

# 4 种三维打印材料的太赫兹光谱特性检测与分析

李帅<sup>1,2,3,4</sup>, 赵国忠<sup>1,2,3,4\*</sup>, 郭姣艳<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>首都师范大学物理系, 北京 100048;

<sup>2</sup>北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048;

<sup>3</sup>北京市成像理论与技术高精尖创新中心, 北京 100048;

<sup>4</sup>太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

**摘要** 对常用的 4 种三维(3D)打印材料进行了太赫兹光谱检测与分析。实验结果表明:4 种 3D 打印材料在 0.20~2.60 THz 范围内差异明显,其中 3D 打印聚碳酸酯材料对太赫兹光的透过率最高;4 种材料的折射率在 1.45~1.65 之间,光敏树脂的折射率最大,在 1.62 左右;4 种材料的介电常数实部在 2.20~2.75 之间,虚部在 0.05~0.35 之间;从吸收谱上看,4 种材料都没有吸收峰并且吸收较小。该研究为利用 3D 打印材料制作太赫兹器件的材料选取提供了重要的参考。

**关键词** 太赫兹技术; 光谱学; 三维打印材料; 检测

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614025

## Terahertz Spectral Measurement and Analysis for Four Three-Dimensional Printing Materials

Li Shuai<sup>1,2,3,4</sup>, Zhao Guozhong<sup>1,2,3,4\*</sup>, Guo Jiaoyan<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup>Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory of Terahertz Spectroscopy and Imaging, Beijing 100048, China;

<sup>3</sup>Beijing Advanced Innovation Center of Imaging Theory and Technology, Beijing 100048, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China

**Abstract** Herein, terahertz spectra of four kinds of commonly used three-dimensional (3D) printing materials are detected and analyzed. Experiments show that these printing materials have obvious differences in the range of 0.20~2.60 THz. The transmittance of 3D printing polycarbonate measured in terahertz is highest. The refractive index of the four materials ranges from 1.45 to 1.65, and the refractive index of the photosensitive resin is the highest, which is approximately 1.62. The real and imaginary parts of the dielectric constant of these materials range from 2.20 to 2.75 and from 0.05 to 0.35, respectively. From the viewpoint of the absorption spectra, there are no absorption peaks among the four materials. This study lays the foundation for the selection of materials for 3D printed terahertz devices.

**Key words** terahertz technology; spectroscopy; three-dimensional printing materials; measurement

**OCIS codes** 300.6495; 130.3060; 160.5470

## 1 引 言

太赫兹 (THz) 波通常是指频率范围为 0.1~10 THz (波长范围为 0.03~3 mm) 波段的电磁波<sup>[1]</sup>, 它的长波段与毫米波 (亚毫米波) 相重合, 而它的短波段与红外线 (远红外) 相重合, 所以 THz 波与

可见光、红外线、微波等其他波段的电磁波相比具有很多独特的性质, 有着潜在的应用价值和前景。

随着近年来对 THz 技术研究的深入, 研究人员在 THz 辐射源和探测器方面的研究不断取得新的发现与突破, 使 THz 科学技术发生了深刻的变革<sup>[2]</sup>。伴随着这些发展, THz 技术在系统成像<sup>[3]</sup>、生物医学、

收稿日期: 2019-02-14; 修回日期: 2019-04-15; 录用日期: 2019-04-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61575130)

\* E-mail: guozhong-zhao@126.com

通信、无损检测<sup>[4]</sup>等领域都有着广泛应用。

THz波的应用离不开THz器件的支撑,大部分在光波段透明的传统透镜材料,如玻璃等,由于本征介电损耗太高而无法应用于THz器件中,但某些聚合物材料(如高密度聚乙烯、聚四氟乙烯、聚丙烯等<sup>[5]</sup>)对THz波的透过性很好,可以用于制作THz透镜等器件,但是以上这些传统的THz器件制造过程复杂且时间长,因此发展一种简单有效的THz器件加工技术是非常必要的<sup>[6]</sup>。

