

DOI:10.16136/j.joel.2022.04.0591

水填充太赫兹空芯布拉格光纤温度特性研究

苏梦雅¹, 徐 伟^{1,2}, 石 嘉^{1,2*}, 郭翠娟¹, 白 华¹, 姚建铨²

(1. 天津工业大学 电气与电子工程学院天津市光电检测与系统重点实验室, 天津 300387; 2. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 空芯太赫兹 (Terahertz, THz) 光纤因其损耗低和易集成功能材料等优点是当前研究热点。液态水在太赫兹频段具有的独特性质使其在太赫兹辐射、传感和器件等方面具有多种潜在应用。本文设计一种带有水缺陷层的太赫兹空芯布拉格光纤 (hollow core Bragg fiber, HCBF), 并采用有限元法分析了其温度特性。结果表明, 设计的太赫兹光纤在 0.34 THz 到 0.44 THz 频段内存在明显的温度可调的吸收峰, 且限制损耗随着水温的升高而增加。同时, 光纤具有较高的核芯功率比, 其值均大于 98.6%。本文所研究的水填充太赫兹光纤在研究太赫兹与液体相互作用、太赫兹调控器件等领域具有潜在的应用价值。

关键词: 太赫兹 (Terahertz, THz); 空芯布拉格光纤 (hollow core Bragg fiber, HCBF); 调控器件; 液态水; 温度

中图分类号: TN252 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2022)04-0337-05

Temperature characteristic of terahertz hollow core Bragg fiber filled with liquid water

SU Mengya¹, XU Wei^{1,2}, SHI Jia^{1,2*}, GUO Cuijuan¹, BAI Hua¹, YAO Jianquan²

(1. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, School of Electrical and Electronic Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology (Ministry of Education), School of Precision Instruments and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Hollow core terahertz (THz) fibers have attracted attention due to the low loss and easy modification with functional materials. Liquid water has unique properties in the THz region and has been widely investigated in THz emission, sensing and devices. In this paper, a THz hollow core Bragg fiber (HCBF) with a water defect layer is proposed. The finite element method is used to analyze the temperature characteristic of the water-filled THz fiber. The numerical analysis results show that the peak of the confinement loss can be controlled by adjusting the temperature of the liquid water, and the confinement loss increases with the increasing temperature of the liquid water in the frequency range of 0.34 THz to 0.44 THz. Moreover, the THz fiber has a high core power fraction up to 98.6%. The proposed THz water-filled fiber may have great potential as a sample cell for THz interaction with liquid and THz controllable devices.

Key words: Terahertz (THz); hollow core Bragg fiber (HCBF); controllable devices; liquid water; temperature

1 引 言

太赫兹波 (Terahertz, THz) 是频率为 0.1 THz

到 10 THz 的电磁波, 其在电磁频谱上位于毫米波和红外波之间^[1]。近年, 太赫兹因其在通信、成像、传感、国防和安检、生物技术和频谱等方面巨

* E-mail: shijia@tiangong.edu.cn

收稿日期: 2021-08-23 修订日期: 2021-09-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61905177)、陆军军医大学电磁辐射医学防护教育部重点实验室开放基金 (2018DCKF002) 和天津市企业科技特派员项目 (20YDTPJC01090) 资助项目

大的应用潜力成为了研究热点^[2,3]。然而,太赫兹波段应用技术的发展仍然缓慢。现有的太赫兹波导体积大且因为缺少有效的传输手段从而需要在真空传输,使得其很难广泛应用。此外,太赫兹源和太赫兹探测器相对于其他频段的源和探测器的发展还不是很成熟。太赫兹功能器件也发展缓慢。为了解决这些存在的问题,出现了各种各样的太赫兹波导。

