

低损耗大带宽双芯负曲率太赫兹光纤偏振分束器*

惠战强^{1)†} 高黎明¹⁾ 刘瑞华¹⁾ 韩冬冬¹⁾ 汪伟²⁾

1) (西安邮电大学, 电子工程学院, 西安 710121)

2) (中国科学院西安光学精密机械研究所, 瞬态光学与光子技术国家重点实验室,
西安 710119)

摘 要

设计了一种基于双芯负曲率光纤的新型低损耗大带宽太赫兹偏振分束器, 该器件以环烯烃共聚物为基底, 沿圆周等间距分布着 12 个含内嵌管的圆形管, 通过上下对称的两组外切小包层管将纤芯分成双芯。采用时域有限差分法对其导模特性进行分析, 详细研究了各个参数对其偏振分束特性的影响, 分析了该偏振分束器的消光比、带宽、传输损耗等性能。仿真结果表明: 当入射光频率为 1THz, 分束器长度为 6.224cm 时, x 偏振光的消光比达到 120.8dB, 带宽为 0.024THz, y 偏振光的消光比达到 63.74dB, 带宽为 0.02THz, 传输总损耗低至 0.037dB/cm。公差分析表明结构参数在 $\pm 1\%$ 的偏差下, 偏振分束器仍然可以保持较好的性能。

关键词: 太赫兹, 偏振分束器, 负曲率光纤, 耦合模理论

PACS: 87.50.U-, 42.81.Gs, 07.60.Vg, 42.79.Fm

基金: 国家自然科学基金 (批准号: 61875165, 61775180, 61772417)、陕西省教育厅协同创新项目 (批准号: 20JY060) 和西安邮电大学研究生创新工作站 (批准号: YJGJ201905) 资助的课题。

† 通讯作者. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

第一作者. E-mail: zhanqianghui@xupt.edu.cn

1 引 言

太赫兹波位于电磁频谱上的毫米波和红外光之间, 同时具有光波和微波的优点, 在光通信^[1]、光传感^[2]、光成像^[3]和生物医学光谱学^[4]等领域具有广泛应用, 受到普遍关注。在过去的二十多年, 太赫兹源和探测器的研究逐渐成熟并且进入实用阶段, 极大推动了太赫兹技术的快速发展。但目前的太赫兹系统主要采用分

立器件，太赫兹波在空间传输，导致系统体积庞大，成本较高，难以维护^[5]。太赫兹光纤的提出，为太赫兹波的传输提供了一种理想介质^[6]，同时，各种基于微纳结构的太赫兹调制器^[7]、偏振器^[8,9]、滤波器^[10]、光开关^[11]、吸收器^[12]等不断被提出，使实现体积小巧结构紧凑的太赫兹系统成为可能。另一方面，偏振是太赫兹波的一个重要特性，各种线性或非线性光学效应均与太赫兹波的偏振态密切相关，同时，基于偏振特性还可以对太赫兹波进行分束、滤波、开关等信号处理功能，进而构建功能各异的各种太赫兹系统，具有重要工程应用价值。

偏振分束器（Polarization beam splitter, PBS）是一种十分重要的偏振调控器件，它可将电磁波中相互正交的两种偏振模式分开，便于其独立进行后续处理，或者将偏振方向相互垂直的两束光合束。在光纤通信、光纤传感、光成像、生命科学、国家安全、航空航天等方面都具有重要的作用^[13]。得益于光纤通信技术的迅速发展，工作于近红外波段的偏振分束器已广泛商用化。然而，由于天然材料在太赫兹频域具有较大的吸收，电磁响应非常弱，限制了太赫兹波段偏振分束器的发展^[14]。截至目前，人们已提出了一些方案，根据其结构不同，可以分为多模干涉仪型^[15]、反射阵列型^[16]、镀增透膜型^[17]、微结构光纤型^[18]等。其中，微结构光纤型偏振分束器具有损耗低、易于与现有光纤通信系统连接的优势，得到了较多关注。如 2013 年，Li 等人首次提出采用指数逆匹配耦合设计了一种基于芯区正交微结构双芯光子晶体光纤的太赫兹 PBS，在 0.65THz 处 x 偏振和 y 偏振的消光比分别为 33.83dB 和 21dB，工作带宽分别为 0.01THz 和 0.02THz，分束器长度为 18.2cm，损耗为 0.395dB/cm^[19]。2016 年，Chen 等人设计了一种基于双椭圆悬浮芯光纤的太赫兹偏振分束器，在 0.6THz 处的分束器长度为 1.43cm， x 偏振的消光比为 54dB，带宽为 0.013THz， y 偏振的消光比为 36dB，

带宽为 0.01THz，损耗为 0.28dB/cm^[20]。2017 年，Wang 等人设计了一种基于领结型多孔双芯光纤的太赫兹偏振分束器，在 2.3THz 处 x 偏振和 y 偏振的消光比达到 22.94dB 和 19.2dB，分束器长度为 0.6cm，传输损耗为 0.45dB/cm^[21]。2018 年，Zhu 等人设计了一种基于非对称双悬浮芯光纤的太赫兹偏振分束器，1THz 处 x 偏振和 y 偏振的消光比分别为 38dB 和 70dB，工作带宽均为 0.046THz，分束器长度为 1.27cm，损耗为 0.4dB/cm^[22]。2021 年，Wang 等人设计了一种基于四椭圆空气孔悬浮芯光纤的太赫兹偏振分束器，1THz 处 x 偏振和 y 偏振的消光比为 20.8dB 和 20.5dB，工作带宽分别为 0.01THz 和 0.012THz，分束器长度为 0.865cm，传输损耗低于 0.15dB/cm^[23]。然而，上述方案均采用多孔芯结构或悬浮芯结构，尽管与实芯结构相比上述方案可极大降低材料吸收损耗，但光纤基底材料中仍然存在部分导模，引起一定的材料吸收损耗。同时，也无法克服材料本身固有的非线性、色散、瑞利散射、光照损伤等缺陷。设计性能优良的低损耗、大带宽太赫兹 PBS 仍是当前太赫兹技术领域亟待解决的难题。最近，新出现的负曲率光纤表现出极大的优势，所谓的负曲率是指纤芯边界的表面法线方向是与柱坐标系的径向单元矢量方向相反^[5]。由于导模被很好地限制在空气芯中传输，因而其具有超低损耗、超低色散等优良特性，为太赫兹光纤器件的创新提供新的可能^[24,25]。

本文设计了一种基于空芯负曲率光纤的新型太赫兹偏振分束器，采用嵌套环以及双芯结构，导模被很好地限制在两个空气芯中，通过调整光纤结构参数，可以调节纤芯间的耦合特性，进而控制偏振分束特性，最终在保持超低损耗的前提下实现了高消光比和宽工作带宽。数值结果表明：对于长度为 6.224cm 的分束器，当入射光频率为 1THz 时， x 和 y 偏振光的最高消光比分别为 120.8dB 和 63.74dB，

带宽分别为 0.024THz 和 0.02THz，总传输损耗低至 0.037dB/cm。公差分析表明该器件具有良好的工艺容忍性。

2 结构设计及其性能指标

所设计的新型双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器的横截面如图 1 所示。12 个相邻排列的大圆环以及内切无节点排列的 12 个小圆环作为光纤的包层，上下对称的两组外相切的十字形排列的小圆环分别与上下大圆环包层管相切，将光纤分成双芯结构，左边为 B 芯，右边为 A 芯。其中，所有的圆环管厚度一致均为 t ，大圆环的半径为 r_1 ，与大圆环内切的小圆环的半径为 r_3 ，十字形排列的小圆环半径为 r_2 ，相邻两大圆环的圆心间距为 A ，对称分布的两大圆环的圆心间距为 $4A$ ，白色部分为空气，蓝色区域为基底材料。

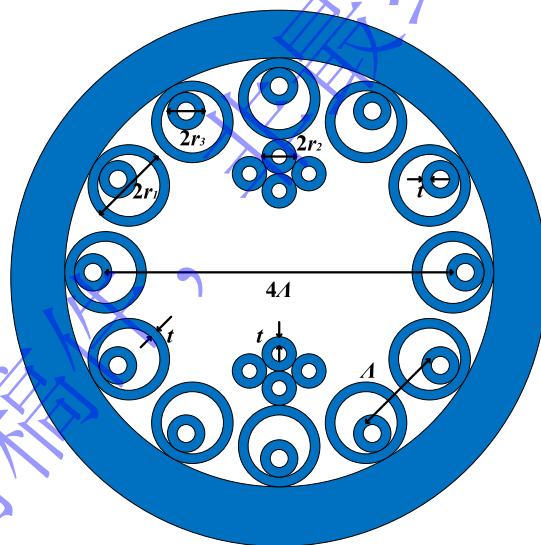


图 1 双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器横截面结构图

Fig. 1. Cross sectional structure of dual core negative curvature fiber terahertz polarization beam splitter

