

连续太赫兹反射式共焦扫描显微成像特性分析

杨永发 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 太赫兹反射式共焦扫描显微成像系统分辨率较高且可呈现物体三维像,因此具有很大的应用价值。针对一种连续太赫兹反射式共焦扫描显微成像实验光路,在所确定的系统参数条件下,计算分析了两种太赫兹波长(118.83 μm 和 184.31 μm)的系统轴向响应特性。仿真结果表明,所设计的波长 118.83 μm 的成像实验装置横向分辨率可达 0.23 mm,轴向分辨率约为 4.27 mm;波长 184.31 μm 的系统横向分辨率可达 0.36 mm,轴向分辨率约为 6.63 mm。探测器轴向偏移影响大于横向偏移影响。

关键词 太赫兹成像;反射式共焦扫描;分辨率;轴向偏移;横向偏移

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.081101

Character Analysis on Continuous-Wave Terahertz Reflection-Mode Confocal Scanning Microscopic Imaging

Yang Yongfa Li Qi Hu Jiaqi

National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract Due to high resolution and the ability of reconstructing 3D image of the sample, the terahertz reflection-mode confocal scanning microscopic imaging has great application value. A terahertz reflection-mode confocal scanning microscopic imaging experimental light path is designed. Under the condition of system parameters, the axial response characteristics of the system is calculated and analyzed in the case of two kinds of different wavelengths (118.83 μm and 184.31 μm). The results of emulation show that the designed experimental device with wavelength of 118.83 μm gains a transverse resolution of 0.23 mm and an axial resolution of about 4.27 mm. When the wavelength is 184.31 μm , the transverse resolution is 0.36 mm and the axial resolution is about 6.63 mm. In comparison with the transverse offset, the axial offset of the detector brings a greater effect.

Key words terahertz imaging; reflection-mode confocal scanning; resolution; axial offset; transverse offset

OCIS codes 110.6795; 180.1790; 180.5810

1 引言

太赫兹(THz)辐射因具有独特的性质,可应用于许多领域^[1-4],太赫兹成像技术的研究具有广阔的应用前景,有很高的研究价值。

共焦扫描显微成像技术比一般光学显微技术的分辨率和图像对比度高,且由于轴向分辨率显著提高,使之具有三维层析成像能力。从照明方式上划分,共焦扫描显微成像技术可以分为透射和反射两种方式。目前已有关于太赫兹透射共焦扫描显微成像的报道^[5-9]。在实际应用中,只有反射式具有层析能力^[10],进而呈现出物体三维像,因此对于反射式的研究比透射式更有应用价值。Lim等^[11]于2008年进行了同轴反射式共焦扫描显微成像实验。其实验装置由波长为 0.3 mm 的太赫兹源、三个透镜、分光片、针孔和探测器组

收稿日期: 2014-01-15; 收到修改稿日期: 2014-03-06; 网络出版日期: 2014-07-21

作者简介: 杨永发(1990—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹技术方面的研究。E-mail: yangyongfa_sky2013@126.com

导师简介: 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

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

成。通过振动物镜,调制照射在样品上的太赫兹束;探测器同时测量振幅和相位信息。

本文提出了一种基于 CO₂抽运的连续太赫兹反射式共焦扫描显微成像实验光路,计算分析了系统的轴向响应特性。

2 基本原理

对于一个没有几何光学像差的理想透镜,其三维点扩展函数(PSF)的亮度中心可以看作一个椭球体,当该椭球体的三个轴长分别等于共焦系统对应坐标方向的 PSF 半峰全宽(FWHM)的两倍时,椭球体包含了由透镜出射的 80%左右的亮度,该椭球体称为焦体^[12],这决定了系统空间分辨率的大小。

图 1 为反射式共焦显微技术原理示意图^[10],图中 α 为照明光束和采集光束在样品空间的发散角, (x, y, z) 为照明透镜(IL)和采集透镜(CL)在样品空间的坐标, (x_d, y_d, z_d) 为 CL 在探测空间的坐标。

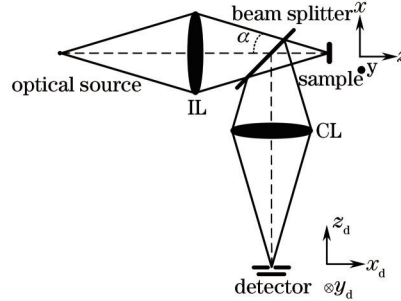


图 1 反射式共焦显微技术原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of reflection-mode confocal microscopy

