

# 基于嵌套三角形包层结构负曲率太赫兹光纤的研究\*

孟淼<sup>1)2)</sup> 严德贤<sup>1)2)†</sup> 李九生<sup>1)2)</sup> 孙帅<sup>3)</sup>

1) (中国计量大学信息工程学院, 浙江省电磁波信息技术与计量检测重点实验室, 杭州 310018)

2) (中国计量大学太赫兹研究所, 杭州 310018)

3) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

(2020年3月27日收到; 2020年5月15日收到修改稿)

设计了一种新型负曲率太赫兹光纤, 光纤由六条均匀分布在包层内部并嵌套等边三角形结构的包层管组成. 通过改变包层管和三角形边的厚度来研究负曲率光纤的有效模场面积、纤芯功率比、限制损耗、色散等性能. 当包层管和三角形厚度为 90  $\mu\text{m}$  时, 光纤的限制损耗在 2.36 THz 时可以达到 0.005 dB/cm, 当频率范围在 2.1—2.8 THz 时, 色散系数在  $\pm 0.19$  ps/(THz·cm), 纤芯功率比达到了 99% 以上, 并且拥有较好的有效模场面积. 进一步, 将包层管和三角形边厚度保持在 90  $\mu\text{m}$  不变, 调整三角形边的弯曲程度, 继续研究以上性能, 结果表明在内弯曲的状态下可以将限制损耗降低 60%. 该工作为高效率、高性能的太赫兹光纤提供了合理的结构设计以及理论分析.

**关键词:** 太赫兹光纤, 限制损耗, 功率比, 色散

**PACS:** 78.20.Ci, 87.50.U-, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200457

## 1 引言

随着越来越多的研究者对于太赫兹的独特性和未来应用潜力的关注和研究, 太赫兹技术得到了快速发展. 近些年来, 在太赫兹源<sup>[1-2]</sup>、滤波器<sup>[3-4]</sup>、偏振器<sup>[5]</sup>、调制器<sup>[6]</sup>、开关<sup>[7]</sup>、超表面<sup>[8]</sup>以及光纤波导<sup>[2]</sup>等方面进行了深入研究. 在微结构太赫兹光纤的研究中, 各种各样微结构太赫兹光纤也已经被提出, 如目前空芯光纤、微结构纤芯光子晶体光纤<sup>[9]</sup>已经吸引了许多学者的关注. 与具有实芯或多孔芯的光纤不同, 空芯光纤允许太赫兹波在色散相对较低的空芯区快速传播<sup>[10]</sup>.

目前报道的大多数太赫兹系统主要采用离散

组件, 太赫兹波在自由空间传播, 这使得系统非常庞大, 难以维护. 紧凑、低成本太赫兹系统的发展需要通过光纤或波导等限制性元件来远程传输太赫兹波, 因此太赫兹光纤的发展成为人们关注的焦点<sup>[11]</sup>.

在当前的研究中, 空芯光纤可以分为两类. 第一类是光子带隙光纤 (HC-PBG), 通过光子带隙效应实现光波传导. 这类光纤的传输带宽有限. 第二类是反谐振空芯光纤 (也称为抑制耦合空芯光纤), 其传导机制基于抗共振效应和纤芯模与包层模之间抑制耦合的组合<sup>[12-13]</sup>. 反谐振空芯光纤由单层或多层包层管组成, 与 HC-PBG 光纤相比, 这些光纤具有更宽的传输带宽和低光介质重叠<sup>[14]</sup>. 反谐振空芯光纤具有一系列窄带宽/高损耗谐振区和宽

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61871355, 61831012) 和浙江省自然科学基金 (批准号: LQ20F010009, LY18F010016) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yandexian1991@cjlu.edu.cn

带宽/低损耗反谐振区. 在谐振区, 纤芯模式与包层模相位匹配, 传输损耗大, 而在反谐振区, 传导太赫兹的模式被严格限制在空气芯中. 共振区和反共振区的光谱位置和带宽明显取决于反共振单元管的厚度<sup>[15]</sup>.

在光纤的研究与制备中, 负曲率光纤是当前的研究热点之一. 负曲率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. 在空芯微结构光纤中, 空芯边界的负曲率形状可以大大降低在光纤传输的光损耗<sup>[16]</sup>. 2013年, Setti等<sup>[17]</sup>制备了包层由一个圆形排列的电介质管组成的负曲率光纤, 在 0.375 THz 和 0.828 THz 处分别获得了较低的损耗 0.3 dB/cm 以及 0.16 dB/cm; 2015年, Alice等<sup>[18]</sup>报道了由聚合物材料为基底的负曲率空芯光纤, 纤芯可以约束 95% 的模式能量, 传输带宽 0.3—0.5 THz; 2020年, Sultana等<sup>[19]</sup>报道了一款夹杂金属线的负曲率光纤, 在 1 THz 损耗最低为 0.0058 dB/m, 但是传输带宽有限. 目前报道的太赫兹负曲率光纤主要工作在 1 THz 以下, 而光泵浦气体激光器可以在 2.5 THz 频段输出高功率的太赫兹波, 在通信以及成像领域具有广阔的应用前景<sup>[20–22]</sup>. 为此, 研究工作在 2.5 THz 频段的负曲率太赫兹光纤可以促进该波段太赫兹源的应用.

本文提出了一种基于嵌套三角形包层结构的新型负曲率光纤, 通过改变包层管和三角形结构边的厚度, 研究光纤结构的限制损耗、模场面积、纤芯功率比及色散等传输特性. 当厚度为 90 μm 时, 光纤的限制损耗下降到 10<sup>-3</sup> dB/cm 量级, 在 2.36 THz 处限制损耗为 0.005 dB/cm, 有效模场面积在 2.72 THz 可以达到 1.55 × 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>, 在 2.1—2.8 THz 频段内色散曲线平坦, 在此频段内的色散为 -0.19 ps/(THz · cm) < β<sub>2</sub> < 0.19 ps/(THz · cm), 且纤芯功率比维持在 99% 左右, 传输带宽更宽. 在此基础上, 对嵌套三角形结构的边进行了一定程度的弯曲. 结果表明, 三角形结构的边处于内弯曲的状态时, 光纤的限制损耗降低到 0.002 dB/cm, 纤芯功率比仍然维持在 99% 左右. 与目前已经报道出来的太赫兹频段负曲率光纤相比, 传输带宽和传输效率都有了明显提高.

