

基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展

谭智勇, 万文坚, 黎 华, 曹俊诚*

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 中国科学院太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050)

摘要: 太赫兹 (THz) 实时成像是 THz 技术中颇具潜力的一个领域, 具有成像速度快、成像分辨率高等特点, 基于 THz 量子级联激光器 (QCL) 的实时成像是其中最重要的一种, 系统体积小、重量轻、成像信噪比高等特点使其在实际应用中具有独特的优势。本文主要介绍了 THz QCL 器件及其实时成像系统的研究进展, 采用超半球高阻硅透镜改善了 THz QCL 的输出激光, 实现了准高斯光束输出, 搭建了基于二维摆镜消干涉技术的 THz 实时成像系统, 单帧成像光斑面积 $45\text{ mm} \times 30\text{ mm}$, 实现了对刀片、药片的实时成像演示, 成像分辨率优于 0.5 mm ; 最后对成像系统激光源、成像光路和探测端的改进以及成像效果的改善方面进行了综述, 并探讨了 THz 实时成像系统未来的发展趋势及其在材料分析和生物医学成像方面的应用前景。

关键词: 太赫兹; 实时成像; 量子级联激光器; 焦平面阵列

中图分类号: O434.3; O432.1+2; O436.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/CO.20171001.0068

Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers

TAN Zhi-yong, WAN Wen-jian, LI Hua, CAO Jun-cheng*

(Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

* Corresponding author, E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

Abstract: Terahertz (THz) real-time imaging is a promising field in most of THz technologies. It has lots of features such as fast imaging, high-resolution imaging, etc. The imaging system based on THz quantum-cascade laser (QCL) is one of the most important THz imaging technologies. This type of imaging system has a unique advantage in applications with the features of small size, light weight, and high SNR. In this paper, the research progress of THz QCL and the related real-time imaging system are mainly presented. A hyper-hemi-

收稿日期: 2016-09-19; **修订日期:** 2016-10-12

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 资助项目 (No. 2014CB339803); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61131006, No. 61321492, No. 61575214, No. 61405233); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2011YQ150021); 中国科学院“百人计划”; 中科院创新团队国际合作伙伴计划: “高迁移率材料工程”创新团队项目以及上海市科学技术委员会 (No. 14530711300, No. 15DZ0500103)

Supported by National Program on Key Basic Research Projects of China (No. 2014CB339803); National Natural Science Foundation of China (No. 61131006, No. 61321492, No. 61575214, No. 61405233); Major National Development Project of Scientific Instrument and Equipment (No. 2011YQ150021); Hundred Talent Program of the China Academy Sciences; International Collaboration and Innovation Program on High Mobility Materials Engineering of the Chinese Academy of Sciences, and the Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (No. 14530711300, No. 15DZ0500103)

spherical high-resistivity silicon lens is used to improve the beam quality of THz QCL. Then a quasi-Gaussian light beam is acquired in imaging system. A THz real-time imaging system is constructed by employing a two dimensional wobbling mirror to eliminate the interference of the THz light. A beam spot size of 45 mm × 30 mm for single frame imaging is obtained. The real-time imaging for blade and tablets is demonstrated with a resolution better than 0.5 mm. Finally, the improvements of the source, optics, and detector array of the system and the imaging effect are summarized. The application prospect in material analysis and bio-medical imaging as well as the future trends of the real-time imaging system are discussed.

Key words: Terahertz; real-time imaging; quantum cascade laser; focal plane array

1 引言

太赫兹 (THz) 辐射通常指频率介于 0.1 ~ 10 THz (对应波长 30 μm ~ 3 mm) 的电磁波, 其研究范畴属于红外光子学与微波电子学交叉领域, 也称为宏观电子学向微观光子学过渡的区域。THz 成像技术是 THz 技术^[1] 中颇具潜力的一个方向, 基于 THz 辐射的特点, 如辐射能量低、对非极性和非金属材料透过率高、能量尺度对应于有机和无机材料中振动能级以及大分子结构中的转-振能级等^[2], THz 成像应用于上述物质时, 具有比红外和可见光更好的穿透特性以及比微波毫米波更好的分辨率, 这一特点使其在生物医学、安全控制、工业监测、无损检测分析等^[1-4] 领域具有广阔的应用前景。

近年来, 随着 THz 辐射源和探测技术^[5-8] 的发展, THz 成像技术的发展经历了多个阶段并获得不断改进, 从基于 THz 时域光谱 (TDS) 系统的成像^[9-10] 到基于各种辐射源的快速扫描成像^[11-14], 再到基于焦平面阵列探测的实时成像^[15-16], 成像系统的性能得到很大提升, 系统的应用水平也不断提高, 尤其是 THz 实时成像系统的出现和完善^[7-8], 将 THz 成像的速度和精度提高到可实际应用的水平, 有望在材料分析、生物医学成像等领域获得重要应用。

