

# 太赫兹成像系统分析及其相关技术研究

王华泽<sup>1</sup>, 吴晗平<sup>1,2</sup>, 吕照顺<sup>1,2</sup>, 梁宝雯<sup>1</sup>

(1.武汉工程大学光电子系统技术研究所, 湖北 武汉 430205; 2.海军工程大学兵器工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 随着 THz 成像技术的日益发展, 针对设计清晰、实时、高灵敏度、小型化及低成本 THz 成像系统还比较困难的问题, 从设计 THz 成像系统的角度出发, 就其在成像方面的特点、工作原理、组成及关键技术(包括 THz 光学系统、探测器及信号处理)进行了研究, 着重研究了目前 THz 成像系统的新进展。并分析比较了电磁波段中 $\gamma$ 、X、紫外、可见光、微光、红外、THz 及毫米波各成像系统的优缺点及应用。在 THz 成像系统的典型应用基础上提出了 THz 成像系统未来发展方向。

**关键词:** THz 成像; 总体分析; 关键技术; 成像技术; 比较研究

**中图分类号:** TN224      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2013)07-0391-07

## Research on THz Imaging System and Related Technologies

WANG Hua-ze<sup>1</sup>, WU Han-ping<sup>1,2</sup>, LV Zhao-shun<sup>1,2</sup>, LIANG Bao-wen<sup>1</sup>

(1. Institute of Optoelectronic System Technology, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** With the increasing development of THz imaging technology, this article, aiming at the problem which is more difficult to design a clear, real time, high sensitivity, miniaturization and low-cost THz imaging system, from the view of designing of THz imaging system, studies imaging characteristics, operating principle, composition and key technologies (including THz optical system, detector and weak signal processing) and focuses on the current progress of THz imaging system. And the advantages, disadvantages and application of the imaging systems, which include  $\gamma$ , X, ultraviolet, visible, low-light-level, infrared, THz and millimeter wave in the electromagnetic spectrum, are compared and analyzed. Based on typical applications, the future development direction of THz imaging system is proposed. This work plays a significant role in the study and design of THz imaging.

**Key words:** THz imaging, general analysis, key technology, imaging techniques, comparative study

## 0 引言

太赫兹 (THz) 波处于红外和毫米波之间, 具备独特的辐射特性。其成像技术被作为一种新型的成像方式正随着材料科学、反隐身、高技术武器攻防、信息对抗、自动导航、目标搜索及跟踪等技术的快速发展而日益被重视<sup>[1]</sup>, 目前已成为世界研究的热点。随着该技术的不断改进提升, 我国已实现了 3~5 帧/s 的速度对人体进行 1 m×2 m 大尺寸、分辨率达到 2 cm 的被动成像样机<sup>[2]</sup>。

如今恐怖袭击及地震灾害等重大事件频频发生, 若利用 THz 成像的独特性, 将其与物联网技术有力结合<sup>[3]</sup>, 有望给反恐和灾区人员搜救等工作带来极大帮

助。另外, 该成像技术被广泛应用于: 反恐(炸弹、地雷及毒气侦查, 目标识别及跟踪等)、医学成像(疾病诊断, 肌肤损伤高精度探测等)、安全检查(隐蔽武器及生化物的检查等)、环境监测、全天候导航等诸多方面, 尤其在医疗、安检及军事领域具有重大的研究价值和广阔的应用前景<sup>[4]</sup>。因此, 对 THz 成像的独特性、关键技术、现状、应用及其成像技术的比较研究显得尤为重要。

## 1 THz 成像技术的特点、工作原理及组成

### 1.1 THz 成像技术特点

1) THz 光子能量只有几毫伏, 不会对物质产生破坏作用, 适合用于对生物组织进行活体成像检查, 并

收稿日期: 2013-04-26; 修订日期: 2013-05-21.

作者简介: 王华泽 (1987-), 男, 山西霍州人, 硕士研究生, 目前研究方向为红外与 THz 技术。E-mail: tobywanghua@163.com.