## 2 光纤的结构与设计

本文所提出的负曲率空芯光纤由六个嵌套等

边三角形结构的包层管组成, 结构如图 1 所示. 白色区域代表空气, 蓝色区域代表 Topas COC 材料, 包层管的厚度和嵌套三角形结构的厚度相同用  $t$  表示,  $d_0$  表示包层管的直径, 纤芯区域的直径用  $d_1$  表示, 外层 Topas COC 材料所构成的包层直径和厚度分别用  $D_1$  和  $D_2$  表示, 六个包层管均匀排列在内部. 其中  $d_1$  设置为 1425 μm,  $D_1$  和  $D_2$  分别为 3625 μm 和 287.5 μm. 光纤以 Topas COC 为基底材料, 折射率值为 1.53, 空气折射率值为 1. 选择 Topas COC 材料作为基底材料的原因是 Topas COC 具有一些良好的特性, 这些特性是恒定折射率、低材料损耗、对湿度不敏感和低色散<sup>[23]</sup>, 通过反谐振作用可以将太赫兹波有效束缚在纤芯内部.

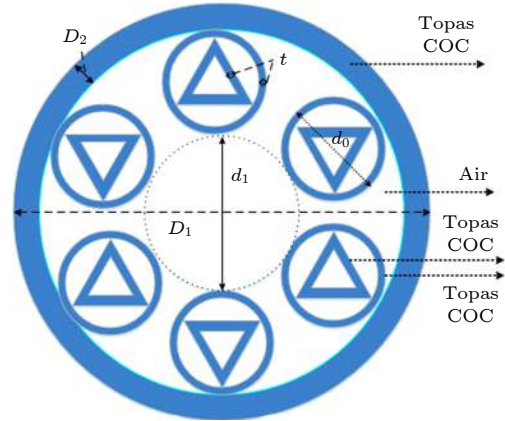


图 1 嵌套三角形结构负曲率空芯光纤结构图  
Fig. 1. Structure of negative curvature hollow core fiber with nested triangle structure.

使用 COMSOL Multiphysics 软件模拟计算结构参数对光纤传输性能的影响<sup>[10]</sup>. 在包层管和三角形结构厚度不同的情况下研究负曲率光纤在 2.0—2.8 THz 频段内的性能差异.

## 3 结果与讨论

通过全矢量有限元法在 2.0—2.8 THz 频段内对光纤的限制损耗、色散、有效模场面积以及纤芯功率比进行了数值模拟<sup>[24]</sup>. 当太赫兹波在光纤内部传输时, 部分太赫兹波泄漏到包层结构中, 导致光纤产生限制损耗<sup>[25]</sup>. 负曲率光纤限制损耗 (单位为 dB/cm) 可以通过下式得出<sup>[26]</sup>:

$$CL = 40\pi \times \frac{\text{Im}(n_{\text{eff}})}{\lambda \ln 10}, \quad (1)$$

式中,  $\text{Im}(n_{\text{eff}})$  代表模式有效折射率的虚部,  $\lambda$  代

表输入的波长. 根据 (1) 式可知光纤的限制损耗主要受有效模式折射率的虚部影响, 设计的光纤在 2.05—2.8 THz 频率内且  $t$  为 90  $\mu\text{m}$  时, 限制损耗一直处于较低的水平 (10<sup>-3</sup> dB/cm 量级), 在 2.36 THz 处得到了 0.005 dB/cm 的限制损耗. 因此当太赫兹波在光纤内部传输时, 太赫兹波可以很好地被束缚在纤芯区域, 限制损耗的影响得到了有效抑制. 图 2(a) 所示是四种不同厚度情况下限制损耗在 2.0—2.8 THz 频段内的变化趋势, 从图中可以看出当厚度从 70  $\mu\text{m}$  到 100  $\mu\text{m}$  逐渐增大时, 限制损耗在 2.0—2.2 THz 频段内逐渐降低. 所以, 当保持包层和纤芯直径不变时, 仅改变包层管和嵌套三角形的厚度, 光纤的限制损耗会受到影响, 随着厚度的增大, 光纤限制损耗明显降低. 而且随着管厚度的增大, 光纤限制损耗的起伏不同, 这是因为包层管厚度的变化导致负曲率光纤反谐振中心<sup>[27]</sup>发生改变, 从图中可以看出在厚度为 90  $\mu\text{m}$  时有较强的反谐振作用使光纤限制损耗得到有效抑制. 四种厚度相比较而言, 厚度为 90  $\mu\text{m}$  时限制损耗在较长的太赫兹频段内一直处于比较低的水平, 更有利于宽频段太赫兹波在光纤内部的传输.

波导色散是由光纤自身结构引起, 对于波导色散的分析, 一般只考虑基模情况. 在色散特性的研究与分析中, 可以通过式 (2) 得到色散参数<sup>[28]</sup>:

$$\beta_2 = \frac{1}{c} \left( 2 \frac{dn}{d\omega} + \omega \frac{d^2n}{d\omega^2} \right), \quad (2)$$

