

## 太赫兹计算层析成像研究进展(特邀)

戎路<sup>1,2\*</sup>, 刘义铭<sup>1</sup>, 宁冉<sup>3,4</sup>, 赵洁<sup>1,2</sup>, 王云新<sup>1,2</sup>, 王大勇<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>北京工业大学理学部物理与光电工程系, 北京 100124;<sup>2</sup>北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心, 北京 100124;<sup>3</sup>深圳大学物理与光电子工程学院, 广东 深圳 518000;<sup>4</sup>深圳市微纳光子信息技术重点实验室, 广东 深圳 518000

**摘要** 太赫兹波作为一种穿透性强、具有非电离性和惧水性的电磁波,可以穿透多种非金属、非极性介质材料。太赫兹计算层析成像技术基于傅里叶中心切片定理和直线传播模型,通过记录不同投影角度下的强度数据,采用滤波反投影等重建算法获得样品三维吸收系数分布和内外结构信息分布。随着太赫兹成像器件的不断发展和应用场景的拓展,已发展出多种照明模式、成像光路和重建算法,并已在文物保护、骨密度测量和无损检测领域开展了应用探索。概述太赫兹计算层析技术的基本原理,并从提高重建质量、分辨率和采集效率三方面具体介绍太赫兹计算层析成像技术的最新研究。

**关键词** 太赫兹成像; 计算层析; 三维成像; 照明光场调控

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP232341

## Research Progress of Terahertz Computational Tomography (Invited)

Rong Lu<sup>1,2\*</sup>, Liu Yiming<sup>1</sup>, Ning Ran<sup>3,4</sup>, Zhao Jie<sup>1,2</sup>, Wang Yunxin<sup>1,2</sup>, Wang Dayong<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>Department of Physics and Optoelectronics Engineering, Faculty of Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;<sup>2</sup>Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing 100124, China;<sup>3</sup>College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518000, Guangdong, China;<sup>4</sup>Shenzhen Key Lab of Micro-Nano Photonic Information Technology, Shenzhen 518000, Guangdong, China

**Abstract** Terahertz waves possess remarkable penetrability, capable of passing through a wide range of non-metallic, nonpolar materials without causing ionization. This unique characteristic makes them particularly useful in the field of computed tomography, enabling the capture of detailed external and internal structures of samples along their three-dimensional absorption coefficient distributions. In this process, the sinogram for each vertical layer is generated through raster scanning at different projection angles. These sinograms are then transformed into sectional images using filtered back projection and other algorithms based on the Fourier central slicing theorem. As the field has developed, a diverse array of illumination modes, imaging configurations, and reconstruction algorithms have been proposed. These advancements serve to accommodate the development of terahertz imaging instruments and components, as well as the expanding range of application scenarios. This study reviews the principals of terahertz computed tomography. We provide a comprehensive review of its recent research progress, focusing on enhancing three key areas: reconstruction quality, imaging resolution enhancement, and data acquisition efficiency.

**Key words** terahertz imaging; computational tomography; three-dimensional imaging; illumination field manipulation

## 1 引言

太赫兹 (THz) 辐射是一种频率从 0.1 THz 到 10 THz

(1 THz = 10<sup>12</sup> Hz) 的电磁波, 介于微波与红外之间, 对应的波长范围为 0.03 mm 到 3 mm。由于此波段的特殊性, 较低的光子能量不会对脆弱的生物组织造成电

收稿日期: 2023-10-23; 修回日期: 2023-12-08; 录用日期: 2023-12-13; 网络首发日期: 2023-12-25

基金项目: 国家自然科学基金(62220106005, 62175004, 62075001)、北京市自然科学基金(4222061, 4222063)

通信作者: \*ronglu@bjut.edu.cn; \*\*wdyong@bjut.edu.cn

离损伤,较宽的频带范围能研究更多物质的光谱信息,较强的穿透性能也可以对非极性非金属材料内部的结构进行探测。因此,太赫兹技术广泛应用于生物医学成像<sup>[1]</sup>、安全防范监测<sup>[2]</sup>、地质矿产勘探<sup>[3]</sup>、材料缺陷检测<sup>[4]</sup>、文物无损探伤<sup>[5]</sup>等相关领域。一方面,基于各种太赫兹源、探测器和成像器件,以及不同的应用场景,发展出了多种太赫兹成像方法;另一方面,由于空气中的水分对太赫兹波有很强的吸收作用,因此与可见光等波段相比,太赫兹光路的结构往往更加紧凑。目前,对于透射式样品,太赫兹成像方法主要集中在逐点扫描或全场记录的二维成像模式,但这些成像方式往往难以获取物体内部更完整的信息。以太赫兹层析成像技术(terahertz tomography)为代表的太赫兹三维成像技术<sup>[6-9]</sup>能更有效地检测物体的三维形貌及内部结构,主要包含太赫兹衍射层析成像(THz diffraction tomography)<sup>[10]</sup>、太赫兹飞行时间层析成像(terahertz time-of-flight tomography)<sup>[11]</sup>、太赫兹光学相干层析成像(terahertz optical coherence tomography)<sup>[12]</sup>和太赫兹计算层析成像(THz CT)<sup>[13]</sup>等,其中 THz CT 是目前较为成熟的三维成像方法。

THz CT 起源于早期的 X 射线计算层析成像,将一束平面波照射样品,探测不同投影角度上的投影强度数据,基于傅里叶中心切片定理和滤波反投影等算法得到样品横截面的二维吸收系数分布,按照已知的层间间隔垂直步进移动样品,堆叠得到待测样品的三维结构信息。这项技术已经应用于文物保护、骨密度测量、考古鉴定及工业无损检测等领域<sup>[14-15]</sup>。本文给出 THz CT 的基本原理,对其重建质量、分辨率和成像速率三个方面的研究进展进行逐一介绍,并展望其发展趋势。

## 2 太赫兹计算层析成像技术的基本原理

### 2.1 太赫兹计算层析成像系统光路结构

基于不同的太赫兹源、探测器的记录方式,太赫兹计算层析成像系统可以分为太赫兹时域光谱(THz-TDS)成像系统<sup>[16]</sup>和连续太赫兹波(CW THz)计算层

析成像系统。在早期的 THz CT 实验中大多采用 THz-TDS 系统作为实验装置,通过飞秒激光器、光学延迟系统及探测器等获取样品信息。图 1(a)为基于钛宝石锁模飞秒激光器泵浦的 THz-TDS 成像系统<sup>[17]</sup>,飞秒激光脉冲被分成泵浦和探测光束。泵浦光束触发一个有偏压的宽孔天线从而产生太赫兹脉冲,该脉冲通过抛物面镜聚焦到样品上,使用光谱仪和 CCD 相机间接接收太赫兹波穿透样品后的投影数据,转动平移台获得不同角度的数据,利用太赫兹重建算法重建出样品的三维结构。

近年来,随着太赫兹器件的不断发展<sup>[18-20]</sup>,太赫兹源经历了从以往利用光电导天线或者光整流产生的脉冲太赫兹波源<sup>[21]</sup>到使用气体激光泵浦的连续太赫兹源、太赫兹参量振荡器、量子级联激光器(QCL)、耿式二极管和肖特基二极管等的发展<sup>[21-25]</sup>。探测器包括了面阵式的微测热辐射计、热释电探测器和单点的高莱探测器<sup>[26-28]</sup>,及相干探测模式的光电导探测器、整流探测器及肖特基二极管<sup>[29-32]</sup>等。

相较于 THz-TDS 成像系统,连续太赫兹波辐射源通常具有输出窄带宽、功率高和相干性良好等优势,且构成的 THz CT 系统结构相对紧凑、成像速度较快,因此在 THz CT 中常用连续太赫兹源进行太赫兹波的发射。图 1(b)即为采用频率为 2.9 THz 的高功率连续波量子级联激光器对样品进行 THz CT 成像的实验装置系统<sup>[33]</sup>。将首先介绍 THz CT 的基本工作原理、傅里叶中心切片定理及滤波反投影重建算法,并对傅里叶中心切片定理和滤波反投影重建算法的数学表达式进行详细阐述。

### 2.2 THz CT 的基本工作原理

THz CT 的基本原理是 Radon 变换和傅里叶中心切片定理<sup>[34-35]</sup>。与 X 射线 CT 类似,THz CT 也是通过将样品置于一个二维移动平台带动的旋转平台上进行透射式扫描的,如图 1 所示,样品每旋转一个角度  $d\theta$ ,对该高度下的样品进行一次线投影扫描,理论上共旋转  $180^\circ$  可以完成一次样品二维横截面的扫描。得到的数据在以横坐标为投影角度、纵坐标为投影位置的强

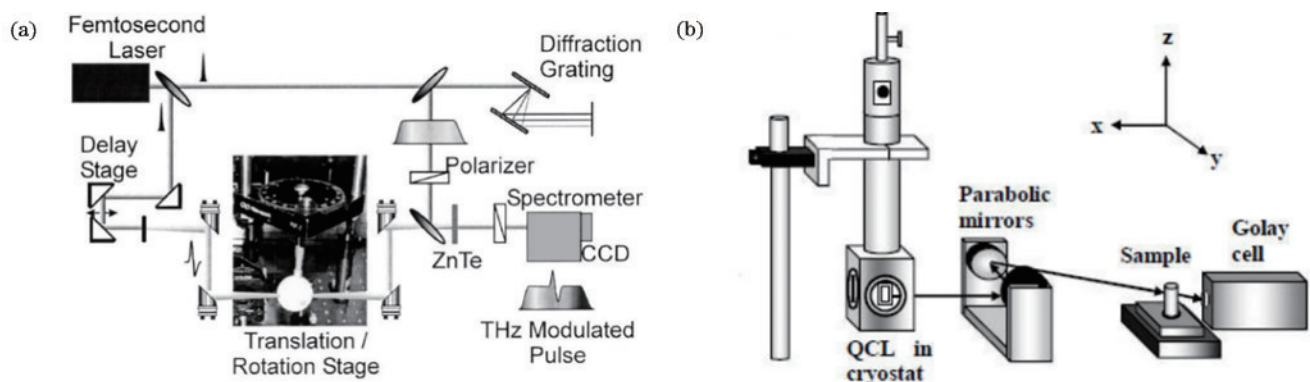


图 1 THz CT 成像系统。(a) THz-TDS 成像装置<sup>[17]</sup>; (b) 连续太赫兹波成像装置<sup>[33]</sup>

Fig. 1 THz CT imaging systems. (a) THz-TDS imaging device<sup>[17]</sup>; (b) CW THz imaging device<sup>[33]</sup>

度图上表示,称为正弦图<sup>[36]</sup>。以 Shepp-Logan 头部模型为例,图 2 展示了该模型的二维截面以及模拟投影后的正弦图。然后利用重建算法对正弦图进行处理,得到样品二维截面的吸收分布,通过对各个位置处的二维截面进行 y 轴方向的堆叠,得到样品的三维空间分布<sup>[37]</sup>。

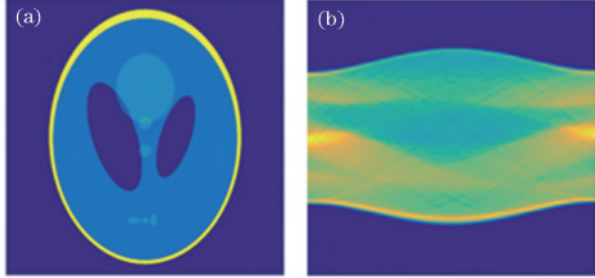


图 2 Shepp-Logan 头部模型以及投影正弦图<sup>[37]</sup>。(a) Shepp-Logan 模型;(b)正弦图

Fig. 2 Shepp-Logan phantom and its sinogram<sup>[37]</sup>。(a) Shepp-Logan phantom; (b) sinogram

在照明波束穿过待测样品进行投影时,待测样品会吸收辐照能量,波束强度会因此而衰减。设待测样品某一剖面的分布函数为  $f(x, y)$ ,入射波束强度为  $I_0$ ,经过样品的出射波束强度为  $I$ ,波束穿过样品路径的长度为  $L$ ,根据物体内部传播遵循 Lambert-Beer 定律<sup>[38-39]</sup>可知

$$I = I_0 \exp\left[-\int_L f(x, y) dl\right]. \quad (1)$$

在数学上射线投影可以作为待测样品在不同角度的线积分,假设投影角度为  $\theta$ ,线扫描后获得的数据  $R_\theta(\rho)$  作为分布函数  $f(x, y)$  的 Radon 变换,则投影路径上的积分为

$$R_\theta(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy, \quad (2)$$

式中: $\rho$  为线扫描的位置。 $\delta$  是狄拉克函数,满足

$$\begin{cases} \delta(x, y) = 0, & x \neq 0, y \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x, y) dx dy = 1 \end{cases}. \quad (3)$$

