

# 基于太赫兹量子级联激光器的无线信号传输的实现\*

谭智勇 陈镇 韩英军 张戎 黎华 郭旭光 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)

(2011年8月1日收到; 2011年9月6日收到修改稿)

文章采用连续波激射的太赫兹量子级联激光器 (THz QCL) 为发射端、光谱匹配的 THz 量子阱探测器 (THz QWP) 为接收端, 搭建了基于 THz 波的无线传输演示系统. 测量并分析了该演示系统的传输带宽. 采用搭建的无线传输系统演示了基于 4.13 THz 电磁波的图片文件的无线传输过程, 得到了与源文件一致的结果, 验证了采用 THz QCL 和 THz QWP 进行 THz 信号无线传输的可行性. 最后, 分析了演示系统的传输速率, 给出了提高系统传输速率的方法.

**关键词:** 太赫兹, 量子级联激光器, 量子阱探测器, 太赫兹无线通信

**PACS:** 87.50.U-, 42.55.Px, 85.60.-q, 42.79.Sz

## 1 引言

随着对太赫兹 (THz) 频段重要辐射源和探测器研究的日趋深入<sup>[1,2]</sup>, 研究人员逐渐将 THz 技术及其应用领域作为研究的重点, 以推动 THz 技术领域的发展, 开发出能服务社会的 THz 新技术, 如 THz 成像技术<sup>[3,4]</sup> 和无线通信技术<sup>[5-8]</sup>.

作为 THz 频段重要器件的 THz 量子级联激光器 (THz QCL)<sup>[9]</sup> 和 THz 量子阱探测器 (THz QWP)<sup>[10]</sup> 是便携而紧凑型 THz 应用系统中不可或缺的两种器件. 随着研究的深入, THz QCLs 在理论设计和实验研制上均取得了重要进展<sup>[11-14]</sup>. THz QCL 工作的一大特点是其内部输运的载流子寿命很短, 因此可直接对激光器进行高速调制, 最新的研究结果表明, 采用 Bias-Tee 装置对 THz QCL 进行直接调制, 其调制频率可高达 35 GHz<sup>[15]</sup>. 与 THz QCL 激射频率相匹配的 THz QWP 是中红外量子阱探测器在 THz 波段的扩展, 是一种窄谱的低维半导体探测器<sup>[16]</sup>. 中红外量子阱探测器的研究表明, 由于内在的短载流子寿命 ( $\tau \sim 5$  ps) 特性, 探测器具有非常短的瞬时响应时间, 其高频响应速

率可高达 110 GHz<sup>[17]</sup>. 因此, THz QWP 远比目前使用的 THz 热探测器, 如氘化硫酸三甘肽 (deuterated triglycine sulfate, DTGS) 探测器、焦热电探测器以及高利池 (Golay cell) 探测器等的响应时间 (约 20 ms) 短得多, 可作为 THz 频段的高速探测器<sup>[16]</sup>. THz QWP 自出现以来, 其工作性能也不断提高<sup>[18-21]</sup>, 并在 THz 应用研究中发挥着越来越重要的作用<sup>[22]</sup>. 早在 2007 年, Hosako 等人就建议 THz QWP 用于 THz QCL 激光辐射的探测中<sup>[23]</sup>. 随后, 加拿大的研究小组采用脉冲激射的 THz QCL 为发射源, THz QWP 为接收装置, 实现了音频信号的无线传输<sup>[24]</sup>, 传输频点为 3.8 THz.

本文采用连续激射的 THz QCL 作为发射源、光谱匹配的 THz QWP 作为信号探测器, 搭建出基于 THz 波的无线发射接收系统. 通过改变 THz QCL 的调制信号频率, 测量得到发射接收系统的传输带宽, 分析了限制系统传输带宽的因素. 最后采用该无线发射接收系统演示了图片文件的无线传输过程, 并分析了影响系统传输速率的主要因素, 为进一步提高系统的传输速率, 发展基于 THz QCL 的无线通信系统奠定实验基础.

\* 863 主题项目 (批准号: 2011AA010205), 国家自然科学基金 (批准号: 61131006, 61021064, 61176086), 国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2011YQ150021), 中科院重要方向项目 (批准号: YYYJ-1123-1), 上海市基础研究重点基金 (批准号: 10JC1417000) 和上海市自然科学基金 (批准号: 11ZR1444200) 资助的课题.