由于 TOPAS 环烯烃共聚物 (Copolymers of Cycloolefin, COC) 在太赫兹波段具有近似恒定的折射率、材料吸收损耗低、易加工等优点^[26,27]，选择其作为基底材料，该材料的折射率与波长的关系由 Sellmeier 方程描述^[28]：

$$n^2(\lambda) = A_1 + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - A_3^2} \quad (1)$$

式中， $A_1=2.045$ ， $A_2=0.266$ ， $A_3=0.206$ 。

在太赫兹负曲率光纤中，其导光机理是基于反谐振效应，将光纤中高折射率层看作一个 F-P 谐振腔，当入射光波频率满足该 F-P 腔的谐振条件时，就会谐振出高折射率层，导致能量泄露；当入射光频率远离谐振频率时，光被 F-P 腔反射回来，从而被限制在低折射率层，并沿着其轴向向前传播^[29]。谐振频率可通过下式计算^[30]：

$$f_m = \frac{mc}{2t\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}, m \in N^+ \quad (2)$$

其中， c 为真空中的光速， n_1 为材料 COC 的折射率， n_2 为空气折射率， t 是管的厚度， m 是谐振阶次。对于 $90\mu\text{m}$ 的管厚，当 m 分别取 1、2 时，谐振频率分别为 1.46THz，2.91THz。

所设计的太赫兹偏振分束器为双芯结构，根据耦合模理论，由于双芯破坏了传统光纤圆中心对称性，本来简并的 x 偏振光和 y 偏振光将被解除简并态，导致在这样的波导中存在 4 个非简并态模式，分别为： x 偏振偶模、 x 偏振奇模、 y 偏振偶模、 y 偏振奇模^[31]。奇模指的是两个纤芯中模式电场方向相反，偶模指的是两个纤芯中模式电场方向相同。相同偏振光下的奇模和偶模具有相同的偏振方向，彼此之间由于干涉发生耦合作用，不同偏振光的奇模和偶模具有不同的偏振方向，它们之间不发生耦合作用。因此，不同的偏振光具有不同的耦合长度^[31]。

耦合长度为衡量分束器性能优劣的一个重要指标。当某一偏振光的能量从一个纤芯耦合到另一个纤芯中时，该纤芯中的光能量出现由最大值（ P_{max} ）到最小值（ P_{min} ）的变化，另一个纤芯中则相反，光能量由（ P_{min} ）变成了（ P_{max} ），相

应的偏振光在光纤中的传输距离就定义为光纤的耦合长度， x 、 y 偏振光的耦合长度分别可通过下式计算^[32]。

$$\begin{cases} L_x = \frac{\pi}{\beta_e^x - \beta_o^x} = \frac{\lambda}{2(n_e^x - n_o^x)} = \frac{c}{2f(n_e^x - n_o^x)} \\ L_y = \frac{\pi}{\beta_e^y - \beta_o^y} = \frac{\lambda}{2(n_e^y - n_o^y)} = \frac{c}{2f(n_e^y - n_o^y)} \end{cases} \quad (3)$$

式中， λ 是入射光波长， f 是入射光频率； β 表示传播常数， n 表示有效折射率，下标 e 和 o 分别表示偶模和奇模，上标 x 和 y 分别表示 x 偏振方向和 y 偏振方向，例如 β_e^x 是 x 方向的偶模传播常数； n_e^x 是 x 方向的偶模有效折射率。

不考虑损耗时，若光入射到 A 芯，在 A 芯中传输距离 L 时，两偏振光的归一化输出光功率 P_{out}^x ， P_{out}^y 可分别表示为下式^[32]：

$$\begin{cases} P_{out}^x = P_{in}^x \cos^2\left(\frac{\pi L}{2 L_x}\right) \\ P_{out}^y = P_{in}^y \cos^2\left(\frac{\pi L}{2 L_y}\right) \end{cases} \quad (4)$$

同样，在 B 芯的输出端口两偏振光的归一化功率^[32]为

$$\begin{cases} P_{out}^x = P_{in}^x \sin^2\left(\frac{\pi L}{2 L_x}\right) \\ P_{out}^y = P_{in}^y \sin^2\left(\frac{\pi L}{2 L_y}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中： P_{in}^x 和 P_{in}^y 分别表示入射光在 x 方向和 y 方向的输入功率； P_{out}^x 和 P_{out}^y 分别表示出射光在 x 方向和 y 方向的输出功率。当光在纤芯中传输距离 L 达到 L_c 时，该芯区中某一偏振光的光功率达到最大值，而另一个偏振光光功率达到最小值，则实现了偏振分束，称 L_c 是偏振分束器的长度。

消光比（Extinction ratio, ER）是衡量偏振分束器分束性能优劣的另一指标，其表征光在纤芯中传输一定距离后，输出端口处两束偏振光达到的分离程度，即

光功率的相对比值。A 芯和 B 芯的消光比分别表示为^[32]:

$$\begin{cases} ER_A = 10 \log_{10} \frac{P_{out}^x}{P_{out}^y} \\ ER_B = 10 \log_{10} \frac{P_{out}^y}{P_{out}^x} \end{cases} \quad (6)$$

消光比的绝对值越大，分束特性越好。在实际应用中，一般认为偏振分束器消光比的绝对值大于 20dB 时，即实现较好分束。因此，偏振分束器的消光比的绝对值大于 20dB 所覆盖的频率范围被定义为其工作带宽。

对于太赫兹负曲率光纤来说，限制损耗（Confinement loss, CL）和有效材料吸收损耗（Effective material loss, EML）也是需要考虑的，二者统称为总传输损耗。限制损耗是指由于光子晶体光纤中周期性空气孔的层数有限，导致该光纤对太赫兹波的限制能力有一定的局限性，造成部分能量泄露引起的损耗。一般用限制损耗 α_{CL} 来表示光子晶体光纤对太赫兹波的限制能力，可根据有效折射率的虚部计算得到^[33]:

$$\alpha_{CL} = \frac{20}{\ln 10} \times \frac{2\pi}{\lambda} \times \text{Im}(n_{eff}) \times 10^{-2} \text{ (dB / cm)} \quad (7)$$

有效材料吸收损耗描述材料对太赫兹波的吸收效应，可由下式得到^[34]:

$$EML = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left(\frac{\int_{mat} n_{mat} |E|^2 \alpha_{mat} dA}{\left| \int_{all} \vec{S}_z dA \right|} \right) \quad (8)$$

3 优化与讨论

在双芯负曲率光纤中，相互正交的两个偏振光耦合长度不同，即 $L_x \neq L_y$ ，为获得性能优良的偏振分束器，以不同偏振光的耦合长度的比值作为参考，该比值称为耦合长度比^[35]（Coupling length ratio, CLR），可以表示为

$$CLR = \frac{L_y}{L_x} = \frac{n}{m} \quad (9)$$

上式中, n 和 m 分别代指不同的正整数, 其中一个为奇数, 另外一个为偶数, 当满足 $n/m=2$ (或 $1/2$) 时, 此时偏振分束器的性能为理想状态, 因此以 CLR 尽可能地接近 2 或 $1/2$ 作为优化依据, 从而设计性能优良的偏振分束器。由于双芯负曲率光纤的结构参数 (r_1 , r_2 , r_3 , A , t) 会影响其耦合特性, 因此下面, 将分别讨论结构参数变化对耦合特性的影响, 以得到最优结构参数。