由式(1)和式(3)可知,投影后的数据为

$$R_\theta(\rho) = \ln \frac{I_0}{I}. \quad (4)$$

采用 CT 重建算法就可以对  $R_\theta(\rho)$  进行计算,得到待测样品的二维剖面吸收系数分布  $f(x, y)$ 。

### 2.3 傅里叶中心切片定理

在对待测样品进行层析扫描时,需要采集不同横向位移和旋转角度下的投影数据,通过这些投影数据来重建图像。这一理论基础来源于 Bracewell 提出的傅里叶中心切片定理<sup>[40]</sup>。

在傅里叶中心切片定理中,线投影函数  $R_\theta(\rho)$  的傅里叶变换为

$$S_\theta(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} R_\theta(\rho) \exp(-2\pi i \omega \rho) d\rho. \quad (5)$$

将式(2)代入式(5),并由狄拉克函数的定义可得

$$S_\theta(\rho) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-2\pi i(x\rho \cos \theta + y\rho \sin \theta)] dx dy. \quad (6)$$

定义待测样品分布函数  $f(x, y)$  的二维傅里叶变换为

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp[-2\pi i(ux + vy)] dx dy, \quad (7)$$

其中  $u = \rho \cos \theta, v = \rho \sin \theta$ ,可以得到样品投影与其分布函数在傅里叶频域上满足的关系:

$$S_\theta(\rho) = F(u, v). \quad (8)$$

这是傅里叶中心切片定理直观的表达公式,也是计算层析的理论依据。

### 2.4 滤波反投影算法

滤波反投影(FBP)算法<sup>[41]</sup>能够对采集到的投影值进行滤波,消除部分低频分量,使重建图像减少模糊情况,是目前 THz CT 普遍使用的重建算法。根据傅里叶逆变换,分布函数可通过式(8)表达为

$$f(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u, v) \exp[2\pi i(ux + vy)] du dv. \quad (9)$$

建立一个极坐标系  $\rho-\theta$ ,式(9)可以简化为

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} F(\rho \cos \theta, \rho \sin \theta) |\rho| \times \exp[2\pi i(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\rho d\theta. \quad (10)$$

进一步地,由傅里叶中心切片定理可以将式(5)代入式(10),得到样品空间分布函数:

$$f(x, y) = \int_0^\pi \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} R_\theta(\rho) \exp(-2\pi i \omega \rho) d\rho \right] \times |\rho| \exp[2\pi i(x \cos \theta + y \sin \theta)] d\rho d\theta, \quad (11)$$

式中: $|\rho|$  表示笛卡儿坐标系变换到极坐标系时产生的雅可比因子,作为投影数据的滤波函数,消除伪影,提高成像质量<sup>[42]</sup>。根据式(11)进行不同投影角度数据的叠加即可重建出待测样品的折射率分布。

由此可知,为了保证 THz CT 足够的成像质量,应尽可能使投影角度数量更多,即投影角度间隔尽可能小,采样密度尽可能大;另外,成像分辨率很大程度上取决于照明光束的直径和移动步长,使用高效的光束聚焦元件提升成像系统的空间分辨率。太赫兹计算层析理论模型没有充分考虑散射和衍射效应,衍射层析<sup>[43-46]</sup>才会通过数字全息等方法在不同旋转角度或不



同照明方向下再现得到样品二维复振幅分布,然后通过弱散射近似处理成衍射层析重建所需的投影数据,利用频域差值等重建算法恢复样品的三维折射率分布。但由于 THz 波长较长,成像时波束的衍射、散射和非涅耳反射损耗会产生伪影并降低重建质量。为了缓解这些问题,需要额外的折射抑制或数值补偿,通过算法和改善光束照明条件可以很好地改善成像质量。

### 3 重建质量提高方法研究

#### 3.1 重建算法提高重建质量

在对重建图像的质量进行评价时,常用均方根误差(RMSE)<sup>[47]</sup>、结构相似性(SSIM)<sup>[48]</sup>及图像峰值信噪比(PSNR)<sup>[49]</sup>这些函数作为评价指标。其中,均方根误差是均方误差的算数平方根,这个参数主要用来反

映待测图像和真实图像之间的差异程度,其计算值越小,表明预测值和真值之间的差异程度越小。结构相似性是用来衡量两幅图像之间结构相似度的重要指标,能够更好地分析两幅图像的结构特征,其值越大,表示两幅图像的结构差异越小。图像峰值信噪比是用来衡量图像信号与噪声之间比值的指标,能够反映图像的噪声水平,计算值越大,图像的噪声越小。大多数 THz CT 数据采用 FBP 算法重建,具有过程简单、重建速度较快的特点,由于太赫兹波透射样品出现散射、折射等光学效应,为了节省数据采集时间,往往设定较大的角度步长,此时单一的 FBP 重建无法满足成像需求,需要开发其他迭代重建算法进一步提升系统性能。表 1 对研究中所提及的 THz CT 重建算法进行了总结。

表 1 THz CT 重建算法总结  
Table 1 Reconstruction THz CT algorithm summary

Algorithm	Theoretical basis	Analysis
FBP	Based on Fourier center slice theorem and Radon inverse transformation from the projection data	High computational efficiency
SART	Based on the Kaczmarz algorithm to solve iteratively the linear system of equations between voxels and projections	Reduce background noise and artifacts
OSEM	Each reconstruction only uses $1/n$ subsets to correct the projected data	Reduce background noise and artifacts
OSC	Consists of iterating in $t$ and subsets $s+1$ in order to update each voxel $j$ of the volume $\mu$ until convergence of the solution	Efficient convergence rate
ART	Approximating a system of linear equations based on the Kaczmarz algorithm to update the projection of each ray in the image	Reduce background noise and artifacts, but may over-smooth image edges
SIRT	Based on the Cimmino algorithm to obtain the reconstructed image by solving linear functions	Avoids the local convergence of the Kaczmarz algorithm
Wavelet	Corresponds to a conventional inversion of the Radon transform with the ramp filtering replaced by the wavelet ramp filtering	Reduce the beam hardening, stable reconstructed quality
TV-IR	Uses the sparsity of the L1 norm of the discrete gradient transform of images	Suppress artifacts and reduce the projection data
Dictionary learning	Performs sparse representation by training an over-complete dictionary from extracting image blocks	Suppress artifacts and preserve the image details

法国波尔多大学课题组将反投影滤波(BFP)算法<sup>[50]</sup>、联合代数迭代算法(SART)<sup>[51]</sup>与有序子集最大期望值法(OSEM)<sup>[52-53]</sup>应用于太赫兹计算层析成像系统的数据重建中,使用 110 GHz 耿氏二极管作为太赫兹源构建成像装置,比较了用 BFP、SART 和 OSEM 三种算法对俄罗斯套娃进行重建的图像。SART 是基于 Kaczmarz 算法来逼近线性方程组的,该迭代通过比较原始投影来更新图像的每个像素。OSEM 每次更新都是从几个投影的子集中完成的,计算时长往往超过 SART。图 3(a)中的结果显示,在投影角度有限的情况下能从 SART 重建的图像更清楚地看清内部的小套娃<sup>[54]</sup>,这证实了太赫兹波段的非电离性对易碎和唯一性样品成像较 X 射线更有优势,使得它在人类学和考古学中有了广泛应用。但在该成像实验中,没有充分考虑太赫兹光束能量传播的非均匀性,不太适用

X 射线重建图像的方法,因此,在成像模型中深入考虑了高斯光束的传播性质,对插入螺钉的聚甲基丙烯酸酯(PMI)材料中样品进行成像,重建结果如图 3(b)所示,OSEM 与高斯光束结合后获得的重建精度优于其他两种算法<sup>[55]</sup>。澳大利亚国立大学与法国波尔多大学合作构建了基于 287 GHz 耿氏二极管和肖特基二极管的成像系统,在结合高斯光束传输模型的基础上使用有序子集凸性(OSC)算法<sup>[56-57]</sup>对塑料喷头进行 THz CT 重建。OSC 算法将凸算法应用于投影的每个子集,然后将迭代后的更新用作处理下一个子集的起始图像。图 3(c)表明,相比于 BFP 和 SART,OSC 算法减少了伪影和噪声,重建精度更高<sup>[58]</sup>。这种方法在采集数据的噪声水平和稀疏性的情况下具有高效的收敛速度。奥地利无损检测研究中心课题组基于 THz-TDS CT 成像系统也做了类似的工作,使用两个光导

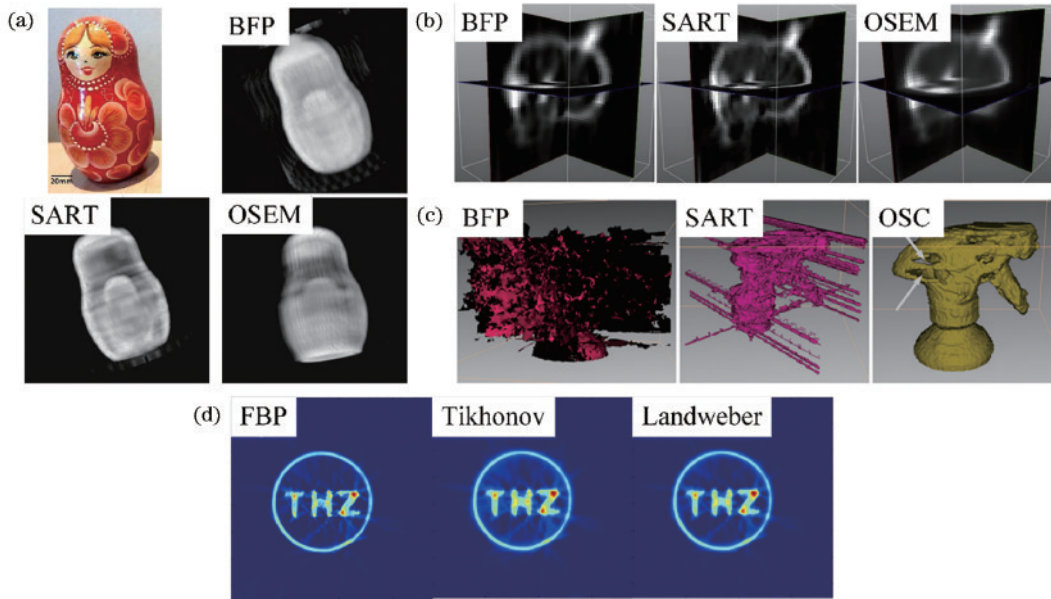


图 3 THz CT 成像运用各类重建算法的重建图像。(a)俄罗斯套娃的三维重建图<sup>[54]</sup>；(b)插入螺钉的PMI材料的  $x$ - $y$ 、 $x$ - $z$  和  $y$ - $z$  平面的剖面图<sup>[55]</sup>；(c)塑料喷头的三维重建图<sup>[58]</sup>；(d)3D 打印的字母的二维剖面图<sup>[59]</sup>

Fig. 3 THz CT reconstruction using various reconstruction algorithms to reconstruct images. (a) 3D reconstruction of a Russian nesting doll<sup>[54]</sup>; (b) sections of a screw inserted PMI sample<sup>[55]</sup>; (c) 3D reconstruction of a plastic nozzle<sup>[58]</sup>; (d) sections of 3D printed letters<sup>[59]</sup>

天线和两个同步飞秒激光器,它们在 1560 nm 的中心波长条件下工作,用于产生和检测脉冲太赫兹辐射,光路结构如图 4 所示。对 3D 打印的英文字母进行高质量重建, Tikhonov 正则化是在面对不好求解的方程组时添加一个有关矩阵作为约束条件的方式,而 Landweber 通过迭代更新解向量来逼近真实解,从图 3(d)中可以看出 Tikhonov 正则化和 Landweber 迭代两种算法的结果都优于 FBP 算法<sup>[59]</sup>。不过该实验样品属于平面样品,通过人为地弯曲样品得到具有偏差的重建结果,也证明了该方法在无损伤检测领域的有

效性。德国弗劳恩霍夫工业数学研究所课题组使用 230~320 GHz 的宽带太赫兹发射源对一个具有非圆形形状和钻孔缺陷的聚乙烯样品进行成像,采用了计算效率较高的共轭梯度最小二乘法(CGLS)<sup>[60]</sup>,其能够在缺乏测量数据的情况下求解大型线性系统,并结合文中提出的 Early stop 程序,取得了较好的重建质量<sup>[61]</sup>。虽然该算法比 FBP 有更高的计算效率,但它需要额外的先验信息即量化样品散射和折射作为约束条件来实现快速收敛,这也是未来提高 THz CT 成像能力的新方向。

