

双芯太赫兹光纤定向耦合器

黄旭, 骆兴芳, 左翔宇, 王少华, 祝远锋*

江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330000

摘要 提出了一种双芯太赫兹光纤定向耦合器, 两介质圆柱分别悬挂于两环形介质层的内部, 形成光纤的两个纤芯, 通过调节结构参数可使两偏振模耦合长度相等, 从而实现了耦合长度与偏振无关的特性。耦合器件长度可为光纤模式耦合长度的 1/2, 器件长度较短, 这降低了模式传输损耗。采用有限元法对耦合器进行了数值分析研究, 结果表明: 耦合器的长度为 0.535 cm, x 和 y 偏振模的传输损耗分别为 0.23 dB 和 0.19 dB; 在保证两偏振模的耦合长度差小于 1% 的前提下, 其带宽可达到 220 GHz。

关键词 光纤光学; 微结构光纤; 定向耦合器; 太赫兹; 耦合长度

中图分类号 TN253

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0206006

Dual-Core Terahertz Fiber Directional Coupler

Huang Xu, Luo Xingfang, Zuo Xiangyu, Wang Shaohua, Zhu Yuanfeng*

School of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang, Jiangxi 330000, China

Abstract In this paper, a two-core terahertz fiber directional coupler is proposed. Two dielectric cylinders are suspended in the interior of two annular dielectric layers to form two fiber cores. By adjusting the structural parameters, the coupling length of the two polarization modes can be equal, thus realizing polarization independence of the coupling length. The length of the coupler can be one half of the coupling length of the fiber mode, and the transmission loss can be reduced with the short length of the device. The coupler is numerically analyzed by finite element method. The results show that the length of the coupler is 0.535 cm, and the transmission loss of x and y polarization modes is 0.23 dB and 0.19 dB, respectively. Under the premise that the coupling length difference between the two polarization modes is less than 1%, the bandwidth reaches 220 GHz.

Key words fiber optics; microstructure fiber; directional coupler; terahertz; coupling length

1 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率介于微波和红外波之间的电磁波, 其独特的性质使其具有广泛的应用前景, 目前国内外科研机构已在生物技术^[1-2]、通信^[3-4]、光谱学^[5-6]、成像^[7-8]等领域展开了对 THz 技术的研究。一个完整的太赫兹系统一般由三部分组成: THz 辐射源、光波导和探测器。目前, THz 辐射源和探测器越来越接近实用化, 但 THz 光纤及器件还处于理论和实验室研究阶段, 其原因是用于组成此波段所需的光纤及光纤器件的低损耗透明材料比

较匮乏。现阶段, THz 波的高效传输已经成为影响 THz 技术发展的瓶颈。因此研究具有高品质的 THz 光纤器件具有重要的科学意义与实用价值。

THz 光纤定向耦合器是 THz 通信系统中重要的组成部件之一。在近红外波段, 基于微结构光纤的定向耦合器已经得到了广泛的研究^[9-10]。从理论上来说, 近红外波段的耦合器件结构可应用于 THz 波段, 即通过等比例增大光纤尺寸即可将工作在红外波段的耦合器件结构应用于 THz 波段, 但等比例增大光纤尺寸必然会导致耦合长度的等比例增大。而在 THz 波段, 长的器件将导致大的传输损耗, 因

收稿日期: 2021-08-17; **修回日期:** 2021-09-16; **录用日期:** 2021-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(12064016, 52061017)、江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ170185)

通信作者: *yuanfengzhu@126.com

此通过合理设计 THz 光纤结构来实现低损耗的 THz 耦合器具有重要的研究意义。

Nielsen 等^[11]提出了一个耦合长度为 20 cm、中心频率为 1.4 THz 的 THz 双芯光子晶体光纤耦合器,该耦合器只考虑了一种偏振模的耦合特性,忽略了两种偏振模的不同。Chen 等^[12]提出了一种中心频率为 1 THz 的三芯光纤定向耦合器,其 x 和 y 偏振模的耦合长度分别为 1.968 cm 和 2.193 cm, y 偏振模的耦合长度比 x 偏振模的耦合长度大 10%。另外,上述两种耦合器的纤芯传导模主要在基底材料中传输,有较大的吸收损耗,因此只能用缩短耦合器长度的办法来降低器件损耗。Dupuis 等^[13]提出了基于亚波长光纤的定向耦合器, Lu 等^[14]提出了基于介质管波导的定向耦合器,这两种耦合器的优点是:THz 波主要在空气中传输,这有效地减小了器件的吸收损耗;其缺点是:这两种耦合器件不易控制,任何外界接触均易影响 THz 波在器件中的传输。白晋军等^[15]提出了一种传输带宽为 0.14 THz、耦合长度约为 13.5 cm 的空芯光子带隙光纤定向耦合器,该耦合器的耦合长度较长。为了解决这一问题,姜子伟等^[16]提出了一种类菱形的双芯光纤定向耦合器,该耦合器的耦合长度缩短为 1.35 cm。本课题组 Zhu 等^[17]提出了一种亚波长双悬挂芯 THz 光纤耦合器,该耦合器的耦合长度与偏振无关,且耦合长度较短,但纤芯的支撑臂为矩形介质层,在光纤的制备过程中容易变形^[18],从而降低耦合器的效果,难以实现偏振无关。