近年来,主要研究的太赫兹波导有金属管波导^[4]、金属线波导^[5]和聚合物光纤^[6-12]等。聚合物光纤因其损耗低和灵活性好等优点使其脱颖而出。它主要分为空芯光纤^[6-10]、实芯光纤^[11]和多孔光纤^[12]。其中,空芯光纤因其特有的性质最具发展潜力。空芯布拉格光纤(hollow core Bragg fiber, HCBF)是特殊的光子带隙光纤,可以低损耗地进行单模传输。在光纤中填充功能材料也是当前的研究热点。在光纤中填充功能材料可能会增强光纤性质、获得可调控光纤及相关器件的性能在太赫兹领域中也得到了应用。文献[6]在空芯光纤中填充氩气可以将光纤设计成脉冲形成器,通过调节氩气的压强来产生宽带可调的太赫兹时域光谱。填充了甲醇气体的空芯光纤作为太赫兹气体激光器的反应池时,可以减小太赫兹源的体积^[7]。选择性填充氯化钾的空芯光纤可以作为介电常数趋于零的材料,从而得到趋于零且平坦的色散^[8]。HCBF结构简单,其纤芯和包层易于填充液体材料且可以进行实时检测,是填充型光纤的翘楚。在HCBF纤芯内壁填充液体(α 乳糖)可以进行表面共振传感应用^[9]。在HCBF包层中引入共振微流道可以无接触检测流体(甘油)的折射率变化^[10]。

与上述功能材料相比,液态水是自然界中最常见且最易获得的材料之一,在太赫兹器件应用上更具发展潜力。液态水对太赫兹波的强吸收作用使得其在太赫兹领域无法被忽略。液态水中水分子的氢键会和相邻水分子的氢键结合形成四面体状的氢键带,继而组成氢键网络。水分子从平衡位置置换或旋转时,氢键网络的弛豫动力学时间变化尺度在皮秒到亚皮秒之间^[13]。从水中激发太赫兹波等问题是太赫兹领域的研究前沿^[14]。此外,液态水的光学特性会受到热弛豫和共振等过程的影响。温度会改变水分子中氢键带的偶极定向和平移拉伸,从而影响液态水对太赫兹波的吸收^[15]。因此,温度可以控制液态水的介电常数。综上所述,液态水作为光纤中填充的功能材料为太赫兹产生和太赫兹器件应用方面提供了可能。

本文主要研究了带有水缺陷层的太赫兹 HCBF。通过有限元法分析不同水温下 HCBF 的光学特性。在低频区域限制损耗实现水温度可调。

2 HCBF 的设计模型及理论

本文研究的 HCBF 有一个空心纤芯和包层组成,其横截面示意图如图 1 所示。包层是由 11 层等厚的低折射率的空气层和高折射率的树脂层交替排列组成。在第一层空气层引入缺陷层,用于填充不同温度的液态水。空心纤芯的直径为 5 mm,空气层和树脂层的层厚为 0.7 mm。

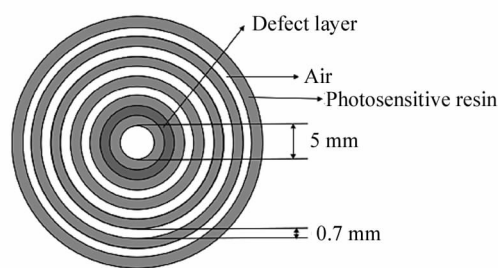


图 1 HCBF 的横截面示意图

Fig. 1 Cross section of the proposed HCBF

当太赫兹波从 HCBF 的空芯传输到包层时,层叠式包层会产生 Bragg 衍射,从而将太赫兹波束缚在空芯中。引入的缺陷层可以看成有损耗的法布里-珀罗(Fabry-Perot)腔,使纤芯的导模和包层的缺陷模发生谐振耦合,进而导致损耗谱出现很高的谐振峰。根据纤芯-包层的相位条件和包层的反谐振反射条件,可以计算其共振频率^[16],表示为:

$$f = c / (d_w \sqrt{n_w^2 - n_c^2} + d_p \sqrt{n_p^2 - n_c^2}), \quad (1)$$

式中, c 是真空中光速, n_w 和 n_p 是缺陷层和树脂层的折射率, d_w 和 d_p 是对应层的层厚, n_c 是纤芯的折射率。

从式(1)可以分析出,共振频率随缺陷层折射率的增加而左移。表明缺陷层的折射率变化会改变光纤的传输特性。因此,通过改变缺陷层中水的温度可以控制光纤的光学特性。

太赫兹频段下液态水的复介电常数可以根据双德拜(Debye)模型计算出^[17],即:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_1}{1 + i\omega\tau_D} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_\infty}{1 + i\omega\tau_1}, \quad (2)$$

