

文章编号: 0258-7025(2009)11-2853-06

脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较

杨 昆 赵国忠 梁承森 武利忠

(首都师范大学物理系太赫兹波谱与成像北京市重点实验室, 太赫兹光电子学省部共建教育部重点实验室, 北京 100048)

摘要 对脉冲太赫兹 (THz) 波成像和连续波太赫兹成像进行了对比研究。在两个系统下分别进行实验, 对两个成像系统的成像机理、系统分辨率、系统噪声、成像速度、信息量、价格、复杂性、便携性及其应用进行多方面的比较。研究表明, 脉冲系统可以获得更多信息, 连续波系统简单便捷, 两者在应用上具有各自的特点, 同时又有很好的互补性。另外, 就脉冲太赫兹波成像的多波长特点, 探讨了太赫兹波多光谱成像识别方法。

关键词 光谱学; 脉冲; 连续波; 太赫兹; 成像

中图分类号 TN911.73 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.2853

Comparison Between Pulsed Terahertz Imaging and Continuous-Wave Terahertz Imaging

Yang Kun Zhao Guozhong Liang Chengsen Wu Lizhong

(Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract We investigate two important aspects of the terahertz imaging technology. They are the pulsed terahertz spectral imaging and the continuous wave terahertz imaging. Experimentally, we obtain terahertz images by these two imaging systems. We compared many aspects between the pulsed imaging system and the continuous wave imaging system, such as imaging mechanism, system resolution, system noise, imaging speed, information capacity, price, complexity, portability and their applications. Experimental results show that the pulsed imaging system has an obvious advantage that it can get more spectral information, on the other hand the continuous wave imaging system is simple and compact. The two systems have their own strong points, and are complementary to each other. In addition, we present an identification method based on the terahertz multi-spectral imaging technology.

Key words spectroscopy; pulse; continuous wave; terahertz; imaging

1 引 言

太赫兹 (THz) 波在物体成像、环境监测、医疗诊断、射电天文、宽带移动通信方面具有重大的科学价值和广阔的应用前景^[1], 很多在可见光和红外波段不透明的材料, 太赫兹波都可以穿透^[2,3]。太赫兹成像技术可分为相干成像和非相干成像。相干成像包括时域光谱成像、电光取样成像、层析成像等; 非相干成像主要是连续波成像^[4,5]。最早出现的是脉

冲太赫兹波成像, 在质量检测、法医鉴定、生物医学等领域有应用价值。2000 年, 第一套商用脉冲太赫兹波成像系统面世。2003 年, 伦敦大学太赫兹研究中心的谢旭等^[6,7]受美国航空航天局 (NASA) 的委托, 对用于航天飞机的绝缘泡沫材料可能存在的缺陷和损伤进行检测, 开发出太赫兹连续波成像系统, 它主要应用于环境监测、医疗诊断、无损探伤、安全检测等方面。

收稿日期: 2008-09-02; 收到修改稿日期: 2009-03-01

基金项目: 国家 973 计划 (2007CB310408)、国家自然科学基金 (10474067)、北京市自然科学基金 (1092007) 和北京市教育委员会高等教育人才强教计划资助课题。

作者简介: 杨 昆 (1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹成像技术方面的研究。E-mail: nukgnay@sohu.com

导师简介: 赵国忠 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要从事太赫兹光谱与成像方面的研究。

E-mail: guozhong-zhao@mail.cnu.edu.cn (通信联系人)

近几年,太赫兹成像技术引起科学工作者的极大关注,并由此展开了大量的相关研究,已经初步覆盖了广泛的应用领域^[8~16]。本文对脉冲太赫兹波成像和连续波太赫兹成像进行对比研究,给出了它们的成像机理、系统分辨率、系统噪声、成像速度、信息量、价格、复杂性、便携性及其应用多方面的比较。

2 脉冲太赫兹波成像

脉冲太赫兹波成像的基本原理是:透过成像样品(或从样品反射)的太赫兹电磁波的强度和相位包含了样品复介电函数的空间分布信息。将透射太赫兹电磁波的强度和相位的二维信息记录下来,并经过适当的处理和分析,就能得到样品的太赫兹图像^[17]。