本文主要讲述了 THz 量子级联激光器 (quantum-cascade laser, QCL) 及其实时成像系统的研究进展, 着重对成像系统激光源、成像光路和探测端的改进以及成像效果的改善方面进行了综述, 并进一步展望了 THz 实时成像未来的发展趋势及其在材料分析和生物医学成像方面的应用前景。

2 THz 量子级联激光器

THz QCL 是 1 ~ 5 THz 频段辐射源中非常重要的一种紧凑型激光源, 具有体积小、易集成、寿命长、功率高、能量转换效率高等特点。2002 年, THz QCL 首次由意大利和英国的科学家合作研制成功, 当时器件采用啁啾超晶格结构, 只能脉冲激励, 最大输出功率约 2.3 mW^[17], 随后人们通过对激光器有源区结构的改进, 实现了器件的连续激励, 最大输出功率 0.41 mW^[18]。QCL 的工作原理如图 1 所示, 器件中的增益介质是由几百层交替生长的半导体薄层材料 (通常是 GaAs 和 Al-GaAs, 采用分子束外延方法生长) 组成, 在这种增益介质中电子被限制在分立的子能级中。这些薄

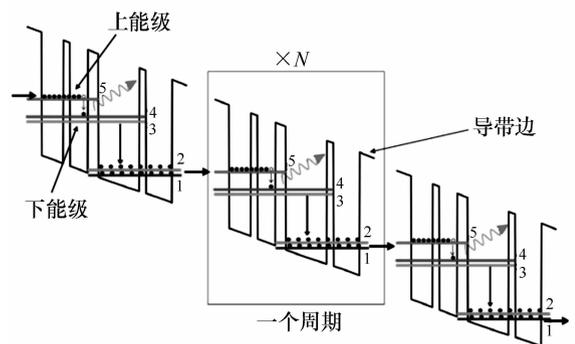


图 1 THz 量子级联激光器工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of working principle of terahertz quantum-cascade laser

层形成周期性的模块, 当施加外部电场时, 电子通过级联的方式从一个周期到达另一个周期, 每一步跃迁辐射出一个低能量的光子 (见图 1), 多个周期辐射出的光子通过级联的方式汇集到一起,

在器件脊条形成的腔体中增益后输出。同样的光子能量也不是取决于材料的带隙,而是通过控制半导体薄层的厚度在很宽范围的值里选择^[2]。

THz QCL 的成功研制开启了人们对半导体量子级联 THz 器件的研究热潮。通过各国研究人员的努力,THz QCL 在输出功率、工作温度、工作频率范围等方面均得到了很大的提高^[5]。截至目前,器件激励频率可覆盖 1.2 ~ 5.2 THz 范围^[19-20],在连续波工作模式下,最高激励温度为 129 K^[21],最大输出功率为 230 mW^[22];脉冲工作模式下,最高激励温度近 200 K^[23](见图 2),最大峰值输出功率达 1.56 W^[24]。这一点使其成为 THz 实时成像系统的首选。器件最近被证明存在亚 kHz 的量子噪声限线宽^[25],并且也出现了潜在的可调谐性^[26],有望在多频点 THz 实时成像方面获得应用。就器件而言,THz QCLs 在成像能力方面,其辐射功率可超过光学泵浦源和热辐射源好几个数量级;并且其在紧凑型成像系统的潜在发展能力也使我们不再依赖庞大而昂贵的超快激光源^[27-29]或气体激光器^[15]。上述吸引人的特性不仅仅促使人们对基于 THz QCL 的实时成像系统产生极大的研究兴趣,还为进一步改进 THz 成像技术提供了巨大潜力。

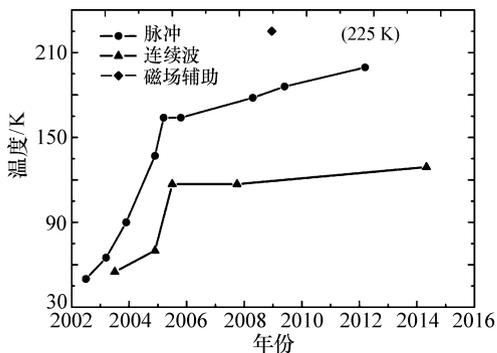


图 2 不同时期 THz QCL 的最高工作温度

Fig. 2 Maximum operating temperature of THz QCL in different years

3 基于 THz QCL 的实时成像研究进展

THz 实时成像以阵列探测器为基础,配以合适的激光光源,当阵列探测器工作在一定帧率的情况下,相邻两帧图像在眼睛看来是连续出现时,

我们称之为实时成像 (Real-time imaging),当成像帧率达到 25 Hz 甚至更高时,我们称之为视频成像 (Video rate imaging)。THz 实时成像具有成像速度快和分辨率高等特点,是 THz 成像应用中颇具潜力的一种成像手段,未来在材料分析、物质反应分析和生物医学成像分析等方面具有重要应用前景。

