

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

张尧 孙帅 闫忠宝 张果 史伟 盛泉 房强 张钧翔 史朝督 张贵忠 姚建铨

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

Zhang Yao Sun Shuai Yan Zhong-Bao Zhang Guo Shi Wei Sheng Quan Fang Qiang Zhang Jun-Xiang Shi Chao-Du Zhang Gui-Zhong Yao Jian-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 208703 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200662

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200662>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于领结型多孔光纤的双芯太赫兹偏振分束器

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

物理学报. 2017, 66(2): 024209 <https://doi.org/10.7498/aps.66.024209>

高性能反谐振空芯光纤导光机理与实验制作研究进展

Theoretical and experimental investigation of light guidance in hollow-core anti-resonant fiber

物理学报. 2018, 67(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180724>

基于谐振环的太赫兹宽带偏振转换器件研究

A broadband polarization converter based on resonant ring in terahertz region

物理学报. 2017, 66(18): 180701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.180701>

基于双开口谐振环超表面的宽带太赫兹涡旋光束产生

Broadband terahertz vortex beam generation based on metasurface of double-split resonant rings

物理学报. 2019, 68(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182147>

太赫兹表面极化激元

Terahertz surface polaritons

物理学报. 2017, 66(14): 148705 <https://doi.org/10.7498/aps.66.148705>

InAs/GaSb量子阱中太赫兹光电导特性

Terahertz photoconductivity in InAs/GaSb based quantum well system

物理学报. 2018, 67(18): 187301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180769>

太赫兹双芯反谐振光纤的设计及其耦合特性

张尧¹⁾²⁾ 孙帅¹⁾²⁾ 闫忠宝¹⁾²⁾ 张果¹⁾²⁾ 史伟^{1)2)†} 盛泉¹⁾²⁾ 房强³⁾
张钧翔¹⁾²⁾ 史朝督¹⁾²⁾ 张贵忠¹⁾ 姚建铨¹⁾²⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

2) (天津大学光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

3) (天津市现代激光光学技术研究院, 天津 300384)

(2020年5月4日收到; 2020年6月28日收到修改稿)

设计了一种新型的太赫兹双芯反谐振光纤, 利用有限元分析法对光纤的损耗特性、双芯之间的耦合特性等进行了理论分析. 结果表明, 单芯反谐振光纤在一定范围内改变内包层管的排列分布, 其传输特性并不会受到明显的影响, 据此可以改变双芯光纤的内包层管的排列分布, 从而利用模式泄漏耦合机制在太赫兹波段实现双芯反谐振光纤的定向耦合. 本文通过改变纤芯距离和纤芯间的间隙大小, 在 2.5 THz 的传输频率下实现了耦合长度为 0.72 m 的定向耦合, 这种太赫兹双芯反谐振光纤将在太赫兹光开关、调制器和耦合器等太赫兹光学器件中具有重要的应用价值.

关键词: 太赫兹, 双芯反谐振光纤, 定向耦合, 耦合长度

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

DOI: 10.7498/aps.69.20200662

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1—10 THz 之间, 对应波长范围在 30 μm —3 mm 之间的电磁波, 其在光谱中处于微波和红外光之间, 具有良好的光子学特性和电子学特性^[1]. THz 波对非极性材料具有较高的穿透性, 而其本身光子能量较低, 此外 THz 波还具有宽带宽和大通信容量等特性, 使得 THz 波在无损检测^[2]、生物医学成像^[3]、通信^[4]等领域具有重要的学术价值和广泛的应用前景.

发展 THz 技术不仅需要高性能的 THz 波导技术以实现 THz 波的高效传输, 同时也需要适用于 THz 波段的光开关、调制器和耦合器等重要的光学器件. 随着对 THz 波导技术的深入研究, 研究人员提出了许多高性能 THz 波导结构, 如金属空芯管波导^[5]、平行金属板波导^[6]、光子晶体光纤^[7]

以及微结构空芯光纤等, 其中空芯光子晶体光纤和空芯反谐振光纤 (hollow-core anti-resonant fiber, HC-ARF) 近年来得到了迅速发展^[8–10], 为基于光纤结构的 THz 光学器件的研究提供了有力的技术手段. 迄今为止, THz 单模单偏振光纤^[11,12]和高双折射光纤^[13–15]已得到了较为广泛的研究, 但是对实现 THz 波定向耦合的光纤结构和器件的研究还比较少见. 2009 年 Dupuis 等^[16]通过把两个亚波长聚合物光纤临近放置, 利用光纤包层中能量相互作用实现定向耦合. 对于这种耦合结构, 纤芯模式与吸收介质的重叠面积较小, 材料吸收损耗较低, 但是亚波长聚合物光纤以空气作为包层, 容易受到外界的干扰而产生较大的散射损耗, 特别是空气中水蒸气的影响. 为了克服这一缺点, 2013 年姜子伟等^[17]提出了一种基于空芯光子晶体光纤的 THz 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 4 个空气

† 通信作者. E-mail: shiwei@tju.edu.cn

孔构成类菱形结构, 该结构成功将能量耦合过程引入光纤结构内部, 较好地降低了耦合器的传输损耗, 在 1.8 THz 以下取得了较好的定向耦合结果, 但是这种 THz 光纤定向耦合器结构相对复杂, 不易加工, 且无法在 2 THz 以上实现定向耦合.

