

基于太赫兹半导体量子阱器件的光电表征技术及应用

谭智勇^{1,2}, 曹俊诚^{1,2*}

¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所太赫兹固态技术重点实验室, 上海 200050;

²中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049

摘要 光电表征技术是太赫兹应用技术的重要基础, 涵盖了太赫兹频段光电器件表征、光谱测量、光束改善以及通信和成像应用等多个方面, 在太赫兹应用领域中发挥着重要作用。介绍了太赫兹频段两种半导体量子器件的工作原理和最新进展, 综述了二者在太赫兹脉冲功率测量、探测器响应率标定等光电表征技术中的应用及其在太赫兹快速调制与探测、太赫兹扫描成像系统中的应用, 最后介绍了太赫兹光电表征技术的改善, 包括激光光源质量改善和探测器有效探测面积的提高方法等, 并给出了器件及表征技术的潜在应用。

关键词 太赫兹技术; 量子级联激光器; 量子阱探测器; 光电表征; 快速调制与探测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0614004

Photoelectric Characterization Technique Based on Terahertz Semiconductor Quantum-Well Devices and Its Applications

Tan Zhiyong^{1,2}, Cao Juncheng^{1,2*}

¹Key Laboratory of Terahertz Solid-State Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Photoelectric characterization technique is an important foundation of the terahertz technology. It covers photoelectric device characterization, spectral measurement, beam improvement, and communication and imaging applications in terahertz region, and plays an important role in terahertz application field. Firstly, the working principle and the latest progress of two kinds of terahertz semiconductor quantum devices are presented. Then, their applications in terahertz photoelectric characterization such as pulse light power measurement and detector responsivity calibration, and their applications in terahertz fast modulation and detection as well as terahertz scanning imaging systems are summarized. Finally, the improvements of the above characterization techniques are also introduced and discussed, including the methods to improve the terahertz light beam quality and the effective detection area of detectors. The potential applications of devices and characterization techniques in the future are also presented.

Key words terahertz technology; quantum-cascade laser; quantum-well photodetector; photoelectric characterization; fast modulation and detection

OCIS codes 260.3090; 140.5965; 040.2235

1 引 言

太赫兹 (THz) 频段是介于红外光与毫米波之间有待深入和全面研究的电磁波段, 频率范围覆盖

0.1~10 THz, 对应波长 0.03~3 mm。光电表征技术是 THz 应用技术的重要基础, 涵盖了诸如 THz 光电器件性能表征、光路校准与光束改善、光谱测量、激光调制与解调、通信与成像应用等多个层面,

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-04-20; 录用日期: 2019-04-28

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFF0106302, 2017YFA0701005)、国家自然科学基金(61775229)、上海市科学技术委员会资助的自然科学基金(17ZR1448300)和国际合作项目(18590780100)

* E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

在 THz 应用领域中发挥着重要作用。随着材料科学、激光技术和能带工程的发展,紧凑型 THz 辐射源和探测器逐渐出现并获得性能上的不断完善^[1-4]。随着 THz 辐射源和探测手段的迅速发展,THz 频段的光电表征手段不断迭代更新,可以较为方便地获得一些传统方法难以准确测量的物理参数。

在这些逐渐成熟的 THz 器件中,以 THz 量子级联激光器(QCL)和量子阱探测器(QWP)为代表的半导体量子阱器件,因其体积小、制备工艺成熟、寿命长、性能稳定等特点而被广泛研究,并逐步应用于 THz 标准源、本地振荡源、快速探测与成像、THz 无线信号传输以及 THz 成像等^[3-7]。本文首先介绍 THz QCL 和 THz QWP 的工作原理和最新研究进展,随后介绍这两种器件在 THz 光电测试技术中的应用,主要包括二者在频谱和响应时间上的匹配特性、在 THz 辐射源和探测器性能测试过程中的互表征技术以及二者在 THz 无线信号传输、快速调制与探测和扫描成像系统方面的应用,最后介绍了光电表征技术中最为重要的辐射源和探测装置需要改进的几个方面及其潜在应用领域。

2 器件原理及研究进展

2.1 THz QCL 工作原理及研究进展

THz QCL 是 1~5 THz 频段非常重要的一种紧凑型激光源,具有体积小、易集成、寿命长、能量转换效率高等优点。自 2002 年首次被验证以来^[1],THz QCL 在工作频率、工作温度、输出功率、激光光束改善以及器件稳定性方面发展迅速^[7],由最初的脉冲激励和 40 K 低温下工作^[1]发展至接近 200 K 的最高工作温度^[8]和瓦级脉冲峰

值功率^[9],在光束改善方面采用超半球透镜将光束发散角减小至 3°以内^[9]。THz QCL 的工作原理如图 1 所示,器件中的增益介质由 200 层左右交替生长的半导体薄层材料组成,这些薄层结构中的量子阱区域为 GaAs 材料,势垒区域为 AlGaAs 材料,均采用分子束外延方法生长,在这种增益介质中电子被限制在分立的子能级内。这些薄层形成周期性的模块,当施加外部电场时,电子通过级联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光子(图 1),其中 N 表示周期数,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不断增益,然后形成辐射输出。辐射出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的数值范围内进行选择^[4]。

作为一种使用寿命长、性能稳定可靠的辐射源,THz QCL 的成功研制为 1~5 THz 频段光电测试技术的实现提供了新的手段。截至目前,THz QCL 的激励频率可覆盖 1.2~5.2 THz 范围^[9],在脉冲激励模式下,最高工作温度接近 200 K^[8],最大峰值输出功率达 1.56 W^[10];在连续波模式下,最高工作温度 129 K^[11],最大输出功率 230 mW^[12]。在实用化模块方面,斯特林制冷型 THz 激光源最大有效输出功率大于 4 mW^[7];液氮冷却型 THz 激光源最大有效输出功率大于 1 mW,单次最长工作时间大于 8 h(图 2),完全满足一定距离范围内的无线信号传输、扫描成像和光路校准等应用需求。此外,THz QCL 已被证明存在亚 kHz 量级的量子噪声限线宽^[13],并在 THz 光频梳、精细成谱和多色成像中得到应用^[14-16]。

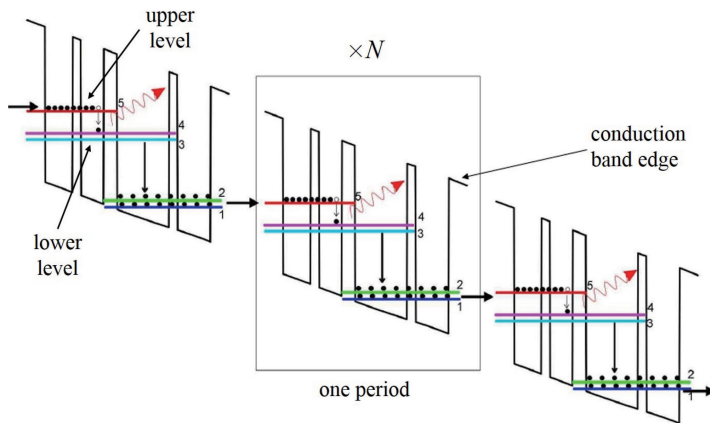


图 1 THz 量子级联激光器工作原理示意图^[7]

Fig. 1 Schematic of working principle of terahertz quantum-cascade laser^[7]

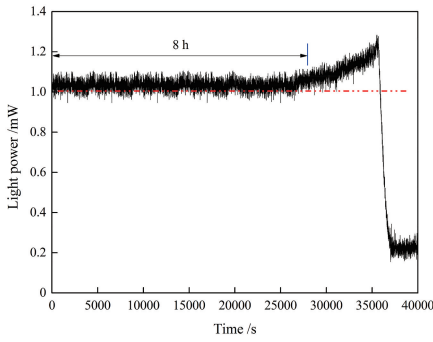


图 2 液氮杜瓦中 4.3 THz QCL 有效输出功率稳定性测量结果

Fig. 2 Output power stability of a 4.3 THz QCL in a liquid nitrogen dewar (LND)