首先分析 r_1 对耦合特性的影响。仿真中, 保持 $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$ 不变, r_1 分别为 $375\mu\text{m}$ 、 $380\mu\text{m}$ 、 $385\mu\text{m}$ 时, 耦合长度和 CLR 随频率的变化关系如图 2 所示。由图 2 (a) 可得, x 偏振光的耦合长度随着频率的增大而增大, y 偏振光的耦合长度随着频率的增大而减小, 耦合长度比 CLR 随着频率的增加而减小。根据耦合长度的定义式, 其由频率和折射率差共同决定, 对于同样的 r_1 , 若入射光频率与折射率差的乘积变大, 则耦合长度减小, 反之增大。而对于相同的入射光频率, r_1 的增大导致双芯的区域变小, 耦合作用强弱发生变化, 同时也使得偶模和奇模的折射率差改变, 耦合作用的强弱和折射率差的大小共同影响了耦合长度的大小。因此 x 偏振和 y 偏振的耦合长度出现图中所示变化, 且在不同的 r_1 下具有不同的耦合长度。在 1THz 处, 当 $r_1=380\mu\text{m}$ 时, CLR 十分接近 2, 因此选取 r_1 的最优参数为 $380\mu\text{m}$ 。

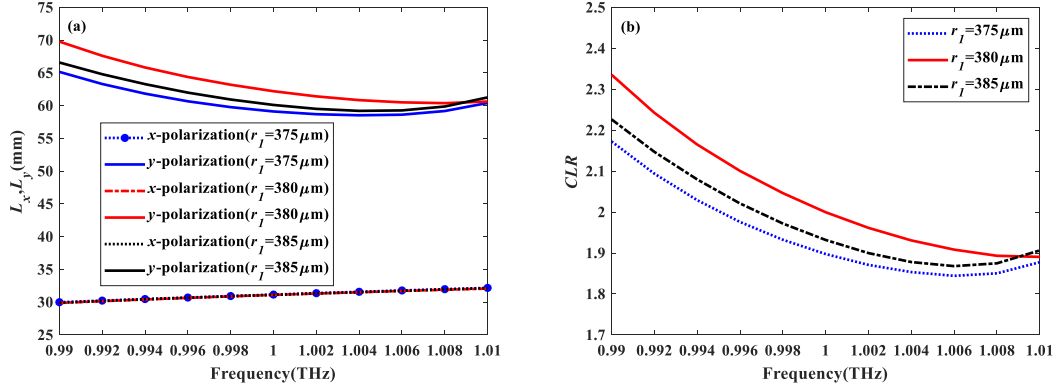


图 2 当固定参数 $r_2=160\mu m$, $r_3=174.1\mu m$, $A=810\mu m$, $t=90\mu m$ 时, r_1 分别为 $375\mu m$ 、 $380\mu m$ 、 $385\mu m$ 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图: (a) 耦合长度; (b) CLR

Fig. 2. The variation of coupling length and CLR: (a) The coupling length on frequency when r_1 varies from 375 to $385\mu m$ when $r_2=160\mu m$, $r_3=174.1\mu m$, $A=810\mu m$, $t=90\mu m$; (b) The CLR in x-polarization and y-polarization.

接着分析参数 r_2 对耦合特性的影响。图 3 为固定参数 $r_1=380\mu m$, $r_3=174.1\mu m$, $A=810\mu m$, $t=90\mu m$, r_2 分别为 $156\mu m$ 、 $160\mu m$ 、 $164\mu m$ 时耦合长度和 CLR 随频率变化的曲线图。从图中可以看出, x 和 y 偏振光的耦合长度的变化趋势与图 2 (a) 类似, 耦合长度比 CLR 的变化趋势与图 2 (b) 类似。分析认为, r_2 的增大导致双芯间的耦合“桥梁”变小, 耦合作用的强弱和折射率差均发生改变, 耦合作用的强弱和折射率差的大小共同影响耦合长度的大小。因此 x 偏振和 y 偏振的耦合长度出现图 3 中所示变化, 且不同的 r_2 下具有不同的耦合长度。在 1THz 处, 当 $r_2=160\mu m$ 时, CLR 等于 2, 因此选取 r_2 的最优参数为 $160\mu m$ 。

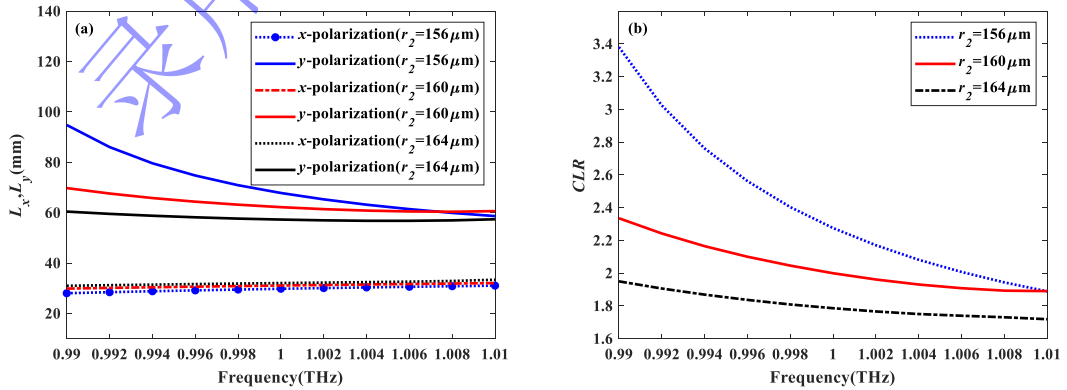


图 3 当固定参数 $r_1=380\mu m$, $r_3=174.1\mu m$, $A=810\mu m$, $t=90\mu m$ 时, r_2 分别为 $156\mu m$ 、 $160\mu m$ 、 $164\mu m$ 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图: (a) 耦合长度; (b) CLR

Fig. 3. The variation of coupling length and CLR: (a) The coupling length on frequency when r_2 varies from 156 to 164 μm when $r_1=380\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$; (b) The CLR in x-polarization and y-polarization.

接下来讨论参数 r_3 对耦合特性的影响。图4为固定参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$, r_3 分别为 170.1 μm 、174.1 μm 、178.1 μm 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图。由图可得, x 偏振光的耦合长度随着频率的增大几乎不变, y 偏振光的耦合长度随着频率的增大而减小, 而 r_3 的不同仅仅对耦合长度造成微弱影响, 耦合长度比 CLR 随着频率的增加而减小。原因在于, r_3 的改变导致耦合作用的强弱和折射率差的大小发生略微变化, 对耦合长度的影响很小。在 1THz 处, 当 $r_3=174.1\mu\text{m}$ 时, CLR 等于 2, 具有优良的耦合特性, 因此选取 r_3 的最优参数为 174.1 μm 。

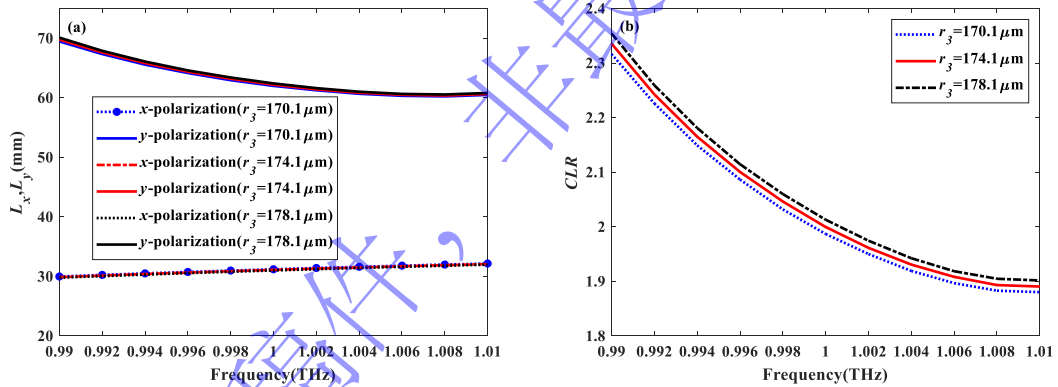


图4 当固定参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$ 时, r_3 分别为 170.1 μm 、174.1 μm 、178.1 μm 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图: (a) 耦合长度; (b) CLR

Fig. 4. The variation of coupling length and CLR: (a) The coupling length on frequency when r_3 varies from 170.1 to 178.1 μm when $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$; (b) The CLR in x-polarization and y-polarization.

