

文章编号: 1005-5630(2022)01-0029-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2022.01.005

太赫兹金属弹簧波导的研究

董章华, 赵佳宇

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为深入了解金属弹簧波导对太赫兹波的传输效果, 对不同螺线间距金属弹簧的太赫兹波传输特性进行了实验研究。实验结果表明, 对于线径 0.8 mm、外直径 12 mm、长 14 cm 的金属弹簧, 在 3.5/4.4 mm 等较大的螺距下, 弹簧波导反而能在较大的带宽下传导太赫兹波, 并具有良好的偏振保持能力。3.5/4.4 mm 螺距弹簧的太赫兹传输带宽均约为 0.9 THz, 且在其峰值频率处的传输损耗分别约为 0.2 cm^{-1} 和 0.27 cm^{-1} 。此外, 金属弹簧能将太赫兹模式束缚在空气芯内传输, 而非通过金属螺线导引传输。该研究结果对金属弹簧波导在太赫兹技术中的应用具有一定参考意义。

关键词: 太赫兹波; 金属弹簧波导; 弹簧螺线间距; 偏振特性

中图分类号: O 451 **文献标志码:** A

Study on metal spring based terahertz waveguide

DONG Zhanghua, ZHAO Jiayu

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to understand the transmission effect of the metal spring waveguide on terahertz wave, the transmission characteristics of terahertz wave by springs with different helix spacings have been studied experimentally. The experimental results show that when the pitch is larger as 3.5/4.4 mm (with wire diameter of 0.8 mm, outer diameter of 12 mm and length of 14 cm), the metal spring waveguide can propagate terahertz wave in a larger bandwidth with the additional ability of polarization maintaining. The terahertz transmission bandwidth of metal springs with pitch of 3.5/4.4 mm are both about 0.9 THz, and the lowest transmission loss are about 0.2 cm^{-1} and 0.27 cm^{-1} respectively at their peak frequencies. In addition, it has been proved that the terahertz mode was confined inside the air core rather than being guided by the metal helix. The above results are helpful for applications of the metal spring waveguide in the field of terahertz technology.

Keywords: terahertz wave; metal spring waveguide; helix spacing; polarization characteristics

收稿日期: 2021-10-08

基金项目: 上海市晨光计划(18CG53)

作者简介: 董章华(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为太赫兹技术。Email: jytl67@163.com

通信作者: 赵佳宇(1988—), 男, 副教授, 研究方向为超快非线性光学。Email: zhaojiayu@usst.edu.cn

引 言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波是位于微波和红外波段之间的电磁波, 其独特的性质为光电科学和技术提供了更多可能性^[1]。近年来, 太赫兹波在生物医学、国土安全、信息和通信技术、无损检测和分析等各个领域的应用正在迅速发展^[2-4]。在对太赫兹波的利用中, 起传导作用的波导必不可少, 因此, 关于太赫兹波导的报导不断涌现。现有的波导结构主要分为平行平板波导^[5-7]、管状波导^[8-22]。其中, 管状波导因其较强的灵活性而得到不断发展, 又可细分为金属线波导^[8-9]、实心介质波导^[10-11]、空芯介质波导^[12-16]、负曲率波导与光子晶体光纤^[17-20]、螺旋结构波导^[21-22]等。

后四种波导因为利用空气芯对太赫兹波进行传输, 从而避免了波导材料本身对光场的吸收与色散, 在近年得到更多关注。例如, Dupuis 等以厚的聚合物 (聚甲基丙烯酸甲酯, PMMA) 作为空芯管的包层材料, 提供较大的包层损耗, 将太赫兹模式有效地束缚在空气芯内, 实现了在 0.3~1 THz 宽带内多频点低损耗、低色散的太赫兹波导^[12-14]。Lai 等以低均匀折射率的介质作为管壁构成法布里-珀罗腔, 在管内形成了稳定的太赫兹模场, 实现了在 0.1~1 THz 内多个低损耗的可调谐传输窗口^[15-16]。

一方面, 为了提高波导束缚能力及降低群速

度色散与损耗等, 研究人员探讨了各种各样空芯波导的包层材料与结构, 如结构复杂多样的负曲率波导^[17-18]与光子晶体光纤^[19-20]等。另一方面, Dominik 等首次报导了金属与电介质弹簧波导^[21], 以理论仿真与实验证明了弹簧可以在 0.2~1 THz 宽带下以接近零的群速度色散传输太赫兹波, 损耗低至 0.1 cm^{-1} 。在良好的波导特性与光学响应^[22]的基础上, 这种造价低廉、结构简单、具有高度灵活性的弹簧为太赫兹技术提供了一个独特的选择。