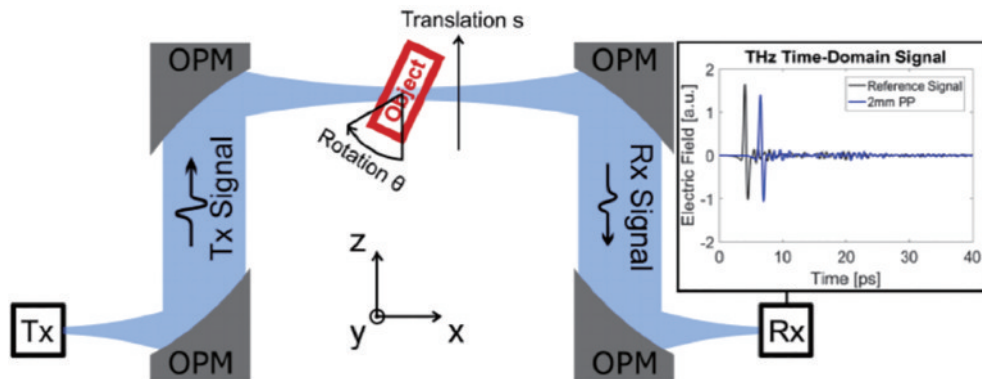


图 4 基于 THz-TDS 的太赫兹计算层析成像系统光路图<sup>[59]</sup>

Fig. 4 Schematic of THz CT system's optical light based on THz-TDS<sup>[59]</sup>

国内方面对 THz CT 重建算法的改进也有突出的成果。上海微系统与信息技术研究所相关课题组搭建了 3.9 THz QCL<sup>[62]</sup>和量子阱光电探测器组成的 THz CT 系统,如图 5(a)所示。样品为放入金属螺钉和空

心塑料管的聚苯乙烯立方体,平移步长和旋转角度分别为 1 mm 和 6°,对 FBP、代数重建算法(ART)<sup>[63]</sup>、同步迭代代数重建算法(SIRT)<sup>[64]</sup>和小波变换重建算法重建的图像进行对比。ART 基于 Kaczmarz 算法通过



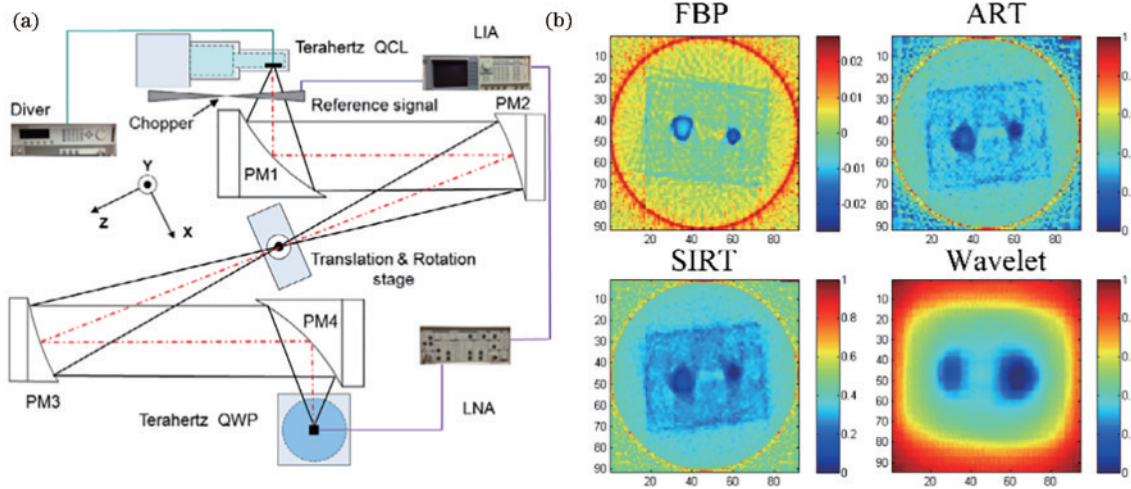


图 5 基于 QCL 的 THz CT 系统及样品重建结果<sup>[65]</sup>。(a) 基于 QCL 的 THz CT 装置；(b) 聚苯乙烯样品的二维重建剖面图  
Fig. 5 THz CT system based on QCL and imaging results<sup>[65]</sup>. (a) Diagram of the THz CT setup based on QCL; (b) sectional images of a polystyrene sample

求解线性函数来获得重建图像；SIRT 基于 Cimmino 算法通过使用所有投影的平均值来更新图像像素，避免了 Kaczmarz 算法的局部收敛；小波变换对传统的 Radon 变换求逆，用小波滤波代替了斜坡滤波用于扩展投影。采用结构相似度函数进行评价，如图 5(b) 所示，结果表明基于小波变换的重建算法能更好地提升成像质量<sup>[65]</sup>。在不减少投影次数的情况下，ART 和 SIRT 比 FBP 有更好的重建质量和噪声抑制能力；当投影次数减少时，小波变换能在不损失视觉质量的情况下更快速地进行重建，但处理的图像可能会存在轮廓失真的问题。之后，该课题组又将新型的 90~140 GHz 低相干宽带连续太赫兹源和肖特基势垒二极管作为探测器开展了关于陶瓷壶的层析成像实验，其光路结构如图 6(a) 所示，通过画相贯线进行定量分析，发现重建

结果与样品真实尺寸一致，图 6(b) 为陶瓷罐的三维重建结果<sup>[66]</sup>。降低太赫兹波束的空间相干性，不容易在样品反射时产生干涉效应，影响信号强度，这种低相干的太赫兹源具有体积小、稳定性好、系统紧凑、常温工作等特点，在实际应用中具有广泛的应用前景。2021 年，华中科技大学课题组采用 300 GHz 的耿氏二极管发射连续太赫兹波，比较虚拟展开算法和 FBP 对恢复卷轴内文字的重建质量，虚拟展开算法其实是将折叠或滚动结构中的大部分信息从物体的横截面轮廓（脊线）中提取出来，然后用融合 FBP 和 ART 的方法将这些轮廓（脊线）拼接在一起的。图 7(a) 表明虚拟展开算法重建的字母轮廓更清晰<sup>[67]</sup>，这是由于该方法更适用于卷曲或折叠结构的样本，在文物保护或安保领域具有一定的应用潜力。

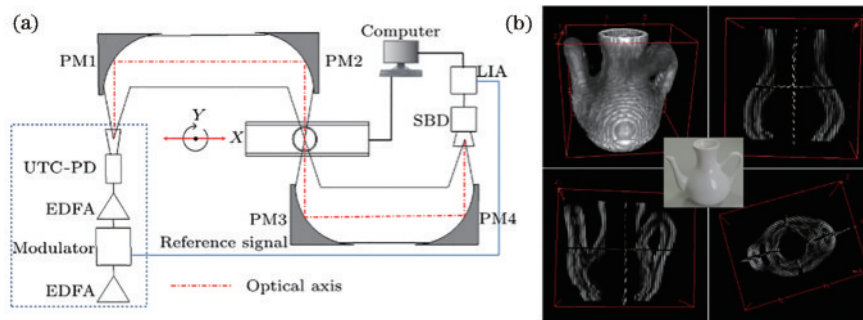


图 6 基于宽带连续太赫兹源的 THz CT 系统及重建结果<sup>[66]</sup>。(a) 基于宽带连续太赫兹源的 THz CT 装置；(b) 陶瓷罐与其三维重建图和正交截面重建图

Fig. 6 THz CT system based on board band CW THz source and its reconstruction results<sup>[66]</sup>. (a) Diagram of the THz CT system setup based on board band CW THz source; (b) ceramic pot with its 3D reconstruction and orthogonal sectional images

2022 年，北京工业大学课题组使用 278.6 GHz 的雪崩二极管构建了 THz CT 系统，FBP、ART 和全变分梯度下降迭代算法 (TV-IR)<sup>[68]</sup> 在稀疏角度投影数据下的重建结果如图 7(b) 所示<sup>[69]</sup>。对于结构简单的样品，在减少投影角度数量时，FBP 与 ART 重建的结果

受背景噪声影响较大，TV-IR 是从其离散傅里叶变换的稀疏样本中准确地恢复图像的，其重建结果的伪影较少，且使用梯度下降法进行约束处理，不仅改善了重建质量，也将数据采集时间缩短到原来的 1/4。此成像系统还加入了轴棱锥用于产生贝塞尔波束，光路结

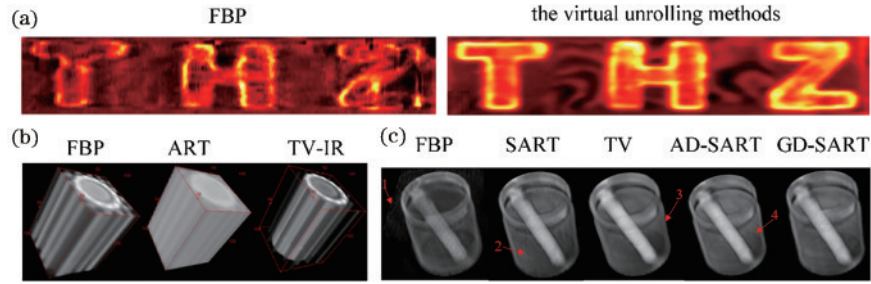


图 7 THz CT 成像运用各类重建算法的重建图像。(a)卷轴文字的二维剖面图<sup>[67]</sup>;(b)ABS管的三维重建图<sup>[69]</sup>;(c)放置金属杆的聚丙烯塑料杯的三维重建图<sup>[70]</sup>

Fig. 7 THz CT reconstruction using various reconstruction algorithms to reconstruct images. (a) 2D section of scroll text<sup>[67]</sup>; (b) 3D reconstruction of ABS tube<sup>[69]</sup>; (c) 3D reconstruction of a polypropylene plastic cup with metal rod<sup>[70]</sup>

构参考文献[69]。重庆大学相关课题组研究了不完整投影数据的 THz CT 重建算法,采用了两种字典学习算法,通过提取图像块训练一个完备字典来进行稀疏表示,能更好地保留局部图像的纹理和细节。结果如图 7(c)所示,两种字典学习算法重建精度均优于 FBP、SART 等经典算法<sup>[70]</sup>。不过此算法也存在一定局限性,比如计算过程非常耗时、需要根据不同扫描对象调整合适的参数等。

### 3.2 考虑光学效应提高重建质量

THz CT 和 X-ray CT 的成像理论模型都是照明光束在物体内部沿直线传播,这本质上是不考虑样品散射与衍射效应的,但当照明光束的波长较长时或照明光束的波长与样品的细节尺寸相当时,需要进行折射抑制或数值补偿,或通过算法提高 THz CT 的成像质量。天津大学课题组<sup>[71]</sup>基于 2.52 THz 光泵太赫兹激光器搭建了太赫兹计算层析成像系统,如图 8(a)所示。将成像样品放置在折射率匹配的液石蜡油中进行层析成像,液体石蜡和样品的折射率分别为 1.46 和

1.53,样品旋转步长为 6°,并对滤波反投影算法进行了修正,大幅提高了重建精度。在图 6(b)中能够清晰地看到藏于石蜡中的针与石蜡边界,检测到样品内部直径小至 0.5 mm 的小缺陷。该方法有效避免了样品的反射与折射问题,消除了液体吸收和抑制伪影,突破了传统 THz CT 技术的局限性,开辟了一条新的途径,不过折射率匹配这种方法在工业环境中可能难以实现。2017 年,德国萨尔大学相关课题组<sup>[72]</sup>在重建过程中分析和考虑了波束在样品表面的折射和反射损失,对 ART 算法的理论模型进行改进,并基于路径差和透射系数获得复折射率分布。该方法虽然考虑折射和反射损失,但并未充分考虑衍射效应,可以结合高斯光束传播模型来优化重建算法。2022 年,奥地利无损检测中心研究人员通过使用图 4 的 THz-TDS CT 系统专门研究了太赫兹波在样品弯曲界面的传播,利用光线追踪和代数图像重建框架<sup>[73]</sup>构建了界面折射模型。该课题组提出的几何正演模型结合了 Landweber 迭代和 L1 正则化算法,可以有效抑制衍射伪影,重建样品壁