三维(3D)打印是一项正在制造业领域迅速发展新兴技术,被称为“具有工业革命意义的制造技术”<sup>[7]</sup>。3D打印是一个从计算机模型直接到制造成型的过程,它以数字模型文件为基础,通过连接计算机与3D打印设备将数字模型直接输入到3D打印设备中,打印机运用粉末状金属或者塑料等材料,通过逐层打印的方法来构造3D实体,这给样品的快速成型带来无限可能<sup>[8-10]</sup>。经过多年的发展,3D打印技术已广泛应用于电子、医疗、航天等领域<sup>[11]</sup>。

目前,使用3D打印技术加工THz器件已经得到较大的关注,Cruz等<sup>[12]</sup>用3D打印技术打印出具有复杂内核结构的THz波导。实验结果表明:与块状材料的吸收损耗(约78 dB/cm)相比,这些打印的THz波导的传播损耗只有0.30 dB/cm。Gospodaric等<sup>[13]</sup>设计并打印制作了一种THz全息板,实验结果显示:这种全息版可以调制140 GHz频率的入射高斯光束,在探测器平面上产生预期图像。

2015年,Zhang等<sup>[14]</sup>用“FullCure835 VeroWhite”材料<sup>[15]</sup>3D打印了一个工作在THz频率范围的平面凸透镜,并在实验中使用3D场扫描仪测量了透镜在100 mm焦距处的聚焦特性,所得实验结果与仿真结果吻合较好。Wei等<sup>[16]</sup>还设计一种轴棱镜,通过3D打印制作方法,实现了0.30 THz的任意阶贝塞尔光束的生成。

综上所述,3D打印技术展示出独特的优势,用其制作THz器件可以减小成本和耗时,但3D打印技术会导致样品之间存在间隙,体现出全新的材料性质。很多THz器件都选用聚合物材料打印制作,本文选取了目前常用的4种3D打印材料<sup>[17]</sup>,即工程塑料(ABS-M30)、聚碳酸酯(PC)、进口光敏树脂(PSR)和聚乳酸(PLA),进行THz光谱表征,该研究可为3D打印制作THz器件的材料选取提供研究基础和宝贵的材料信息。

## 2 实验系统与3D打印材料样品

THz时域光谱实验系统光路如图1所示,其中

BS为渥拉斯顿棱镜,QWP为1/4波片,L为透镜。飞秒激光器的工作波长为800 nm,输出功率为1.5 W。飞秒激光通过半波片(HWP)和一个偏振分束器(PBS)后被分成两束光:抽运光和探测光。抽运光依次经过由两个反射镜M1、M2组成的平移台延时装置,反射镜M3、M4,以及光学斩波器后,被引入真空腔内,并由反射镜M5、M6和透镜会聚照射在发射晶体砷化铟(InAs)上,InAs晶体表面辐射出THz波。THz波经过离轴抛物面镜PM1收集和PM2会聚后照射在样品上,样品放在PM2和PM3的共焦点上,透过样品后带着样品信息的THz波经过PM3和PM4后被聚集到探测晶体碲化锌(ZnTe)上<sup>[18-19]</sup>。同时探测光经过反射镜M7、M8后等光程照射在ZnTe上,携带样品信息的THz波与探测光会聚在ZnTe同一点,THz电场通过ZnTe时会使这种电光晶体的折射率发生各向异性的改变,这种变化会影响探测激光的偏振,从而可以被差分探头检测出来<sup>[20]</sup>。