下面分析参数 A 对耦合特性的影响。图5为固定参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$, A 分别为 805 μm 、810 μm 、815 μm 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图。如图中所示, x 偏振光的耦合长度随频率增大缓慢增大, y 偏振光的耦合长度随频率增大逐渐减小, 但对同一频率, 随 A 的增大, 耦合长度

先增大后减小，当 Λ 分别为 $805\mu\text{m}$ 、 $815\mu\text{m}$ 时，耦合长度随频率变化曲线近似重合。原因在于， Λ 的单调增大导致双芯的区域变小，改变了耦合作用的强弱和折射率差的大小，二者共同作用导致耦合长度改变。在 1THz 处，当 $\Lambda=810\mu\text{m}$ 时， CLR 十分接近 2，具有很好的耦合特性，因此选取 Λ 的最优参数为 $810\mu\text{m}$ 。

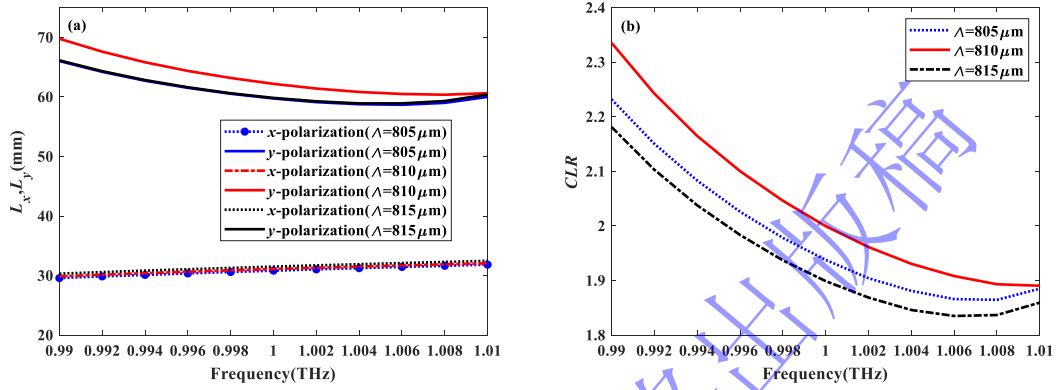


图 5 当固定参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$ 时, Λ 分别为 $805\mu\text{m}$ 、 $810\mu\text{m}$ 、 $815\mu\text{m}$ 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图: (a) 耦合长度; (b) CLR

Fig. 5. The variation of coupling length and CLR : (a) The coupling length on frequency when Λ varies from 805 to $815\mu\text{m}$ when $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$; (b) The CLR in x -polarization and y -polarization.

最后讨论参数 t 对耦合特性的影响。图 6 为固定参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $\Lambda=810\mu\text{m}$, t 分别为 $87\mu\text{m}$ 、 $90\mu\text{m}$ 、 $93\mu\text{m}$ 时耦合长度和 CLR 随频率变化的曲线图。从图中可以看出, x 偏振光的耦合长度随频率的增大几乎不变, 而 y 偏振光的耦合长度随频率的增大发生明显变化, 当 $t=87\mu\text{m}$, y 偏振光的耦合长度随频率的增大大幅减小, 当 $t=90\mu\text{m}$, 减小幅度变缓, 当 $t=93\mu\text{m}$, 先略微减小后逐渐增大。原因在于, t 的改变会引起谐振频率的变化, 同时也会导致奇模与偶模耦合作用的强弱改变, 导致有效折射率差发生改变, 最终影响了耦合长度的大小。在 1THz 处, 当 $t=90\mu\text{m}$ 时, CLR 十分接近 2, 因此选取 t 的最优参数为 $90\mu\text{m}$ 。

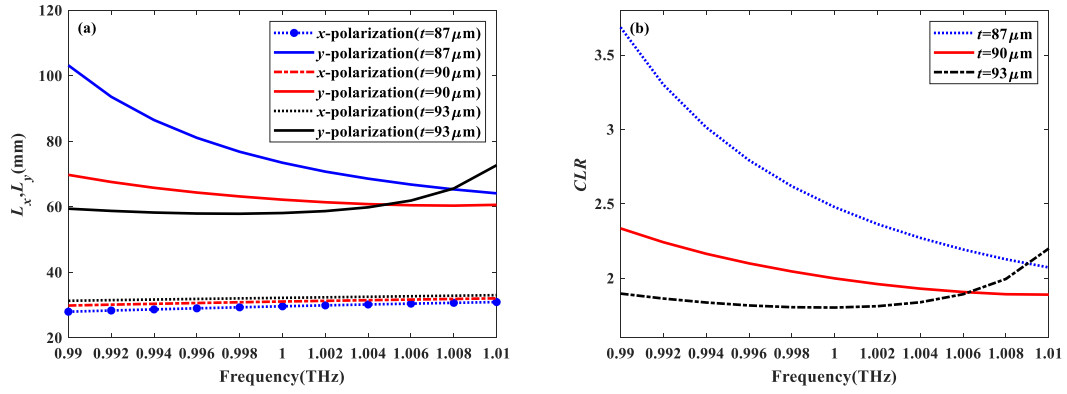
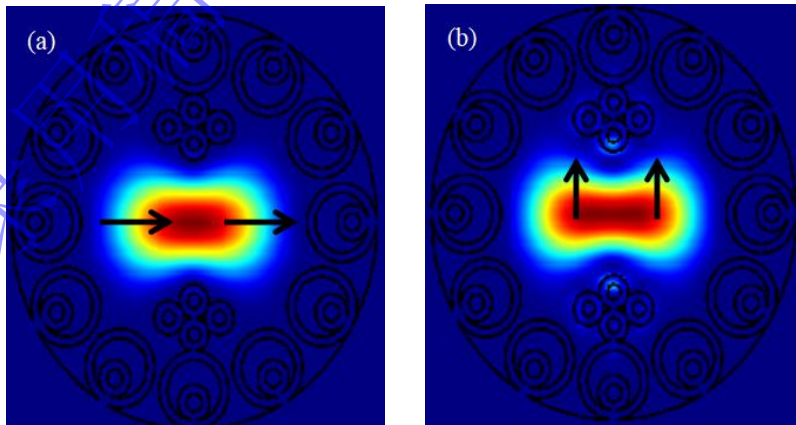


图 6 当固定参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$ 时, t 分别为 $87\mu\text{m}$ 、 $90\mu\text{m}$ 、 $93\mu\text{m}$ 时耦合长度和 CLR 与频率的变化关系图: (a) 耦合长度; (b) CLR

Fig. 6. The variation of coupling length and CLR : (a) The coupling length on frequency when t varies from 87 to $93\mu\text{m}$ when $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$; (b) The CLR in x-polarization and y-polarization.

4 性能分析

根据上述分析可知, 当选取负曲率光纤结构参数 $r_1=380\mu\text{m}$, $r_2=160\mu\text{m}$, $r_3=174.1\mu\text{m}$, $A=810\mu\text{m}$, $t=90\mu\text{m}$ 时, 该偏振分束器的 CLR 最接近 2, 可实现偏振分束功能。根据式 (2) 可知, 对于 $90\mu\text{m}$ 的管厚, 谐振阶次为 1 时, 谐振频率为 1.46THz 。要使入射光很好地被限制在空气双芯中传播, 工作频率应尽量远离谐振频率。对于优化后的光纤结构, 图 7 为在入射光频率为 1THz 时的模场分布图, 显然, 光场被很好的限制在空气纤芯中传输。



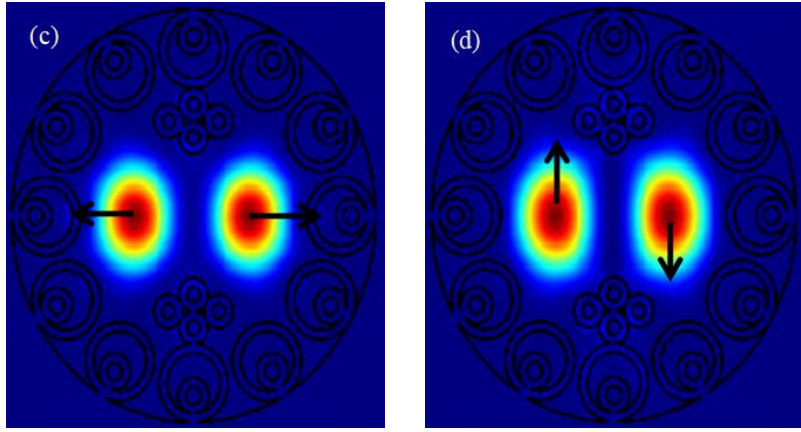


图 7 双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器模场分布图:

(a) x 偏振偶模; (b) y 偏振偶模; (c) x 偏振奇模; (d) y 偏振奇模

Fig. 7. Distributions of four supermode in the proposed dual core negative curvature fiber terahertz polarization beam splitter: (a) the x -polarized even mode; (b) the y -polarized even mode; (c) the x -polarized odd mode; (d) the y -polarized odd mode.