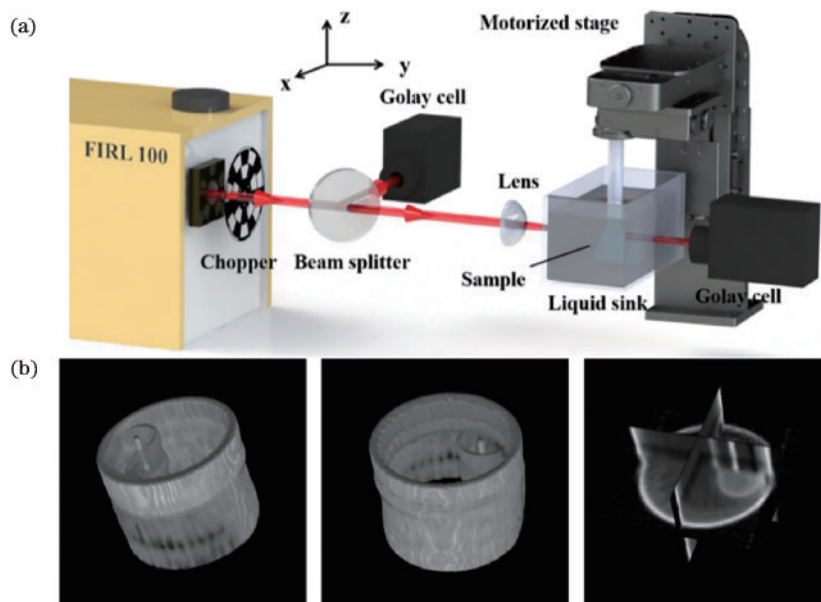


图 8 基于折射率匹配的太赫兹 CT 系统及重建结果<sup>[71]</sup>。(a)THz CT 装置;(b)三维重建结果

Fig. 8 THz CT system based on refractive index matching and its reconstruction results<sup>[71]</sup>. (a) THz CT setup; (b) 3D reconstruction results



厚的误差从 500  $\mu\text{m}$  减小到 150  $\mu\text{m}$ <sup>[74]</sup>。该方法可以对有复杂折射的样品进行三维成像,且精度很高,不仅在塑料或非导电材料的无损检测领域有广泛应用,还可以对生产物品的质量进行在线反馈。

### 3.3 贝塞尔波束提高重建质量

以贝塞尔波束为代表的无衍射照明波束逐渐成为 THz CT 领域中的研究热点,由于贝塞尔波束具有大焦深的特性,用贝塞尔波束替代高斯光束能够提升连续太赫兹波层析成像系统的焦深。贝塞尔波束的产生方

法主要分为主动式和被动式,主动式依靠改变激光器谐振腔的内部结构生成贝塞尔波束,而被动式则是采用对输出光场进行调控的方法间接获取贝塞尔波束,如图 9 所示,主要有环缝-透镜法<sup>[75]</sup>、谐振腔法<sup>[76]</sup>、轴棱锥法<sup>[77]</sup>、透镜-轴棱锥法<sup>[78]</sup>和超表面<sup>[79]</sup>等。在太赫兹频段,由于受限于该频段下光学器件种类,太赫兹零阶贝塞尔波束的产生主要是基于轴棱锥法<sup>[80-81]</sup>实现的。当高斯光束入射到轴棱锥上后出射准贝塞尔波束,这种方法中元器件结构简单,光束的传输效率较高<sup>[82]</sup>。

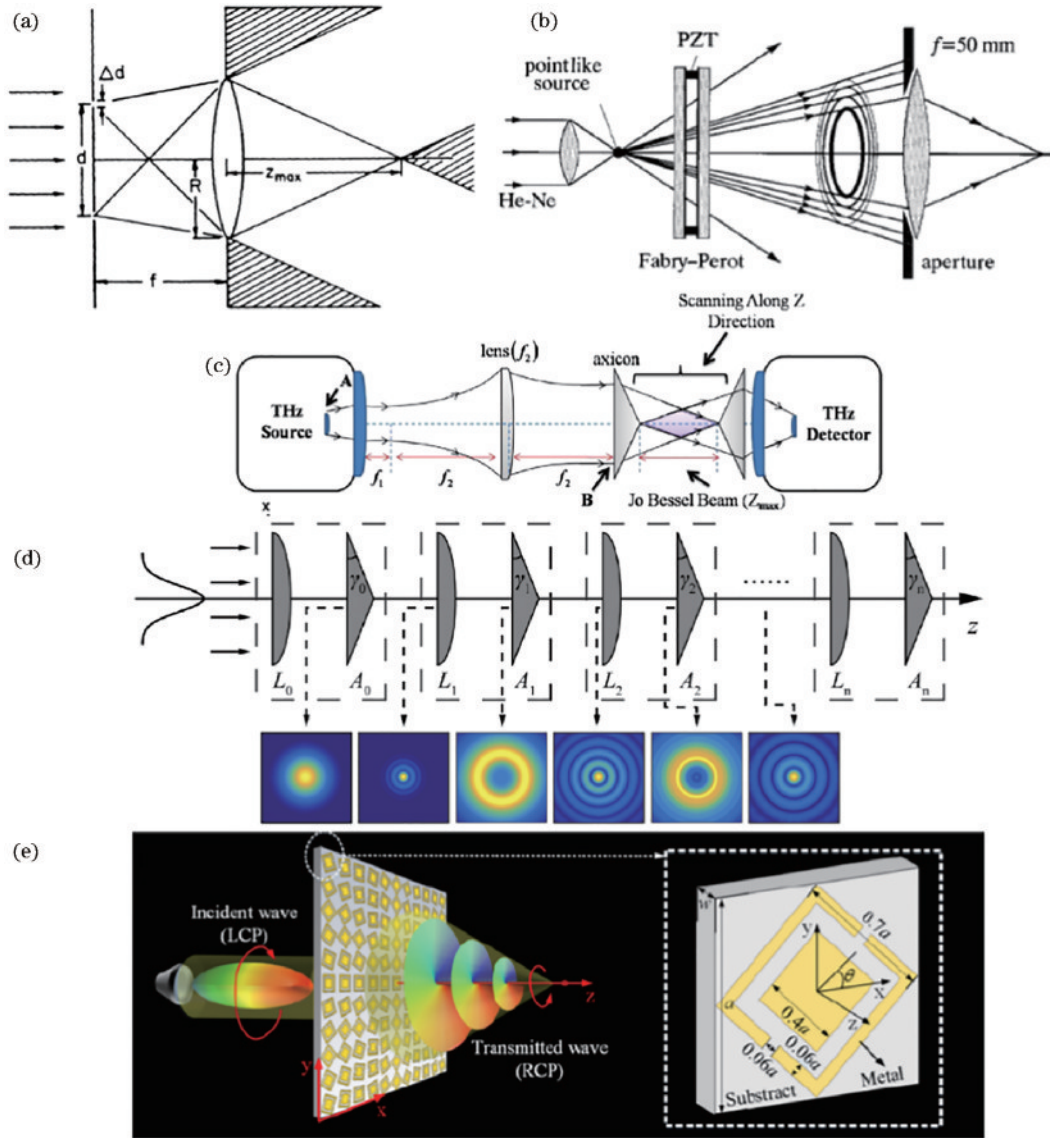


图 9 产生太赫兹贝塞尔波束的方式。(a)环缝-透镜法<sup>[75]</sup>;(b)谐振腔法<sup>[76]</sup>;(c)轴棱锥法<sup>[77]</sup>;(d)透镜-轴棱锥法<sup>[78]</sup>;(e)超表面<sup>[79]</sup>  
Fig. 9 THz Bessel beam generation approaches. (a) Ring slit-lens method<sup>[75]</sup>; (b) resonant cavity method<sup>[76]</sup>; (c) conical lens method<sup>[77]</sup>; (d) lens-conical lens method<sup>[78]</sup>; (e) metasurface<sup>[79]</sup>

根据标量衍射理论,贝塞尔波束可以用零阶贝塞尔函数来描述,通过求解柱面坐标系中的亥姆霍兹方程,得到了贝塞尔波束的强度分布<sup>[83]</sup>,表达式为

$$I(\rho, z) = \frac{4Ek_0 \sin \alpha_0}{\omega_0} \frac{z}{Z_{\max}} J_0^2(k\rho \sin \alpha_0) \exp\left(-\frac{2z^2}{Z_{\max}^2}\right), \quad (12)$$

式中: $\rho$ 是光斑的主瓣半径; $z$ 是沿光轴的传播距离; $E$ 为入射高斯光束的能量; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为在自由空间内的波数; $\omega_0$ 为入射高斯光束的束腰半径; $Z_{\max}$ 为贝塞尔波束的最大无衍射距离; $J_0(\cdot)$ 为第一类零阶贝塞尔函数; $\alpha_0$ 表示出射贝塞尔波束的半顶角。

以色列巴伊兰大学课题组<sup>[84]</sup>设计了一种底角为



26°的 Telfon 棱锥透镜(折射率为 1.35),产生的贝塞尔波束横向直径约为 2.6 mm,无衍射距离约为 100 mm,搭建了基于光电导开关天线的脉冲太赫兹计算层析成像系统,使用相位对比分析对高斯光束与贝塞尔波束下塑料样品重建的图像进行对比,后者的成像质量优于传统高斯光束。不过该塑料样品吸收和损耗均匀,可以用相位对比分析改善 CT 质量,但如果样品材质不均匀,可能还需要幅度对比分析。华中科技大学课题组<sup>[85]</sup>用折射率为 1.655 和吸收系数为  $150 \text{ m}^{-1}$  的 3D 打印材料制作了顶角为 160°的轴棱锥,采用由耿氏二极管、三倍频器和喇叭天线构成的 300 GHz 太赫兹源进行 CT 成像,光路结构如图 10(a)所示,光束直径约为 4 mm,无衍射距离大于 100 mm。该实验样品是一个装有金属棒的纸杯,这揭示了结合贝塞尔光束的 THz CT 比传统检测大样品的方法更具优势。韩国食品研究所研究人员<sup>[86]</sup>基于贝塞尔波束照明构建了高精度的 210 GHz 透射式成像系统,采用高密度聚乙烯(折射率为 1.54)制成了顶角为 150°的轴棱锥,光路如图 10(b)所示,实测光束横向直径为 3.7 mm,无衍射

距离为 40.2 mm,并将该系统应用于面粉中异物的检测,实验结果表明贝塞尔波束可用于拓宽成像系统的焦深。相比高斯光束,准贝塞尔光束的扩展焦深特性对远距离透射式成像非常有用,可以用于均匀和光滑表面的食品质量检测中。北京工业大学课题组<sup>[87]</sup>采用聚四氟乙烯制成的轴棱锥(折射率为 1.426)结合 2.52 THz 光泵太赫兹激光器搭建了 THz CT 系统,不同顶角的轴棱锥会产生不同强度和不同无衍射距离的贝塞尔波束,图 11 展示了轴棱锥实物及实测光场分布。之后,使用雪崩光电二极管发射了 278.6 GHz 频率的连续太赫兹波,用同样折射率的聚四氟乙烯材料制作了轴棱锥,光束尺寸为 8 mm,无衍射距离为 45 mm,光路结构如图 10(c)所示,结合 3.1 节中的重建算法得到了图 7(b)中的重建结果<sup>[69]</sup>。在相同条件下,高斯光束在到达样品前表面时已经处于光束散射区,经过样品到达后表面时,散射更加严重,但零阶贝塞尔光束的非衍射特性减弱了太赫兹波穿过样品的折射和散射效应,使重建图像更接近样品的实际尺寸。