为了探索结构简单且能在更高的传输频率下实现定向耦合光纤结构, 本文研究了 HC-ARF 的内、外包层的排列分布对传输特性的影响, 并设计了两种不同的双芯反谐振光纤结构. 利用有限元分析软件 COMSOL 对光纤的损耗特性、耦合特性等进行了理论分析, 结果表明, 在一定范围内改变 HC-ARF 内、外包层的排列分布, 可实现在保持光纤传输特性的同时, 改变纤芯模场分布, 从而可以利用模式泄漏耦合机制在太赫兹波段实现双芯反谐振光纤的定向耦合, 本文通过改变纤芯距离和纤芯间的间隙大小在 2.5 THz 的传输频率下实现了耦合长度为 0.72 m 的定向耦合.

2 HC-ARF 的内、外包层结构

2.1 结构设计

本文采用的 HC-ARF 基础结构如图 1(a) 所示, 纤芯直径 D_{core} 为 2 mm, 6 个内包层管的直径 d 为 1 mm, 管壁厚 t 为 0.13 mm, 满足反谐振周期条件 $t = (N - 0.5)\lambda / [2(n_1^2 - n_0^2)^{1/2}]$, 其中 λ 为波长, n_1 为材料折射率, n_0 为空气折射率, N 为正整数, 本文取 $N = 2$. 为了研究内、外包层对纤芯能量的限制作用, 先后剥离光纤的部分外包层以及扩大某一处内包层管的间隙, 形成了如图 1(b) 所示的外包层间隙结构 (HC-ARF with outer-slit cladding, O-ARF) 和如图 1(c) 所示的内包层间隙结构 (HC-ARF with inner-slit cladding, I-ARF). 在 O-ARF 中, 内包层管位置不变, 增加外包层间隙大小, 为了保证光纤结构的完整性, 外包层间隙大小 φ 最大为 50° ; 在 I-ARF 中, 外包层结构不变, 只改变某一处内包层管的间隙大小, 为了保证光纤的完整性, 包层管间隙大小 φ 最大为 60° .

光纤材料选用环烯烃共聚物 (cyclic olefin copolymer, COC), 相比于聚乳酸、有机玻璃等材料, 这种材料的折射率在 2.5 THz 及更高的频率下能够稳定在 1.53 左右, 其材料色散低至可以忽略, 并且这种材料具有较低的吸收系数 [18,19], 因此该材料是较为理想的 THz 光纤基材.

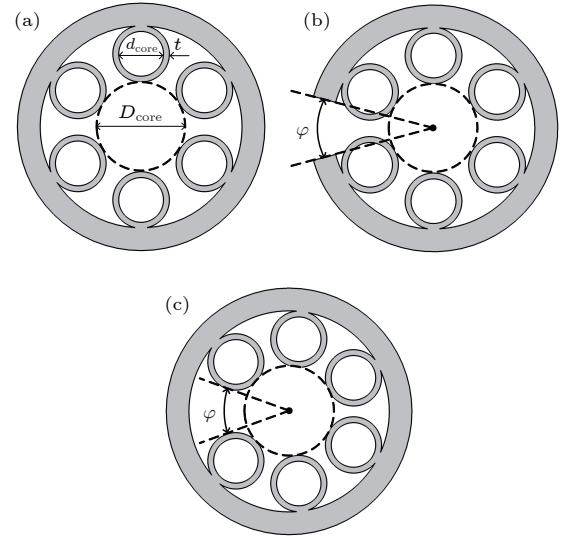


图 1 端面示意图 (a) HC-ARF 基础结构; (b) O-ARF; (c) I-ARF

Fig. 1. The cross-section of (a) HC-ARF, (b) O-ARF, and (c) I-ARF.

2.2 模拟结果分析

光纤的限制损耗 (confinement loss, CL) 是影响其传输特性的重要因素, HC-ARF 中限制损耗 [20] 为

$$CL = \left(\frac{20}{\ln 10} \right) \left(\frac{2\pi f}{c} \right) \text{Im}(n_{\text{eff}}), \quad (1)$$

其中, f 为光波频率, $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 为模式有效折射率虚部. 为表征 HC-ARF 的结构变化对模场分布的影响, 定义纤芯能量占比为 $R(\text{energy rate})$, 计算公式如下:

$$R = \int_{D_{\text{core}}} |E| dA / \int_{\text{all}} |E| dA, \quad (2)$$

其中分子积分区域为直径 D_{core} 的纤芯范围, 分母积分区域为整个光纤端面.