因此, 本文针对金属弹簧螺线间距对太赫兹波传导特性的影响进行了深入研究。结果表明, 不同螺距金属弹簧对太赫兹波的传输效果不同, 且传导机理也有所变化, 同时, 金属弹簧对太赫兹波具有偏振保持能力。最后, 我们验证了太赫兹模场被束缚在金属弹簧的空气芯内, 而不是沿着金属螺线传输。该研究结果对金属弹簧波导在太赫兹技术中的应用具有一定参考意义。

1 实验装置

所使用的实验系统为典型的全光纤太赫兹时域光谱系统 (THz time-domain spectroscopy, THz-TDS), 如图 1(a) 所示。其中, 飞秒激光器 (MenloSystems) 发射中心波长为 1560 nm、脉宽约 95 fs 的激光, 分为泵浦光与探测光, 平均功率均约为 30 mW。泵浦光经保偏光纤后激发发

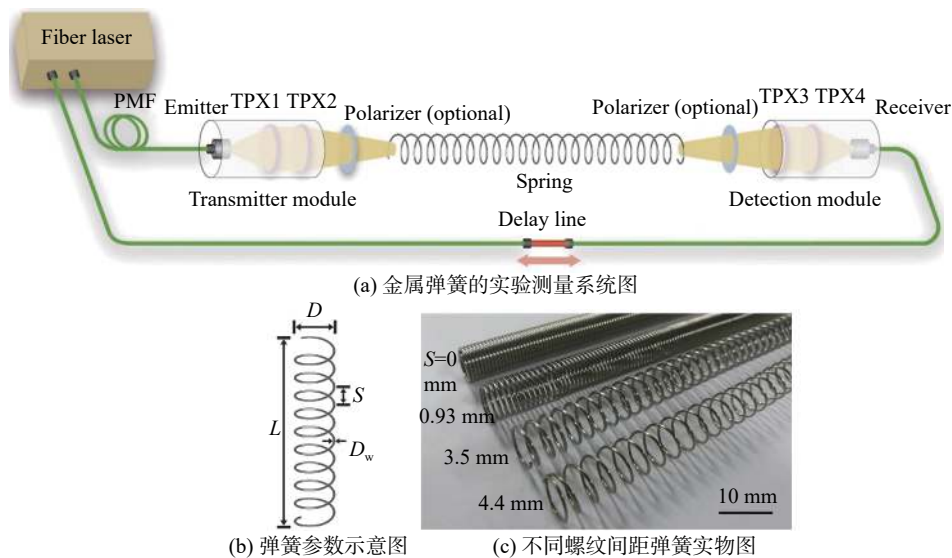


图 1 金属弹簧的参数、实物及实验测量系统图

Fig. 1 Diagrams of spring parameters, springs with different pitch and experimental set-up

射天线 (MenloSystems)。探测光经保偏光纤, 再经延迟线 (General Photonics) 激发接收天线。发射天线在约 100 V 高压下发射太赫兹波, 太赫兹波经两片 TPX 透镜 (焦距分别为 15 mm 和 35 mm) 被聚焦到金属弹簧波导中。这两块 TPX 透镜与发射天线共同构成发射模块。

金属弹簧波导出射的太赫兹信号被另外两块 TPX 透镜收集并聚焦汇入接收天线, 这两块 TPX 透镜与接收天线共同构成接收模块。金属弹簧波导前后有两块可拆卸的太赫兹偏振片, 分别为起偏器和检偏器, 用于后文所述波导传输太赫兹波偏振特性的探究。实验中的金属弹簧波导均为购买的普通不锈钢弹簧, 长度 $L = 14$ cm, 外直径 $D = 12$ mm, 线径 $D_w = 0.8$ mm, 螺纹间距 S 分别为 0、0.93 mm、3.5 mm 与 4.4 mm, 金属弹簧参数及实物分别如图 1(b)、(c) 所示。