设辐射源波长为 λ , 当点探测器恰好处于 CL 镜焦点位置时, IL 和 CL 的 PSF 相等 [即 $h_i(x, y, z) = h_c(x, y, z) = h(x, y, z)$], 并且有^[10]:

$$h(x, y, z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P(x_\rho, y_\rho) \exp\left[\frac{i u}{2}(x_\rho^2 + y_\rho^2)\right] \exp\{i(v_x x_\rho + v_y y_\rho)\} dx_\rho dy_\rho, \quad (1)$$

式中 $P(x_\rho, y_\rho)$ 为两镜的光瞳函数; $v_x = \frac{2\pi x \sin \alpha}{\lambda}$, $v_y = \frac{2\pi y \sin \alpha}{\lambda}$ 和 $u = \frac{8\pi z \sin^2(\alpha/2)}{\lambda}$ 为两镜在样品空间的归一化光学坐标, $\sin \alpha$ 为两镜在样品空间的数值孔径。

考虑点探测器存在微小的偏移, 其归一化光学坐标为 $v_{dx} = \frac{2\pi x_d \sin \alpha}{\lambda}$, $v_{dy} = \frac{2\pi y_d \sin \alpha}{\lambda}$, $u_d = \frac{8\pi z_d \sin^2(\alpha/2)}{\lambda}$ 。

当点探测器仅沿着采集光轴 z_d 方向存在轴向偏移时, CL 的 PSF 为^[13]:

$$h_c(x, y, z, u_d) = \int_0^1 2\pi \rho J_0(\rho v) \exp\left[\frac{i(u + u_d)\rho^2}{2}\right] d\rho. \quad (2)$$

共焦显微系统的 PSF 是 IL 和 CL 的 PSF 乘积^[14], 系统的轴向响应 $I(x, y, z, u_d)$ 应写为^[13]:

$$I(0, 0, z, u_d) = \left| \int_0^1 2\pi \rho J_0(\rho v) \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2}\right) d\rho \right|^2 \times \left| \int_0^1 2\pi \rho J_0(\rho v) \exp\left[\frac{i(u + u_d)\rho^2}{2}\right] d\rho \right|^2, \quad (3)$$

整理得到:

$$I(0, 0, z, u_d) = \left| \int_0^1 2\pi \rho \exp\left[\frac{i 4\pi z \sin^2(\alpha/2)\rho^2}{\lambda}\right] d\rho \right|^2 \times \left| \int_0^1 2\pi \rho \exp\left\{\frac{i[8\pi z \sin^2(\alpha/2)/\lambda + u_d]\rho^2}{2}\right\} d\rho \right|^2. \quad (4)$$

当点探测器在 CL 焦平面上仅沿 x_d 方向存在横向偏移时, CL 的 PSF 为^[13]:

$$h_c(x, 0, z, v_{dx}) = \iint_{-\infty}^{+\infty} P(x_\rho, y_\rho) \exp\left[\frac{i u}{2}(x_\rho^2 + y_\rho^2)\right] \exp\{i[(v_x + v_{dx})x_\rho]\} dx_\rho dy_\rho. \quad (5)$$

此时系统的轴向响应为:

$$I(0,0,z,v_{dx}) = \left| \int_0^1 2\pi\rho J_0(\rho v) \exp\left(\frac{i u \rho^2}{2}\right) d\rho \right|^2 \times \left| \iint_{x_\rho^2+y_\rho^2 \leq 1} \exp\left[\frac{i u}{2}(x_\rho^2+y_\rho^2)\right] \exp\{i[(v_x+v_{dx})x_\rho]\} dx_\rho dy_\rho \right|^2, \quad (6)$$

整理得到:

$$I(0,0,z,v_{dx}) = \left| \int_0^1 2\pi\rho \exp\left[\frac{i4\pi z \sin^2(\alpha/2)\rho^2}{\lambda}\right] d\rho \right|^2 \times \left| \iint_{x_\rho^2+y_\rho^2 \leq 1} \exp\left[\frac{i4\pi z \sin^2(\alpha/2)}{\lambda}(x_\rho^2+y_\rho^2)\right] \exp(v_{dx}x_\rho) dx_\rho dy_\rho \right|^2, \quad (7)$$

系统基于 FWHM 的横向分辨率 Δr 为^[15]

$$\Delta r = \frac{0.37\lambda}{\sin \alpha}. \quad (8)$$

3 实验光路方案设计

拟采用美国相干公司 SIFIR-50 CO₂ 抽运连续太赫兹激光器作为成像光源,设计的太赫兹反射式共焦扫描显微成像方案如图 2 所示。太赫兹辐射经过针孔 p1, 离轴抛物面镜组 I 将辐射聚焦至样品中, 样品放置于一个三维移动平台上; 辐射经样品、分束器反射后, 由离轴抛物面镜组 C 将辐射聚焦至针孔 p2, 最终进入单元探测器。