2.1 实验系统

实验采用的是太赫兹透射型脉冲成像系统,其系统光路如图 1 所示。主要由飞秒激光器、太赫兹辐射产生装置、太赫兹辐射探测装置和时间延迟控制系统组成。此系统使用的飞秒激光器是由光谱物理公司生产的自锁模可调谐式钛蓝宝石激光器,其产生的飞秒激光脉冲中心波长为 800 nm,重复频率为 82 MHz,脉宽为 100 fs,输出功率为 1043 mW。太赫兹脉冲产生和探测的装置分别是<100>晶向的 InAs 晶体和<110>晶向的 ZnTe 晶体。钛蓝宝石产生的飞秒激光脉冲经分束棱镜(PBS)分为两束,一束作为产生太赫兹脉冲的抽运光,另一束作为探测太赫兹脉冲的探测光。抽运光经过频率为 1.1 kHz 的斩波器调制,通过时间延迟线(stage)入射到透镜 L1,经透镜聚焦以 45°入射角照射在<100>-InAs 晶体表面上,发生丹倍效应,即抽运光激发 InAs 晶体表面耗尽层载流子的跃迁,从而辐射出太赫兹脉冲。接着产生的太赫兹脉冲经两对表面镀金的离轴抛物面镜准直和聚焦,通过一个高阻硅片,聚焦在<110>-ZnTe 晶体上。另一束激光脉冲-探测光经过一系列

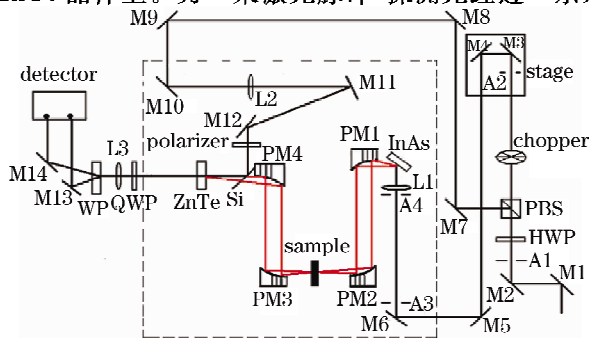


图 1 透射式太赫兹脉冲成像系统

Fig. 1 THz pulse imaging system of transmission

的反射镜、透镜 L2 和偏振片与太赫兹脉冲同时聚焦在<110>-ZnTe 晶体的同一位置,此时 ZnTe 晶体中发生电光效应,即太赫兹辐射电场调制 ZnTe 晶体的折射率椭球,导致通过电光晶体的探测光偏振态发生变化,从而反映出太赫兹辐射电场的大小及变化。偏振态被调制的探测光经过 $\lambda/4$ 波片(QWP)和透镜 L3 聚焦到渥拉斯顿棱镜(Wollastom prism, WP),探测光被其分为偏振方向互相垂直的两个分量,被差分探测器-光电二极管探测,得到的分量差分信号经锁相放大器解调后输入计算机得到最终的太赫兹脉冲时域信息。利用这个装置探测到的有效谱宽为 0.2~2.6 THz,频谱分辨率为 50 GHz,信噪比为 600。实验中把样品放置在能量较高的离轴抛物面镜 PM2 焦点处, M1~M14 是反射镜, A1~A4 是光阑, HWP 是半波片(half wave plate)。

2.2 成像过程及分析

太赫兹波被聚焦元件聚焦到样品的某一点上,收集元件将透过样品(或从样品反射)的太赫兹波收集后聚焦到太赫兹波探测元件上,太赫兹波探测元件将含有位置信息的太赫兹信号转化为相应的电信号。图像处理单元将此信号转换为图像^[18]。