在 2.5 THz 的传输频率下, 改变内、外包层对 O-ARF 和 I-ARF 的限制损耗以及纤芯能量占比的影响如图 2 所示, 不同间隙大小的 O-ARF 和 I-ARF 的模场如图 3、图 4 所示. 由图 2 中的蓝虚线和红虚线可知, 在 O-ARF 中, 随着间隙的增大, 限制损耗和纤芯能量占比没有明显的变化, 分别稳定在 0.83dB/m 和 89% 左右, 由图 3 所示的 O-ARF 的模场分布图可见, 外包层的缝隙对纤芯模场没有明显的影响; 由图 2 中的蓝实线和红实线可知, 在 I-ARF 中, 随着间隙在一定范围内增大, 限制损耗略微减小后缓慢增大, 在 $\varphi = 42^\circ$ 时达到 0.83dB/m,

同时纤芯能量占比从 89% 略微减小到 83%; 随着间隙进一步增大, I-ARF 的限制损耗显著增大、纤芯能量占比显著减小, 在 $\varphi = 60^\circ$ 时限制损耗显著增到 1.58 dB/m、纤芯能量占比减到 71%. 由图 4 所示, 随着内包层圆间隙的增大, I-ARF 的纤芯模场向间隙略微偏移, 但是间隙进一步增大后, I-ARF 的纤芯模场出现了明显的偏移. 对比可知, HC-ARF 主要利用内包层管将光限制在纤芯内传输, 剥离部分外包层不会对 HC-ARF 的传输特性和模场分布产生影响, 并且 HC-ARF 在不影响传

输特性的情况下允许内包层管存在一定大小的间隙, 使部分纤芯能量随间隙泄漏, 但间隙过大会破坏 HC-ARF 的基本结构, 纤芯内大量的能量将从间隙泄漏, 模场分布发生严重偏移, 光纤传输损耗急剧增大. 由此可见, 在不影响 HC-ARF 传输特性的情况下, 可以剥离部分外包层、扩大某一处内包层管间隙以实现模式泄漏, 符合双芯反谐振光纤的模式泄漏耦合机制, 为接下来设计 THz 双芯反谐振光纤并实现定向耦合提供了可能.

3 THz 双芯反谐振光纤

3.1 双芯耦合理论

对于 HC-ARF 而言, 利用反谐振效应将传输的光限制在纤芯内, 其纤芯模式与包层模式几乎没有重叠, 故并不能像普通石英光纤一样单纯靠近距离实现定向耦合, 只有改变其内部结构, 组合成双芯结构或多芯结构, 在保证原有空芯光纤波导功能的同时, 将各自的模式泄漏到相邻的纤芯中, 使纤芯模式相互影响从而实现定向耦合, 这种耦合机制也被称为模式泄漏耦合机制. 用于分析光纤耦合原理的耦合模理论同样适用于该耦合机制, 耦合模理论的核心是耦合模方程. 下面从耦合方程出发, 对双芯反谐振光纤的耦合原理进行分析.

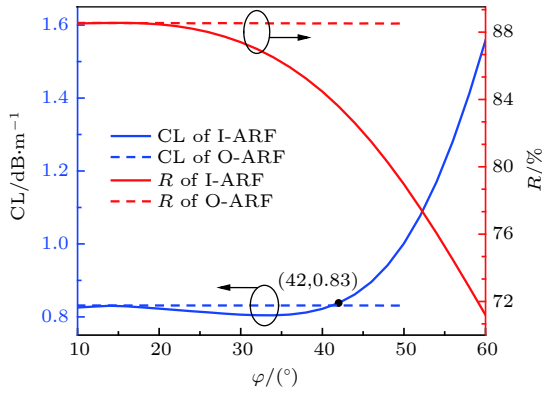


图 2 I-ARF 与 O-ARF 的限制损耗和纤芯能量占比随 φ 的变化曲线

Fig. 2. Confinement loss and energy rate as a function of φ for the fundamental mode in I-ARF and O-ARF.

