

太赫兹自混合干涉成像景深扩展技术

蔡家轩¹, 解研^{2,3*}, 于洋², 王迎新^{2,3}, 陈猛³, 赵自然^{2,3**}, 白鹏¹, 杨宁¹, 楚卫东^{1***}

¹北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088;

²清华大学工程物理系, 北京 100084;

³危爆物品探测技术国家工程研究中心, 北京 100084

摘要 太赫兹波在生物学和危爆物检测等领域有广泛的应用前景,但其在成像上会受到探测器灵敏度的限制。搭建一套基于太赫兹量子级联激光器的自混合相干成像系统,将全息成像技术与自混合干涉测量相结合,实现太赫兹波段的大景深成像。利用自混合收发一体的特性,在不同偏焦程度下,对分辨率板上每毫米 2 个线对的区域进行二维成像,在偏焦 56 倍波长条件下得到与焦平面处相同的图像对比度。

关键词 自混合探测; 太赫兹成像; 全息技术; 量子级联激光器; 景深扩展

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP231331

Depth-of-Field Extension Technology for Terahertz Self-Mixing Interferometric Imaging

Cai Jiakuan¹, Xie Yan^{2,3*}, Yu Yang², Wang Yingxin^{2,3}, Chen Meng³, Zhao Ziran^{2,3**}, Bai Peng¹, Yang Ning¹, Chu Weidong^{1***}

¹Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

²Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

³National Engineering Research Center of Detection Technology of Dangerous Explosives, Beijing 100084, China

Abstract Terahertz waves have a wide range of applications in biology and hazardous explosive detection, but they suffer limitations in imaging owing to the sensitivity of the corresponding detectors. Herein, we demonstrate a self-mixing coherent imaging system with a terahertz quantum cascade laser. We achieve imaging with a large depth of field in the terahertz band by combining the holographic imaging technology and self-mixing interferometric measurement. We imaged an area of 2 pair line per millimeter on a resolution board in the off-focus plane in two dimensions using a feature like self-mixing of a transceiver. We obtain the same image contrast as that on the focal plane when the imaging plane is 56 times the wavelength offset.

Key words self-mixing measurement; terahertz imaging; holographic technology; quantum cascade laser; depth of field extending

1 引言

太赫兹是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波,随着人们对光学和电磁学领域的研究不断深入,发现了这一波段在生物医学^[1]、危爆探测^[2]等方向上的独特优势,太赫兹的实际应用也引起学界广泛兴趣。作为对激光最广泛、有效的利用手段之一,成像探测在太赫兹波段同样是研究热点^[3]。目前,太赫兹探测器在频率、探测精度、仪器便携性等方面还不够完善^[4],在

此背景下,自混合(SM)探测因高灵敏性、收发一体等特点,成为太赫兹成像的热门方向之一^[5]。

自混合探测指激光器发出的光与目标物作用后重新注入回激光器腔内,基于激光器在反馈光下动力学状态的变化,获得目标物信息的过程。自 1972 年 Spencer 等^[6]从理论上提出自混合技术后,其在半导体激光器上得以验证,并广泛应用于振动、位移、速度方面的探测^[7]。随着自混合技术的发展,在对目标物反射参数的感知上也有应用,例如对目标物反射系数^[8]、

收稿日期: 2023-05-18; 修回日期: 2023-06-12; 录用日期: 2023-06-20; 网络首发日期: 2023-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(62105178)

通信作者: *xie_yan@tsinghua.edu.cn; **zhaozr@tsinghua.edu.cn; ***chu_weidong@iapcm.ac.cn

平整度^[9]、厚度^[10]等参数的探测。此外,通过光注入,自混合也可用来测量激光器自身的线宽^[11]和线宽增宽因子^[12]等参数,使研究人员对激光器的工作状态有进一步的了解。量子级联激光器(QCL)是目前太赫兹波段的紧凑型大功率固态相干辐射源,具有体积小、可连续工作、激光频率可调等优异特性^[13],其也被证明在自混合上具有高度敏感性^[14],在太赫兹自混合干涉成像中发挥重要作用。