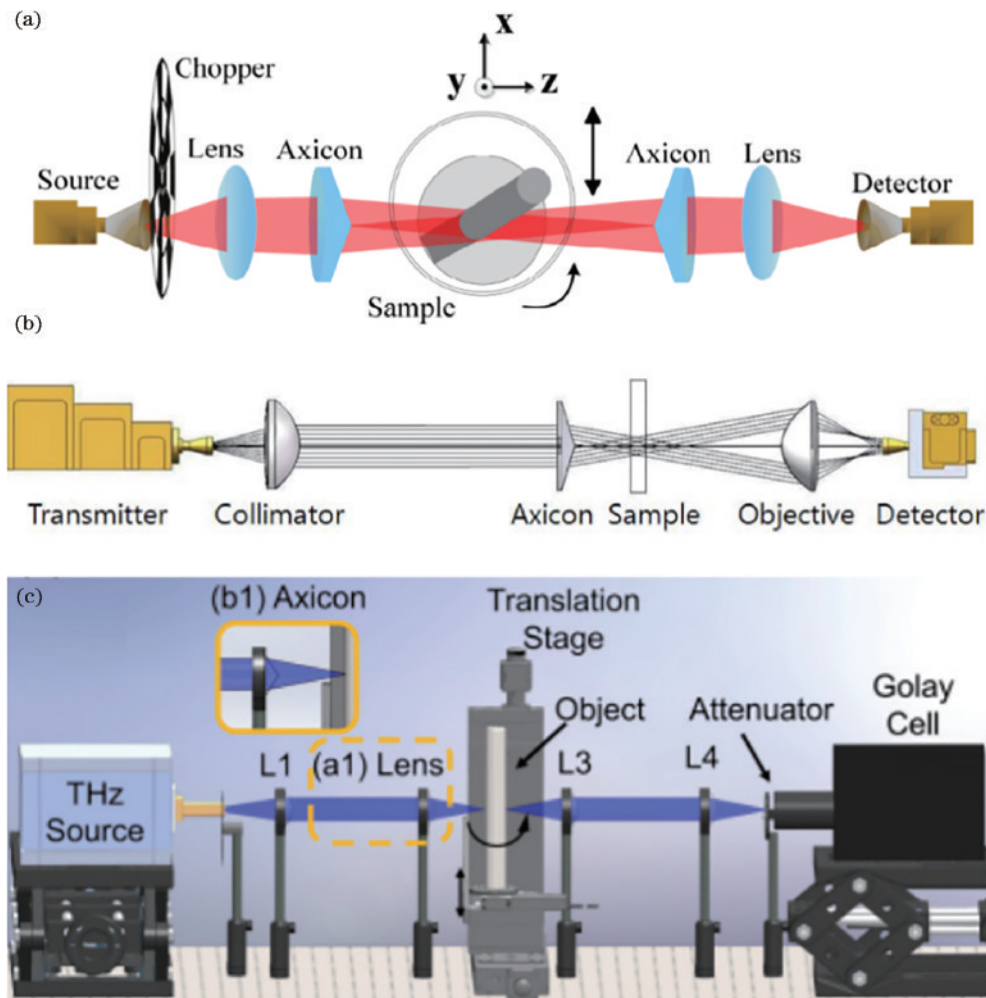


图 10 由不同顶角轴棱锥组成的 THz CT 系统。(a) 160°<sup>[85]</sup>; (b) 150°<sup>[86]</sup>; (c) 150°<sup>[69]</sup>

Fig. 10 THz CT systems composed of different axicon with apex angles. (a) 160°<sup>[85]</sup>; (b) 150°<sup>[86]</sup>; (c) 150°<sup>[69]</sup>

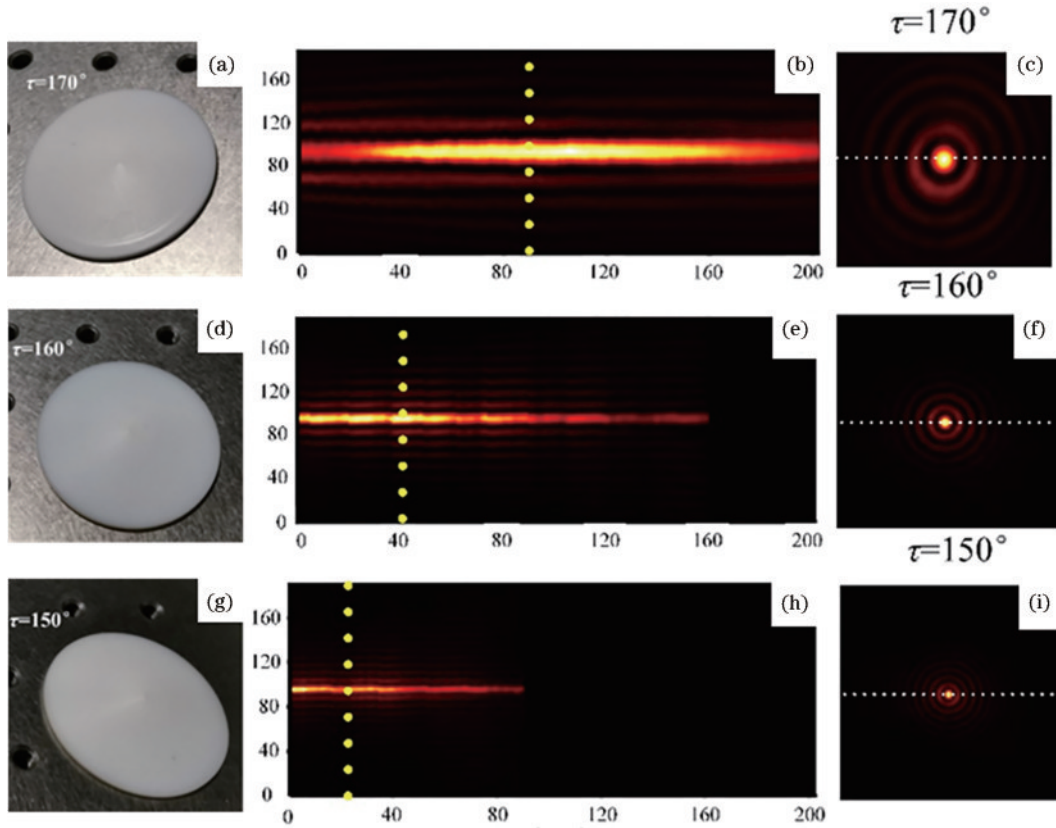


图 11 不同轴棱锥顶角的太赫兹贝塞尔光束<sup>[87]</sup>。(a)(d)(g)不同顶角的太赫兹轴棱锥;(b)(e)(h)  $x-z$ 平面上的贝塞尔光束强度图;(c)(f)(i)横截面的强度图

Fig. 11 Terahertz Bessel beams generated by axicons with different geometrical parameters<sup>[87]</sup>. (a) (d) (g) Axicons with different apex angles; (b) (e) (h) intensity images of Bessel beams on the  $x-z$  plane; (c) (f) (i) cross-sectional intensity images

目前贝塞尔光束已应用到多种太赫兹成像技术当中<sup>[88-89]</sup>,包括太赫兹计算层析成像技术,验证了其拓展轴向视场的能力,能实现一种大焦深清晰成像的太赫兹计算层析成像技术,但总的来说还尚处于起步阶段,也要考虑其较高的旁瓣能量占比对成像质量的影响。

#### 4 成像分辨率提高方法研究

太赫兹波计算层析的成像分辨率是由扫描焦斑的横向尺寸和焦深决定的,聚焦光斑的半峰全宽通常作为系统分辨率的体现,横向焦斑尺寸越小分辨率越高<sup>[90-91]</sup>。在太赫兹波段,常用的光场聚焦元件有离轴抛物面镜、透镜以及轴棱锥。如果按照传统的方法提高分辨率,需要调整光学系统的基本参数、改变样品所处空间的折射率等。比如透镜是一种最常用且重要的基础光学元件,一般由 TPX、高密度聚乙烯、聚四氟乙烯等材料制作而成,其原始聚焦光场的横向光斑一般无法突破衍射率极限,难以形成同时具有小横向尺寸和长轴向尺寸的聚焦光场。

于是,研究人员采用多种方法对传统聚焦透镜的光场进行三维整形,从而实现包括聚焦光斑阵列、延长焦深的“光针”、涡旋光束等一系列的新型光场分布<sup>[92-94]</sup>。形形色色的聚焦光场元件相继出现,比如固体浸没透镜<sup>[95]</sup>、超透镜<sup>[96]</sup>等,但由于这些透镜将光斑

聚焦于近场,其焦深很短,不太适用于对三维物体的成像,为实现高系统分辨率的 THz CT,提出了另一种高效的光场调控元件,即太赫兹超振荡透镜(TSOL)。它作为一种波前调制元件,遵循衍射元件的设计理念<sup>[97]</sup>,合理调制入射波的相位、振幅、偏振态等参数,会在远场产生复杂干涉,不仅可以产生低于系统衍射极限的横向焦斑,还可调控轴向焦深,形成长焦深的聚焦光场<sup>[90-91]</sup>。这种元件应用于太赫兹计算层析成像系统可有效提升重建结果的质量。目前 TSOL 的制作工艺以光刻、激光直写等为主,近些年逐步发展了 3D 打印技术,其快速、简便的制作方式渐渐成为热点。

光刻是制作 TSOL 的常用工艺。2018 年,重庆大学相关研究团队<sup>[90]</sup>采用深层离子刻蚀技术优化设计了 TPX 相位型 TSOL,工作波长为  $118.8 \mu\text{m}$ ,产生相位调制的台阶高度约为  $24.75 \mu\text{m}$ ,环带在折射率 3.4 的高阻硅上制成,个数为 119 个,焦距为  $420\lambda$ ,半径为  $160\lambda$ ,透镜能够在焦点区域沿光轴产生长度为  $19.7\lambda$  的亚衍射针。其中,最小焦点的横向尺寸为  $1.212\lambda$ ,比衍射极限  $1.476\lambda$  小 17.8%,比传统 TPX 透镜小 21.4%,最大旁瓣强度为 42.52%。设计的同心圆环阵列是采用基于粒子群算法和遗传算法的改进算法实现的,具有厚度小、质量轻、次衍射焦距大、焦深大



等优点。之后,该课题组<sup>[98]</sup>又采用硅刻蚀制作了相位型调制的太赫兹超振荡透镜,工作波长为  $118.8 \mu\text{m}$ ,数值孔径为  $0.606$ ,焦距为  $210\lambda$ ,最小线宽为  $30 \mu\text{m}$ ,产生的焦斑横向尺寸为  $0.67\lambda$ ,同样突破了系统的衍射极限( $0.825\lambda$ ),该聚焦光场具有较强的衍射旁瓣占比,约为  $24.9\%$ 。通过利用矢量角频谱理论和粒子群算法,解决了太赫兹透镜受到大焦点或不对称轮廓影响的问题。电子科技大学相关研究团队<sup>[99]</sup>通过二元相位板和传统透镜构成了分离式太赫兹超振荡透镜,其中二元相位板以石英为基底,在高阻硅上进行刻蚀。该器件由 3 个环带构成,最小线宽约为  $45 \mu\text{m}$ ,台阶高度约为  $24.75 \mu\text{m}$ ,在  $118.8 \mu\text{m}$  的照明波长下,焦距为  $242\lambda$ ,产生了横向尺寸为  $0.8\lambda$  的焦斑,是衍射极限  $1.15\lambda$  的  $0.70$ ,成像分辨率约为瑞利判据的  $0.85$ ,具有良好的光学性能,其超振荡透镜和光场分布如图 12 所示。

2021 年,日本大阪大学激光工程研究所研究人员<sup>[91]</sup>利用光刻技术在玻璃基板上制作了同心环形金属

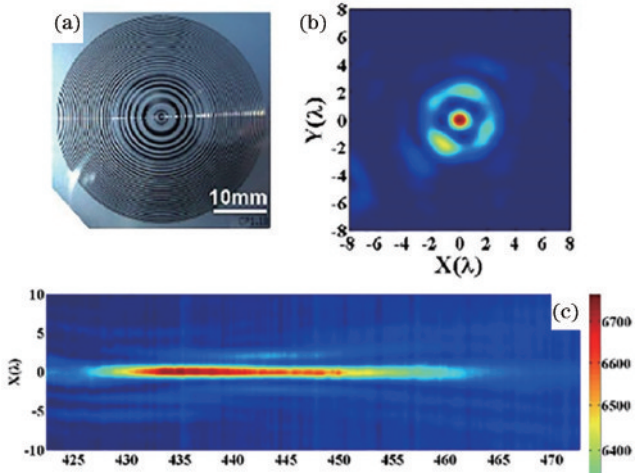


图 12 相位型太赫兹超振荡透镜及其聚焦光场分布<sup>[99]</sup>。(a) 实物图;(b) 焦平面处光场分布;(c) 轴向光场分布  
Fig. 12 Phase-type terahertz super-oscillating lens and its optical field distribution<sup>[99]</sup>. (a) Photograph of the THz super-oscillating lens; (b) intensity distribution at the focal plane; (c) axial intensity distribution

狭缝,这是一种振幅型超振荡结构的超振荡透镜,在  $3 \text{ mm}$  的工作波长下,制成由 50 个环带构成、最小线宽为  $1.8 \text{ mm}$  的 TSOL。采用逐点扫描成像系统对两个振幅型样品进行成像,标定了系统的分辨率约为  $0.5\lambda$ ,是衍射极限  $1.1\lambda$  的  $0.45$ ,测得焦距为  $25\lambda$ ,并具有  $47 \text{ mm}$  的焦深,是传统透镜的  $10.8$  倍,其超振荡透镜和光场分布如图 13 所示。不同的制作技术以及材料都会影响 TSOL 的成像结果,该组设计的 TSOL 产生了较小的横向焦斑尺寸。