太赫兹时域光谱成像技术与一般的强度成像不同,它包含很大的信息量。每一个成像点对应一个时域波形,可以从时域谱或者其傅里叶变换谱中选择任意某个数据点的振幅或相位进行成像,从而重构样品的空间密度分布、折射率和厚度分布。根据对时域或频域中不同物理量的选取,太赫兹波成像可以表达成各种形式,不同表达方式可以解释样品的不同特征,以便提供更多、更精确的样品信息。

时域模式都是在太赫兹波电场的时域波形中提取出反映样品信息的数据进行成像的。大体可以分为两类:1)振幅成像,主要反映了样品的厚度和吸收特性;2)相位成像,主要反映了样品厚度及其折射率信息。任一时域信息的变化,都是样品对频域中所有频率成分影响的综合反映,是一个平均的效果。这一特点决定了采用时域信息进行成像通常都有较好的成像效果,不同成像方法之间像质差别也比较小。

频域模式都是在太赫兹电场的频域波谱中提取出反映样品信息的数据进行成像的。针对频谱中某一特定频率所对应的振幅、功率、相位、吸收系数或折射率,反映的是样品在不同频率下光学性质所存在的差异,所得图像的对比度变化明显。由于太赫兹波的光谱宽度在 2.0 THz 以上,其高频分量具有

更短的波长,从而可获得更高的空间分辨率。同时,不同频率下的成像方法也提供了新的研究方向,即太赫兹波多光谱成像及其识别技术。

3 连续波太赫兹成像

连续波太赫兹成像的原理:连续波源提供比脉冲源更高的辐射强度,其实质是一种强度成像。在对物体成像时,根据物体内部的缺陷或损伤的边缘对太赫兹光的散射效应,从而会影响太赫兹波电磁场的强度分布,反映到物体的太赫兹波图像上显示为明暗即强度的不同,据此可推出物体内部的形状、缺陷或损伤位置。

3.1 实验系统

0.2 THz 的连续波成像实验装置利用耿氏^[19]二极管振荡器作为辐射源,无偏置肖特基二极管作为探测器,可采取透射或反射式成像方案。反射式成像具有较好的系统配置,如图 2 所示。系统主要包含 5 个部分:太赫兹单元、二维平移台、电路控制板、电源(内含变压器)和计算机,其中关键部分是太赫兹单元,包括连续波(CW)源、探测器和准直、聚焦光具组。

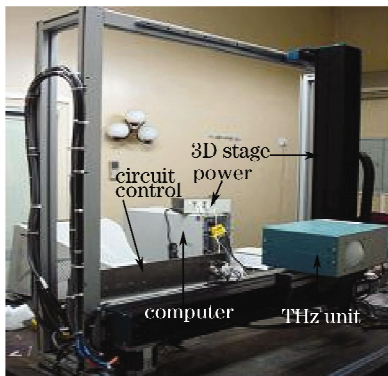


图 2 0.2 THz CW 成像系统

Fig. 2 0.2 THz CW imaging system

太赫兹单元的内部结构如图 3 所示,耿氏二极管产生频率为 0.1 THz 的电磁波,经倍频器倍频,输出频率为 0.2 THz。这两部分组成发射器,作为太赫兹成像系统的光源。喇叭天线耦合传输太赫兹波,使输出太赫兹波具有较好的方向性。被偏转镜反射的太赫兹波穿过分束镜,由聚焦透镜聚焦在样品表面。太赫兹波正入射到样品表面,经样品或金属底板反射后被聚焦透镜收集,再由分束镜反射到探测器上。被样品调制后,太赫兹波信号被低噪声的放大器放大后输出,由计算机采集后形成图像。在分束镜的背后放置消光镜,它的主要作用是

将反射的部分太赫兹波反射回到探测器上,以消除透镜反射的部分太赫兹波的影响。太赫兹单元通过 3 个接口即电源(PWR)、信号(SIG)和 5V 接口与外界部分进行连接。电源和 5V 接口是太赫兹单元的输入接口,分别提供控制耿氏二极管和放大器的电压。信号是探测器的输出接口,经电缆连接到计算机上。太赫兹单元的工作频率为 0.2 THz,输出功率为 10 mW,空间分辨率为 2.6 mm,动态范围为 34 dB,景深为 20 mm,焦距为 180 mm^[20]。

