

基于可调谐准高斯波束太赫兹源的 成像系统研究*

张显斌[†] 施 卫

(西安理工大学应用物理系, 西安 710048)

(2007 年 10 月 19 日收到 2008 年 3 月 12 日收到修改稿)

报道了一种基于频率可调谐准高斯太赫兹波束的透射成像系统. 研究表明, 在这种成像系统中太赫兹波束具有良好的空间分布特性, 其波束质量因子 $M_x^2 = 1.15$, $M_z^2 = 1.25$, 波束传输特性和聚焦特性良好. 实验结果反映出成像系统的空间分辨能力与典型太赫兹波长(250 μm)相近. 在太赫兹波输出 1.0—2.5 THz 范围内, 成像系统信噪比大于 1000 dB, 在 1.8 THz 处, 信噪比大于 6000 dB. 利用这种太赫兹波透射成像系统对样品进行了成像实验, 并得到较为清晰的图像.

关键词: 太赫兹波, 太赫兹成像, 太赫兹探测

PACC: 4265, 5235, 4270

1. 引 言

亚毫米太赫兹电磁波产生技术^[1,2]、太赫兹波探测技术^[3,4]、太赫兹波应用技术研究^[5,6], 形成了目前太赫兹科学研究领域中紧密相关而又有所侧重的三个方面. 而物质的太赫兹波成像是太赫兹波应用研究中最主要的内容之一. 所有的太赫兹波应用研究几乎都建立在以下两个太赫兹波的重要性质基础之上: 一是太赫兹波独特的频率范围(位于微波频段和光频段之间)覆盖了多数大分子物质的分子振动和转动光谱, 因此多数大分子物质在太赫兹频段无论其吸收谱、反射谱还是发射谱都具有明显的指纹谱特性^[7], 这一点是微波所不具备的. 二是太赫兹波可以不同程度地穿透多数物质, 这个特点为红外辐射所不具备. 以上两点成为开展太赫兹光谱分析、太赫兹波成像应用的重要根据^[8]. 利用太赫兹波对样品成像有多种技术, 在选择何种成像技术前, 需要考虑样品本身的物理化学性质、研究目的、要获取的信息类型以及成像效率和成本. 此外, 太赫兹辐射源本身的性质在很大程度上决定了它适于做何种成像技术的光源. 目前主要的太赫兹波成像技术包括太

赫兹时域光谱^[2]成像、近场成像、太赫兹断层扫描(T-ray CT)成像、透射和反射成像^[8-10]等. 上述太赫兹成像技术主要使用的是基于光整流和光电导偶极天线辐射方法^[2,7]的宽带太赫兹波源, 即利用飞秒激光照射光学晶体(GaAs, GaSe, ZnTe)或超快光电导开关, 得到从数十兆赫兹延伸到数十太赫兹的宽带太赫兹波辐射^[11-13].

本文报道了一种基于频率可调谐的准高斯太赫兹波束透射成像系统. 成像系统所用太赫兹波源是基于耦合场量子辐射机制和角度调谐技术的结合, 辐射的太赫兹波具有良好的能量空间分布特性, 波束质量因子达到 $M_x^2 = 1.15$, $M_z^2 = 1.25$. 高质量波束的特点使太赫兹波束具有良好的传输特性和聚焦特性, 并可在成像过程中获得较高的成像分辨率. 文中对这种成像系统的特性进行了分析, 并给出了一些样品的成像结果.

2. 成像系统

图 1 为太赫兹透射成像实验装置示意图, 其中太赫兹波源是整个成像系统的核心部分. 辐射源的非线性介质由三块非线性 MgO:LiNbO₃ 晶体组成.

* 国家重点基础研究发展规划(批准号:2007CB310406)、国家自然科学基金(批准号:10390160, 60771053)、陕西省自然科学研究计划(批准号:2005A03)和西安理工大学科学研究计划(批准号:108-210703)资助的课题.