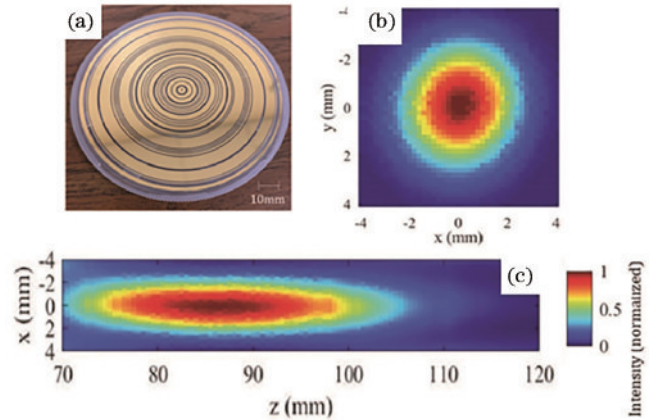


图 13 振幅型太赫兹超振荡透镜及其聚焦光场分布<sup>[91]</sup>。(a) 实物图;(b) 焦平面处光场分布;(c) 轴向光场分布  
Fig. 13 Amplitude-type terahertz super-oscillating lens and its optical field distribution<sup>[91]</sup>. (a) Photograph of the THz super-oscillating lens; (b) intensity distribution at the focal plane; (c) axial intensity distribution

北京工业大学相关课题组<sup>[100]</sup>使用折射率为  $1.65$  的均匀光敏树脂和 3D 打印技术制成了台阶高度为  $0.81 \text{ mm}$  的二元 TSOL,其台阶厚度为  $1.5 \text{ mm}$ ,直径为  $25 \text{ mm}$ 。使用  $278.6 \text{ GHz}$  雪崩二极管源产生连续太赫兹波,通过 TSOL 产生焦深度为  $25\lambda$ 、横向焦斑尺寸为  $0.97\lambda$ 、旁瓣比小于  $15\%$  的照明波束。将该聚焦波束应用于 THz CT,并采用 TV-IR 算法抑制重建断面图像中的伪影,如图 14 所示,可以识别壁厚为  $1.2 \text{ mm}$  的空心圆柱体和直径为  $1 \text{ mm}$  的实心细棒,壁厚和直径的平均误差均小于  $5\%$ 。低成本的 3D 打印技术非

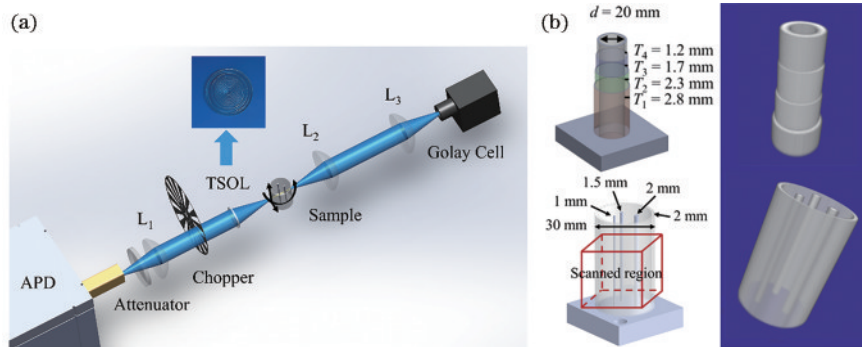


图 14 基于 TSOL 的 THz CT 系统及成像结果<sup>[100]</sup>。(a) THz CT 的装置原理;(b) 样品照片的三维重建结果  
Fig. 14 THz CT system based on TSOL and its imaging results<sup>[100]</sup>. (a) Schematic of the THz CT setup; (b) 3D reconstruction of the samples



常适用于工作在低频太赫兹频段( $<1$  THz)的光束整形和相位调制组件,环带的设计也可以使用计算效率

更高的深度学习算法等实现。表 2 展示了不同 TSOL 在工作时输出的光束信息。

表 2 不同 TSOLs 输出的光束信息

Table 2 Beam information output by different TSOLs

Reference	Operating frequency	Focal length	FWHM of the focal spot	Side lobe ratio
Method in Ref. [90]	2.52 THz	$420\lambda$	$1.212\lambda$	42.52%
Method in Ref. [91]	100 GHz	$25\lambda$	$0.5\lambda$	8.5%
Method in Ref. [93]	2.52 THz	$210\lambda$	$0.67\lambda$	24.9%
Method in Ref. [98]	2.52 THz	$242\lambda$	$0.8\lambda$	
Method in Ref. [100]	300 GHz	$25\lambda$	$0.8\lambda$	15%

通过合理设计太赫兹超振荡透镜的环带结构分布,可实现多种参数的光场调控,比如缩小焦斑尺寸、扩展轴向焦深及弱化衍射旁瓣等。立陶宛物理科学与技术中心相关课题组<sup>[101]</sup>近年来一直使用激光直写工艺制作了不同类型的 TSOL。在直径为 17.5 mm 的高阻硅圆形薄片上采用激光直写制备了 4 台阶菲涅耳透镜,这种工作在 0.58 THz 频率的相位调制元件可以产生焦距分别为 5 mm 和 10 mm 的两个焦平面,焦斑尺寸分别为 0.55 mm 和 0.43 mm,具有的焦深为 2.13 mm 和 1.55 mm。此后该课题组<sup>[102]</sup>又用同样的制作工艺设计了一种应用于 0.6 THz 频率的 Fibonacci 透镜,并采用有限时域差分方法进行了光场分析,该透镜直径约为 25.4 mm,由 9 个环带构成,刻蚀深度为 100  $\mu\text{m}$ ,工作波长 500  $\mu\text{m}$  时产生的聚焦光场可探测的焦平面分别位于元件后 6.7 mm 和 13.4 mm 处,焦斑尺寸分别为 0.46 mm、0.55 mm,应用于点扫成像系统时可以分别在两个焦平面处实现  $1.6\lambda$  (0.8 mm) 的分辨率。该课题组<sup>[103]</sup>在高阻硅上刻蚀制作了太赫兹多元菲涅耳波带片,其能够在 0.6 THz 的频率下产生横向焦斑尺寸为 0.43 mm、无衍射距离为 20 mm 的聚焦光场。将两个太赫兹多元菲涅耳波带片应用于逐点扫描成像系统,一片用于扫描光束的聚焦,另一片用于会聚光束透射样品的散射光,对厚度为 12 mm 的样品的分辨率约为  $1.6\lambda$  (0.8 mm),对薄样品的分辨率约为  $1.2\lambda$  (0.6 mm),展示了长焦深的聚焦光场对三维样品良好的成像分辨率。该组制作的 TSOL 能同时对两个焦面的物体成像,虽然第一个焦面分辨率较低,但两个焦面的成像结果也都达到了波长分辨率,这扩展了在连续波模式下调控 THz 光束的方法,为开发集成的 THz 成像系统提供了有力支撑。

## 5 成像速度提高方法研究

在太赫兹计算层析数据采集的过程中,通常需要对样品进行机械平移和旋转运动,逐点扫描往往费时费力,可以使用稀疏角度重建算法来减少所需的旋转角度数量。哈尔滨工业大学课题组<sup>[104]</sup>采用 2.52 THz 的光泵连续太赫兹波激光器搭建了一套基于逐点扫描模式的 THz CT 系统,采用改进的 SART 与高斯低通

滤波和开闭运算相结合的方法减少投影角度数量,投影角度数量减少到 9 个,将采集时间减少到原来的 1/4。2021 年,北京工业大学课题组<sup>[69]</sup>使用 TV-IR 重建算法对稀疏角度投影进行 THz CT 重建,在重建过程中引入梯度幅度函数,并使用梯度下降法进行约束处理,在保证重建质量的同时缩短数据采集时间,将数据采集时间缩短到原始的 1/4,这也起到了降低噪声和纠正失真的作用。与第 3 节中提高成像质量的重建算法不同的是,本节的算法是通过减少投影角度数量来实现扫描速率提升的,也就是说该算法会缩短数据采集的时间,而不是在后续重建上改进,这大大提升了成像速度。

另外一种提高成像采集速度的策略是使用振镜或转镜进行快速光束转向,这类照明模式可以取代二维机械位移台对样品进行横向运动的方式,已在各种太赫兹成像方法中得到成功验证<sup>[105-109]</sup>。日本德岛大学研究团队<sup>[110]</sup>采用柱面镜搭建了基于钛宝石激光器的 THz-TDS 成像光路系统,利用产生的二维线光束对样品进行扫描,以  $5^\circ$  为旋转步长,对厘米量级样品采集 36 个投影角度数据仅需要 6 min,对金属棒、塑料盒中的牙签、药胶囊 3 种样品的重建结果如图 15 所示。不过该实验采集速度还被 2 mm/s 的平移台速度限制,如果能够更换速度快 10 倍的平移台,总测量时间将减少至 36 s。

韩国食品研究院<sup>[111]</sup>将非球面  $f-\theta$  扫描透镜与二维振镜相结合,构建了一套基于单点探测器记录的连续太赫兹波二维扫描成像系统,实现了 4 mm 的空间分辨率和 100 mm 的扫描视场范围,并用于食品质量检测。次年,该课题组<sup>[112]</sup>利用多角镜扫描技术结合  $f-\theta$  透镜构建了一套频率为 210 GHz 的二维成像系统,以 0.32 frame/s 的速度连续获得  $250 \times 180$  像素的透射图像,其扫描速度可达 80 mm/s,空间分辨率达到 2.83 mm。虽然该课题组将成像系统命名为二维成像系统,但是其测量的样品是面粉中的蟋蟀和花生,所以本文也将其纳入三维成像领域。德国航空航天中心食品研究所相关研究人员<sup>[113]</sup>基于高速扫描转镜、QCL 和 Ge:Ga 光电导探测器搭建了一套连续太赫兹波计算层析成像系统。如图 16(a)所示,QCL 发射的光束通过振镜在物体上进行光栅扫描,然后透射的辐射聚焦

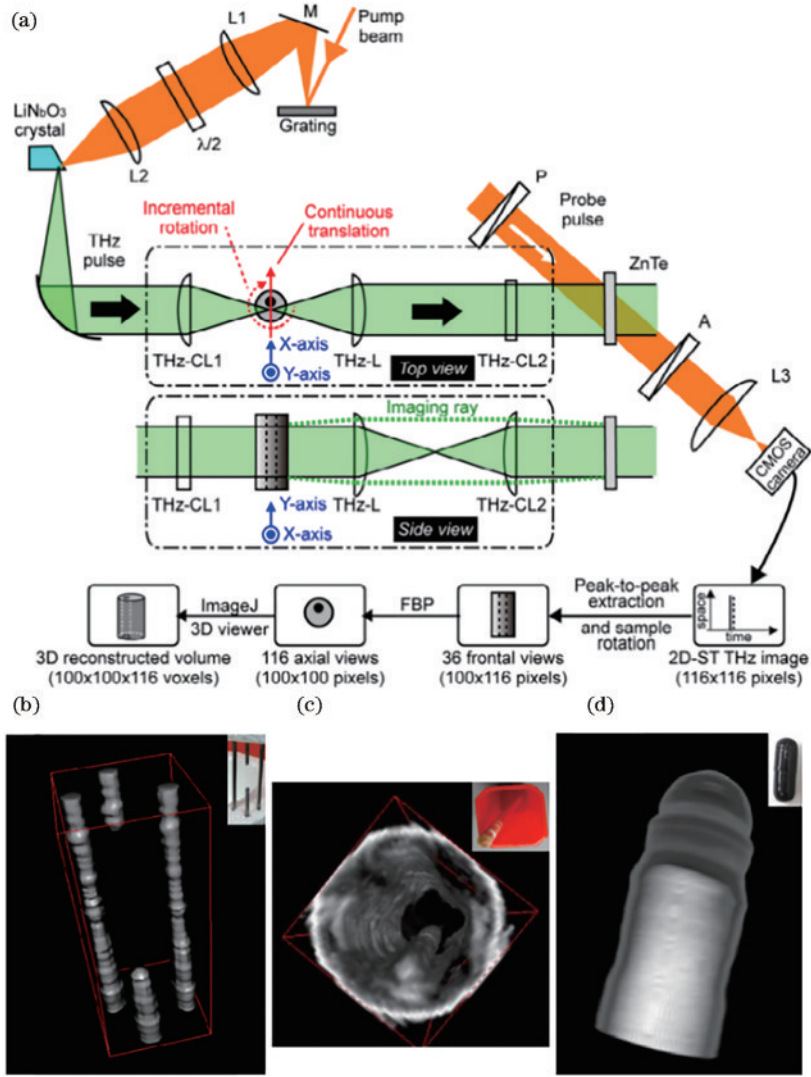


图 15 基于 THz-TDS 的 THz CT 系统及重建结果<sup>[110]</sup>。(a) 实验装置及三维重建示意图；(b) 金属棒三维重建图；(c) 塑料盒中牙签的三维重建图；(d) 药胶囊的三维重建图