式 (2) 中,  $c$  表示光在真空中的传播速度,  $n$  表示有效模式折射率的实部,  $\omega = 2\pi f$  表示角频率. 图 2(b) 所示为不同厚度下色散系数随频率的变化趋势, 由图中可以看出随着包层管和三角形厚度  $t$  的改变, 可以实现相应频段的色散平坦趋势. 当厚度为 90  $\mu\text{m}$  时, 此光纤在 2.0—2.8 THz 频段内色散系数基本在零刻度上下浮动, 在 2.1—2.8 THz 范围内的色散为  $-0.19 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm}) < \beta_2 < 0.19 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$ . 当厚度为 70  $\mu\text{m}$  和 80  $\mu\text{m}$  时, 光纤色散在 2.0—2.4 THz 范围内浮动较大. 厚度为 100  $\mu\text{m}$  时在 2.0—2.5 THz 范围内色散值处于较低的水平 (绝对值介于 0.03—0.3 ps/(THz·cm) 之间), 但是在 2.5—2.8 THz 范围内色散曲线有明显的变化, 在 2.7 THz 达到了  $-20 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$ , 2.75 THz 达到了  $15 \text{ ps}/(\text{THz} \cdot \text{cm})$ . 结果表明, 当厚度为 90  $\mu\text{m}$  时, 所设计的光纤能够获得较低的色散, 可以实现太赫

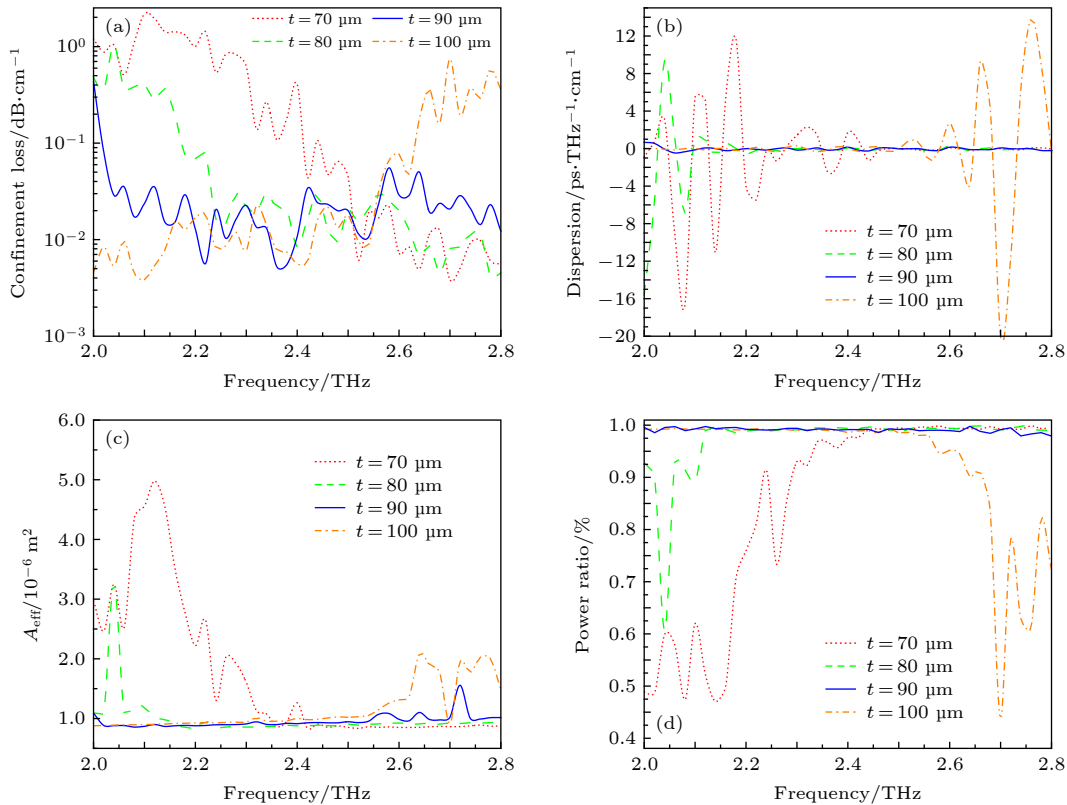


图 2 (a) 限制损耗; (b) 色散特性; (c) 有效模场面积; (d) 纤芯功率比随频率的变化曲线

Fig. 2. (a) Confinement loss; (b) dispersion characteristics; (c) effective mode field area; (d) core power ratio versus frequency.

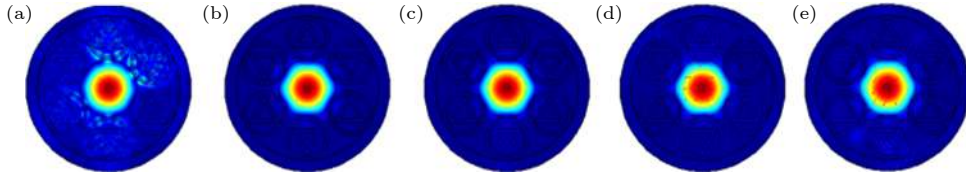


图 3 光纤模场分布 (a) 2.0 THz; (b) 2.2 THz; (c) 2.4 THz; (d) 2.6 THz; (e) 2.8 THz

Fig. 3. Fiber mode field distribution. (a) 2.0 THz; (b) 2.2 THz; (c) 2.4 THz; (d) 2.6 THz; (e) 2.8 THz.

兹波的基模稳定传输. 不同太赫兹频率下的光纤模场分布如图 3 所示.

此外, 还讨论了光纤的有效模场面积和纤芯功率比. 有效模场面积表征光纤模式传输过程中实际的模场分布大小 [25], 纤芯功率比表征传输过程中太赫兹波在纤芯中的存量. 这两个参数可以通过 (3) 式和 (4) 式得出 [26,28-30]:

$$A_{\text{eff}} = \left[ \int I(r)rdr \right]^2 / \left[ \int I^2(r)dr \right]^2, \quad (3)$$

$$f = \frac{\int_{\text{hole}} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}{\int_{\text{total}} (E_x H_y - E_y H_x) dx dy}, \quad (4)$$