[†] E-mail: zhangxianbin@xaut.edu.cn

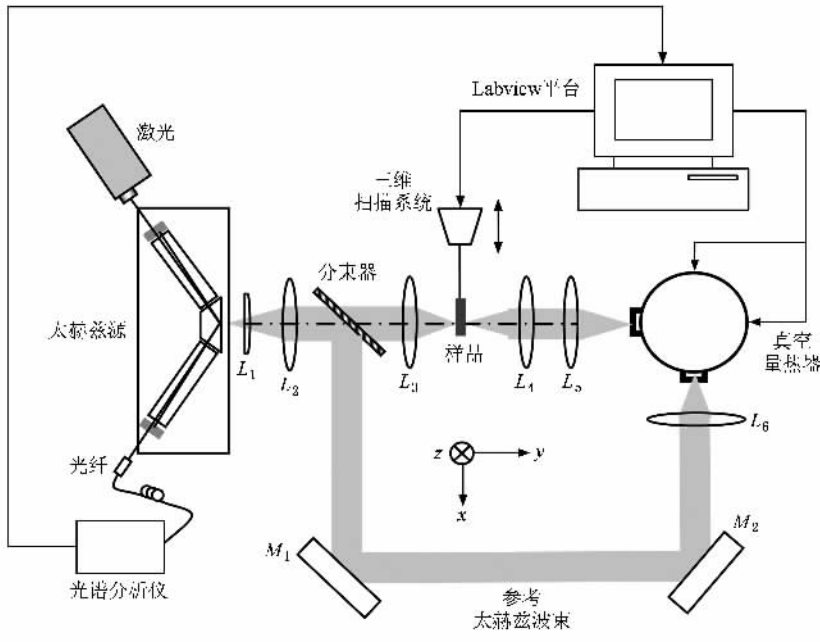


图 1 太赫兹透射成像装置示意图

这种辐射源产生太赫兹波的原理如下：纳秒脉冲宽度的红外抽运光入射 LiNbO_3 非线性晶体后，晶体中具有电磁特性的 TO 声子可以和入射光子形成耦合场量子。作为一种电磁特性的元激发，耦合场量子具有类声子和类光子的双重特性，其辐射场频率在太赫兹频段范围，这使耦合场量子本身可以辐射太赫兹频段电磁波。通过 LiNbO_3 耦合场量子受激散射过程可以辐射宽带太赫兹电磁波，结合角度相位匹配及参量振荡原理，对太赫兹辐射的频率实现调谐，最终形成可调谐、单色性好、波束质量高且常温下工作的太赫兹辐射源。本文实验中的太赫兹源可以辐射准高斯太赫兹波束，有关这类太赫兹辐射源的研究情况已在文献 [14, 15] 进行了报道。

实验中使用 1064 nm 的脉冲激光作为太赫兹源的抽运光源。抽运激光入射 $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ 晶体后出射太赫兹波，并通过聚氯乙炔柱面透镜 L_1 ($f = 50$ mm) 和球面透镜 L_2 ($f = 35$ mm) 后成为平行太赫兹波束。柱面透镜将截面成椭圆的太赫兹波束在 z 方向上进行压缩，使波束截面上光斑在 x 方向和 z 方向大小趋于接近，达到相互匹配的目的。平行太赫兹波束通过太赫兹波专用偏振分束器后分成两束。一束作为成像波束通过 L_3 ($f = 35$ mm) 聚焦后，对置于焦平面处样品实现透射成像。穿透样品后的太赫兹光束再经过透镜 L_4 ($f = 33$ mm) 和 L_5 ($f = 55$ mm) 后送入 Si 基低温真空量热器的第一探测通道。另一束

太赫兹波经过反射镜 M_1 和 M_2 反射并由 L_6 ($f = 55$ mm) 汇聚后，作为参考太赫兹波束进入真空量热器第二探测通道。偏振分束器还起到对成像波束和参考波束能量进行调节分配的作用。样品固定于焦平面处支架上，由控制系统带动样品在 x - z 平面上运动实现对样品的二维扫描，扫描范围及步进距离可通过程序设定。闲频光通过光纤送入光谱分析仪测量其波长，用以间接对辐射源的输出频率进行监控。