环境中的水分子<sup>[21-22]</sup>对THz辐射有着强烈的吸收,因此在进行THz时域光谱测量时,THz脉冲在光路传播的同时部分特定频率的光会被周围环境中的水蒸气吸收,从而使得THz信号总体的强度减弱,导致信噪比减小,测量的频谱分辨率降低<sup>[23]</sup>。利用实验室设备,改建了一套真空THz光谱系统,用机械泵抽真空的方法排除空气,稳定状态下的真空度可以达到1 Pa,减小了水蒸气对THz光谱的影响。真空装置中样品腔室和其他真空部分分离,所以更换样品后只需要对样品室重新抽真空即可,抽真空测量时间为每次3 min,快速高效。该真空THz光谱系统的有效光谱范围是0.20~2.60 THz,信噪比大于1000,动态范围大于10000。

选取4种聚合物材料:ABS-M30、PC、进口PSR和PLA。样品是由北京易速普瑞科技股份有限公司<sup>[24]</sup>打印制作的。打印的样品为直径为13 mm、厚度为1 mm和2 mm的圆形薄片。

PLA材料和ABS-M30、PC材料用熔融沉积(FDM)打印工艺制作。FDM技术是将丝状的热熔性材料加热融化,同时3D喷头在计算机的控制下,根据截面轮廓信息将材料选择性地涂敷在工作台上,快速冷却后形成一层截面。一层成型完成后,机器工作台下下降一个高度(即分层厚度)再成型下一层,直至形成整个实体造型,打印精度为0.20 mm。

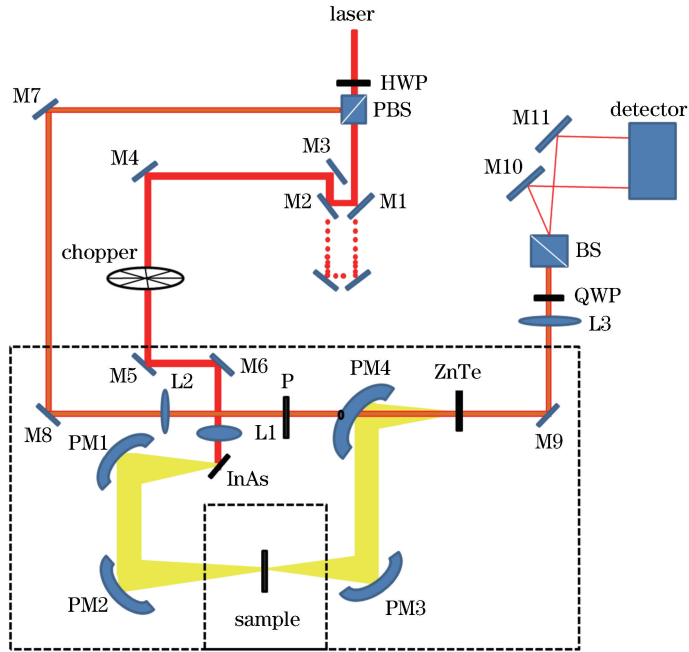


图 1 真空 THz 光谱系统光路图

Fig. 1 Optical path map of vacuum THz spectroscopy system

进口 PSR 型号为 9000, 3D 打印工艺是基于 PSR 的选择性固化打印技术<sup>[25]</sup>。在液槽中充满液态 PSR, 其在激光器所发射的紫外激光束照射下会快速固化, 在成型开始时, 可升降工作台处于液面以下刚好一个截面层厚的高度。利用透镜聚焦后的激光束, 按照机器指令对截面轮廓沿液面进行扫描。扫描区域的树脂快速固化, 从而完成一层截面的加工过程, 得到一层塑料薄片。然后, 工作台下降低一层截面层厚的高度, 再固化另一层截面, 这样层层叠加建构 3D 实体, 这种技术的打印精度为 0.10 mm。

