

用于太赫兹波传输的低损耗、 高双折射光纤研究*

付晓霞 陈明阳[†]

(江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

(2010年7月27日收到; 2010年9月20日收到修改稿)

提出了一种同时具有低吸收损耗、高双折射特性的新型太赫兹传输光纤. 光纤由层状的聚四氟乙烯和空气层组成. 采用有限元法分析了光纤的结构参数对其吸收损耗和双折射的影响. 结果表明: 这种光纤的双折射可高达 0.08; 在保证模式的吸收损耗小于 20 dB/m 的前提下, 其双折射仍可大于 0.02.

关键词: 太赫兹传输, 吸收损耗, 双折射, 有限元法

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Gs, 42.81.Dp

1. 引言

太赫兹 (THz) 波是指频率在 0.1—10 THz (波长为 30—3000 μm) 范围内的电磁波 ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). 近几年来, 飞秒激光技术的发展和成熟为 THz 波脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源, 使 THz 辐射的机理研究、检测技术和应用技术得到蓬勃发展.

太赫兹波极易被介质材料吸收, 对于 THz 波的传输来说, 限制其传输损耗的一个关键因素就是材料对 THz 波的本征吸收. 目前常用的太赫兹光纤制作材料的吸收损耗一般在几十 dB/m 到几百 dB/m 之间. 减小材料的吸收损耗的一种方法是采用新型的光子晶体光纤结构, 如多孔光纤^[1,2] 或空芯光子晶体光纤^[3-5]. 其基本思想都是通过光纤中引入空气孔, 以降低太赫兹波分布在基质材料中的比例, 从而减少材料对光的吸收. 采用光子晶体光纤结构, 人们已经获得了吸收损耗仅为几 dB/m 的低损耗太赫兹光纤.

具有高双折射特性的单模光纤由于可以保持光的偏振态、减小偏振光之间的耦合, 在光信号检测与处理等领域有着重要的应用. 因此, 人们也开展了传输太赫兹波的高双折射光纤的研究. 采用光

子晶体光纤结构, 可以很容易获得具有高双折射的太赫兹光纤. 如纤芯由两个实芯棒组成的高双折射太赫兹光纤^[6], 其双折射可达 0.021. 但由于光主要是在基质材料中传输, 其吸收损耗无法降低. 因此, 这种结构的实用性较差. 文献[7]报道了一种基于矩形孔结构的高双折射多孔光纤, 其双折射可达 0.012. 但其吸收损耗过大, 仍然不适于较长距离的太赫兹传输. 据我们所知, 目前同时具有低吸收损耗和高双折射特性的太赫兹光纤尚未见报道. 本文提出一种新型的太赫兹传输光纤, 由层状的聚四氟乙烯和空气层组成, 并用圆形管子组成固定结构. 此结构可以很容易实现高双折射, 同时, 其特殊的光纤结构还可以有效地减少材料对太赫兹波的吸收.

2. 层状光纤的基本结构与计算方法

这里取光纤的基质材料为聚四氟乙烯, 其吸收损耗为 130 dB/m, 材料折射率为 1.5^[2], 空气折射率为 1. 传输的太赫兹波为 1 THz. 层状结构光纤的截面模型如图 1 所示, 光纤由周期性排布的层状的聚四氟乙烯和空气层交替排布而成, 并通过外侧的聚四氟乙烯圆管组成稳定结构. 这种光纤的传光原理与多孔光纤类似: 高折射率的材料和低折射率的

* 国家自然科学基金 (批准号: 10904051) 和中国博士后科学基金 (批准号: 200902505) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: miniyong@163.com

空气层组成等效的纤芯部分,因此其等效折射率大于其包层,即光纤外侧的空气中的折射率.空气层的引入使太赫兹波进入光纤后有部分能量在空气中传输,从而减小光在材料中的比例,降低其吸收损耗.由于纤芯的折射率分布具有二阶对称性,因此,光纤具有双折射特性.光纤的主要结构参数为:层状聚四氟乙烯的厚度 d ,相邻层之间的间距(层周期) Λ ,环形管的宽度(环宽) a ,圆管的外直径(光纤直径) c .