式 (3) 中,  $I(r) = (E_t)^2$  表示电场强度, 在这种情况下, 传播模式保持较大的有效模场面积 [24]. 式 (4) 中  $E_x, E_y, H_x, H_y$  表示横向和纵向电场和磁场的分量 [26]. 由图 2(c) 可以看出在有效模场面积曲线图中, 厚度为 90  $\mu\text{m}$  时的有效模场面积相对于其他三种厚度处于较低水平, 在 2.72 THz 达到峰值  $1.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . 厚度为 70  $\mu\text{m}$  时, 有效模场面积在 2.12 THz 达到最高值  $4.98 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ . 由图 2(d) 可以发现厚度为 90  $\mu\text{m}$  时, 在较长的带宽范围内纤芯功率比可以稳定在 99% 以上, 可以实现太赫兹波的高效传输. 厚度为 100  $\mu\text{m}$  时在 2.7 THz 达到最低 43%, 在 2.0—2.34 THz 范围内可以达到 99%. 纤芯功率比的增长趋势也可以反映出包层管和嵌套三角形结构的厚度带来的影响, 值得注意的是当厚度为 90  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$  时, 在部分太赫兹频段内两种参数不同的光纤有着相近的传输能力. 在 2.64—2.8 THz 频段内, 厚度为 100  $\mu\text{m}$  时限制损耗增大, 纤芯功率比下降, 这表明纤芯基模和包层模发生强烈的模式耦合, 从而破坏了反谐振区域的形成 [27].

综合上述分析, 嵌套三角形结构的负曲率光纤在四种厚度的情况下都会有相应的带宽可以实现模式的稳定传输, 但相比较而言厚度为 90  $\mu\text{m}$  的

情况最为理想, 减少了能量衰减.

## 4 结构优化

为了获得一个更好的传输效果, 对设计的负曲率光纤进行了改进, 将三角形结构的边进行了一定程度的弯曲, 并且从向外弯曲和向内弯曲来分析光纤的传输特性. 由于所设计光纤嵌套包层结构空气层厚度并没有远小于芯区宽度, 所以不能忽略空气层的反谐振作用. 三角形边在不同弯曲状态时空气层厚度的变化会影响光纤对限制损耗的抑制, 理论上空气层厚度在一定范围内可以降低限制损耗 [27].

### 4.1 三角形结构边外弯曲

三角形结构边处于外弯曲的状态时, 截取不同圆的特定弧长作为三角形结构的弯曲边, 保持包层管和嵌套三角形的厚度  $t$  仍然为 90  $\mu\text{m}$ , 其他结构参数不做变化. 图 4 所示即为三角形边进行一定程度弯曲后的光纤结构图, 选取半径为 797  $\mu\text{m}$ 、1003  $\mu\text{m}$ 、1436  $\mu\text{m}$  的圆的特定弧长作为三角形结构的弯曲边.

研究分析外弯曲负曲率光纤在 2.0—2.8 THz 的传输性能. 在外弯曲的状态下, 研究结果表明,

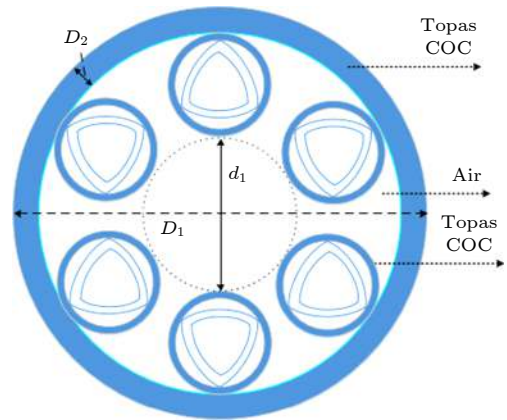


图 4 外弯曲负曲率光纤结构图

Fig. 4. Structure diagram of external bending negative curvature fiber.

当选取半径为 1003  $\mu\text{m}$  圆的弧长作为三角形外弯曲边时, 太赫兹波在光纤内部的传输保持在较好的水平. 图 5 所示即为外弯曲负曲率光纤各项性能随频率变化的曲线图. 图 6 是半径为 1003  $\mu\text{m}$  时, 光纤在不同太赫兹频率处的模场分布情况.

如图 5(a) 所示, 可以看到限制损耗曲线在 2.0—2.18 THz 范围内, 半径所取越大则限制损耗越低. 半径为 1003  $\mu\text{m}$  时, 光纤在 2.18—2.8 THz 限制损耗变化幅度较小, 相比较三角形的直边情况, 半径为 1003  $\mu\text{m}$  时限制损耗在 2.22 THz 降到了 0.0024 dB/cm, 并在多个太赫兹频率处的限制损耗低至 0.003 dB/cm, 比直边最低 0.005 dB/cm 的限制损耗下降了 40% 左右. 表明光纤结构的改

变在一定程度上增强了反谐振作用, 促进了光纤对限制损耗的有效抑制. 从图 5(a) 也可以看出限制损耗存在振荡特性, 这是由于基模泄露的能量被包层反射后和基模继续耦合所致<sup>[30]</sup>, 因此包层管内空气孔的变化对于振荡峰的产生起到了一定作用.

从图 5(b) 可以观察到色散系数在不同弯曲程度作用下的变化趋势, 半径为 1003  $\mu\text{m}$  时色散系数在零刻度线上下浮动范围较小, 在 2.04—2.78 THz 频率值内浮动范围是  $-0.19 \text{ ps}/(\text{THz}\cdot\text{cm}) < \beta_2 < 0.19 \text{ ps}/(\text{THz}\cdot\text{cm})$ . 由图 5(c) 可以发现随着半径的增大, 有效模场面积也随之增大, 当光纤的有效模场面积较小时将会激发一系列非线性效应, 阻碍太赫兹波在光纤中的传输<sup>[25]</sup>. 所以在半径为 1003  $\mu\text{m}$