通讯作者: 吴晗平 (1964-), 男, 湖南澧县人, 工学博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向为光电子系统总体技术及设计。E-mail: wuhanping601@sohu.com.

具有对黑体辐射或热背景不敏感的优点。

2) THz 脉冲源只包含若干个周期的电磁振荡, 偶极子的转动、振动跃迁及一些晶体材料的声子振动能级都落在该范围<sup>[5]</sup>。对研究药物化学元素组成、指纹识别、检测电子元器件及鉴定炸药属性等具有特殊意义<sup>[6]</sup>。

3) 与其它光源相比, THz 辐射可测量出材料的空间密度及折射率空间分布, 获得材料更多信息。结合断层扫描技术, 可获得样品的三维信息<sup>[7]</sup>。

4) THz 脉冲的带宽很宽并具有相干性, 可在亚皮秒分辨率的基础上直接测量电磁场, 这对研究散射机理提供一种有价值的新方法, 利用此特性可进行军事目标识别及生物成像等<sup>[8]</sup>。

5) THz 成像可探测比可见和中长波红外更远的信息。极大信号带宽和极窄天线波束因 THz 频率很高而易于实现。在 THz 雷达成像中, 信号带宽决定距离差, 其纵向分辨率有:  $\Delta=c/2B$ , 其中  $c$  为光速,  $B$  为信号带宽。因此, 通过测量脉冲相干 THz 信号时域波谱, 可获得更小目标的精确定位, 且保密性更强<sup>[9]</sup>。

### 1.2 THz 成像工作原理

利用 THz 源所产生的已知 THz 波作为成像射线, 经目标透射或反射后记录了其谱信息 (包括复介电常数强度、振幅及相位的空间分布信息) 的 THz 波, 或目标自身辐射已载有目标信息的 THz 波<sup>[4]</sup>, 经过 THz 光学系统后, 通过斩波器调制, 再聚焦至 THz 探测器引发其特性变化, 根据不同的变化转换为相应电信号响应, 随后经适当的信号分析处理, 最终得到目标的二维或三维图像<sup>[10]</sup>。

### 1.3 THz 成像系统组成

THz 成像系统大致包括光源、THz 光学系统 (包括频带选通、准直及聚焦)、THz 探测器、数据获取

系统 (包括前置放大电路、滤波电路及数字信号处理器等)、显示器。其组成框图如图 1 所示。系统的整个成像过程若采取扫描的方式, 则当扫描完成后也就呈现出整个目标图像。目前, 随着焦平面成像技术的发展, 光导天线形成探测阵列已被应用到 THz 成像系统中来提高系统吸收效率及灵敏度<sup>[11]</sup>。

## 2 THz 成像关键技术

### 2.1 THz 光学系统

THz 光学系统应根据应用场合来设计。目前由光学系统结构形式主要分为折射、折反及反射式光学系统。THz 光学系统设计应满足如下要求: ①小尺寸, 便于整机安装调试; ②尽可能大的相对孔径; ③满足要求的视场角; ④在所选波段内有最小辐射能损失; ⑤适应不同环境, 并具有可靠稳定的光学性能等<sup>[12]</sup>。

折射 (透射) 式 THz 光学系统具有较大视场、低 F 数、加工装调工艺成熟、可消除各种像差、结构轻巧紧凑、透射性好及性能稳定等特点。但此设计受材料特性限制, 光能损失较大, 难以实现大口径、长焦距设计, 在提高相对孔径、压缩结构长度等方面有较大困难<sup>[13]</sup>。