图 8 为在最优结构参数下, 4 个非简并模式的有效折射率随频率的变化关系图, 由图可得, 当频率从 0.98THz 增加到 1.02THz 时, 四个模式的有效折射率随着频率的增加而增加, 正是由于结构的非圆对称性, 增加了双折射, 使得四个模式的有效折射率并不相同。四个模式的有效折射率大小关系为: x 偏振偶模 $> y$ 偏振偶模 $> y$ 偏振奇模 $> x$ 偏振奇模。根据图可得, 在 1THz 附近, x 偏振的偶模和奇模折射率差减小, y 偏振的偶模和奇模折射率差增大, 这与上文对结构参数的讨论中变化一致。

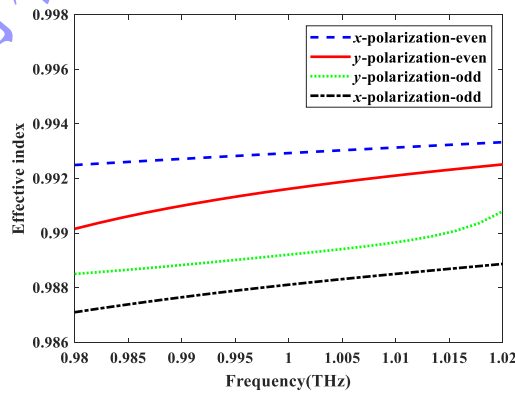


图 8 四个非简并模式的有效折射率随着频率的变化关系图

Fig. 8. The variation of effective refractive index with frequency

对于所设计的双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器，图 9 分别为其两个纤芯中相互垂直的两个偏振光的归一化能量 P_{out}^x 和 P_{out}^y 随着传输距离的变化曲线图。仿真中认为从 A 芯端口输入频率为 1THz 的 x 偏振光和 y 偏振光，将入射光功率进行归一化处理时，令 $P_{in}^x = 1$ ， $P_{in}^y = 1$ 。可以看出，对于特定的偏振光，其光能量在两个纤芯中周期性变化。当光在光纤中传输距离为 6.224cm 时，A 芯中 x 偏振光的能量达到最大， y 偏振光的能量达到最小，而同时在 B 芯中， x 偏振光的能量达到最小， y 偏振光的能量达到最大， y 偏振光与 x 偏振光实现完全分离。

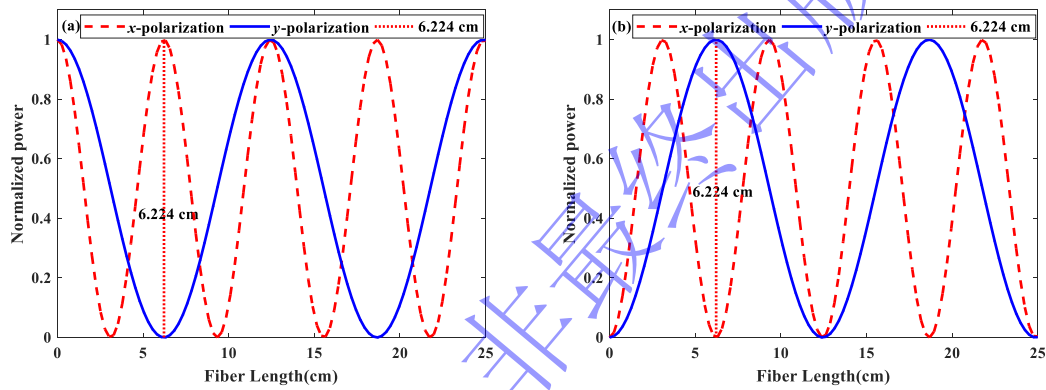


图 9 偏振分束器的双芯中归一化能量随着传输距离的变化关系图：（a）A 芯；（b）B 芯
Fig. 9. The normalized transmission power changes with distance in the dual core of polarization beam splitter: (a) core A; (b) core B.

图 10 所示为双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器的长度为 6.224cm 时，A 芯和 B 芯的输出端口的消光比随着频率的变化曲线图。由图可知，当入射光频率为 1THz 时，A 芯端口 x 偏振光的消光比达到 120.8dB，带宽为 0.024THz，B 芯端口 y 偏振光的消光比达到 63.74dB，带宽为 0.02THz。表明在带宽范围内，偏振分束器的性能优良，满足宽带宽和高消光比的要求。

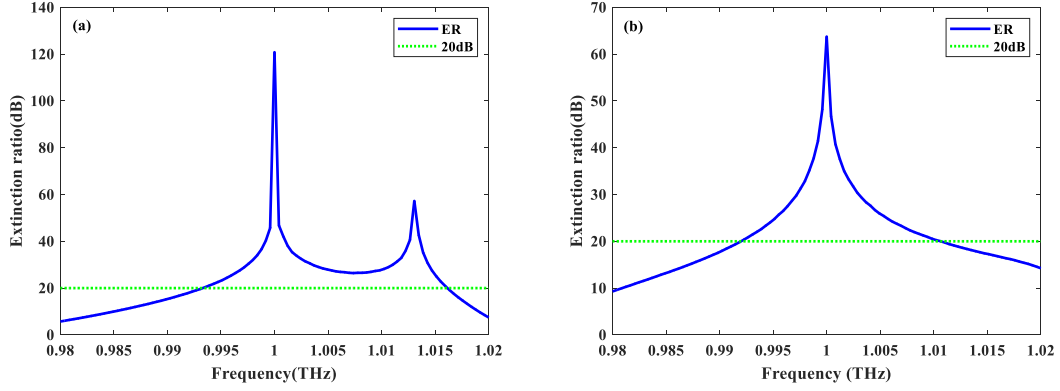


图 10 偏振分束器的双芯输出端口消光比变化曲线图：（a）A 芯；（b）B 芯

Fig. 10. The variation curve of extinction ratio of dual core output port of polarization beam splitter: (a) core A; (b) core B.

再对其损耗特性进行分析，图 11（a）和（b）分别为该 PBS 的限制损耗和材料有效吸收损耗随频率的变化关系图。由图可知，在所研究的频率范围 0.98-1.02THz 内，仅有 y 偏振奇模出现上升的趋势，其他三个模式的损耗均随着频率的增加而下降。限制损耗最低为 10^{-6} dB/cm，有效吸收损耗最低为 0.037dB/cm，与以前的工作相比^[35,36]，具有低的限制损耗和有效吸收损耗。传输损耗为二者之和，主要由有效吸收损耗决定，即为 0.037dB/cm。

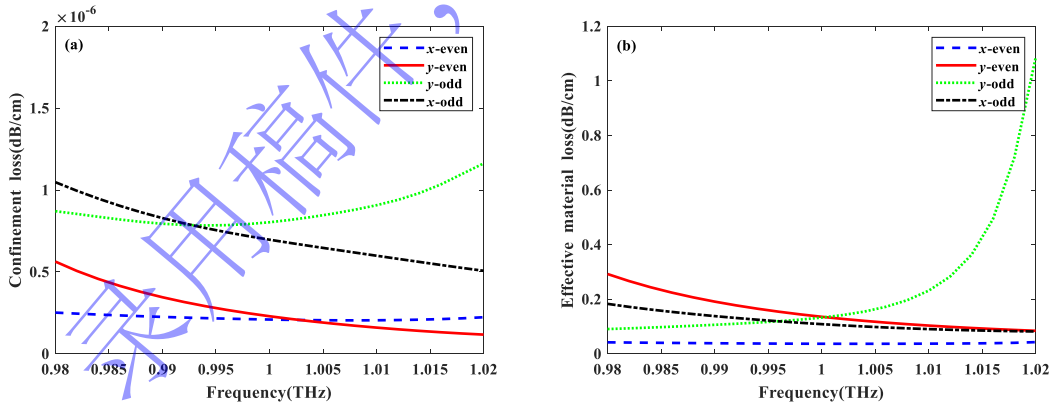
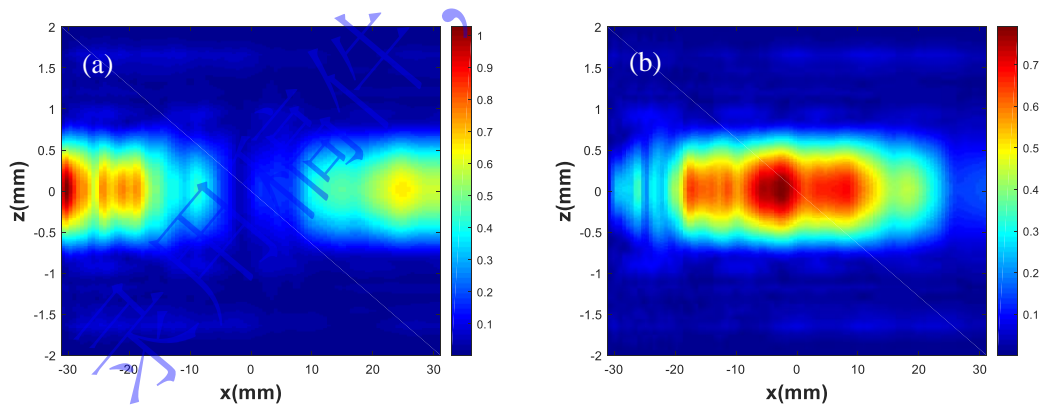


图 11 偏振分束器的损耗随着频率的变化关系图：（a）限制损耗；（b）有效吸收损耗

Fig. 11. The variation of loss with frequency in the proposed dual core negative curvature fiber terahertz polarization beam splitter: (a) Confinement loss; (b)Effective material loss.