Fig. 15 THz CT system based on THz-TDS and reconstruction results<sup>[110]</sup>. (a) Experimental setup and reconstruction flowchart; (b) 3D reconstruction of metal bars; (c) 3D reconstruction of a wooden toothpick in a plastic case; (d) 3D reconstruction of the medicine capsule

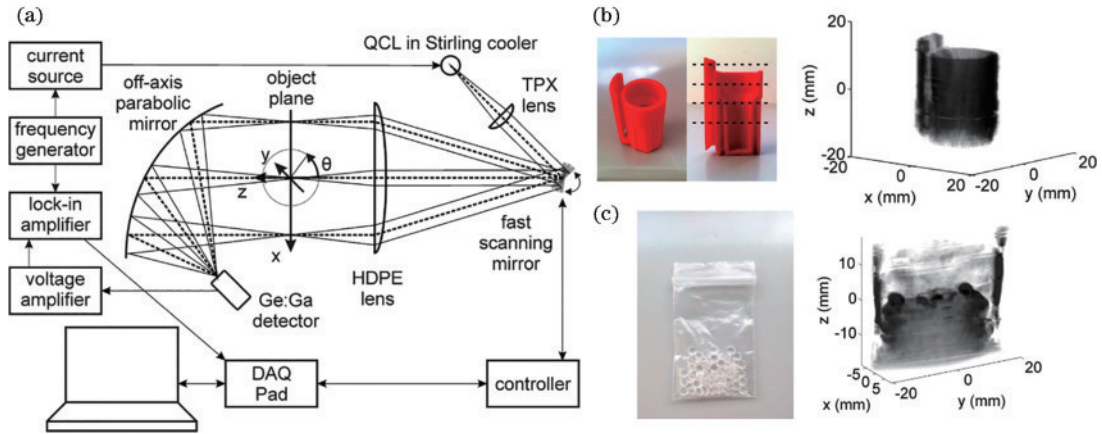


图 16 基于量子级联激光器和一维转镜的 THz CT 系统示意图及样品三维重建图<sup>[113]</sup>。(a) THz CT 系统示意图；(b) 笔帽及其三维重建图；(c) 装有 TPX 颗粒的袋子及其三维重建图

Fig. 16 Schematic of THz CT system based on QCL and fast scanning mirror and 3D reconstruction of sample<sup>[113]</sup>. (a) Schematic of THz CT system; (b) pen cap and the corresponding THz CT measurement result; (c) a bag filled with TPX pellets and the corresponding THz CT image

到 Ge:Ga 探测器上。由于转镜的扫描时间和 Ge:Ga 探测器的响应时间都非常快,因此该系统能在 1 s 内获得约 10000 个像素数的图像,图 16(b)和图 16(c)展示了笔帽和装有直径约 4 mm 的 TPX 颗粒的袋子以及它们的三维重建图像。

法国波尔多大学相关研究团队<sup>[114]</sup>使用二维振镜与大尺寸离轴抛物面镜相结合的扫描方式,代替了机械移动样品的方式,形成均匀照明区域,对 15 mm×15 mm×34 mm 的聚丙烯塑料笔帽的投影数据进行采集,时间少于 15 min。由于扫描采样的 THz CT 装置

收集投影数据时间长且物体需要保持高度稳定,北京工业大学相关课题组<sup>[115]</sup>用面阵式热释电探测器取代了单点探测器,将各投影角度下记录的同轴数字全息图回传到物体后切面,以此节省采集投影数据的时间。该课题组<sup>[116]</sup>提出了一种基于二维振镜扫描和全场记录的太赫兹波成像方法,优化设计非球面  $f-\theta$  物镜,实现了基于三角波信号驱动的面阵高密度匀速扫描,获得了高均匀度的照明光场和低相干噪声的强度图像,大幅度提升了三维层析数据采集效率及重建精度。表 3 对各研究团队改进扫描技术的方式进行了总结。

表 3 通过机械改进的扫描技术

Table 3 Scanning techniques by mechanical improvement

Method	Operating frequency	Beam steering strategy	Sample size / (mm×mm×mm)	Number of projection angles	Acquisition time /min
Method in Ref. [110]	1 kHz	THz cylindrical lens	10×10×10	36	6
Method in Ref. [112]	210 GHz	$f$ -theta scanning lens	100×100×8.5	16	—
Method in Ref. [113]	2.5 THz	Fast scanning mirror	20×20×20	30	1.45
Method in Ref. [114]	3.78 THz	Galvanometer scanner	15×15×34	36	15
Method in Ref. [115]	2.52 THz	Pyroelectric array detector	10×15×1	45	15
Method in Ref. [116]	2.52 THz	Double-mirror galvanometer	20×25×5	36	1.8

## 6 结论与展望

太赫兹波对非金属、非极性材料具有较好的穿透能力和成像对比度,并且不会对操作人员产生电离辐射伤害。太赫兹计算层析成像技术作为一种三维成像手段,十分适用于对高分子材料工件、纸质木质陶质骨质等文物的无损检测。随着太赫兹衍射光学元件、照明模式、光路结构和重建算法的快速发展,太赫兹计算层析成像技术往成像分辨率更高、重建质量更好、数据采集效率更快的方向不断进步,并向着仪器化和商业化迈进。虽然目前该成像技术在许多方面有很大的优势,但仍然存在一定的局限性,未来可以从以下几个方面进行突破:首先,需要借鉴、吸收和消化其他波段的计算层析成像方法,进一步发展和完善太赫兹计算层析成像理论,研究锥形光束等照明模式;其次,可以将深度学习、主成分分析、图像增强等技术相结合,在减少投影角度数量的同时提高成像分辨率和对比度;此外,还迫切需要研发紧凑、集成化的仪器设备,挖掘更多成像应用的领域。

### 参 考 文 献

- [1] Bowman T, Vohra N, Bailey K, et al. Terahertz tomographic imaging of freshly excised human breast tissues[J]. Journal of Medical Imaging, 2019, 6(2): 023501.
- [2] Hunsche S, Koch M, Brener I, et al. THz near-field imaging[J]. Optics Communications, 1998, 150(1/2/3/4/5/6): 22-26.
- [3] Zhan H L, Ren Z W, Chen R, et al. A new approach for desert reservoir exploration: terahertz prospecting[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2020, 10(1): 68-73.
- [4] Zhong H, Redo-Sanchez A, Zhang X C. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal-plane imaging system[J]. Optics Express, 2006, 14(20): 9130-9141.
- [5] Mao Y Q, Wu T X, Chen Y, et al. A 0.2-terahertz ceramic relic detection system based on iterative threshold filtering imaging and neural network[J]. Electronics, 2021, 10(18): 2213.
- [6] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.
- [7] 左超, 陈钱. 计算光学成像: 何来, 何处, 何去, 何从?[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 20220110. Zuo C, Chen Q. Computational optical imaging: an overview[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 20220110.
- [8] 林平, 李琦, 申作春. 连续场景太赫兹数字全息三维重建图像的参数影响[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(22): 220901. Lin P, Li Q, Shen Z C. Influence of parameters on terahertz digital holography 3D image reconstruction of a continuous scene[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(22): 220901.
- [9] 王与焯, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 太赫兹波三维成像技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(1): 1-18. Wang Y Y, Chen L Y, Xu D G, et al. Advances in terahertz three-dimensional imaging techniques[J]. Chinese Optics, 2019, 12(1): 1-18.
- [10] Liu C, Malek M, Poon L, et al. Simultaneous dual-contrast three-dimensional imaging in live cells via optical diffraction tomography and fluorescence[J]. Photonics



- Research, 2019, 7(9): 1042-1050.
- [11] Zhai M, Locquet A, Roquelet C, et al. Nondestructive measurement of mill-scale thickness on steel by terahertz time-of-flight tomography[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 393(15): 125765.
- [12] Ikeou T, Isogawa T, Ajito K, et al. Terahertz imaging using swept source optical-coherence-tomography techniques [C]//2012 IEEE International Topical Meeting on Microwave Photonics, September 11-14, 2012, Noordwijk, Netherlands. New York: IEEE Press, 2013: 290-293.
- [13] Wang S, Zhang X C. Pulsed terahertz tomography[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(6): 964.
- [14] Middleman D M, Hunsche S, Boivin L, et al. T-ray tomography[J]. Optics Letters, 1997, 22(12): 904-906.
- [15] 李运达, 李琦, 丁胜晖, 等. 太赫兹计算机辅助层析成像发展近况[J]. 激光与红外, 2012, 42(12): 1372-1376.  
Li Y D, Li Q, Ding S H, et al. Recent development of terahertz computed tomography imaging[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(12): 1372-1376.
- [16] 王与焯, 李海滨, 葛梅兰, 等. 太赫兹成像技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(18): 1811004.  
Wang Y Y, Li H B, Ge M L, et al. Terahertz imaging technology and its application[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(18): 1811004.
- [17] Ferguson B, Wang S H, Gray D, et al. T-ray computed tomography[J]. Optics Letters, 2002, 27(15): 1312-1314.
- [18] Jiang Z P, Xu X G, Zhang X C. Improvement of terahertz imaging with a dynamic subtraction technique [J]. Applied Optics, 2000, 39(17): 2982-2987.
- [19] Jiang Z P, Zhang X C. Terahertz imaging via electrooptic effect[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999, 47(12): 2644-2650.
- [20] Jiang Z P, Zhang X C. 2D measurement and spatio-temporal coupling of few-cycle THz pulses[J]. Optics Express, 1999, 5(11): 243-248.
- [21] Aoki K, Savolainen J, Havenith M. Broadband terahertz pulse generation by optical rectification in GaP crystals [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(20): 201103.
- [22] Crocker A, Gebbie H A, Kimmitt M F, et al. Stimulated emission in the far infra-red[J]. Nature, 1964, 201(4916): 250-251.
- [23] Minamide H, Ito H. Frequency-agile terahertz-wave generation and detection using a nonlinear optical conversion, and their applications for imaging[J]. Comptes Rendus Physique, 2010, 11(7/8): 457-471.
- [24] Preu S, Döhler G H, Malzer S, et al. Tunable, continuous-wave terahertz photomixer sources and applications[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 109(6): 061301.
- [25] Ding Y J. Progress in terahertz sources based on difference-frequency generation[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2014, 31(11): 2696-2711.
- [26] Le Noc L, Tremblay B, Martel A, et al. 1280 × 960 pixel microscanned infrared imaging module[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7660: 766021.
- [27] Georges M. Long-wave infrared digital holography[J]. New Techniques in Digital Holography, 2015: 219-254.
- [28] Hack E, Valzania L, Gäumann G, et al. Comparison of thermal detector arrays for off-axis THz holography and real-time THz imaging[J]. Sensors, 2016, 16(2): 221.
- [29] Auston D H, Smith P R. Generation and detection of millimeter waves by picosecond photoconductivity[J]. Applied Physics Letters, 1983, 43(7): 631-633.
- [30] Auston D H, Cheung K P. Coherent time-domain far-infrared spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1985, 2(4): 606-612.
- [31] Tripathi S R, Sugiyama Y, Murate K, et al. Terahertz wave three-dimensional computed tomography based on injection-seeded terahertz wave parametric emitter and detector[J]. Optics Express, 2016, 24(6): 6433-6440.
- [32] Aharon A, Rozban D, Klein A, et al. Detection and upconversion of three-dimensional MMW/THz images to the visible[J]. Photonics Research, 2016, 4(6): 306-312.
- [33] Nguyen K L, Johns M L, Gladden L, et al. Three-dimensional imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. Optics Express, 2006, 14(6): 2123-2129.
- [34] Helgason S. The Radon transform[J]. Progress in Mathematics, 2007, 13(4): 81-133.
- [35] Zalevsky Z, Mendlovic D. Fractional radon transform: definition[J]. Applied Optics, 1996, 35(23): 4628-4631.
- [36] Kalender W A. Computed tomography[M]. New Jersey: Wiley-VCH, 2011.
- [37] 王大勇, 宁冉, 金晓宇, 等. 3D打印衍射元件的高分辨太赫兹计算机辅助层析成像研究(特邀)[J]. 光子学报, 2022, 51(7): 0751405.  
Wang D Y, Ning R, Jin X Y, et al. High-resolution terahertz computed tomography using 3D printed diffractive elements(invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(7): 0751405.
- [38] Swinehart D F. The Beer-Lambert law[J]. Journal of Chemical Education, 1962, 39(7): 333-335.
- [39] Kocsis L, Herman P, Eke A. The modified Beer-Lambert law revisited[J]. Physics in Medicine and Biology, 2006, 51(5): N91-N98.
- [40] Kak A C, Slaney M, Wang G. Principles of computerized tomographic imaging[J]. Medical Physics, 2002, 29(1): 107.
- [41] Bracewell R N. Strip integration in radio astronomy[J]. Australian Journal of Physics, 1956, 9(2): 198-217.
- [42] 闫镔, 李磊. CT图像重建算法[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 36-42.  
Yan B, Li L. CT image reconstruction algorithm[M]. Beijing: Science Press, 2014: 36-42.
- [43] Wang D Y, Jin X Y, Zhao J, et al. Continuous-wave terahertz diffraction tomography for measuring three-dimensional refractive index maps[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(12): 123701.
- [44] 赵洁, 金晓宇, 王大勇, 等. 基于物理增强神经网络的连续太赫兹波同轴数字全息成像[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(18): 1811002.  
Zhao J, Jin X Y, Wang D Y, et al. Continuous-wave terahertz in-line digital holography based on physics-enhanced deep neural network[J]. Laser & Optoelectronics

