在整个带隙内都可以产生转移^[18]. 由于受到表面模的影响, x 偏振偶模折射率高于 y 偏振偶模, 而对于奇模, x 偏振方向上折射率要略低于 y 偏振方向上折射率.

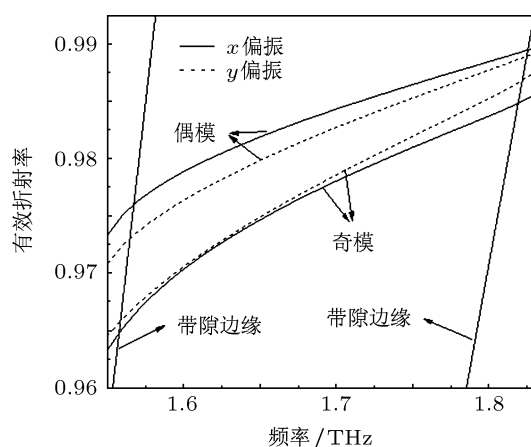


图 2 太赫兹双芯光子带隙光纤基模的有效折射率

3.2 耦合特性

光从双芯光纤中的一个纤芯中入射, 激励出的奇、偶两种模式发生干涉, 从而使光的能量沿着传播方向, 在两个纤芯中发生周期性的转移. 定义耦合长度为入射光功率从一个纤芯全部转移到另一个纤芯所需的光纤长度. 从模式理论角度来看, 耦合长度^[19]就是奇模和偶模产生“拍”的长度的一半, 可以表述为

$$L_c = \frac{\pi}{|\beta_{\text{even}}^i - \beta_{\text{odd}}^i|} = \frac{\lambda}{2|n_{\text{even}}^i - n_{\text{odd}}^i|}, \quad i = x, y, \quad (4)$$

其中, β_{even}^i 和 β_{odd}^i 分别表示 i 偏振方向上的偶模和奇模的传播常数, n_{even}^i 和 n_{odd}^i 分别表示 i 偏振方向上的偶模和奇模的有效折射率, λ 表示真空中的波长. 利用全矢量有限元法, 计算出偶模和奇模的有效折射率, 根据 (4) 式得到双芯光纤耦合长度.

图 3 给出了双芯光纤耦合长度随频率的变化曲线. 在两个偏振方向上, 耦合长度都随着频率的增大而增大. 对于 y 偏振方向, 随着频率的增加, 耦合长度变化很大, 特别是到高频区, 耦合长度迅速增加, 因此不适合用来实现定向耦合. 而对于 x 偏振方向, 耦合长度随着频率的增加几乎呈线性变化. 重要的是其耦合长度很短, 在 1.55 THz 仅为 0.962 cm, 在 1.80 THz 时为 1.757 cm, 这比普通太赫兹光纤定向耦合器的耦合长度减小了一个数量级, 更加容易实现器件的小型化, 减小背景材料对太赫兹波的吸收损耗.

为了进一步讨论双芯光纤耦合器 x 偏振方向上的耦合特性, 分析了频率为 1.68 THz 时对应的 3 dB 耦合器的耦合比. 此时光纤的长度取耦合长度的一半 0.675 cm. 耦合器的功率耦合比 [15] 可以表述为

$$\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \cos^2\left(\frac{\pi L}{2L_c}\right), \quad (5)$$

其中, P_{out} 和 P_{in} 分别表示入射光纤的输出功率和总入射功率, L 代表耦合器的长度. 3 dB 耦合器耦合比随频率的变化曲线, 如图 4 所示. 由图中可见, 在 1.65 THz 到 1.72 THz 频率范围内耦合效率处于 0.5 ± 0.05 区间内, 实现定向窄带耦合.

3.3 损耗特性

对于太赫兹光子带隙光纤, 包层空气孔是有限的, 这将导致部分导模能量发生泄漏. 其中一部分被基底材料吸收, 形成吸收损耗; 另一部分从光纤中泄露出去, 形成泄露损耗. 所以光纤的主要损耗可以表述为

$$L_{\text{total}} = L_{\text{abs}} + L_{\text{leak}}, \quad (6)$$

其中 L_{total} , L_{abs} 和 L_{leak} 分别表示总能量损耗、材料吸收损耗和泄露损耗.

材料吸收损耗系数可由归一化材料吸收损耗系数与材料的体吸收系数的乘积表示 [20] 为

$$L_{\text{abs}} = \alpha_m L_{\text{nom}} = \alpha_m \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\int_{\text{background}} n_b |E|^2 dA}{\left| \int_{\text{all}} S_z dA \right|}, \quad (7)$$

其中 α_m 是光纤基底材料的体吸收系数, L_{nom} 表示归一化材料吸收损耗系数, “background” 和 “all” 分别表示光纤的基底材料和整个光纤的横截面, n_b 是基底材料的折射率.