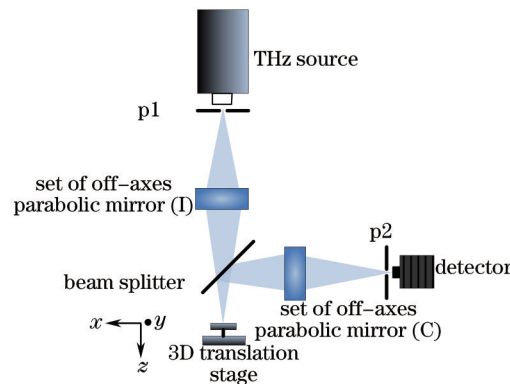


图 2 太赫兹反射式共焦扫描显微成像方案图

Fig.2 Schematic diagram of THz reflection-mode confocal scanning microscopic imaging

4 仿真分析

根据图 2 所示的实验光路方案设计图, 进行仿真研究。

在太赫兹反射式共焦扫描显微成像实验装置中, 主要的光学元件是离轴抛物面镜组, 其数值孔径决定成像系统的分辨率。选用直径 $D=38.1$ mm, 焦距 $f=101.6$ mm 的离轴抛物面镜组。

下面分别针对 2.52 THz 源(118.83 μm) 和 1.63 THz 源(184.31 μm), 探讨离焦偏移对系统轴向分辨率和探测器接收强度的影响。

4.1 2.52 THz 源(118.83 μm)

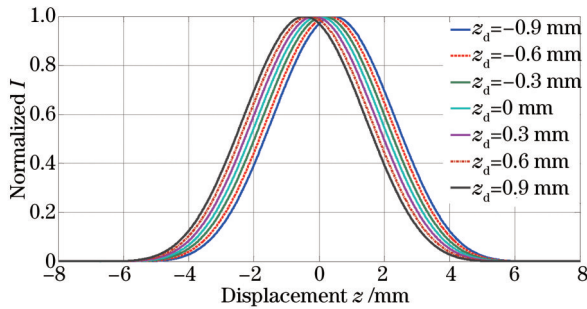
由(8)式计算得出横向分辨率约为 0.23 mm; 由(4)式计算得出轴向分辨率约为 4.27 mm。

1) z_a 偏移对轴向分辨率的影响

由(4)式经过仿真得到 z_a 偏移对系统归一化轴向响应的影响曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知, 探测器的轴向微小偏移 z_a 导致轴向特性曲线产生较大移动; 当探测器在轴向上存在微小偏移 $z_a \in [-0.6 \text{ mm}, 0.6 \text{ mm}]$ 时, 分辨率基本不变, 响应峰值的微小偏移可以忽略。

2) x_a 偏移对轴向分辨率的影响

由(7)式经过仿真得到 x_a 偏移对系统归一化轴向响应的影响曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知, 当探测器在横向上存在微小偏移时, 归一化轴向响应曲线基本不发生移动; 偏移量 $x_a \in [-0.21 \text{ mm}, 0.21 \text{ mm}]$ 时, 分辨率误差不会超过 $\pm 5\%$, 即约为 ± 0.21 mm。

图3 波长为 118.83 μm 时 z_d 偏移对轴向分辨率的影响Fig.3 Influence of the axial deviation of detector on axial resolution with wavelength of 118.83 μm 3) x_d 偏移对探测器接收的轴向响应光强的影响

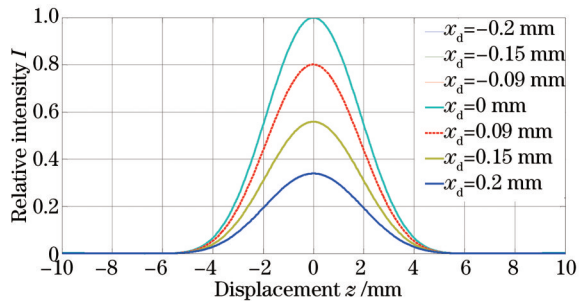
由(7)式知点探测器正好位于焦点处时,轴向响应光强最大值为 $I(0,0,0) = \pi^4 \text{cd}$ 。由(7)式得到 x_d 偏移对探测器接收的相对轴向响应[即 $I(0,0,z,u_d)/I(0,0,0)$]曲线,如图5所示。由图5可知, x_d 的取值范围为 $[-0.09 \text{ mm}, 0.09 \text{ mm}]$ 时,接收到的光强不小于轴向响应光强最大值的 80%,即约为 77.93 cd。