在聚焦成像应用中,景深是限制成像范围的重要因素,目前有多种方法用于提高成像景深,例如,对焦扫描技术通过在曝光过程中移动传感器,让不同距离的物体都经历一个模糊-对焦-模糊的过程,再通过去卷积得到全焦图像^[15];波前调控技术通过环形的孔径去除光斑的中心,使艾里斑中心变窄,从而降低偏焦对图像质量的影响^[16];深度学习算法采集多个不同焦深的图像,再进行融合,也可得到类似全聚焦的效果^[17]。这些方式有着不同的特点和适用场景,其中,全息重建是一种广泛应用于相干成像的技术,可以通过数字聚焦将发散的球面波转换为会聚的球面波,模拟在焦面成像时的情况,提高非聚焦成像下图像的分辨率^[18]。这种基于计算光学技术不需要额外的机械扫描或多个不同焦深镜头组合,只需物体相干光的幅值和相位,即可通过光学重建得到反射时的光场分布,通过反演消除偏焦带来的影响,还原焦平面处的成像精度。

自混合成像因收发一体的特点,可以在目标物精确位置未知的情况下利用散射光进行探测,但传统的焦平面成像技术在目标物偏离焦面时会导致分辨率大幅下降。当全息重建这种不需要额外扫描和镜头的成像技术和自混合探测这一无探测器的成像方法相结合时,可以极大地降低光路的复杂度。本文搭建了基于太赫兹量子级联激光器的折叠自混合光路,对不同程度偏离焦平面的分辨率板进行了扫描成像,并将全息算法应用于光学自混合测量的结果中,对实际偏焦 56 倍波长条件下得到的图像进行了重建,得到了与焦平面处成像基本一致的结果,扩展了太赫兹自混合成像在实际应用中的潜力。

2 基本原理

2.1 自混合干涉的基本原理

自混合理论的基本模型是:将目标物视作一个有固定反射系数的反射镜,该反射镜与激光器两端端面共同组成一个三反射镜模型,通过分析外部反馈光对激光器动力学稳定性的影响,得到激光器动力学参数与外部目标物的关系。

图 1 是三反射镜模型的具体表示,其中 M 代表激光器两端端面和样品对应的反射镜,下角标 1 和 2 表示激光器两个端面,ext 对应外部样品。 r 表示各镜的反射系数, t 表示透射系数, β 和 β_0 代表腔内外波矢大小,

E_0 为腔内激光初始电场强度, L 和 L_{ext} 是激光腔和外腔长度, n_e 和 n_0 是激光腔内外折射率。

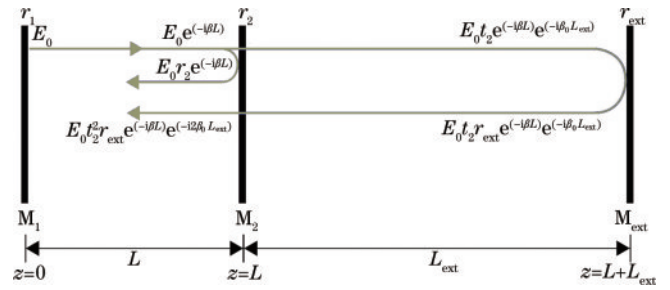


图 1 三反射镜自混合模型

Fig. 1 Three mirror model of self-mixing

若将 M_2 在激光腔内的反射光和经 M_2 透射入激光腔内的光合并,将 M_2 和 M_{ext} 视作一个等效反射镜 M_{eff} ,其等效反射系数为 r_{eff} ,则有

$$E_0 r_{\text{eff}} \exp(-i\beta L) = E_0 r_2 \exp(-i\beta L) + E_0 t_2^2 r_{\text{ext}} \times \exp(-i\beta L) \exp(-i2\beta_0 L_{\text{ext}}), \quad (1)$$

即等效反射系数可表示为 $r_{\text{eff}} = r_2 + t_2^2 r_{\text{ext}} \times \exp(-i2\beta_0 L_{\text{ext}})$, 以此代替自由运行时激光器出光端面反射系数 r_2 , 并将其代入自由运行下激光器增益系数 $g_0 = \alpha_s + \ln(1/r_1 r_2)/L$, 其中 α_s 为损耗系数,同时考虑反馈光强度远小于腔内的状况,可以得到有光反馈下激光器稳定时增益系数 g_c 与自由运行时增益系数 g_0 之差,表达式为

$$\Delta g = g_c - g_0 = -\ln[1 + \kappa_{\text{ext}} \cos(2\pi\nu\tau_{\text{ext}})]/L, \quad (2)$$