3.1 红外焦平面阵列探测

早期 THz 实时成像系统采用二氧化碳气体激光器为激光源^[15,30],由于气体激光器输出光束质量好,在成像效果上主要受限于阵列探测器的水平。不过气体激光器体积庞大,设备昂贵,使得成像系统一直停留在实验室演示的层面,难以获得实际应用。

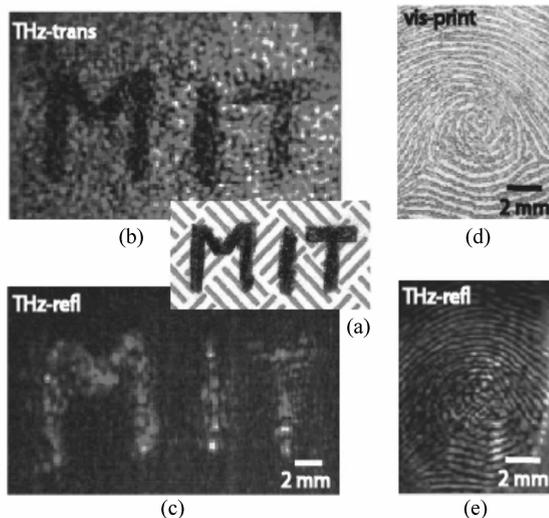


图 3 纸质信封内铅笔字可见光照片 (a) 及其在封闭信封内 THz 透射 (b) 和反射 (c) 成像效果对比和拇指指纹的可见光照片 (d) 和 THz 反射成像 (e) 效果对比^[15]

Fig. 3 Pencil letters written on inside of paper security envelope at visible frequencies. (a) Terahertz transmission mode, (b) one frame, and (c) terahertz reflection mode. (d) Visible frequency thumb print and (e) terahertz reflection mode image of thumb^[15]

THz QCL 的出现给了 THz 实时成像系统实用化的希望。基于 THz QCL 和阵列探测器进行实时成像的系统由美国 MIT 的 Lee 等人^[16]首次提出并获得验证,该系统成像频点为 4.3 THz,所

用器件输出的峰值功率约 50 mW,实现了对信封内铅笔字和人体大拇指指纹的成像演示,成像分辨率约 0.5 mm(见图 3)。上述成像演示开启了以 THz QCL 为主动光源的阵列探测成像以及实时成像研究。随后, Lee 等人^[31]采用一个可连续波工作、最大连续波输出功率达 38 mW 的 4.9 THz QCL 作为成像光源,将系统的成像距离提高到 25.8 m,实现了对干种荚的实时成像,成

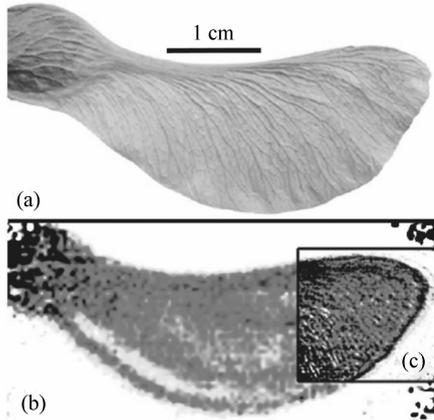


图 4 干钟荚的可见光(a)照片和 THz 实时成像结果(b)^[31]

Fig.4 Visible photo(a) and THz image(b) of a dried seed pod(down)^[31]

像分辨率 0.75 mm(见图 4)。上述成像系统的共同点除了采用 THz QCL 做成像光源外,都采用红外焦平面阵列作为成像信号接收端,由于这种阵列探测器的峰值探测波长为 8 ~ 14 μm ,其在 THz 频段的响应较弱,成像系统对激光器的输出功率有很高要求,所采用的 QCLs 必须工作于体积较大的大冷量制冷机装置中。