当在双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器的某一个纤芯中分别输入 x 偏振光和 y 偏振光时，其在双芯中的传输情况如图 12 所示。（a）和（b）分别为在 A

芯中输入 x 偏振光时，模式在 A 芯和 B 芯中的传播情况，（c）和（d）分别为在 A 芯中输入 y 偏振光时，模式在 A 芯和 B 芯中的传播情况。由图可知，在一个纤芯中输入 x 偏振光时，由于所设计的偏振分束器的长度为 x 偏振光的耦合长度的 2 倍，因此 x 偏振光在传输过程中经过了两次完全耦合状态， x 偏振光依然在原来的纤芯端口输出，而对于 y 偏振光，偏振分束器的长度恰好等于 y 偏振光的耦合长度， y 偏振光在传输过程中经历了一次完全耦合， y 偏振光的能量几乎完全耦合到另一个纤芯中，因此 y 偏振光在另一个纤芯端口输出。同时，这四幅图展现了所设计的偏振分束器的整个偏振分束过程。因此，在该偏振分束器的输入端某一个纤芯的端口耦合一根单模传输的太赫兹光纤作为输入端，在另一端的两个纤芯端口各自耦合一根单模传输的太赫兹光纤作为输出端。为提高耦合效率，可设计光纤型模斑转换器作为过渡。最终，输入端输入 x 偏振光和 y 偏振光， x 偏振光和 y 偏振光将从输出端不同的纤芯输出，可以用来接不同的光学系统，彼此独立完成后续的光信号处理。



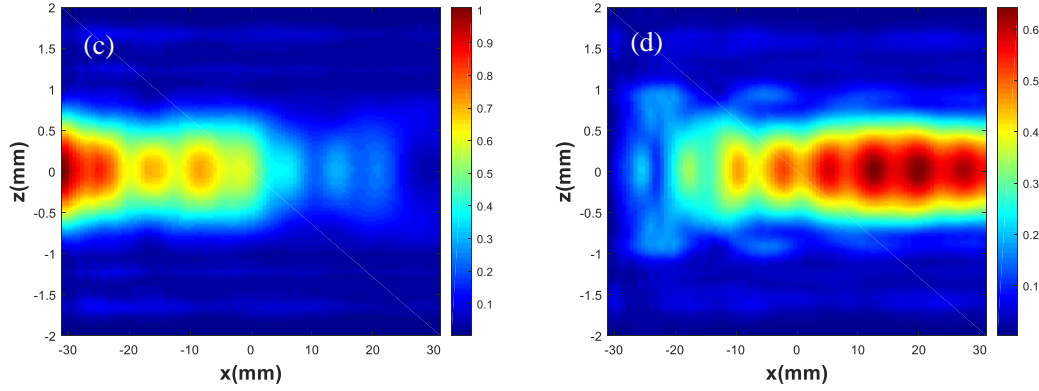


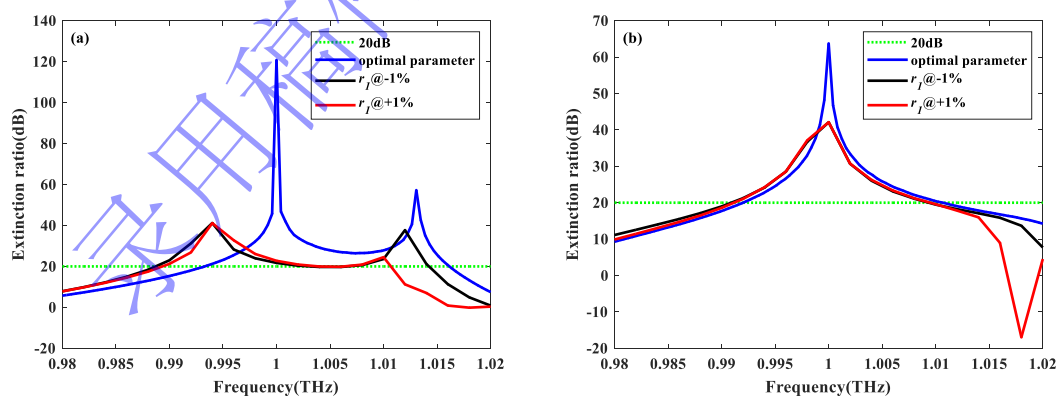
图 12 A 芯中分别输入 x 偏振光和 y 偏振光时，双芯的模式传输情况：（a）A 芯中 x 偏振光；（b）B 芯中 x 偏振光；（c）A 芯中 y 偏振光；（d）B 芯中 y 偏振光

Fig. 12. Mode transmission of dual core when x -polarized light and y -polarized light are input into core A respectively: (a) the x -polarization in core A; (b) the x -polarization in core B; (c) the y -polarization in core A; (d) the y -polarization in core B.

从工程应用的角度考虑，该器件的制备也是一个重要问题。传统光子晶体光纤的制造方法有堆拉法、压铸法、钻孔法、溶胶凝胶法和 3D 打印法等^[36-39]。本文提出的这种双芯负曲率光纤结构具有多个微观空心管，管与管之间有嵌套和耦合连接，整体光纤结构力学性能敏感，采用堆拉法难以制造；压铸法可能会使圆环管发生塌缩和变形；钻孔法和溶胶凝胶法具有操作过程繁琐、需要特定模具、不灵活、表面粗糙、成本昂贵等等缺点，不适合用来大批量制备该结构。与之相比，3D 打印法具有结构灵活、成本低、均匀性好等优点，适合制造该复杂结构。2015 年，Cruz A^[40]使用 3D 打印法制备了一种以 Zeonex 为基底材料的太赫兹空芯反谐振光纤。2018 年 Van P^[41]使用 3D 打印法制备了一种以 COC 为基底材料的太赫兹空芯反谐振光纤，本文所设计的这种光纤亦可以使用 3D 打印法来制备。

多孔芯结构 PBS 和悬浮芯结构 PBS 是当前两种相对流行的太赫兹偏振分束器，前者仍然采用堆拉法和溶胶凝胶法制备^[42]，后者多采用挤压法和 3D 打印法来制备^[22]。考虑到多孔芯结构的高精度孔尺寸和悬浮芯结构的易变形，均制作不易。而本文设计的结构采用的 3D 打印法制作较简单，避免了高精度模具的使

用，成本较低，可以大批量制备。因此，本文提出的结构制作难度相比多孔芯结构和悬浮芯结构较小。然而，在制备过程中，仍不可避免的会产生一定的工艺偏差。因此，有必要对所设计器件的公差进行分析。已有工作^[43]中讨论了偏振分束器的长度在 $\pm 1\%$ 的误差下对消光比的影响，也有研究工作^[42]中讨论了参数在 $\pm 3\%$ 误差下对分束器长度的影响，受此启发，我们研究了各个参数 $\pm 1\%$ 误差下对于偏振分束器的主要性能消光比和带宽造成的影响，图 13 展示了所设计的五个结构参数 (r_1 , r_2 , r_3 , A , t) 分别在 $\pm 1\%$ 的参数误差下消光比的变化情况，其中 (a)、(c)、(e)、(g)、(i) 为 A 芯的消光比变化，(b)、(d)、(f)、(h)、(j) 为 B 芯的消光比变化。可以看出，各个参数在 $\pm 1\%$ 的误差情况下，在 1THz 处消光比仍然能达到 20dB 以上，带宽均在 0.02THz 左右。图 14 所示为所有参数在 $\pm 1\%$ 的误差情况下，A 芯和 B 芯的消光比变化情况。可以看出，峰值消光比对应的频率有频移， $+1\%$ 误差对应的频率发生左移， -1% 误差对应的频率发生右移，存在误差时，1THz 频率处的消光比仍在 20dB，具有良好的偏振分束性能，表明该结构具有较大的工艺容差。