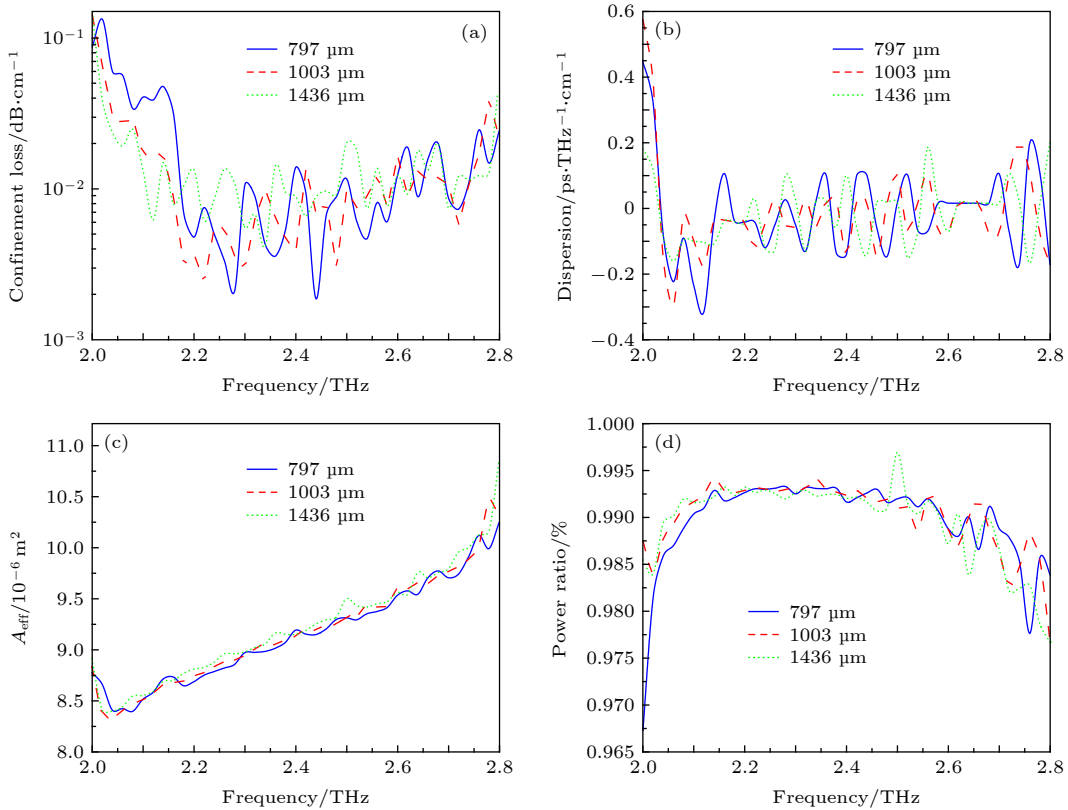


图 5 (a) 限制损耗; (b) 色散特性; (c) 有效模场面积; (d) 纤芯功率比随频率的变化曲线

Fig. 5. (a)confinement loss; (b) dispersion characteristics; (c) effective mode field area; (d) power ratio curve with frequency.

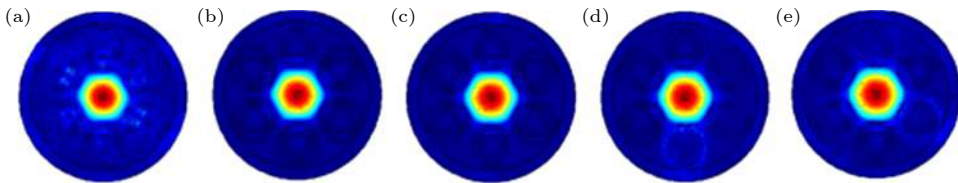


图 6 外弯曲光纤模场在不同频率时的分布 (a) 2.0 THz; (b) 2.2 THz; (c) 2.4 THz; (d) 2.6 THz; (e) 2.8 THz

Fig. 6. The distribution of mode field of external bending fiber at different frequencies. (a) 2.0 THz; (b) 2.2 THz; (c) 2.4 THz; (d) 2.6 THz; (e) 2.8 THz.

时, 较大的模场面积可以提高传输效率. 根据图 5(d) 中的纤芯功率比变化趋势, 半径为 1003  $\mu\text{m}$  时要优于其他两种情况. 综合上述分析, 选取半径为 1003  $\mu\text{m}$  圆的弧长作为三角形的弯曲边有利于太赫兹波在光纤内部的传输.

### 4.2 三角形结构边内弯曲

三角形边向内弯曲增加了包层管内部的反射弧面和空气层厚度, 在其他结构参数不变的基础上通过分析三组数据研究以上性能, 对比发现在计算不同参数时, 半径为 1003  $\mu\text{m}$  时可以同时获得较高的纤芯功率比和较低的限制损耗. 如图 7 所示是内弯曲光纤结构图.

在分析内弯曲负曲率光纤相关性能时, 选取半径为 797  $\mu\text{m}$ 、1003  $\mu\text{m}$ 、1436  $\mu\text{m}$  的圆的特定弧长作为三角形结构的弯曲边. 图 8(a)、图 8 (b)、图 8 (c)、图 8 (d) 是内弯曲负曲率光纤的限制损耗、色散、有效模场面积、纤芯功率比随频率的变化趋势. 图 9 是半径为 1003  $\mu\text{m}$  圆的弧长作为弯曲边时在不同太赫兹频率处的模场分布情况.

由图 8(a) 可以发现当选取半径为 797  $\mu\text{m}$  和

1003  $\mu\text{m}$  圆的弧长作为弯曲边时, 限制损耗在特定太赫兹频段变化幅度明显, 并且出现周期性的变化以及狭长的谐振峰. 包层管内三角形边在向内弯曲时反射弧面的增加是谐振峰形成的主要机制, 由于包层的反共振原理<sup>[31]</sup> 使光纤内反谐振区域的形成出现周期性的变化, 在特定太赫兹频段阻碍反谐振区域的形成, 使纤芯束缚太赫兹波的能力减弱, 从

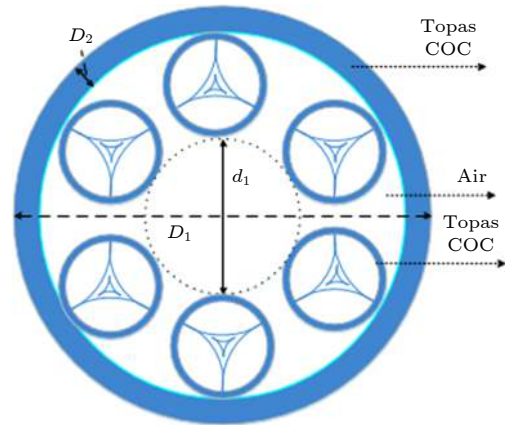


图 7 内弯曲负曲率光纤结构图

Fig. 7. Internal bending negative curvature fiber structure diagram.