3.2 THz 阵列探测(THz Camera)

为了进一步提高阵列探测器在 THz 频段的响应率和灵敏度,2008 年日本 NEC 公司的 Oda 等人^[7]在原有红外焦平面阵列探测器基础上对器件的峰值响应波长进行优化,最终获得了常温下低至 40 pW@3.1 THz 的单像素等效噪声功率(Noise Equivalent Power, NEP),在配置了改进的阵列探测器后,成像系统光源的平均输出功率降低至 1 mW 水平也可以获得相同质量的图像。因此,成像系统探测端灵敏度的提高,极大地降低了系统对光源输出功率的要求,使 THz QCL 冷却装置的小型化成为了可能。除了 NEC 公司之外,加拿大的 INO 公司开发出像元素为 384 pixel \times 288 pixel 的 THz 照相机,最佳 NEP 达 70 pW@2.5 THz,并采用二氧化碳泵浦的 THz 气体激光器作为成像光源,实现了对刀片、软盘等样品的视频成像,帧率达 30 Hz^[32]。

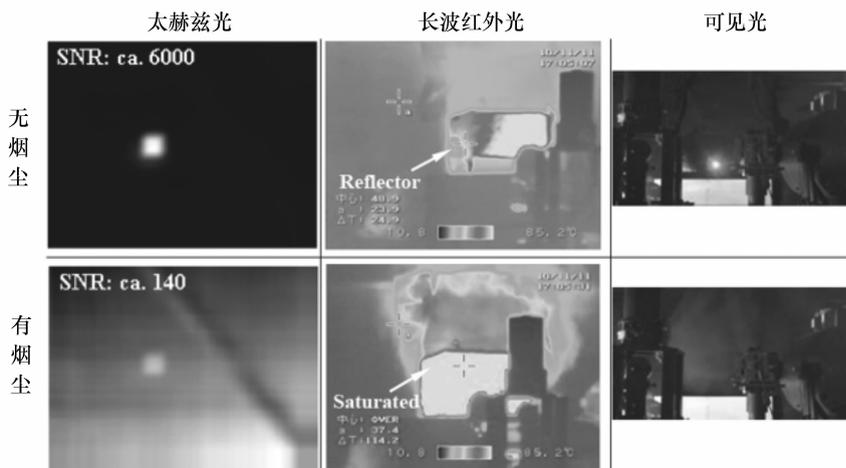


图 5 经过反射镜后返回的 THz 光、红外光和可见光成像光斑对比图^[33]

Fig.5 Comparison of the returning light through the reflecting mirror at terahertz, longwave infrared and visible frequencies (a) without black smoke, (b) with black smoke^[33]

相比之下,NEC 公司开发的成像软件要明显优于 INO 公司,前者的成像效果也更好。但目前

NEC 公司 30 Hz 帧率的红外及 THz 阵列探测器和照相机对中国均执行禁运,且相机软件开发包

(Software Development Kit, SDK) 不对外开放,使得这款相机仅仅是一种实验工具,无法集成在自主开发的成像系统中,加拿大的 INO 公司目前既开放 SDK,其 30 Hz 帧率的相机也不对中国禁运,是集成在自主开发成像系统中的一种折中选择。当然,国内在这种基于氧化钽的红外焦平面阵列探测器开发方面,已有不少公司在生产并关注到 THz 频段的应用,希望国产 THz 相机能尽快实现成像应用,弥补 NEC 公司不开放条款带来的系统开发限制。

为了验证 THz QCL 输出激光对现场烟尘的穿透特性,日本 NICT 的 Hosako 等人^[33]将改进版的探测端用于实时成像系统,并将成像系统应用于火灾现场。研究表明,透过烟尘 THz 阵列探测器可以很明显的发现经过反射镜后返回的 THz 激光(见图 5),工作距离可达 5 m。而与之对比的长波红外光波段,因烟尘的温度高于周围环境,烟尘的辐射已经将红外探测阵列饱和,使其无法区分信号和噪声;在可见光波段,光信号直接被烟尘遮挡,无法探测到信号。这套系统中激光源的冷却装置采用的是液氮杜瓦,极大地减小了激光源装置的体积和重量,适合于现场火灾中的成像应用。研究人员表示,通过改进系统的性能,有望在未来用这套系统透过烟尘发现火灾中的被困人员。同年,NEC 公司推出基于改进型红外焦平面阵列的 THz 照相机(THz Camera),其主要工作频率为 1~7 THz,专门针对 THz QCL 激光频率范围而优化,使得基于 THz QCL 的实时成像系统具有更好的应用优势。

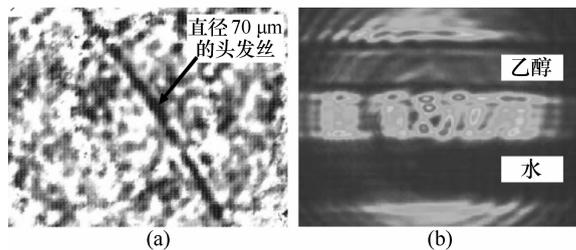


图 6 头发丝(a)和微管中乙醇和水(b)的 THz 显微实时成像结果^[8]