参考太赫兹波束的作用是为了去除噪声或者外界干扰给成像带来的影响。噪声或者外界干扰（环境温度 and 湿度的变化、光学平台的振动等）会造成太赫兹波输出的不稳定，表现为一定程度的波动。实验中用于透射成像或者太赫兹光谱分析的取样信号，已经由成像控制系统将第一探测通道信号与第二探测通道信号进行了比较处理，这样可以消除由于干扰导致的信号波动对成像的影响。透射成像开始后，所有扫描成像过程由 Labview 程序控制，存储数据自动生成数据文件或图形文件。

成像系统的分辨率主要取决于太赫兹波束的可聚焦特性。可聚焦性好，则太赫兹波束能被太赫兹透镜聚焦后的焦点越小，在同等扫描速度下成像的分辨率就越高。太赫兹波束能量的空间分布特性及波束质量可由波束质量因子 M^2 评价。理想高斯波束的 $M^2 = 1$ ，可以被透镜聚焦成一个点。根据束宽和远场发散角乘积不变原理，国际标准化组织将束腰直

径与波束远场发散角乘积的 1/4 定义为评价波束可聚焦性的特征参数 K_f ,

$$K_f = w_0 \theta_0 = w_f \theta_f. \tag{1}$$

在本文成像系统中 (1) 式的 θ_0, θ_f 为太赫兹波束聚焦前后的光束发散角一半; w_0, w_f 为太赫兹波束聚焦前后束腰的半径. 对于波长为 λ 的太赫兹波, 聚焦特征参数和波束质量因子的关系可表示为

$$K_f = \frac{\lambda}{\pi} M^2. \tag{2}$$

聚焦光斑半径 w_f 与波束质量因子的关系为

$$w_f = \frac{2K_f f}{D} = \frac{2\lambda f}{\pi D} M^2, \tag{3}$$

式中 f 为透镜焦距, D 为波在进入聚焦透镜时的波束直径. 由 (3) 式可知, 波束质量因子 M^2 越小, 即波束越接近理想高斯波束, 聚焦后的焦点也就越小.

图 2 给出了实验中测量太赫兹波束直径随传播位置的变化关系, 图中实心点和空心点分别是测量太赫兹波束在 x 方向和 z 方向上的直径数据. 经过曲线拟合可以确定出太赫兹波束在 x 方向和 z 方向上的波束因子分别为 $M_x^2 = 1.15$, $M_z^2 = 1.25$. 这个结果反映了本成像系统所用太赫兹波源出射的太赫兹波具有较高的波束质量.

为了确定成像系统的实际聚焦特性, 实验中采用刀刃法对聚焦后太赫兹波焦斑大小进行了精确测量. 图 3 为测量刀刃在焦点位置处沿 x 方向和 z 方

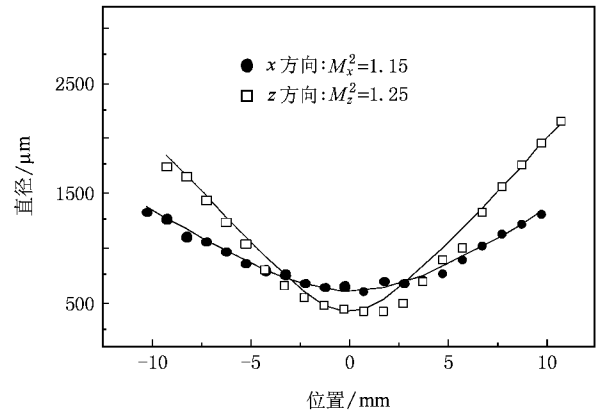


图 2 太赫兹波束直径随传播位置的变化关系

向移动时太赫兹波强度的变化曲线. 太赫兹波强度从 15.9% 连续变化到 84.1% 时刀刃所走过的距离, 对应的是太赫兹波高斯焦斑上的强度为最高强度 $1/e^2$ 两点的距离. 测量出太赫兹波焦斑在 x 方向和 z 方向上的宽度为 $610 \mu\text{m} \times 420 \mu\text{m}$. 图 4 为通过太赫兹波束分析系统给出的焦斑处能量的空间分布特性. 由实验中聚焦系统光路参数和 (3) 式确定的焦斑直径约为 $500 \mu\text{m}$. 考虑实验中合理误差后, 可认为测量值与理论计算值基本符合, 这表明实验系统所用太赫兹波源具备良好的聚焦特性. 如果实验中测量的焦斑大小与 (3) 式给出的理论估算值相差较大, 则说明太赫兹波光路上透镜的位置还需要作进一步调

