

太赫兹 Gabor 同轴数字全息记录距离实验研究

李 琦 胡佳琦

(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 150080)

摘要 太赫兹 Gabor 同轴数字全息系统具有分辨率高和结构紧凑等特点, 有潜在的应用前景。由于其系统横向分辨率与记录距离有关, 因此研究实际成像系统中记录距离对成像结果的影响具有重要的应用价值。利用自制的分辨率分别为 0.4 mm 和 0.6 mm 的目标, 进行了不同记录距离的 2.52 THz Gabor 同轴全息成像实验, 并通过角谱法实现数字再现。对再现像进行了对比分析, 实验结果接近横向分辨率随记录距离变化的理论计算结果。

关键词 成像系统; 太赫兹成像; 数字全息; 横向分辨率; 记录距离

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0209020

Experimental Investigation on Recording Distance of Terahertz Gabor in-Line Digital Holography

Li Qi Hu Jiaqi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract Terahertz Gabor in-line digital holographic system has the characteristics of high resolution and compact structure, and it has potential application prospects. The lateral resolution of the system is related to the recording distance, so the research on the effect of recording distance on imaging results in actual imaging system has important application values. By using self-made targets with resolutions of 0.4 mm and 0.6 mm, 2.52 THz Gabor in-line holography imaging experiments with different recording distances are carried out and digital reconstructions are realized by angular-spectrum representation. The reconstructed images are compared and analyzed, and experimental results are close to the theoretical calculation results of the lateral resolution changing with the recording distance.

Key words imaging systems; terahertz imaging; digital holography; lateral resolution; recording distance

OCIS codes 110.6795; 110.3000

1 引 言

太赫兹 (THz) 成像是成像领域的前沿技术之一^[1-3], 其中, 太赫兹数字全息技术是太赫兹技术与数字全息技术的结合, 具有空间分辨率高和结构紧凑等优势, 国际上已开展了一些相关实验研究^[4-10]。太赫兹数字全息技术根据太赫兹源输出方式可以划分为连续和脉冲两种, 研究最早的是脉冲方式^[7-10]。同轴数字全息比离轴数字全息对探测器空间频率要求低, 更能充分利用探测器有限的带宽积, 同时还具有结构紧凑和光路简单等特点, 因此对其的研究十分重要。俄罗斯的研究团队利用可

调谐太赫兹自由电子激光器在 130 μm 及 68 μm 两波段进行了一系列的 Gabor 同轴数字全息的实验研究, 他们使用 CCD 面阵探测器记录数字全息图^[11-12]。2012 年, 本课题组实现了基于光抽运连续太赫兹激光器的 Gabor 同轴数字全息成像^[5], 使用热释电机作为记录全息图的面阵探测器, 实测系统横向分辨率达到 0.2 mm, 并于同年进行了隐藏物成像实验^[13]。

由于数字全息成像系统横向分辨率与记录距离有关, 因此研究实际成像系统中记录距离对成像结果的影响具有重要的应用价值。据我们所知, 迄今

收稿日期: 2013-09-03; **收到修改稿日期**: 2013-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)、高等学校博士学科点专项科研基金(20112302110028)

作者简介: 李 琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光与太赫兹成像及图像处理等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

尚无关于连续太赫兹 Gabor 同轴数字全息记录距离实验研究的报道。本文基于已有的光抽运连续太赫兹激光器的 Gabor 同轴数字全息成像实验装置,利用自制的分辨率分别为 0.4 mm 和 0.6 mm 的聚四氟乙烯基底电路板作为目标,进行了不同记录距离的 2.52 THz Gabor 同轴全息成像实验,利用角谱法进行数字再现,并对再现像进行了对比分析。

2 Gabor 同轴全息成像及再现原理

2.1 成像原理及横向分辨率

Gabor 同轴数字全息记录光路如图 1 所示,详见文献[5]。实验中使用 CO₂ 激光抽运太赫兹激光器,工作频率为 2.52 THz(波长 118.83 μm),该波段的平均输出功率约为 50 mW,近似基模高斯光束。使用热释电相机 Pyrocam III 作为探测器记录全息图,它具有 124 × 124 个像素,有效面积为 12.4 mm × 12.4 mm。BS1 为分束器。使用两个离轴抛物面镜 (PM) 组成共聚焦直镜组。准直后的近似平面波经全反镜 (M1) 反射后照射在物体上,被物体信息调制的光作为物光,其余透射的光作为参考光。参考光与物光在探测器表面干涉获得干涉图样。