近些年来研究人员设计了双芯光纤结构,用于两偏振模耦合长度不同的 THz 偏振分束器^[19-27]的研究,他们对耦合长度与偏振无关的低损耗 THz 耦合器的研究较少。在双芯光纤中两偏振模的耦合长度通常是不等的,设 x 偏振模的耦合长度(L_x)和 y 偏振模的耦合长度(L_y)满足关系 $L_x/L_y = m/n$, 如果 m 和 n 均为奇数或均为偶数时可实现耦合器,此时耦合器长度为 $nL_x = mL_y$, 即耦合器的长度为多个耦合长度,因此耦合器长度较长,长的耦合器将导致大的损耗,所以开发和设计耦合长度与偏振无关的 THz 耦合器结构是非常有必要的。

本文提出了一种新型双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器,构成耦合器的结构单元均具有圆形边界,这有利于其在制备过程中的形状保持,纤芯大小为亚波长尺寸,而 THz 波主要在空气中传输,这有效降低了材料的吸收损耗。本文采用有限元法研究了该耦合器的结构参数对耦合特性的影响,通

过优化结构参数可使 x 与 y 偏振的耦合长度相等,且耦合长度较短,从而有效降低了器件的传输损耗。

2 双悬挂芯太赫兹光纤定向耦合器结构

双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器的横截面如图 1 所示,两薄层小介质圆管对称地嵌套在最外层介质圆管内部,最外层介质圆管起到了固定光纤耦合器结构的作用。两介质圆柱分别悬挂于两薄层小介质圆管的内侧,形成光纤耦合器的纤芯 A 和纤芯 B。光纤耦合器的所有介质结构单元的边界均为圆形,这有利于在光纤耦合器的制备过程中避免光纤耦合器变形,此外,光纤耦合器的纤芯直径小于运转波长,且材料吸收损耗较小。目前,类似的运转波长为近红外波段的单悬挂芯光纤已被成功制备^[28],并且该光纤形状保持良好。

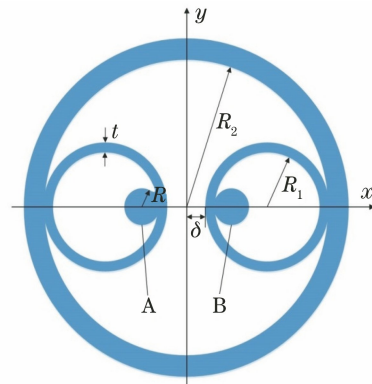


图 1 双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器横截面示意图
Fig. 1 Cross section diagram of double suspended core THz fiber directional coupler

双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器结构的几何参数定义为:纤芯半径为 R ,薄层小介质圆管的内半径为 R_1 ,薄层厚度为 t ,薄层小介质圆管的外壁与两纤芯对称点的距离为 δ ,最外层介质圆管的内半径为 R_2 ,这里 $R_2 = 2R_1 + 2t + \delta$ 。文献^[29]给出了常用的聚合物材料的有效折射率和吸收系数,在这些聚合物材料中,聚合物 Topas^[30]不仅具有较小的吸收系数,而且还具有相对稳定的有效折射率,所以本文选择 Topas 作为介质材料。目前,THz 光纤耦合器通常只考虑一个偏振模,忽略了另一个偏振模的不同^[11],这里提供的双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器可通过调节结构参数使得 x 和 y 偏振模的耦合长度相等,从而实现耦合长度与偏振无关的特性。3 dB 耦合器长度取一个耦合长度的一半,这有效减小了耦合器长度,降低了器件传输损耗。

3 双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器的耦合特性

采用有限元法分析了双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器的特性。在频率为 1 THz 处,当 $\delta = 140 \mu\text{m}$ 、 $t = 20 \mu\text{m}$ 、 $R_2 = 0.003 \text{ m}$ 、 $R = 53.2 \mu\text{m}$ 时 x 与 y 偏振的奇超模和偶超模的电场分布图如图