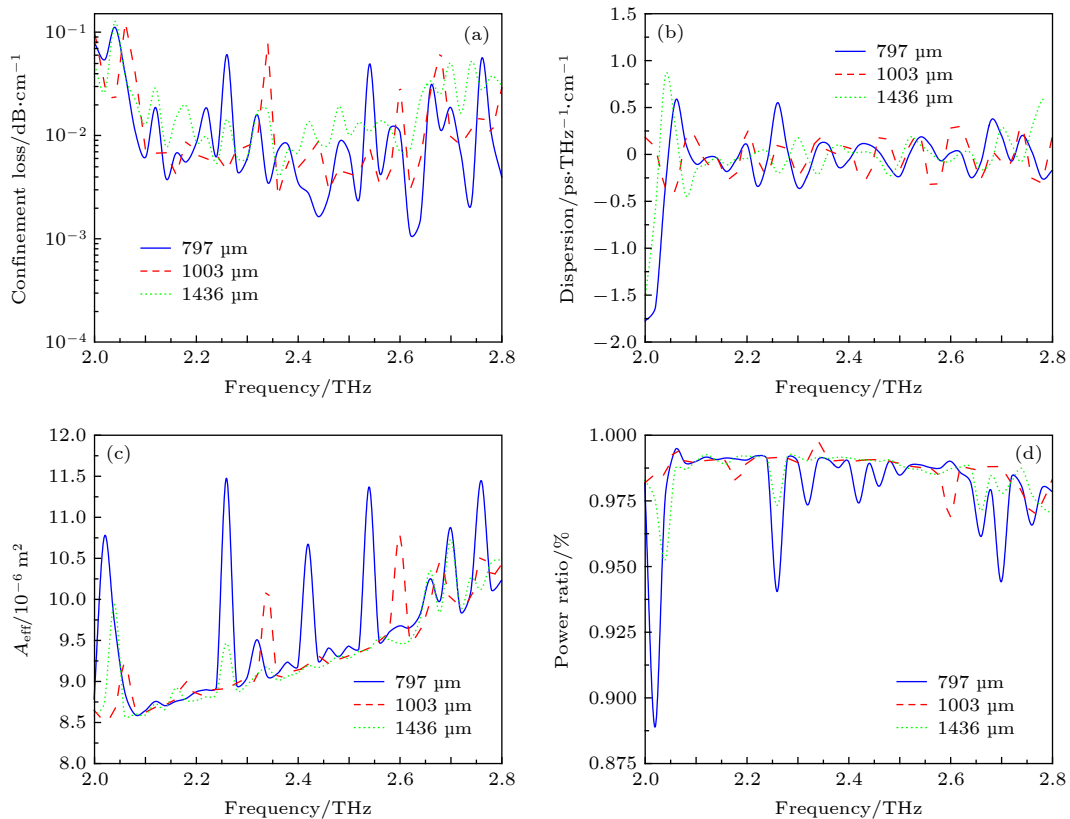


图 8 (a) 限制损耗; (b) 色散特性; (c) 有效模场面积; (d) 纤芯功率比随频率的变化曲线

Fig. 8. (a)confinement loss; (b) dispersion characteristics; (c) effective mode field area; (d) power ratio curve with frequency.

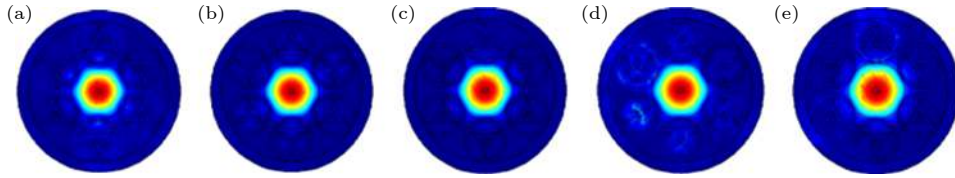


图 9 内弯曲光纤模场在不同频率时的分布 (a) 2.0 THz; (b) 2.2 THz; (c) 2.4 THz; (d) 2.6 THz; (e) 2.8 THz

Fig. 9. The distribution of mode field of internal bending fiber at different frequencies. (a) 2.0 THz; (b) 2.2 THz; (c) 2.4 THz; (d) 2.6 THz; (e) 2.8 THz.

表 1 设计的光纤结构与其他结构的性能对比

Table 1. Performance comparison between the designed optical fiber structure and other structures.

参考文献	光纤结构	频率/THz	纤芯功率比/%	限制损耗/dB·cm <sup>-1</sup>	色散/ps·(THz·cm) <sup>-1</sup>	A <sub>eff</sub> /m <sup>2</sup>
[17]	电介质管包层	0.828		0.16	—	—
[18]	三角形包层	0.21—0.3	95	0.66	—	—
[19]	夹杂金属丝包层	1.0	99	0.000 058	—	—
	直边	2.1—2.8	99	0.005	-0.19—0.19	1.5 × 10 <sup>-6</sup>
本文	外弯曲	2.06—2.62	99	0.003	-0.19—0.19	1.04 × 10 <sup>-6</sup>
	内弯曲	2.22—2.48	99	0.002	-0.02—0.2	1.08 × 10 <sup>-6</sup>

而导致一部分能量被包层所吸收.