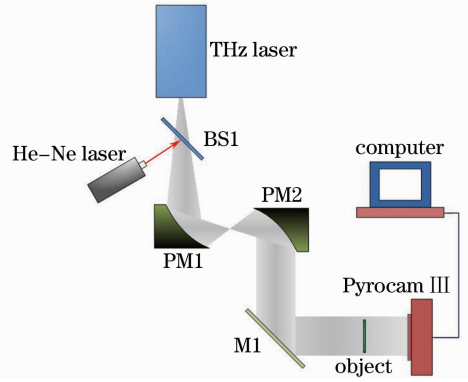


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

Gabor 同轴全息要求被记录的物体的透光部分面积大于不透光部分的面积,采用平面波垂直照射物平面 x_0-y_0 ,则透过物平面的光场分布可表示为

$$U(x_0, y_0) = 1 - a(x_0, y_0), \quad (1)$$

式中 $U(x_0, y_0)$ 代表物平面的复振幅分布, $a(x_0, y_0)$ 代表物体不透光部分的贡献, $U(x_0, y_0)$ 和 $a(x_0, y_0)$ 均反映物体的信息,等式右端可看作是参考光场与物光光场的叠加。

根据瑞利-索末菲衍射积分公式,全息平面上记录的数字全息图可表示为

$$I(x, y) = |1 - a(x_0, y_0) \otimes h_z(x_0, y_0, z_0)|^2 = 1 - a(x_0, y_0) \otimes h_z(x_0, y_0, z_0) - a^*(x_0, y_0) \otimes h_z^*(x_0, y_0, z_0) + |a(x_0, y_0) \otimes h_z(x_0, y_0, z_0)|^2, \quad (2)$$

式中 $h_z(x_0, y_0, z_0)$ 为系统的脉冲响应函数, \otimes 表示卷积运算,上角标* 表示取复共轭, z_0 为数字全息的记录距离,即物体到全息平面的距离。(2)式中的第一项是均匀光波,对所需再现像的干扰不大。当参考光的复振幅远大于物光的复振幅时,(2)式中的第 4 项可以忽略不计^[14]。

对于 Gabor 同轴全息,当记录物体为不透光的小物体时,即参考光的复振幅远大于物光的复振幅时,(2)式可近似表示为

$$\tilde{I}(x, y) \approx 1 - a(x_0, y_0) \otimes h_z(x_0, y_0, z_0) - a^*(x_0, y_0) \otimes h_z^*(x_0, y_0, z_0), \quad (3)$$

若使用振幅为 1 的准直平面波进行数值再现,则距离记录面 $-z_0$ 处(即再现距离 $z = -z_0$)的再现像平面 x_1-y_1 上的光场复振幅分布为^[5]

$$U(x_1, y_1) = U(x_0, y_0) - a^*(x_0, y_0) \otimes h_{2z}^*(x_0, y_0, z_0), \quad (4)$$

式中 $h_{2z}(x_0, y_0, z_0)$ 为 $z = 2z_0$ 处的脉冲响应函数。(4)式中,第一项 $U(x_0, y_0)$ 即透过物平面的光场分

布,可看作所需的原始再现像,第二项 $a^*(x_0, y_0) \otimes h_{2z}^*(x_0, y_0, z_0)$ 总是处于离焦状态,弥散在再现像平面上,对原始再现像的干扰非常有限。因此,再现结果为物体所成像,(4)式可通过角谱法等再现算法数值实现。

探测器像素间隔 $\Delta x_H > \frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2z_0}{L}\right)^2}$ 时,同轴数字全息系统能达到的横向分辨率为

$$\epsilon = \frac{\lambda}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2z_0}{L}\right)^2}, \quad (5)$$

式中 λ 表示记录太赫兹激光波长, L 表示探测器的尺寸。对于同轴数字全息系统,通过减小系统记录距离 z_0 ,只要保证满足采样条件就可使系统实际横向分辨率达到或接近 Δx_H 。系统横向分辨率由数字全息系统记录的目标衍射的最高空间频率决定,但其最终要通过再现像来反映。成像质量受数字再现分辨率的影响,与再现算法密切相关,再现过程中高频分量丢失会导致图像模糊。