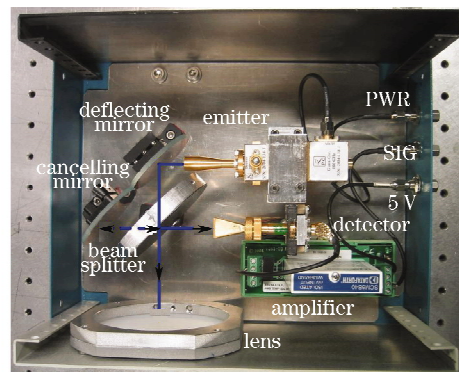


图 3 CW 系统太赫兹单元

Fig. 3 THz unit of CW system

3.2 成像过程及分析

在检测过程中,样品放在太赫兹单元的焦点处,且确保太赫兹波正入射到样品表面,太赫兹单元固定在 X-Y 二维平移台上,通过计算机控制平移台,实现太赫兹单元相对样品的移动。计算机采集样品表面或金属底板反射回的强度信息,实现对样品不同点的成像,获得样品的二维图像。太赫兹波在经过样品时被样品吸收或散射而引起强度的变化,探测各点强度然后通过计算机组合得到物体的灰度图像。系统平移台移动的最大线性速度可达到 600 mm/s,为了得到质量较好的图像,线性速度一般取 100 mm/s。平移台的移动范围、步长可由计算机的 Labview 扫描主程序来控制。

保存该系统扫描出的图像强度信息,用数字图像处理的办法对所得图像进行后期分析。

4 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较

分辨率是成像系统的一个重要参数,光学系统成像的分辨率与光的波长成反比,与光的频率成正比。所以理论上高频太赫兹波的成像分辨率要高。而连续波太赫兹源的硬件技术所限,很难做到高频率单频的连续波源,这也是太赫兹成像技术的瓶颈

之一。目前国内有 0.2 THz, 0.4 THz 耿氏二极管振荡器源和 0.59~0.71 THz 可调返波管源。就现状来看, 脉冲太赫兹波成像比连续波太赫兹成像在分辨率上有一定的优势。

对直径分别为 1.2 mm, 2.3 mm 和 3.6 mm 的铜制圆孔在脉冲系统下进行成像实验得到各自图像, 如图 4(a)~(c) 所示。用二维平移台对其进行逐点扫描, 扫描点数为 38 pixel×38 pixel, 实验外部

条件是湿度为 20.2%, 温度为 21.0 °C。扫描采集到 38 pixel×38 pixel 个 [X, Y] 矩阵, 它们每一个代表扫描的一个点的时域信息。然后用自己编写的 Labview 程序进行时域振幅成像。脉冲系统下 1.2 mm, 2.3 mm, 3.6 mm 圆孔的像都可以看到, 说明系统分辨率在 1.2 mm 以下, 脉冲系统的光斑很小, 通过狭缝法测量出其光斑大小为 1.0 mm^[21]。

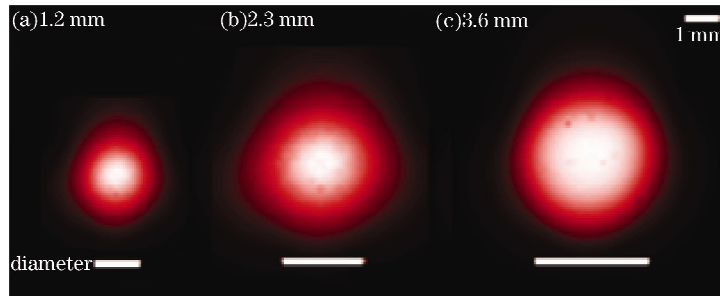


图 4 不同直径圆孔的时域振幅太赫兹成像图

Fig. 4 Time domain amplitude THz imaging of circular holes with the different diameter