总体来说,就器件本身的性能而言,THz QCL 的辐射功率已远远超过光学抽运源和热辐射源,且相比庞大而昂贵的超快激光源或气体激光器,其在构建紧凑型 THz 光电测试系统和 THz 应用系统方面更具优势^[17]。

2.2 THz QWP 工作原理及研究进展

THz QWP 是红外量子阱探测器在 THz 频段的扩展,是 THz 频段中颇具潜力的一种光电探测器^[2]。THz QWP 具有结构简单、响应速度快、性能稳定、易集成和损伤阈值高等优点,是 2 THz 以上综合性能较高的一种快速探测器,特别适合高速探测与高速成像应用。

THz QWP 的导带结构如图 3 所示,多个量子阱与势垒组成的周期结构以及上、下接触层构成了器件的有源区,每个周期包含一层掺杂的量子阱层(GaAs 材料)和一层势垒层(AlGaAs 材料)。器件

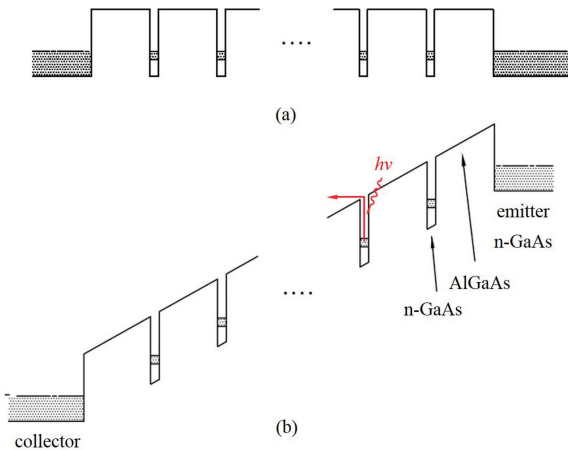


图 3 THz QWP 导带结构示意图^[18]。

(a) 无偏压; (b) 有偏压

Fig. 3 Schematic conduction band edge profile of the THz QWP^[18]. (a) Zero bias; (b) finite bias

的工作原理为:当外加 THz 辐射作用于器件敏感面时,位于量子阱中的束缚态电子吸收 THz 光子能量($h\nu$)后跃迁至接近势垒边的准连续态,其中 h 为普朗克常数, ν 为 THz 光子的频率。上述光生载流子(电子)在外加偏压的作用下,形成特定方向的光电流,通过测量和分析光电流的大小和变化可以得到入射光辐射的强弱和变化情况,进而实现对 THz 波的探测。器件的峰值响应频率由上述结构中束缚态到准连续态的能量间隔决定,上述能量间隔可以通过调节有源区的势垒高度、量子阱宽度和阱中的掺杂浓度等参数来改变,从而实现按需设计。为保证器件对入射光的充分吸收,器件有源区的周期数通常为 10~100 个^[18]。

2004 年,THz QWP 由 Liu 等^[2]首次研制成功。随后,在器件理论设计^[19-20]、光电性能提高^[21-23]和应用研究^[24-26]方面均取得了重要进展。比如在器件的理论设计方面,Guo 等^[19]考虑器件中多体效应影响,将器件峰值探测频率的设计误差由最初的 30% 减小到 5%,大幅提高了器件的理论设计精度;随后,Guo 等^[20]又设计了表面等离子体增强光栅结构和金属微腔结构的 THz QWP 器件,理论上将器件探测时的耦合效率分别提高了 30 倍和约 100 倍。在器件性能提高方面,Zhang 等^[23]研制出金属光栅耦合 THz QWP,将器件的峰值响应率提高了 146%;Wang 等^[27]设计并研制了双色 THz QWP,双峰值探测频率分别为 3.75 THz 和 5.55 THz,将探测器的响应谱宽从 1.5 THz 左右提高至接近 3 THz;随后,Wang 等^[28]又设计并研制出宽带偏压可调谐的 THz QWP 器件,峰值探测频率可从 4.5 THz 调节至 6.5 THz;Jia 等^[29]研究得出,当引入一束功率密度为 819 W/cm² 的 THz 激光时,可将一个 5.5 THz 峰值探测频率的 THz QWP 器件的光噪声限性能温度提高至 77 K 以上。在器件的应用研究方面,2009 年,Grant 等^[24]首次将 THz QWP 应用于一套 3.8 THz 的无线传输系统,演示了 THz 音频信号的传输,实现了 1 THz 以上基于激光辐射的无线信号传输零的突破;随后,Gu 等^[26]将系统的传输速率提高至 20 Mbit/s;Fatholoulumi 等^[30]采用 THz QWP 研究了 THz QCL 热淬灭过程,对应器件的响应时间在 μ s 量级;此外,Patrashin 等^[31]采用低温读出电路实现了对 4 个 THz QWP 器件在 4 K 温度下的信号读取;Fu 等^[32]采用频率上转换技术,将 THz QWP 与光电二极管(LED)集成,研制出具有成像功能的 THz 频率上转换探测芯

片,并获得了很好的成像效果。

总之,以上理论优化、性能改善和应用研究充分展现了 THz QWP 器件的独特优势,为其进一步应用于 THz 光电表征技术和相关应用系统奠定了很好的基础。

3 基于 THz 量子器件的光电表征技术

3.1 脉冲激光 THz QCL 发射谱及激光脉冲峰值功率的表征

脉冲激光是 THz QCL 的一种常用工作模式,传统方法中,脉冲激光的 THz QCL 发射谱采用傅里叶变换光谱仪进行测量,但由于光谱仪内部采用的常温热探测器时间常数在几十毫秒量级,对于电驱动重复频率为 10 kHz、脉宽为 5 μ s 量级的脉冲激光 THz QCL 来说,其发射谱的测量需要用到光谱仪的内部斩波器,通过对激光脉冲的测量得到能量包络,再进行傅里叶变换反映在光谱分布上。上述包络测量过程中,斩波器的影响较大,会使实际测量的发射谱发生形变,尤其是在光谱测量速度变快、热探测器来不及响应时,这一点尤为明显。为了能快速、准确且在不使用斩波器同步的情况下测量脉冲激光 THz QCL 的发射谱,需要采用一种具备快速探测能力的 THz 探测器。

图 4 所示为峰值探测频率为 3.22 THz 的 QWP 光电流谱与多个 THz QCL 发射谱的归一化光谱对比,由图可知,探测器的光电流谱完全覆盖了三个 THz QCL 的发射谱频率,再加上 THz QWP 内部 ps 级响应时间所对应的快速响应特性,非常适合于脉冲激光 THz QCL 发射谱的测量。

为此,我们将上述探测器及其冷却装置与傅里叶变换光谱仪进行真空结合,搭建了快速光谱测量

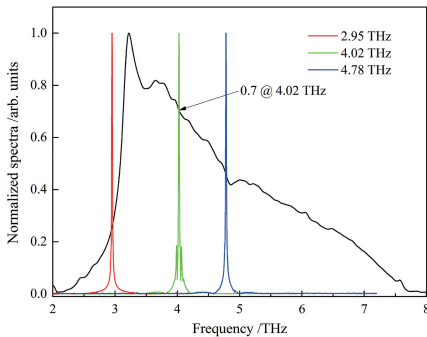


图 4 三个 THz QCL 的发射谱与 THz QWP 光电流谱的归一化光谱对比

Fig. 4 Comparison of the normalized emission spectra of three THz QCLs and the normalized photocurrent spectrum of a THz QWP

装置,测量了中心工作频率为 4.1 THz 的 QCL 的发射谱,并与传统热探测器(具有聚乙烯窗口的氟化硫酸三甘肽探测器,DTGS-PE)测量结果进行了对比,对比结果如图 5 所示。从对比结果可以看出,采用 THz QWP 测量得到的激光器发射谱更加尖锐,其谱峰半峰全宽更小,因而更接近实际的发射谱谱形^[33]。