2.2 角谱再现实算原理

角谱理论^[15]的基本思想是将物平面上的光波场分解为具有不同权重的沿不同方向传播的平面波的叠加,该理论是衍射问题的一种准确描述。该方

法首先将物平面上的单色光波场在 x_0 - y_0 平面上进行傅里叶变换以获得其频谱,将入射光波视为不同传播方向的平面波的叠加,其叠加重表示为

$$A(f_{x_0}, f_{y_0}, 0) = \iint_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0, 0) \exp[-i2\pi(x_0 f_{x_0} + y_0 f_{y_0})] dx_0 dy_0 = \mathcal{F}\{U(x_0, y_0, 0)\}, \quad (6)$$

式中 $A(f_{x_0}, f_{y_0}, 0)$ 代表输出面的角谱分布, $U(x_0, y_0, 0)$ 代表物平面上的光场分布, \mathcal{F} 代表作傅里叶变换, f_{x_0} 和 f_{y_0} 分别代表 x_0 方向、 y_0 方向的空间频率。

空间频率为 (f_x, f_y, f_z) 的平面波经距离 z 的传播后,其复振幅为

$$A(f_x, f_y, z) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right) \times \iint_{-\infty}^{\infty} U(x, y, 0) \exp[-i2\pi(x f_x + y f_y)] dx dy, \quad (7)$$

$$U(x, y, z) = \mathcal{F}^{-1}\left\{\mathcal{F}\{U(x, y, 0)\} \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right)\right\}. \quad (8)$$

光波在自由空间中由衍射平面到观测平面的传播过程,在频域中等效于通过一个半径为 $1/\lambda$ 的理想低通滤波器,其传递函数为

$$H_A(f_x, f_y, z) = \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right). \quad (9)$$

在离散计算时,需要考虑传递函数的离散取样是否满足奈奎斯特采样定理的要求。设物空间取样范围为 $X \times Y$, 取样点大小为 $\Delta x \times \Delta y$, 取样数为 $N \times M$, 即 $X \times Y = N\Delta x \times M\Delta y$ 。角谱法在使用时必须满足采样条件^[15], 即

$$\frac{|z|}{X} \leq \begin{cases} \frac{Y}{X} \frac{\Delta y}{\Delta x} \sqrt{\frac{1}{(\lambda/\Delta x)^2} - \frac{1}{4} \left[\left(\frac{Y}{X}\right)^2 + 1\right]}, & \frac{Y}{X} \frac{\Delta y}{\Delta x} \leq 1 \\ \sqrt{\frac{1}{(\lambda/\Delta x)^2} - \frac{1}{4} \left[\left(\frac{Y}{X}\right)^2 + 1\right]}, & \frac{Y}{X} \frac{\Delta y}{\Delta x} > 1 \end{cases}, \quad (10)$$

式中 z 即是再现距离。

3 实验结果及分析

本数字全息成像装置参数为 $\lambda = 118.83 \mu\text{m}$ 、探测器尺寸 $12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$ 、探测器的像素间隔 $\Delta x_H = 0.1 \text{ mm}$, 图 2 为利用(5)式计算出的记录距

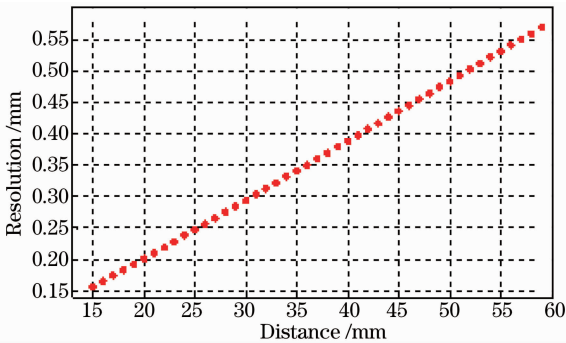


图 2 系统横向分辨率与记录距离的关系曲线

Fig. 2 Curve of system lateral resolution versus recording distance

离 z_0 在 $15 \sim 59 \text{ mm}$ 的该系统的理论横向分辨率曲线, 横向分辨率与记录距离近似呈线性关系。当 $z_0 = 24 \text{ mm}$ 时, $\epsilon \approx 0.24 \text{ mm}$; 当 $z_0 = 33 \text{ mm}$ 时, $\epsilon \approx 0.32 \text{ mm}$; 当 $z_0 = 45 \text{ mm}$ 时, $\epsilon \approx 0.44 \text{ mm}$; 当 $z_0 = 50 \text{ mm}$ 时, $\epsilon \approx 0.48 \text{ mm}$ 。