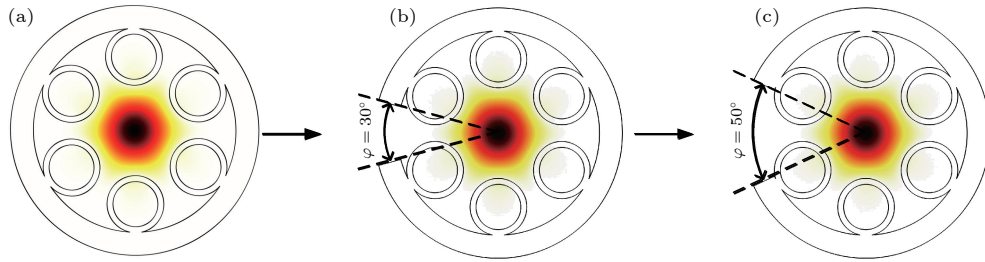


图 3 模场图 (a) HC-ARF; (b) $\varphi = 30^\circ$, O-ARF; (c) $\varphi = 50^\circ$, O-ARF

Fig. 3. Fundamental mode distribution of (a) HC-ARF, and O-ARF of $\varphi = 30^\circ$ (b) and $\varphi = 50^\circ$ (c).

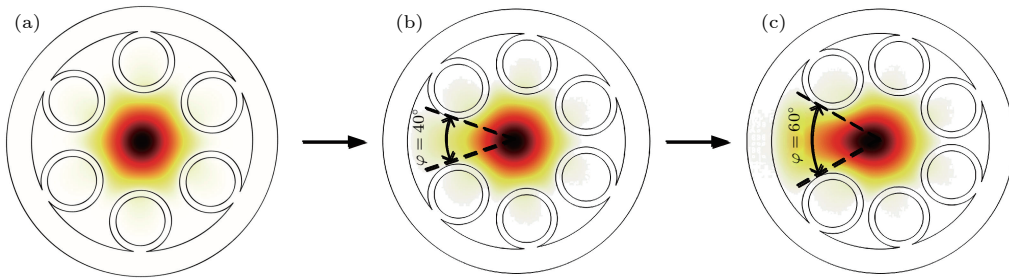


图 4 模场图 (a) HC-ARF; (b) $\varphi = 40^\circ$, I-ARF; (c) $\varphi = 60^\circ$, I-ARF

Fig. 4. Fundamental mode distribution of (a) HC-ARF, and I-ARF of $\varphi = 40^\circ$ (b) and $\varphi = 60^\circ$ (c).

在多芯结构中由于发生定向耦合, 电场强度分布将会发生改变, 表示为各纤芯电场强度分布的叠加^[21], 即

$$E(x, y, z) = \sum_{k=1}^{k=m} A_k(z) E_k(x, y) \exp(i\beta_k z),$$

$$m = 2, 3, 4, \dots, \quad (3)$$

其中, m 为纤芯总个数 (在本文双芯结构中 $m = 2$), $E_k(x, y) \exp(i\beta_k z)$ 为第 k 个纤芯的电场强度分布, β_k 为对应的传播常数, $A_k(z)$ 为第 k 个纤芯的场强系数.

双芯反谐振光纤利用双芯连通的间隙进行模式泄漏以实现定向耦合, 双芯之间的模场重叠很小, 两个纤芯之间的场强系数满足耦合模方程:

$$\frac{\partial A_1}{\partial z} = K_{12} A_2 \exp[i(\beta_1 - \beta_2)z], \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial z} = K_{21} A_1 \exp[i(\beta_2 - \beta_1)z], \quad (5)$$

其中 K_{12} , K_{21} 为双芯之间的耦合系数.

两个纤芯所传输模式的功率各为 $|A_1|^2$ 及 $|A_2|^2$, 由功率守恒条件可得

$$\frac{d}{dz} (|A_1|^2 + |A_2|^2) = 0, \quad (6)$$

又由初始条件 $A_1(0) = 0$, $A_2(0) = 1$ 得起始处耦合模方程 (4) 和 (5) 的解为

$$A_1(z) = \frac{K_{12}}{(K_c^2 + \Delta^2)} e^{-i\Delta z} \sin[(K_c^2 + \Delta^2)^{1/2} z], \quad (7)$$

$$A_2(z) = e^{-i\Delta z} \left\{ \cos[(K_c^2 + \Delta^2)^{1/2} z] - i \frac{\Delta}{(K_c^2 + \Delta^2)} \sin[(K_c^2 + \Delta^2)^{1/2} z] \right\}, \quad (8)$$

其中 $2\Delta = \beta_1 - \beta_2$, $K_c^2 = |K_{12}|^2$.