在连续波系统下对圆孔阵列进行扫描成像, 如图 5 所示。小孔孔径从右向左依次递减(6.0 mm, 5.5 mm, 5.0 mm, 4.5 mm, 4.0 mm, 3.5 mm, 3.0 mm, 2.5 mm, 2.0 mm)。可以模糊地看到从右数第 8 排 2.5 mm 孔径的圆孔, 但是第 9 排 2.0 mm 孔径的圆孔难以看清, 所以连续波系统对于圆孔的辨别能力大约在 2.5 mm。

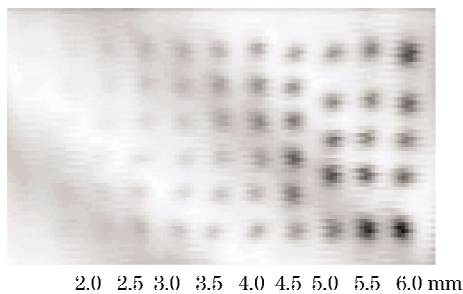


图 5 圆孔阵列的连续波太赫兹成像图

Fig. 5 CW THz imaging of circular holes array

为了测量连续波系统分辨率, 对一个铝制扇形模板成像, 相邻两个刀刃间提供了无数个宽度。图像中能够分开每个刀刃之间的最小距离就是其系统分辨率。通过成像实验, 如图 6 所示, 连续波系统的分辨率为 2.6 mm。与连续波成像相比在成像分辨率上脉冲成像占有明显的优势。

对于两个系统的噪声比较, 连续波系统得到的图像上有明显的条纹, 这是由于该系统多路反射在探测器相干叠加的结果及电动平移台的振动影响所

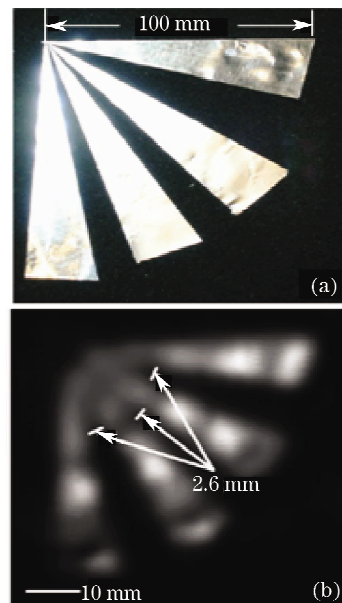


图 6 扇形模板(a)及扇形模板太赫兹图像与测量值(b)

Fig. 6 Fan template (a) and terahertz imaging and measured value of the fan template (b)

造成的。脉冲系统的噪声主要是斩波器的机械噪声和电子噪声, 与连续波系统的噪声相比很小。

在成像速度上连续波系统有明显的优势。扫描上面的脉冲图像时, 对于一组锁相积分时间设为 10 ms 的 38 pixel×38 pixel 点的数据, 所需时间大约为 13 h 以上, 用连续波系统扫描的面积要大几十倍的图像却只用了十几分钟。扫描速度上的优势为连续波对大面积的物体无损检测提供了可能。

由于截然不同的机制,两种系统得到的图像数据是完全不同的。在连续波系统中,只以矩阵形式储存强度信息,可以直接转变为图像。而脉冲系统的数据非常复杂,因此要求更先进的处理方法而使之被充分利用。下面用自己开发的 Labview 程序,先将 $38 \text{ pixel} \times 38 \text{ pixel}$ 个时域数据同时转化为频域数据,再对频域数据成像,即可以得到不同频率下物体的像。以孔径为 2.6 mm 的铜孔为例,如图 7 所示。从图中可以看到,选择频谱中不同频率成分的振幅值所成的图像的对比度存在较大的差异。在频率较低时,成像的对比度较差,这是由于空间衍射极限造成的,如第一排小于 0.5 THz 的 3 个像,高频部分由于相应的波长较短,因此应该能够获得更高的空间分辨率。而且不难看出在 0.96 THz 处像对比度最好,因为 1.0 THz 附近能量较大。这种方法也为识别不同成分的物体提供了一种新的多波长光谱成像方法。由于物体成分不同,它们在太赫兹波段的吸收峰的位置也不同,所以可以用不同频率的像区别几种成分的物体。脉冲系统信息量丰富可以做多光谱成像研究,而只有强度信息的连续波成像是无法做到的。