考虑到角谱法采样条件和计算速度, 数字再现时采用取样数 $N = M = 1024$ 。由于 $\Delta x = \Delta y = 0.1 \text{ mm}$, 则 $X = Y = 102.4 \text{ mm}$, 因此再现距离为

$$|z| \leq 102.4 \sqrt{\left(\frac{0.1}{0.11883}\right)^2 - \frac{1}{2}} = 46.7 \text{ (mm)}. \quad (11)$$

所采用的实验样本是自制的 0.5 mm 厚聚四氟乙烯印制电路板上覆铜箔的两个“Z”字母, 其分辨率分别为 0.4 mm 和 0.6 mm (“Z”中横线宽度), 大小分别为 $1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ 和 $1.8 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$, “Z”中斜线宽度分别约为 0.5 mm 和 0.75 mm 。图 3 为实物照片(下部为毫米标尺)及分辨率 0.6 mm 的“Z”字母电路板图。虽然聚四氟乙烯电路

板周围固定了一圈铜条纹,但是板材仍有形变,而且

材料分布也不够均匀,将会对再现像质量有影响。

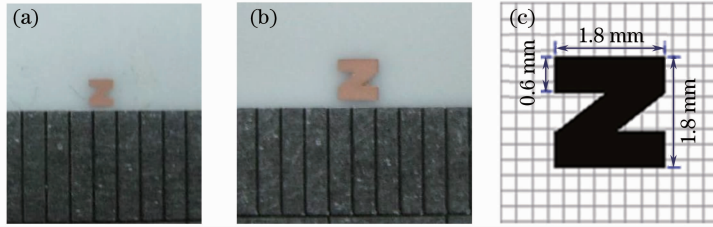


图 3 (a),(b)分辨率 0.4 mm 和 0.6 mm 的字母照片;(c)分辨率 0.6 mm 的字母电路板图

Fig. 3 (a), (b) Letter photos with resolutions of 0.4 mm and 0.6 mm; (c) circuit board graph with resolution of 0.6 mm

图 4 为 0.4 mm 分辨率的“Z”字母在记录距离分别为 24、26、27、32 mm 处的全息图及其在再现距离分别为 24、25.7、26.3、31.7 mm 的再现像。本文所有全息图均为 15 帧叠加平均后的结果。图 5 为图 4 中再现像的目标截图,截图大小为 21 pixel × 18 pixel,横纵坐标数值为截图的行列数。图 4 中全息图和再现像中均可看到衍射环,再现像中“Z”均

可辨认,但字母上有亮斑。样本“Z”的上下横线宽均为 0.4 mm,斜线宽约 0.5 mm,斜线与横线的夹角处分辨率远高于 0.4 mm,因此再现像中这部分出现模糊。此现象可以由图 2 中计算的所测最近的记录距离 24 mm 时的理论分辨率为 0.24 mm 这一结果说明。另外,再现像背景不够均匀,这与聚四氟乙烯板不够均匀和平整有关。