在二维成像光学系统中, 一般应用光电晶体进行探测, 光学系统物距总是远远大于透镜焦距。其成像分辨率为:

$$\Delta=1.22\lambda D_f f / (D_s D)$$

式中:  $\lambda$  是成像载波波长;  $D_t$  是物体尺寸;  $f$  是透镜焦距;  $D_s$  是探测晶体尺寸;  $D$  为透镜直径。由此, 一旦探测晶体尺寸、透镜直径及探测波长确定, 则可设计如图 2 所示的谐衍/折射变焦光学系统来得到一定分辨率的图像<sup>[14]</sup>。

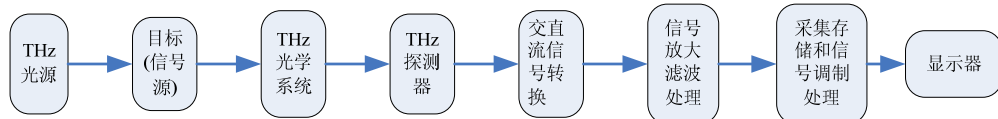


图 1 THz 成像系统组成框图

Fig.1 System composition block diagram of THz imaging system

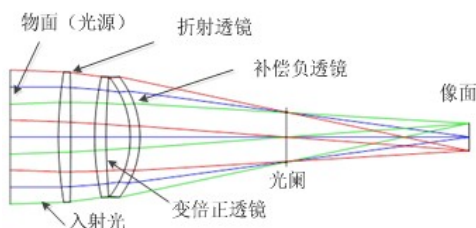


图 2 谐衍/折射变焦光学系统简图

Fig.2 Harmonic diffraction/refraction zoom optical system diagram

反射式 THz 光学系统具有易获得大口径反射材料, 无色差且能较好地校正球差和彗差, 光能损失小, 工作波段宽, 系统总长度短等优点; 但其 F 数较大, 中心挡光, 光机结构复杂性增大, 加工装调困难, 杂散光不易控制, 制作成本高, 难于满足大视场大口径成像要求。图 3 所示, (a) 为离轴三反, (b) 为共轴三反光学系统简图。

目前利用 ZEMAX 光学成像设计软件, 通过编写



于 THz 频段的石英电路<sup>[2]</sup>。该器件作为 THz 倍频器核心元件, 实现了倍频器在 THz 频段的工作, 在 170~220 GHz 的倍频效率为 3.6%, 220~325 GHz 的倍频效率达到 1.0%, 可实现宽频带倍频。在 THz 成像、通信和卫星遥感方面有着广阔的应用前景<sup>[16]</sup>。表 2 为连续信号探测器中某些器件的基本性能参数对比, 其中 SBD 为肖特基二极管、SIS 为超导体—绝缘体—超导体结混频探测器、HEB 为电子辐射热量计混合器<sup>[17-18]</sup>。

### 2.3 信号处理

THz 成像系统中, 信号处理决定着检测的灵敏度、噪声系数、抗干扰能力等关键指标, 关系到最终成像质量。根据多级级联放大器总噪声系数公式:

$$F = F_1 + \frac{F_2 - 1}{K_1} + \frac{F_3 - 1}{K_1 K_2} + \dots + \frac{F_M - 1}{K_1 K_2 \dots K_{M-1}}$$

式中:  $F$  为各级放大器噪声系数;  $K$  为功率增益, 下标代表放大器级数。可知高性能前置放大器设计尤为关键。

前置放大电路的设计要求: ①高增益及低噪声, 以保证足够大的信噪比; ②足够的带宽, 以免产生波形失真; ③输出阻抗低; ④负载能力强; ⑤强的抗干扰能力。以下将恒压或恒流信号源热噪声(源电阻)来等效探测器和偏置电路的总噪声, 综合考虑放大电路类型、器件选择及放大方式来设计前置放大电路, 表 3 为设计前置放大电路最佳组合方式<sup>[19]</sup>。

通常可以利用电子电路仿真设计软件 Multisim 对放大电路基本特性如输出增益、输出脉冲上升时间、噪声、输入输出阻抗和带宽等进行仿真测试。这种理论测试分析对实际前置放大器的设计有很大帮助与参考价值<sup>[20]</sup>。