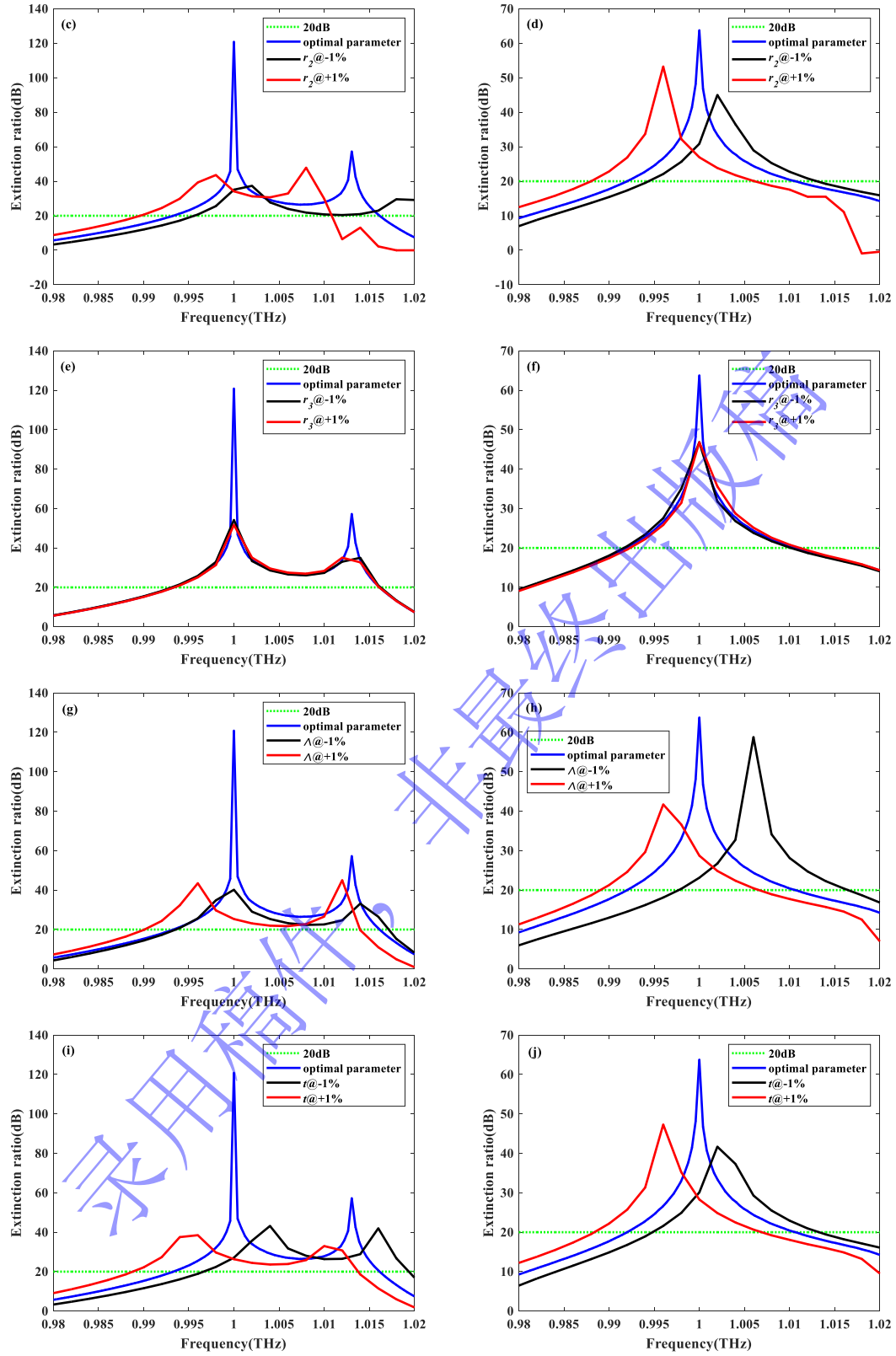


图 13 各个参数分别在 $\pm 1\%$ 误差情况下消光比的变化情况

Fig. 13. The change of extinction ratio of each parameter under $\pm 1\%$ error.

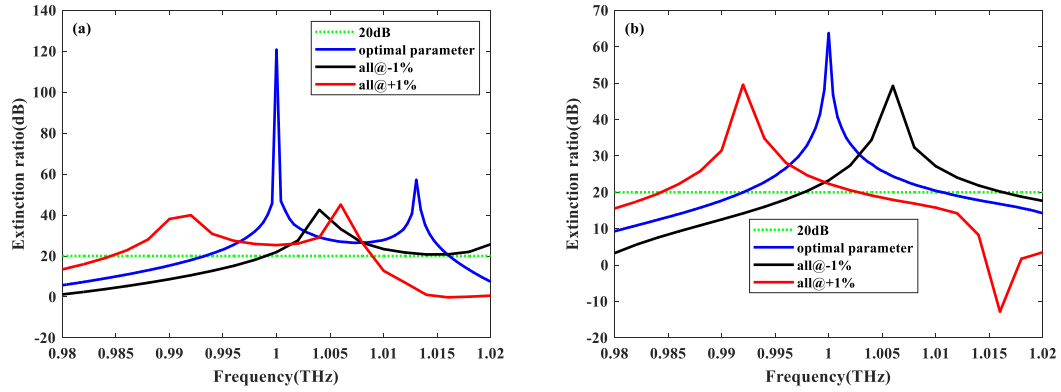


图 14 所有参数在 $\pm 1\%$ 误差情况下消光比的变化情况：（a）A 芯；（b）B 芯
Fig. 14. The change of extinction ratio of all parameter under $\pm 1\%$ error: (a) core A; (b) core B.

最后将本文所设计的双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器与以往文献中微结构光纤型太赫兹偏振分束器的主要性能参数作比较，结果如表 1 所示。可以看出，前期所报道的太赫兹 PBS 中心频率大部分为 1THz，最大消光比低于 100dB，分束器长度基本都在厘米量级。本文所设计的偏振分束器的长度为 6.224cm，具有较大的工作带宽，同时消光比和传输损耗有显著优势。

表 1 光纤型太赫兹 PBS 性能比较
Table 1. Performance comparison of optical fiber terahertz PBS.

结构	中心频率	消光比	工作带宽	传输损耗	分束器长度
Zhu, Chen, et al.(2013) ^[44]	1THz	73.86dB	0.032THz	0.27dB/cm	3.36cm
Chen, Yan, et al.(2016) ^[20]	0.6THz	54dB	0.013THz	0.28dB/cm	1.43cm
E. Reyes-Vera, et al.(2018) ^[45]	1THz	68dB	0.15THz	1.5dB/cm	10.9cm
Zhu, Liu, et al.(2018) ^[22]	1THz	70dB	0.046THz	0.4dB/cm	1.27cm
Kumar, Varshney, et al.(2020) ^[42]	0.75THz	20dB		0.03dB/cm	10cm
Tian, Liu, et al(2021) ^[46]	1THz	64.64dB	0.02THz	0.51dB/cm	1.184cm
Wang, Tian, et al.(2021) ^[23]	1THz	20.8dB	0.01THz	0.15dB/cm	0.865cm
本文工作	1THz	120.8dB	0.024THz	0.037dB/cm	6.224cm

5 结 论

设计了一种以环烯烃共聚物为基底材料的新型双芯负曲率光纤太赫兹偏振

分束器，采用时域有限差分法对其消光比、带宽、损耗等特性进行分析。数值模拟结果表明：当入射光频率为 1THz，分束器长度为 6.224cm 时， x 偏振光的消光比达到 120.8dB，带宽为 0.024THz， y 偏振光的消光比达到 63.74dB，带宽为 0.02THz，传输总损耗低至 0.037dB/cm。并通过光场模式传播情况直观解释了器件的偏振分束原理，分析了器件结构参数在 $\pm 1\%$ 偏差下的性能，表明其具有良好的工艺容差。该双芯负曲率光纤太赫兹偏振分束器具有大带宽、低损耗等优点，在未来太赫兹光子学领域具有潜在应用。