Fig. 6 Real-time THz microscope imaging of human hair(a) and ethanol and water(b)^[8]

显微成像是成像系统中的一个重要功能,

2012 年 Oda 等人^[8]采用小型斯特林制冷机作为激光源的冷却装置,搭建了一套 THz 显微成像装置,最小显微成像光斑直径 3.7 mm,实现了对头发丝、微管中乙醇和水等物质的实时显微成像(见图 6),成像分辨率达 0.07 mm。通过优化系统性能,采用类似的装置,实现了对植物血凝素(lectin)和糖原(glycogen)反应产物的实时成像^[34]。研究表明,在无标记生物分子反应产物的探测方面,基于小型斯特林制冷机和 THz 照相机的成像系统是一种很好的分析工具。

3.3 二维摆镜消干涉技术

THz QCL 在实时成像系统中发挥着重要作用,尤其是在小型化系统的开发过程中,通过优化探测端性能可以很好地降低系统对激光器的功率需求,为激光源的小型化奠定了坚实的基础。然而,THz QCL 输出激光有一个特点,因其输出激光波长比激光器端面的二维尺寸要大很多,输出激光呈现出环状和发散特性,尤其是双面金属波导结构的器件^[35],如图 7 所示,是一个单面金属波导 THz QCL 的输出激光经一个小型离轴抛物面镜收集后,激光束的二维分布图。在上述显微成像系统^[34]中就使用了光阑将光束中多余的环状部分进行滤除,只保留了中心较为均匀的部分。

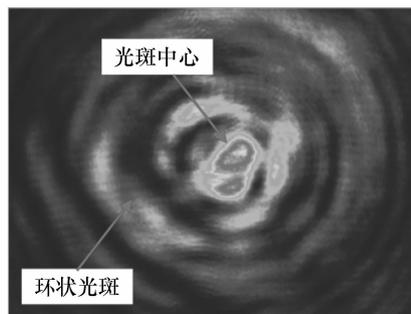


图 7 单面金属波导 THz QCL 输出激光经过离轴抛物面镜后的二维分布图

Fig. 7 Beam pattern of the terahertz light emitting from a single facet metal waveguide with an off-axis parabolic mirror

对于干涉问题的解决,除了对激光器脊条进行工艺改进,比如采用三阶(third-order)分布式光栅结构^[36]或者端面刻蚀技术^[37]等微观方法外,宏观的方法就是采用一组二维摆镜,将成像光束在 x, y 两个维度上进行摆动,使得 THz 探测阵列

上接收到的信号在时间上来看是均匀分布的,从而实现了消除激光本身干涉和分布不均的问题,再辅以空间滤波技术和信号处理技术,实现成像质量的有效提高。为此,Oda 等人^[38]采用这种方法搭建了一套基于二维摆镜消干涉技术的实时成像系统,有效地消除了成像光斑中的干涉条纹(见图 8)。

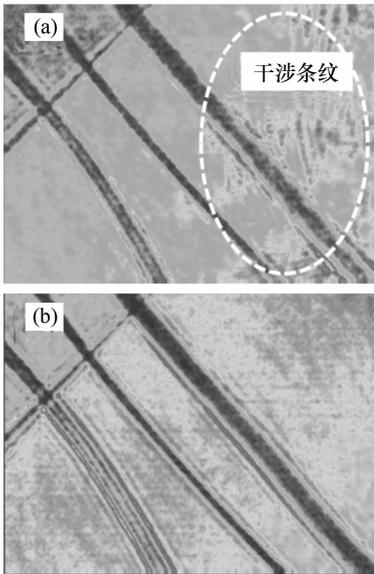


图 8 未采用(a)和采用(b)二维摆镜消干涉部件后对头发丝、金属丝样品的实时成像^[38]

Fig. 8 Real-time imaging of human hair and metal wire without(a) and with(b) two dimensional wobbling mirrors^[38]

危险品检测一直是 THz 领域的研究人员致力于开发的应用,我们采用自主研制的 THz QCL,采用 $D = 4 \text{ mm}$ 的超半球高阻硅透镜实现了准高斯激光束的输出,有效提高了激光束的质量(见图 9),开发出小型化的 THz 激光源装置,工作频率 4.3 THz,重量小于 18 kg,即插即用,有效输出功率大于 $4 \text{ mW}@50 \text{ K}$ (见图 10),激光器供电为 20 kHz 重复频率、 $2.5 \mu\text{s}$ 脉宽(对应占空比为 5%)的脉冲电流驱动。采用该小型化激光源搭建了 THz 实时成像系统,单帧最大成像范围达 $45 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ (见图 11),实现了对刀片和药片的实时成像,成像分辨率优于 0.5 mm ,各样品的尺寸如图 11 所示。大成像范围光斑的实现,为缩短对特定面积样品的成像时间,实现对危险品的快速成像奠定了基础。