由 (7) 式可知, 当 $(K_c^2 + \Delta^2)^{1/2} z = \pi/2$ 时, $A_1(z)$ 功率达到最大值, 即两个纤芯之间实现最大的功率转换. 一般将这个距离 z 定义为耦合长度, 用 L_c 表示:

$$L_c = \frac{\pi}{2(K_c^2 + \Delta^2)^{1/2}}, \quad (9)$$

在相位匹配的条件下, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$, $K_{12} = K_{21} = K_c$, 故 (4) 式、(5) 式可写成

$$A_1(z) = \sin(K_c z), A_2(z) = \cos(K_c z), \quad (10)$$

将 $A_1(z)$, $A_1(z)$ 代入 (3) 式, 可得

$$E(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{ E_s \exp[i(\beta + K_c)z] + E_a \exp[i(\beta - K_c)z] \},$$

$$E_s = \frac{1}{\sqrt{2}} [E_2(x, y) + E_1(x, y)],$$

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{2}} [E_2(x, y) - E_1(x, y)]. \quad (11)$$

这表明, 在双芯反谐振光纤中, 纤芯之间发生了模式耦合, 各个纤芯的复振幅将发生改变, 但纤芯能够传导的模式由纤芯结构决定, 不会因耦合而发生转变, 因此每个纤芯的本征模场仍为 E_k , 而双芯结构中的本征模式其实就是每个纤芯的本征模式不同相位下的线性组合. 根据 (11) 式化简可知, 双芯结构的本征模式分别是一个对称模 s , 其传播常数为 $\beta + K_c$; 另一个反对称模 a , 其传播常数为 $\beta - K_c$, 则代入 (9) 式, 耦合长度就可表示为

$$L_c = \pi / |\beta_s^i - \beta_a^i|, \quad i = x, y, \quad (12)$$

其中 β_s^i , β_a^i 分别为不同偏振方向上的对称模 s 和反对称模 a 的传播常数, i 为偏振方向.

这说明, 利用双芯反谐振光纤在传播过程中的对称模 s 和反对称模 a 的传播常数就可以分析得到该光纤的耦合长度. 为了便于研究, 本文利用耦合长度来反映双芯反谐振光纤的耦合特性, 即双芯反谐振光纤的耦合长度越短, 耦合性能越好.

3.2 结构设计及模拟结果分析

为了在 HC-ARF 中实现定向耦合, 本文设计了一种较为直接的解决方案, 即将两根相同的 HC-ARF 剥离部分外包层、扩大并调整某一处内包层管间隙后进行镜像组合, 形成如图 5(a) 所示的双芯结构, 称为镜像双芯反谐振光纤. 图 5(b), (c) 分别为该光纤在 x 偏振方向上对称模 s 和反对称模 a 的模场图, 前者的两个纤芯模场都处于正强度峰中, 后者的一个纤芯模场处于正强度峰中, 而另一个处于负强度峰中.

在镜像双芯反谐振光纤中, 影响耦合长度的主要因素是间隙大小 φ . 镜像双芯反谐振光纤在 x 偏振方向上的耦合长度随 φ 的变化如图 6(a) 所示, 图 6(b), (c), (d) 分别表示 φ 为 30° , 42° 和 60° 时光纤对称模 s 的模场图. 可以发现, 随着间隙 φ 的增大, 耦合长度呈指数下降, 并在 φ 为 42° 时实现耦合长度为 7.2 m 的定向耦合. 由图 6(b), (c), (d) 所示的场强分布的变化表明, 当 $\varphi \leq 42^\circ$ 时对称模 s 在两个纤芯中保持独立; 但当 $\varphi > 42^\circ$ 时, 对称

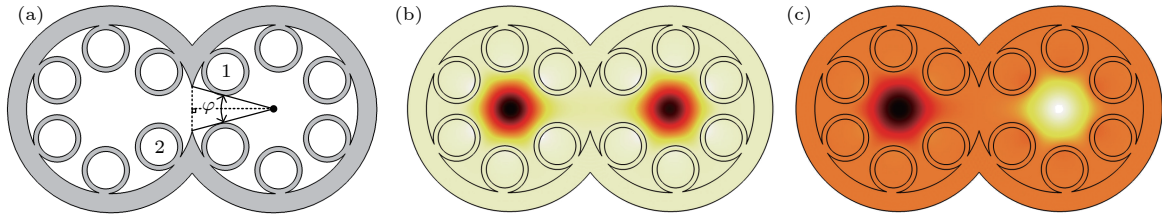


图 5 (a) 镜像双芯反谐振光纤端面示意图; x 偏振方向上的对称模 s (b) 和反对称模 a (c) 的模场图

Fig. 5. (a) The cross-section of dual-core HC-ARF with mirror composition; the fundamental mode distribution of even-mode s (b) and odd-mode a (c) at x -polarization.