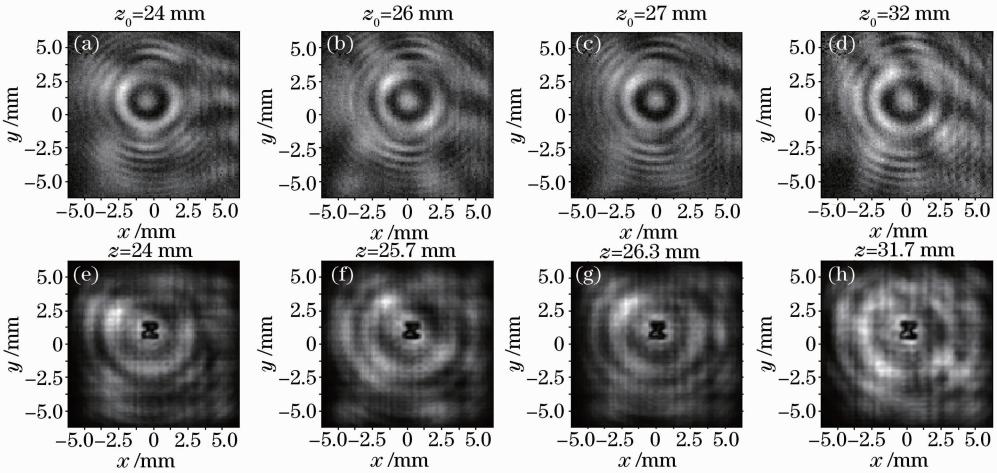


图 4 分辨率为 0.4 mm 的“Z”字母。(a),(b),(c),(d)不同记录距离时全息图;(e),(f),(g),(h)不同再现距离时的再现像

Fig. 4 0.4 mm resolution “Z” letter. (a), (b), (c), (d) Holograms with different recording distances; (e), (f), (g), (h) reconstructed images with different reconstruction distances

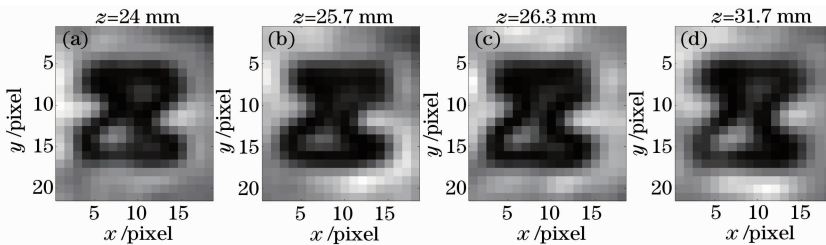


图 5 图 4 再现像的截图

Fig. 5 Cropped images of reconstructed results in Fig. 4

分别对图 5 中第 9 列、第 11 行、第 4 列和第 13 列进行对比分析,如图 6~9 所示。从图 6 可以看出: $z=25.7$ mm 和 $z=26.3$ mm 时较好地再现了目标,目标高 1.2 mm; $z=31.1$ mm 时,再现目标高接近 1.3 mm。以上三个图像对比度随距离增长呈

下降趋势。 $z=24$ mm 的再现目标高 1.1 mm,可能是由于此时目标放置有一定俯仰。另外,所有截图在第 6~17 行之间,灰度值起伏较大。从图 7 所示的第 11 行可以看出:当记录距离不大于 25.7 mm 时可以较好地再现宽 0.5 mm 的目标;其他两个位

置,再现像的宽度为 0.6 mm 且灰度值波动较大。从图 8 显示的第 4 列的第 10 个像元附近灰度分布可以看出, $z=24$ mm 时对比度最高,分辨最清楚,而 $z=31.7$ mm 时最差。从图 9 显示的第 13 列的第 12 个像元附近灰度分布可以看出, $z=25.7$ mm 时对比度最高,分辨最清楚,而 $z=31.7$ mm 时最差。

