

低损耗太赫兹波导及其成像应用

李帅¹, 戴子杰¹, 高翔², 占涛¹, 赵得龙¹, 龚诚^{1*}, 刘伟伟¹

(南开大学 现代光学研究所, 天津 300350;

2. 天津市交通运输工程质量安全监管总站, 天津 300384)

摘要: 高性能的太赫兹功能器件在太赫兹波的产生、传输及探测上都有着重要意义。报道了一种 Kagome 型低损耗太赫兹波导及其成像应用。首先根据反谐振波导理论设计了 0.1 THz 处低损耗的太赫兹波导, 其理论损耗低至 0.012 cm^{-1} 。然后使用 3D 打印技术制备波导实物, 实验测得其损耗为 0.0153 cm^{-1} , 波导末端光束发散角为 $6 \pm 0.5^\circ$ 。最后基于该波导搭建了可重构太赫兹成像装置, 分别实现了对隐藏刀片、矿石的反射和透射成像, 在地下远距离勘探领域具有潜在的应用前景。

关键词: 太赫兹波导; 太赫兹成像; 透射成像; 反射成像

中图分类号: O43 文献标识码: A

Low-loss terahertz waveguide and its imaging application

LI Shuai¹, DAI Zi-Jie¹, GAO Xiang², ZHAN Tao¹, ZHAO De-Long¹, GONG Cheng^{1*}, LIU Wei-Wei¹

(1. Nankai University, Institute of Modern Optics, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Transportation Engineering Quality and Safety Supervision Station, Tianjin 300384, China)

Abstract: High-performance terahertz functional devices have great significance in the generation, transmission and detection of terahertz waves. This paper reports a Kagome-type low-loss terahertz waveguide and its imaging applications. Firstly, anti-resonant waveguide theory was used to design a Kagome terahertz waveguide with low loss transmission at 0.1 THz, which has a theoretical loss as low as 0.012 cm^{-1} . Secondly, the waveguide was fabricated by 3D printing technology. The experimental loss is 0.0153 cm^{-1} , and the beam divergence angle at the end of the waveguide is about 6 ± 0.5 degree. Finally, a reconfigurable terahertz imaging system was set up based on the waveguide, which realizes reflection and transmission imaging for a hidden blade and ore respectively. This technology has great application prospects in the underground long-distance exploration.

Key words: terahertz waveguide, terahertz imaging, transmission imaging, reflection imaging

PACS: 42

引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波通常指频率介于 0.1 ~ 10 THz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 的电磁辐射^[1]。近二十年来, 得益于太赫兹辐射源、太赫兹传输波导以及太赫兹探测器等各类太赫兹功能器件的发展^[2,3], 太赫兹科学技术研究日益成熟。由于太赫兹波对大多数

非极性材料的透视性, 并且其光子能量低, 在覆盖生物大分子振动和转动能级的同时不会对生物样品造成电离损伤^[4]。因此太赫兹波在无损伤检测^[5]、生物医学^[6]、国防安全^[7]等领域具有重大的应用前景。

目前限制太赫兹技术应用的主要难题在于自由空间传输过程中水蒸气吸收及气体分子散射等因素会对太赫兹波造成较大的损耗。因此开展对太赫兹

收稿日期: 2018-04-13 修回日期: 2018-12-15

Received date: 2018-04-13 revised date: 2018-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(61505087, 11574160); 国家重点研发计划(2018YFB0504400)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (61505087, 11574160); National key research and development program (2018YFB0504400)

作者简介 (Biography): 龚诚 (1984-) 男, 重庆人, 讲师, 博士学位, 主要研究领域为超材料, 毫米波及太赫兹成像。E-mail: gongcheng@nankai.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: gongcheng@nankai.edu.cn