## 3 各种成像技术比较及相关进展

### 3.1 成像技术的比较

按电磁波段划分成像系统类型, 比较分析其优缺点及主要应用<sup>[5,16,20-33]</sup>如表 4 所示。其中, 各成像系统共同的主要性能参数有: 系统信噪比、传递函数、

表 1 超脉冲信号探测器比较

Table 1 Comparison of pulse signal detector

探测器	工作温度	工作频段/THz	带宽/THz	噪声等效功率/ $W \cdot Hz^{-1/2}$	响应速度	相干性
光电导天线	室温	0.1~20	约为 2	$10^{-15}$	~100 fs	
电光晶体	室温	0.1~100	约为 10	$10^{-15}$	~10 fs	相干
空气探测	室温	0.1~100	约为 8	-	~ps	

表 2 连续信号探测器比较

Table 2 Comparison of continuous signal detector

探测方式	探测器	工作温度	本振功率	工作频率范围/(THz)	噪声等效功率/ $(W \cdot Hz^{-1/2})$	响应速度
	SBD	低/室温	0.5 mW, 3~5 mW	0.5~3.37	$10^{-19}$	~ps
外差式探测器	SIS	2~4 K	1~10 $\mu$ W	0.1~2	$10^{-21} \sim 10^{-20}$	~(ps~ns)
	HEB	2~4 K	1~250 nW	1~5	$10^{-21}$	ps~ns
测辐射热计		低温	约 10 nW		$10^{-12}$	几十 ps
		低/室温	-	全波段	$10^{-15} \sim 10^{-12}$	~ms
直接式探测器	Golay	室温	-	全波段	$10^{-15} \sim 10^{-12}$	~100 ms
	热释电	室温	-	全波段	约 $10^{-9}$	~100 ms
	单光子	约 50 mK	-	1.4~1.7	约 $10^{-22}$	~1 ms

表 3 设计前置放大器最佳组合方式

Table 3 Best combination of preamplifier

源等效阻抗	放大器件	放大类型	放大方式	优点
10 $\Omega$ ~1 M $\Omega$	晶体管	低阻型	电荷放大	工作稳定可靠
1 K $\Omega$ ~1 G $\Omega$	JFET	高阻型	电流放大	负载能力强, 耦合电容小, 采用热电探测器时可用此方法
>1 M $\Omega$	VMOS 场效应管	高阻型	电流放大	
1 K $\Omega$ ~1 M $\Omega$	运算放大器	跨阻型	电压放大	信噪比及灵敏度高、频带较宽、直流精度很高