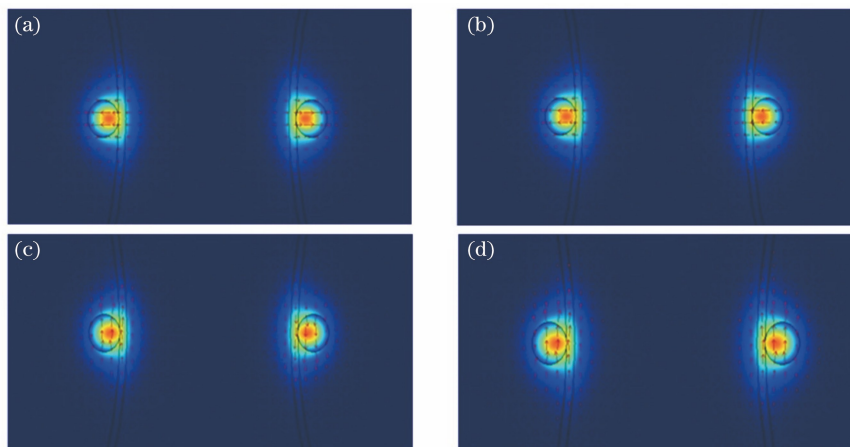


图 2 4 个超模的模场分布。(a) x 偏振奇超模;(b) x 偏振偶超模;(c) y 偏振奇超模;(d) y 偏振偶超模
Fig. 2 Mode field distributions of four supermodes. (a) x -polarization odd supermode; (b) x -polarization even supermode; (c) y -polarization odd supermode; (d) y -polarization even supermode

3.1 耦合长度分析

由耦合模理论可知双芯耦合器的特性可以通过奇超模和偶超模来进行描述,奇超模的模场是反对称的,偶超模的模场是对称的,可将双芯光纤中模耦合长度定义为

$$L_i = \frac{\lambda}{2(n_e^i - n_o^i)}, \quad i = x, y, \quad (1)$$

式中: n_e^i 和 n_o^i 分别为 i 偏振奇超模和偶超模的有效折射率,上标 i 代表 x 或 y 偏振。

为了对比,本文首先分析了无介质圆管的亚波

2 所示,箭头表示了 4 种超模的电场方向。从图中可看出,绝大部分的模式能量分布在纤芯周围的空气中,计算结果表明: x 偏振奇超模、 x 偏振偶超模、 y 偏振奇超模、 y 偏振偶超模的模场能量在空气中的分布比例分别为 75%、77%、79%、81%,大的能量占比有助于降低耦合器的材料吸收损耗。

长双芯耦合器的耦合特性,这里取 δ 为 $140 \mu\text{m}$ 、 t 为 $20 \mu\text{m}$ 、纤芯半径为 R 。图 3(a)给出了无介质圆管的亚波长双芯耦合器结构图,图 3(b)给出了亚波长双芯耦合器的耦合长度随纤芯半径 R 的变化曲线。由图 3 可知, x 和 y 偏振模的耦合长度随着纤芯半径 R 的增大而增加,但 y 偏振模的耦合长度始终比 x 偏振模的耦合长度大 10% 左右。为克服此问题,本文提出了一种双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器结构。

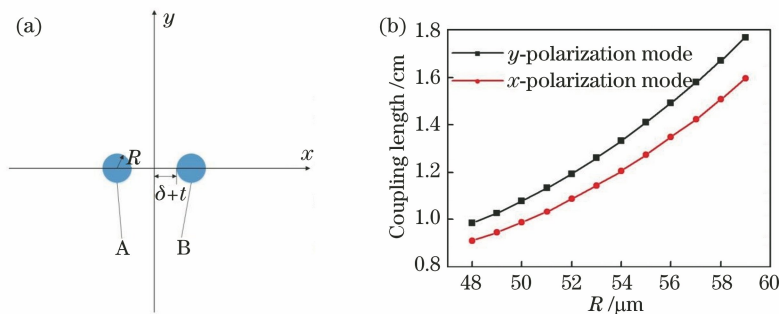


图 3 亚波长双芯耦合器结构,以及 x 和 y 偏振模耦合长度随 R 的变化曲线。
(a)亚波长双芯耦合器结构;(b) x 和 y 偏振模耦合长度随 R 的变化曲线

Fig. 3 Subwavelength dual-core coupler structure, and coupling length of x and y polarization modes as a function of R .
(a) Subwavelength dual-core coupler structure; (b) coupling length of x and y polarization modes as a function of R

图 4(a)和(b)分别给出了不同 t 和 R_2 下,两偏振模的耦合长度随着纤芯半径 R 的变化曲线,由图 4 可知,纤芯半径 R 越大, x 和 y 偏振模的耦合长度也会越长。其原因是 R 增大后,两纤芯的基模模场的倏逝场重叠区域减小,耦合系数也随之变小,而耦合长度与耦合系数成反比,故两偏振模的耦合长度增加。重要的是:通过调整结构参数可使两偏振模的耦合长度曲线有一个相交点,该相交点即为两偏振模