### 3 理论模型

样品光学参数的提取均采用 Duvillaret 等<sup>[26]</sup>提出的模型。复折射率  $\bar{n} = n + ik$  可以描述样品的宏观光学性质, 其中:  $n$  为实折射率, 反映样品的色散特性;  $k$  为消光系数, 反映样品对于电磁波的吸收特性。各类文献中经常提及的吸收系数与消光系数之间的线性关系为

$$\alpha(\omega) = \frac{2\omega k(\omega)}{c}, \quad (1)$$

式中:  $\alpha(\omega)$  为吸收系数;  $\omega$  为角频率;  $c$  为真空中的光速。

首先测量 THz 脉冲通过自由空间传播而得到的波形, 将其作为参考信号, 进行快速傅里叶变换后得到参考信号的频谱  $R(\omega)$ 。然后在光路中放置样

品, 使 THz 脉冲完整地入射到样品表面, 然后测量从样品后表面透射的 THz 波形, 将其作为样品信号, 也通过快速傅里叶变换得到信号频谱  $S(\omega)$ 。两组频谱的比值即为样品对 THz 波的透射率, 即

$$\frac{S(\omega)}{R(\omega)} = \rho(\omega) \cdot \exp[-i\phi(\omega)], \quad (2)$$

式中:  $\rho(\omega)$  为透射系数;  $\phi(\omega)$  为样品信号相对于参考信号的相位差。

通常认为自由空间中空气的折射率为 1, 根据麦克斯韦的电磁理论和菲涅耳方程, 利用弱吸收近似, 推导得到折射率  $n(\omega)$ 、消光系数  $k(\omega)$  和吸收系数  $\alpha(\omega)$  分别为

$$n(\omega) = 1 + \phi(\omega) \cdot \frac{c}{\omega d}, \quad (3)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{2}{d} \ln \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega) \cdot [1 + n(\omega)]^2}, \quad (4)$$

$$k(\omega) = \ln \frac{4n(\omega)}{\rho(\omega) \cdot [1 + n(\omega)]^2} \cdot \frac{c}{\omega d}, \quad (5)$$

式中:  $d$  是样品的厚度。介电常数实部  $\epsilon'$  与虚部  $\epsilon''$  可以通过  $n$  和  $k$  求出:

$$\epsilon' = n^2 - k^2, \quad (6)$$

$$\epsilon'' = 2nk. \quad (7)$$

### 4 结果与分析

利用上述 THz 时域光谱系统, 测量了 4 种

1 mm厚的3D打印材料样品的THz谱。图2是4种3D打印材料的THz时域谱,从时域谱中可以看出,每种样品对THz信号的衰减各不相同:从信号的峰-峰值来看,PC对THz波的衰减最小,只衰减到参考信号的48.0%;THz波透过ABS之后衰减到参考信号的43.9%,透过PSR之后衰减到参考信号的38.2%;THz波透过PLA之后衰减最大,只有原来参考信号的29.3%。

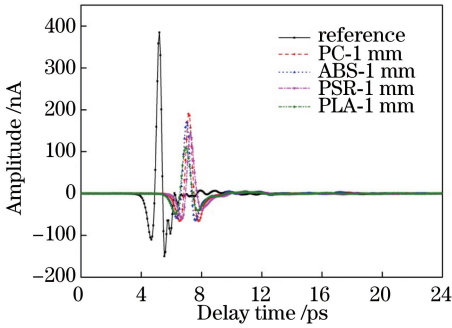


图2 4种3D打印材料的THz时域谱  
Fig. 2 THz time domain spectra of four kinds of 3D printing materials

图3是上述时域谱经过快速傅里叶变换后得到的频域振幅谱。从图中可以看出,振幅信号相对参考信号来说,4种材料的截止频率有所不同,导致有效光谱频率范围减小。PLA在1.80 THz处的幅值最先衰减到0,所以PLA的光谱信息在0.20~1.80 THz内有效;ABS和PSR在大于2.30 THz的幅值接近于0,所以PLA的光谱信息在大于2.30 THz后无效。

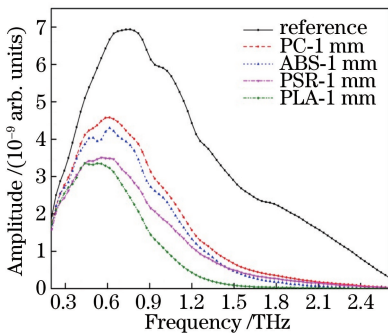


图3 4种3D打印材料的频域振幅谱  
Fig. 3 Frequency domain amplitude spectrum of four kinds of 3D printing materials