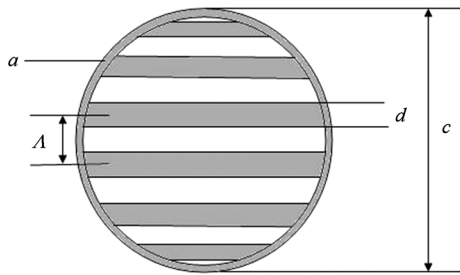


图1 光纤截面图,其中白色区域为空气,灰色区域为基质材料

我们采用有限元法^[8-10]分析层状光纤的传输特性.根据光纤结构的对称性,我们仅需对其1/4结构进行计算,有限元网格的数量在20000左右.光纤外侧设置理想匹配层(perfect matched layer, PML)边界条件^[11,12],如图2所示.PML层与纤芯中心的间距为650 μm ,PML层的厚度取为50 μm .PML层的作用是将辐射到光纤边界上的能量吸收掉,减少能量在边界的反射.求解得到光纤的模式以后,由模式的有效折射率可以获得光纤的双折射.其计算公式为^[13]

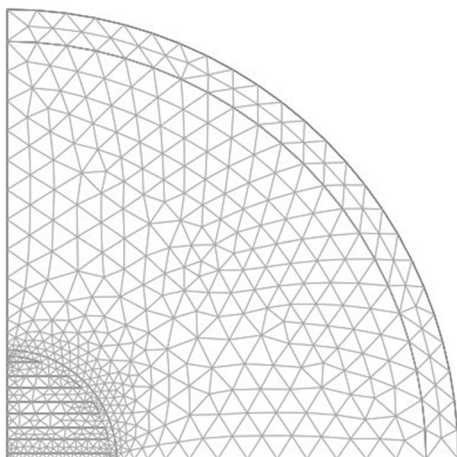


图2 有限元法计算时的光纤网格划分示意图

$$B = |n_x - n_y|, \quad (1)$$

其中, n_x 是 x 偏振模的有效折射率, n_y 是 y 偏振模的有效折射率.

通过计算模式场在材料和空气中的比例并根据光纤基质材料的吸收损耗可以获得模式的吸收损耗,即模式的吸收损耗为

$$L = \frac{q}{w} \times \alpha \text{ (dB/m)}, \quad (2)$$

其中, L 是吸收损耗, q 是指在光纤材料中传输的能量, w 是太赫兹波的总能量, α 是材料的吸收损耗.

3. 层状光纤的模场分布及特点

图3给出了周期 $\Lambda = 20 \mu\text{m}$,层厚度 $d = 10 \mu\text{m}$,环宽 $a = 10 \mu\text{m}$,圆管直径 $c = 340 \mu\text{m}$ 时层状光纤的基模场强分布.由图看出, x 偏振模在空气层和材料层中的场强分布具有连续性,而 y 偏振模主要集中在空气层中传输.因此 x 偏振模的吸收损耗比 y 偏振模的吸收损耗大.事实上,根据计算得到的模场分布,再由(2)式可得 x 偏振模的吸收损耗为58.9 dB/m,而 y 偏振模的吸收损耗为35 dB/m.两偏振模的吸收损耗虽然仍然较大,但与材料本身的吸收损耗相比,已有较大的下降.由于两个偏振模的场强分布具有较大的差异,这就有利于光纤获得高双折射.例如,这种光纤的 x 和 y 偏振模的有效折射率分别为1.175和1.098.由(1)式,可知其双折射 $B = 0.077$.在光波段,曾有人用三层具有不同折射率的材料组成具有二阶对称性的纤芯结构^[14],但其双折射也仅为0.018左右.据我们所知,目前还没有其他太赫兹传输光纤可以达到如此高的双折射.