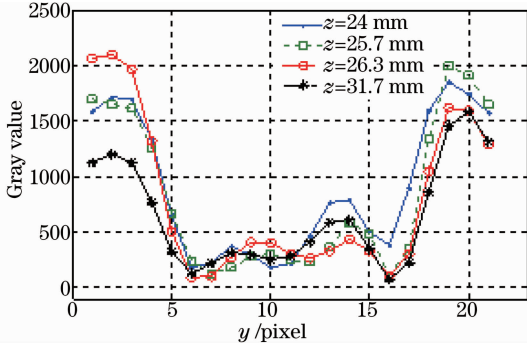


图 6 图 5 中第 9 列的灰度值分布

Fig. 6 Gray distributions of the ninth column in Fig. 5

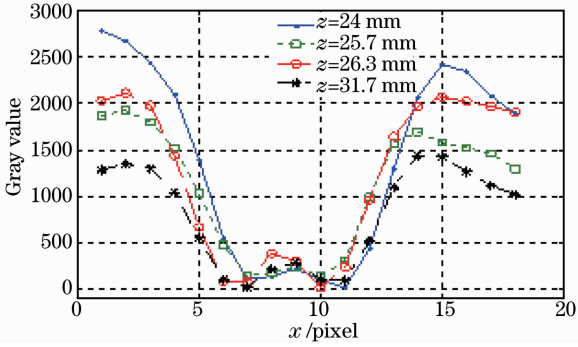


图 7 图 5 中第 11 行的灰度分布

Fig. 7 Gray distributions of the eleventh row in Fig. 5

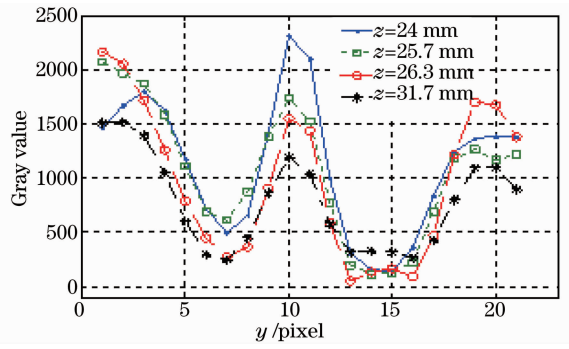


图 8 图 5 中第 4 列的灰度值分布

Fig. 8 Gray distributions of the fourth column in Fig. 5

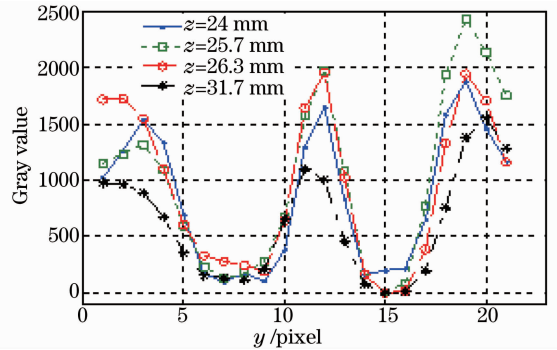


图 9 图 5 中第 13 列的灰度值分布

Fig. 9 Gray distributions of the thirteenth column in Fig. 5

图 10 为 0.6 mm 分辨率“Z”字母在记录距离分别约为 22、33、45、50、55 mm 处的全息图及其在再现距离分别为 22、32.9、45、50、55 mm 时的再现像。由于对记录距离 50 mm 和 55 mm 的数字再现时采用 $N = M = 2048$ 的结果与 $N = M = 1024$ 结果相差甚微,因此,再现结果依然采用 $N = M = 1024$ 。

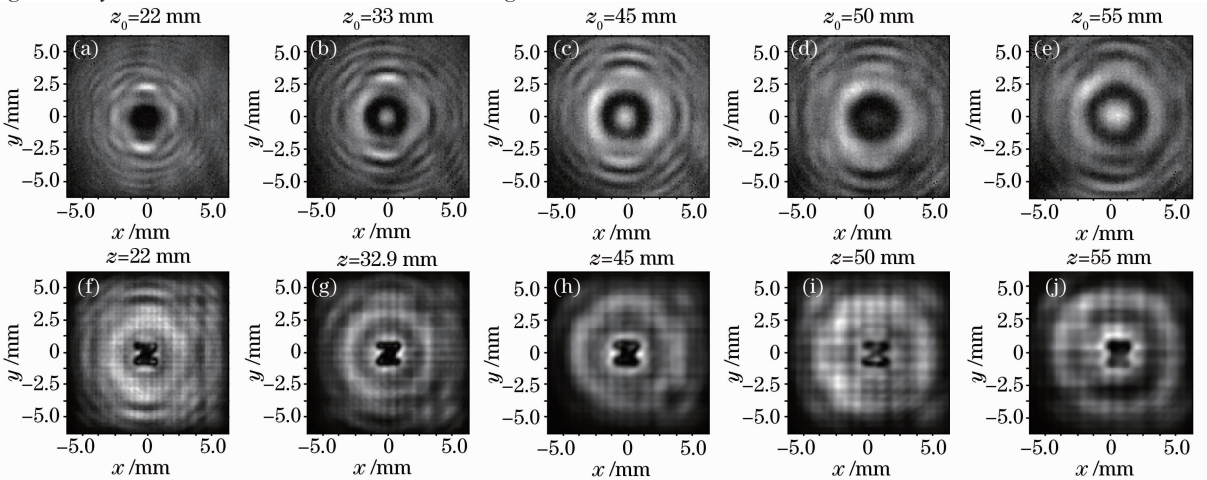


图 10 分辨率为 0.6 mm 的“Z”字母。(a), (b), (c), (d), (e)不同记录距离时的全息图;
(f), (g), (h), (i), (j)不同再现距离时的再现像