波低损耗传输波导的研究就显得及其重要^[8]. 2004 年美国莱斯大学的 K. L. Wang 等人首先提出太赫兹金属线传输波导, 太赫兹波经由金属十字交叉结构耦合进金属线中并以索末菲表面波的形式向前传输, 其中金属线波导虽然可以实现以较低的损耗 (0.1 THz 下损耗为 0.07 cm^{-1}) 和色散传输太赫兹波, 但是极低的耦合效率也限制了其发展^[9]. 2008 年, 来自中国台湾的学者 J. Y. Lu 等人首次报道了 Kagome 型的太赫兹波导器件, 其使用 Teflon 材料制备了中心为大空气孔, 外围以小空气孔环绕排布的结构, 实现了 $0.2 \sim 0.8 \text{ THz}$ 波段内的低损耗传输^[10]. 2016 年 J. Yang 等人使用 3D 打印技术制备出保护层为圆形, 包层为小空气孔环绕排布为六边形的 Kagome 结构太赫兹波导, 并实验证明了该类型波导管的机械拼接损耗极小, 在 $0.2 \sim 1 \text{ THz}$ 波段内损耗可低至 0.02 cm^{-1} ^[11]. 众多学者对太赫兹波导器件的研究极大地推动了太赫兹波以低损耗低色散小型集成化等优点方向发展.

在太赫兹波成像研究方面, 早在 1995 年, 来自美国贝尔实验室的 Nuss 等人利用脉冲太赫兹扫描成像的方式首次实现了对树叶脉络与 IC 芯片内部结构的太赫兹成像^[12]. 2003 年, 张希成等人搭建了第一台连续太赫兹波成像系统, 实现了对航天飞机材料的无损检测^[13]. 此后基于激光差频、耿氏二极管以及量子级联激光器等技术的高功率连续太赫兹源相继出现^[14-16], 极大促进了太赫兹成像技术在安全检查^[17]、古文物艺术品检测^[18]等领域上的广泛应用.

本文介绍了一种低损耗太赫兹波导及其成像应用. 首先基于反谐振波导理论设计了在 0.1 THz 处低损耗传输的 Kagome 型太赫兹波导, 理论损耗低至 0.012 cm^{-1} ; 然后使用 3D 打印技术制备波导实物, 实验测得损耗为 0.0153 cm^{-1} ; 并使用该波导搭建一套可重构的太赫兹成像系统. 低损耗波导的引入不仅可以降低太赫兹波的传输损耗, 还可以有效地将波导末端出射的太赫兹光束发散角约束至 6° 左右, 可实现太赫兹波的远距离传输与波导末端可重构成像系统的搭建. 最后基于该系统实现了对隐藏的刀片及矿石的太赫兹成像, 分辨率可达 3 mm . 这项技术在建筑工程质检, 以及矿产资源勘探领域上具有重要应用前景.

1 波导材料参数表征

本文选用天威公司, 型号为: 1.0 Plus 3D 的 3D

打印机来制备太赫兹波导, 材料选用 3D 打印常用材料: PLA. 首先采用太赫兹时域光谱仪 (THz-TDS) 对该 PLA 材料进行太赫兹波段的参数表征. 制备直径 4 cm 高度 1.5 mm 的圆柱体材料, 测量了该体材料的太赫兹时域脉冲, 将时域数据进行快速傅里叶变换 (FFT) 得到其在频域上的数据信息, 进而计算出该 PLA 材料在太赫兹波段上的折射率及吸收损耗系数.

材料的折射率和吸收损耗系数可由下列公式计算所得^[11]:

$$n_{sam}(\omega) = \frac{\Delta\varphi(\omega)c}{\omega l} + n_{ref} \quad (1)$$

其中 $\Delta\varphi(\omega) = \varphi_{sam} - \varphi_{ref}$ 为实验测得的材料和参考物的相位差, 其中材料厚度和空气折射率分别是 $l = 1.5 \text{ mm}$, $n_{ref} = n_{air} = 1$.

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{l} \ln \left[\frac{I_{ref}(\omega)}{I_{sam}(\omega)} \right] + \frac{2}{l} \ln \left\{ \frac{4n_{sam}(\omega)}{[n_{sam}(\omega) + n_{ref}]^2} \right\} \quad (2)$$

式中 $\alpha(\omega)$ 代表材料的吸收损耗系数, I_{ref} 和 I_{sam} 分别为空气参考物和 PLA 材料下测得的太赫兹信号强度. 该 PLA 材料的折射率和吸收损耗系数计算结果如图 1(a) 和 (b) 所示, 由图 1(a) 可知该材料的色散系数较小, $0.2 \sim 1 \text{ THz}$ 处的折射率基本保持不变, 而 0.2 THz 以下的折射率波动很大则是由 THz-TDS 光电导天线的自身缺陷所导致, 故我们可以取 $0.1 \sim 1 \text{ THz}$ 波段内该材料的折射率约为: 1.641 ; 由图 1(b) 可知, 该材料在 0.1 THz 处的吸收损耗系数为: 0.6701 cm^{-1} .