半径为 797 μm 时, 光纤的限制损耗在 2.62 THz、2.64 THz 可以达到最低 0.001 dB/cm, 在 2.04 THz 达到最高 0.11 dB/cm. 半径为 1003 μm 时, 限制损耗在 2.36 THz 达到最低 0.002 dB/cm, 比直边时的最低 0.005 dB/cm 下降了 60%, 并在 2.46—2.6 THz 内限制性损耗维持在 0.004 dB/cm 左右, 光纤的限制损耗特性相比较外弯曲的情况得到了有效优化. 半径为 1436 μm 时, 光纤的限制损耗特性变化平缓, 然而在 2.1—2.26 THz、2.4—2.66 THz 范围内均要高于其他两种情况.

如图 8(b) 所示, 当三角形边向内弯曲时, 三种半径情况下的光纤色散特性与三角形外弯曲边相比出现了不同程度的增长, 但半径为 1003 μm 时, 光纤在 2.26-2.38 THz 频段内  $-0.02 \text{ ps}/(\text{THz}\cdot\text{cm}) < \beta_2 < 0.20 \text{ ps}/(\text{THz}\cdot\text{cm})$ , 仍然具有良好的色散特性. 如图 8(c) 所示, 可以看出截取半径为 1003 μm 的圆的弧长作为三角形结构的弯曲边时模场面积并不理想, 在 2.6 THz 取得峰值  $1.08 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ , 这是由于空气孔的变化, 空气层厚度的增加使得芯模与管模两个区域不重叠度升高 [27], 所以模式耦合时太赫兹波可以被有效束缚在纤芯区域中, 限制损耗也相应降低. 综合图 8(d) 纤芯功率比曲线可以发现半径为 1003 μm 时, 光纤在 2.22—2.48 THz 范围内纤芯功率比稳定在 99% 以上, 纤芯区域可以高效传输太赫兹波. 综合上述分析, 选择截取半

径为 1003 μm 圆的弧长作为三角形的弯曲边时, 此光纤有最佳传输性能.

对比分析负曲率光纤嵌套三角形的三种结构, 结果表明三角形边弯曲时的传输性能优于直边的情况, 且三角形边在向内弯曲时比向外弯曲有更好的传输效果. 这是因为在厚度不变的情况下, 弯曲状态下的曲率变化 [32] 导致三角形边长增大, 反射面积得到了有效增长, 且内弯曲状态下形成的反射面比外弯曲更有利于光纤对太赫兹波在光纤内部的抑制耦合作用.

为了进一步说明本文所设计的光纤结构的优越性, 将所设计光纤的参数与已报道的文献进行了对比, 结果如表 1 所示. 对比结果表明, 本文所设计的光纤结构在较高太赫兹频率处的参数优于已经报到的光纤结构, 在基于光泵浦气体太赫兹激光器系统中具有较大的应用潜力.

## 5 总结

设计了嵌套三角形包层结构的新型负曲率光纤, 在对三角形结构厚度优化的基础上采用全矢量有限元法对此负曲率光纤在 2.0—2.8 THz 频段进行数值模拟, 深入分析了光纤的各个传输特性, 光纤在此频段内限制损耗、色散特性、有效模场面积以及纤芯功率比均体现出良好的性能. 结果表明三角形结构厚度为 90 μm 时, 有低损耗、宽带的传

输特性, 限制损耗在 2.36 THz 达到 0.005 dB/cm, 有 2.1—2.8 THz 的传输带宽, 同时在此频段内有较低的色散系数 ( $\pm 0.19$  ps/(THz·cm)), 纤芯功率比也稳定在 99% 以上.

在对负曲率光纤的结构进行优化后, 发现三角形边在向内弯曲时比向外弯曲有更好的传输性能. 特别当截取半径为 1003  $\mu\text{m}$  圆的特定弧长作为弯曲边时, 限制损耗在 2.36 THz 达到了 0.002 dB/cm, 并在 2.46—2.6 THz 范围内限制损耗维持在 0.004 dB/cm 左右, 在此区间内纤芯功率比也稳定在 99% 以上. 负曲率光纤的各项性能分析需要进一步的实验验证, 在未来的研究工作中将通过 3D 打印技术获取此光纤实物进行实验探究. 嵌套三角形包层结构的负曲率光纤将会因低限制损耗、宽传输带宽在传感器以及成像仪<sup>[18]</sup>等领域有重要应用价值.