表4 各种成像技术比较

Table 4 Comparison of imaging technologies

成像方式	波长/ $\mu\text{m}$	应用类型	主要性能指标	成像系统优点	成像系统缺点	主要应用
$\gamma$ 成像	$<10^{-4}$	$\gamma$ 相机; $\gamma$ 望远镜; $\gamma$ 全息成像	位置、能量及空间分辨率; 探测效率; 系统灵敏度; 背景触发率; 几何面积; 噪声阈值	1) 具有一定的穿透力; 2) 对放射性物质成像距离远、灵敏度高 3) 可达到观测小脏器的分辨率; 4) 使用方便等	1) 边界产生压缩效应; 2) 光学系统材料较少; 3) 低能量下灵敏度不够高; 4) 辐射会造成人体伤害等	1) 疾病诊断; 2) 原子、离子等结构研究; 3) 天文研究; 4) 核污染区分布及程度的判定; 5) 军控核查及反恐等
X 成像	$10^{-5}\sim 0.01$	X 线透射机; X 线摄影机; X 线照相	辐射剂量; 空间分辨率; 噪声率; 图像的灰度级; 穿透力; 图像评估	1) 信息量大; 2) 背景杂波低; 3) 穿透能力强; 4) 影像清晰; 5) 拍摄条件宽容范围大; 6) 动态特性高等	1) 图像时间分辨率低; 2) 对被测人体有辐射损害; 3) 空间分辨率受限; 4) 成本高等	1) 疾病诊断; 2) 材料的无损检测及焊接; 3) 安检; 4) 对生物内部运动情况研究等
紫外成像	$0.1\sim 0.4$	紫外照相; 紫外显微镜; 紫外望远镜; 紫外摄影	最小紫外光灵敏度; 可见光影像放大度; 聚焦距离; 帧速; 光谱分辨率	1) 灵敏度高; 2) 抗干扰能力强; 3) 对环境要求低; 4) 操作简单; 5) 检测方法安全可靠且效率高等	1) 穿透能力弱; 2) 紫外线辐射可直接造成某些检测物损伤; 3) 光学材料稀少且制备困难等	1) 对敌对目标的跟踪及精确打击; 2) 电力放电检测; 3) 岩石分布探测; 4) 火焰燃烧控制; 5) 现场侦查取证; 6) 零件探伤; 7) 天文学研究等
可见光成像	$0.4\sim 0.76$	显微成像; 照相机; 望远镜; 电视摄像机	可视距离; 灵敏度; 帧频; 分辨率; 带宽; 最小可分辨对比度	1) 操作极其简单; 2) 图像的细节(光谱信息)丰富; 3) 动态范围大; 4) 结果准确、直观、灵敏度高; 5) 安全可靠等	1) 由环境引起低能见度下, 成像效果受到极大限制; 2) 光照过强, 图像对比度会下降等	1) 生物组成及病变的研究; 2) 天象及天体研究; 3) 公共场所监视; 4) 环境监测; 5) 卫星侦查等
微光成像	$0.5\sim 0.9$	微光直视; 微光电视; CCD 微光摄像机	光谱响应范围; 灵敏度; 最大作用距离; 亮度增益; 分辨力; 出瞳直径及距离; 灰度等级	1) 极其微弱照度下可清晰成像, 像调制度高; 2) 自身隐蔽性好; 3) 性价比高; 4) 动态范围大; 5) 体积小、重量轻; 6) 操作方便等	1) 图像层次不够分明; 2) 强光出现时, 图像模糊; 3) 浓云和烟雾影响观察效果; 4) 电子倍增装置需冷却, 其帧频有所限制等	1) 夜间监视、警戒、指挥、制导; 2) 微光夜视眼镜、夜视头盔、夜瞄具及微光电视跟踪制导仪的辅助配件; 3) 侦查摄影及水下作业等
红外成像	$0.76\sim 10^3$	红外显微镜; 红外热成像; 红外凝视成像	光谱频带; 热灵敏度; 空间分辨力; 工作温度; 噪声等效温差 NETD; 最小可分辨/探测温差; 帧频/行频	1) 抗干扰能力强; 2) 可夜间工作; 3) 视距远且识别伪装能力强; 4) 无损害、自动化程度高、有一定的伪装能力; 5) 对地扫描可快速、高效获取地面目标图像等	1) 对冷目标成像质量较差; 2) 穿透力弱; 3) 对环境适用性不够; 4) 空间分辨率低, 图像层次感不强; 5) 制造复杂; 6) 成本较高等	1) 深层组织成像; 2) 产品的检测、识别和定量分析; 3) 加工参数监控; 4) 进行战略预警、战术报警、侦查、瞄准、导航、制导、气象、搜救、森林防火等
THz 成像	$30\sim 3\times 10^3$	THz 显微镜; THz 时域光谱成像; THz 连续波成像	频谱范围; 探测距离; 功耗; 空间分辨率; 工作温度; 像素; 采集速率; 响应度	1) 抗干扰能力强; 2) 反隐身能力强; 3) 穿透深度大; 4) 成像速度快、对比度和均匀性好; 5) 对物质敏感度高, 安全可靠 6) 可全天候工作等	1) 成像质量不够高; 2) 光谱不够宽; 3) 欠缺高效、实用的辐射源; 4) 探测器材料及工艺水平欠缺等	1) 安检; 2) 反恐; 3) 疾病诊断; 4) 金属、地雷及隐身武器的探测; 5) 材料无损探伤; 6) 瓦斯含量预测; 7) 环境监控等
毫米波	$10^3\sim 10^4$	主动成像(合成孔径毫米波雷达成像、三维全息成像); 被动成像系统	工作频率; 信号带宽; 信号极化方式; 焦距; 角分辨率; 物镜口径; 噪声等效温差; 帧频; 系统灵敏度;	1) 成像层次感强; 2) 可对远距离小目标成像; 3) 具有一定的烟尘穿透力; 4) 受环境影响小; 5) 隐蔽性与抗干扰能力强; 6) 指向性好等	1) 有绕射现象; 2) 成像帧速率和系统的温度灵敏度相制约; 3) 存在空变问题; 4) 分辨率及实时性还不够高; 5) 体积大等	1) 医疗检查; 2) 本战斗机群的信息获取; 3) 引导飞机着陆; 4) 目标识别与跟踪; 5) 隐匿物检测; 6) 军事地形测绘; 7) 武器制导等