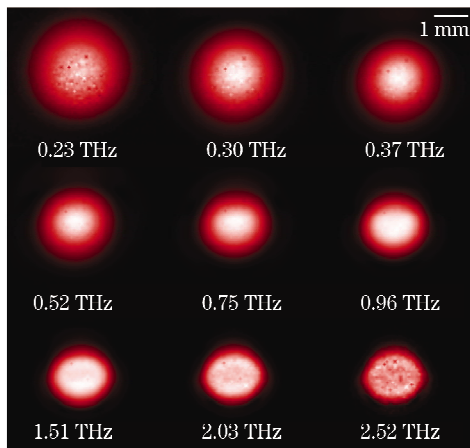


图 7 直径为 2.6 mm 的铜孔在不同频率下的振幅成像

Fig. 7 Amplitude imaging of 2.6 mm diameter hole copper at different frequency

以损失景深、时域和频域信息为代价,连续波系统是一个紧凑、简便、快速成像的系统。因为它不需要抽运探测成像,连续波系统的光路复杂性与脉冲系统相比大大降低,而且它不需要时间延迟扫描,因此扫描速度也非常快^[21]。

在航天泡沫材料(SOFI)等无损检测应用中,连续波技术提供了更为有效的结果,它可以很好地检测并辨别空缺和分层两种主要的缺陷,与脉冲系统相比,其结果有较高的分辨率。

对上面提到的两个成像系统的成像机理、系统分辨率、系统噪声、成像速度、信息量、价格、复杂性、便携性及其应用总结如表 1 所示。

表 1 两种成像系统的对比

Table 1 Comparison of two imaging system

	Pulse system	CW system
Theory and process	Record intensity and phase of THz wave	Edge scattering only record intensity
Resolution	High (under 1.1 mm)	Low ($2.6 \text{ mm}/0.2 \text{ THz}$)
Noise	Small	Big
Image speed	Slow	Fast
Information quantity	Big	Small
Application	Image identification, hidden objects detection	Nondestructive test, security inspection
Price	Expensive (about $\$150000$)	Cheap (about $\$50000$)
Complexity	Complicate	Simple
Portability/kg	100	2

5 结 论

脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像各有特点和优势,有很好的互补性,要视具体的应用来选择、构建最佳的成像方案。脉冲太赫兹时域测量系统能够提供成像物体的光谱信息,甚至折射率色散,这是连续波系统不能提供的信息。连续波系统具有较高的辐射功率,系统简单、价格低、成像速度快、使用方便的特点。如果扫描的物体比较大而又只需要检测缺陷或者透射性质,选择连续波系统较好。但如果探测的物体比较精细,要求系统有较高的分辨率并获得物体的光谱信息,则需使用脉冲成像方法。

参 考 文 献

- 1 C. Fattinger, D. Grischkowsky. Point source terahertz optics [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(16): 1480~1483
 - 2 Guozhong Zhao, Maarten ter Mors, Tom Wenckebach *et al.*. Terahertz dielectric properties of polystyrene foam [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(6): 1476~1479
 - 3 T. Hartwick, D. Hodges, D. Barker *et al.*. Far infrared imagery [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(8): 1919~1922
 - 4 B. Hu, X. Zhang, D. Auston *et al.*. Free-space radiation from electro-optic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(6): 506~508
 - 5 Q. Wu, X. Zhang. Free-space electro-optic sampling of terahertz beams [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(24): 3523~3525
 - 6 Xie Xu, Zhong Hua, Yuan Tao *et al.*. Terahertz imaging of defects in space shuttle foam insulation [J]. *Physics*, 2003, **32**(9): 583~584
- 谢 旭, 钟 华, 袁 韬等. 使用太赫兹技术研究航天飞机失事