式中:外腔耦合系数 $\kappa_{\text{ext}} = \frac{r_{\text{ext}}}{r_2} (1 - r_2^2) \ll 1$; ν 表示有光反馈下激光器的激光频率;光在外腔的传播时间 $\tau_{\text{ext}} = 2n_e L_{\text{ext}}/c$ 。由于外腔耦合系数 κ_{ext} 很小,对其进行泰勒展开并取一阶项,则式(2)可化简为

$$\Delta g = -\kappa_{\text{ext}} \cos(2\pi\nu\tau_{\text{ext}})/L, \quad (3)$$

增益系数的变化影响了激光激光时的稳定条件,从而影响反转粒子数密度 N , 有

$$\frac{\partial n_e}{\partial N} \Delta N = -\frac{\alpha c}{4\pi\nu} \Delta g, \quad (4)$$

式中: α 是激光器的线宽增宽因子。对于半导体激光器,其端电压与 N 成正比,故在光反馈条件下,反转粒子数密度变化 ΔN 会导致激光器由自由运行时的 V_0 变为 V , 有

$$V - V_0 = V_{\text{SM}} = C \cos \varphi, \quad (5)$$

式中: V_{SM} 为自混合电压信号; V_0 是激光器自由运行时的端电压; $\varphi = 2\pi\nu\tau_{\text{ext}}$ 。 C 是反馈系数,与外腔耦合系数 κ_{ext} 、腔内光子寿命 τ_n 、激光器自由运行时的光子密度 S_0 及激光群速度 v_g 相关,可表示为

$$C = \frac{\kappa_{\text{ext}}}{g_0} \left(1 + \frac{1}{v_g S_0 \tau_n \frac{\partial g}{\partial N}} \right), \quad (6)$$

式中,除 κ_{ext} 外,其余均为激光器固定参数,因此,通过一已知参照物进行自混合标定后,即可通过自混合电压幅值信号得到样品的反射系数。

2.2 全息重建下的景深增大

当成像目标物偏离会聚透镜的焦面时,若偏焦距离大于高斯光束的瑞利距离 $Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ 时,即可将其视为发散的球面波,以焦点为坐标系时,电场分布可写为

$$E(r') = \frac{E}{r'} \exp(jkr'), \quad (7)$$

式中:场点到焦点之间的距离 $r' = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; k 为波矢大小。对于反射系数分布为 $f(x, y, z)$ 、位置位于 (x_0, y_0) 的目标物,其反射的球面波在焦点处电场的叠加 s 可写作

$$s(x=0, y=0, k) = \iiint f(x-x_0, y-y_0, z) \times \frac{\exp(-j2kr')}{r'^2} dx dy dz, \quad (8)$$

这就是最终会重新注入回激光器腔内电场的幅度。

根据标量衍射理论,将式(8)写为角谱传播形式,并以 $x' = x + x_0, y' = y + y_0, z' = z - z_0$ 作变量替换, z_0 代表目标物与焦点在 z 方向上的距离,得到

$$s(x' = x_0, y' = y_0, k) = \int_{z_0}^{\infty} \frac{j\lambda}{2(z' + z_0)} \iint A(f_x, f_y, z' + z_0) \cdot \exp[-jk_z(z' + z_0)] \times \exp[j2\pi(f_{x_0} x_0 + f_{y_0} y_0)] df_x df_y dz', \quad (9)$$

通过对式(9)进行一次一维和二维傅里叶变换,即可自测量到二维强度分布 $s(x_0, y_0, k)$, 得到目标物反射系数分布的角谱,再进行一次二维傅里叶逆变换即可得到目标物的图像,即

$$f(x, y, z) = \frac{2z}{j\lambda} \text{FT}_{2D}^{-1} \left\{ \text{FT}_{1D} \left\{ \text{stolt} \left\{ \text{FT}_{2D} [s(x_0, y_0, k)] \times \exp(-jk_z z_0) \right\} \right\} \right\}, \quad (10)$$

式中: $\text{stolt} \left\{ \text{FT}_{2D} [s(x_0, y_0, k)] \exp(-jk_z z_0) \right\}$ 表示对 $s(k_{x_0}, k_{y_0}, k_z)$ 进行 stolt 插值,得到均匀排布的 $s(k_{x_0}, k_{y_0}, k_z)$, 以便后续进行傅里叶变换。通过式(10),即可基于偏焦目标物在 x 和 y 方向上的扫描结果,重建目标物在焦面处成像的结果。