图4是4种材料的THz透过率谱,4种3D打印样品透过率各不相同,结果显示随着频率的升高,透过率逐渐下降。可以看出:PC透过率最高;ABS次之;PSR在小于0.20 THz范围内的透过率比ABS低,但是超过1.46 THz之后,PSR透过率高于

ABS;PLA在大于1.80 THz范围内的透过率接近于0,说明高频THz信号不能透过PLA样品。

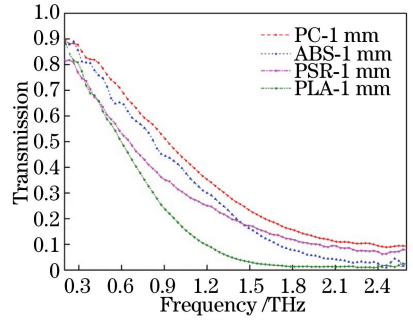


图4 4种3D打印材料的透过率谱  
Fig. 4 Transmittance spectra of four kinds of 3D printing materials

图5给出了4种材料的THz折射率谱,结果表明:PSR的折射率较大,在1.63左右,且随着频率的增大,折射率从1.66缓慢减小到1.60;PC和ABS则比较平稳,在1.20~2.40 THz范围,ABS折射率缓慢增大;PLA材料在低频0.20~0.70 THz范围内与ABS相差不大,但是由于透过率衰减较大,折射率在大于1 THz的范围内明显减小,在1.80 THz处减小到1.45。

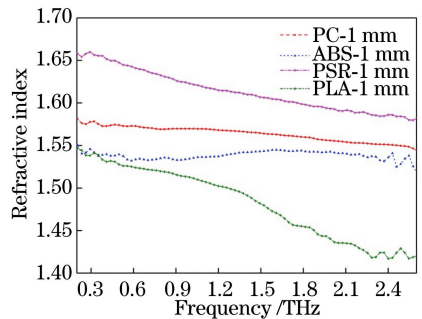


图5 4种3D打印材料的折射率谱  
Fig. 5 Refractive index spectra of four kinds of 3D printing materials

图6是4种材料的THz吸收谱,4种打印材料的吸收系数随着频率的增大缓慢增加。PC吸收最小;ABS和PSR吸收相接近,但是ABS在0.20~1.46 THz范围内的吸收小于PSR,在1.46~2.60 THz范围内又高于PSR;ABS材料在2.40 THz有一个明显吸收峰,根据频域图和透过率图,由于信号在2.40 THz时的透过率接近于0,此处判断为误差噪声;PLA材料在0.20~1.80 THz范围内的吸收相对较大。