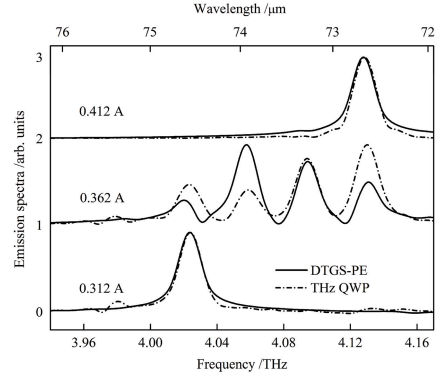


图 5 采用 THz QWP(虚线)和 DTGS-PE(实线)测量到的不同驱动电流下 THz QCL 的发射谱^[33]

Fig. 5 Emission spectra of the THz QCL, under different drive currents, measured by THz QWP (dash line) and DTGS-PE (solid line), respectively.^[33]

输出功率是器件应用的重要性能指标,器件及其装置输出功率的大小直接决定其应用领域和范围。因此,如何精确地测量器件的有效输出功率是器件应用之前的重要环节。在传统方法中,THz 激光脉冲输出功率的测量通常采用热探测器,先测量激光脉冲的平均功率,再根据激光脉冲的持续时间和占空比,计算得到激光脉冲的峰值功率,比如采用热释电探测器测量得到激光脉冲的平均功率为 1 mW,激光脉冲的重复频率为 10 kHz,脉宽为 5 μ s,则激光脉冲的占空比为 5%,计算得到激光脉冲的峰值功率为 1 mW/5% = 20 mW。然而,由于上述测量过程中使用的热探测器的时间常数通常在 10~100 ms 量级,响应速度非常慢,导致测量得到的平均功率会因激光脉冲的重复频率和脉宽的不同(相同占空比)而出现较大差异,计算结果并不能精确地反映 THz 激光脉冲的实际峰值功率。为此,我们采用具有快速响应特性的 THz QWP 器件和离轴抛物面反射镜(OAP)来直接表征激光脉冲的峰值功率,采用 THz QWP 测量 THz QCL 脉冲输出功率时,无需像热探测器那样进行包络积分,可直接根据探测器的响应幅度和响应率,计算得到激光脉冲的峰值功率,测量装置如图 6 所示。

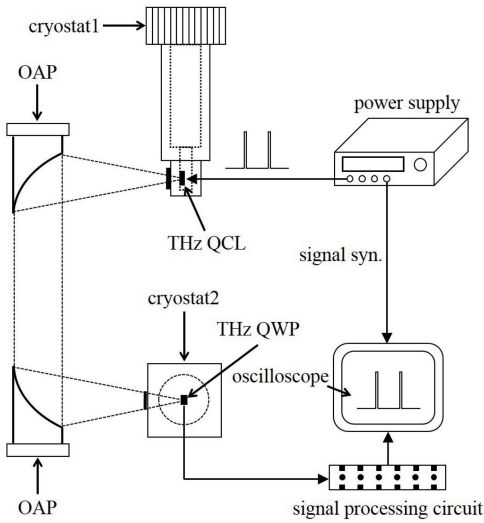


图 6 基于 THz QWP 的 THz QCL 脉冲峰值功率测量装置示意图

Fig. 6 Schematic of the setup measuring the peak pulse power of the THz QCL by using a THz QWP

采用上述装置,我们测量了一个中心工作频率为 4.2 THz 的 QCL 的脉冲峰值功率。测量过程中,THz QWP 为电流响应率已知的标准探测器,器件响应率曲线如图 7 所示,由图可知,THz QWP 在工作温度为 3 K、工作偏压为 30 mV 时的峰值响应率值为 0.52 A/W。对应工作条件下的光电流谱及 THz QCL 的发射谱如图 8 所示,由图可知,探测器在 4.16 THz 处的响应幅度为峰值幅度的 0.67,计算得到探测器在 4.16 THz 处的电流响应率为 0.35 A/W。

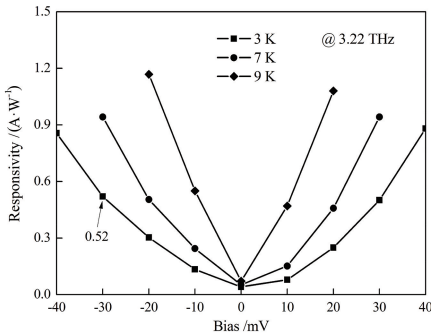


图 7 标准 THz QWP 器件变温响应率曲线
Fig. 7 Current responsivity with the bias under different temperatures of a standard THz QWP

上述装置中 THz QWP 对脉冲激励 THz QCL 输出光信号的响应信号如图 9 所示,图中上方波形为 THz QWP 响应波形,下方波形为 THz QCL 驱动电压波形,对应驱动电压为 4.813 V,重复频率 10 kHz,脉宽 1 μs。由图 9 可知,THz QWP 的响应

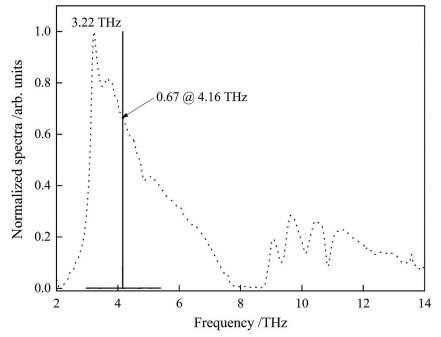


图 8 THz QWP 光电流谱与被测脉冲激励 THz QCL 发射谱的光谱对比

Fig. 8 Comparison of the emission spectrum of the THz QCL and the photocurrent spectrum of the THz QWP

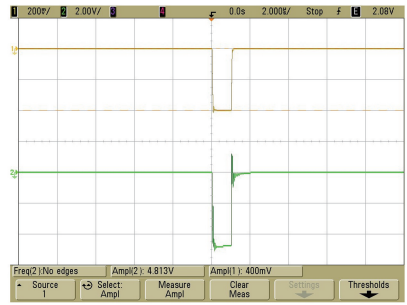


图 9 THz QCL 调制信号波形(下)和 THz QWP 响应信号波形(上)

Fig. 9 Modulation signal waveform applied to the THz QCL (lower) and response signal of the THz QWP (upper)

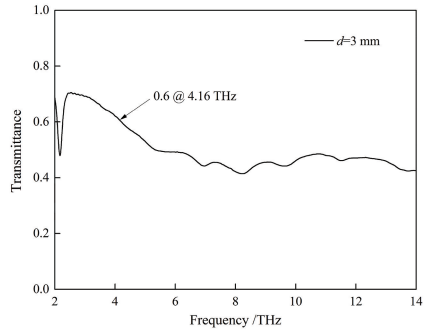


图 10 THz QWP 制冷机 3 mm 厚 HDPE 窗口的 THz 透射谱
Fig. 10 Transmittance spectrum of the 3 mm-thick HDPE window fixed on the cryostat used for THz QWP

幅度为 400 mV,电流放大器的灵敏度为 1 mA/V,计算得到 THz QWP 对光信号的响应电流为 0.4 mA,根据其在 4.16 THz 处的响应率,计算得到 THz QWP 探测到的脉冲峰值功率为 0.14 mW。

脉冲 THz 激光到达 THz QWP 敏感面时,被制冷机上的聚乙烯窗口衰减。经过光谱测量,制冷机上 3 mm 厚的高密度聚乙烯(HDPE)窗口在 4.16 THz 处的透过率为 0.6(图 10),因此在不考虑

测量装置收集效率的情况下,我们认为 THz QCL 输出到达 THz QWP 敏感面处的有效功率为 $0.14 \text{ mW}/0.6 \approx 0.23 \text{ mW}$ 。而实际上,当考虑测量装置收集效率时,从制冷机窗口处输出的 THz QCL 实际脉冲峰值功率应该更大。

上述测量装置及测量方法可以快速而准确地计算得到光学镜会聚焦点处 THz 激光脉冲的峰值功率,进而计算出 THz QCL 端面的脉冲峰值输出功率,为标准 THz 激光源的应用提供很好的测量技术基础。