耦合长度相等的点,固定此点对应的光纤参数可实现此 THz 器件耦合长度的偏振无关特性。由于两偏振模的耦合长度相等,3 dB 耦合器件长度可选为两偏振模的 0.5 个耦合长度,这有助于实现长度较短的耦合器。另外,两偏振模耦合长度相等的点对应的耦合长度随着 t 的减小和 R_2 的增加而变短,当 $t=20 \mu\text{m}$ 、 $R_2=3 \text{ mm}$ 时,与偏振无关的耦合长度最小,耦合长度为 1.07 cm,耦合器件长度可取 0.535 cm。

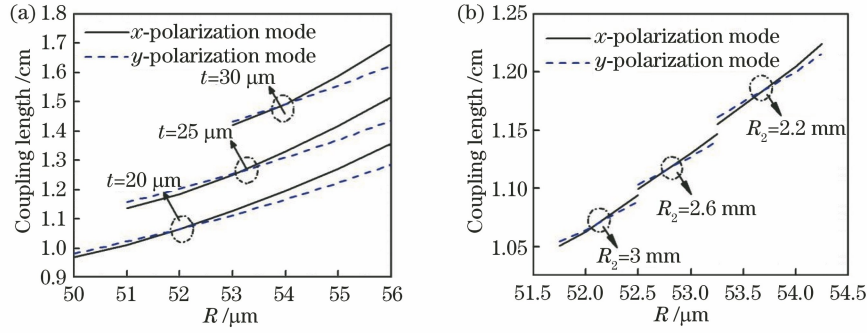


图 4 耦合长度随纤芯半径 R 的变化曲线。(a) $R_2=3 \text{ mm}$;(b) $t=20 \mu\text{m}$

Fig. 4 Variation of coupling length with core radius R . (a) $R_2=3 \text{ mm}$; (b) $t=20 \mu\text{m}$

3.2 损耗特性分析

为了对耦合器的损耗特性进行分析,表 1 和 2 给出了耦合器的耦合模总损耗 A_{loss}^i 和耦合器的器件损耗 P_{loss}^i ,耦合器的器件损耗定义为

$$P_{\text{loss}}^i = A_{\text{loss}}^i \times \frac{1}{2} L_c, \quad (2)$$

式中: A_{loss}^i 是 i 偏振的偶超模与奇超模总损耗。这里取 $\delta=140 \mu\text{m}$,传输的 THz 波频率为 1 THz。从表 1 可以看出,当 $R_2=3 \text{ mm}$ 时,耦合长度 L_c 随着

厚度 t 的增加而增加,耦合模总损耗 A_{loss}^i 也随之增加,由耦合长度 L_c 和耦合模总损耗 A_{loss}^i 共同决定的器件损耗 P_{loss}^i 自然也随之增加;从表 2 可以看出,当 $t=20 \mu\text{m}$ 时,耦合长度 L_c 与耦合模总损耗 A_{loss}^i 都随 R_2 的增加而降低,由耦合长度 L_c 和耦合模总损耗 A_{loss}^i 共同决定的器件损耗 P_{loss}^i 自然也随之降低。当 $t=20 \mu\text{m}$ 、 $R_2=3 \text{ mm}$ 时, x 和 y 偏振模的器件损耗为 0.23 dB 和 0.18 dB。

表 1 在 1 THz 处, t 不同时耦合器的 L_c 、 A_{loss}^x 、 A_{loss}^y 、 P_{loss}^x 和 P_{loss}^y

Table 1 L_c , A_{loss}^x , A_{loss}^y , P_{loss}^x , and P_{loss}^y of couplers at 1 THz for different t

| $t / \mu\text{m}$ | L_c / cm | $A_{\text{loss}}^x / (\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1})$ | $A_{\text{loss}}^y / (\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1})$ | $P_{\text{loss}}^x / \text{dB}$ | $P_{\text{loss}}^y / \text{dB}$ |
|-------------------|-------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 20 | 1.07 | 0.44 | 0.35 | 0.23 | 0.18 |
| 25 | 1.26 | 0.62 | 0.50 | 0.39 | 0.31 |
| 30 | 1.49 | 0.84 | 0.66 | 0.62 | 0.49 |

表 2 在 1 THz 处, R_2 不同时耦合器的 L_c 、 A_{loss}^x 、 A_{loss}^y 、 P_{loss}^x 和 P_{loss}^y