2.3 自混合成像的信号提取

自混合成像装置如图 2 所示。QCL 发出的太赫兹激光首先经硅透镜,再由一对直径和焦距均为 50.08 mm 的离轴抛物面反射镜整合,得到一束平行度

较好的激光光束,再经两个互相垂直的反射镜,最后由一个离轴抛物面镜会聚到成像样品上。被样品反射的光经原路注入回激光器腔内,导致激光器端电压发生变化。从式(5)可知,想获得自混合信号的幅值和相位,需要通过调制获得至少一个完整周期的自混合干涉正弦信号。目前主流的调制方法主要有两种,一是基于电流对激光器激射频率进行调谐,二是直接改变外腔长,即对 τ_{ext} 进行调制。基于电流可以实现较快的调谐速度,但激光器的伏安特性也会导致电压的改变,影响自混合信号的提取,信噪比较低^[19]。基于外腔长的调节一般通过机械方法实现,速度稍慢,但稳定性和信噪比表现良好。为了更好地探索自混合成像的分辨极限,选用外腔长调制法进行成像,利用电动位移台控制两个反射镜的位置,导致外腔长的改变,使式(5)中 τ_{ext} 发生变化。当外腔长变化达到半个波长时,就可在激光器端电压上看到自混合电压信号的一个周期,通过对周期信号幅度和相位的读取,得到 C 和 φ , 对应式(10)中的 s 和 k , 沿图 2 中的 x 和 y 方向进行扫描,得到 $s(x_0, y_0, k)$ 并将其代入式(10),即可得到全息重建后的图像。

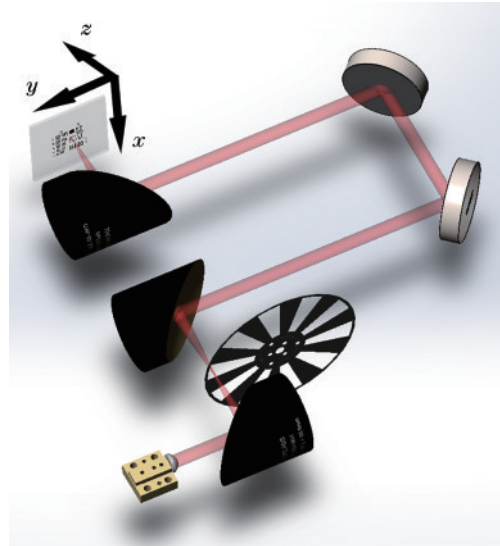


图 2 自混合干涉成像装置示意图

Fig. 2 Imaging schematic of self-mixing interferometer

实验所用的 THz-QCL 在热沉温度 67 K 环境下连续工作,其驱动电流为 0.45 A (阈值电流为 0.3 A),此时激射频率为单纵模 4.16 THz (波长为 72 μm)。在测量时,对腔长和样品的扫描通过电动位移台 (NRT100, Thorlabs 公司) 实现。QCL 两端电压通过低噪声放大器 (SR560, SRS 公司) 去直流分量后放大 500 倍,借助数据采集卡 (USB-6251, NI-DAQ 公司) 将信号传输至电脑,在 Labview 程序上,实现对位移台、样品的同步控制和自混合信号的实时显示。样品选用 USAF1951 分辨率负板,通过在浮法玻璃上沉积铬制成,每毫米线对最少 1 对,最多 228 对。浮法玻璃和铬在 4.16 THz 处的复折射率分别为 $2.2858 + 0.5160i$ 和

74.214+108.58i^[20-21]。

本实验中,控制扫描腔长的速度为 40 μm/s,光路中两平面镜只要移动 λ/4 就可以得到一个自混合周期。实际成像中,包括目标物的移动时间在内,平均每个像素点成像时间约为 1 s。

3 分析与讨论

3.1 光斑尺寸的测量及发散模拟

为了明确在样品处光束的状态,首先利用刀片法在焦点处对光束形状进行测量,结果如图 3 所示,高斯光束光场强度分布为

$$I = I_0 \exp\left[-2\left(\frac{x-x_c}{w}\right)^2\right], \quad (11)$$

拟合后得到光斑半径 w 为 161.65 μm。高斯光束中,光斑半径随传播距离变化的公式为

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0}\right)^2}, \quad (12)$$

式中: w_0 为光腰处的光斑半径; $w(z)$ 是与光腰距离 z 处光斑的半径。在得到焦点处的光腰半径 161.65 μm 后,代入波长 72 μm,即可得到发散区不同位置的光斑半径。