Fig. 10 0.6 mm resolution “Z” letter. (a), (b), (c), (d), (e) Holograms with different recording distances;
(f), (g), (h), (i), (j) reconstructed images with different reconstruction distances

图 11 为图 10 中再现像的目标截图,截图大小 $23 \text{ pixel} \times 27 \text{ pixel}$ 。与图 4 相比,图 10 中的全息图图像随记录距离的变化较大,这主要是由于记录距

离变化较图 4 中大。再现像的衍射环较明显地随距离增大而增大,再现目标清晰度随距离增大而降低。 $z=55 \text{ mm}$ 的再现像基本无法辨认出是“Z”字母。

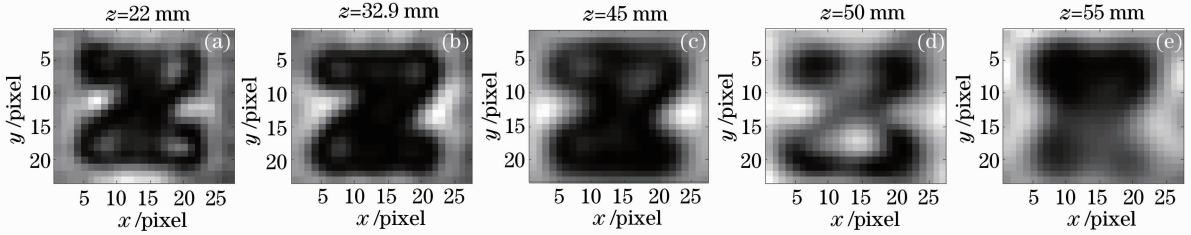


图 11 图 10 再现像的截图

Fig. 11 Cropped images of reconstructed results in Fig. 10

图 12、13 分别给出图 11 中第 15 列和第 11 行的灰度分布。从图 12 所呈现的第 15 列灰度分布可以看出: $z=22 \text{ mm}$ 的再现像所呈现的目标高 1.7 mm ,对比度较高; $z=32.9 \text{ mm}$ 和 $z=45 \text{ mm}$ 的再现像所呈现的目标高 1.8 mm ,但目标边缘对比度明显随距离增长而下降,而且 $z=45 \text{ mm}$ 的目标灰度分布起伏较大; $z=50 \text{ mm}$ 的目标灰度起伏过大; $z=55 \text{ mm}$ 的目标灰度值基本随行数增加而增大。从图 13 所示的第 11 行灰度分布可以看出: $z=22 \text{ mm}$ 所再现的目标宽度为 0.8 mm ; $z=32.9 \text{ mm}$ 和 $z=45 \text{ mm}$ 所再现的目标宽度为 0.9 mm ; $z=50 \text{ mm}$ 所再现的结果难以判断目标宽度; $z=55 \text{ mm}$ 的目标宽度为 1.1 mm 。

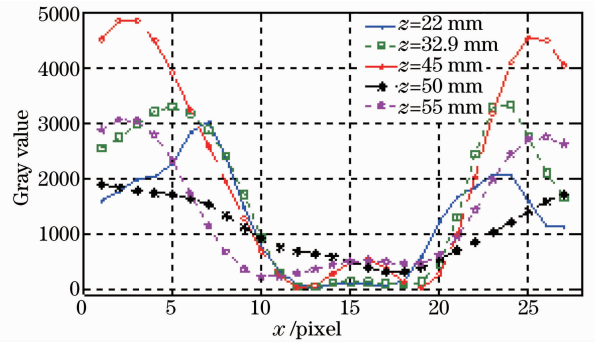


图 13 图 11 中第 11 行的灰度分布

Fig. 13 Gray distributions of the eleventh row in Fig. 11
同轴数字全息实验装置上,进行了不同记录距离下 2.52 THz Gabor 同轴全息成像实验,并利用角谱法进行了数字再现。实验结果表明,尽管样本“Z”最大线宽 0.6 mm ,但因为斜线与横线夹角处分辨率很高,因此记录距离等于 50 mm 时,很难呈现出较清晰的图像。这与理论计算结果相近。对于所用分辨率 0.4 mm 和 0.6 mm 的目标,记录距离分别约为 33 mm 和 45 mm 时,利用角谱法可以再现出较清晰的图像。该实验结果可为太赫兹 Gabor 同轴全息成像实际应用中记录距离的选择提供依据。