Table 2 L_c , A_{loss}^x , A_{loss}^y , P_{loss}^x , and P_{loss}^y of couplers at 1 THz for different R_2

| R_2 / mm | L_c / cm | $A_{\text{loss}}^x / (\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1})$ | $A_{\text{loss}}^y / (\text{dB} \cdot \text{cm}^{-1})$ | $P_{\text{loss}}^x / \text{dB}$ | $P_{\text{loss}}^y / \text{dB}$ |
|-------------------|-------------------|--|--|---------------------------------|---------------------------------|
| 2.2 | 1.18 | 0.52 | 0.43 | 0.30 | 0.25 |
| 2.6 | 1.11 | 0.47 | 0.39 | 0.26 | 0.21 |
| 3 | 1.07 | 0.44 | 0.35 | 0.23 | 0.18 |

耦合器的插入损耗与偏振相关损耗也是评价光纤定向耦合器性能的重要参数。插入损耗定义为耦合器输出端的输出光功率与输入端的总光功率之比,其计算公式为

$$I = -10 \lg(p_o/p_i), \quad (3)$$

式中: p_o 代表耦合器任一输出端口的输出光功率值; p_i 代表耦合器的输入总光功率值。

偏振相关损耗为同一输出端 x 和 y 偏振模插入损耗的差值。当 $\delta=140 \mu\text{m}$ 、 $t=20 \mu\text{m}$ 、 $R_2=3 \text{ mm}$ 时,图 5(a)和(b)给出了耦合器的纤芯 A 和 B

的插入损耗和偏振相关损耗随着频率的变化曲线。文献[12]中提出的三芯光纤定向耦合器的 y 偏振模耦合长度比 x 偏振模耦合长度大 10%，这里将带宽定义为 y 偏振模耦合长度与 x 偏振模耦合长度相差不超过 1% 的频率范围，即耦合器的工作频率范围为 0.94~1.16 THz，带宽为 220 GHz。当频率小于 1.02 THz 时， x 和 y 偏振模的插入损耗小于 3.3 dB，偏振相关损耗小于 0.1 dB。

基于耦合模理论，在考虑损耗的情况下，耦合器纤芯 A 和 B 的归一化功率可分别表示为

$$p_{out,A} = p_{in} \cos^2\left(\frac{\pi z}{2L}\right) \exp(-A^i_{loss} z/4.343), \quad (4)$$

$$p_{out,B} = p_{in} \sin^2\left(\frac{\pi z}{2L}\right) \exp(-A^i_{loss} z/4.343), \quad (5)$$

式中： $p_{out,A}$ 和 $p_{out,B}$ 分别是纤芯 A 和 B 中的输出功率； p_{in} 是输入功率； L 是耦合长度。图 6 给出了 1 THz 处纤芯 A 和 B 中的 x 和 y 偏振模的归一化功率随传输距离的变化曲线，由图可知，当传输距离为 0.535 cm 时， x 偏振模的光功率在纤芯 A 和 B 中的比例分别为 47.36% 和 47.32%， y 偏振模的光功率在纤芯 A 和 B 中的比例分别为 47.85% 和 47.81%，二者有效地实现了 3 dB 耦合。

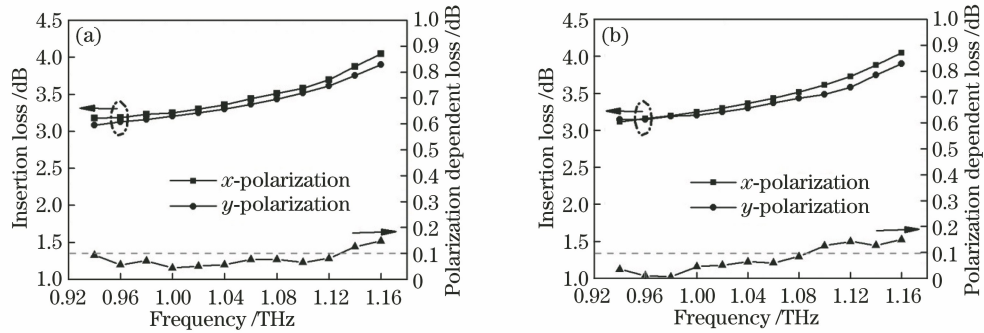


图 5 当 $\delta=140 \mu\text{m}$ 、 $t=20 \mu\text{m}$ 和 $R_2=3 \text{ mm}$ 时，耦合器的插入损耗和偏振相关损耗随着频率的变化曲线。(a)纤芯 A；(b)纤芯 B

Fig. 5 Insertion loss and polarization dependent loss of coupler as functions of frequency when $\delta=140 \mu\text{m}$, $t=20 \mu\text{m}$, and $R_2=3 \text{ mm}$. (a) Core A; (b) core B