在实际成像中,根据瑞利判据,图像分辨率是光斑强度分布的半峰全宽(FWHM),与高斯光束中的光腰直径略有差异,光场强度的半峰全宽 $d =$

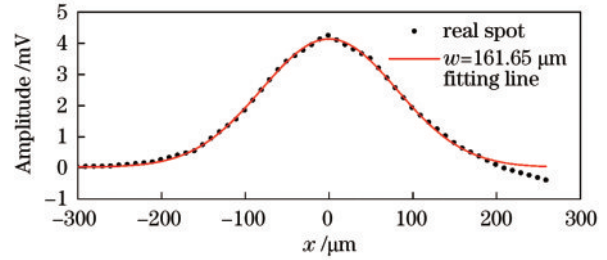


图 3 刀片法测得的聚焦后光场强度分布
Fig. 3 Spot intensity distribution after focusing measured by knife-edge method

$2w(z) \sqrt{\ln 2}$, 最后得到偏焦时光场强度 FWHM 的变化,如图 4(a)所示。可以看到,在距离焦点 300 μm 内,FWHM 基本与焦点处相同(269.2 μm),但当偏焦距离达到 1 mm 后,光束的发散呈线性趋势,即可视为球面波。自建的自混合成像系统在对偏离焦点的目标物成像时,会由于偏焦导致反馈光准直性下降,使得信噪比下降。本系统中,当偏焦达到 4 mm 以上时,噪声就会对自混合信号的提取产生较大影响,尤其在相位方面。因此,将偏焦的范围控制在 4 mm 以内,偏焦 2 mm 时, $d = 544.6 \mu\text{m}$,与分辨率板第一组第一级(线对宽度 500 μm,如图 4(b)所示,以下简称 1-1)相近,在偏焦 2 mm 及以上时,光斑直径大于线对宽度,同时信号仍有较高的信噪比,故对 1-1 进行了自混合相干成像及重建。

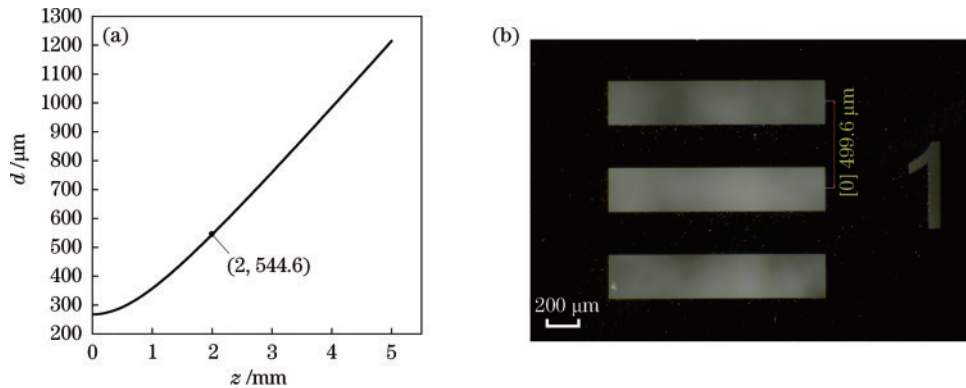


图 4 通过模拟光斑尺寸选择合适的成像区域。(a)偏离焦点($z=0$)时,FWHM 随传播距离的变化模拟;(b)光学显微镜下分辨率板 1-1 照片
Fig. 4 Appropriate imaging area selected by simulation of spot size. (a) Simulation of FWHM varying with propagation distance when deviating from the focal plane ($z=0$); (b) image of 1-1 on resolution board by optical microscope

3.2 对分辨率板的扫描成像及重建

图 5(a)是在不同偏焦程度下,对分辨率板 1-1 中间沿 x 方向扫描得到的结果。1-1 上,一个金属或玻璃条纹的宽度为 250 μm,当光斑直径小于一个条纹的宽度时,扫描结果会在下降和上升后有一段平整区域;出现偏焦时,光斑直径大于一个条纹宽度,对比度有所降低;当偏焦导致 FWHM 大于一个线对的宽度时,从样品不同位置反射的光混杂在一起,就不能在幅值上观测到条纹图案。图 5(b)是利用式(10)重建的结果,可以看到,在 0~4 mm 范围内,经过重建,各条纹

对比度基本相同。图 5(c)~(e)是在 0、2、4 mm 偏焦下,幅值和全息重建结果的对比。在 0 mm,即焦点处,对比度和曲线形状没有明显变化。由于相位对温度和振动等环境因素十分敏感,全息重建对应的虚线存在一定噪声。在偏焦 2 mm 时,虽然曲线峰和谷的对比度变化不大,但可以看到,虚线的谷底宽度比实线要宽,即全息重建提升了条纹边缘的锐利程度。当偏焦达到 4 mm 时,可以明显看到幅值上的混乱和算法重建的明显效果,重建后的对比度和焦面上的对比度基本一致。

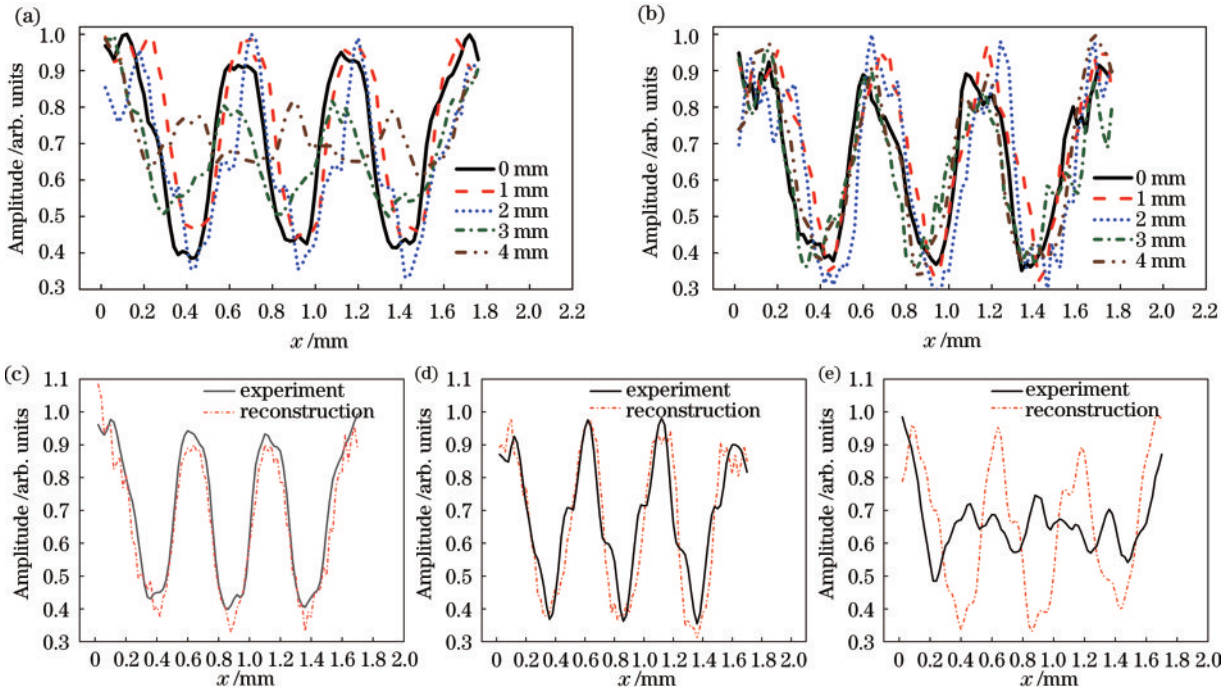


图 5 对 1-1 一维 x 方向扫描及重建结果。(a)不同偏焦下的幅值;(b)不同偏焦下的重建结果;(c)焦面处的结果对比;(d)偏焦 2 mm 时的结果对比;(e)偏焦 4 mm 时的结果对比
 Fig. 5 Scanning and reconstruction results for 1-1 along x axis. (a) Amplitude under each off-focus plane; (b) reconstruction results under each off-focus plane; (c) result comparison on the focal plane; (d) result comparison on plane 2 mm away to focal plane; (e) result comparison on plane 4 mm away to focal plane