3.2 THz QWP 绝对响应率的标定

电流响应率是衡量 THz QWP 工作性能的重要参数之一,定义为探测器吸收单位光功率后产生的光电流值,单位为 A/W 。THz QWP 电流响应率的标定通常沿用红外频段的方法^[18]:采用标准黑体作为标定辐射源,结合斩波器、电流放大器和锁相放大器获得一定斩波频率下器件对特定温度黑体辐射的响应幅度,然后通过计算特定温度下标准黑体的辐射能量,由探测器敏感面相对黑体辐射的立体角计算出到达探测器敏感面的辐射功率,再对探测器的光电流谱进行积分,得到峰值探测频率处占光电流谱积分的比值,最后根据该比值、到达探测器敏感面的辐射功率以及锁相放大器显示的响应幅度和放大器的灵敏度(即放大倍数)计算得到探测器的峰值响应率,再根据探测器的光电流谱分布,获得各频点的响应率。

然而,制备 THz QWP 器件采用的材料体系为 GaAs/AlGaAs,实际制作的探测器对红外光和可见光也有一定的响应,因此在采用标准黑体作为标定辐射源时,首先,红外光和环境中的杂散光(尤其是红外光)对器件在 THz 频段的响应率标定有较大影响。其次,标定过程通常在大气环境中进行,大气中水汽对 THz 辐射的吸收峰分布在探测器光电流谱的多个频率点,不能简单地用一个空气透过率值来计算,而是需要将水汽吸收谱和该光电流谱进行对比后作复杂的积分差来扣除大气中水汽吸收的影响,由于水汽吸收谱随环境温度和湿度变化剧烈,标定过程中斩波器的快速转动会对环境有较大扰动,导致扣除水汽吸收的环节会引入很大的偏差。最后,由于探测器需要工作在低温条件下,冷却杜瓦上的窗片对响应率测量的影响同样需要从谱的角度来作复杂的积分差计算。因此,在 THz 频段采用红外频段的方法标定 THz QWP 的电流响应率存在较大的误差。

为了消除传统方法中红外背景光和水汽吸收的影响,简化器件电流响应率计算过程,我们提出了基于单频激光源的 THz QWP 电流响应率标定方法,即采用功率可测定的单频激光源作为标定光源,得到探测器在该激光频率处的绝对响应率值,利用探测器归一化光电流谱进一步计算得到探测器在其任意可探测频率处的绝对响应率值,标定装置如图 11 所示。

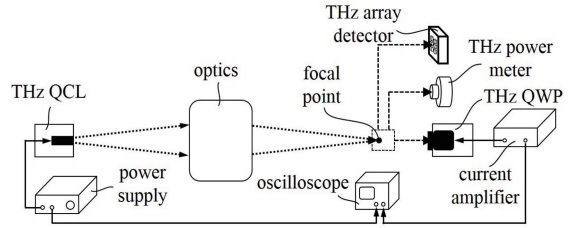


图 11 基于单频激光源的 THz QWP 响应率标定装置示意图
Fig. 11 Schematic of the setup for calibrating the responsivity of THz QWP based on a single frequency laser

THz QWP 的光电流谱半峰全宽通常为 $1 \sim 3 \text{ THz}$,而目前包括二氧化碳气体激光器和 THz QCL 在内的 THz 激光器谱宽均小于 1 MHz ,仅为被标定探测器谱宽的百万分之一甚至更小,完全可以近似为单频激光,非常适合用来标定 THz QWP 的绝对响应率。因此,在图 11 所示装置中,直接采用周期输出的单频激光源作为标定光源,采用太赫兹阵列探测器和功率计测量得到到达探测器敏感面的 THz 激光功率和光斑的二维能量分布,极大地减小了传统标定方法中背景光、水汽吸收的影响,避免了各种谱积分的复杂计算,整个标定过程简单,引入误差小,具有广泛适用性。

为了验证上述方法,我们采用一个 4.24 THz 的 QCL 作为单频激光源,对一个峰值探测频率为 3.22 THz 的 QWP 进行电流响应率的标定。从激光器和探测器光谱对比图(图 12)可以看出,THz QWP 在 4.24 THz 处的归一化响应幅度为 0.64 。探测器的二维尺寸为 $1.6 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$,对应 45° 入射敏感面的尺寸为 $1.6 \text{ mm} \times 1.1 \text{ mm}$,单频 THz QCL 输出的激光通过一组直径 76.2 mm 、有效焦距 127 mm 的 OAP 收集后会聚,焦点处光斑的轮廓和二维能量分布采用 THz 阵列探测器测量。

为了对比,我们将 $1.1 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ 的探测器敏感区域显示于图 13 中,从图中可以看出,会聚光斑比 THz QWP 敏感面小很多,这意味着在标定 THz QWP 电流响应率时,探测器敏感面接收到了全部激光能量并产生了相对应的光电流。在实际标

定过程中,还需要在计算中考虑 THz QWP 冷却装置窗口在 4.24 THz 处的吸收带来的影响。

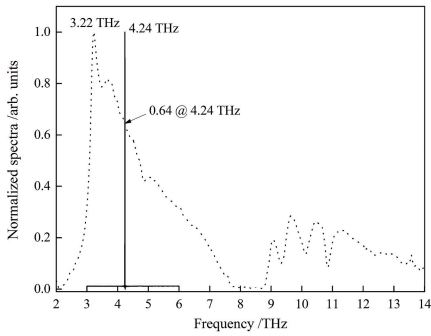


图 12 单频 THz QCL 发射谱(实线)与 THz QWP 光响应谱(虚线)的对比

Fig. 12 Comparison of the emission spectrum of a single frequency THz QCL (solid line) and the photocurrent spectrum of a THz QWP (dash line)

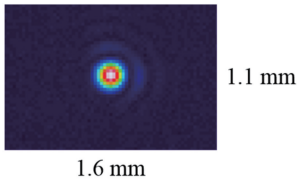


图 13 与 THz QWP 敏感面等大区域内会聚光斑的二维轮廓
Fig. 13 2D profile of the converging spot in the area equal to the sensitive facet of the THz QWP

图 14 所示为采用上述方法标定的 3.22 THz QWP 在不同温度下的峰值电流响应率曲线,与文献[18]中传统标定方法得到的响应率值相当,但我们采用的方法更简单,引入误差更小。受限于激光波长的大小,图 13 所示激光光斑轮廓的直径在 250 μm 左右,因此上述自由空间下标定响应率的方法最小可表征的探测器敏感面尺寸在 300 μm 左右。当被标定探测器尺寸小于 300 μm 时,需要采用小孔光阑遮挡等特定的方法来标定。

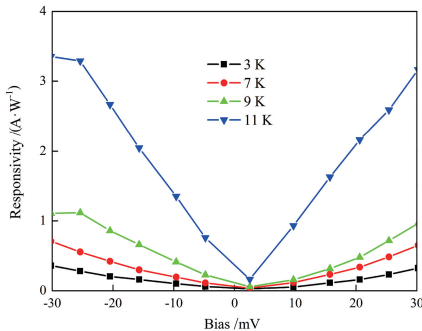


图 14 3.22 THz QWP 器件变温峰值响应率曲线标定结果
Fig. 14 Peak current responsivity calibration curves of the 3.22 THz QWP under different temperature conditions

3.3 THz 激光的快速调制与探测技术

THz 辐射的快速探测技术是 THz 无线通信系统和成像系统中颇具潜力且非常重要的一种基础技术^[34],对 THz 发射端的调制也是高速率数据传输和频移技术的关键技术。有了成熟的辐射源(发射端)和探测器(接收端),就可以构建 THz 频段的无线发射接收链路^[35]。由于内部具备非常快速的载流子跃迁过程,THz QCL 非常适合于快速的直接调制作用,这一点使得 THz QCL 成为 1~5 THz 频段首选的通信系统发射端器件。采用 THz QCL 作为发射端,Chen 等^[35-36]和 Gu 等^[26]先后实现了音频信号和实时视频信号的无线传输演示,填补了国内 1~5 THz 无线信号传输的空白,也充分验证了 THz 半导体量子器件在无线信号传输方面的应用性能。在高速调制方面,采用上转换探测方法,THz QCL 已被验证具备非常快速的调制特性^[37]。但上述高速调制光信号的直接检测因缺乏有效而快速的探测器或探测手段,一直未能解决。