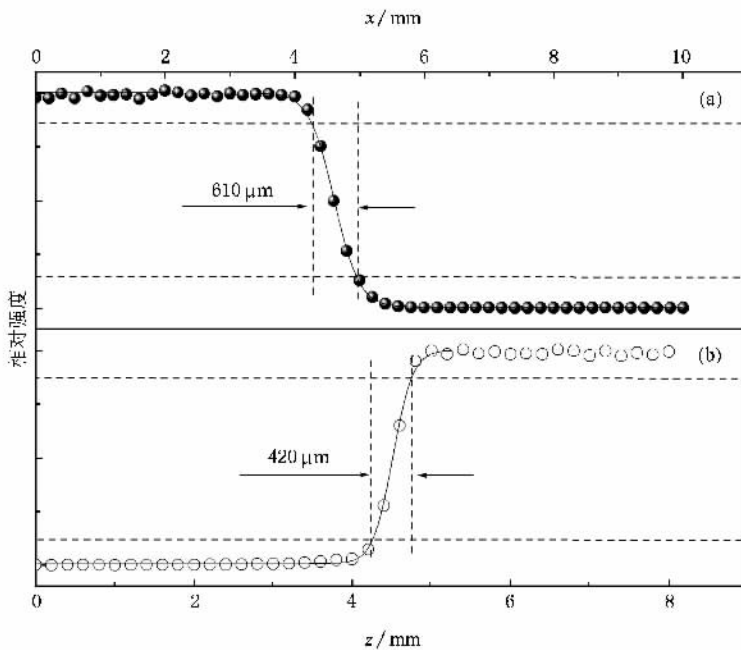


图 3 太赫兹波强度随刀刃位置在 x 方向和 z 方向移动时的变化 (a) x 方向 (b) z 方向

整 经反复多次调整后系统光路可将太赫兹波焦斑调整到最小.事实上,焦斑大小虽然还可以通过精心选择光路汇聚到较小,但是最终存在一个理论衍射极限.对于高斯波束,这个由衍射极限决定的最小焦斑直径与太赫兹波的波长成正比关系.

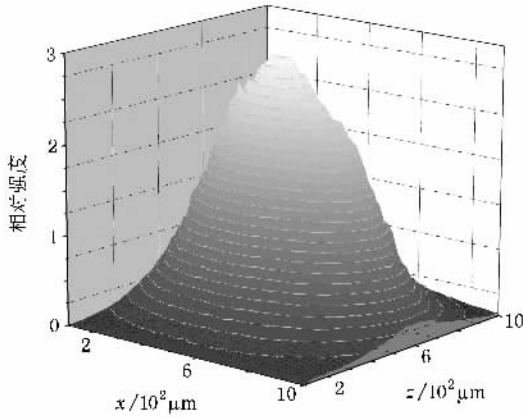


图 4 太赫兹波焦斑处能量的空间分布特性

为了估计成像的动态响应范围,测量了太赫兹源在不同频率下成像系统在透过率为 1 和 0 时信号的大小,进而给出信噪比随太赫兹波频率的变化曲线,如图 5 所示.在 1—2.5 THz 范围内,信噪比大于 1000 dB,在 1.8 THz 位置,信噪比大于 6000 dB,并由此估算出在 1.8 THz 处透射成像图片的动态响应范围可达到 37 dB.