图 6 是不同偏焦程度下对分辨率板 1-1 的幅值成像和全息重建成像的结果。参照图 5 的分析得到:在焦面处,图 6(a)与图 6(d)差别不大;偏焦 2 mm 时,图 6(b)中条纹边缘有明显虚影,图 6(e)的边缘仍旧锐利;当偏焦达 4 mm 时,虽然重建得到的图 6(f)有一定噪声,噪声影响图像质量,但仍能明显分辨出三个玻璃条纹,而从图 6(c)已彻底不能看到条纹。

结构相似度 (SSIM) 是用来刻画成像准确性和衡量复原效果的基本参数^[22]。图 7 是图 6 中各幅图像与原始图像结构相似度的计算结果,实线对应的幅值成像相似度随着偏焦距离增大近似呈线性下降,而重建后的图像结构相似度如虚线所示,在偏焦 2 mm 时下降到 0.5,之后基本能维持在 0.5 附近。重建后图像不能完全与原图像吻合的一个主要原因是测量信号中的

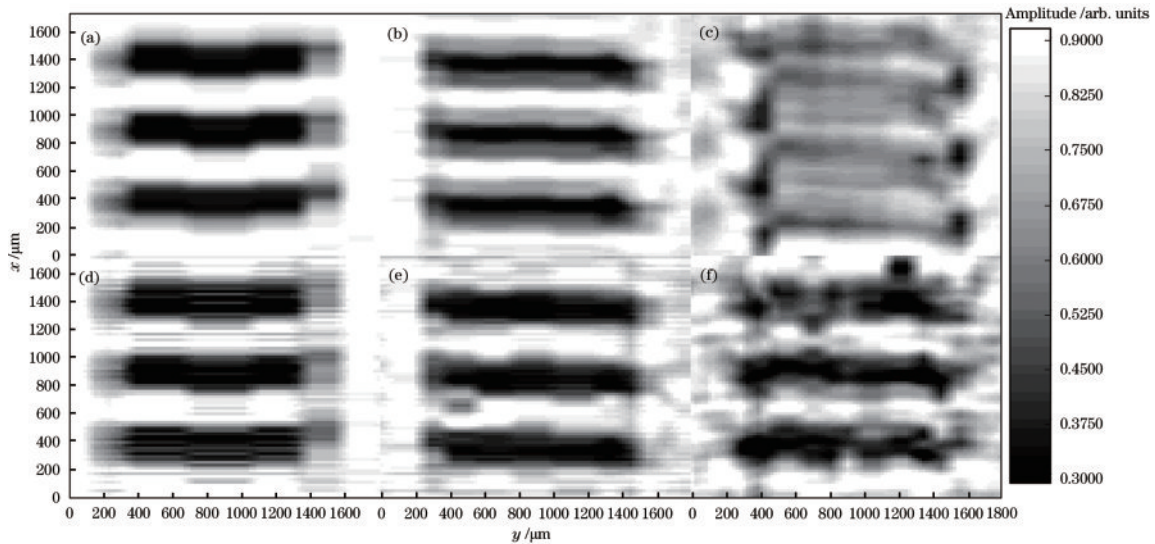


图 6 对 1-1 幅值成像及重建结果。(a)~(c)偏焦 0, 2, 4 mm 时的幅值成像;(d)~(f)偏焦 0, 2, 4 mm 时的重建图像
 Fig. 6 Amplitude and reconstruction images of 1-1. (a)-(c) Amplitude images on plane 0, 2, 4 mm away to focal plane; (d)-(f) reconstruction images on plane 0, 2, 4 mm away to focal plane