4. 层状光纤参数分析

4.1. 光纤外环宽度的分析

我们首先分析环宽对光纤传输特性的影响.这里取周期 $\Lambda = 20 \mu\text{m}$,材料厚度 $d = 5 \mu\text{m}$,圆管直径 $c = 340 \mu\text{m}$.图4给出了光纤基模的吸收损耗和双折射随环宽变化的曲线.

由图可知,吸收损耗随着环宽的增大而增大,其原因是环宽增大后,光在材料中的比例增加,从而导致吸收损耗的增加.而双折射则有一个最优值,过大或过小的环宽都会导致双折射的下降.需要注意的是,环宽对双折射的影响并不大.例如,图

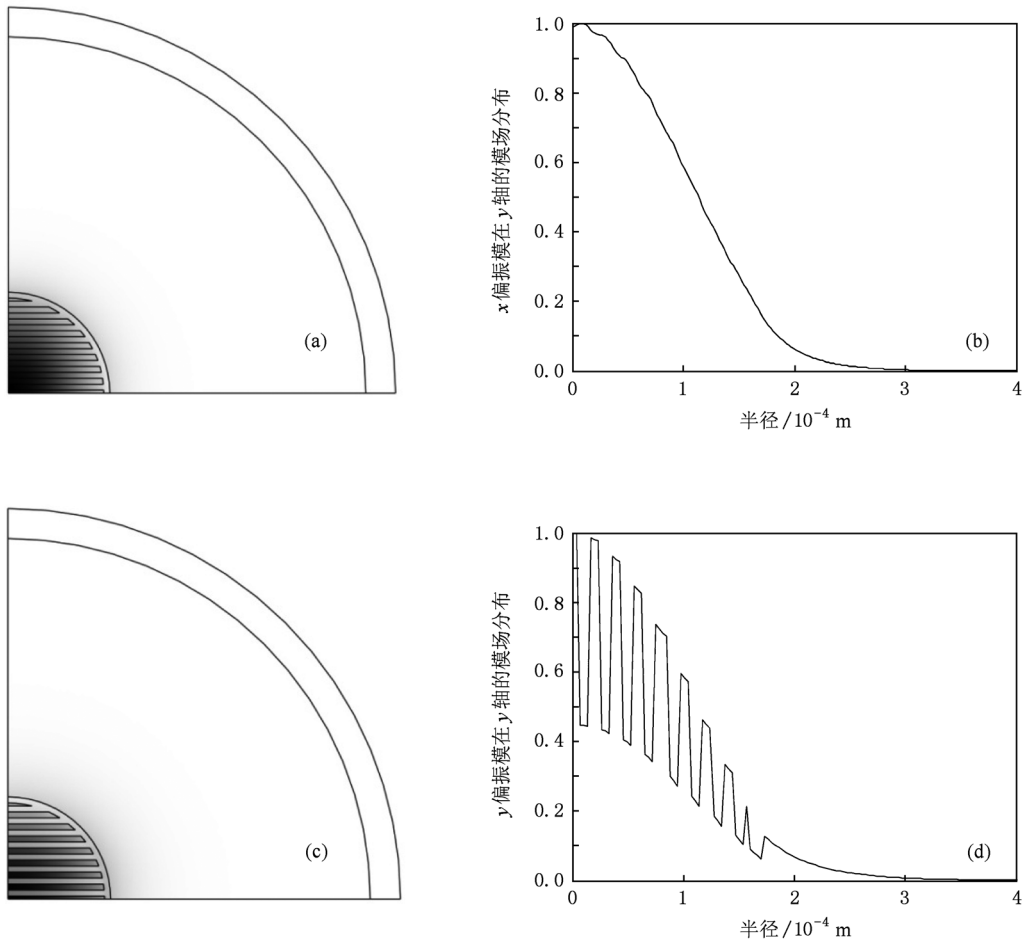


图3 层状光纤模场分布图 (a) x 偏振模的二维模场分布图; (b) x 偏振模在 y 轴上的模场分布; (c) y 偏振模的二维模场分布图; (d) y 偏振模在 y 轴上的模场分布

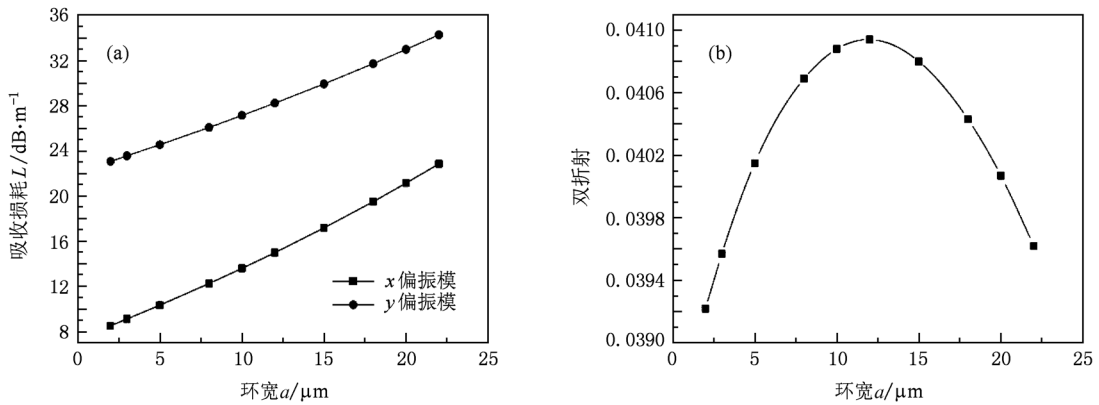


图4 光纤的吸收损耗、双折射与环宽的关系曲线 (a) 吸收损耗; (b) 双折射

中所示双折射的最大值与最小值之间仅为 0.0017. 因此,环宽将主要影响光纤的吸收损耗. 图 5 给出了环宽 $a = 30 \mu\text{m}$ 时光纤的基模模场分布图. 由图可见,当环宽很宽时,能量将向环形区域集中. 显然,

这样会增大模式的吸收损耗;同时,两个偏振模的差别也会减小,从而导致光纤双折射的减小. 因此,从损耗和双折射角度考虑,环宽应取得小一点. 但另一方面,环宽太细会导致光纤的制作困难,同时

在实际使用时的机械性能较差. 综合考虑, 我们在后面的分析中取环宽 $a = 10 \mu\text{m}$.

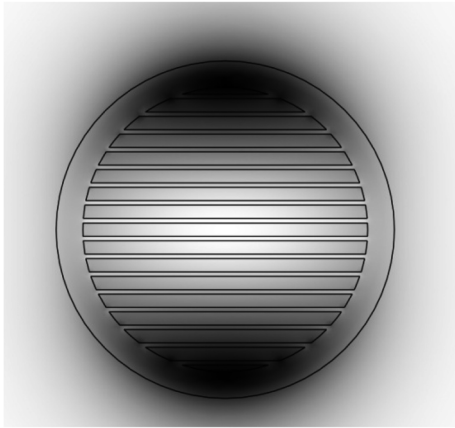


图5 环宽 $a = 30 \mu\text{m}$ 时光纤的基模场分布图

4.2. 纤芯结构分析

下面我们考察在层周期固定的情况下, 材料层的厚度变化对模式特性的影响. 图6给出了当环宽 $a = 10 \mu\text{m}$, 圆管直径 $c = 340 \mu\text{m}$ 时, 不同周期下材料层厚度与模式损耗的关系曲线. 显然, 材料层越厚, 模式的传输损耗也会越大, 这是因为材料层的增厚使光在材料中传输的比例提高, 从而使传输损耗增加. 另一方面, 光纤的双折射随材料层厚度的增加是先增大, 达到极值后, 又开始减小, 如图7所示.

我们知道, 层状光纤的双折射主要来源于由材料层和空气层组成的具有二阶对称性的纤芯结构. 显然, 材料层过薄或过厚都会导致两偏振模的场分布差别变小, 从而使其双折射变小. 从图7可知, 不同周期下, 光纤的最大双折射值是相近的, 都在0.08左右, 这个值远大于之前报道的光纤的双折射^[6,7,14]. 同时我们还发现, 不同周期下, 在光纤的双

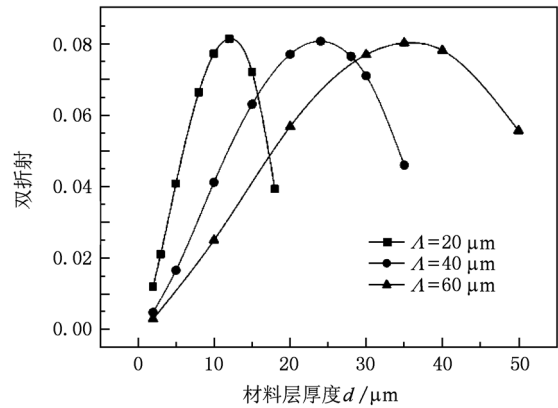


图7 光纤的双折射与材料层厚度的关系曲线

折射为最大时, 对应的模式的吸收损耗也是相近的. 表1给出了不同周期下, 光纤的最大双折射和对应的模式的吸收损耗. 这一现象同样可以根据光纤的传光原理来解释: 当层周期尺寸远小于传输波长时, 纤芯可以等效为具有单一折射率的均匀纤芯, 即将光纤等效为一阶跃型光纤. 若圆形管不存在, 则 x 和 y 偏振模传输时对应的纤芯的等效折射率 n_x 和 n_y 可以表示为^[15]

$$n_x = \left[\sqrt{f/n_{\text{air}}^2 + (1-f)/n_{\text{mat}}^2} \right]^{-1},$$

$$n_y = \sqrt{fn_{\text{air}}^2 + (1-f)n_{\text{mat}}^2}, \quad (3)$$

其中 n_{air} 是空气的折射率, n_{mat} 表示聚四氟乙烯材料的折射率, f 是光纤内部的空气总面积占整个光纤横截面 (不包括圆形管) 总面积的比例, 即空气占空比.

表1 不同周期下, 光纤的最大双折射和对应的模式吸收损耗

周期(Λ) / μm	空气占空 比(f)/%	最大双 折射	吸收损耗/ $\text{dB}\cdot\text{m}^{-1}$	
			x 偏振模损耗	y 偏振模损耗
20	39.65	0.0814	71.929	46.748
40	38.44	0.0807	72.813	47.762
60	40.32	0.0802	71.604	46.618

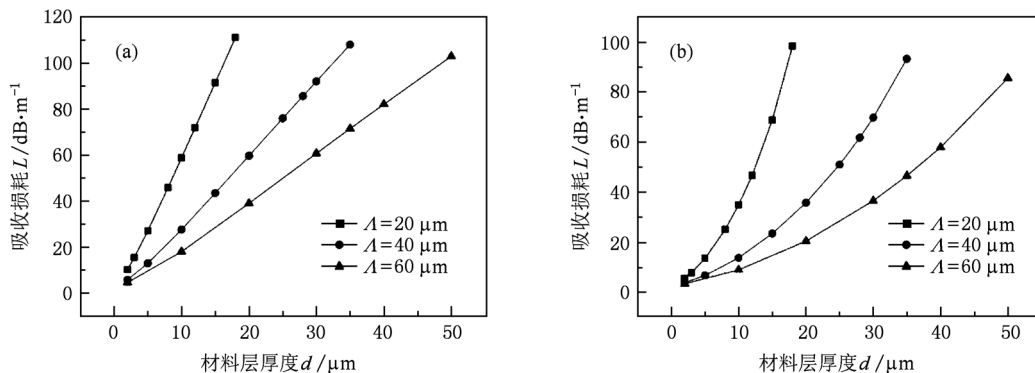


图6 光纤的吸收损耗随材料层厚度变化的曲线图 (a) x 偏振模; (b) y 偏振模

这里选取的材料层周期仅为 20, 40 和 60 μm , 满足层周期远小于传输波长 (300 μm) 的要求. 由 (3) 式可知, 在光纤材料确定的情况下, 两种偏振状态下的纤芯等效折射率仅取决于空气占空比 f . 利用 (3) 式可以求出 $n_x - n_y$ 达到最大值时的空气占空比值, 因为式中 n_{air} 和 n_{mat} 的大小已知, 通过求导计算可以得出, 当 $f = 44.84\%$ 时, x 与 y 偏振模传输时纤芯的等效折射率相差最大. 因此, 此时光纤的双折射也达到最大值. 实际计算结果如表 1 所示, 可见, 不同层周期光纤的双折射达到最大值时的空气占空比 f 与理论值 44.84% 非常接近. 其偏差主要是由于圆形管的引入而导致的. 由表 1 可知, 即便材料层周期不同, 在理想情况下, 只要其空气占空比相同, 则它们都可以等效为相同参数的阶跃型光纤. 因而其双折射和吸收损耗也相同. 由于圆管等非对称结构的引入, 不同周期时, 相同空气占空比情况下的结果略有不同, 但相差很少. 为了制作的方便, 一般可选择较大的层周期, 从而减少材料层的数量, 增大材料层的厚度. 如实际应用时要求模式的吸收损耗较低, 则可取较小的材料层厚度. 由图 6 和图 7 可知, 当两偏振模的吸收损耗均小于 20 dB/m 时, 仍

可保证光纤具有大于 0.02 的高双折射. 例如, 层周期 $\Lambda = 60 \mu\text{m}$, 层厚度 $d = 10 \mu\text{m}$, 环宽 $a = 10 \mu\text{m}$, 直径 $c = 340 \mu\text{m}$ 时, x 偏振模在光纤中的吸收损耗为 18.07 dB/m, y 偏振模的吸收损耗为 9 dB/m, 此时光纤的双折射为 0.025.

4.3. 色散分析

已经有相关文献对基于光子晶体光纤结构的太赫兹光纤的色散特性进行了分析^[16-18], 并证明通过对光纤结构参数的调整, 可实现零色散传输. 与普通光纤类似, 太赫兹光纤的总色散由材料色散和波导色散组成. 在频率为 0.1 THz 到 2 THz 范围内, 聚四氟乙烯的折射率基本为常数, 其材料色散对于总色散的贡献非常小, 可以忽略^[19]. 因此层状光纤的总色散可直接用波导色散表示为

$$D = \frac{d^2\beta}{d\omega^2}. \quad (4)$$

图 8 给出了环宽 $a = 10 \mu\text{m}$, 圆管直径 $c = 340 \mu\text{m}$ 时, 层状光纤在不同层周期和层厚度下的色散曲线. 由图 8 可见, 由于 x 和 y 偏振模的模场分布不同, 两者的色散曲线也有差别. 同时, 由于频率低

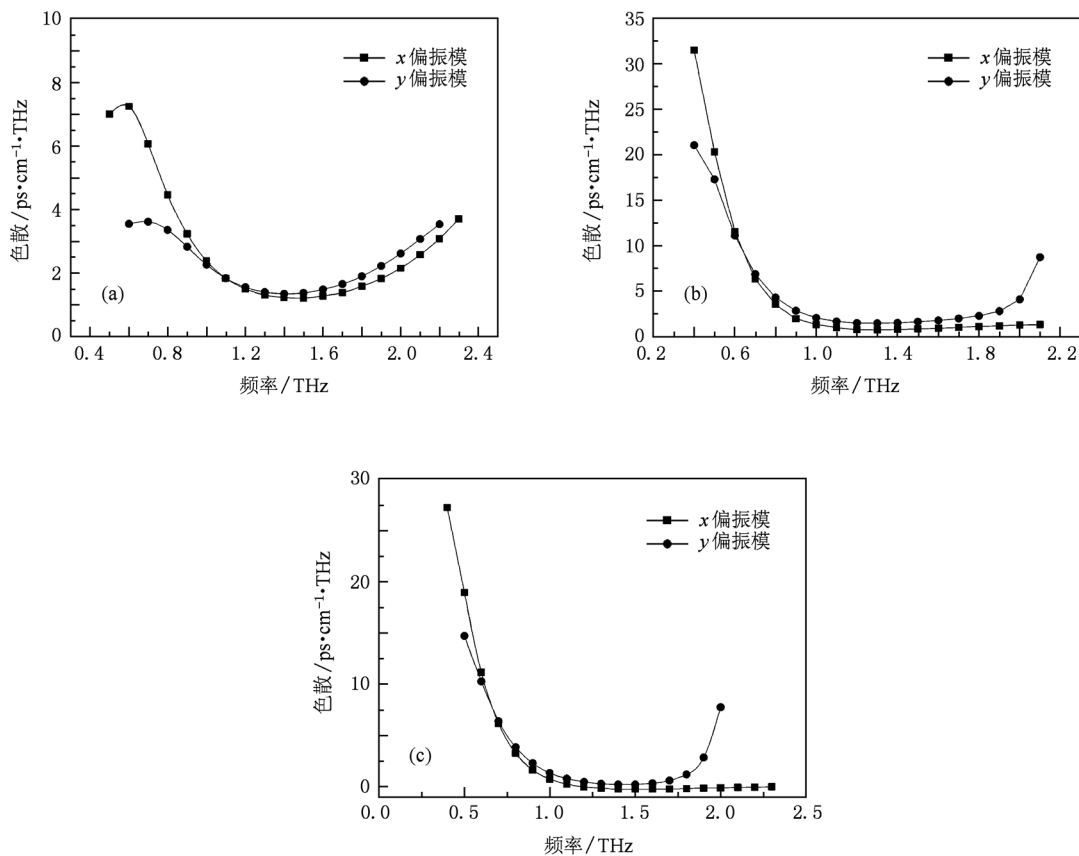


图 8 层状光纤的色散随频率的变化曲线 (a) $\Lambda = 60 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda = 60 \mu\text{m}$, $d = 35 \mu\text{m}$; (c) $\Lambda = 20 \mu\text{m}$, $d = 10 \mu\text{m}$

时太赫兹波能量将向包层扩展,而频率过高时太赫兹波将向聚四氟乙烯材料区集中,因此在低频或高频端色散都会增大.但在适当的频率区间,获得低色散传输是可能的.例如,当层周期 $\Lambda = 60 \mu\text{m}$,层厚度 $d = 10 \mu\text{m}$ 时,光纤在 1.2—1.6 THz 的频率区间内, x 和 y 偏振模的色散值均小于 $1.5 \text{ ps} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{THz}$.而当层周期 $\Lambda = 60 \mu\text{m}$, $d = 35 \mu\text{m}$ 时,在 1—1.9 THz 的频率范围内,其 x 和 y 偏振模的色散值均小于 $2.5 \text{ ps} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{THz}$,并且 x 偏振模的色散最小值为 $0.7 \text{ ps} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{THz}$.与图 8(a) 比较,图 8(c) 只改变了层周期 Λ 的值,其色散值却有所减小,其 x 偏振模的色散在频率 1—2 THz 范围内基本接近于零,且其 y 偏振模在 1—1.6 THz 时的色散值均小于 $0.6 \text{ ps} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{THz}$.因此,虽然层状光纤的双折射与材料层的周期无关,但材料层的周期会影响到光纤的色散.在需要同时具有低色散和高双折射的场

合,需要综合考虑,以选择合适的周期值.由以上分析可知,与光子晶体光纤类似,通过调整光纤的层周期和层厚度,就可以对光纤的色散进行调节.

5. 结 论

提出了一种新型的太赫兹传输光纤.采用层状结构获得了高双折射,同时有效降低了模式的吸收损耗.结果表明:光纤的双折射和吸收损耗仅取决于空气占空比,而与材料层的周期无关.这种光纤的双折射最大值可达到 0.08.减小材料层的厚度,可以有效地降低模式的吸收损耗,从而保证光纤在低吸收损耗的前提下,双折射仍可以达到 0.02 以上.另外,我们还发现,可以通过改变光纤结构参数来获得低色散传输.

- [1] Atakaramians S, Afshar V S, Fischer B M, Abbott D, Monro T M 2008 *Opt. Express* **16** 8845
- [2] Hassani A, Dupuis A, Skorobogatiy M 2008 *Opt. Express* **16** 6340
- [3] Lu J Y, Yu P C, Chang H C, Chen H W, Li Y T, Pan C L, Sun C K 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 064105
- [4] Vincetti L 2009 *Opt. Fiber Technol.* **15** 398
- [5] Vincetti L 2010 *Opt. Commun.* **283** 979
- [6] Cho M, Kim J, Park H, Han Y, Moon K, Jung E, Han H 2008 *Opt. Express* **16** 7
- [7] Atakaramians S, Afshar V S, Ebdorff-Heidepriem H, Nagel M, Fischer B M, Abbott D, Monro T M 2009 *Opt. Express* **17** 14053
- [8] Selleri S, Vincetti L, Cucinotta A, Zoboli M 2001 *Opt. Quantum Electron* **33** 359
- [9] Wang J, Lei N G, Yu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 0946 (in Chinese) [王 健、雷乃光、余重秀 2007 物理学报 **56** 0946]
- [10] Meng J, Hou L T, Zhou G Y, Gao F, Yuan J H, Wei D B 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3779
- [11] Franco M A R, Serrão V A, Sircilli F 2007 *IEEE Photon. Techn. Lett.* **19** 1738
- [12] Pureur V, Bouwmans G, Bigot L, Perrin M, Douay M, Quiquempois Y 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 3589
- [13] Suzuki K, Kubota H, Kawanishi S, Tanaka M, Fujita M 2001 *Opt. Express* **9** 676
- [14] Wang A, George A K, Liu J F, Knight J C 2005 *Opt. Express* **13** 5988
- [15] Steel M J, Osgood R M 2001 *J. Lightwave Technol.* **19** 495
- [16] Sun Y 2007 *MS Thesis* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [孙 悦 2007 硕士学位论文(北京:北京交通大学)]
- [17] Huang B 2009 *MS Thesis* (Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications) (in Chinese) [黄 滨 2009 硕士学位论文(南京:南京邮电大学)]
- [18] Jiang Y J, Shi W H, Li P L, Zhao Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5559 (in Chinese) [姜跃进、施伟华、李培丽、赵 岩 2010 物理学报 **59** 5559]
- [19] Miao P 2006 *MS Thesis* (Beijing: Beijing Jiaotong University) (in Chinese) [缪 萍 2006 硕士学位论文(北京:北京交通大学)]

Terahertz transmission optical fiber with low absorption loss and high birefringence^{*}

Fu Xiao-Xia Chen Ming-Yang[†]

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

(Received 27 July 2010; revised manuscript received 20 September 2010)

Abstract

A novel terahertz transmission optical fiber with low absorption loss and high birefringence is proposed. The proposed fiber is composed of alternate teflon and air-hole layers to form a two-fold symmetry configuration. Using the finite element method, the dependences of absorption loss and birefringence on the configuration parameter of the fiber are presented. The numerical results show that the birefringence can reach as large as 0.08. In addition, when the mode absorption loss is less than 20 dB/m, the birefringence can still be larger than 0.02.

Keywords: terahertz transmission, absorption loss, birefringence, finite-element method

PACS: 42.81.Qb, 42.81.Gs, 42.81.Dp

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10904051) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 200902505).

[†] Corresponding author. E-mail: miniyong@163.com