视场及动态范围。

### 3.2 成像技术的相关进展

目前,核应急使用的 $\gamma$ 相机是由可见光相机、探测器、激光测距仪、数据采集和图像合成软件组成的系统;我国已研制出基于碳纳米 X 射线发射源的 CT 系统,具有可控发射、时间分辨率高、低功耗且易于集成等诸多优势。红外成像系统目前向着高分辨率、大视场、高清化及数字化发展,并且综合微光/可见光和红外 2 种光图像融合成像技术正逐步发展,使其成像信息更加丰富,分辨率更高及可视性更佳。

## 4 THz 成像系统的典型应用

目前,THz 成像的主要应用领域有:1) 物理化学研究,如:①对分子团簇等气相物质的光谱及动力学性能研究;②蛋白质二、三级结构细节清晰显示;③对分子构型动力学相干控制等。2) 生物学研究,如:①药材成分鉴别;②对 DNA 及蛋白质研究。3) 国土安全,如:对爆炸物、违禁品及武器等危险物品的远程监测等。4) 遥感,如:①对航天器着陆进行全天候成像;②对恐怖袭击进行预警;③气象分析等。5) 雷达,如对目标的测距、跟踪等。以下着重研究分析 THz 成像系统在医疗、安检及军事领域的应用<sup>[5,10,34-36]</sup>。

### 4.1 在医疗方面的应用

THz 成像系统在医疗方面的主要应用有:1) 癌症诊断,THz 医疗成像主要进行皮肤膜疾病的诊断,特别是应用于区别近皮肤表面的良性与恶性损伤。2) 损伤探测,对于外科手术前预估入侵瘤的大小和深度、精确测定边缘处组织、精确皮肤烧伤深度及龋齿检测等方面具有独特的作用。3) 制药研究,主要用于对毒品、假冒药品及药物污染程度的鉴定;药物保质期的确定等。

### 4.2 在安检方面的应用

THz 成像系统在安检方面的主要应用有:1) 对地雷或简易爆炸物的探测及对航天器进行无损探伤。2) 在公共场所、警戒区及安检站可检测出隐藏在衣服下的武器、装饰品、塑料炸弹等危险物。3) 对煤矿中瓦斯含量进行探测分析及可对稀有矿物质进行搜寻。4) 将该技术与物联网技术有力结合<sup>[3]</sup>,可用于火灾、地震、塌方等灾害现场的人员的快速搜救。5) 随着片上集成 THz 系统的发展,利用 THz 透射性等独特优点将其人体成像,经组网后,对失踪者进行可视化跟踪或搜寻,用以解决人员失踪问题。这是物联网发展的又一崭新局面。