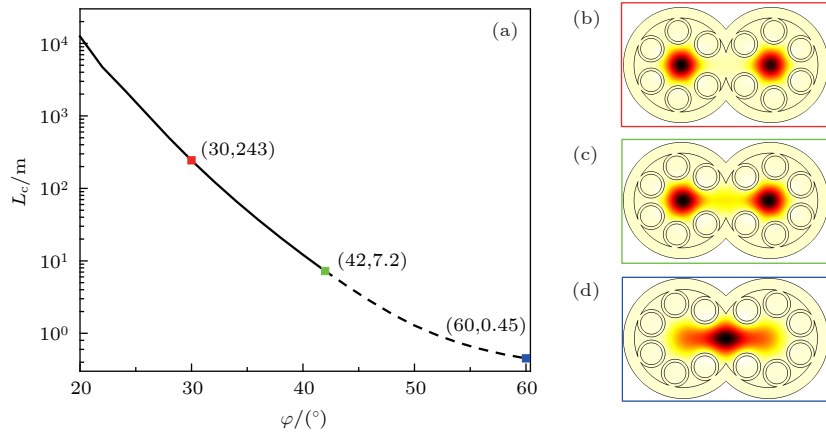


图 6 (a) 镜像双芯反谐振光纤的耦合长度随 φ 的变化曲线; 光纤在 x 偏振方向上的对称模 s 的模场图 (b) $\varphi = 30^\circ$; (c) $\varphi = 42^\circ$; (d) $\varphi = 60^\circ$

Fig. 6. (a) Coupling length as a function of φ for dual-core HC-ARF with mirror composition and the fundamental mode distribution of even-mode at x -polarization when (b) $\varphi = 40^\circ$, (c) $\varphi = 42^\circ$ and (d) $\varphi = 60^\circ$.

模 s 的本征模式在结构中心出现了明显的独立模式, 两个纤芯的模式向结构中心偏移而发生重叠.

图 6 说明间隙过大会破坏了两侧 HC-ARF 的波导作用, 使得双芯结构中心区域出现了类 HC-ARF 结构, 不再符合耦合模理论, 再扩大间隙大小也无法实现定向耦合, 这与第 2 节中 HC-ARF 关于间隙大小 φ 的分析一致. 因此这种光纤受间隙大小的限制无法得到理想的耦合长度. 为了解除镜像双芯反谐振光纤受间隙大小的限制并进一步缩短耦合长度, 在双芯结构镜像组合的基础上, 改变结构内部包层管排列分布, 调整纤芯距离形成如图 7(a) 所示的新型双芯结构, 称为包层重构型双芯反谐振光纤. 该结构将包层管 1 和 2 移动到双芯连接区域, 二者的距离为 d_t , 两个纤芯的距离为 D_r , 每一侧的 5 个包层管在光纤内均匀分布. 在不改变整体结构内部包层管数量的情况下, 利用包层管 1 和 2 将两芯区域隔开, 这不仅确保了左右两部分符合 HC-ARF 结构, 而且能够利用包层管 1 和 2 之间的间隙进行模式泄漏以实现定向耦合.

在该光纤中, 影响耦合长度的主要因素不仅是

间隙大小 φ , 也包括包层管 1 和 2 之间的距离 d_t 与两个纤芯的距离 D_r . 不同 D_r 下的耦合长度随 d_t 的变化曲线如图 8(a) 所示. 可以发现, 随着 d_t 从 0.9 mm 增加到 1.4 mm, 不同 D_r 下的耦合长度均呈指数下降, 由此可见 d_t 可以显著影响耦合长度, 而在相同的 d_t 下, D_r 从 2.6 mm 到 3.6 mm 的变化则对耦合长度的影响很小. 不同 D_r 下的纤芯能量占比随 d_t 的变化曲线如图 8(b) 所示, 可见两者呈反比, 且 D_r 越小, 纤芯能量占比随 d_t 的变化程度越小. 根据第 2 节所得结论, 为保证 I-ARF 光纤功能的完整性, 需要使纤芯能量占比在 83% 以上, 此时光纤在 $D_r = 2.6$ mm、 $d_t = 1.2$ mm 时具有最佳定向耦合效果, 耦合长度为 0.72 m, 纤芯能量占比为 83%, 对应的在 x 偏振方向上的对称模 s 和反对称模 a 的模场图如图 7(b), (c) 所示. 由此可见, 包层重构型双芯反谐振光纤在镜像双芯反谐振光纤的结构基础上通过优化内包层管的排列分布, 保证了 HC-ARF 的光纤功能的完整性, 突破了间隙大小的限制, 并进一步缩短了耦合长度, 在结构简单的双芯光纤中实现了 2.5 THz 波的定向耦合.