2 太赫兹波导设计及制备

提出了如图 2(a) 所示的 Kagome 型太赫兹传输波导, 该类型波导的传输机制可由反谐振波导模型来解释如下: 就是把高折射率的包层区域介质层看作一个法布里帕罗谐振腔. 纤芯为低折射率区域, 电磁波从纤芯区域泄露到较高折射率的介质层内, 在介质层中产生振荡, 我们通过设计包层的厚度来控制电磁波是否在法布里帕罗腔内产生谐振, 若包层的厚度满足谐振条件时, 电磁波能量基本透射入包层内, 造成波导的高损耗; 反之, 若包层的厚度满足反谐振条件, 光可以反射回低折射率的纤芯区域内, 从而实现电磁波在纤芯中的低损耗传输^[19]. 如图 2(a) 所示: 波导中心的大空气孔作为纤芯, 外围两层小空气孔以六边形环绕的形式作为包层结构, 其中包层壁厚与高损耗频率之间满足反谐振理论公式:

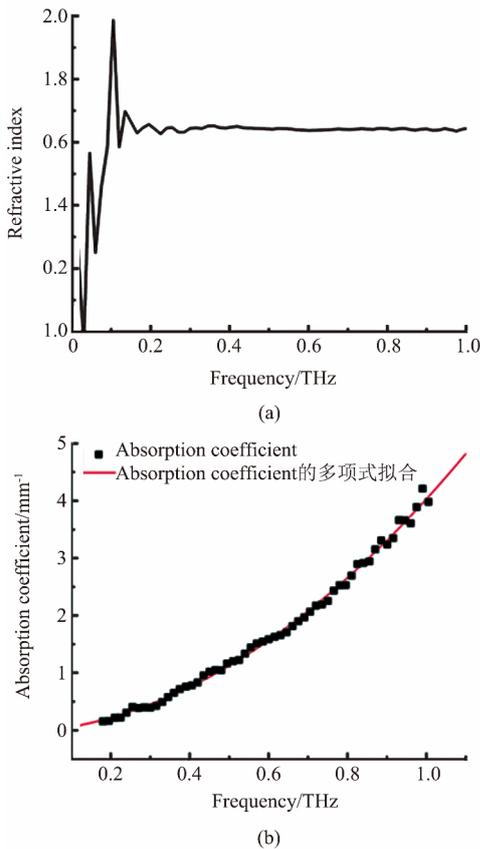


图1 PLA材料参数表征: (a) PLA材料的折射率, (b) PLA材料的吸收系数
Fig. 1 Characteristics of PLA polymer: (a) Refractive index of PLA, (b) Absorption coefficient of PLA

$$f_m = \frac{mc}{2t \sqrt{n_{sam}^2 - 1}} \quad , \quad (3)$$

其中: m 为常数, c 为光速, t 为包层空气孔的壁厚, n_{sam} 为材料的折射率.

由反谐振波导模型可以预测: 对于 PLA 材料, 其折射率为 1.641, 当壁厚尺寸设计为 0.77 mm 时, 对应的反谐振高损耗频率为 0.15 THz, 从而可以实现 0.1 THz 频率处为低损耗传输.

使用 Comsol Multiphysics 仿真 0.1 THz 频率处的太赫兹波基模场分布, 结果如图 3(a) 所示. 0.1 THz 频率处的 HE_{11} 模式基模场很好地束缚在波导纤芯中, 基本没有泄露. 此时仿真计算得到基模的有效折射率为: $n_{eff} = 0.992749 - i2.80833 \times 10^{-4}$, 损耗与有效折射率的虚部之间的关系可由公式(4)得到:

$$\alpha = \frac{-2\omega b}{c} = \frac{-4\pi b}{\lambda} (\text{cm}^{-1}) \quad , \quad (4)$$