- Progress, 2023, 60(18): 1811002.
- [45] Jin X Y, Zhao J E, Wang D, et al. Continuous-wave terahertz in-line holographic diffraction tomography with the scattering fields reconstructed by a physics-enhanced deep neural network[J]. *Photonics Research*, 2023, 11(12): 2149-2158.
- [46] Saba A, Gigli C, Ayoub A B, et al. Physics-informed neural networks for diffraction tomography[J]. *Advanced Photonics*, 2022, 4(6): 066001.
- [47] Zhu M M, Mao Z R, Li D Y, et al. Structure-preserved meta-learning uniting network for improving low-dose CT quality[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2022, 67(24): 245015.
- [48] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [49] Horé A, Ziou D. Image quality metrics: PSNR vs. SSIM [C]//2010 20th International Conference on Pattern Recognition, August 23-26, 2010, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2010: 2366-2369.
- [50] Herman G. Image reconstruction from projections: the fundamentals of computerized tomography[J]. *Medical Physics*, 1982, 9(3): 446-448.
- [51] Andersen A H, Kak A C. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm[J]. *Ultrasonic Imaging*, 1984, 6(1): 81-94.
- [52] Shepp L A, Vardi Y. Maximum likelihood reconstruction for emission tomography[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1982, 1(2): 113-122.
- [53] Hudson H M, Larkin R S. Accelerated image reconstruction using ordered subsets of projection data[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1994, 13(4): 601-609.
- [54] Recur B, Younus A, Salort S, et al. Investigation on reconstruction methods applied to 3D terahertz computed tomography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 5105-5117.
- [55] Recur B, Desbarats P, Domenger J P, et al. Terahertz radiation for tomographic inspection[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 091609.
- [56] Kamphuis C, Beekman F J. Accelerated iterative transmission CT reconstruction using an ordered subsets convex algorithm[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 1998, 17(6): 1101-1105.
- [57] Erdogan H, Fessler J A. Ordered subsets algorithms for transmission tomography[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 1999, 44(11): 2835-2851.
- [58] Recur B, Balacey H, Bou S J, et al. Ordered subsets convex algorithm for 3D terahertz transmission tomography [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 23299-23309.
- [59] Fosodeder P, Hubmer S, Ploier A, et al. Phase-contrast THz-CT for non-destructive testing[J]. *Optics Express*, 2021, 29(10): 15711-15723.
- [60] Beister M, Kolditz D, Kalender W A. Iterative reconstruction methods in X-ray CT[J]. *Physica Medica*, 2012, 28(2): 94-108.
- [61] May K H, Keil A, von Freymann G, et al. The conjugate gradient least square algorithm in terahertz tomography[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 142168-142178.
- [62] Worrall C, Alton J, Houghton M, et al. Continuous wave operation of a superlattice quantum cascade laser emitting at 2 THz[J]. *Optics Express*, 2006, 14(1): 171-181.
- [63] Gordon R, Bender R, Herman G T. Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1970, 29(3): 471-481.
- [64] Trampert J, Leveque J J. Simultaneous iterative reconstruction technique: physical interpretation based on the generalized least squares solution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1990, 95(B8): 12553-12559.
- [65] Gu L, Zhou T, Tan Z Y, et al. Computed tomography using a terahertz quantum cascade laser and quantum well photo-detector[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(10): 105701.
- [66] Zhou T, Zhang R, Yao C, et al. Terahertz three-dimensional imaging based on computed tomography with photonics-based noise source[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(8): 084206.
- [67] Wang T Y, Wang K J, Zou K G, et al. Virtual unrolling technology based on terahertz computed tomography[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 151: 106924.
- [68] Sidky E Y, Pan X C. Image reconstruction in circular cone-beam computed tomography by constrained, total-variation minimization[J]. *Physics in Medicine and Biology*, 2008, 53(17): 4777-4807.
- [69] Wang D Y, Ning R, Li G C, et al. 3D image reconstruction of terahertz computed tomography at sparse angles by total variation minimization[J]. *Applied Optics*, 2021, 61(5): B1-B7.
- [70] Zhong F S, Niu L T, Wu W W, et al. Dictionary learning-based image reconstruction for terahertz computed tomography[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2021, 42(8): 829-842.
- [71] Chen L Y, Wang Y Y, Xu D G, et al. Terahertz computed tomography of high-refractive-index objects based on refractive index matching[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 5900813.
- [72] Tepe J, Schuster T, Littau B. A modified algebraic reconstruction technique taking refraction into account with an application in terahertz tomography[J]. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2017, 25(10): 1448-1473.
- [73] Kak A C, Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001.
- [74] Fosodeder P, van Frank S, Rankl C. Highly accurate THz-CT including refraction effects[J]. *Optics Express*, 2022, 30(3): 3684-3699.
- [75] Durmin J, Miceli J J, Eberly J H. Diffraction-free beams [J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(15): 1499-1501.
- [76] Yao Z L, Li X W, Wang Z P, et al. High-efficiency

- fabrication of computer-generated holograms in silica glass using a femtosecond Bessel beam[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135: 106729.
- [77] Bitman A, Moshe I, Zalevsky Z. Improving depth-of field in broadband THz beams using nondiffractive Bessel beams[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4164-4166.
- [78] Xiang F D, Liu D F, Xiao L, et al. Generation of a meter-scale THz diffraction-free beam based on multiple cascaded lens-axicon doublets: detailed analysis and experimental demonstration[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 36873-36883.
- [79] Zhang K, Yuan Y Y, Zhang D W, et al. Phase-engineered metalenses to generate converging and non-diffractive vortex beam carrying orbital angular momentum in microwave region[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1351-1360.
- [80] Shaukat M U, Dean P, Khanna S P, et al. Generation of Bessel beams using a terahertz quantum cascade laser[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 1030-1032.
- [81] Busch S F, Town G E, Scheller M, et al. Focus free terahertz reflection imaging and tomography with Bessel beams[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(3): 318-326.
- [82] McLeod J H. The axicon: a new type of optical element [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(8): 592-597.
- [83] Brzobohatý O, Cizmár T, Zemánek P. High quality quasi-Bessel beam generated by round-tip axicon[J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 12688-12700.
- [84] Bitman A, Goldring S, Moshe I, et al. Computed tomography using broadband Bessel THz beams and phase contrast[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 1925-1928.
- [85] Niu L T, Wu Q, Wang K J, et al. THz computed tomography system with zero-order Bessel beam[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10623: 1062303.
- [86] Ok G, Choi S W, Park K, et al. Foreign object detection by sub-terahertz quasi-Bessel beam imaging[J]. *Sensors*, 2012, 13(1): 71-85.
- [87] Wang D Y, Li B, Rong L, et al. Extended depth of field in continuous-wave terahertz computed tomography based on Bessel beam[J]. *Optics Communications*, 2019, 432: 20-26.
- [88] Bitman A, Moshe I, Zalevsky Z. Broadband THz, extended depth of focus imaging based on step phase mask aided interferometry[J]. *Optics Communications*, 2013, 309: 1-5.
- [89] Meng H F, Xiang B, Zhang J L, et al. The generation of Bessel beam and its application in millimeter wave imaging[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, 35(2): 208-217.
- [90] Ruan D S, Li Z Y, Du L H, et al. Realizing a terahertz far-field sub-diffraction optical needle with sub-wavelength concentric ring structure array[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(27): 7905-7909.
- [91] Iba A, Domier C W, Ikeda M, et al. Subdiffraction focusing with a long focal length using a terahertz-wave super-oscillatory lens[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(19): 4912-4915.
- [92] Wang J C, Ma J, Shu Z Q, et al. Terahertz metalens for multifocusing bidirectional arrangement in different dimensions[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(1): 1-11.
- [93] Yang Y Q, Ye X, Niu L T, et al. Generating terahertz perfect optical vortex beams by diffractive elements[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1417-1425.
- [94] Li Z Y, Zou R J, Kong W P, et al. Terahertz synthetic aperture in-line holography with intensity correction and sparsity autofocusing reconstruction[J]. *Photonics Research*, 2019, 7(12): 1391-1399.
- [95] Chernomyrdin N V, Schadko A O, Lebedev S P, et al. Solid immersion terahertz imaging with sub-wavelength resolution[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22): 221109.
- [96] Yin Z P, Zheng Q, Wang K Y, et al. Tunable dual-band terahertz metalens based on stacked graphene metasurfaces[J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 41-45.
- [97] Wan X W, Shen B, Menon R. Diffractive lens design for optimized focusing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(12): B27-B33.
- [98] Yang M Y, Ruan D S, Du L H, et al. Subdiffraction focusing of total electric fields of terahertz wave[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124764.
- [99] Wu P, Sun X, Yao N, et al. Experimental study of terahertz superfocusing with super-oscillation phenomenon [J]. *Optics Communications*, 2022, 515: 128185.
- [100] Ning R, Wang D Y, Zhao J, et al. High accuracy terahertz computed tomography using a 3D printed super-oscillatory lens[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2023, 167: 107610.
- [101] Minkevičius L, Indriūnas S, Šniaukas R, et al. Terahertz multilevel phase Fresnel lenses fabricated by laser patterning of silicon[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 1875-1879.
- [102] Jokubauskis D, Minkevičius L, Karaliūnas M, et al. Fibonacci terahertz imaging by silicon diffractive optics [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(12): 2795-2798.
- [103] Minkevičius L, Jokubauskis D, Kašalynas I, et al. Bessel terahertz imaging with enhanced contrast realized by silicon multi-phase diffractive optics[J]. *Optics Express*, 2019, 27(25): 36358-36367.
- [104] Li Q, Li Y D, Ding S H, et al. Terahertz computed tomography using a continuous-wave gas laser[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(5): 548-558.
- [105] Romagnoli D, Circi C. Lissajous trajectories for lunar global positioning and communication systems[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2010, 107(4): 409-425.
- [106] Bazaei A, Yong Y K, Reza Moheimani S O. High-speed Lissajous-scan atomic force microscopy: scan pattern planning and control design issues[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(6): 063701.



- [107] Liao H E. Super long viewing distance light homogeneous emitting three-dimensional display[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9532.
- [108] Chen Y W, Hong Y J, Makita S, et al. Three-dimensional eye motion correction by Lissajous scan optical coherence tomography[J]. Biomedical Optics Express, 2017, 8(3): 1783-1802.
- [109] Hassan A M, Wu X, Jarrett J W, et al. Polymer dots enable deep *in vivo* multiphoton fluorescence imaging of microvasculature[J]. Biomedical Optics Express, 2019, 10(2): 584-599.
- [110] Jewariya M, Abraham E, Kitaguchi T, et al. Fast three-dimensional terahertz computed tomography using real-time line projection of intense terahertz pulse[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 2423-2433.
- [111] Ok G, Park K, Kim H J, et al. High-speed terahertz imaging toward food quality inspection[J]. Applied Optics, 2014, 53(7): 1406-1412.
- [112] Ok G, Park K, Chun H S, et al. High-performance sub-terahertz transmission imaging system for food inspection[J]. Biomedical Optics Express, 2015, 6(5): 1929-1941.
- [113] Rothbart N, Richter H, Wienold M, et al. Fast 2-D and 3-D terahertz imaging with a quantum-cascade laser and a scanning mirror[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(5): 617-624.
- [114] Perraud J B, Chopard A, Guillet J P, et al. A versatile illumination system for real-time terahertz imaging[J]. Sensors, 2020, 20(14): 3993.
- [115] Li B, Wang D Y, Zhou X, et al. Continuous-wave terahertz digital holographic tomography with a pyroelectric array detector[J]. Optical Engineering, 2016, 55(5): 053106.
- [116] 宁冉. 基于照明光场调控的太赫兹波计算层析成像方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2023: 121-124.
- Ning R. Research on terahertz computed tomography with illumination field modulation[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2023: 121-124.