太赫兹数字全息成像的研究进展

李琦丁胜晖李运达薛凯王骐

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室,黑龙江哈尔滨 150081)

摘要 随着太赫兹成像技术的发展,人们对太赫兹成像系统的成像性能如分辨率、成像速率、成像维度等均提出了 越来越高的要求。为了消除衍射对太赫兹成像的影响,提高太赫兹成像系统所能达到的性能指标,许多学者已针 对太赫兹数字全息技术进行了研究。首先对太赫兹数字全息的基本原理进行了概述,阐述并分析了目前国内外有 关太赫兹数字全息成像的研究进展,这些研究显示太赫兹数字全息技术在提高成像分辨率、扩展成像维度等方面 具有很大的发展潜力,且具备实时成像的能力,具有十分广阔的应用及发展前景。

关键词 全息术;太赫兹成像;数字全息术

中图分类号 TN26 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP49.050006

Advances in Research on THz Digital Holographic Imaging

Li Qi Ding Shenghui Li Yunda Xue Kai Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract With the development of THz imaging technique, there have been great demands for the improvement of THz imaging performances such as imaging resolution, imaging speed, image dimension, etc. To eliminate the influence of diffraction on imaging results and to improve the performance of THz imaging system, a lot of researchers have turned their attentions to THz digital holography. Firstly, some fundamental theories for THz digital holography are briefly introduced. Then a comprehensive description on the advances in the domestic and international research of THz digital holography is povided. These investigations exhibit that THz digital holography has great potentials to improve the imaging resolution and extend image dimension, etc. Moreover, THz digital holography has the capability of real-time imaging. Those characterizations make THz digital holography a promising technique which has an exciting application and development prospect.

Key words holography; THz imaging; digital holography OCIS codes 110.6795; 090.1995; 110.1758; 040.1240

1 引 言

太赫兹科学技术是当前科学界的一个前沿研究领域,由于其潜在的科学价值和应用价值,受到世界各个 发达国家的高度重视。太赫兹成像以其较低的光子能量和对可见光、近红外不透明的非金属和非极性物质 (如纸张、布和聚乙烯等)的较高的穿透能力,在无损检测、医学检查、安全检测、环境监测和空间遥感等方面 展现出巨大的前景。由于太赫兹辐射没有 X 射线的电离特性,因此不会对材料和人体造成伤害,使其较 X 射线有更大的应用优势。

数字全息是传统的光全息术与数字技术相结合的产物。数字全息与传统光全息术的不同之处有两点: 1)采用光敏元件代替普通光学介质来记录全息图,从而获得一张数字全息图;2)通过计算机的数值计算手 段来模拟光学衍射过程以实现对目标物体的全息再现。其基本原理与光学全息基本原理类似,都由波前记 录与波前再现两部分构成。已广泛应用于可见光和红外波段^[1~4]。

在太赫兹波段,数字全息成像的研究受到越来越多的重视。这主要由于太赫兹数字全息具有以下两个

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金(20112302110028)资助课题。

作者简介:李 琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit_liqi@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-12-06; 收到修改稿日期: 2012-01-11;网络出版日期: 2012-03-22

突出优点:

1)由于通过对全息图的记录获取了物光场的全部信息,故可通过对光束传播行为的数值计算获得任意 平面上的光波场分布,从而消除了衍射的影响;

2)与常规焦平面成像方式相比,其聚焦平面可自由选择,避免了光路装调误差对成像结果的影响,且容易实现大数值孔径成像,从而提高成像分辨率。

太赫兹数字全息成像已是当前太赫兹成像的前沿研究方向之一。本文介绍太赫兹数字全息成像的原理 和研究进展,为我国进一步开展此项研究提供技术参考。

2 数字全息成像基本原理

按参考光与物光主光线的传播方向,可将全息术分为同轴全息以及离轴全息两种。两种记录方式记录的都 是物光波与参考光波形成的干涉场的光强分布,下面以 离轴菲涅耳全息为例进行介绍。

全息图记录和再现的简化系统模型如图 1 所示,设 成像目标位于 x₀-y₀ 平面,全息图记录位于 x-y 平面,重 建位于 x_i-y_i 平面,全息面距物平面和再现平面分别为 z₀ 和 z_i。用 O(x,y) 及 R(x,y) 分别表示位于 x-y 平面上物 光及参考光的复振幅分布,则位于记录面上的干涉场强 度分布为



图 1 全息图的记录及再现系统



 $I(x,y) = |O(x,y) + R(x,y)|^{2} = |O(x,y)|^{2} + |R(x,y)|^{2} + O^{*}(x,y)R(x,y) + O(x,y)R^{*}(x,y).$ (1) 对波前再现有用的即为后两项 [$O^{*}(x,y)R(x,y) + O(x,y)R^{*}(x,y)$],称为干涉项。在传统的光学全息 中,使用一束与原参考光性质相同的光束照射所记录的全息图,则通过全息图后的光场分布为

$$u(x,y) = I(x,y)R(x,y) =$$

 $\left[\left| O(x,y) \right|^{2} + \left| R(x,y) \right|^{2} \right] R(x,y) + O^{*}(x,y) R^{2}(x,y) + \left| R(x,y) \right|^{2} O(x,y).$ (2)

上式共包含三项,其中第一项 $[O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2](x, y)$ 为沿参考光方向传播的略微发散的光波, 即零级衍射项;第二项 $O^*(x, y)R^2(x, y)$ 为物光的共轭光,沿传播方向会聚,在距离记录面 $z_i = z_0$ 位置处 将形成物体的实像,该项常称为负一级衍射;第三项 $|R(x, y)|^2O(x, y)$ 具有和原物光相同的波前,但振幅 受到参考光强度 $|R(x, y)|^2$ 的调制,若沿着其传播方向反方向观察则可以在原物体位置观察到物体的虚 像,该项即再现的物光,通常被称为正一级衍射光。

数字全息所依据的基本原理也与以上步骤相同,只是再现过程由计算机数值计算模拟参考光照射全息 图完成。许多学者都建立了数字全息的记录及再现模型,并对数字全息中系统分辨率与成像过程中诸多因 素的关系进行了研究。对物光信息进行数字化记录及再现的过程可由图 2 中方框图过程进行表述^[5]。通过 探测器对记录面上干涉场分布 *I(x,y)* 的离散采样,获得数字全息图 *I(m,n)*。构建合适的数字化再现参考光 照射全息图,获得此时全息图后的出射光波场分布 *u'(m,n)*,即对全息图进行解码;选取恰当的方法对记录 面后的衍射光场进行模拟计算,获得目标平面上光波场的分布 *u'_t(m,n)*。其关键为对记录面上的干涉场进行 合理的离散采样,以及选取恰当的数值计算手段来模拟光场在自由空间的衍射。



图 2 数字全息记录及再现的系统方框图

Fig. 2 Block diagram of digital holographic recording and reconstruction

由于位于记录面上的探测器具有有限的横向尺寸,因此其能够接收到的从物平面上物体发出的最高空间频率即截止频率 f。为^[1]

$$f_{\rm c} = \frac{1}{\lambda \sqrt{1 + (2z_0/X)^2}},$$
(3)

式中X为探测器的横向尺寸。

因此,数字全息系统的极限分辨率也由上式决定,即 $\Delta_{\min} = 1/(2f_c)$ 。由于全息图的记录是对记录面上的衍射场进行离散采样获得的,采样间距不可能做得无限小,这就决定了全息图能够记录的空间频率成分有限。零级衍射与±1级衍射的频谱中心分别位于全息图的傅里叶变换谱的(0,0)以及(± a_1/λ ,± b_1/λ)处。只需 a_1/λ 与 b_1/λ 足够大,且 $G(f_x, f_y)$ 的频谱分布有限,即可通过合适的滤波方法将目标频谱项提取出来并进行复原^[6]。

3 国内外研究进展简介

英国的 R. J. Mahon 等^[7~9]在 100 GHz 波段对毫 米波数字全息进行了相关实验研究。他们于 2006 年在 Opt. Comm.上报道的实验光路如图 3 所示^[7],采用的是 离轴全息记录方式。利用耿氏二极管振荡器产生约 35 mW 的 100 GHz(λ=3 mm)辐射,通过十字形定向耦合器 分为强度比为 1:1的两束光,即物光和参考光。参考光通 过一个抛物面镜将其聚焦至全息记录面并与物光发生干 涉,通过记录面上点源探测器的二维扫描实现全息图的记 录。制作了一个"M"形的目标并将其固定在聚苯乙烯泡 沫塑料上并进行了成像,该目标尺寸为 60 mm×60 mm, 其细节部分的最小尺寸约为 9 mm。在进行数值再现时 对参考光采用了平面波近似,获得的全息图及其再现结 果如图 4 所示^[7]。







图 4 100 GHz 数字全息成像结果。(a) 全息图;(b) 再现结果

Fig. 4 100 GHz digital holographed results. (a) Hologram; (b) reconstruction result

俄罗斯研究小组利用可调谐太赫兹自由电子激光器在 130 μm 和 68 μm 两波段进行了数字全息的一系 列相关实验研究^[10~13]。该激光器能够以 5.6 MHz 重复频率产生 100 ps 的单色太赫兹脉冲,实验时的平均 功率约为 30~100 W。由于激光器输出强度过大,超出了大部分探测器的探测阈值,而微辐射热计阵列的空 间分辨率及光敏面尺寸有限;为此,他们将热影像板与 CCD 结合进行太赫兹辐射的二维探测以增大成像视 场。他们所使用热影像板的响应时间为 0.2 s,分辨率为 4 lp/mm,CCD 相机像素为 1024 pixel×1024 pixel, 探测精度受热影像板的分辨率的限制。由于其光源的相干长度只有约 20 mm,使得其参考光与物光的夹角 必须小于 0.1 rad。他们的全息实验装置及成像结果如图 5,6 所示^[11,12],图 5 右侧分别为物体距离全息平面 0 和 60 μm 时的全息图,可见再现结果不够清晰。

激光与光电子学进展







图 6 自由电子激光器数字全息成像结果。(a) 目标照片;(b) 记录的同轴全息图;(c) 复原结果 Fig. 6 Digital holographic results with free electron laser. (a) Object photo; (b) recorded on-axes hologram; (c) reconstruction result

美国 Martin 等^[14]于 2011 年发表了对离轴太赫兹数 字全息的研究论文。他们通过对 13.5 GHz 和16.0 GHz 毫米波进行多次倍频后获得 0.66~0.76 THz 的可调谐太 赫兹辐射,其平均功率约 50 μ W。实验光路如图 7 所 示^[14],采用离轴记录方式,全息图通过探测器的二维扫描 获得。受探测器孔径限制,对0.712 THz(λ =0.421 mm) 全息图记录的截止空间频率为 0.51 cycle/mm,因此物参 光的最大夹角为12.41°。为了消除全息图中零级衍射的影 响,他们对获得的全息图进行了频域滤波,并选用角谱法 计算太赫兹辐射在空间的传播。在记录距离为 200 mm 时 获得的 0.712 THz 全息图及其再现结果如图 8 所示。目 标第一排的圆孔直径分别为 1.5~2 mm,第二排圆孔直径



图 7 Martin 等的太赫兹数字全息记录光路 Fig. 7 Digital holographic recording configuration by Martin et al.



图 8 0.712 THz 数字全息成像实验结果。(a) 目标照片;(b) 0.712 THz 全息图;(c) 振幅再现结果 Fig. 8 0.712 THz digital holographic experimental results. (a) Object photo; (b) 0.712 THz hologram; (c) amplitude reconstructed result

为0.9 mm,圆孔横向间隔也为 0.9 mm,而第三排圆孔的直径为 0.8 mm,横向间距 1 mm。易见,只有第一排的 圆孔能够较好地识别,而第二排起即发生了模糊混叠。由于圆孔间的距离大于系统的衍射极限,因此他们认为 系统的空间分辨率并不是由探测器的孔径及采样频率限制,而是受衍射现象所限制。此外,为了获得精确的相 位,他们在两个波段下进行全息图记录,对两幅全息图分别再现,以此消除 2π 相位模糊。

国内首都师范大学张岩等^[15]于 2008 年进行了离轴太赫兹数字全息的研究。他们利用角谱理论对太赫 兹脉冲在空间的传播进行了数值仿真并进行了实验研究。他们通过飞秒抽运产生太赫兹辐射,通过 CCD 相 机记录了穿过或经物体反射后的太赫兹复振幅时域波形,一系列复振幅时域波形组成一幅全息图。由于可 直接获得太赫兹辐射的复振幅,因此无需使用参考光干涉方式记录,可通过角谱理论对其进行直接处理以获 得物面上的光场分布,进而改善成像质量。图 9 给出他们的实验装置图。当记录距离为 5 cm 时的重构结果 如图 10 所示^[15],重构效果不够理想,他们认为此结果是由于衍射现象并不明显所造成。





本课题组在 2011 年进行了 2.52 THz 数字全息成 像实验,其装置如图 11 所示^[16]。所使用的面阵探测器 是 Pyrocamm III 面阵探测器。实验中,斩波频率 48 Hz。 为了对 SIFIR-50 输出进行扩束,使用了 4 个镀金离轴抛 物面镜(PM1-PM4)。经 PM4 后出射的太赫兹光束近似 为平行光束,其束腰位于面阵探测器 Pyrocam III 的光敏 面上。BS1 和 BS2 为高阻单晶硅片,作为分束器使用,其 中 BS1 对 2.52 THz 光的透射率约为 99%,而 BS2 的分 束比则约为 1:1。为了消除零级衍射光的影响,使物体 像与零级衍射光分离,BS2 在 x 以及 y 方向都具有一定 的俯仰。参考光经 M1 反射后与物光在探测器表面干涉 获得干涉图样。



- 图 10 首都师范大学的太赫兹数字全息实验结果。 (a) 记录距离为 5 cm 时的振幅;(b) 重构结果
- Fig. 10 Experimental results THz digital holography from Capital Normal University. (a) Amplitude at recording distance 5 cm; (b) reconstructed image



图 11 哈尔滨工业大学实验装置图 Fig. 11 Experimental setup from Harbin Institute of Technology

再现过程中,利用拉普拉斯滤波消除零级衍射影响。图 12 给出利用自制的聚四氟乙烯分辨率板中的间隔为 0.4 mm 的条纹的成像结果^[16]。图 12(a)和(b)分别给出了无参考光时水平和垂直条纹 5 frame 平均成像结果,图 12(a)和(b)分别是水平和垂直条纹 10 frame 平均全息图,图 12(e)和(f)分别是水平和垂直条纹再现结果。由图 12(e)和(f)可见,0.4 mm 条纹完全可以分辨;较常规面阵成像分辨率 0.6 mm^[17]有很大提高。





Fig. 12 Imaging result of 0.4 mm resolution chart

通过减小物体到探测器距离的措施,本课题组获得 了清晰的 0.3 mm 条纹再现像^[18,19],如图 13 所示,全息 图记录距离为 2.1 cm。目标右上角条纹宽度为 0.6 mm,下部从左到右依次为 0.4、0.3、0.2、0.15 mm 条纹。图 13(b)为物光 40 frame 平均结果,图 13(c)为 40 frame 平均的全息图,图 13(d)为(c)的再现结果。从 再现结果可以看到,图像中部的 0.3 mm 横向及纵向条 纹较清楚地被呈现, 而 0.2 mm 纵向条纹也能够分辨, 然 而 0.2 mm 横向条纹则不可分辨,且图像左侧的 0.4 mm 条纹发生了较严重的畸变,其原因可能是受聚四氟乙烯 材质粗糙及光束不够均匀的影响。可见,与常规面阵成 像结果相比,数字全息成像方式使图像分辨率有了十分 明显改进。且在数字全息成像方式中成像目标的放置位 置可以根据分辨率需要灵活调整,只需要数字再现过程 中进行相应的变化,使得其成像过程及光路设置更为 简单。

表1给出各研究组的研究结果对比,可见迄今为止, 太赫兹数字全息的研究在耿氏二极管、CO2 抽运连续气 体激光器等连续太赫兹源及基于飞秒激光系统的脉冲太 赫兹源上均有报道。其中,由于大多数连续太赫兹源均 采用非相干探测方式,因此需通过参考光干涉方式来"记



图 13 光敏面前 2.1 cm 处分辨率测试板的成像结果。 (a) 实物图; (b) 物光 40 frame 平均; (c) 40 frame 平均 全息图; (d) 对图(c)的再现结果

Fig. 13 Imaging result of a resolution chart placed
2.1 cm before the photosurface. (a) Photo; (b)
40 frame averaging object light; (c) 40 frame averaging hologram; (d) reconstructed result from Fig. (c)

录"透过目标后光场的复振幅信息。而脉冲太赫兹源可以进行相干探测,直接测得物光的复振幅信息从而进 行衍射反演计算以消除衍射的影响并获得物平面上的光场复振幅信息,记录步骤较非相干探测系统简单。 受技术发展限制,脉冲太赫兹源需要用到庞大且昂贵的飞秒激光系统,且操作十分复杂,其应用场合有限。 而采用连续太赫兹源则具有体积较小、操作简便和花费较低等优势。目前采用 CO₂ 抽运的连续气体太赫兹 源及热释电相机的数字全息成像其分辨率已达 0.3 mm,且具有实时成像的能力,其分辨率仍有进一步提高 的潜力。

激光与光电子学进展

Table 1 Comparison of research results from different groups			
Country	THz source	Recording	Results and problem
year		type	
U.K. 2006~2011	Gunn diode oscillator (0.1 THz, CW)	Non-coherent	A target with the smallest feature of
		detection	9 mm is imaged. The resolution is
		point scanning	constrained by long wavelength
Russia 2005~2010	Free-electron laser (2.3 THz,4.4 THz, pulsed)	Non-coherent detection array imaging	The angle between object beam and reference beam is constrained by the
			coherent length of the THz pulse,
			which limits the recording distance
USA 2011	Multiplier chains (0.712 THz, CW)	Non-coherent detection point scanning	The imaging results are not satisfying. The axial resolution is improved by dual wavelength reconstruction. The sampling frequency is constrained by the aperture size of the detector, constraining the resolution in consequence
China	THz emitter	Coherent detection array imaging	
(Capital	pumped by a		Back propagation can be directly
Normal	femtosecond laser		carried out on the complex amplitude
University)	(0.2~2.6 THz,		recorded by coherent detection,
2008	pulsed)		the experimental result is not satisfying
China		Non-coherent detection array imaging	Off-axis geometry is adopted. The
(Harbin	CO_2 pumped gas		lateral resolution can reach 0.3 mm.
Institute of	laser (2.52 THz,		In-line geometry should be
Technology)	CW)		investigated to further improve the
2011			resolution

表 1 各研究组的研究结果对比 e 1 Comparison of research results from different group

4 结束语

由于太赫兹波段波长较长,基于面阵探测器的常规焦平面成像往往受衍射的影响十分严重,制约了其成 像质量的提高。太赫兹数字全息即是消除衍射影响的一个有效手段。且其无透镜成像的特点避免了在成像 过程中由于透镜引入的损耗、畸变及装调难度,具有极大的应用潜力。太赫兹数字全息的研究日益深入,成 像质量不断提高,正向三维成像发展。

在可见光、红外数字全息领域,由于衍射对再现结果的影响较小,错误的再现距离对数值再现仅是使得 再现结果变得模糊,因此可将再现像边缘锐度等参数作为判据进行再现距离的自动选取,即自动聚焦。而对 于太赫兹数字全息,由于衍射的影响十分严重,当再现距离错误时再现结果中会出现衍射条纹等干扰项,难 以将图像锐度等作为自动聚焦的判据。只能通过手动调整即主观视觉比较获得较准确的再现距离,因此有 必要对太赫兹数字全息再现的自动聚焦方法进行研究。此外,目前报道的大多数太赫兹数字全息均为离轴 全息方式,其对探测器带宽利用程度有限。为了充分利用探测器带宽,进一步提高分辨率,还需要对太赫兹 同轴数字全息技术进行研究。作为一项新兴的技术,太赫兹数字全息技术具有广阔的发展空间及应用前景。

参考文献

1 V. Kebbel, H. J. Hartmann, W. P. O. Jüptner. Characterization of micro-optics using digital holography[C]. SPIE, 2000, 4101: 477~487

- 2 Li Junchang. FFT computation of angular spectrum diffraction formula and its application in wavefront reconstruction of digital holography[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(5): 1163~1167
- 李俊昌. 角谱衍射公式的快速傅里叶变换计算及在数字全息波面重建中的应用[J]. 光学学报,2009, **29**(5): 1163~1167 3 Pan Weiqing, Lu Wei. Double wavelength one-shot in-line digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 352~357

潘卫清,鲁 伟.基于双色光照明的单曝光同轴数字全息技术[J].光学学报,2010,30(2):352~357

4 Liu Changgeng, Wang Dayong, Zhang Yizhuo et al.. Derivatives-based autofocus algorithms for the digital holographic imaging[J]. Chinese J. Lasers, 2009, 36(11): 2989~2996

刘长庚,王大勇,张亦卓等.数字全息成像中基于导数的自动对焦算法[J].中国激光,2009,36(11):2989~2996

- 5 A. Stern, B. Javidi. Improved-resolution digital holographpy using the generalized sampling theorem for locally bandlimited fields[J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2006, 23(5): 1227~1235
- 6 Li Junchang, Guo Rongxin, Fan Zebin. Study on digital real-time holography of nonplanar reference wave [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, **37**(6): 1156~1160

李俊昌,郭荣鑫,樊则宾.非平面参考光波的数字实时全息研究[J].光子学报,2009,37(6):1156~1160

- 7 R. J. Mahon, J. A. Murphy, W. Lanigan. Digital holography at millimetre wavelengths[J]. Opt. Commun., 2006, 260: 469~473
- 8 I. McAuley, J. A. Murphy, N. Trappe *et al.*. Applications of holography in the millimeter-wave and terahertz region[C]. *SPIE*, 2011, **7939**: 79380H
- 9 R. Mahon, A. Murphy, W. Lanigan. Terahertz holographic image reconstruction and analysis[C]. 29th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves and 12th Int. Conf. on Terahertz Electronics, 2004. 749~750
- 10 V. P. Bolotin, V. S. Cherkassky, E. N. Chesnokov *et al.*. Novosibirsk terahertz free electron laser: status and survey of experimental results[C]. 2005 Joint 30th Intl. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Intl. Conf. on Terahertz Electronics, 2005, 2: 495~496
- 11 V. S. Cherkassky, B. A. Knyazev, S. V. Kozlov *et al.*. Terahertz imaging and holography with a high-power free electron laser[C]. 2005 Joint 30th Intl. Conf. on Infrared and Millimeter Waves & 13th Intl. Conf. on Terahertz Electronics, 2005, 2: 337~338
- 12 B. A. Knyazev, A. L. Balandin, V. S. Cherkassky *et al.*. Classic holography, tomography and speckle metrology using a high-power terahertz free electron laser and real-time image detectors[C]. 2010 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2010. 1~3
- 13 B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov. Novosibirsk terahertz free electron laser: instrumentation development and experimental achievements[J]. *Measure*. Sci. & Technol., 2010, 21(5): 054013
- 14 M. S. Heimbeck, M. K. Kim., D. A. Gregory et al.. Terahertz digital holography using angular spectrum and dual wavelength reconstruction methods[J]. Opt. Express, 2011, 19(10): 9192~9200
- 15 Y. Zhang, W. Zhou, X. Wang et al.. Terahertz digital holography[J]. Strain, 2008, 44: 380~385
- 16 S. H. Ding, Q. Li, Y. D. Li et al.. Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera [J]. Opt. Lett., 2011, 36(11): 1993~1995
- 17 Yao Rui, Ding Shenhui, Li Qi et al.. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis [J]. Chinese J. Lasers, 2011, 38(1): 0111001

姚 睿,丁胜晖,李 琦等. 2.52 THz 面阵透射成像系统的改进及分辨率分析[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0111001

- 18 Li Qi, Ding ShengHui, Li Yunda et al.. Experimental research on resolution improvement in CW THz digital holography [J]. Appl. Phys. B, doi: 10.1007/S00340-012-4876-1
- 19 S. H. Ding, Research on Resolution Improvement CW THz Imaging[D]. Harbin Institute of Technology dissertation for the Master Degree in Engineering, 2011. 60~78

丁胜晖.提高连续太赫兹成像分辨率的研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2011.60~78