式中 b 为模式传输的有效折射率的虚部数值, λ 为

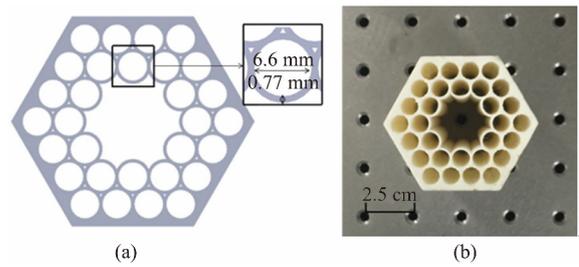


图2 (a) 波导横截面设计图, (b) 波导实物图
Fig. 2 (a) Cross section of waveguide design, (b) Photograph of fabrication waveguide

对应的太赫兹波的波长. 根据基模的有效折射率虚部可得 0.1 THz 处损耗系数约为 0.012 cm^{-1} , 该值远小于 PLA 材料在 0.1 THz 处的吸收损耗系数: 0.6701 cm^{-1} .

接下来, 我们使用 3D 打印机制备出上述结构参数下长短不一的数根波导样品, 并实验测试其损耗. 结果如图 3(b) 所示: 其实验测得损耗为: 0.0153 cm^{-1} . 其误差主要来源于 3D 打印精度、室内水蒸气 (实验环境湿度: $36.3\% \pm 1\%$) 的吸收及实验过程中太赫兹源及探测器的抖动等因素.

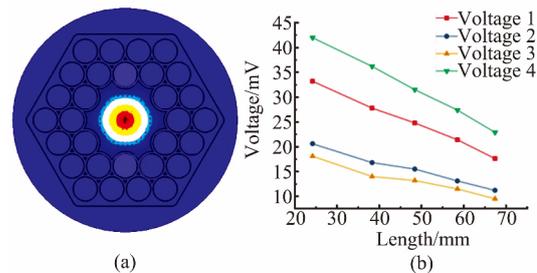


图3 (a) 仿真纤芯基模场分布; (b) 实测波导损耗
Fig. 3 (a) Simulated core fundamental mode distribution; (b) The experimental waveguide loss

3 基于波导的成像实验

图 4(a) 为所搭建太赫兹透射成像系统的示意图. 基于雪崩二极管的太赫兹源 S 辐射太赫兹波 (频率为 0.1 THz, 功率为 81.06 mW) 进入 Kagome 波导中传输 (波导长度 80 cm), 波导末端的太赫兹波经由离轴抛物面镜 OAP 聚焦, 成像样品置于焦点位置处, 透过样品的太赫兹信号由肖特基二极管 D 进行探测, 然后经由数据采集卡 DAQ 采集数据并传送到电脑终端处理. 在成像过程中, 样品放置于二维电控平移台上, 实现对样品的逐点扫描, 以获取样品的透射太赫兹成像.

由于太赫兹源 S 辐射的太赫兹波发散角较大 (18°), 且空气中的水蒸气对太赫兹波的强吸收作用, 导致该太赫兹源很难适用于远距离成像, 而将太赫兹波耦合进 Kagome 波导中, 太赫兹波则以 0.0153 cm^{-1} (实验数据) 的损耗束缚于波导纤芯中向前传播, 使用肖特基二极管 D 在长约 80 cm 长度的波导末端不同位置处进行二维扫描, 即可得到太赫兹波光斑在不同传播距离上的大小分布, 限制于太赫兹波的探测手段与扫描方式, HE_{11} 模式光斑扫描结果如图 5 (a) 所示呈类似椭圆形, 故分别取其光斑在长轴 (L)、短轴 (S) 上的半高全宽 (FWHM) 作为光斑尺寸. 由图 5 (b) 可以看出: 经波导的束缚传播 80 cm 后, 波导末端的太赫兹波光束发散角约束至 6° 左右, 远小于太赫兹源端口处的光束发散角.