THz QWP 是 2~7 THz 频段非常具有潜力的快速探测器,其内在响应时间为 ps 量级,非常适合于高速探测和高速通信应用。不过,由于缺乏阻抗匹配的信号处理电路和跨阻放大技术,早期基于 THz QCL 和 THz QWP 的无线信号传输系统的链路带宽仅达到几十 Mbit/s 的量级^[26]。因此,必须寻找新的调制和解调方法,将两种 THz 量子器件的内在高速特性充分发挥出来。为此,我们提出了一种采用射频注入调制的办法,来实现对 THz QCL 的高速调制,同时采用传输线封装技术,将 THz QWP 封装在可与传输线直接相连的热沉上(图 15)。

上述高速调制与探测装置如图 16 所示,演示的光路距离为 0.3 m^[38]。首先,给一个工作中心频率为 4.2 THz 的 QCL 施加直流偏压,使其工作在激

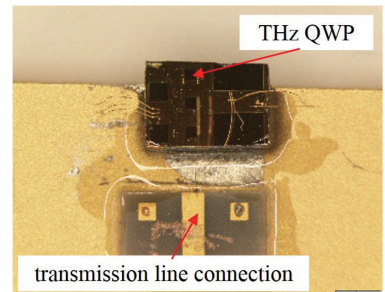


图 15 传输线式封装的 THz QWP 照片
Fig. 15 Photograph of the THz QWP with transmission line packaging

射阈值附近,然后将微波辐射源产生的射频(RF)信号经过 Bias Tee 加载到 THz QCL 上,使其输出与 RF 信号相同周期变化的 THz 激光;THz QWP 接收到上述周期变化的 THz 激光后,产生相应变化的光电流,通过另一个 Bias Tee 输出至放大器后,连接至示波器进行显示,同时将微波信号源的 RF 信号接入示波器进行信号对比。经过测试证实我们获得了调制速率达 0.5 GHz 的信号波形(图 17),图中下方曲线为加载到 THz QCL 的 RF 信号,上方曲线为 THz QWP 的响应信号,上述演示实现了对快速调制 THz 激光的直接探测,为进一步发展基于 THz 半导体量子器件的高速调制、探测与信号传输技术奠定基础。

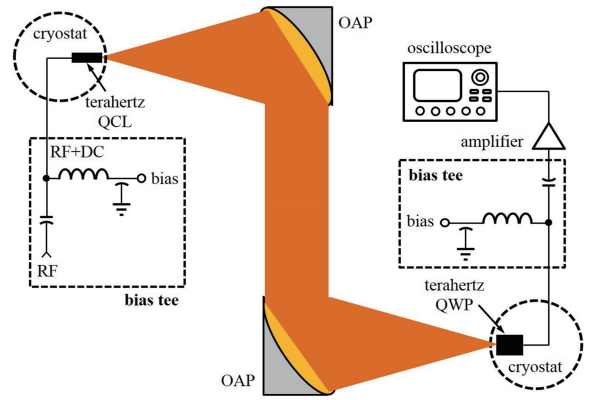


图 16 基于 THz QCL 和 THz QWP 的高速调制与直接探测装置示意图^[38]

Fig. 16 Schematic of high speed modulation and fast direct detection setup based on THz QWP and THz QCL^[38]

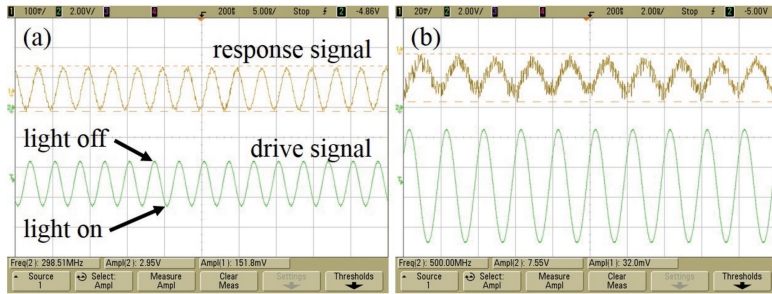


图 17 THz QCL 驱动信号(下)与 THz QWP 响应信号(上)波形对比^[38]。(a) 300 MHz;(b) 500 MHz
Fig. 17 Waveform comparison of the drive signal of THz QCL (lower) and the response signal of THz QWP (upper)^[38]. (a) 300 MHz; (b) 500 MHz

3.4 基于 THz 半导体量子器件的成像技术

成像技术是 THz 应用技术的重要发展方向^[39-41]。因此,THz 半导体量子器件光电表征技术的另一个应用是 THz 成像。成像过程主要利用 THz QWP 对 THz QCL 发出的激光经过样品后信号强弱变化的探测来实现。以扫描成像系统为例,THz QCL 作为成像光源发出的激光,经过设计搭建的成像光路后照射在样品上,THz 激光与样品相互作用后,经过样品(或被样品反射)的 THz 激光被 THz QWP 探测,采用特定的移动装置(比如二维平移台或旋转平移台)实现 THz 激光与样品不同区域的相互作用,从而获得与样品位置相对应的透射或者反射 THz 信号,将上述信号强度与空间位置一一对应,即可得到样品的 THz 图像,进而完成对样品的 THz 扫描成像过程。成像系统可参见图 18。

基于上述技术,我们发展了基于 THz QCL 和 THz QWP 的扫描成像技术,先后实现了对人民币水印的透射扫描成像^[25]、对 U 盘 Logo 的反射扫描成像^[42]以及对表面平整物体的快速反射扫描成

像^[43],为进一步将 THz 半导体量子器件应用于近场显微成像^[44]和偏振转换与成像^[45-46]技术奠定了很好的器件和系统基础。

上述演示系统中,基于 THz QCL 和 THz

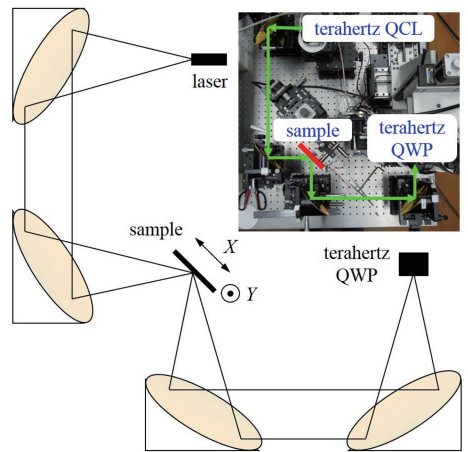


图 18 基于 THz QCL 和 THz QWP 的反射扫描成像装置示意图^[42]

Fig. 18 Schematic of scanning reflection imaging setup based on THz QWP and THz QCL^[42]

QWP 的反射式扫描成像装置如图 18 所示。THz QCL 发射的激光经过一组 OAP 之后到达样品表面,经过精确的光路校准,样品表面反射的 THz 光被另一组 OAP 收集后会聚于 THz QWP 敏感面。采用上述装置,我们在无可见光的暗条件下实现了对 U 盘表面的扫描成像演示,U 盘表面在可见光下观察到的微亮面 Logo,在 THz 反射图像中显示出比非亮面区域高 4~5 倍的信号强度(图 19)。

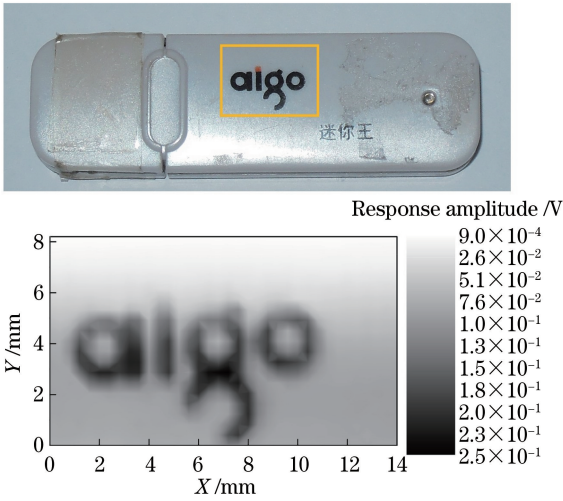


图 19 U 盘表面 Logo 的光学照片(上)及其 THz 反射图像(下)^[42]