为了进一步分析4种3D打印材料在THz波段的光学性质,计算了相应的介电常数实部和虚部。



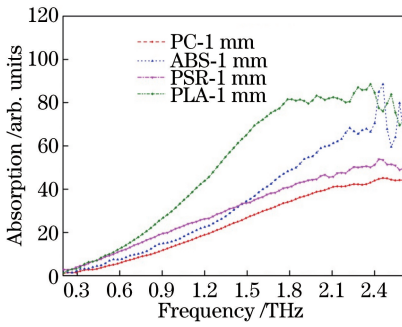


图 6 4 种 3D 打印材料的吸收谱

Fig. 6 Absorption spectra of four kinds of 3D printing materials

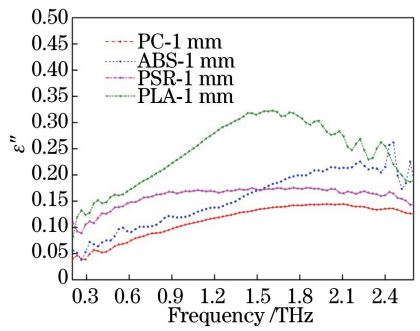


图 8 4 种 3D 打印材料的介电常数虚部

Fig. 8 Imaginary part of dielectric constant of four 3D printing materials

图 7 和图 8 分别给出了 4 种材料的介电常数实部  $\epsilon'$  和介电常数虚部  $\epsilon''$ , 介电常数反映了电介质与电磁波相互作用的特征。图 7 表明 4 种材料的介电常数实部  $\epsilon'$  随着频率的升高都呈现下降趋势, 介电常数实部  $\epsilon'$  在 2.20~2.75 之间, 说明 4 种材料都是非极性物质。PSR 展示出最大的介电常数, 其次是 PC, ABS 与 PC 的介电常数相接近, PLA 展示出较小的介电常数, 且在 1.20~1.80 THz 频率范围内剧烈下降。图 8 表明介电常数虚部  $\epsilon''$  随着频率的增加而缓慢增大; PLA 的  $\epsilon''$  最大, 在 1.50 THz 频率下,  $\epsilon''$  为 0.34; PC 材料的  $\epsilon''$  最小, 随着频率升高只是缓慢增大, 从 0.05 增加到 0.10; ABS 和 PSR 的  $\epsilon''$  介于 PLA 和 PC 之间。

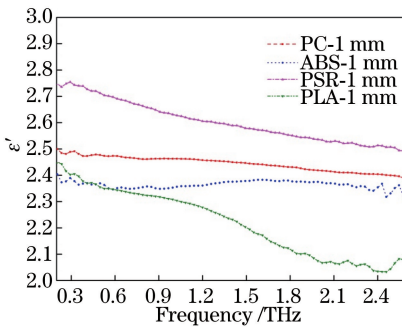


图 7 4 种 3D 打印材料的介电常数实部

Fig. 7 Real part of dielectric constants of four 3D printing materials

作为比较, 还测量了 3D 打印的 2 mm 厚的同种材料光谱, 如图 9、10 所示。从图 9 可以看出, 对于 2 mm 厚的样品, THz 信号透过样品后峰-峰值衰减更大, THz 信号透过 2 mm 厚的 PC、ABS、PSR 和 PLA 后分别衰减至参考信号的 30.7%、27.1%、21.1% 和 21.3%。

相比于 1 mm 厚样品的信号, 2mm 厚的 4 种材料对 THz 信号的衰减也不同。PC 减少了 36.3%,

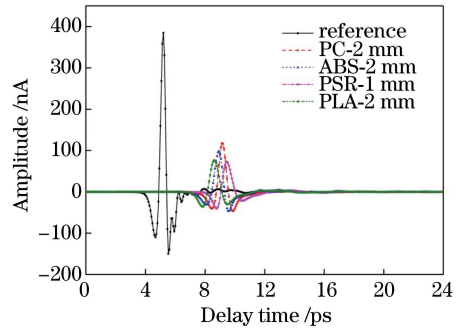


图 9 参考振幅图和 4 种 3D 打印材料的频域振幅谱

Fig. 9 Amplitudes in frequency domain of reference and four kinds of 3D printing materials

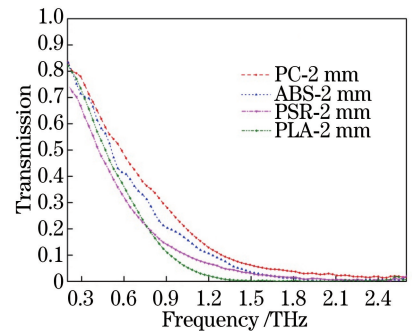


图 10 4 种 3D 打印材料的透过率谱

Fig. 10 Transmittance spectra of four 3D printing materials

ABS 减少了 38.3%, PSR 减少了 45.2%, PLA 减少了 28.6%。这说明随着样品厚度的增加, THz 信号损失更多。

从图 10 的透过率谱可以看出, 4 种材料透过率依旧随着频率的增加呈直线下降, 只是信号幅值到 0 的截止频率有所提前。1 mm 厚的样品中只有 PLA 在 1.80 THz 处的透过率为 0, 而 2 mm 厚的样品中只有 PC 的透过率没有到 0, 但是大于 2 THz 范围内接近于 0; ABS 和 PSR 在 1.80 THz 处的透过率也接近 0, 而 PLA 在 1.30 THz 处的透过率就