在 1.9 THz ($\lambda = 157 \mu\text{m}$)下对银盐感光底板上的图案进行透射成像以实际检测成像系统的分辨能力.银盐感光底板上已经制作好宽度和间距不等的细线,细线与空白处对太赫兹波吸收的差异造成透过率不同,当太赫兹波扫描银盐板后形成透射成像图片,结果如图 6 (b)所示.银盐底板图案宽度和间

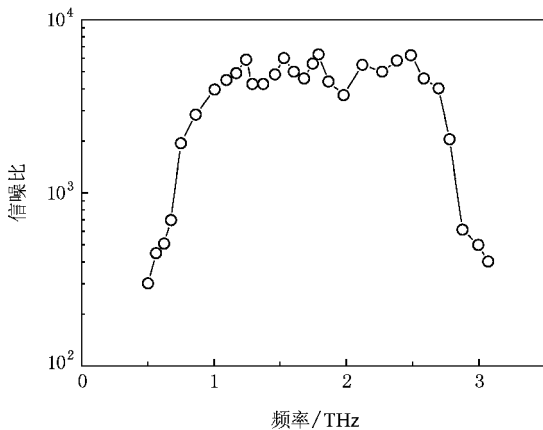


图 5 成像系统的信噪比

距分别为 200, 500, 1000 μm ,如图 6 (a)所示.由于衍射效应会随着障碍物尺度的减小趋于明显,因此在图案宽度间距同为 200 μm 处的对比度是最低的,但仍然可以分辨.如果继续减小图案尺寸,则衍射效应将使图案中的线段变得难以分辨.以上实验表明,该太赫兹波透射成像系统的分辨能力与典型太赫兹波长 (250 μm)相接近,已经可以满足一般的成像要求.

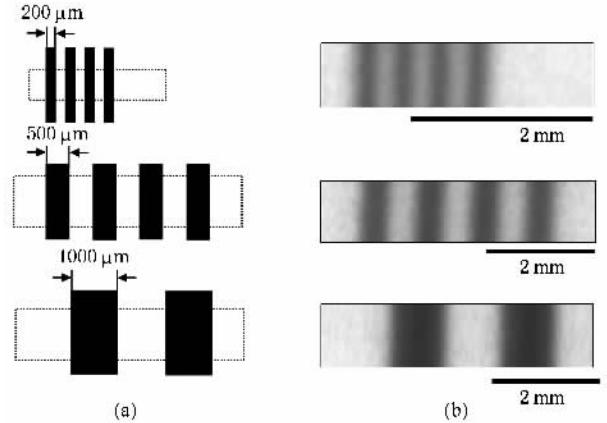


图 6 在 1.9 THz 下检测成像系统分辨能力 (a)样品图样, (b)成像结果

3. 样品成像实验

图 7 是太赫兹波透射成像系统在输出波长为 1.9 THz 时对脱水树叶的成像结果.图 7 (a)为样品的普通光学照片,图 7 (b)为太赫兹波透射成像图片,扫描区域为 20 mm × 16 mm,图片扫描像素为 130 × 110 扫描用时 20 min 左右.由于样品中叶梗、叶脉、原叶肉部分对太赫兹波吸收程度的不同,因此图片可以反映出叶体各部位的空间密度差异.此外,要获得图 7 中这种较为清晰的图片,一般要对样品采取脱水处理,否则太赫兹波将几乎被水全部吸收.到目前为止,水对太赫兹波强烈的吸收是任何一种太赫兹波成像实验都应该考虑的问题.然而,也有研究者提出利用水对太赫兹波强烈吸收特性来研究水在生物体内分布状况的可能性.

1.8 THz 下对丁苯橡胶绝缘层包裹的金属导线进行了太赫兹成像(图 8).样品导线的金属芯直径为 1.5 mm,实验前已经人为地将金属导线折断,可以清晰地从此成像图片中发现折断的位置.实验中也对内部折断的玻璃光纤进行了同类型太赫兹成像,从图像中同样可发现损伤的位置,但由于纤芯太细造成的强衍射效应使成像质量降低.这些实验表明,