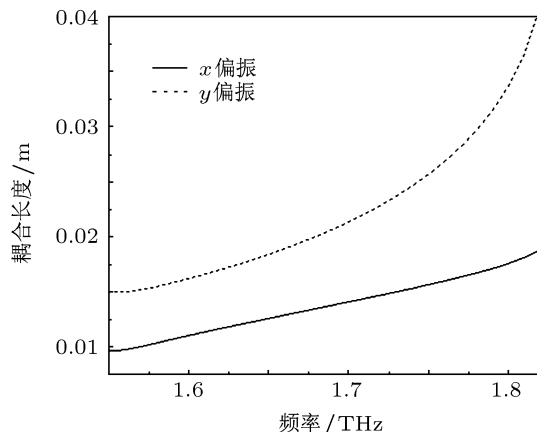


图 3 双芯光纤的耦合长度

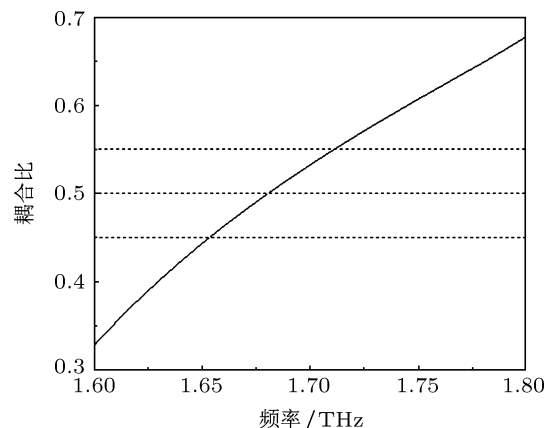


图 4 长度为 0.675 cm 光纤耦合器 x 偏振模式的耦合比

泄漏损耗 L_{leak} 可以通过导模折射率的虚部求出, 即

$$L_{\text{leak}} = 2k_0 \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (8)$$

其中 k_0 是真空中的波数, Im 表示求虚部.

图 5 给出了导模吸收损耗随频率的变化曲线. 计算中, 取 HDPE 的吸收系数为 0.3 cm^{-1} [16,17]. 由图中可见, 在带隙中央, 材料吸收损耗都小于 0.02 cm^{-1} , 随着频率接近带隙边缘, 吸收损耗增大. 这是由于在带隙中央, 光子带隙局域能力强, 导模大部分的能量被局域在纤芯中, 通过空气传输, 从而显著降低了背景材料对导模的吸收损耗. 在带隙的边缘, 随着带隙对导模限制能力降低, 部分能量泄露到包层中, 被材料吸收. 另外发现在高频区, 奇模的

吸收损耗急剧增大, 而偶模相对平缓, 表明在高频带隙边缘, 带隙对偶模的局域作用强于奇模.

图 6 给出了双芯光子带隙光纤的泄露损耗随着频率的变化曲线. 由图中可以发现, 在带隙的中间, 损耗很小, 都低于 10^{-6} cm^{-1} . 随着频率接近带隙的边缘, 泄露损耗迅速增大. 这是由于在带隙中央, 光纤对导模的局域能力较强, 使能量很好的在纤芯中传输. 随着频率接近带隙边缘, 光子带隙对导模的局域能量下降, 导模的能量轻易的泄露到包层中去, 增大了泄露损耗. 同时发现, 偶模的泄露损耗要低于奇模式, 且随着频率的升高, 两种模式的泄露损耗差值增大, 说明高频区奇模更易于泄露到包层, 这也与图 5 中高频区偶模吸收损耗变化缓慢时, 奇模吸收迅速增大相符合. 对于泄露损耗, 可以通过增加光纤包层空气孔的层数加以减小.

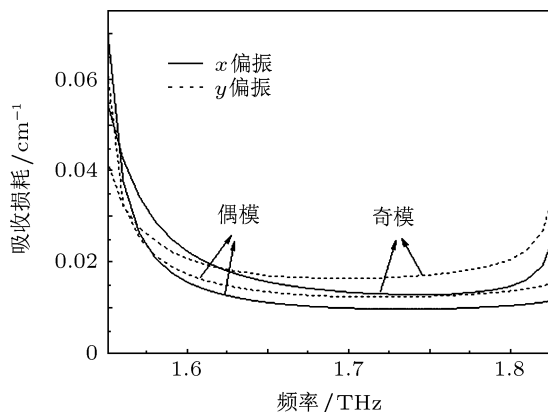


图 5 导模吸收损耗随频率的变化曲线

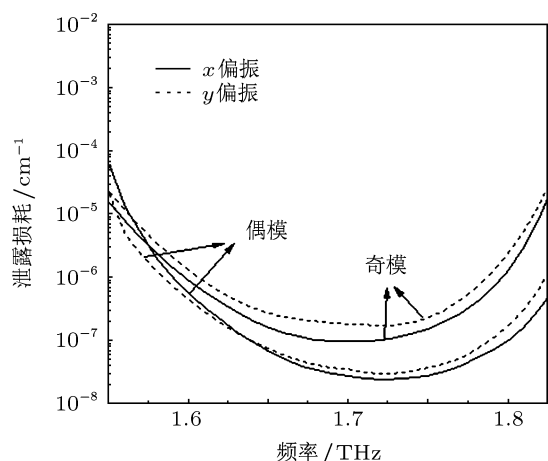


图 6 泄露损耗随频率的变化曲线

由上述可见, 光纤的泄露损耗相对于材料的吸收损耗几乎可以忽略不计. 光纤的损耗几乎全部来

源于材料的吸收损耗, 这也成为限制太赫兹光纤功能器件发展的一个关键因素. 在吸收损耗系数普遍较高的情况下, 通过设计减小光纤器件的尺寸, 成为降低传输损耗的关键方法之一.

3.4 群速度色散

在太赫兹光纤中, 群速度色散会直接导致光脉冲在传输时的展宽, 致使前后脉冲重叠, 引起码间串扰, 限制光纤的传输带宽和传输容量. 通常群速度色散主要由两部分组成, 分别为材料色散和波导色散. 由于基底材料 HDPE 折射率在传输带宽范围内基本保持不变, 且在空心光子带隙光纤中, 导模的大部分能量在空气纤芯中传输, 所以可以忽略材料色散. 近似的认为波导色散就等于群速度色散. 群速度色散可以表述为

$$D = \frac{d^2 \text{Re}(\beta)}{d\omega^2}, \quad (9)$$

其中 ω 是角频率, Re 表示取实部, β 是导模传播常数.

群速度色散随频率的变化曲线如图 7 所示. 在带隙边缘, 色散曲线随着频率的增加变化较大. 但是在中央区域, 曲线都比较平坦. 在带隙大部分范围内, x 偏振的色散略高于 y 偏振方向. 由于耦合器的耦合长度十分短, 所以得到的色散并不会对耦合器的性能有大的影响.

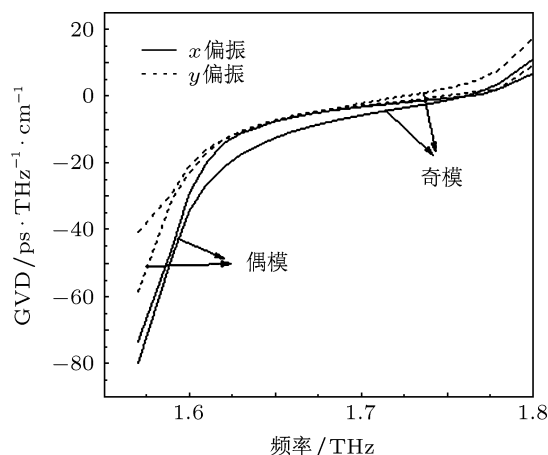


图 7 群速度色散随频率的变化曲线

4 结论

表一给出了本文提出的 THz 光纤定向耦合器和现有 THz 光纤耦合器的性能比较. 从表中可以

看出,空心光纤传输带宽较窄,这主要是由于空心光纤是基于光子带隙局域原理,而微结构光纤是基于全内反射原理.然而空心光纤具有较低的吸收损耗,这主要是由于光子带隙效应使得大部分导模被限制在空气中传输,与基底材料交叠不大.本文提出的类菱形纤芯光纤耦合器,和前面两种相比,带宽变窄,但是由于在实际太赫兹通信中,大部分采用窄带光源,几乎都是准单色辐射源,因此,这种结构也能满足实际的需求.值得注意的是,本文设计

的太赫兹光纤定向耦合器耦合长度仅处于 1 cm 量级,有效地减小了器件的体积,为实现器件的小型化,减小传输中的损耗奠定了基础.而且在加工方面,空芯耦合器比微结构纤芯耦合器有明显的优势.空芯光纤耦合器的纤芯是大空气孔,利用堆积法和减法技术^[14]可以比较容易的控制成功.而微结构纤芯耦合器由于其两个纤芯具有复杂结构,需要对其精细加工,运用现有的控制技术比如机械钻孔法都比较难实现.