### 4.3 在军事方面的应用

THz 成像系统在军事方面的主要应用有:1) THz 单脉冲雷达可在标准大气环境及全天候条件下识别出距海平面 1 km 远的隐蔽目标,在路、海、空、天,电磁五维战场中,均可对其目标物进行对象识别。2) 在单兵作战中通过无线组网实时监控周边灰尘或烟雾环境及在此恶劣环境下进行远距离的敌情勘查并指挥作战。3) 用于坦克及装甲车对敌军目标精确识别、跟踪及告警等指挥控制。4) 在作战期间,用以感测地雷、炸弹、毒气及生物战剂,并提醒战斗人员做进一步处理。5) 在近距离反恐中,可透过障碍物观察恐怖分子内部人员的分布及携带武器情况。6) 可对敌方隐形战斗机进行实时监测或精确打击。7) 用于对军事装备进行质量检查。8) 在空间军事侦查中,可建立空间在轨目标的准确编目并识别卫星的载荷。9) 在导弹防御方面,用于紧密跟踪战略或战术导弹的尾焰,并快速做出应敌策略,提高导弹的预警能力。特别地,在终端制导、侦查预警空天飞机与超音速飞行器等方面将应用广泛。

### 4.4 系统发展现状

一个国际小组研制成功的 THz 摄像机能在 10~20 m 外将隐藏物呈现出来。我国成功研制的超宽带 THz 探测成像仪,可透视墙壁。目前,利用 THz 成像技术对地沟油进行直观检测及分析已被实现。另外,随着 THz 技术的发展,制造高能量 THz 射线将有望“剿灭”癌症。

## 5 结语

成像系统中,THz 成像技术已经成为 $\gamma$ 射线、X 射线、紫外、可见光、微光、红外及毫米波等成像技术的有力补充,在医学、安检及军事等方面发挥着其独特作用并具有广阔应用前景。随着国内外 THz 探测器材料、数字读出电路、太赫兹焦平面<sup>[37]</sup>、反褶积信号处理、压缩图像处理及片上集成 THz 系统等技术的迅速发展,实现清晰、实时、高灵敏度、高度紧凑及低成本的 THz 成像系统将是未来的发展方向<sup>[38]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 汤庆乐. THz 成像探测技术[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(6): 61-64.
- [2] 国内首台太赫兹安检仪产品样机研制成功[EB/OL]. 2012-12-5. <http://www.instrument.com.cn/news/subject/201003/?SubjectID=161>.
- [3] 王华泽, 吴晗平, 吴晶, 等. 基于 MC9S12XS128 的光电无线传感网络构建及其控制器技术设计[J]. 光电技术应用, 2012, 27(6): 16-21.