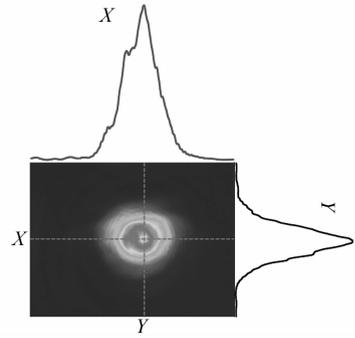


图 9 经过超半球高阻硅透镜耦合输出后的准高斯束二维能量分布

Fig. 9 Two dimensional energy distribution of quasi-Gaussian THz light beam collimated by a hyper-hemispherical high-resistivity silicon lens

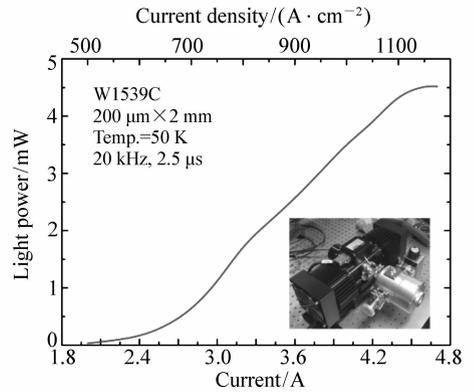


图 10 基于小型斯特林制冷机的 THz QCL 光源装置(插图)及其输出功率曲线

Fig. 10 Stirling cooler based THz QCL light source apparatus(inset) and its light power curve with the drive current

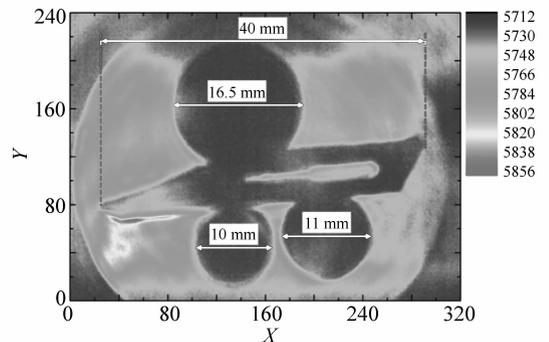


图 11 刀片和不同大小药片的 THz 实时图像

Fig. 11 THz real-time images of blade and tablets with different sizes

4 成像系统的改进

随着 THz QCL 器件性能的不不断提高,基于 THz QCL 的实时成像系统将获得更大地改进,包括体积、重量、成像信号信噪比以及成像效果。不过要实现上述改善,我们认为至少需要在激光源、成像光路和信号探测端做如下改进:

(1)激光源方面,目前最好的 THz QCL,在不考虑制冷机本身功耗的情况下,其光电能量转换效率只有 2% 不到,大部分的水平在 1% 以下。在室温工作的 THz QCL(不包括差频产生方式)获得验证并实用化之前,激光器的冷却装置仍然是成像系统设计过程中必须加以综合考虑的部分。高工作温度(大于 77 K)和高的能量转换效率(大于 1%)是实用化 THz QCL 必须具备的条件。尽管小型斯特林制冷机在现有成像系统中具有体积较小、重量较轻以及耐用性好等特点,但斯特林制冷机工作时的振动以及其自身冷却过程中产生的干扰(主要是风冷系统),在对环境敏感的成像系统中难以获得大范围应用,而水冷系统需要额外增加体积和重量,也不利于系统的优化。为此,提高器件的能量转换效率,改进器件的制冷方式,采用更小型的制冷机是未来的发展趋势,比如可手持式的制冷机等。其次,激光束的改善也需要在现有基础上进一步提高稳定性和可靠性,目前通常采用的是胶粘高阻硅透镜,这种方法尽管在精准的贴片机辅助封装下可以实现良好的光束输出,但其在实用化过程中遇到振动等环境性实验时,易出现脱落和损坏等,必须采用更可靠的方式来实现硅透镜对 THz 激光的耦合输出,比如位置可调、精细设计的透镜夹具等。第三,为了实现多

频点的成像,还需要对激光器的激射频率进行优化,针对不同物质采用环境吸收小的频点来提高成像激光的穿透性能,获得更优的成像信噪比。

(2)光路优化方面,目前大部分系统针对的是透射成像,对反射成像的优化涉及较少,需要针对成像目标物进一步改进成像方式,拓宽系统的成像功能,并针对不同成像光斑范围,采用不同型号的二维摆镜。