4.2 1.63 THz 源(184.31 μm)

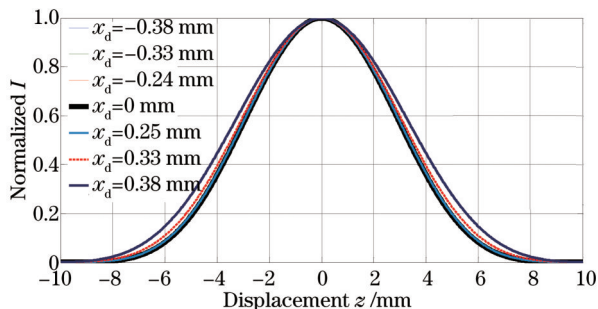
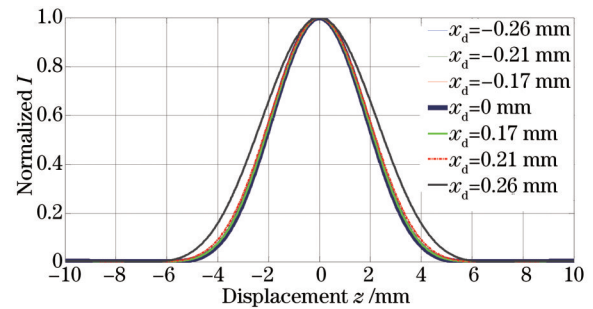
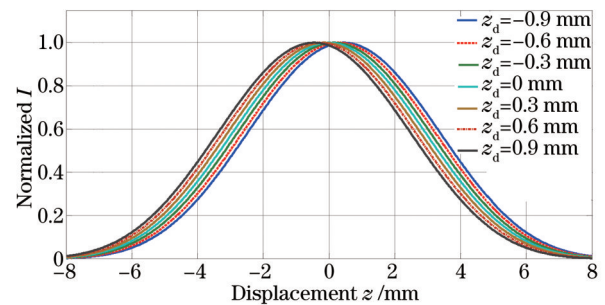
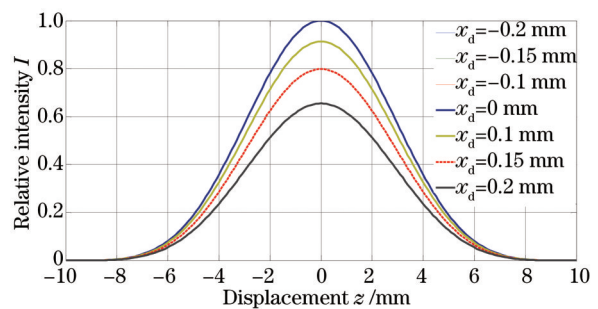
由(8)式计算得出横向分辨率约为 0.36 mm;由(4)式计算得出轴向分辨率约为 6.63 mm。

1) z_d 偏移对轴向分辨率的影响

由(4)式经过仿真得到 z_d 偏移对系统归一化轴向响应的的影响曲线,如图6所示。由图6可知,探测器的轴向微小偏移 z_d 导致轴向特性曲线产生较大移动;当探测器在轴向上存在微小偏移 $z_d \in [-0.6 \text{ mm}, 0.6 \text{ mm}]$ 时,分辨率基本不变,响应峰值的微小偏移可以忽略。

图5 波长为 118.83 μm 时 x_d 偏移对轴向响应光强的影响Fig.5 Influence of the transverse deviation of detector on axial response intensity with wavelength of 118.83 μm 2) x_d 偏移对轴向分辨率的影响

由(7)式经过仿真得到 x_d 偏移对系统归一化轴向响应的的影响曲线,如图7所示。由图7可知,当探测器在横向上存在微小偏移时,归一化轴向响应曲线基本不发生移动;偏移量 $x_d \in [-0.33 \text{ mm}, 0.33 \text{ mm}]$ 时,分辨率

图7 波长为 184.31 μm 时 x_d 偏移对轴向分辨率的影响Fig.7 Influence of the transverse deviation of detector on axial resolution with wavelength of 184.31 μm 图4 波长为 118.83 μm 时 x_d 偏移对轴向分辨率的影响Fig.4 Influence of the transverse deviation of detector on axial resolution with wavelength of 118.83 μm 图6 波长为 184.31 μm 时 z_d 偏移对轴向分辨率的影响Fig.6 Influence of the axial deviation of detector on axial resolution with wavelength of 184.31 μm 图8 波长为 184.31 μm 时 x_d 偏移对轴向响应光强的影响Fig.8 Influence of the transverse deviation of detector on axial response intensity with wavelength of 184.31 μm