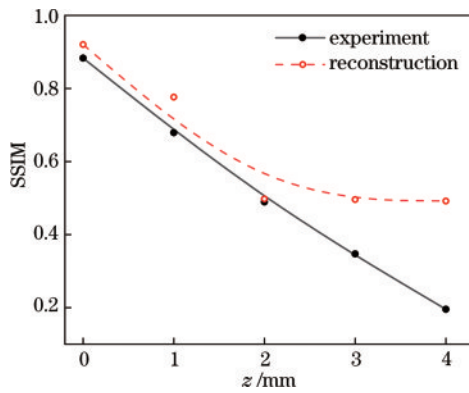


图7 图像的结构相似度随偏焦距离的变化

Fig. 7 Variation of structural similarity of images with offset distance

噪声影响。偏焦会导致测量结果的对比度下降,噪声在全息重建时影响最终结果。

噪声来源是相位的波动,根据反射系数的定义式,

$$\hat{r} = \frac{n-1+ik}{n+1+ik} = re^{i\theta}, \quad (13)$$

结合浮法玻璃和铬在 $72 \mu\text{m}$ 处的复折射率,得到二者复反射系数的相位分别为 0.2238 rad 和 0.0126 rad 。在实验中,温度的波动在 20 mK 以内时,温度对 QCL 激光频率的影响约为 -90 MHz/K ,根据式(5),结合光路长度,得到 20 mK 对应的相位变化约为 0.041 rad ,即为玻璃与铬相位之差的 19% 。当幅值的对比度较大时,相位的波动对全息重建的影响较小,但当偏焦较为严重时,主要依靠相位在全息重建中发挥的作用重建图像,因此,相位上的噪声会对最终结果产生明显影响,导致图像质量有所降低,若能有效控制温度的波动,就会显著减小噪声的幅度。

4 结 论

利用全息成像技术,在 THz-QCLs 自混合相干成像系统中,实现太赫兹大景深成像。在分辨率板上每毫米 2 个线对区域,在偏离焦平面 4 mm (56 倍波长)处,利用全息算法进行重建,得到与焦平面处相同的图像对比度,验证了全息算法应用于太赫兹自混合干涉测量的可行性,扩展了太赫兹自混合探测的应用范围。

参 考 文 献

- [1] Wilminck G J, Grundt J E. Invited review article: current state of research on biological effects of terahertz radiation [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, 32(10): 1074-1122.
- [2] Davies A G, Burnett A D, Fan W H, et al. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs[J]. *Materials Today*, 2008, 11(3): 18-26.
- [3] Mittleman D M. Twenty years of terahertz imaging[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9417-9431.
- [4] Lewis R A. A review of terahertz detectors[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(43): 433001.
- [5] Dean P, Leng Lim Y, Valavanis A, et al. Terahertz imaging through self-mixing in a quantum cascade laser [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(13): 2587.
- [6] Spencer M B, Lamb W E. Laser with a transmitting window[J]. *Physical Review A*, 1972, 5(2): 884-892.
- [7] Giuliani G, Norgia M, Donati S, et al. Laser diode self-mixing technique for sensing applications[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2002, 4(6): S283-S294.
- [8] Zhang Y B, Wei Y B, Chen C X, et al. Self-mixing interferometer based on frequency analysis method for accurate refractive index measurement[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(2): 6801306.
- [9] Ottonelli S, Dabbicco M, de Lucia F, et al. Laser-self-mixing interferometry for mechatronics applications[J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3527-3548.
- [10] Fathi M T, Donati S. Thickness measurement of transparent plates by a self-mixing interferometer[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1844-1846.
- [11] Giuliani G, Norgia M. Laser diode linewidth measurement by means of self-mixing interferometry[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(8): 1028-1030.
- [12] Yu Y G, Giuliani G, Donati S. Measurement of the linewidth enhancement factor of semiconductor lasers based on the optical feedback self-mixing effect[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(4): 990-992.
- [13] Williams B S. Terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(9): 517-525.
- [14] Leng L Y, Dean P, Nikolić M, et al. Demonstration of a self-mixing displacement sensor based on terahertz quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(8): 081108.
- [15] Kuthirummal S, Nagahara H, Zhou C Y, et al. Flexible depth of field photography[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(1): 58-71.
- [16] Welford W T. Use of annular apertures to increase focal depth[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1960, 50(8): 749-753.
- [17] Wang Z J, Ziou D, Armenakis C, et al. A comparative analysis of image fusion methods[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(6): 1391-1402.
- [18] Sheen D M, McMakin D L, Hall T E. Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2001, 49(9): 1581-1592.
- [19] Rakić A D, Taimre T, Bertling K, et al. Swept-frequency feedback interferometry using terahertz frequency QCLs: a method for imaging and materials analysis[J]. *Optics Express*, 2013, 21(19): 22194-22205.
- [20] Rubin M. Optical properties of soda lime silica glasses[J]. *Solar Energy Materials*, 1985, 12(4): 275-288.
- [21] Rakić A D, Djurisić A B, Elazar J M, et al. Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5271-5283.
- [22] 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.