Fig. 19 Optical photograph (upper) and the THz reflected image (lower) of logo on the surface of a U-disk^[42]

上述扫描成像系统将器件性能发挥到了较高的水平,与红外光成像相比,充分体现了 THz 辐射的穿透特性,同时也获得了比微波和毫米波成像更好的空间分辨率。然而,受限于二维平移运动的限制,上述扫描成像过程时间较长,成像速度慢,在一些需要快速获得目标物 THz 图像的成像应用中难以胜任。为此,我们采用共光路设计,搭建了基于 THz QCL、旋转平移二维扫描装置和 THz 分束器的快速成像系统(图 20),该系统的扫描速度可达 5000 point/s,探测端采用低温热辐射计或者 THz

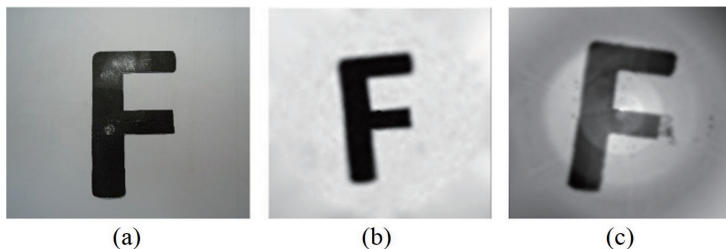


图 21 可见光和 THz 照射下打印字母“F”的图像。(a)可见光照片;(b)可见光快速扫描成像结果;(c) THz 快速扫描成像结果
Fig. 21 Images of a printed letter ‘F’ under visible and THz radiation. (a) Photograph under visible light; (b) result of visible scanning imaging; (c) result of THz scanning imaging

QWP,该成像系统理论上的成像分辨率可达 0.1 mm。系统成像演示过程中样品处的成像光斑如图 20(b)所示,两个小图即为 1 mm×1 mm 区域内光斑的二维强度分布,其中上图为没有分束片时的光斑大小,光斑直径 260 μm,下图为有分束片时的光斑大小,光斑直径 310 μm。

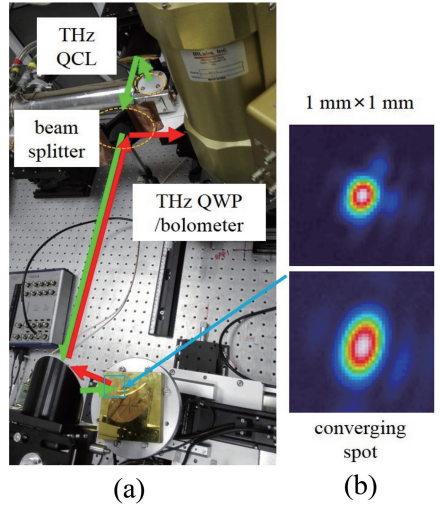


图 20 (a) THz 快速成像系统照片及(b)会聚光斑图
Fig. 20 (a) Photograph of the fast THz imaging system and (b) pattern of the converged beam spot

采用上述成像系统,我们实现了对打印字母的扫描反射成像演示,成像结果如图 21(c)所示。为了对比,将上述发射和接收端的探测器换成可见光频段的器件,同时采用可见光波段的分束片,实现了对打印字母的可见光快速扫描反射成像,成像结果如图 21(b)所示。由对比图可知,THz 频段的成像结果与可见光波段结果相近,上述 THz 成像的分辨率优于 1 mm,成像区域直径 100 mm,成像时间 5 s;随后,通过改进系统光路和扫描速度,实现了对叶片和隐匿叶片的 THz 成像演示,成像分辨率提高至 0.3 mm^[43]。上述成像演示有效验证了基于平移和旋转扫描机制实现快速 THz 成像的可行性,为器件进一步应用于快速 THz 探测系统奠定了基础。

4 表征技术的完善

表征结果的好坏,取决于所使用的 THz 激光源和探测器的性能与水平,一套稳定可靠的表征系统是实现可重复、良好表征结果的重要基础。

4.1 THz 激光源装置的改进

在前文介绍的 THz 光电表征技术中,THz QCL 激光的输出通常采用端面输出或者外部 OAP 耦合的方式。然而,THz QCL 输出激光有一个特点,在激光器输出端面处,生长厚度方向的尺寸(约为 $10\ \mu\text{m}$)比输出激光波长(约为 $100\ \mu\text{m}$)小很多,导致输出激光呈现环状和发散特性,尤其是双面金属波导结构的器件^[47]。在需要均匀 THz 光束或者高斯分布光束的场合,就需要对 THz QCL 进行工艺改进或者激光耦合改进。对于干涉问题,可以采用工艺改进的办法,比如采用三阶分布式光栅结构^[48]或者端面刻蚀技术^[49]等。

在这里介绍一种简单有效的改善器件输出光束的有效方法,我们称之为内耦合方法。将定制的小型 OAP 放置于 THz QCL 冷却装置内,通过微调结构将 THz QCL 的激光输出端面精确移动至内置 OAP 的焦点处(图 22),所用小型 OAP 直径 $12.7\ \text{mm}$,焦距 $6.8\ \text{mm}$ 。在耦合输出的准平行 THz 光束中放置一个同光轴的可变孔径光阑,通过调节光阑的直径,获得需要的准平行高斯光束的尺寸。

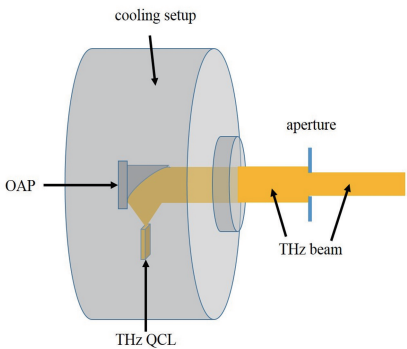


图 22 基于内置小型 OAP 高效耦合的装置及光束输出示意图

Fig. 22 Schematic of a mini-type OAP coupled setup and the output THz beam

采用一个 THz 阵列探测器对 THz 光束的二维轮廓进行表征,表征时光阑放置于距离 THz QCL 出光端面 $100\ \text{mm}$ 处,分别获得了无光阑时距离端面 $150\ \text{mm}$ 处、有光阑时距离端面 $150\ \text{mm}$ 处和有光阑时距离端面 $200\ \text{mm}$ 处的光斑轮廓及二维强度分布(图 23),被测 THz QCL 的中心工作频率为

$4.3\ \text{THz}$ 。光束轮廓测量采用的 THz 阵列为 NEC T0831C 型,像元数为 $320\ \text{pixel} \times 240\ \text{pixel}$,单像素尺寸为 $23.5\ \mu\text{m}$ 。经过分析计算得出,图 23(b)和 23(c)中的光斑直径分别为 $2\ \text{mm}$ 和 $3.6\ \text{mm}$,两处测量位置相距 $50\ \text{mm}$,经过上述方法改进后 THz 激光束的发散角为 1.86° 。

最后,分析了太赫兹探测阵列敏感面距 THz QCL 出光端面 $200\ \text{mm}$ 处 THz 激光光斑的高斯特性(图 24),采用高斯强度拟合法对 $Y=0\ \text{pixel}$ 处的激光强度分布曲线进行拟合。结果表明, $Y=0\ \text{pixel}$ 处激光强度分布曲线的高斯特性明显,半峰全宽为 $116\ \text{pixel}$,计算得到半峰全宽的尺寸为 $116\ \text{pixel} \times 23.5\ \mu\text{m}/\text{pixel} = 2726\ \mu\text{m}$,由图可知 $X=0\ \text{pixel}$ 处有类似的曲线形状,高斯拟合的半峰全宽与 $Y=0\ \text{pixel}$ 处相近。相比外部 OAP 耦合的方法,上述方法不仅有效降低了 THz 准高斯平行激光束产生装置的体积,而且利用 OAP 表面对 THz 激光的高反射率来有效减小耦合过程中对激光功率的损耗。因此,上述内耦合方法具有收集效率高、反射能量损耗小等优点。