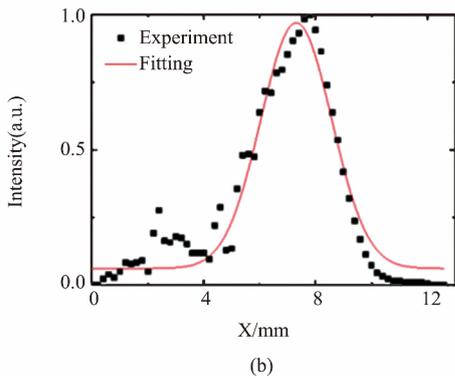
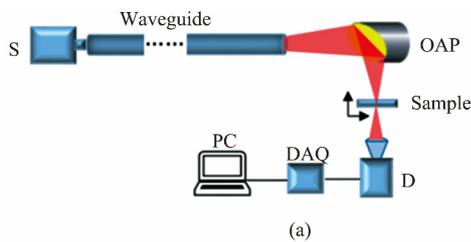


图 4 (a) 太赫兹波透射成像系统示意图, (b) 焦点处太赫兹光斑大小
Fig.4 (a) Schematic of terahertz wave transmission imaging system, (b) Terahertz spot size at the focal point

成像的空间分辨率直接由太赫兹光斑的大小所决定, 由于雪崩二极管太赫兹源的频率为 0.1 THz, 相应的波长为 3 mm, 因此经由离轴抛物面镜聚焦后的 THz 光斑直径不小于 3 mm. 采用刀片法测得焦点位置处的光斑如图 4 (b) 所示, 光斑的半高全宽, 相关度, 符合高斯型能量分布, 满足成像需求. 该系统成像效果如图 6 所示, 其中图 6 (a) 是对隐藏的刀片成像, 能够清晰地探测到藏匿于纸板中的刀片. 图 6

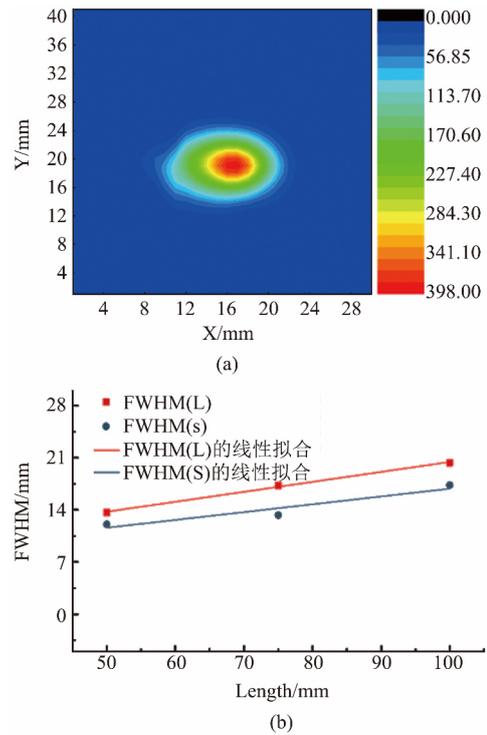


图 5 波导末端发散角测量: (a) 距离波导末端 5 cm 位置处的太赫兹场分布, (b) 发散角测量结果
Fig.5 The measurement of divergence angle at the waveguide end; (a) Terahertz spot distribution at 5 cm, (b) Divergence angle measurement result

(b) 是对矿石成像, 左图黑色矩形方框内为成像区域, 成像结果显示此装置可以实现对矿石轮廓的成像.

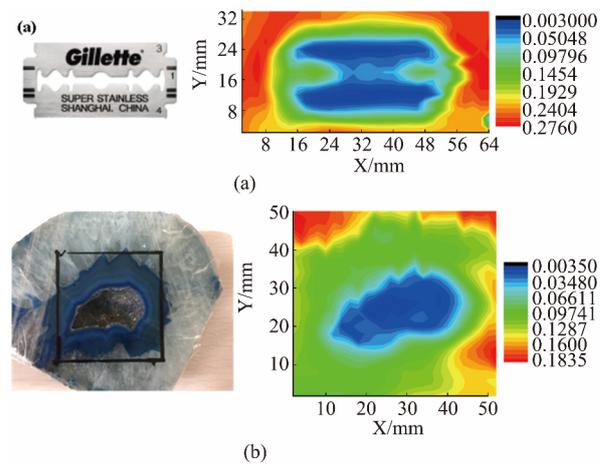


图 6 太赫兹波透射成像效果图: (a) 刀片成像, (b) 矿石成像
Fig.6 Terahertz wave transmission imaging: (a) Blade imaging, (b) Ore imaging

一些对太赫兹波吸收较强的样品, 透射太赫兹波较弱, 此时太赫兹反射成像更具优势. 通过对透射式

太赫兹成像系统进行简单变换即可实现反射式太赫兹成像. 图 7 (a) 给出了太赫兹波反射成像的系统示意图, 太赫兹波经由波导传输后, 入射到 45° 斜置的高阻硅半透半反镜上. 同样利用刀片法, 找到硅片反射太赫兹波的焦点位置, 将太赫兹探测器放置于此处.