式中, ϵ_s 是低频的静态介电常数, ϵ_∞ 是高频的极限介电常数, ϵ_1 是快慢弛豫过程之间的过渡介电常数, τ_D 是从 ϵ_s 到 ϵ_1 衰减的慢弛豫时间常数, τ_1 是从 ϵ_1 到 ϵ_∞ 衰减的快弛豫时间常数,以上所述参数均可从文献

[17]中得到。

复介电常数和复折射率一般表达形式分别为^[18]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon'(\omega) - i\epsilon''(\omega), \quad (3)$$

$$\hat{n}(\omega) = n(\omega) - ik(\omega), \quad (4)$$

式中, $\epsilon'(\omega)$ 和 $\epsilon''(\omega)$ 分别是复介电常数的实部和虚部, $n(\omega)$ 是折射率, $k(\omega)$ 是吸光系数。

利用复介电常数计算出复折射率的表达式为^[18]:

$$n(\omega) = \left[\frac{\sqrt{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} + \epsilon'(\omega)}{2} \right]^{1/2}, \quad (5)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi f}{c} \left[\frac{\sqrt{\epsilon'(\omega)^2 + \epsilon''(\omega)^2} - \epsilon'(\omega)}{2} \right]^{1/2}, \quad (6)$$

$$k(\omega) = \frac{c\alpha(\omega)}{2\omega}, \quad (7)$$

式中, $\alpha(\omega)$ 是吸收系数, f 是频率, 本文采用光敏树脂的折射率和吸收系数均来源于文献[9]。

3 仿真和讨论

有效模场面积表示太赫兹波传输到光纤横截面的实际覆盖面积, 其表达式为^[19]:

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint |E(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\iint |E(x, y)|^4 dx dy}, \quad (8)$$

式中, $E(x, y)$ 是电场密度分布。

不同水温下基模的有效模场面积如图2所示。从图2中可以分析出, 有效模场面积大约在0.38 THz和0.62 THz处出现峰值。在纤芯中传输的太赫兹波会泄露到包层, 泄露到包层的太赫兹波越多, 有效模场面积越大。随着水温度从300 K上

升到340 K, 有效模场面积在第一个峰值处依次增加。

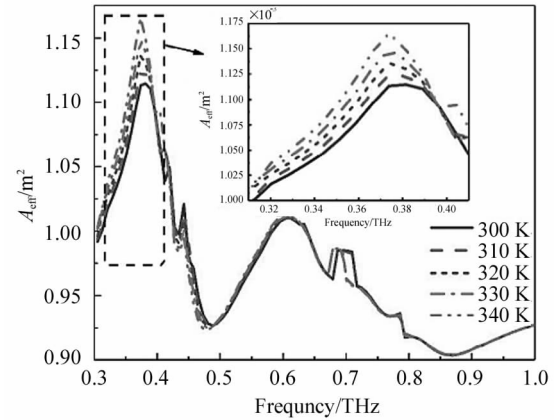


图2 不同水温下基模的有效模场面积

Fig. 2 Effective mode area of the fundamental mode with water at different temperature

有效材料损耗(effective material loss, EML)是研究光纤性质的重要损耗之一, 主要来源于光纤的背景材料。空芯光纤可以减少包层吸收核芯区域的太赫兹波, 从而减小光纤的EML。EML的表达式为^[20]:

$$\alpha_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \left[\frac{\int_{\text{mat}} n_{\text{mat}} |E|^2 \alpha_{\text{mat}} dA}{\left| \int_{\text{all}} S_z dA \right|} \right], \quad (9)$$