另外,采用太赫兹阵列探测器进行激光束的准直校准,用可变孔径光阑进行光束优选,产生的 THz 激光束具有平行度高、高斯分布形态明显等优点,可以为 THz 探测、成像和通信应用提供一种稳定可靠、光束质量优异的激光源。从改善方式所采用的结构来看,上述方法非常适合于单面金属波导结构较大尺寸大功率 THz QCL 输出激光的有效耦合。

除了光束质量的改进与表征,前文提到的 THz 激光源输出功率稳定性(图 2)和激射频率稳定性也是未来需要改进和表征的性能,主要从器件的工艺可靠性和驱动电路性能着手,以便为器件的光频梳、标准源、本地振荡源等应用提供良好的技术支撑。

4.2 THz 探测装置的改进

探测率和响应率是 THz 探测器的关键指标,前文介绍的 THz 光电表征技术中 THz QWP 通常采用自由空间的 OAP 光路进行耦合,探测器仅用到了器件的敏感面。由于探测器敏感面比较小(mm 量级尺寸),在实际表征和应用过程中,仅靠 OAP 会聚和器件的敏感面难以收集全部有用的 THz 激光,尤其是在大装置的性能表征过程中,比如自由电子激光 THz 辐射源的探测,涉及的 THz 光路在装置调试过程中并不完善,进入探测装置的 THz 激光束尺寸较大,需要采用一种可以有效收集大部分激

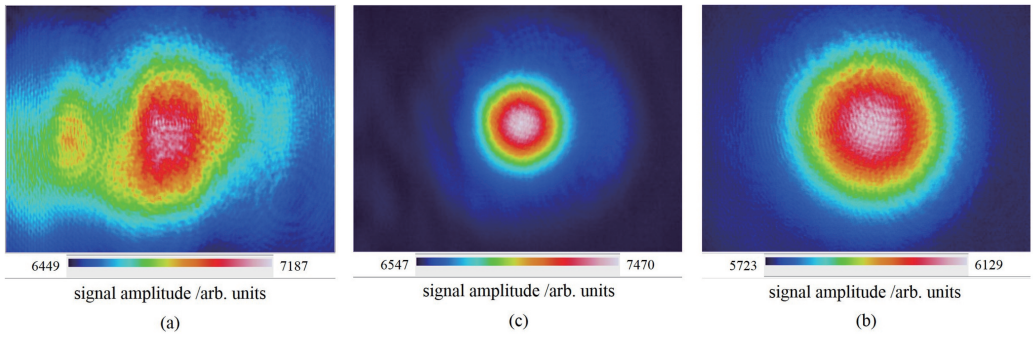


图 23 距离 THz QCL 端面一定距离处的激光束二维能量分布。(a)距离端面 150 mm, 无光阑;
(b)距离端面 150 mm, 有光阑;(c)距离端面 200 mm, 有光阑

Fig. 23 Two-dimensional beam pattern of the THz light at a certain distance from the THz QCL end facet. (a) The distance is 150 mm, no aperture; (b) the distance is 150 mm, with aperture; (c) the distance is 200 mm, with aperture

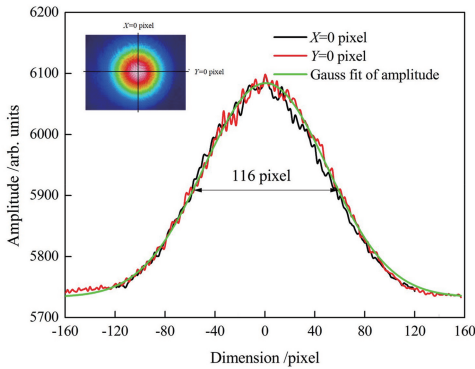


图 24 准高斯分布 THz 光斑在 $X=0$ pixel 和 $Y=0$ pixel 处的强度曲线和高斯拟合曲线(插图:光斑的二维轮廓)

Fig. 24 Amplitude curves and the corresponding Gauss fitting curve of the quasi-Gauss distributed THz beam spot at $X=0$ pixel and $Y=0$ pixel (inset: 2D profile of the THz beam spot)

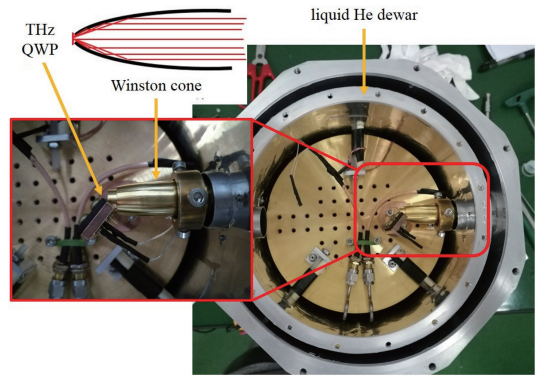


图 25 安装于液氦杜瓦的 THz QWP、耦合 Winston 光锥照片及光收集示意图

Fig. 25 Photographs of the THz QWP and the coupling Winston cone fixed in the liquid He dewar, and schematic of gathering THz light

光的集成装置。

为此,采用基于 Winston 光锥的 THz 激光耦合技术,将绝大部分准平行激光会聚于 THz QWP 敏感面上(图 25),这种方法已应用于热辐射计等低温热探测器装置中,能大幅提高探测装置的响应率。这主要是由于当入射 THz 激光光束尺寸较大时,THz QWP 敏感面本身能收集的信号很少,增加光锥作为耦合装置后,可大幅度增加探测装置的有效探测面积。

如图 26 所示,THz QWP 的敏感面尺寸为 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ (方块区域),Winston 光锥入口的内径为 10 mm (圆形区域),出口内径为 1 mm ,THz 激光从右边入射经光锥收集后会聚至 THz QWP 敏感面上。由图 26 对比分析可知,采用光锥后,THz QWP 等效收集面积变为直径 10 mm 的圆形区域,有效探测面积提高至原来的 78.5 倍,接近两

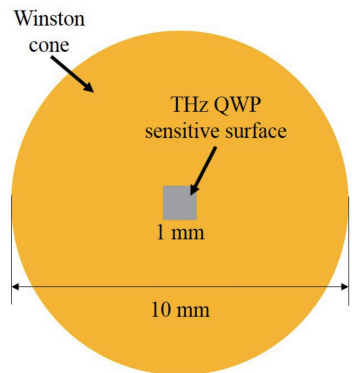


图 26 Winston 光锥入口内径(圆形)和 THz QWP 敏感面区域(方形)

Fig. 26 Comparison between the inner diameter of entrance of a Winston cone (circle) and the size of the THz QWP (square)

个数量级。

除了收集效率的提高,目前 THz QWP 的信号放大仍然采用比较传统的电流放大技术,为了大幅

提高器件的探测速度,大带宽的低噪放是必要的配置,同时基于液氮杜瓦的 THz QWP 低温跨阻放大技术也是未来需要重点开发的重要基础技术。

5 结束语

围绕基于 THz 半导体量子器件的光电表征技术,介绍了 THz QCL、THz QWP 的工作原理和最新进展,详细阐述了脉冲激射 THz QCL 发射谱和脉冲峰值功率的测量、THz QWP 电流响应率的标定等表征技术,给出了上述表征技术在 THz 无线信号传输、THz 快速调制与探测以及 THz 扫描成像技术中的应用实例。最后,对 THz 表征技术涉及的激光源输出光束质量、探测装置有效探测面积等进行了详细论述。我们认为进行上述改进和器件性能的提高之后,THz QCL 和 THz QWP 及其光电表征技术有望在 THz 标准源、本地振荡源、光频梳技术、高速探测技术和近场显微成像技术等方面获得广泛应用。