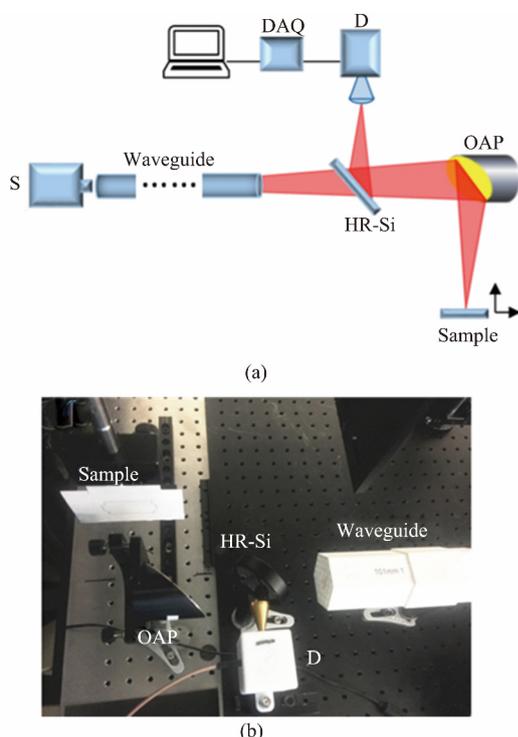


图 7 太赫兹波反射成像系统: (a) 示意图, (b) 实物图
Fig. 7 Terahertz wave reflection imaging system: (a) Schematic diagram, (b) Photograph of reflection imaging system

首先对隐藏于纸板中的刀片成像, 实物装置如图 7 (b) 所示, 在成像过程中固定 THz 源与探测器, 对置于平移台上的样品进行二维扫描, 得到刀片的太赫兹反射成像图如图 8 (a) 所示, 同样地方法可得矿石的太赫兹反射成像图如图 8 (b)。

由实验结果可知, 无论是太赫兹透射成像系统, 还是太赫兹反射成像系统都能实现对刀片、矿石的成像, 这在安全检查、矿产勘探等领域具有良好的应用前景. 值得一提的是, 整套实验装置中使用了长约 80 cm 的 Kagome 型低损耗太赫兹波导, 实现较远距离传输的同时也较大程度上缩小了太赫兹光束的发散角, 这为波导末端扫描成像系统的搭建起到关键性作用, 这也为便携式集成化成像系统的研发提供了有益思路.