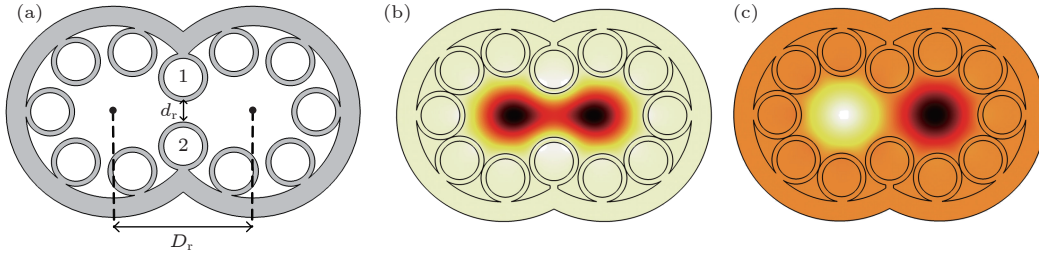


图 7 (a) 包层重构型双芯反谐振光纤端面示意图; x 偏振方向上的模场图 (b) 对称模 s , (c) 反对称模 a

Fig. 7. (a) The cross-section of dual-core HC-ARF with cladding reconstruction; the fundamental mode distribution of (b) even-mode s and (c) odd-mode a at x -polarization.

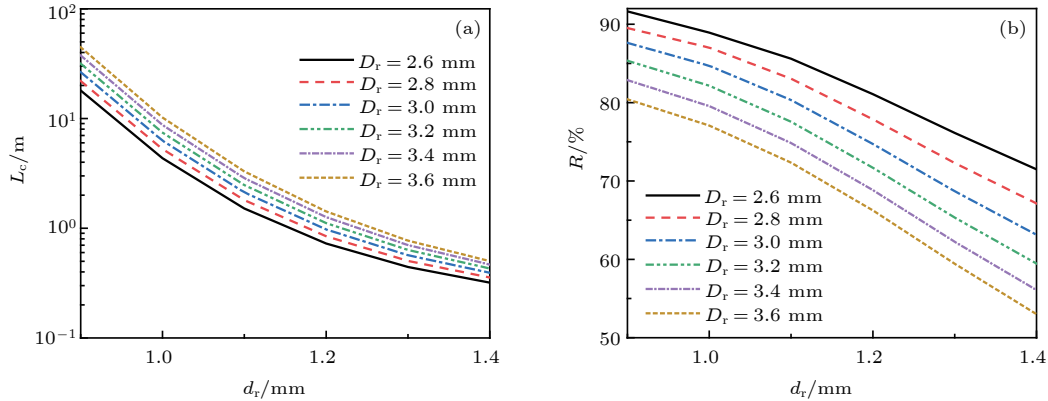


图 8 (a) 包层重构型双芯反谐振光纤在不同 D_r 下的耦合长度随 d_r 的变化曲线; (b) 包层重构型双芯反谐振光纤在不同 D_r 下的纤芯能量占比随 d_r 的变化曲线

Fig. 8. (a) Coupling length (L_c) and (b) energy rate (R) as a function of d_r under different D_r for dual-core HC-ARF with cladding reconstruction.

4 结 论

本文设计了一种新型的 THz 双芯反谐振光纤, 与普通石英光纤耦合器、双芯光子晶体光纤相比, 利用结构相对简单的反谐振结构实现了在 2 THz 以上的定向耦合. 利用有限元分析法对光纤的损耗特性、双芯之间的耦合特性等进行了理论分析, 研究发现, 在一定范围内改变 HC-ARF 内包层管的排列分布, 可以实现模式泄漏且不会对光纤传输特性产生明显的影响, 从而可以利用模式泄漏耦合机制设计出 THz 双芯反谐振光纤, 通过改变纤芯距离和纤芯间隙大小在 2.5 THz 的传输频率下实现了耦合长度为 0.72 m 的定向耦合, 这种太赫兹双芯反谐振光纤将在太赫兹光开关、调制器和耦合器等太赫兹光学器件中具有重要的应用价值.

参考文献

- [1] Zhong K, Shi W, Xu D G, Liu P X, Wang Y Y, Mei J L, Yan C, F u, S J, Yao J Q 2017 *Sci. China Technol. Sc.* **60** 1801
- [2] Homare M, Yoshiaki S, Isao Y, Shigenori N, Tetsuya Y, Chiko O 2020 *Opt. Express* **28** 12279
- [3] Cao Y Q, Huang P J, Li X, Ge W T, Hou D B, Zhang G X 2018 *Phys. Med. Biol.* **63** 035016
- [4] Withayachumnankul W, Yamada R, Fujita M, Nagatsuma T 2018 *APL Photonics* **3** 051707
- [5] Otter W J, Ridler N M, Yasukochi H, Soeda K, Konishi K, Yumoto J, Kuwata-Gonokami M, Lucyszyn S 2017 *Electron Lett.* **53** 471
- [6] Yoo S, Park J, Choo H 2020 *Results Phys.* **16** 102881
- [7] Islam M S, Sultana J, Atai J, Islam M R, Abbott D 2017 *Optik* **145** 398
- [8] Wei W, Zhang Z M, Tang L Q, Ding L, Fan W D, Li Y G 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 114209 (in Chinese) [魏薇, 张志明, 唐莉勤, 丁镭, 范万德, 李乙钢 2019 *物理学报* **68** 114209]
- [9] Wei C L, Weiblen R J, Menyuk C R, Hu J 2017 *Adv. Opt. Photonics* **9** 504
- [10] Hasanuzzaman G K M, Iezekiel S, Markos C, Habib M S 2018 *Opt. Commun.* **426** 477
- [11] Zhang W, Lian Z G, Trevor B, Wang X, Lou S Q 2019 *J. Opt.* **21** 025001
- [12] Wang X Y, Li S G, Liu Q, Wang G Y, Zhao Y Y 2017 *Plasmonics* **12** 1325
- [13] Sultana J, Islam M S, Faisal M, Islam M R, Ng B W, Ebendorff-Heidepriem H, Abbott D 2018 *Opt. Commun.* **407** 92
- [14] Hasan M R, Akter S, Khatun T, Rifat A A, Anower M S 2017 *Opt. Eng.* **56** 043108