2 结果与讨论

2.1 不同螺纹疏密程度的弹簧传输效果

图 2 展示了初始的太赫兹信号以及不同螺纹疏密程度的金属弹簧出射信号的时域及频域波

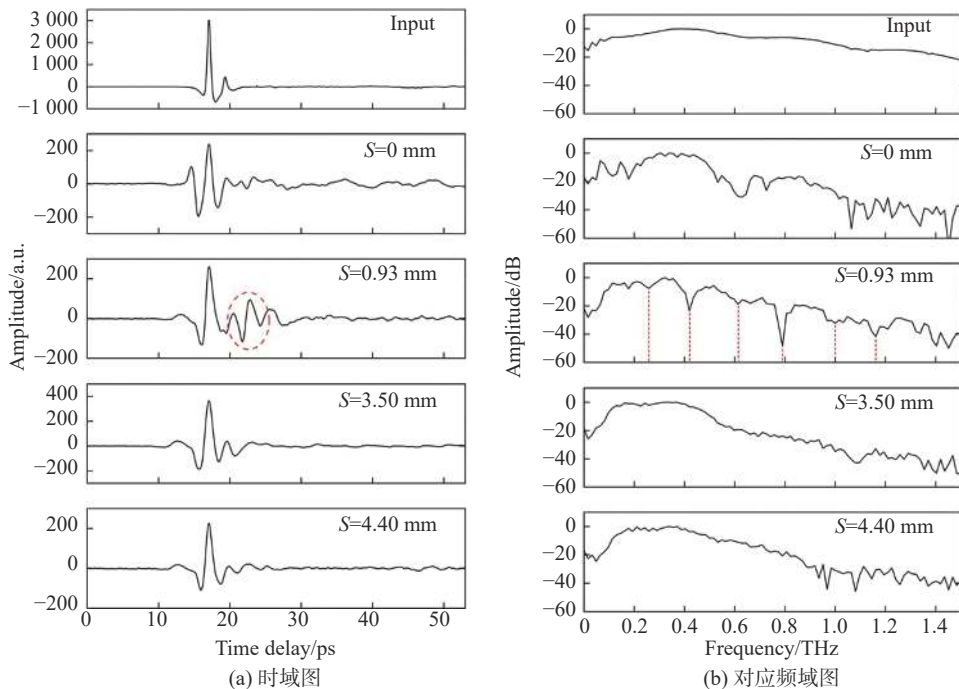


图 2 初始太赫兹信号以及不同螺距下弹簧出射信号

Fig. 2 Initial terahertz signal and output signal of springs with different pitch

形。从图 2(a)、(b) 中可以看出, 对螺纹间距为零, 即准金属波纹管而言, 虽然它能传导太赫兹波, 但时域和频域波形失真较大, 例如时域主脉冲前沿有较大的尖峰, 且在主脉冲之后有较大的无序波动。以上两点一方面可能来自于高阶太赫兹模式的激发与模式间的耦合^[21]。另一方面, 螺距为 0 时, 由于金属弹簧内壁的起伏不平, 内壁提供的太赫兹反射率也会降低。

而对于较小螺纹间距 0.93 mm 的金属弹簧, 其传输的太赫兹时域波形上, 主脉冲后紧随一个次脉冲, 如红虚线框所示, 这表明太赫兹波传输过程中存在谐振现象。进一步观察到频谱上如虚线所示的周期性凹陷, 也验证了这种弱谐振效应。这可能是由于作为完美导体的金属螺线^[23]与螺线间隙的空气形成了一种周期性介电常数的“包层”, 这种包层一定程度上充当了法布里-珀罗腔, 使频谱上凹陷处的频率分量(谐振频谱成分)在金属弹簧外不同程度地相干叠加相长, 从而使得反谐振频谱成分得以保留和传输。这与经典的反谐振空芯波导^[15-16]类似。

当螺纹间距增大到 3.5 mm、4.4 mm 时, 由图 2 可知如下。

一方面, 其出射的时域和频域波形都较好地保留了初始信号的信息, 虽然幅值有所降低, 但

时域单周期脉冲和宽带频谱饱满度较之前的情况都大为改善。这是由于：随着螺线变疏，空气带来的扰动增大，导致上述“包层”外表面反射的光场被极大的抑制^[24]，最终使频谱上的谐振凹陷消失，故频谱更接近初始信号。