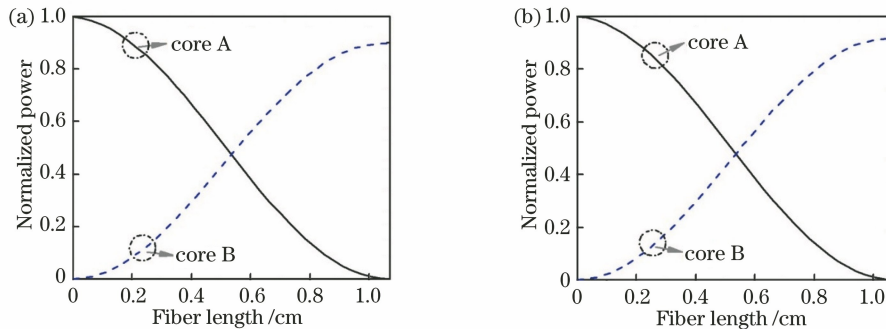


图 6 当 $\delta=140 \mu\text{m}$ 、 $t=20 \mu\text{m}$ 和 $R_2=3 \text{ mm}$ 时，纤芯 A 和 B 中的归一化功率随着传输距离的变化曲线。

(a)两纤芯中 x 偏振模的功率变化曲线；(b)两纤芯中 y 偏振模的功率变化曲线

Fig. 6 Normalized power of core A and core B as a function of transmission distance when $\delta=140 \mu\text{m}$, $t=20 \mu\text{m}$, and $R_2=3 \text{ mm}$. (a) Power change curves of x -polarization mode in two cores; (b) power change curves of y -polarization mode in two cores

3.3 误差分析

目前 THz 光纤器件的制造主要采用预制棒-拉丝和 3D 打印技术^[31-34]。3D 打印技术虽然在制备长距离传输 THz 光纤时有一定的困难，但它特别适用于制造短的 THz 光纤耦合器件，然而即便利用 3D 打印技术制造 THz 光纤耦合器件，也很难获得

具有精确结构参数的耦合器件。因此，本文还研究了光纤耦合器可能存在的制备误差对耦合特性的影响。这里将 x 和 y 偏振模耦合长度之比定义为 K ，图 7(a)和(b)分别给出了 K 值随 t 和 R 的变化曲线，图 7 中上、下虚线分别表示 $K=1.01$ 和 $K=0.99$ 。从图 7(a)中可知，当 K 值的变化范围为

0.99~1.01、 $R_2=3$ mm 时, t 的变化范围为 14.4~23.1 μm , 并且随着 R_2 的增大, t 的变化范围减小。从图 7(b) 中可知, 当 K 值的变化范围为 0.99~1.01、 $t=20$ μm 时, R 的变化范围为 51.1~52.9 μm , 并且随着 t 的增大, R 的变化范围减小。图 8(a) 和 (b) 分别给出了两偏振模的器件损耗随着 t 和 R 的变化曲线, 由图 8(a) 可见, 在 $t=20$ μm 时, 耦合器的器件损耗随着 R_2 的增大而减小, 当 $R_2=3.0$ mm, t 的变化范围取 14.4~23.1 μm 时, x 和 y

偏振模的器件损耗分别小于 0.3 dB 和 0.23 dB; 由图 8(b) 可见, 当 $t=20$ μm , $R_2=3.0$ mm 时, 耦合器的器件损耗随着 R 的增大而增大, 并且当 R 的变化范围为 51.1~52.9 μm 时, x 和 y 偏振模的器件损耗分别小于 0.26 dB 和 0.22 dB。在 x 和 y 偏振模的器件损耗分别小于 0.3 dB 和 0.23 dB 的情况下, THz 光纤定向耦合器的纤芯半径 R 和厚度 t 分别具有 1.8 μm 和 8.7 μm 的工艺误差容限。

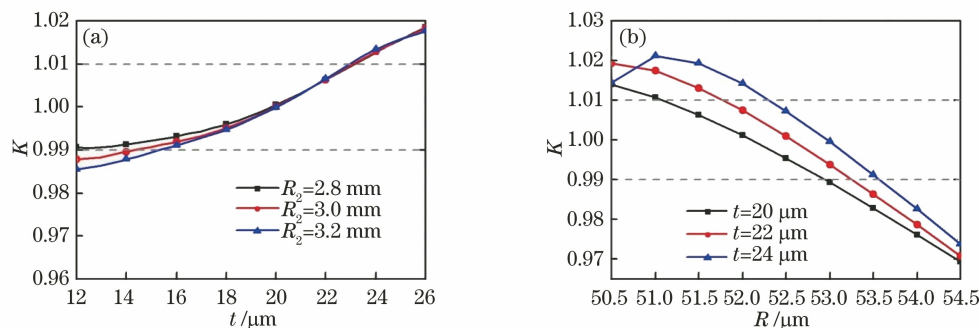


图 7 K 、 t 和 R 三者之间的关系。(a) 不同 R_2 下 K 值随 t 的变化; (b) 不同 t 下 K 值随 R 的变化
Fig. 7 Relationship among K , t , and R . (a) Variation of K value with t under different R_2 ; (b) variation of K value with R under different t