式中, ϵ_0 和 μ_0 是真空中介电常数和磁导率, n_{mat} 是背景材料的折射率, α_{mat} 是背景材料的吸收损耗, E 是电场强度, S_z 是 z 方向的坡印亭矢量 $S_z = 0.5 \cdot (E \times H^*) \cdot z$, H^* 是磁场的共轭复数。

不同水温下的材料特性如图3所示。由图3(a)可以分析出, 本文所研究的光纤的EML对温度不敏

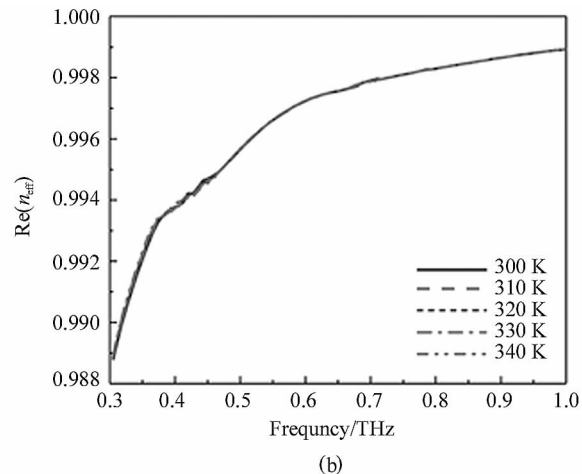
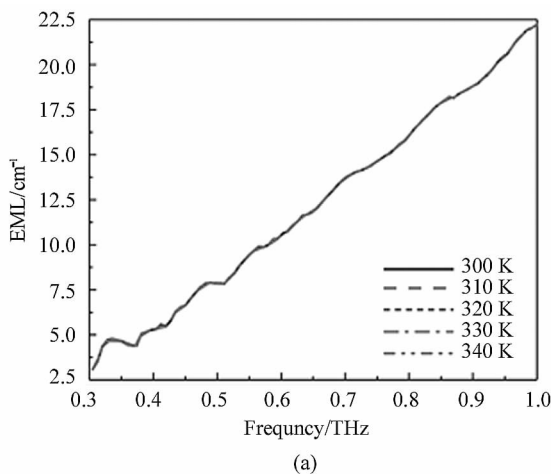


图3 (a) 不同水温下的有效材料损耗; (b) 不同水温下的基模有效折射率

Fig. 3 (a) Effective material loss; (b) Effective refractive index with water at different temperatures

感且低频处的 EML 较低。从图 3(b)中可以得出,光纤基模的有效折射率 $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 的变化趋势和 EML 相一致。

核芯功率比是计算太赫兹波在光纤纤芯中传输的功率。目前太赫兹传输应用中要追求更高的核芯功率比。其计算式为^[21]:

$$\eta = \frac{\int_i S_z dA}{\int_{\text{all}} S_z dA}, \quad (10)$$

式中,分子是 z 分量的坡印亭矢量在核芯区域的积分,分母是其在整个光纤横截面区域的积分。

在不同水温下的核芯功率比如图 4 所示。从图 4 中可以分析出,光纤的核芯功率比均高达 98.6%。这就表明太赫兹波 98.6% 以上的能量都在纤芯中传输。此外,在 0.34 THz 到 0.44 THz 之间,核芯功率比的变化趋势和水升温的变化趋势相反。出现此现象可能是由于在此频段处,受水温的影响太赫兹波和液态水发生了更强的交互作用。

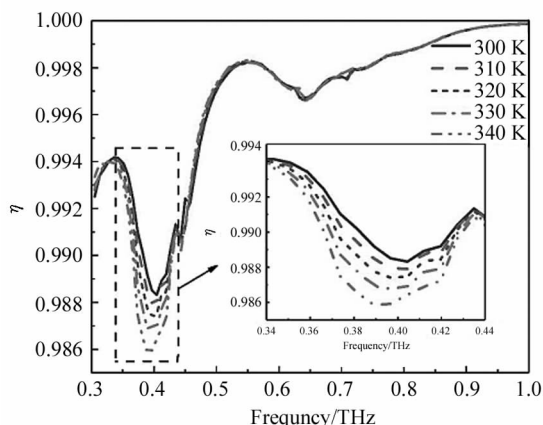


图 4 不同水温下的核芯功率比,内插图是核芯功率比的局部放大图

Fig. 4 Core power fraction with water at different temperatures (The inset: zoomed-in core power fraction)