实验样本对太赫兹 Gabor 同轴数字全息成像质量有一定影响,因此,今后需研究制作背景均匀、不易变形的小目标,从而使实验结果更精确。

参考文献

- Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on the passive terahertz image target detection[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0211002.
- 张馨,赵源萌,邓朝,等.被动式太赫兹图像目标检测研究[J].光学学报,2013,33(2):0211002.
- Li Xinlei, Li Biao. Review on progress of real-time THz sensing and imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(9): 090008.
- 李昕磊,李彪.实时太赫兹探测与成像技术新进展[J].激光与光电子学进展,2012,49(9):090008.
- Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda, *et al.*. Experimental research

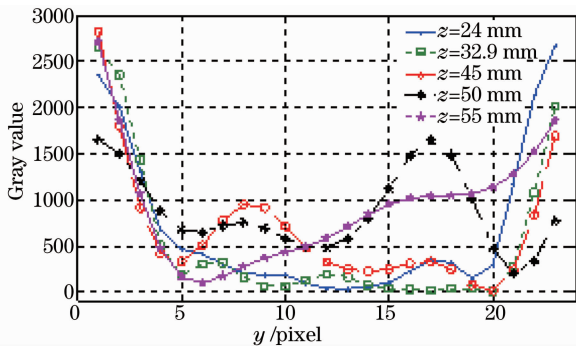


图 12 图 11 中第 15 列的灰度分布

Fig. 12 Gray distributions of the fifteenth column in Fig. 11

对比以上实验结果与图 2 所示的理论计算结果可以看出,尽管样本“Z”最大线宽 0.6 mm ,但因为斜线与横线夹角处分辨率很高,因此记录距离等于 50 mm 时,很难呈现出较清晰的图像。

4 结论

利用自制的分辨率分别为 0.4 mm 和 0.6 mm 的两个“Z”字母作为目标,在已有的太赫兹 Gabor

- on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-mode scanning system[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1011001.
- 丁胜晖, 李琦, 李运达, 等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1011001.
- 4 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Advances in research of THz digital holography imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(5): 050006.
- 李琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 太赫兹数字全息成像的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(5): 050006.
- 5 Kai Xue, Qi Li, Yunda Li, *et al.*. Continuous-wave terahertz in-line digital holography[J]. Opt Lett, 2012, 37(15): 3228—3230.
- 6 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Comparison between 2.52 THz off-axis digital holography and focal-plane imaging[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0909003.
- 李琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 2.52 THz 离轴数字全息成像和焦平面成像特性比较[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0909003.
- 7 Y Zhang, W Zhou, X Wang, *et al.*. Terahertz digital holography[J]. Strain, 2008, 44(5): 380—385.
- 8 Xinke Wang, Ye Cui, Wenfeng Sun, *et al.*. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. J Opt Soc Am A, 2010, 27(11): 2387—2393.
- 9 Xinke Wang, Ye Cui, Dan Hu, *et al.*. Terahertz quasi-near-field real-time imaging[J]. Opt Commun, 2009, 282(24): 4683—4687.
- 10 Xinke Wang, Ye Cui, Wenfeng Sun, *et al.*. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. Opt Commun, 2010, 283(22): 4626—4632.
- 11 V S Cherkassky, B A Knyazev, S V Kozlov, *et al.*. Terahertz imaging and holography with a high-power free electron laser[C]. The Joint 30th International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference 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]. 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2010.
- 13 Q Li, K Xue, Y D Li, *et al.*. Experimental research on THz Gabor inline digital holography of concealed objects[J]. Appl Opt, 2012, 51(29): 7052—7058.
- 14 L Denis, C Fournier, T Fournel, *et al.*. Twin-image noise reduction by phase retrieval in in-line digital holography[C]. SPIE, 2005, 5914: 59140J.
- 15 Á F Doval, C Trillo. Dimensionless formulation of the convolution and angular spectrum reconstruction methods in digital holography[C]. SPIE, 2010, 7387: 73870U.

栏目编辑: 史敏