4 总结

介绍了一种 Kagome 型低损耗太赫兹波导及其

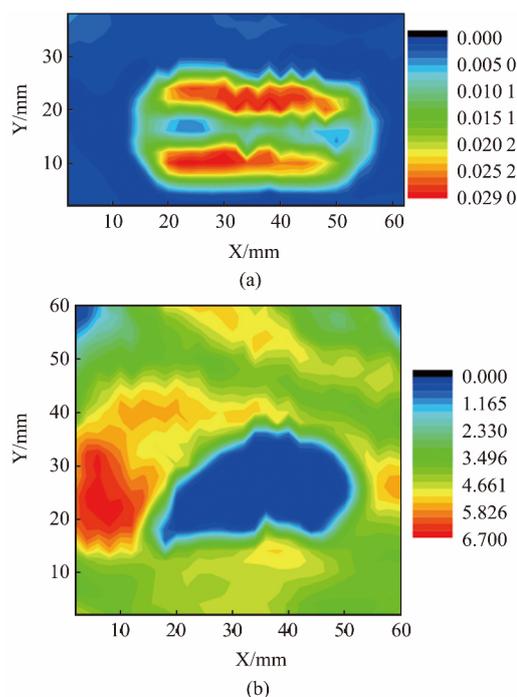


图 8 太赫兹波反射成像效果图: (a) 刀片成像, (b) 矿石成像

Fig. 8 Terahertz wave reflection imaging: (a) Blade imaging, (b) Ore imaging

在成像领域的应用. 首先利用反谐振波导理论公式, 设计并仿真了 0.1 THz 处的低损耗传输波导, 理论损耗低至 0.012 cm^{-1} , 使用 3D 打印加工技术制备出波导实物, 实验测得损耗为 0.0153 cm^{-1} . 然后利用该波导搭建了一套可重构的太赫兹成像系统, 分别对隐藏的刀片以及矿石实现了反射和透射式成像, 分辨率可达 3 mm. Kagome 波导的引入不仅降低了太赫兹波在空气中的传输损耗, 还有效地束缚了太赫兹波出射的孔径角, 且装置可通过任意延伸波导管长度以达到远距离成像的目的, 未来可通过对可弯曲的柔性太赫兹波导的研制来实现远程太赫兹成像. 这对太赫兹波的传输、操控、探测提供了新的手段和思路; 也推动了太赫兹成像在安全检查、矿产资源勘探、建筑工程质检等领域上的应用.

References

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Physics*, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [3] Lee Y. Principles of Terahertz Science and Technology [M]. *Springer US*, 2009, 17(6): 47-47.
- [4] LIU Sheng-gang, ZHONG Ren-bin. Recent Development of Terahertz Science and Technology and It's Applications [J]. *Journal of university of electronic science and technolo-*

- gy of china ,2009 ,**38**(5) : 481-486.
- [5] Kawase K. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints [J]. *Optics Express* , 2003 , **11**(20) : 2549-2554.
- [6] Woodward R M , Cole B E , Wallace V P , et al. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of human skin cancer and skin tissue [J]. *Physics in Medicine & Biology* , 2002 , **47**(21) : 3853-3863.
- [7] Cooper K B , Dengler R J , Lombart N , et al. Penetrating 3-D imaging at 4-and 25-m range using a submillimeter-wave radar [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* , 2008 , **56**(12) : 2771-2778.
- [8] Gallot G , Jamison S P , McGowan R W , et al. Terahertz waveguide [J]. *Journal of the Optical Society of America B* , 2000 , **17**(5) : 851-863.
- [9] Mittleman D M , Wang K L. Metal wires for terahertz wave guiding [J]. *Nature* , 2004 , **432**(7015) : 376-379.
- [10] Lu J Y , Yu C P , et al. Terahertz air-core microstructure fiber [J]. *Applied Physics Letters* 2008 , **92**(6) : 5263-400.
- [11] Jing Yang , Jiayu Zhao , Cheng Gong , et al. 3D printed low-loss THz waveguide based on Kagome photonic crystal structure [J]. *Optical Express* , 2016 , **24**(20) : 22454.
- [12] Hu B B and Nuss M C . Imaging with terahertz waves [J]. *Optics Letters* , 1995 , **20**(16) : 1716.
- [13] Catherine Z. THz imaging of space shuttle foam [J]. *Nature* , 2003 , **14**: 721-722.
- [14] Siebert K J , Quast H , et al. Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging [J]. *Applied Physics Letters*. 2002 , **80**(16) : 3003-3005.
- [15] Darmo J , Tamosiunas V , Fasching G , et al. Imaging with a terahertz quantum cascade laser [J]. *Optics Express* , 2004 , **12**(9) : 1879-1884.
- [16] Dobroiu A , Yamashita M , Ohshima Y N , et al. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator [J]. *Applied Optics* , 2004 , **43**(30) : 5637-46.
- [17] Duling I , Zimdars D. Terahertz imaging revealing hidden defects [J]. *Nature Photonics* , 2009 , **3**(11) : 630-632.
- [18] Flammini M , Bonsi C , Ciano C , et al. Confocal Terahertz Imaging of Ancient Manuscripts [J]. *Journal of Infrared , Millimeter , and Terahertz Waves* , 2017 , **38**: 1-8.
- [19] Duguay M A , Kokubun Y , Koch T L , et al. Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures [J]. *Applied Physics Letters* , 1986 , **49**(1) : 13-15.