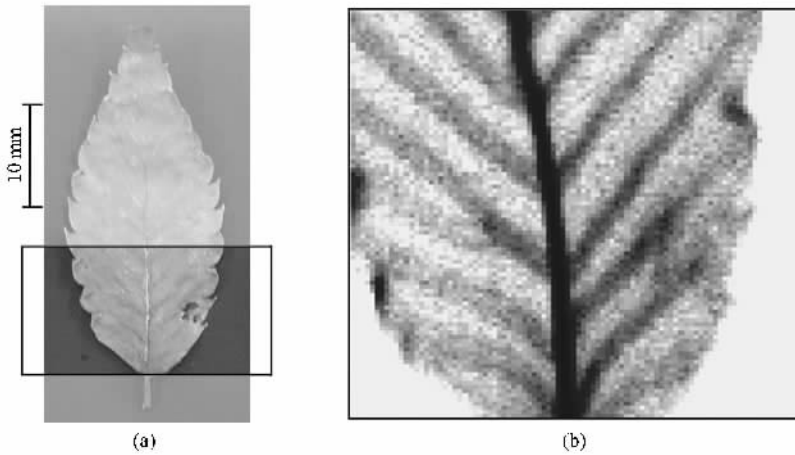


图7 在 1.9 THz 波长下对脱水树叶的透射成像结果 (a)脱水的树叶 (b)成像结果.扫描像素为 130×110 ,用时为 20 min 左右

在目前实验基础上通过进一步的技术优化,把这种太赫兹波成像系统用于工业流水线现场产品检测应该是可行的.

放置在包装纸中剃须刀片的透射成像结果如图 9 所示.太赫兹波被金属反射但是可以很好地穿透纸制品,因此可以透视包装而看到金属物品.目前,在机场安全检查中,对包裹中夹带的金属刀具一般用 X 射线透射.由于 X 射线频率高,光子能量大(典型的 X 光子能量为 10^6 eV),会对检查对象和周围人员的身体健康造成一定的损伤.而太赫兹波光子能量要低得多(典型太赫兹光子能量为 10^{-3} eV),对生物体几乎无任何伤害,是一种安全的射线.相对于 X 射线,将“T 射线”用于安检的设想受到了广泛的关注.

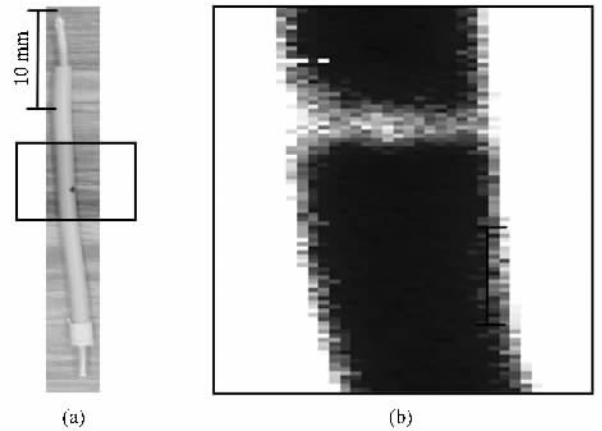


图8 折断导线的太赫兹透射成像结果 (a)折断的导线 (b)成像结果.扫描像素为 151×120 ,扫描用时 30 min

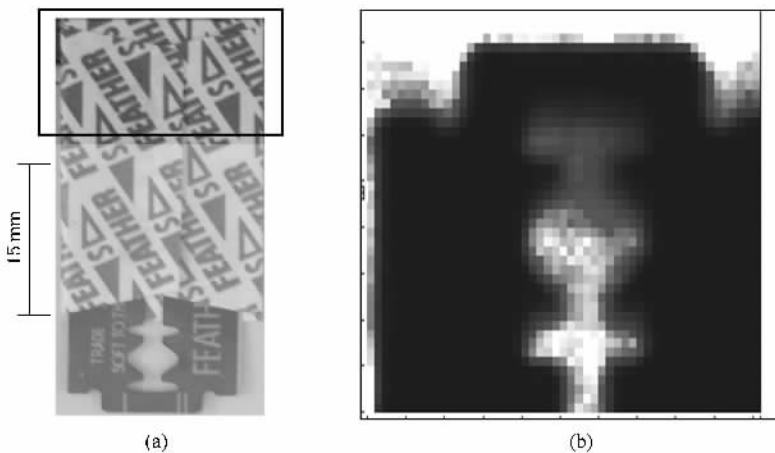


图9 对纸包中剃须刀片的透射成像结果 (a)纸包中的剃须刀片 (b)成像结果.扫描像素为 151×120 ,扫描用时 30 min

4. 结 论

1) 研究了一种基于频率可调谐的准高斯太赫兹波束的透射成像系统. 成像系统的太赫兹光源是基于耦合场量子的受激散射辐射机制和角度调谐技术的结合.