- [4] Robert Bogue. Terahertz imaging: a report on progress[J]. *Sensor Review*, 2009, **29**(1): 6-12.
- [5] Charron M Danielle, Ajito Katsuhiko, Kim Jae-Young, et al. Chemical mapping of pharmaceutical cocrystals using terahertz spectroscopic imaging[J]. *Analytical Chemistry*, 2013, **85**: 1980-1984.
- [6] Hooper J, Mitchell E, Konek C, et al. Terahertz optical properties of the high explosive  $\beta$ -HMX[J]. *Chemical Physics Letters*, 2009, **467**: 309-312.
- [7] 袁宏阳. 连续太赫兹波成像系统的应用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [8] 张存林. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [9] 胡伟东, 张萌, 穆晨晨, 等. 220 GHz 脉冲成像系统设计与应用研究[J]. *现代科学仪器*, 2012(6): 20-22.
- [10] Cunningham J, Byrne M B, Wood C D, et al. On-chip terahertz systems for spectroscopy and imaging[J]. *Electronics Letters*, 2010, **46**(26): s34-s37.
- [11] Ma Yong, Lu Zheng, Chen Qin, et al. Recent advances of terahertz imaging technologies[J]. *Recent Patents on Signal Processing*, 2012, **2**(1): 4-11.
- [12] 吴晗平. 光电系统设计基础[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] 李梅. 15~38  $\mu\text{m}$  太赫兹波成像光学系统设计研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- [14] Duncan W D, Schwall R E, Irwin K D, et al. An optical system for body imaging from a distance using near-terahertz frequencies[J]. *J. Low Temp. Phys.*, 2008, **151**: 777-783.
- [15] 王兵兵, 侯丽伟, 谢巍, 等. 太赫兹成像准光学系统设计[C]//第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2013: 516-523.
- [16] Thomas Kleine-Ostmann, Tadao Nagatsuma. A review on terahertz communications research[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, **32**(2): 143-171.
- [17] 宋淑芳. 太赫兹波探测技术的研究进展[J]. *激光与红外*, 2012, **42**(12): 1367-1371.
- [18] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [19] 王海涛. 高性能厚膜前置中频放大器的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [20] 陈向宁. 军用光学遥感[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [21] Greiner J, Mannheim K, Aharonian F, et al. GRIPS-Gamma-Ray imaging, polarimetry and Spectroscopy[J]. *Experimental Astronomy*, 2012, **34**(2): 551-582.
- [22] CHARAGI S K, KOUL M K, SAPRU M L, et al. Tactic imaging  $\gamma$ -Ray telescope: a simulation study of the effect of switched-off pixels on its quality factor[J]. *Experimental Astronomy*, 2001, **11**: 71-79.
- [23] 王奇志, 郑万平, 沙京田, 等. X 射线管特性与成像系统技术指标分析[J]. *警察技术*, 2013(1): 57-59.
- [24] 于磊, 林冠杰, 于向阳. 空间高层大气遥感远紫外成像光谱仪的光学系统[J]. *光学学报*, 2013, **33**(1): 0122001.
- [25] 崔吴杨, 陈琳, 汤乃云, 等. 紫外成像技术在电力设备局部放电探测中的应用[J]. *上海电力学院学报*, 2012, **28**(1): 93-96.
- [26] Aaron Mac Raighne, Colin Brownlee, Ulrike Gebert. Imaging visible light with Medipix2[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**: 113103.
- [27] 叶玉堂, 刘爽. 红外与微光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [28] Aswathy R G, Yoshida Y, Maekawa T, et al. Near-infrared quantum dots for deep tissue imaging[J]. *Anal Bioanal Chem.*, 2010, **397**: 1417-1435.
- [29] 郭晖, 向世明, 田民强. 微光夜视技术发展动态述评[J]. *红外技术*, 2013, **35**(2): 63-68.
- [30] 邱民朴. 大视场红外扫描成像光学系统设计[J]. *红外技术*, 2012, **34**(11): 648-651.
- [31] Yu A Pirogov. Passive millimeter-wave imaging[J]. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2003, **46**(8): 594-603.
- [32] 邓玥琳. 基于空变模型的无源毫米波成像技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [33] Jesse P Samluk, Christopher A Schuetz, Thomas Dillon, et al. Q-band millimeter wave imaging in the far-field enabled by optical upconversion methodology[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, **33**(1): 54-66.
- [34] Wai Lam Chan, Kriti Charan, Dharmpal Takhar, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 121105.
- [35] Woodward R M, Wallace V P, Arnone D D, et al. Terahertz pulsed imaging of skin cancer in the time and frequency domain[J]. *Journal of Biological Physics*, 2003, **29**: 257-261.
- [36] 闵碧波, 印欣, 马俊海. 太赫兹及其在军事和航天领域里的应用[C]//第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2013: 460-463.
- [37] Jonathan D Chisum, Erich N Grossman, Zoya Popovic. A general approach to low noise readout of terahertz imaging arrays[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, **82**: 065106.
- [38] ZHANG Man, PAN Rui, XIONG Wei, et al. A compressed terahertz imaging method[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2012, **29**(10): 104208.