已经是0。可见:样品厚度的增加不仅会让 THz 信号的幅度快速衰减,还会使本来能透过的高频信号不能透过厚样品。

图 11 是 1 mm 厚样品和 2 mm 厚样品的折射率谱。通过对比发现,同一种材料样品的折射率是固定的,但也有细微差别,原因在于:折射率光学参数的提取包含着样品厚度信息,打印精度的问题造成样品厚度不是精确的 2 mm。通过计算 1 mm 厚和 2 mm 厚材料折射率的相对误差可知:在有效频率范围内,同种材料折射率的差异很小;ABS、PC、PLA 的相对误差都在 0.002 左右;PSR 的相对误差较大,在 0.012 左右。在误差允许的范围内,同种物质不管厚度如何,其折射率都是一定的,因此 THz 光谱也可以用于以上 4 种 3D 打印材料的物质鉴别。

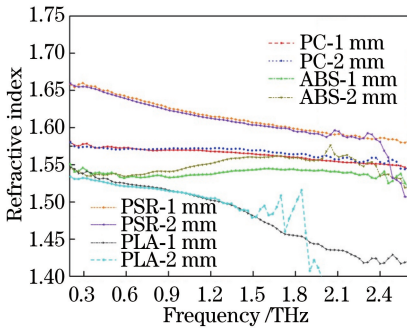


图 11 1 mm 厚和 2 mm 厚的 4 种 3D 打印材料的折射率谱

Fig. 11 THz refractive index spectra of four 3D printing materials with 1 mm and 2 mm thickness

## 5 结 论

利用 THz 时域光谱系统,对常见的 4 种 3D 打印材料进行光谱检测,并分析了它们的 THz 光谱特性。实验结果表明:4 种材料的透过率在 0.20~2.60 THz 范围内差异明显,其中 PC 的 THz 透过率最高;4 种材料的折射率在 1.45~1.65 之间,PSR 的折射率最大,在 1.62 左右;4 种材料的介电常数实部在 2.20~2.75 之间,虚部在 0.05~0.35 之间;从吸收谱上看,4 种材料都没有吸收峰。此外,通过比较不同厚度的 4 种材料的 THz 光谱性质,可以看出样品的折射率光学参数与样品厚度无关。通过实验研究,得到了 4 种 3D 打印材料的 THz 波段光学性质,材料的 THz 透过率、折射率、吸收和介电常数等信息,该研究将为研究人员的器件仿真材料选取提供依据,更为 3D 打印 THz 器件制作的材料选取提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [2] Lee Y S. Principles of terahertz science and technology[M]. Boston, MA: Springer, 2009: 1-3.
- [3] Xu J Z, Zhang X C. Terahertz science and technology and applications [M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 1-4.  
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1-4.
- [4] Li T J, Sun Y, Shao G F, *et al.* Terahertz nondestructive detection method of ceramic matrix composites[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 061101.  
李铁军, 孙跃, 邵桂芳, 等. 陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 061101.
- [5] Cunningham P D, Valdes N N, Vallejo F A, *et al.* Broadband terahertz characterization of the refractive index and absorption of some important polymeric and organic electro-optic materials [J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(4): 043505.
- [6] Zhang H Y, Wang K J, Zhang Y L, *et al.* Terahertz cylindrical lenses based on three-dimensional printing technique [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(1): 011414.  
张涵祎, 王可嘉, 张玉立, 等. 基于三维打印技术的太赫兹波段的柱透镜[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 011414.
- [7] Squires A D, Lewis R A. Feasibility and characterization of common and exotic filaments for use in 3D printed terahertz devices [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2018, 39 (7): 614-635.
- [8] Kodama H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer[J]. Review of Scientific Instruments, 1981, 52(11): 1770-1773.
- [9] Sachs E, Cima M, Williams P, *et al.* Three dimensional printing: rapid tooling and prototypes directly from a CAD model [J]. Journal of Engineering for Industry, 1992, 114(4): 481-488.
- [10] Zhang M, Liu C, Ren B, *et al.* Microstructure and mechanical properties of porous Ni alloy fabricated by laser 3D printing [J]. Chinese Optics, 2016, 9(3): 335-341.  
张敏, 刘畅, 任博, 等. 3D 打印激光制备多孔镍合金组织和力学性能研究[J]. 中国光学, 2016, 9(3): 335-341.