2) 研究表明, 在这种成像系统中由于太赫兹波束具有良好的波束空间分布特性, 其波束质量因子 $M_x^2 = 1.15$, $M_z^2 = 1.25$, 使波束具有良好的传输特性和聚焦特性. 实验表明, 该太赫兹波透射成像系统的空间分辨能力与典型太赫兹波长(250 μm)相接近, 已经可以满足一般的成像要求.

3) 在太赫兹波输出 1—2.5 THz 范围内, 成像系

统信噪比大于 1000 dB; 在 1.8 THz 处, 信噪比大于 6000 dB, 图像的动态响应范围可达到 37 dB.

4) 利用这种太赫兹波透射成像系统, 对脱水树叶、绝缘管中折断导线、纸包中的刀片等样品进行了成像实验, 并得到较为清晰的图像. 我们认为, 部分成像结果反映出这种太赫兹成像系统具有进一步的发展潜力, 并有可能应用在工业品在线检测和安检等领域.

感谢日本理化学研究所的 H. Ito 教授、T. Ikari 博士及日本东北大学电气通信研究所 C. Takyu 和 T. Shoji 先生在实验中给予的技术支持, 同时感谢西安理工大学余宁梅教授对研究工作提供的帮助.

-
- [1] Kanda N, Konishi K 2007 *Opt. Express* **15** 11117
- [2] Wang S, Zhang X C 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** R1
- [3] Naftaly M, Miles R 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 3517
- [4] Cao J C, Liu H C, Lei X L 2001 *Phys. Rev. B* **63** 308
- [5] Kawase K, Takaaki H 2000 *Opt. Lett.* **25** 1714
- [6] Imafuji O, Singh B, Hirose Y 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 071112
- [7] Han P Y, Huang X G, Zhang X C 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 2864
- [8] Ueno Y, Rungsawang R, Tomita I 2006 *Chem. Lett.* **35** 1128
- [9] Jeong Y U, Kazakevitch G M, Cha H J 2007 *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res.* **575** 58
- [10] Gregory I S, Tribe W R, Cole B E 2004 *Electron. Lett.* **40** 143
- [11] Bandyopadhyay A, Artificial 2006 *Int. J. Infrar. Millim. Waves* **27** 1145
- [12] Yuan T, Xu J Z, Zhang X C 2004 *Infrar. Phys. Techn.* **45** 417
- [13] Heyman J N, Neocleous P D, Hebert 2001 *Phys. Rev. B* **64** 085202
- [14] Zhang X B, Shi W 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5237 (in Chinese) [张显斌、施 卫 2006 物理学报 **55** 5237]
- [15] Zhang X B, Shi W, Ikari T, Ito H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 3153

Study of imaging system based on the tunable terahertz wave source with quasi-Gaussian beam output^{*}

Zhang Xian-Bin[†] Shi Wei

(*Department of Applied Physics , Xi'an University of Technology , Xi'an 710048 , China*)

(Received 19 October 2007 ; revised manuscript received 12 March 2008)

Abstract

A terahertz wave imaging system based on the tunable terahertz source with the quasi-Gaussian beam output is reported. In this imaging system , terahertz wave beam is easy to be focused and transmitted owing its spatial distribution with the excellent beam quality factor of $M_x^2 = 1.15$ and $M_z^2 = 1.25$. The experimental results show the spatial resolving power of this imaging system is close to the typical terahertz wavelength of $250 \mu\text{m}$. In the output range of $1.0\text{--}2.5 \text{ THz}$, the signal to noise ratio (SNR) is higher than 1000 dB , and the SNR is above 6000 dB at 1.8 THz . Based on this system , the terahertz imaging experiments for the several samples were performed , and clear pictures were obtained.

Keywords : terahertz wave , terahertz imaging , terahertz detection

PACC : 4265 , 5235 , 4270

^{*}Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB310406) , the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10390160 , 60771053) , the Natural Scientific Research Program of Shanxi Province , China (Grant No. 2005A03) and the Scientific Research Program of Xi'an University of Technology , China (Grant No. 108-210703).

[†] E-mail : zhangxianbin@xaut.edu.cn