表 1 双芯 THz 光纤耦合器的特性比较

光纤结构	耦合带宽 /THz	耦合长度 /cm	吸收损耗 /cm ⁻¹
双微结构纤芯 THz 光子晶体光纤定向耦合器	0.6	~ 45	10 ⁻¹
双圆芯 THz 光子晶体光纤定向耦合器	0.14	~ 13.5	< 0.0021
双类菱形纤芯光子晶体	0.07	~ 13.5	< 0.002

综上所述,本文设计了一种新型的太赫兹双芯光子晶体光纤定向耦合器,利用全矢量有限元法分析了其基模有效折射率、耦合特性、损耗特性以及群速度色散.数值结果显示,这种光纤定向耦合器具有很短的耦合长度,在带隙中央范围内仅处于

1.35 cm 左右,且其损耗系数低于 0.02 cm⁻¹,能实现 0.07 THz 范围内的 3 dB 定向耦合,而且光纤的群速度色散在传输带宽范围内也比较平坦.这种空芯光纤定向耦合器在窄带滤波、波分复用、偏振分离器等技术领域中有潜在的应用价值.

- [1] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L 2008 *Opt. Express* **16** 17039
- [2] Han P Y, Cho G C, Zhang X C 2000 *Opt. Lett.* **25** 242
- [3] Tielrooij K J, Timmer R L A, Bakker H J, Bonn M 2009 *Phys. Rev. Lett.* 198303
- [4] Moller L, Feserrici J, Sinyukov A 2008 *Opt. Lett.* **33** 393
- [5] Danylov A, Goyette T M, Waldman J 2010 *Optics Express* **18** 16264
- [6] Hunsche S, Koch M, Brener I 1998 *Optics Communications* **53** 22
- [7] Ozaki Y 2007 *Analytical Sciences* **23** 767
- [8] Yue W, Wang W, Yan H 2005 *Proceedings of the SPIE* **56** 568
- [9] Ma X J, Zhao H W, Dai B, Liu G F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3429 (in Chinese) [马晓菁, 赵红卫, 代斌, 刘桂锋 2008 物理学报 **57** 3429]
- [10] Atakaramians S, Afshar V S, Fischer M B 2009 *Optics Communications* **282** 36
- [11] Chen H, Chen D, Hong Z 2009 *Appl. Opt.* **48** 3943
- [12] Chen D, Tam Y H 2010 *Journal of Lightwave Technology* **28** 1858
- [13] Hou Y, Fan F, Zhang H, Wang X H, Chang S J 2012 *Photonics Technology Letters* **24** 637
- [14] Dupuis A, Allard J-F, Morris D, Stoeffler K, Dubois C, Skorobogatiy M 2009 *Opt. Express* **17** 8012
- [15] Nielsen K, Rasmussen H K, Jepsen P U, Bang O 2010 *Opt. Lett.* **35** 2879
- [16] 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]
- [17] Bora Ung, Anna Mazhorova, Alexandre Dupuis 2011 *Opt. Express* **19** B848
- [18] Wang Z, Kai G, Liu Y, Liu J, Zhang C, Sun T, Wang C, Zhang W, Yuan S, Dong X 2005 *Opt. Lett.* **30** 2542
- [19] Saitoh K, Sato Y, Koshiba M 2003 *Opt. Express* **11** 3188
- [20] Atakaramians S, Afshar V S, Fischer M B, Abbott D, Monro T M 2008 *Opt. Express* **16** 8845

Terahertz dual air core fiber directional coupler*

Jiang Zi-Wei¹⁾ Bai Jin-Jun²⁾ Hou Yu¹⁾ Wang Xiang-Hui¹⁾ Chang Sheng-Jiang^{1)†}

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

2) (*School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China*)

(Received 8 May 2012; revised manuscript received 26 June 2012)

Abstract

A novel low-loss dual-core fiber directional coupler for terahertz radiation is proposed. Coupling properties, loss and group velocity dispersion of the fibers are investigated by the full-vector finite-element method (FEM). The simulation results demonstrate that the coupling length of this coupler is less than 1.8 cm between 1.55 and 1.80 THz, and the coupling broadband of 0.07 THz can be realized. And the loss coefficient of the coupler is less than 0.02 cm^{-1} . The directional coupler has potential applications in narrowband filtering, wavelength-division multiplexing, switching, polarization splitter and so on.

Keywords: terahertz, dual-core photonic band-gap fiber, fiber coupler, coupling length

PACS: 87.50.U-, 42.81.Qb, 42.70.Qs

DOI: 10.7498/aps.62.028702

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2011AA010205), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61171027), the Natural Science Foundation of Tianjin of China (Grant No. 10JCZDJC15200) and the Doctoral Fund of Ministry of Education of China (Grant No. 20090031110033).

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