- [11] Cui K J, Zhu C Z, Xuan Q, *et al.* Research developments on high performance and functional photosensitive resin for 3D printing [J]. Chinese Polymer Bulletin, 2017(12): 28-38.  
崔可建, 朱才镇, 轩钦, 等. 3D打印用光敏树脂的高性能化及功能化研究进展[J]. 高分子通报, 2017(12): 28-38.
- [12] Cruz A, Cordeiro C, Franco M. 3D printed hollow-core terahertz fibers[J]. Fibers, 2018, 6(3): 43.
- [13] Gospodaric J, Kuzmenko A, Pimenov A, *et al.* 3D-printed phase waveplates for THz beam shaping[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(22): 221104.
- [14] Zhang Z Q, Wei X L, Liu C M, *et al.* Rapid fabrication of terahertz lens via three-dimensional printing technology [J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(2): 022201.
- [15] Stratasys[OL]. [2018-02-10]. <http://www.stratasys.com.cn>.
- [16] Wei X L, Liu C M, Niu L T, *et al.* Generation of arbitrary order Bessel beams via 3D printed axicons at the terahertz frequency range [J]. Applied Optics, 2015, 54(36): 10641-10649.
- [17] Chen S, Wu J M, Shi Y S. General introduction of 3D printing materials and their applications [J]. Physics, 2018, 47(11): 715-724.  
陈双, 吴甲民, 史玉升. 3D打印材料及其应用概述[J]. 物理, 2018, 47(11): 715-724.
- [18] Schall M, Jepsen P U. Freeze-out of difference-phonon modes in ZnTe and its application in detection of THz pulses[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(18): 2801-2803.
- [19] Sun H Q. Study on the performance of terahertz time domain spectroscopy system [D]. Beijing: Capital Normal University, 2007.  
孙红起. 太赫兹时域光谱系统的性能研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2007.
- [20] Cai Y, Brener I, Lopata J, *et al.* Coherent terahertz radiation detection: direct comparison between free-space electro-optic sampling and antenna detection [J]. Applied Physics Letters, 1998, 73(4): 444-446.
- [21] van Exter M, Fattinger C, Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor [J]. Optics Letters, 1989, 14(20): 1128-1130.
- [22] Li J, Liu Q C, Xiong L. Transmission characteristics of terahertz wave in water vapor transmitted 0.6 m[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 090101.  
李进, 刘泉澄, 熊亮. 水蒸气中太赫兹波 0.6 m 行程下的传输特性[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 090101.
- [23] Tian F. THz time domain spectroscopy based on optical rectification and electro-optical sampling by ZnTe[D]. Suzhou: Soochow University, 2015.  
田发. 基于碲化锌晶体光学整流及电光采样的太赫兹时域光谱系统[D]. 苏州: 苏州大学, 2015.
- [24] Mohou[OL]. [2018-02-10]. <http://www.mohou.com/>.
- [25] Wong K V, Hernandez A. A review of additive manufacturing [J]. ISRN Mechanical Engineering, 2012, 2012: 208760.
- [26] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996, 2(3): 739-746.