参考文献：

- [1] Costa D, Yacoub M 2008 *Electron. Lett.* **44** 214
- [2] Xu J, Zhang X C 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 151107
- [3] Federici J F, Schulkin B, Huang F, Gary D, Barat R, Oliveira F, Zimdars D 2005 *Semicond. Sci. Technol.* **20** S266
- [4] Liu H B, Plopper G, Earley S, Chen Y Q, Ferguson B, Zhang X C 2007 *Biosens. Bioelectron.* **22** 1075
- [5] Meng M, Yan D X, Li J S, Sun S 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 167801 (in Chinese) [孟淼, 严德贤, 李九生, 孙帅 2020 物理学报 **69** 167801]
- [6] Hui Z Q, Zhang T T, Han D D, Zhao F, Zhang M Z, Gong J M 2021 *J. Infrared Millim. Waves* **40** 616
- [7] Shi Z W, Cao X X, Wen Q Y, Wen T L, Yang Q H, Chen Z, Shi W S, Zhang H W 2018 *Adv. Opt. Mater.* **6** 1700620
- [8] Su X Q, Ouyang C M, Xu N N, Cao W, Wei X, Song G F, Gu J Q, Tian Z, O'Hara J F, Han J G, Zhang W L 2015 *Opt. Exp.* **23** 27152

- [9] Li J S, Xu D G, Yao J Q 2010 *Appl. Opt.* **49** 4494
- [10] Li J S, Zouhdi S 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 625
- [11] Li D, Li J S 2020 *Opt. Commun.* **472** 125862
- [12] Xiong H, Ji Q, Bashir T, Yang F 2020 *Opt. Exp.* **28** 13884
- [13] Galan J V, Sanchis P, Garcia J, Blasco J, Martinez A, Martí J 2009 *Appl. Opt.* **48** 2693
- [14] Ren L S, Jiao Y C, Li F, Zhao J J, Zhao G 2011 *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.* **10** 407
- [15] Liu H, Li J S 2014 *Optoelectron. Lett.* **10** 325
- [16] Niu T M, Withayachumnankul W, Upadhyay A, Gutruf P, Abbott D, Bhaskaran M, Sriram S, Fumeaux C 2014 *Opt. Exp.* **22** 16148
- [17] Lai W, Born N, Schneider L M, Rahimi-Iman A, Balzer J C, Koch M 2015 *Opt. Mater. Express* **5** 2812
- [18] Li S S, Zhang H, Bai J, Liu W W, Jiang Z W, Chang S J 2014 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **26** 1399
- [19] Li S S, Zhang H, Hou Y, Bai J J, Liu W W, Chang S J 2013 *Appl. Opt.* **52** 3305
- [20] Chen H Z, Yan G F, Forsberg E, He S L 2016 *Appl. Opt.* **55** 6236
- [21] Wang J L, Liu Y, Zhong K 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 024209 (in Chinese) [汪静丽, 刘洋, 钟凯 2017 物理学报 **66** 024209]
- [22] Zhu Y F, Liu X, Rao C F, Zhong H, Luo H M, Chen Y H, Ye Z Q, Wang H 2018 *Opt. Eng.* **57** 086112
- [23] Wang B K, Tian F J, Liu G Y, Bai R L, Yang X H, Zhang J Z 2021 *Opt.*

Commun. **480** 126463

[24] Benabid F, Knight J C, Antonopoulos G, Russell P 2002 *Sci.* **298** 399

[25] Pearce G J, Wiederhecker G S, Poulton C G, Burger S, Russell P S J 2007 *Opt. Exp.* **15** 12680

[26] Islam M S, Sultana J, Rana S, Islam M R, Faisal M, Kaijage S F, Abbott D 2017 *Opt. Fiber Technol.* **34** 6

[27] Nielsen K, Rasmussen H K, Adam A J L, Planken P C M, Bang O, Jepsen P U 2009 *Opt. Exp.* **17** 8592

[28] Khanarian G, Celanese H 2001 *Opt. Eng.* **40** 1024

[29] Hou M X, Zhu F, Wang Y, Wang Y P, Liao C R, Liu S, Lu P X 2016 *Opt. Exp.* **24** 27890

[30] Ding W, Wang Y Y 2015 *Opt. Exp.* **23** 21165

[31] Florous N J, Saitoh K, Koshiba M 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 1231

[32] Qu Y W, Yuan J H, Zhou X, Li F, Yan B B, Wu Q, Wang K R, Sang X Z, Long K P, Yu C X 2020 *J. Opt. Soc. Am. B* **37** 396410

[33] Zhang Y N, Xue L, Qiao D, Guang Z 2019 *Optik* **207** 163817

[34] Wu Z Q, Zhou X Y, Xia H D, Shi Z H, Huang J, Jiang X D, Wu W D 2017 *Appl. Opt.* **56** 2288

[35] Cucinotta A, Selleri S, Vincetti L, Zoboli M 2002 *J. Light. Technol.* **20** 1433

[36] Falkenstein P, Merritt C D, Justus B L 2004 *Opt. Lett.* **29** 1858

[37] Xian F, Mairaj A K, Hewak D, Monro T M 2005 *J. Light. Technol.* **23** 2046

[38] Wang L L, Zhang Y N, Ren L Y, Wang X Z, Li T H, Hu B W, Li Y L, Zhao W,

Chen X H 2005 *Chin. Opt. Lett.* **3** S94

[39] Sultana J, Islam M S, Cordeiro C M B, Habib M S, Dinovitser A, Ng B, Abbott D 2020 *IEEE Access* **8** 113309

[40] Cruz A L S, Serrão V A, Barbosa C L, Franco M A R, Cordeiro C M B, Argyros A, Tang X L 2015 *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.* **14** SI45

[41] Van P L D, Gorecki J, Fokoua E N, Apostolopoulos V, Poletti F 2018 *Appl. Opt.* **57** 3953

[42] Kumar V, Varshney R K, Kumar S 2021 *Results in Opt.* **4** 100094

[43] Kumar V, Varshney R K, Kumar S 2020 *Appl. Opt.* **59** 1974

[44] Zhu Y F, Chen M Y, Wang H, Yao H B, Zhang Y K, Yang J C 2013 *IEEE Photon. J.* **5** 7101410

[45] Vera E R, Restrepo J Ú, Durango C J, Cardona J M, Cardona N G 2018 *IEEE Photon. J.* **10** 1

[46] Tian F J, Liu G Y, Luo J F, Yao C Y, Li L, Yang X H, Zhang J Z 2021 *Optik* **225** 165862

Dual-core Negative Curvature Fiber-based Terahertz Polarization Beam Splitter with Ultra-low Loss and Wide Bandwidth*

Zhan-qiang Hui^{1)†} Li-Ming Gao¹⁾ Rui-hua Liu¹⁾ Dong-dong Han¹⁾ Wei Wang²⁾

1) (School of Electronic Engineering, Xi'an University of Posts and Telecommunications, Xi'an 710121, China)

2) (State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, 710119, China)

Abstract

A novel terahertz polarization beam splitter (PBS) with low loss and large bandwidth based on double core negative curvature fiber is designed. The device takes Copolymers of Cycloolefin as the substrate, and 12 circular tubes with embedded tubes are evenly distributed along the circumference. The fiber core is divided into two cores through two groups of circumscribed small clad tubes symmetrical up and down. The finite-difference time-domain (FDTD) method is used to analyze its guide mode properties. The effects of various structural parameters on its beam splitting characteristics are investigated in detail, and the extinction ratio (ER), bandwidth and transmission loss of the PBS are analyzed. The simulation results show that when the incident light frequency is 1THz and the beam splitter length is 6.224cm, the ER of *x*-polarized light reaches 120.8dB, the bandwidth with ER above 20dB is 0.024THz, the

ER of y-polarized light reaches 63.74dB, the bandwidth with ER above 20dB is 0.02THz, and the total transmission loss is as low as 0.037dB/cm. Tolerance analysis shows that the PBS can still maintain good performance under the $\pm 1\%$ deviation of structural parameters.

Keywords: Terahertz, polarization beam splitter, negative curvature fiber, coupled mode theory

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61875165, 61775180, 61772417), Collaborative Innovation Projects of Education Office of Shaanxi Province (Grant No. 20JY060), and the Graduates' Creative Workstation of Xi'an University of Posts and Telecommunications (Grant No. YJGJ201905).