(3)探测端方面,除了提高阵列的探测灵敏度之外,利用 THz QCL 激光频谱纯度高的特点,开发新型单频点或窄频点探测器阵列,在降低成像信号噪声的同时实现成像信噪比的大幅提高。

5 结束语

本文主要针对基于 THz QCL 的实时成像技术,综述了 THz QCL 及其成像系统的研究进展,采用二维摆镜消干涉光学部件搭建了单帧成像范围 45 mm × 30 mm 的实时成像系统,实现了对刀片、药片等样品的实时成像演示,分辨率优于 0.5 mm。重点分析了成像光源需要改善的几个方面,并对成像系统光路的改进和探测端性能的提高进行了讨论。从系统的角度来看,基于 THz QCL 的实时成像系统已具备可应用的潜力,但还需要进一步缩小系统体积,优化成像光路和成像光束质量。考虑到 THz QCL 输出的激光频率范围主要覆盖 1.5 ~ 5 THz,该频段成像分辨率相对较高,且成像光源输出功率大,发展基于 THz QCL 的显微实时成像技术是未来的重要发展方向。通过探索其在材料分析、生物医学成像等方面的应用,以期在例如癌细胞切除手术、相变材料分析、半导体材料载流子分析中获得应用。

参考文献:

- [1] TONOUCHI M. Cutting-edge terahertz technology[J]. *Nat. Photon.*, 2007, 1:97-105.
- [2] DEAN P, VALAVANIS A, KEELEY J, *et al.*. Terahertz imaging using quantum cascade lasers-a review of systems and applications[J]. *J. Physics D:Applied Physics*, 2014, 47:374008.
- [3] WALLACE V P, MACPHERSON E, ZEITLER J A, *et al.*. Three-dimensional imaging of optically opaque materials using nonionizing terahertz radiation[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2008, 25:3120-3133.
- [4] 蔡禾, 郭雪娇, 和挺, 等. 太赫兹技术及其应用研究进展[J]. *中国光学*, 2010, 15(3):209-222.
CAI H, GUO X J, HE T, *et al.*. Terahertz wave and its new applications[J]. *Chinese Optics*, 2010, 15(3):209-222. (in Chinese)

- [5] KUMAR S. Recent progress in terahertz quantum cascade lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2011, 17(1):38-47.
- [6] 叶全意,杨春. 光子学太赫兹源研究进展[J]. *中国光学*, 2012, 5(1):1-11.
YE Q Y, YANG CH. Recent progress in THz sources based on photonics methods[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):1-11. (in Chinese)
- [7] ODA N, YONEYAMA H, SASAKI T, *et al.*. Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser, using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays[J]. *SPIE*, 2008, 6940:69402Y.
- [8] ODA N, ISHI T, MORIMOTO T, *et al.*. Real-time transmission-type terahertz microscope with palm size terahertz camera and compact quantum cascade laser[J]. *SPIE*, 2012, 8496:84960Q.
- [9] CHAN W L, DIEBEL J AND MITTLEMAN D M. Imaging with terahertz radiation[J]. *Rep. Prog. Phys.*, 2007, 70:1325-1379.
- [10] HU B B, NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. *Opt. Lett.*, 1995, 20:1716-1718.
- [11] DARMO J, TAMOSIUNAS V, FASCHING G, *et al.*. Imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. *Opt. Express*, 2004, 12:1879-1884.
- [12] KIM S M, HATAMI F, HARRIS J S, *et al.*. Biomedical terahertz imaging with a quantum cascade laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:153903.
- [13] 李琦, 胡佳琦, 杨永发. 太赫兹 Gabor 同轴数字全息二维再现像复原[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8):2188-2195.
LI Q, HU J Q, YANG Y F. 2D reconstructed-image restoration of terahertz Gabor in-line digital holography[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2188-2195. (in Chinese)
- [14] ROTHBART N, RICHTER H, WIENOLD M, *et al.*. Fast 2-D and 3-D terahertz imaging with a quantum-cascade laser and a scanning mirror[J]. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, 2013, 3:617-624.
- [15] LEE A W M, HU Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. *Opt. Lett.*, 2005, 30(19):2563-2565.
- [16] LEE A W M, WILLIAMS B S, KUMAR S, *et al.*. Real-time imaging using a 4.3-THz quantum cascade laser and a 320 × 240 microbolometer focal-plane array[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, 18(13):1415-1417.
- [17] KHLER R, TREDICUCCI A, BELTRAM F, *et al.*. Terahertz semiconductor-heterostructure laser[J]. *Nature*, 2002, 417:156-159.
- [18] AJILI L, SCALARI G, HOFSTETTER D, *et al.*. Continuous-wave operation of far-infrared quantum cascade lasers[J]. *Electron. Lett.*, 2002, 38(25):1675-1676.
- [19] SCALARI G, WALTHER C, FISCHER M, *et al.*. THz and sub-THz quantum cascade lasers laser[J]. *Photon. Rev.*, 2008, 3:45-66.
- [20] CHAN C W I, HU Q, RENO J L. Ground state terahertz quantum cascade lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 101:151108.
- [21] WIENOLD M, R BEN B, SCHROTTKE L, *et al.*. High-temperature, continuous-wave operation of terahertz quantum-cascade lasers with metal-metal waveguides and third-order distributed feedback[J]. *Opt. Express*, 2014, 22:3334-3348.
- [22] WANG X, SHEN C, JIANG T, *et al.*. High-power terahertz quantum cascade lasers with ~0.23 W in continuous wave mode[J]. *AIP Advances*, 2016, 6:075210.
- [23] FATHOLOLOUMI S, DUPONT E, CHAN C W I, *et al.*. Terahertz quantum cascade lasers operating up to 200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling[J]. *Opt. Express*, 2012, 20:3866-3876.
- [24] LI L H, ZHU J X, CHEN L, *et al.*. The MBE growth and optimization of high performance terahertz frequency quantum cascade lasers[J]. *Opt. Express*, 2015, 23(3):2720-2729.
- [25] VITIELLO M S, CONSOLINO L, BARTALINI S, *et al.*. Quantum-limited frequency fluctuations in a terahertz laser[J]. *Nat. Photon.*, 2012, 6:525-528.
- [26] VITIELLO M S, TREDICUCCI A. Tunable emission in THz quantum cascade lasers[J]. *IEEE Trans. THz Sci. Technol.*, 2011, 1:76-84.