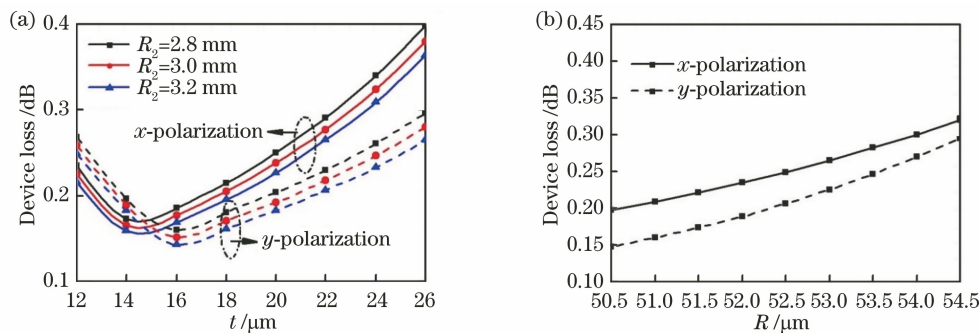


图 8 x 和 y 偏振模的器件损耗随 t 和 R 的变化。(a) 不同 R_2 下 x 和 y 偏振模的器件损耗随 t 的变化; (b) 当 $t=20$ μm 时 x 和 y 偏振模的器件损耗随着纤芯半径 R 的变化

Fig. 8 Device loss of x and y polarization modes varies with t and R . (a) Device loss of x and y polarization modes varies with t at different R_2 ; (b) device loss of x and y polarization modes varies with core radius R at $t=20$ μm

4 结 论

提出了一种双悬挂芯 THz 光纤定向耦合器, 并基于有限元法对该耦合器结构进行仿真分析, 通过优化该定向耦合器的纤芯半径、介质层厚度、介质管半径, 成功使其大部分的模式能量在空气中传输。数值结果显示, 这种 THz 光纤定向耦合器具有较短的耦合长度, 在 1 THz 处耦合长度仅为 0.535 cm, 且 x 和 y 偏振模的器件损耗分别为 0.23 dB 和 0.18 dB。同时, 在 0.94~1.02 THz 处, 该耦合器具有小于 0.1 dB 的偏振相关损耗和低于 3.3 dB 的

插入损耗。该光纤耦合器可用来实现 THz 能量的分路与合路, 在 THz 光纤链路中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Zhao J W, He M X, Dong L J, et al. Effect of terahertz pulse on gene expression in human eye cells [J]. Chinese Physics B, 2019, 28(4): 048703.
- [2] Wang J, Yan S H, Li Z X, et al. Single-cell terahertz spectral characteristics in simulated scattering near-field imaging mode [J]. OSA Continuum, 2020, 3(8): 2096-2105.

- [3] Khalid N, Abbasi N A, Akan O B. Statistical characterization and analysis of low-THz communication channel for 5G Internet of Things[J]. *Nano Communication Networks*, 2019, 22: 100258.
- [4] Yang Y H, Yamagami Y, Yu X B, et al. Terahertz topological photonics for on-chip communication[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(7): 446-451.
- [5] Luo L C, Deng H, Liu Q C, et al. Ammonium perchlorate water content prediction models based on terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1130001.
罗力川, 邓琥, 刘泉澄, 等. 基于太赫兹光谱的高氯酸铵含水率预测模型[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1130001.
- [6] Li D D, Yang Z B, Fu A L, et al. Detecting melanoma with a terahertz spectroscopy imaging technique [J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 234: 118229.
- [7] Wang Y Y, Jiang B Z, Xu D G, et al. Continuous terahertz wave biological tissue imaging technology based on focal plane array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(7): 0711001.
王与焯, 蒋博周, 徐德刚, 等. 基于焦平面阵列的连续太赫兹波生物组织成像技术研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(7): 0711001.
- [8] Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with nanometer resolution [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 83(15): 3009-3011.
- [9] Joseph T, John J. Two-core fiber based mode coupler for single-mode excitation in a two-mode fiber for quasi-single-mode operation [J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101970.
- [10] Sun B, Chen M Y, Qian C L, et al. Design of a broadband directional coupler based on an asymmetric three-core photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706010.
孙兵, 陈明阳, 钱春霖, 等. 基于非对称三芯光子晶体光纤的宽带定向耦合器研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706010.
- [11] Nielsen K, Rasmussen H K, Jepsen P U, et al. Broadband terahertz fiber directional coupler [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(17): 2879-2881.
- [12] Chen M Y, Fu X X, Zhang Y K. Design and analysis of a low-loss terahertz directional coupler based on three-core photonic crystal fibre configuration [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(40): 405104.
- [13] Dupuis A, Allard J F, Morris D, et al. Fabrication and THz loss measurements of porous subwavelength fibers using a directional coupler method[J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8012-8028.
- [14] Lu J T, Lai C H, Tseng T F, et al. Terahertz pipe-waveguide-based directional couplers [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26883-26890.
- [15] Bai J J, Wang C H, Hou Y, et al. Terahertz dual-core photonic band-gap fiber directional coupler [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(10): 108701.
白晋军, 王昌辉, 侯宇, 等. 太赫兹双芯光子带隙光纤定向耦合器 [J]. *物理学报*, 2012, 61(10): 108701.
- [16] Jiang Z W, Bai J J, Hou Y, et al. Terahertz dual air core fiber directional coupler [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(2): 028702.
姜子伟, 白晋军, 侯宇, 等. 太赫兹双空芯光纤定向耦合器 [J]. *物理学报*, 2013, 62(2): 028702.
- [17] Zhu Y F, Huang X, Ke Q, et al. Low loss and polarization-insensitive coupling length for a terahertz fiber directional coupler with symmetric dual-suspended core structure [J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126497.
- [18] Rozé M, Ung B, Mazhorova A, et al. Suspended core subwavelength fibers: towards practical designs for low-loss terahertz guidance [J]. *Optics Express*, 2011, 19(10): 9127-9138.
- [19] Reyes-Vera E, Úsuga-Restrepo J, Jiménez-Durango C, et al. Design of low-loss and highly birefringent porous-core photonic crystal fiber and its application to terahertz polarization beam splitter [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 1-13.
- [20] Wang B K, Tian F J, Liu G Y, et al. A dual-core fiber for tunable polarization splitters in the terahertz regime [J]. *Optics Communications*, 2021, 480: 126463.
- [21] Zhu Y F, Liu X, Rao C F, et al. Low-loss terahertz polarization splitter based on an asymmetric dual-suspended-core fiber [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(8): 086112.
- [22] Kumar V, Varshney R K, Kumar S. Design of a compact and broadband terahertz polarization splitter based on gradient dual-core photonic crystal fiber [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(7): 1974-1979.
- [23] Wang J L, Liu Y, Chen H M. Design on terahertz polarization beam splitter based on self-collimating effect of photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(4): 0423001.
汪静丽, 刘洋, 陈鹤鸣. 基于光子晶体自准直效应的太赫兹偏振分束器设计 [J]. *光学学报*, 2018, 38(4): 0423001.
- [24] Chen H Z, Yan G F, Forsberg E, et al. Terahertz polarization splitter based on a dual-elliptical-core polymer fiber [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(23):

- 6236-6242.
- [25] Wang J L, Liu Y, Zhong K. Dual-core terahertz polarization splitter based on porous fibers with near-tie units [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(2): 024209.
汪静丽, 刘洋, 钟凯. 基于领结型多孔光纤的双芯太赫兹偏振分束器 [J]. *物理学报*, 2017, 66(2): 024209.
- [26] Tian F J, Liu G Y, Luo J F, et al. A modified dual-core THz fiber polarization splitter with four subwavelength tubes [J]. *Optik*, 2021, 225: 165862.
- [27] Ma X Y, Li Y F, Lu Y C, et al. Metagrating-based terahertz polarization beam splitter designed by simplified modal method [J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 580781.
- [28] Ng W L, Wong W R, Mahdiraji G A, et al. Diamond ring fiber for evanescent field exposure [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(8): 1544-1547.
- [29] Ung B, Mazhorova A, Dupuis A, et al. Polymer microstructured optical fibers for terahertz wave guiding [J]. *Optics Express*, 2011, 19(26): B848-B861.
- [30] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J, et al. Bendable, low-loss Topas fibers for the terahertz frequency range [J]. *Optics Express*, 2009, 17(10): 8592-8601.
- [31] Lian Z G, Horak P, Feng X, et al. Nanomechanical optical fiber [J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29386-29394.
- [32] Hong B B, Swithenbank M, Greenall N, et al. Low-loss asymptotically single-mode THz Bragg fiber fabricated by digital light processing rapid prototyping [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, 8(1): 90-99.
- [33] Cruz A, Cordeiro C, Franco M. 3D printed hollow-core terahertz fibers [J]. *Fibers*, 2018, 6(3): 43.
- [34] van Putten L D, Gorecki J, Fokoua E N, et al. 3D-printed polymer antiresonant waveguides for short-reach terahertz applications [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3953-3958.