误差不超过 $\pm 5\%$,即约为 $\pm 0.33\text{ mm}$ 。

3) x_d 偏移对探测器接收的轴向响应光强的影响

由(7)式得到 x_d 偏移对探测器接收的相对轴向响应[即 $I(0,0,z,u_d)/I(0,0,0,0)$]曲线,如图8所示。由图8可知, x_d 的取值范围为 $[-0.15\text{ mm}, 0.15\text{ mm}]$ 时,接收到的光强不小于轴向响应光强最大值的80%,即约为77.93 cd。

5 结 论

太赫兹反射式共焦扫描显微成像,是太赫兹技术与反射式共焦扫描显微成像技术的结合。本文提出了一种太赫兹反射式共焦扫描显微成像实验光路方案,分析确定了离轴抛面镜组参数($D=38.1\text{ mm}$, $f=101.6\text{ mm}$),分别在两种太赫兹波长下,进行了探测器偏移的仿真研究。研究表明,理论上所设计的太赫兹反射式共焦扫描显微成像实验装置, $\lambda=118.83\text{ }\mu\text{m}$ 时,横向分辨率可达 0.23 mm ,轴向分辨率约为 4.27 mm ; $\lambda=184.31\text{ }\mu\text{m}$ 时,横向分辨率可达 0.36 mm ,轴向分辨率约为 6.63 mm 。探测器轴向偏移范围为 $[-0.6\text{ mm}, 0.6\text{ mm}]$ 时,两波长下的系统轴向分辨率均基本不变,响应峰值的微小偏移可以忽略。探测器轴向偏移范围为 $[-0.09\text{ mm}, 0.09\text{ mm}]$ ($\lambda=118.83\text{ }\mu\text{m}$)和 $[-0.15\text{ mm}, 0.15\text{ mm}]$ ($\lambda=184.31\text{ }\mu\text{m}$)时,接收到的光强不小于探测器正好位于焦点处时光强最大值的80%。

参 考 文 献

- 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 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.
- 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.
- Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen, *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(11): 2853-2858.
杨 昆, 赵国忠, 梁乘森, 等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. 中国激光, 2009, 36(11): 2853-2858.
- M A Salhi, M Koch. Semi-confocal imaging with THz gas laser[C]. SPIE, 2006, 6194: 61940A.
- M A Salhi, M Koch. Confocal THz imaging using a gas laser[C]. 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008.
- M A Salhi, I Pupeza, M Koch. Confocal THz laser microscopy[J]. J Infrared Milli Terahz Waves, 2010, 31(3): 358-366.
- N N Zinov'ev, A V Andrianov, A J Gallant, *et al.*. Contrast and resolution enhancement in a confocal terahertz video system[J]. JETP Letters, 2008, 88(8): 492-495.
- Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui, *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(s1): s100402.
丁胜晖, 李 琦, 姚 睿, 等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. 光学学报, 2010, 30(s1): s100402.
- Gu Min. Principles of Three-Dimensional Imaging in Confocal Microscopes[M]. Wang Guiying, *et al.* Transl.. Beijing: New Times Press, 2000.1.
顾 敏. 共焦显微技术的三维成像原理[M]. 王桂英等译. 北京: 新时代出版社, 2000. 1.
- M Lim, J Kim, Y Han, *et al.*. Perturbation analysis of Terahertz confocal microscopy[C]. The 33rd International Conference on Infrared and Millimeter Waves and the 16th International Conference on Terahertz Electronics, 2008. 757-758.
- Stelzer E H K, Lindek S. Fundamental reduction of the observation volume in far-field light microscopy by detection orthogonal to the illumination axis: confocal theta microscopy[J]. Opt Commun, 1994, 111(5): 536-547.
- Jiang Qin, Qiu lirong, Zhao Weiqian, *et al.*. Effect of point detector position in dual-axes confocal microscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(8): 081201.
江 琴, 邱丽荣, 赵维谦, 等. 点探测器位置对双轴共焦显微技术的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(8): 081201.
- Loewke K, Camarillo D, Piyawattanametha W, *et al.*. Real-time image mosaicing with a hand-held dual-axes confocal microscope[C]. SPIE, 2008, 6851: 68510F.
- Corle T R, Kino G S. Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems[M]. Boston: Academic Press, 1996.