## 参考文献

- [1] Yan D X, Wang Y Y, Xu D G, Liu P X, Yan C, Shi J, Liu H X, He Y X, Tang L H, Feng J C, Guo J Q, Shi W, Zhong K, Tsang Y H, Yao J Q 2017 *Photon. Res.* **5** 82
- [2] Yan D X, Zhang H W, Xu D G, Shi W, Yan C, Liu P X, Shi J, Yao J Q 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3373
- [3] Li J S, Zouhdi S 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 625
- [4] Li J S, Li H, Zhang L 2015 *IEEE Trans. Thz. Sci. Techn.* **5** 551
- [5] Li J S, Xu D G, Yao J Q 2010 *Appl. Opt.* **49** 4494
- [6] 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
- [7] Li J S 2017 *Opt. Express* **25** 19422
- [8] Li X N, Zhou L, Zhao G Z 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 238101 (in Chinese) [李晓楠, 周璐, 赵国忠 2019 物理学报 **68** 238101]
- [9] Xiong M J, Li J Y, Luo X, Shen X, Peng J G, Li H Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 094204 (in Chinese) [熊梦杰, 李进延, 罗兴, 沈翔, 彭景刚, 李海清 2017 物理学报 **66** 094204]
- [10] Yan D X, Li J S 2019 *Optik* **180** 824
- [11] Chen H B, Wang H, Hou H L, Chen D R 2012 *Opt. Commun.* **285** 3726
- [12] Poletti F 2014 *Opt. Express* **22** 23807
- [13] Habib M S, Bang O, Bache M 2015 *Opt. Express* **23** 17394
- [14] Belardi W, Knight J C 2014 *Opt. Lett.* **39** 1853
- [15] Vincetti L, Setti V, Zoboli M 2010 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22** 972
- [16] Wang Y Y, Coumy F, Roberts P J, Benabid F 2010 *Conference on Lasers and Electro-Optics*, San Jose, California, United States, 16–21 May, 2010, pCPDB4
- [17] Setti V, Vincetti L, Argyros A 2013 *Opt. Express* **21** 3388
- [18] Cruz A L S, Serrao V A, Barbosa C L, Franco M A R, Cordeiro M B C, Argyros A, Tang X L 2015 *J. Microwaves, Optoelectron. Electromagn. Appl.* **14** SL-45
- [19] Sultana J, Islam M S, Cordeiro C M B, Dinovitsner A, Kaushik M, Ng Brian W H, Abbott D 2020 *Fibers* **8** 14
- [20] Yan D X, Zhang H W, Xu D G, Shi W, Yan C, Liu P X, Shi J, Yao J Q 2016 *Journal of Lightwave Technology* **34** 3373
- [21] Zhang G, Sun S, Zhang Y, Sheng Q, Shi W, Yao J Q 2019 *Infrared and Laser Engineering*. **49** 118 (in Chinese) [张果, 孙帅, 张尧, 盛泉, 史伟, 姚建铨 2019 红外与激光工程 **49** 118]
- [22] Liu H, Wang Y, Xu D, et al. 2017 *J. Phys. D Appl. Phys.* **50** 375103
- [23] Wu Z Q, Zhou X Y, Shi Z H, Xia H D, Huang J, Jiang X D, Wu W D 2016 *Opt. Eng.* **55** 037105
- [24] Habib M A, Anower M S, Abdulrazak L F, Reza M S 2019 *Opt. Fiber Technol.* **52** 101933
- [25] 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]
- [26] Zhang L, Ren G J, Yao J Q 2013 *Optoelectron. Lett.* **9** 438
- [27] Chen X, Hu X W, Li J Y 2019 *Laser & Optoelectronics Progress* **56** 050602 (in Chinese) [陈翔, 胡雄伟, 李进延 2019 激光与光电子学进展 **56** 050602]
- [28] Wu Z Q, Shi Z H, Xia H D, Zhou X Y, Deng Q H, Huang J, Jiang X D, Wu W D 2016 *IEEE Photon. J.* **8** 1
- [29] Bikash K P, Kawsar A 2019 *Opt. Fiber Technol.* **53** 102031
- [30] Cui L, Zhao J L, Zhang X J, Yang D X 2008 *Acta Optica Sinica* **28** 1172 (in Chinese) [崔莉, 赵建林, 张晓娟, 杨德兴 2008 光学学报 **28** 1172]
- [31] Jiang J J, Kong D P, Ma T, He X Y, Chen Q, Wang L L 2014 *Infrared and Laser Engineering* **43** 1909 (in Chinese) [姬江军, 孔德鹏, 马天, 何晓阳, 陈琦, 王丽莉 2014 红外与激光工程 **43** 1909]
- [32] Belardi W, C. Knight J 2013 *Opt. Express* **21** 21912



# Research on negative curvature terahertz fiber based on nested triangle structure cladding\*

Meng Miao<sup>1)2)</sup> Yan De-Xian<sup>1)2)†</sup> Li Jiu-Sheng<sup>1)2)</sup> Sun Shuai<sup>3)</sup>

1) (*Key Laboratory of Electromagnetic Wave Information Technology and Metrology of Zhejiang Province, College of Information Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

2) (*Centre for THz Research, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China*)

3) (*College of Precision Instrument and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

( Received 27 March 2020; revised manuscript received 15 May 2020 )

## Abstract

In the terahertz communication and imaging systems, terahertz fibers have aroused great interest in the past several years. Countering the terahertz wave applications ‘inefficient transmission’ calls for a rapid development in terahertz fibers that could achieve low confinement loss, chromatic dispersion and large refraction of power at the same time. In this paper, a new type of negative curvature terahertz fiber is designed, which consists of six cladding tubes evenly distributed in the cladding and nested with equilateral triangle structure. By using full vector finite element method and changing the thickness of cladding tube and triangle, the effective mode field area, core power ratio, confinement loss, dispersion and other parameters of negative curvature fiber are studied. Here, the thickness range of 70–100  $\mu\text{m}$  is selected. It is found that the confinement loss of optical fiber can reach 0.005 dB/cm at 2.36 THz, the dispersion coefficient can float up and down at  $\pm 0.1$  ps/(THz·cm) at the frequency range of 2.1–2.8 THz, the core power ratio can reach above 99% in the same frequency range. Compared with the known terahertz negative curvature fiber, the nested triangle negative curvature fiber has lower confinement loss and wide transmission bandwidth of 2.1–2.8 THz. After that, when the cladding tube and the triangle thickness are kept at 90  $\mu\text{m}$ , the bending degree of the triangle edge is changed, and the above properties are further studied. When the triangle edge is bent in and out, the transmission performance of the fiber is analyzed. It is found that when the triangle edge is bent inward, the transmission characteristics of terahertz wave is much better than that when the triangle edge is bent outward. When the triangle edge is bent inwards, the confinement loss is obviously reduced, reaching 0.002 dB/cm at 2.36 THz. Compared with triangle straight edge, the confinement loss is reduced by 40% and still maintaining 99% core power ratio at certain frequency band. The designed terahertz fiber will have an important application value in the fields of sensing and imaging systems with low loss and wide bandwidth. This makes the Topas COC-based terahertz fiber very suitable for guiding terahertz wave over the desired frequency range.

**Keywords:** terahertz fiber, confinement loss, power ratio, dispersion

**PACS:** 78.20.Ci, 87.50.U–, 42.81.Qb

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200457

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61871355, 61831012) and the Natural Science Foundation of Zhejiang province, China (Grant Nos. LQ20F010009, LY18F010016).

† Corresponding author. E-mail: [yandexian1991@cjlu.edu.cn](mailto:yandexian1991@cjlu.edu.cn)