- [27] BR NDERMANN E, HAVENITH M, SCALARI G, *et al.* . Turn-key compact high temperature terahertz quantum cascade lasers: imaging and room temperature detection[J]. *Opt. Express*, 2006, 14:1829-1841.
- [28] RICHTER H, GREINER-B R M, PAVLOV S G, *et al.* . A compact, continuous-wave terahertz source based on a quantum-cascade laser and a miniature cryocooler[J]. *Opt. Express*, 2010, 18:10177-10187.
- [29] AMANTI M I, SCALARI G, BECK M, *et al.* . Stand-alone system for high-resolution, real-time terahertz imaging[J]. *Opt. Express*, 2012, 20:2772-2778.
- [30] 姚睿, 丁胜晖, 李琦, 等. 2.52 THz 面阵透射成像系统改进及分辨率分析[J]. 中国激光, 2011, 38(1):0111001.
YAO R, DING SH J, LI Q, *et al.* . Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, 38(1):0111001. (in Chinese)
- [31] LEE A W M, QIN Q, KUMAR S, *et al.* . Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters) [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89:141125.
- [32] BERGERON A, TERROUX M, MARCHESE L, *et al.* . Components, concepts, and technologies for useful video rate THz imaging[J]. *SPIE*, 2012, 8544:85440C.
- [33] HOSAKO I, SEKINE N, ODA N, *et al.* . A real-time terahertz imaging system consisting of terahertz quantum cascade laser and uncooled microbolometer array detector[J]. *SPIE*, 2011, 8023:80230A.
- [34] ODA N, LEE A W M, ISHIA T, *et al.* . Proposal for real-time terahertz imaging system, with palm-size Terahertz camera and compact quantum cascade laser[J]. *SPIE*, 2012, 8363:83630A.
- [35] ADAM A J L, KA ALYNAS I, HOVENIER J N, *et al.* . Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88:151105.
- [36] AMANTI M I, FISCHER M, SCALARI G, *et al.* . Low divergence single-mode terahertz quantum cascade laser[J]. *Nat. Photon.*, 2009, 3:586-590.
- [37] YU N, WANG Q J, KATS M A, *et al.* . Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams[J]. *Nat. Mater.*, 2010, 9:730-735.
- [38] ODA N, ISHI T, KURASHINA S, *et al.* . Palm-size and real-time terahertz imager, and its application to development of terahertz sources[J]. *SPIE*, 2013, 8716:871603.

作者简介:



谭智勇 (1982—), 男, 湖南宜章人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2010 年于中科院上海微系统与信息技术研究所获得博士学位, 主要从事太赫兹材料光谱及量子器件测试与应用方面的研究。
E-mail: zytan@mail.sim.ac.cn



曹俊诚 (1967—), 男, 江西万年人, 博士, 研究员, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者, 中科院“百人计划”、新世纪百千万人才工程国家级人选, 上海市优秀学科带头人计划入选者, 上海市自然科学牡丹奖获得者, 主要从事 THz 物理、器件及通信与成像应用方面的研究。
E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn