

# 新型 THz 微结构传输光纤的仿真设计

顾 达,施伟华

(南京邮电大学 光电工程学院,江苏 南京 210023)

**摘 要:**近几年,太赫兹 (THz) 波及其相关技术的研究逐渐成为热点,因此寻找一种低损耗、近零平坦色散的 THz 波导成为研究的目标。文中运用全矢量有限元法,并利用 COMSOL 软件设计了一种新型 THz 波光子晶体光纤,其包层的孔间距恒定、各层孔直径变化;对所设计的新 THz 光子晶体光纤的损耗、色散特性进行数值计算与优化。计算结果表明,这种 THz 光子晶体光纤工作在  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  ( $2.1 \sim 2.3 \text{ THz}$ ) 之间时,损耗值低于  $0.06 \text{ dB/km}$ ,色散值在  $0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  到  $0.27 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  之间,色散斜率为  $0.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^2)$ ,可以实现长距离、高性能 THz 波传输。

**关键词:**太赫兹;光子晶体光纤;低损耗;近零平坦色散

中图分类号:TN252

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2015)02-0230-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2015.02.052

## Simulation Design of New THz Microstructure Optical Fiber

GU Da,SHI Wei-hua

(College of Optoelectronic Engineering,Nanjing University of Posts and  
Telecommunications,Nanjing 210023,China)

**Abstract:**In recent years,THz and its related technologies has become a hot research,so a kind of THz waveguide with low loss,nearly zero and flat dispersion attracts wide attention and research interest. A new type of THz photonic crystal fiber is designed with full vector Finite Element Method (FEM),in which the hole spacing of its package layer is constant,hole diameter of each layer is changing. Its loss and dispersion characteristics is calculated and optimized. The results show that the loss value is lower than  $0.06 \text{ dB/km}$ ,the dispersion value is between  $0.2 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  to  $0.27 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ ,the dispersion slope is  $0.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^2)$  when this kind of THz photonic crystal fiber works between  $130 \mu\text{m}$  and  $140 \mu\text{m}$  ( $2.1 \text{ THz}$  to  $2.3 \text{ THz}$ ),the PCF can transmit with high performance and long distance.

**Key words:**TeraHertz (THz);Photonic Crystal Fiber (PCF);low loss;nearly zero and flat dispersion

## 0 引 言

太赫兹波<sup>[1-3]</sup>(TeraHertz,THz)是一种频率在  $0.1 \sim 10 \text{ THz}$ (波长在  $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$ )之间的电磁波,处于毫米波与红外辐射之间。随着 THz 技术的快速发展,研究人员对 THz 器件的关注也越来越多。波导在 THz 的传输系统中占很重要的地位,人们迫切需要损耗、色散都低的传输波导。光子晶体光纤<sup>[4]</sup>与其他波导相比,具有更多优良的特性,如低损耗、色散可控、能够实现无截止单模传输、高双折射等。正因为这些特性,研究人员开始对太赫兹波光子晶体光纤进行研究。

2002 年,H. Han 等用实验验证了一款塑料 PCF,它可用于单模传输亚皮秒 THz 脉冲。此 PCF 采用高密度聚乙烯管和细丝制作而成,在  $0.1 \sim 3 \text{ THz}$  范围

内,具有低损耗和相对较低的色散<sup>[5]</sup>。2004 年,Masa-hiro Goto 等报道了 THz 频段的保偏波导:聚四氟乙烯 PCF,其具有相对低的损耗系数,可用于构成相对较长、易于制备的、偏振无变化的光纤波导<sup>[6-8]</sup>。2009 年,Kristian Nielsen<sup>[9]</sup>等报道了一种能够在低损耗条件下传输 THz 波的聚合物 PCF,他们使用环烯烃共聚物 Topas,获得了可弯曲 THz 光纤,它在 THz 区域具有其他材料从未达到的低损耗和材料色散。2011 年,付晓霞<sup>[10]</sup>等设计出一种同时具有低吸收损耗和高双折射特性的新型太赫兹传输光纤。在保证模式的吸收损耗小于  $20 \text{ dB/m}$  的前提下,其双折射仍可大于  $0.02$ 。2011 年,白晋军<sup>[11]</sup>等提出了一种低损耗、宽频段、高双折射太赫兹光子带隙光纤,类矩形纤芯太赫兹光子带

收稿日期:2014-03-17

修回日期:2014-06-24

网络出版时间:2014-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61275067);江苏省高校自然科学研究项目(12KJB510018)

作者简介:顾 达(1989-),男,硕士研究生,研究方向为光通信与光信息处理;施伟华,副教授,研究方向为光通信与光信息处理。

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20141227.1347.033.html>

隙光纤的损耗小于  $0.009\text{ cm}^{-1}$ ,相双折射在  $10^{-3}$  数量级。2013 年,王豆豆<sup>[12]</sup>等以聚合物材料 Topas 环烯烃类共聚物(Topas COC)为基材,设计了一种带隙型太赫兹聚合物光子晶体光纤。该光纤通过缺失包层结构中四个近邻的亚波长空气孔,形成了近菱形的二重对称空气芯,可以基于光子带隙效应将太赫兹波束缚在聚合物光子晶体光纤的空气芯中传输。这一系列的研究都展现出 PCF 在传输 THz 波方面有着很大的优势,但是这些研究都存在一定的不足,即:没有综合考虑损耗、色散特性,损耗低的时候,色散比较高,色散低的时候,损耗又比较高,没有使得损耗和色散达到一个比较好的平衡点。

文中所设计的 PCF,通过仿真结果表明:在  $130\sim 140\text{ }\mu\text{m}$ ( $2.1\sim 2.3\text{ THz}$ )时,可以实现低损耗、近零平坦色散的传输特性,对太赫兹波导的研究有一定的参考价值。

1 结构设计与仿真

文中运用全矢量有限元法<sup>[13]</sup>(Finite Element Method,FEM),利用 COMSOL Multiphysics 软件的射频模块并结合 Matlab 对所设计的 PCF 的特性进行分析和计算。

先对相同孔径结构、渐变孔径结构以及文中所设计的孔间距恒定、各层孔直径变化的光纤结构的特性进行了对比分析,这三种光纤结构如图 1 所示。

图 1 中,  $\Lambda$  为空气孔间距,三种结构都固定  $\Lambda = 220\text{ }\mu\text{m}$ , $d_1$  为第一层空气孔直径, $d_2$  为第二层空气孔直径, $d_3$  为第三层空气孔直径, $d_4$  为第四层空气孔直径。

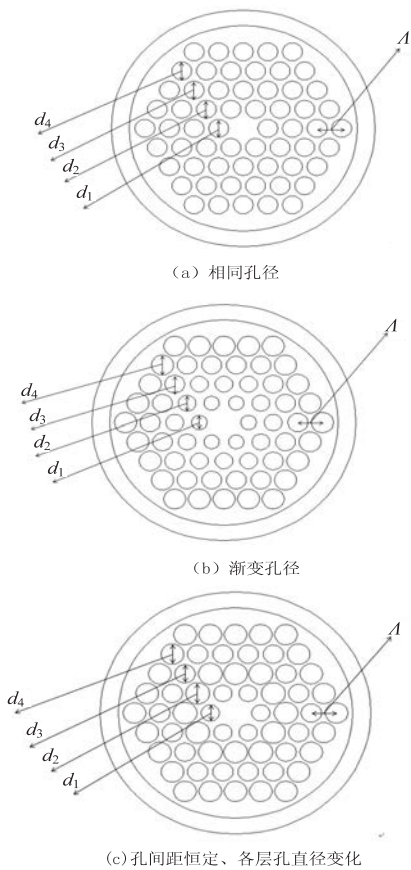


图 1 三种 THz 波光子晶体光纤结构示意图

光纤基底材料为聚乙烯,折射率取 1.53;气孔填充材料为聚四氟乙烯,折射率取 1.37。为传输太赫兹波,光子晶体光纤的周期性结构尺寸应该和波长在一个数量级,因此这种光纤的孔径大小约为几百微米,光纤的包层外径在毫米数量级<sup>[14]</sup>。对上述三种结构进行仿真分析,得到的传输特性如图 2 所示。

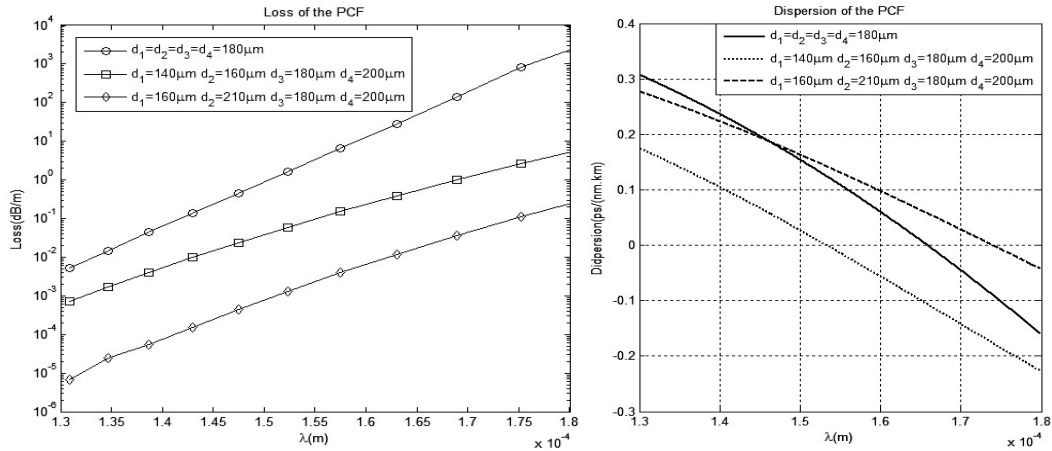


图 2 三种结构的损耗、色散特性比较图

从图 2 可以看出,文中所设计的包层孔间距恒定、各层孔直径变化的结构的损耗比相同孔径结构和渐变孔径结构的损耗小很多,色散也更加平坦,色散值相差不大,所以文中所设计的结构更加适合应用于太赫兹波传输。

为了研究所设计的太赫兹波光子晶体光纤的损耗、色散特性随结构参数的变化规律,通过大量的仿真运算来发现各个参数对损耗和色散特性的影响。文章所用光纤材料为聚乙烯和聚四氟乙烯,它们对太赫兹波的吸收接近于零,从而可以忽略吸收损耗。文章所

设计的光纤工作波段是  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  ( $2.1 \sim 2.5 \text{ THz}$ ), 在这个波段下由瑞利散射引起的损耗接近于零, 可以忽略。因此主要考虑太赫兹光子晶体光纤的泄露损耗特性。

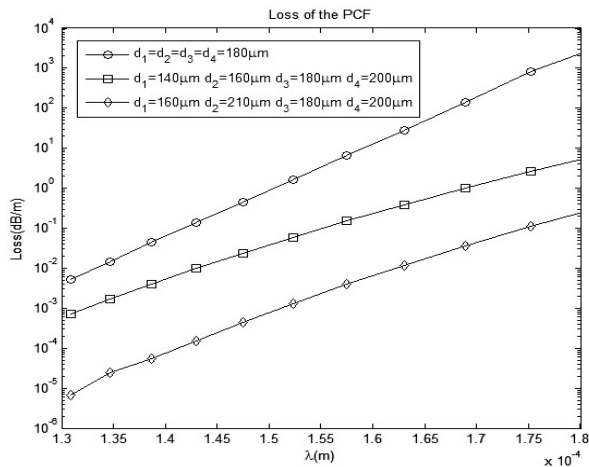
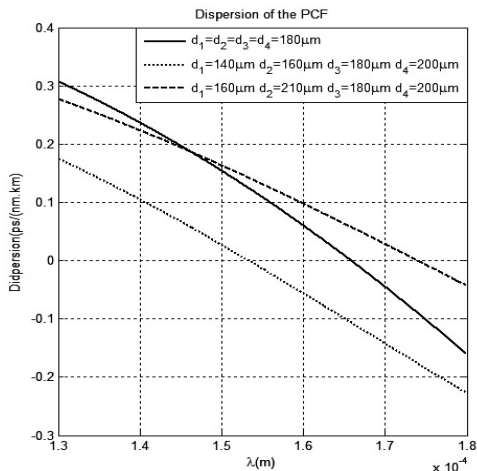


图3 改变孔间距时的损耗和色散曲线

从图3可以看出, 当孔间距由  $216 \mu\text{m}$  变为  $220 \mu\text{m}$  时, 光纤的泄露损耗随着孔间距的增大而减小, 而当孔间距由  $220 \mu\text{m}$  变为  $228 \mu\text{m}$  时, 泄露损耗又随着孔间距的增大而增大, 所以当孔间距  $\Lambda = 220 \mu\text{m}$  时, 对应的泄露损耗较小。当波长取  $130 \sim 140 \mu\text{m}$ , 孔间距由  $216 \mu\text{m}$  变为  $228 \mu\text{m}$  时, 损耗一直低于  $0.09 \text{ dB/km}$ , 波长在  $130 \sim 180 \mu\text{m}$ , 色散值在  $-0.1 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  到  $0.3 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  之间, 色散零点逐渐向长波长方向移动, 此时色散平坦度的变化不大。综合考虑,

首先, 固定各包层介质柱的直径, 研究孔间距  $\Lambda$  对损耗和色散的影响。取  $d_1 = 160 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 210 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 180 \mu\text{m}$ ,  $d_4 = 200 \mu\text{m}$ , 对应的泄露损耗曲线和色散曲线如图3所示。



当工作波长为  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  时, 选定  $\Lambda = 220 \mu\text{m}$ , 此时损耗低于  $0.09 \text{ dB/km}$ , 色散值在  $0.22 \sim 0.28 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  之间, 色散斜率约为  $0.5 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^2)$  左右, 达到平坦色散。

固定孔间距  $\Lambda = 220 \mu\text{m}$ ,  $d_2 = 210 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 180 \mu\text{m}$ ,  $d_4 = 200 \mu\text{m}$ , 改变第一层介质柱的直径, 研究第一层介质柱的直径对损耗和色散的影响。当  $d_1$  分别取  $160 \mu\text{m}$ 、 $180 \mu\text{m}$ 、 $190 \mu\text{m}$  时对应的损耗曲线和色散曲线如图4所示。

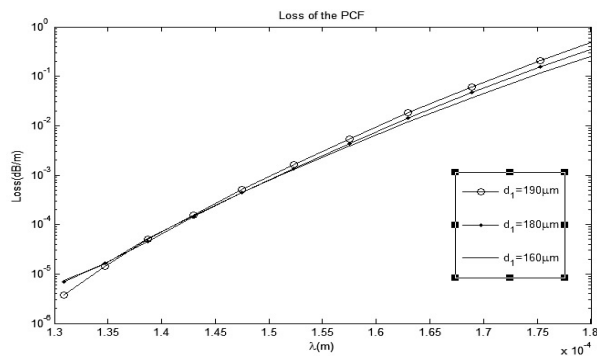
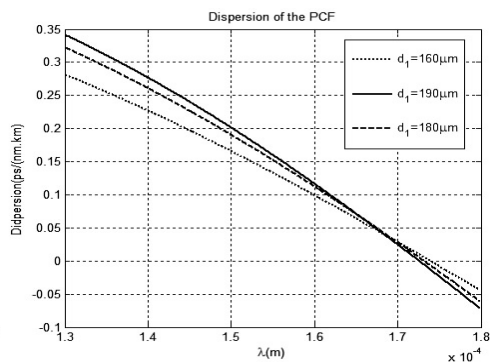


图4 改变第一层孔径时的损耗和色散曲线

从图4可以看出, 当波长为  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  时, 损耗随着  $d_1$  的增大而减小。当波长为  $140 \sim 180 \mu\text{m}$  时, 损耗随着  $d_1$  的增大而增大。当波长取  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  时, 损耗较小, 在  $0.005 \text{ dB/km}$  到  $0.08 \text{ dB/km}$  之间。当波长取  $130 \sim 168 \mu\text{m}$  时, 同一波长下的色散值随着第一层孔径  $d_1$  变大逐渐变大, 当波长取  $168 \sim 180 \mu\text{m}$  时, 同一波长下的色散值随着第一层孔径  $d_1$  变大逐渐变小, 色散零点逐渐向短波长方向移动, 色散斜率逐渐增加。波长在  $130 \sim 180 \mu\text{m}$  时, 色散值都比较小, 但在  $140 \sim 180 \mu\text{m}$  的波长下, 损耗较大, 所以综合考虑



在  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  的波段下找到损耗和色散的平衡点。当  $d_1 = 160 \mu\text{m}$ , 波长为  $130 \sim 140 \mu\text{m}$  时, 损耗低于  $0.09 \text{ dB/km}$  且此时色散值在  $0.23 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  到  $0.28 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$  之间, 色散斜率约为  $0.55 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}^2)$ , 达到平坦色散。

固定孔间距  $\Lambda = 220 \mu\text{m}$ ,  $d_1 = 160 \mu\text{m}$ ,  $d_3 = 180 \mu\text{m}$ ,  $d_4 = 200 \mu\text{m}$ , 改变第二层介质柱的直径, 研究第二层介质柱直径对损耗和色散的影响。当  $d_2$  分别取  $190 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$ 、 $210 \mu\text{m}$ 、 $220 \mu\text{m}$  时对应的损耗曲线、色散曲线如图5所示。

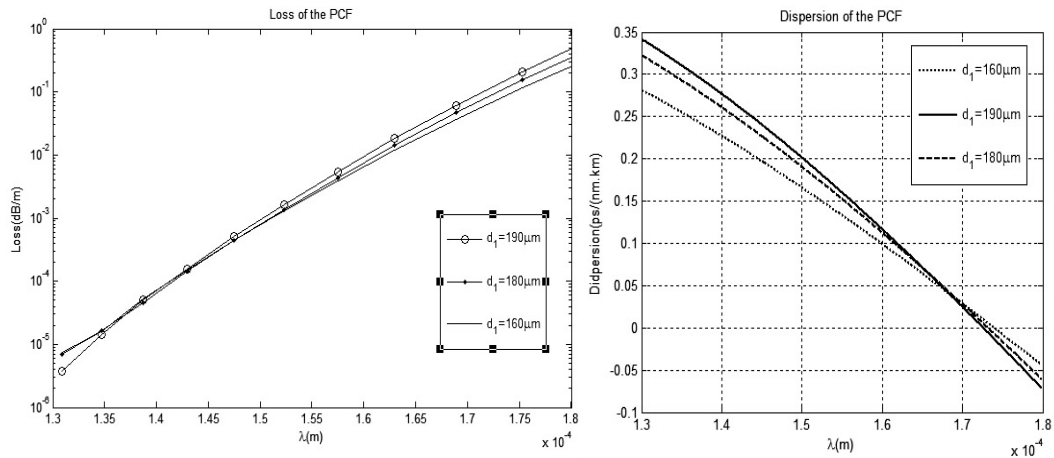


图5 改变第二层孔径时的损耗和色散曲线

从图5可以看出,当第二层孔径 $d_2$ 在190~220 μm范围内变化时,泄露损耗随着 $d_2$ 的增大而减小。当 $d_2=210\text{ }\mu\text{m}$ 和 $d_2=220\text{ }\mu\text{m}$ 、波长为130~140 μm时,损耗值在0.005 dB/km到0.06 dB/km之间,色散值在0.2 ps/(nm·km)到0.27 ps/(nm·km)之间,色散斜率约为0.6 ps/(nm·km<sup>2</sup>),达到平坦色散。可根据实际应用所需传输的距离,灵活选取第二层孔径的数值,同时满足损耗、色散的性能要求。