- [15] Wang D D, Mu C L, Kong D P, Guo C Y 2019 *Chin. Phys. B* **28** 118701
- [16] Dupuis A, Allard J, Morris D, Stoeffler K, Dubois C, Skorobogatiy M 2009 *Opt. Express* **17** 8012
- [17] Jiang Z W, Bai J J, Hou Y, Wang 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]
- [18] Busch S F, Weidenbach M, Balzer J C, Koch M 2015 *J. Infrared Milli. Terahz. Waves* **37** 303
- [19] Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, Hayden L M, Polishak B, Zhou X H, Luo J D, Jen A K, Williams J C, Twieg R J 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 043505
- [20] Liang J, Ren L Y, Chen N N, Zhou C H 2013 *Opt. Commun.* **295** 257
- [21] Li S H, Wang J 2015 *Opt. Express* **23** 18736

Design and coupling characteristics of terahertz dual-core anti-resonant fiber

Zhang Yao¹⁾²⁾ Sun Shuai¹⁾²⁾ Yan Zhong-Bao¹⁾²⁾ Zhang Guo¹⁾²⁾ Shi Wei¹⁾²⁾†
 Sheng Quan¹⁾²⁾ Fang Qiang³⁾ Zhang Jun-Xiang¹⁾²⁾ Shi Chao-Du¹⁾²⁾
 Zhang Gui-Zhong¹⁾ Yao Jian-Quan¹⁾²⁾

1) (College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

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

3) (Tianjin Institute of Modern Laser & Optics Technology, Tianjin 300384, China)

(Received 4 May 2020; revised manuscript received 28 June 2020)

Abstract

The THz wave has good photonic and electronic properties, and has high penetration for non-polar materials, but its own photon energy is low. In addition, the THz wave also has characteristics such as wide bandwidth and large communication capacity, thereby making the THz wave possess important academic value and wide application prospects in the fields of non-destructive testing, biomedical imaging and communication. The development of THz technology requires not only high-performance THz waveguide technology for efficient transmission of THz waves, but also important optical devices such as optical switches, modulators, and couplers that are suitable for THz bands. With the in-depth study of THz waveguide technology, researchers have proposed many high-performance THz waveguide structures, such as metal hollow core tube waveguide, parallel metal plate waveguide, photonic crystal fiber and microstructure hollow core fibers, among which hollow-core photonic crystal fibers and hollow-core anti-resonant fibers (HC-ARF) have developed rapidly in recent years. So far, THz single-mode single-polarization fiber and high-birefringence fiber have been widely studied, but the researches on the fiber structure and devices that realize THz wave directional coupling are relatively rare. In this paper, we study the influences of the arrangement and distribution of the inner and outer claddings of HC-ARF on transmission characteristics, and thus design a new type of THz dual-core anti-resonant fiber. Compared with ordinary quartz fiber couplers and dual-core photonic crystal fibers, it can utilize a relatively simple structure and achieve directional coupling above 2 THz. Using the finite element analysis method to theoretically analyze the loss characteristics and coupling characteristics of the fiber, it is found that HC-ARF changes the periodic arrangement and distribution of the inner cladding tube within a certain range, which can achieve mode leakage without affecting the fiber transmission characteristics. So the THz dual-core anti-resonant fiber can be designed by using the mode leakage coupling mechanism. By changing the core distance and core gap size, the directional coupling with a coupling length of 0.72 m is realized at a transmission frequency of 2.5 THz. This terahertz dual-core anti-resonance fiber will have an important application value in terahertz optical devices such as terahertz optical switches, modulators and couplers.

Keywords: terahertz, dual-core anti-resonant fiber, directional coupling, coupling length

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

DOI: 10.7498/aps.69.20200662

† Corresponding author. E-mail: shiwei@tju.edu.cn