参 考 文 献

- [1] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, *et al.* Terahertz semiconductor-heterostructure laser [J]. *Nature*, 2002, 417(6885): 156-159.
- [2] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, *et al.* Terahertz quantum-well photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(20): 4068-4070.
- [3] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(2): 97-105.
- [4] Liang G Z, Liu T, Wang Q J. Recent developments of terahertz quantum cascade lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1200118.
- [5] Mittleman D M. Twenty years of terahertz imaging [Invited] [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9417-9431.
- [6] Sizov F. Terahertz radiation detectors: the state-of-the-art [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2018, 33(12): 123001.
- [7] Tan Z Y, Wan W J, Li H, *et al.* Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 68-76.
谭智勇, 万文坚, 黎华, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展 [J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 68-76.
- [8] Fatholouloumi 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]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3866-3876.
- [9] Wan W J, Li H, Cao J C. Homogeneous spectral broadening of pulsed terahertz quantum cascade lasers by radio frequency modulation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 980-989.
- [10] Li L H, Zhu J X, Chen L, *et al.* The MBE growth and optimization of high performance terahertz frequency quantum cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2720-2729.
- [11] Wienold M, Röben 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]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3334-3348.
- [12] Wang X M, Shen C L, Jiang T, *et al.* High-power terahertz quantum cascade lasers with ~0.23 W in continuous wave mode [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(7): 075210.
- [13] Vitiello M S, Consolino L, Bartalini S, *et al.* Quantum-limited frequency fluctuations in a terahertz laser [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(8): 525-528.
- [14] Li H, Wan W J, Tan Z Y, *et al.* 6.2-GHz modulated terahertz light detection using fast terahertz quantum well photodetectors [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3452.
- [15] Zhou Z T, Zhou T, Zhang S Q, *et al.* Multicolor T-ray imaging using multispectral metamaterials [J]. *Advanced Science*, 2018, 5(7): 1700982.
- [16] Kliebisch O, Heinecke D C, Barbieri S, *et al.* Unambiguous real-time terahertz frequency metrology using dual 10 GHz femtosecond frequency combs [J]. *Optica*, 2018, 5(11): 1431-1437.
- [17] Richter H, Greiner-Bär M, Pavlov S G, *et al.* A compact, continuous-wave terahertz source based on a quantum-cascade laser and a miniature cryocooler [J]. *Optics Express*, 2010, 18(10): 10177-10187.
- [18] Schneider H, Liu H C. Quantum well infrared photodetectors: physics and applications [M]. Heidelberg: Springer, 2006: 45-81.
- [19] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, *et al.* Many-body effects on terahertz quantum well detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(20): 201101.
- [20] Guo X G, Cao J C, Zhang R, *et al.* Recent progress in terahertz quantum-well photodetectors [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(1): 8500508.
- [21] Luo H, Liu H C, Song C Y, *et al.* Background-limited terahertz quantum-well photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(23): 231103.
- [22] Franke C, Walther M, Helm M, *et al.* Two-photon quantum well infrared photodetectors below

- 6 THz[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70: 30-33.
- [23] Zhang R, Shao D X, Fu Z L, *et al.* Terahertz quantum well photodetectors with metal-grating couplers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 3800407.
- [24] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R, *et al.* Terahertz free space communications demonstration with quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45 (18): 952-954.
- [25] Tan Z Y, Zhou T, Cao J C, *et al.* Terahertz imaging with quantum-cascade laser and quantum-well photodetector [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(14): 1344-1346.
- [26] Gu L, Tan Z Y, Wu Q Z, *et al.* 20 Mbps wireless communication demonstration using terahertz quantum devices [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(8): 081402.
- [27] Wang H X, Zhang R, Wang F, *et al.* Two-colour THz quantum well photodetectors [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(16): 1129-1130.
- [28] Wang H X, Fu Z L, Shao D X, *et al.* Broadband bias-tunable terahertz photodetector using asymmetric GaAs/AlGaAs step multi-quantum well [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(17): 171107.
- [29] Jia J Y, Wang T M, Zhang Y H, *et al.* High-temperature photon-noise-limited performance terahertz quantum-well photodetectors [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2015, 5(5): 715-724.
- [30] Fatholouloumi S, Dupont E, Ban D Y, *et al.* Time-resolved thermal quenching of THz quantum cascade lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(3): 396-404.
- [31] Patrashin M, Hosako I. Terahertz frontside-illuminated quantum-well photodetector [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(2): 168-170.
- [32] Fu Z L, Gu L L, Guo X G, *et al.* Frequency up-conversion photon-type terahertz imager [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 25383.
- [33] Tan Z Y, Guo X G, Cao J C, *et al.* Emission spectra of terahertz quantum-cascade lasers based on the terahertz quantum-well photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4): 2391-2395.
谭智勇, 郭旭光, 曹俊诚, 等. 基于太赫兹量子阱探测器的太赫兹量子级联激光器发射谱研究 [J]. *物理学报*, 2010, 59(4): 2391-2395.
- [34] Dean P, Valavanis A, Keeley J, *et al.* Terahertz imaging using quantum cascade lasers: a review of systems and applications [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, 47(37): 374008.
- [35] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J, *et al.* Wireless communication demonstration at 4.1 THz using quantum cascade laser and quantum well photodetector [J]. *Electronics Letters*, 2011, 47 (17): 1002-1004.
- [36] Chen Z, Gu L, Tan Z Y, *et al.* Real-time video signal transmission over a terahertz communication link [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11 (11): 112001.
- [37] Gellie P, Barbieri S, Lampin J F, *et al.* Injection-locking of terahertz quantum cascade lasers up to 35 GHz using RF amplitude modulation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 20799-20816.
- [38] Tan Z Y, Li H, Wan W J, *et al.* Direct detection of a fast modulated terahertz light with a spectrally matched quantum-well photodetector [J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(2): 91-93.
- [39] Yang M W, Ji H B, Tan Z Y, *et al.* Terahertz joint analyzer with imaging and spectrum detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0611004.
杨旻蔚, 季海兵, 谭智勇, 等. 成像与成谱联动的太赫兹分析检测仪 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0611004.
- [40] Guerboukha H, Nallappan K, Skorobogatiy M. Toward real-time terahertz imaging [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2018, 10(4): 843-938.
- [41] Hillger P, Grzyb J, Jain R, *et al.* Terahertz imaging and sensing applications with silicon-based technologies [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, 9(1): 1-19.
- [42] Tan Z Y, Zhou T, Fu Z L, *et al.* Reflection imaging with terahertz quantum-cascade laser and quantum-well photodetector [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50 (5): 389-391.
- [43] Qiu F C, Tan Z Y, Fu Z L, *et al.* Reflective scanning imaging based on a fast terahertz photodetector [J]. *Optics Communications*, 2018, 427: 170-174.
- [44] Liu Y, Zhao G Z, Shen Y C. Polarization imaging detection based on the continuous terahertz wave [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(1): 0111001.
刘影, 赵国忠, 申彦春. 连续太赫兹波偏振成像检测 [J]. *中国激光*, 2016, 43(1): 0111001.
- [45] Zang X F, Liu S J, Cheng Q Q, *et al.* Lower-order-symmetry induced bandwidth-controllable terahertz polarization converter [J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(11): 115103.
- [46] Bitzer A, Ortner A, Merbold H, *et al.* Terahertz near-field microscopy of complementary planar metamaterials: Babinet's principle [J]. *Optics*

- Express, 2011, 19(3): 2537-2545.
- [47] Adam A J L, Kašalynas I, Hovenier J N, *et al.* Beam patterns of terahertz quantum cascade lasers with subwavelength cavity dimensions [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(15): 151105.
- [48] Amanti M I, Fischer M, Scalari G, *et al.* Low-divergence single-mode terahertz quantum cascade laser [J]. Nature Photonics, 2009, 3(10): 586-590.
- [49] Yu N F, Wang Q J, Kats M A, *et al.* Designer spoof surface plasmon structures collimate terahertz laser beams [J]. Nature Materials, 2010, 9(9): 730-735.