综合考虑,最终选取 $\Lambda=220\text{ }\mu\text{m}$ , $d_1=160\text{ }\mu\text{m}$ , $d_2=210\text{ }\mu\text{m}$ 或者 $d_2=220\text{ }\mu\text{m}$ , $d_3=180\text{ }\mu\text{m}$ , $d_4=200\text{ }\mu\text{m}$ 。在130~140 μm(2.1~2.3 THz)时,损耗值在0.005 dB/km到0.06 dB/km之间,色散值在0.2 ps/(nm·km)到0.27 ps/(nm·km)之间,色散斜率约为0.6 ps/(nm·km<sup>2</sup>),满足THz波传输条件,可以实现长距离、高性能THz波传输。

2 结束语

文中设计了一种包层的孔间距恒定、各层孔直径变化的太赫兹波光子晶体光纤,这种结构的光子晶体光纤的损耗、色散比相同孔径结构和渐变孔径结构的光纤低,且色散更加平坦。通过运用全矢量有限元法对其损耗、色散特性进行计算分析表明:这种THz光子晶体光纤工作在2.1~2.3 THz之间时,损耗值低于0.06 dB/km,色散值在0.2 ps/(nm·km)到0.27 ps/(nm·km)之间,色散斜率为0.6 ps/(nm·km<sup>2</sup>),可实现长距离、高性能THz波传输。文中的研究对太赫兹波光子晶体光纤的设计仿真研究有一定参考价值。

参考文献:

[1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Trans on Microwave Theory and Technology,2002,50(3):910-928.  
[2] Redo-Sanchez A, Zhang Xicheng. Terahertz science and technology trends[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,2008,14(2):260-269.

[3] Appleby R, Wallance H B. Stand off detection of weapons and contraband in the 100GHz to 1THz region[J]. IEEE Trans on Antennas Propag,2007,55(11):2944-2956.  
[4] Russell S T J. Designing a photonic crystal fiber with flattened chromatic dispersion[J]. Electronics Letters,1992,35(4):325-327.  
[5] Han H,Park H,Cho M,et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber[J]. Appl Phys Lett,2002,80(15):2634-2636.  
[6] Goto M,Quema A,Takahashi H,et al. Teflon photonic crystal fiber as polarization-preserving waveguide in THz region[C]//Proc of international conference on ultrafast phenomena. Niigata,Japan:[s.l.]:2004.  
[7] Goto M,Quema A,Takahashi H,et al. Polarization-preserving teflon photonic crystal fiber waveguide for THz radiation[C]//Proc of 12th international conference on terahertz electronics,infrared and millimeter waves. [s.l.]:[s.n.],2004:139-140.  
[8] Goto M,Quema A,Takahashi H,et al. Plastic photonic crystal fiber as terahertz waveguide[C]//Proc of lasers and electro-optics. [s.l.]:[s.n.],2004.  
[9] 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.  
[10] 付晓霞,陈明阳. 用于太赫兹波传输的低损耗、高双折射光纤研究[J]. 物理学报,2011,60(7):406-412.  
[11] 白晋军,王昌辉,霍丙忠,等. 低损宽频高双折射太赫兹光子带隙光纤[J]. 物理学报,2011,60(9):783-787.  
[12] 王豆豆,王丽莉. 低损耗高双折射太赫兹 Topas 光子带隙光纤[C]//2013年(第五届)西部光子学学术会议论文集. 出版地不详;出版者不详,2013.  
[13] Franco M A R,Passaro A,Cardoso J R,et al. Finite element analysis of anisotropic optical waveguide with arbitrary index profile[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1999,35(3):1546-1549.  
[14] 吴  昊. 新型太赫兹波塑料光子晶体光纤的特性研究[D]. 南京:南京邮电大学,2011.

# 新型THz微结构传输光纤的仿真设计

作者：[顾达](#)，[施伟华](#)，[GU Da](#)，[SHI Wei-hua](#)  
作者单位：[南京邮电大学 光电工程学院, 江苏 南京, 210023](#)  
刊名：[计算机技术与发展](#)[ISTIC](#)  
英文刊名：[Computer Technology and Development](#)  
年，卷(期)：2015 (2)

引用本文格式：[顾达](#). [施伟华](#). [GU Da](#). [SHI Wei-hua](#) [新型THz微结构传输光纤的仿真设计](#) [期刊论文] - [计算机技术与发](#)  
[展](#) 2015 (2)