- 的原因[J]. 物理, 2003, **32**(9): 583~584
- 7 N. Karpowicz, H. Zhong, J. Xu *et al.*. Non-destructive sub-THz CW imaging [C]. *SPIE*, 2005, **5727**: 132~142
- 8 Sun Jinhai, Zhao Guozhong, Zhang Liangliang *et al.*. Effect of applied electrical and magnetic field on THz radiation [J]. *Chinese J. Laser*, 2005, **32**(2): 192~195
孙金海, 赵国忠, 张亮亮等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响 [J]. 中国激光, 2005, **32**(2): 192~195
- 9 Shi Xiaoxi, Zhao Guozhong, Zhang Cunlin *et al.*. Terahertz radiation properties of low-temperature-grown GaAs photoconductive antenna [J]. *Chinese J. Laser*, 2008, **35**(3): 396~400
石小溪, 赵国忠, 张存林等. 低温生长砷化镓光电导天线产生太赫兹波的辐射特性 [J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 396~400
- 10 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong *et al.*. Terahertz Sensing and Imaging [M]. Beijing: National Defence industry Press, 2008. 70~95
张存林, 张岩, 赵国忠等. 太赫兹感测与成像 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. 70~95
- 11 R. Tamath, S. Mickan, D. Abbott. T-ray sensing applications; review of global developments [C]. *SPIE*, 2005, **5649**: 826~838
- 12 D. Crawley, L. Christopher, P. Vincent *et al.*. Three-dimensional terahertz pulse imaging of dental tissue [J]. *J. Biomedical Optics*, 2003, **8**(2): 303~307
- 13 C. Pan. An overview of THz research activities in Taiwan [C]. *SPIE*, 2005, **5727**: 74~81
- 14 M. Campbell, E. Heilwei. Noninvasive detection of weapons of mass destruction using terahertz radiation [C]. *SPIE*, 2003, **5070**: 38~43
- 15 H. Zhong, N. Karpowicz, J. Partridge *et al.*. Terahertz wave imaging for landmine detection [C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 33~44
- 16 M. Fitch, D. Schauki, C. Kelly *et al.*. THz imaging and spectroscopy for landmine detection [C]. *SPIE*, 2004, **5354**: 45~54
- 17 Zhang Lei, Xu Xinlong, Wang Li *et al.*. Review of the progress of THz imaging [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(2): 129~134
张蕾, 徐新龙, 汪力等. 太赫兹射线成像的进展概况 [J]. 量子电子学报, 2005, **22**(2): 129~134
- 18 Wang Shaohong, Xu Jingrun, Wang Li *et al.*. Applications and prospects of terahertz technology [J]. *Physics*, 2001, **30**(10): 612~615
王少宏, 许景润, 汪力等. THz技术的应用及展望 [J]. 物理, 2001, **30**(10): 612~615
- 19 J. Gunn. The gunn effect, microwave oscillation of current in III-V semiconductors [J]. *Solid State Communication*, 1963, **1**: 88~91
- 20 Zhou Yan, Mu Kaijun, Zhang Yandong *et al.*. Non-destructive testing of fuel tank foam with continuous wave terahertz [J]. *Non-Destructive Testing*, 2007, **29**(5): 267~271
周燕, 牧凯军, 张艳东等. 燃料箱泡沫板的连续太赫兹波无损检测 [J]. 无损检测, 2007, **29**(5): 267~271
- 21 Sun Hongqi, Zhao Guozhong, Tian Yan *et al.*. Transverse mode distribution of THz wave by THz imaging technology [J]. *Chinese J. Laser*, 2006, **33**(9): 1225~1229
孙红起, 赵国忠, 田艳等. 太赫兹波传播过程中横模分布的成像 [J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1225~1229
- 22 K. Siebert, T. Löffler, H. Quast *et al.*. All-optoelectronic continuous wave THz imaging for biomedical applications [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2002, **47**(21): 3743~3748