另一方面，若把金属弹簧视为一种螺旋接收天线^[25-26]，则根据天线理论^[27]，光场模式可分为横向与轴向模式。横向模式下的弹簧尺寸与波长相比很小；而轴向模式下，螺距 S 与周长 $C = \pi D$ 与波长成正比^[24]。因此，螺线更疏时，更能激发轴向模式，而不容易产生类反谐振现象。另外，从图 2(a) 中 3.5 mm、4.4 mm 螺距金属弹簧时域主脉冲之后的微弱抖动还可以看出，这两种金属弹簧激发的高阶太赫兹模式更少，或者高阶模式在金属弹簧尾端已经得到了很大的衰减。此外，两种较疏的金属弹簧都能得到基本不失真的波形且彼此相似，说明金属弹簧波导具有一定的鲁棒性。最后，在图 2(b) 中的 3.5 mm、4.4 mm 螺距弹簧的传输频谱上可以看出，两者的传输带宽分别均约为 0.9 THz。并且，由 3.5 mm、4.4 mm 螺距弹簧的信号与输入的参考信号，在传输峰值频率 0.37 THz、0.34 THz 处，计算得到的传输损耗分别约为 0.2 cm^{-1} 和 0.27 cm^{-1} 。

2.2 金属弹簧的保偏传输特性

在得到合适的螺距后，本文对金属弹簧传输太赫兹波的偏振特性进行了研究，即金属弹簧出射端对比入射端的太赫兹信号的偏振变化。首先，基于上述螺纹间距 3.5 mm、4.4 mm 的金属弹簧出射信号，以高莱管与示波器代替接收模块，并将两块偏振片置入光路中，起偏器(起偏方向为竖直)用于提高初始线偏振太赫兹波的偏振纯度；其次，将斩波器置于发射天线与起偏器之间，给太赫兹信号 10 Hz 的调制频率；最后，以 10° 为步长转动检偏器一周即 360° (以水平方向为 0°)，并记录每一角度下示波器上高莱管探测到的太赫兹平均能量。

金属弹簧出射的太赫兹能量随偏振角度的分布如图 3 所示，其中，实线表示入射的太赫兹波，红方、蓝圆点分别表示螺距 3.5 mm 和 4.4 mm 的金属弹簧出射太赫兹波，三组数据都分别对自身做了归一化处理。可以看出，金属弹簧出射信

号与入射的线偏太赫兹波基本一致。因此，以线偏振入射的太赫兹波经过金属弹簧后依旧是线偏振光，即这两种螺距疏密程度的金属弹簧对太赫兹波的偏振几乎没有影响。值得说明的是，信号整体偏振角度稍微偏离 90° ，可能是太赫兹偏振片误差以及光路没有完全准直所致。

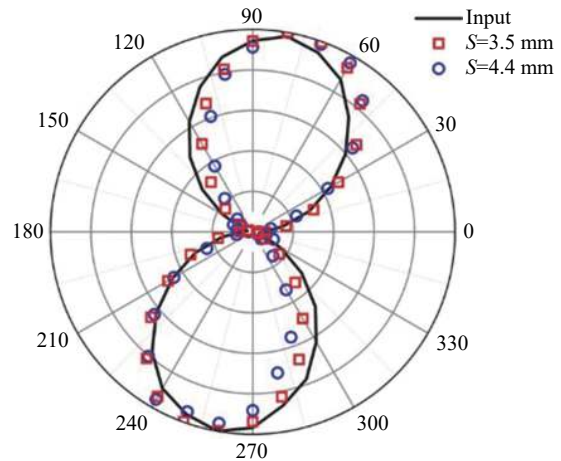


图 3 不同偏振角度下的太赫兹能量分布图

Fig. 3 Terahertz energy distribution at different polarization angles

2021 年，Hiroya 等报导了一种三维金属螺旋阵列组成的宽带太赫兹波圆偏振器，可以改变太赫兹波的偏振态。其中，金属弹簧会充当圆偏振片的角色，使入射的线偏光转化为圆偏振光，且此圆偏振光的手性与金属弹簧螺旋手性相反^[24]。但此现象对金属弹簧自身参数有严格要求，即弹簧圈数 $N > 3$ ，且螺旋角 $12^\circ < \alpha = \tan^{-1}(S/\pi D) < 14^\circ$ 。而根据本文参数，可以计算 3.5 mm、4.4 mm 螺距金属弹簧的螺旋角 α 分别为 5.3° 、 6.7° ，均不在文献要求的范围内，因此我们实验中的线偏振太赫兹波经过这两种金属弹簧后仍为线偏光，与文献 [24] 的报道并不矛盾。