限制损耗 (confinement loss, CL) 表示因太赫兹波从纤芯泄露到包层产生的损耗。根据复有效折射率的虚部 $\text{Im}(n_{\text{eff}})$ 可以计算出限制损耗^[22], 表示为:

$$\alpha_{\text{CL}} = 8.686 \times \frac{2\pi f}{c} \text{Im}(n_{\text{eff}}). \quad (11)$$

不同水温下的限制损耗如图 5 所示。从图 5 中可以得出,限制损耗在 0.45 THz 频段以上较低,并且在 0.34 THz 到 0.42 THz 之间表现出明显的温度特性。此现象可能由于在此频段内太赫兹波倾向于在高折射率材料中传输,热的液态水具有更高的折射率,太赫兹波泄露到液态水缺陷层就越多,从而

导致了较大的损耗。

为了更好的得到所研究光纤的温度特性,图 6 给出了限制损耗在峰值和 0.39 THz 处和液态水温度的变化关系图。图中符号是仿真数据,线条是拟合曲线。从图中可以得出,限制损耗在峰值和 0.39 THz 处和液态水温度都呈线性正比关系。

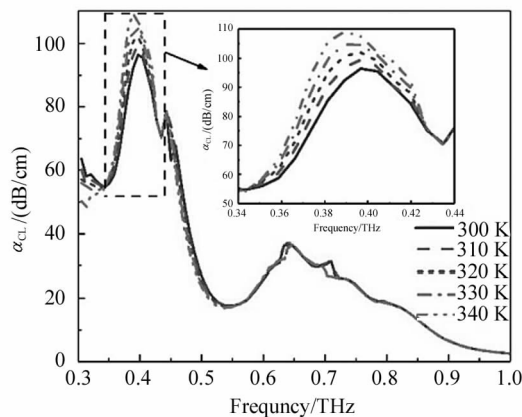


图 5 不同水温下的限制损耗;内插图是限制损耗在 0.34 THz 到 0.44 THz 频段内的细节图

Fig. 5 Confinement loss with water for various temperatures (The inset: the detailed information of confinement loss ranging from 0.34 THz to 0.44 THz)

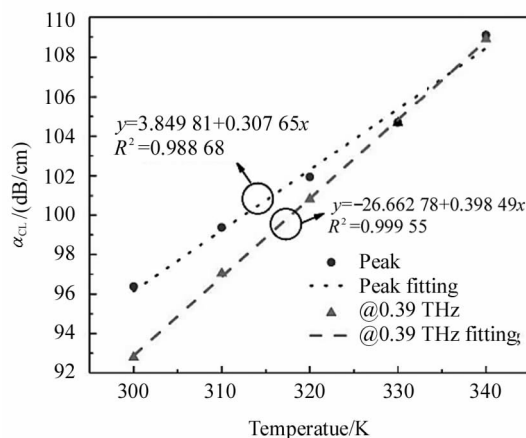


图 6 限制损耗在峰值和 0.39 THz 处和温度的关系图
Fig. 6 Temperature dependence of the confinement loss at the dip and at 0.39 THz

4 结 论

本文研究了基于水填充的 HCBF 的温度特性。数值分析结果表明,在 0.3 THz 到 1 THz 之间,核芯功率比均在 98.6% 之上。限制损耗大约 0.39 THz 处出现吸收峰,且液态水温度可调。限制损耗在 0.34 THz 到 0.44 THz 频段内随着水温的升高而增加。此外,本文研究的光纤具有损耗低、造价低、可

控性较好和制作灵活等优点,在太赫兹调控器件上有很大的应用前景。

参考文献:

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [2] ISLAM M S, SULTANA J, DINOVTSEV A, et al. Zeonex based asymmetrical terahertz photonic crystal fiber for multichannel communication and polarization maintaining applications[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 666-672.
- [3] SULTANA J, ISLAM M S, FAISAL M, et al. Highly birefringent elliptical core photonic crystal fiber for terahertz application[J]. *Optics Communications*, 2018, 407: 92-96.
- [4] GALLOT G, JAMISON S P, MCGOWAN R W, et al. Terahertz waveguides[J]. *Journal of the Optical Society of America B-optical Physics*, 2000, 17(5): 851-863.
- [5] WANG K, MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 376-379.
- [6] CUI W, SCHIFF-KEARN W A, ZHANG E, et al. Broadband and tunable time-resolved THz system using argon-filled hollow-core photonic crystal fiber[J]. *APL Photonics*, 2018, 3(11): 111301.
- [7] YAN D X, ZHANG H W, XU D G, et al. Numerical study of compact terahertz gas laser based on photonic crystal fiber cavity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(14): 3373-3378.
- [8] HOSSAIN M S, HABIB M S, RAZZAK S M, et al. Highly birefringent, low-loss, and near-zero flat dispersion ENZ based THz photonic crystal fibers[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 7202109.
- [9] LI J. W., NALLAPPAN K, GUERBOUKHA H, et al. 3D printed hollow core terahertz Bragg waveguides with defect layers for surface sensing applications[J]. *Optical Express*, 2017, 25(4): 4126-4144.
- [10] CAO Y, NALLAPPAN K, GUERBOUKHA H, et al. Additive manufacturing of resonant fluidic sensors based on photonic bandgap waveguides for terahertz applications[J]. *Optical Express*, 2019, 27(20): 27663-27681.
- [11] HAN H, PARK H, CHO M, et al. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(15): 2634-2636.
- [12] AMING A, UTHMAN M, CHITAREE R, et al. Design and characterization of porous-core polarization maintaining photonic crystal fiber for terahertz guidance[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(23): 5583-5590.
- [13] PERAKIS F, DE MARCO L, SHALIT A, et al. Vibrational spectroscopy and dynamics of water[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(13): 7590-7607.
- [14] YIWEN E, JIN Q, ZHANG X C. Enhancement of terahertz emission by a preformed plasma in liquid water[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(10): 101101.
- [15] VIJ J K, SIMPSON D R, PANARINA O E. Far infrared spectroscopy of water at different temperatures: GHz to THz dielectric spectroscopy of water[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2004, 112(3): 125-135.
- [16] QU H, SKOOROBOGATIY M. Resonant bio- and chemical sensors using low-refractive-index-contrast liquid-core Bragg fibers[J]. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2012, 161(1): 261-268.
- [17] ZHOU J, RAO X, LIU X M, et al. Temperature dependent optical and dielectric properties of liquid water studied by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Aip Advances*, 2019, 9(3): 035346.
- [18] KINDT J T, SCHMUTTENMAER C A. Far-infrared dielectric properties of polar liquids probed by femtosecond terahertz pulse spectroscopy[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(24): 10373-10379.
- [19] PAUL B K, HAQUE M A, AHMED K, et al. A novel hexahedron photonic crystal fiber fin terahertz propagation: design and analysis[J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 32.
- [20] ISLAM M S, SULTANA J, DINOVTSEV A, et al. A novel Zeonex based oligoporous-core photonic crystal fiber for polarization preserving terahertz applications[J]. *Optics Communications*, 2018, 413: 242-248.
- [21] PAUL B K, AHMED K, VIGNESWARAN D, et al. Quasi-photonic crystal fiber-based spectroscopic chemical sensor in the terahertz spectrum: design and analysis[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(24): 9948-9954.
- [22] HABIB M A, ANOWER M S. Design and numerical analysis of highly birefringent single mode fiber in THz regime[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 47: 197-203.

作者简介:

石 嘉 (1990—),男,博士研究生,天津工业大学电气与电子工程学院副教授,硕士生导师,主要从事光纤传感和太赫兹成像方面的研究。