2.3 金属弹簧波导中的太赫兹模场分布

有报导显示，单根金属丝可局限太赫兹波并进行传输^[8-9]。因此有必要对金属弹簧传输太赫兹波的模场分布进行验证，澄清传输区域是空气芯、还是金属螺线、亦或是由螺线和空气构成的等效包层。我们在螺纹间距为 4.4 mm 金属弹簧的基础上，以不同直径的圆形太赫兹波高阻材料(锡箔)遮挡弹簧的中心空气芯，具体过程如图 4(a)

所示, 其中: 横截面图中 D_1 是圆形锡纸片的直径; 锡纸圆片与弹簧共心, 并置于弹簧纵向长度的中央, 与此同时, 记录不同圆片直径下的时域波形, 如图 4(c) 所示。由图 4(c) 可知, 随着圆片直径的增大, 弹簧传输的太赫兹信号逐渐被遮挡而减小, 初步证明了太赫兹波的传播主要发生在弹簧的空气芯中。

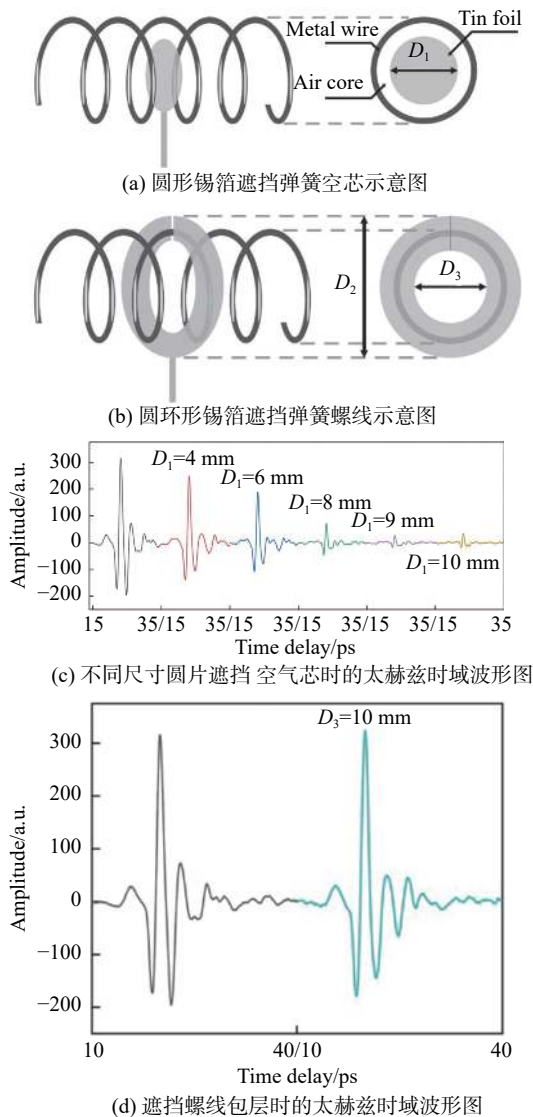


图 4 不同形式锡箔遮挡与对应太赫兹时域波形图

Fig. 4 Different forms of tin foil covering and the corresponding THz time-domain waveforms

为了进一步验证这一结论, 本文以圆环形锡纸遮挡弹簧包层, 位置同样在弹簧纵向中部, 如图 4(b) 所示。圆环的外直径为 $D_2 = 16$ mm, 内直径为 $D_3 = 10$ mm, 由圆环遮挡下的太赫兹时域波形如图 4(d) 所示。可以看出, 只遮挡包层

而不遮挡空芯时, 信号幅值与完全不遮挡的弹簧出射的信号幅值几乎一致。

综合上述结果可以得出, 太赫兹波在金属弹簧的空芯中形成了稳定的模式, 且模式边缘靠近弹簧螺线^[21], 而非通过包层的金属丝传输。

3 结 论

本文通过不同螺距金属弹簧传输太赫兹波的时域、频域光谱对比, 证实了较疏螺距弹簧具有更好的传导效果, 包括时域脉冲单周期性和频谱宽带性。同时, 证明了疏螺距金属弹簧对太赫兹波偏振几乎不产生影响。最后, 以遮挡法验证了金属弹簧将太赫兹波场束缚在其空气芯进行传输。本文研究结果将对发展简易、低成本太赫兹波导起一定促进作用。

参考文献:

- [1] TONOUCI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97 – 105.
- [2] ABBOTT D, ZHANG X C. Scanning the issue: T-ray imaging, sensing, and detection[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2007, 95(8): 1509 – 1513.
- [3] PIESIEWICZ R, KLEINE-OSTMANN T, KRUMBHOLZ N, et al. Short-range ultra-broadband terahertz communications: concepts and perspectives[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2007, 49(6): 24 – 39.
- [4] SENGUPTA K, NAGATSUMA T, MITTLEMAN D M. Terahertz integrated electronic and hybrid electronic – photonic systems[J]. *Nature Electronics*, 2018, 1(12): 622 – 635.
- [5] MENDIS R, GRISCHKOWSKY D. Plastic ribbon THz waveguides[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(7): 4449 – 4451.
- [6] MENDIS R, MITTLEMAN D M. An investigation of the lowest-order transverse-electric (TE_1) mode of the parallel-plate waveguide for THz pulse propagation[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(9): A6 – A13.
- [7] MENDIS R, MITTLEMAN D M. Comparison of the lowest-order transverse-electric (TE_1) and transverse-magnetic (TEM) modes of the parallel-plate wave-

- guide for terahertz pulse applications[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 14839 – 14850.
- [8] WANG K L, MITTLEMAN D M. Metal wires for terahertz wave guiding[J]. *Nature*, 2004, 432(7015): 376 – 379.
- [9] WANG K L, MITTLEMAN D M. Guided propagation of terahertz pulses on metal wires[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2005, 22(9): 2001 – 2008.
- [10] DUPUIS A, MAZHOROVA A, DÉSEVÉDAVY F, et al. Spectral characterization of porous dielectric sub-wavelength THz fibers fabricated using a microstructured molding technique[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13813 – 13828.
- [11] COOPER D E. Picosecond optoelectronic measurement of microstrip dispersion[J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 47(1): 33 – 35.
- [12] PATIMISCO P, SAMPAOLO A, GIGLIO M, et al. Hollow core waveguide as mid-infrared laser modal beam filter[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(11): 113102.
- [13] MATSUURA Y, KASAHARA R, KATAGIRI T, et al. Hollow infrared fibers fabricated by glass-drawing technique[J]. *Optics Express*, 2002, 10(12): 488 – 492.
- [14] BAO H L, NIELSEN K, BANG O, et al. Dielectric tube waveguides with absorptive cladding for broadband, low-dispersion and low loss THz guiding[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 7620.
- [15] LAI C H, HSUEH Y C, CHEN H W, et al. Low-index terahertz pipe waveguides[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(21): 3457 – 3459.
- [16] LAI C H, YOU B, LU J Y, et al. Modal characteristics of antiresonant reflecting pipe waveguides for terahertz waveguiding[J]. *Optics Express*, 2010, 18(1): 309 – 322.
- [17] AMSANPALLY B D A, CHAFER M, BAZ A, et al. Ultralow transmission loss in inhibited-coupling guiding hollow fibers[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 209 – 217.
- [18] BELARDI W, KNIGHT J C. Hollow antiresonant fibers with low bending loss[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 10091 – 10096.
- [19] POLETTI F, PETROVICH M N, RICHARDSON D J. Hollow-core photonic bandgap fibers: technology and applications[J]. *Nanophotonics*, 2013, 2(5/6): 315 – 340.
- [20] RUSSELL P S J, HÖLZER P, CHANG W, et al. Hollow-core photonic crystal fibres for gas-based nonlinear optics[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4): 278 – 286.
- [21] VOGT D W, ANTHONY J, LEONHARDT R. Metallic and 3D-printed dielectric helical terahertz waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 33359 – 33369.
- [22] KAMATA K, PIAO Z Z, SUZUKI S, et al. Spirulina-templated metal microcoils with controlled helical structures for THz electromagnetic responses[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4(1): 4919.
- [23] ANTHONY J. Characterization of novel designs of Terahertz fibers[D]. New Zealand: The University of Auckland, 2013.
- [24] TOMITA H, HASHIMOTO K, TAKEYA K, et al. Development of a terahertz wave circular polarizer using a 2D array of metallic helix metamaterial[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(9): 2232 – 2235.
- [25] 何晴, 黄文. 片上自卷曲太赫兹三维螺旋阵列天线仿真设计 [J]. *微波学报*, 2020, 36(S1): 302 – 305.
- [26] 郭林, 潘杰. 一种基于微纳米加工技术的新型太赫兹片上螺旋天线 [J]. *电子器件*, 2017, 40(2): 276 – 279.
- [27] BALANIS C A. *Antenna theory: analysis and design*[M]. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2016.

(编辑: 钱紫衡)