† E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn

## 2 实验装置及工作原理

整个 THz 无线传输演示系统的示意图如图 1 所示. 其中发射端包括 THz QCL 器件及其制冷系统、驱动电源, 接收端包括 THz QWP 及其制冷系统、信号提取电路, 光路准直部分包括两个  $90^\circ$  的离轴抛物面反射镜 (反射镜 1 和反射镜 2). 系统中所用器件 (THz QCL 和 THz QWP) 的有源区结构均采用分子束外延 (MBE) 方法在半绝缘的 GaAs 衬底上生长. THz QCL 有源区结构为“四阱共振声子”结构<sup>[21]</sup>, 器件波导结构为双面金属波导结构, 器件尺寸为  $40\ \mu\text{m} \times 1\ \text{mm}$ , 器件的激光频率为  $4.1\ \text{THz}$ <sup>[16]</sup>. THz QWP 的有源区结构共包含 23 个周期, 每个周期由一层  $22.1\ \text{nm}$  厚的 GaAs 量子阱层和一层  $95.1\ \text{nm}$  厚的  $\text{Al}_{0.015}\text{Ga}_{0.985}\text{As}$  势垒层组成, 器件尺寸为  $800\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$ , 峰值探测频率为  $3.2\ \text{THz}$ <sup>[16,18]</sup>. 上述器件台面结构均采用标准的 GaAs 工艺制作.

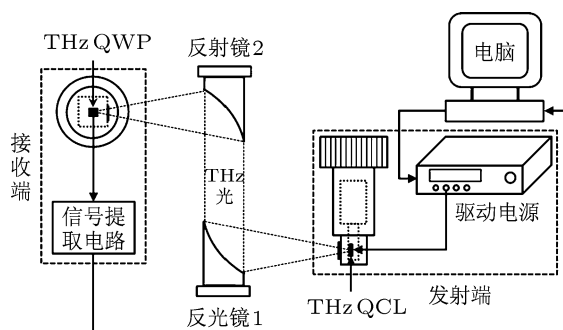


图 1 THz 无线传输演示系统示意图 (其中反射镜 1 和反射镜 2 均为  $90^\circ$  离轴抛物面反射镜)

整个 THz 无线传输系统的工作过程如下: 采用 LabView 软件进行编程, 研制出整个系统的软件控制模块; 控制软件首先发送指令, 控制 THz QCL 驱动电源的开关状态, 进而控制 THz QCL 器件的工作与否, 并使之输出强度与控制信号变化相一致的 THz 波; 接收端的 THz QWP 对变化的 THz 波进行响应, 产生相应变化的电信号, 该电信号经信号提取电路后被输送至控制电脑中, 最后, 控制软件对信号提取电路返回的电信号进行读取并将其还原, 从而完成了基于 THz 波的无线传输过程.

## 3 实验结果与讨论

首先, 我们测量了 THz 无线传输系统中所采

用的发射端 THz QCL 器件的激光发射谱和接收端 THz QWP 器件的光电流谱, 二者的归一化光谱对比结果如图 2 所示. 其中 THz QCL 的测试条件为:  $T = 10\ \text{K}$ , 驱动电流  $I = 0.412\ \text{A}$ , 对应的外加偏压  $V = 12.4\ \text{V}$ ; THz QWP 的测试条件为:  $T = 3.15\ \text{K}$ , 外加偏压  $V = 19.8\ \text{mV}$ . 在上述测试条件下, THz QCL 的激光频率为  $4.13\ \text{THz}$ , THz QWP 的峰值探测频率为  $3.22\ \text{THz}$ , 且在  $3.08\text{--}4.71\ \text{THz}$  范围内有较强的响应幅度 (归一化幅度  $\geq 50\%$ ). 由图 2 可知, THz QCL 的激光发射谱很窄, 其频率范围对应于 THz QWP 光电流谱中较为平坦的区域. 因此, 采用上述工作状态下的 THz QWP 来探测 THz QCL 的激光辐射是合理可行的, 且探测结果不需要光谱校准.

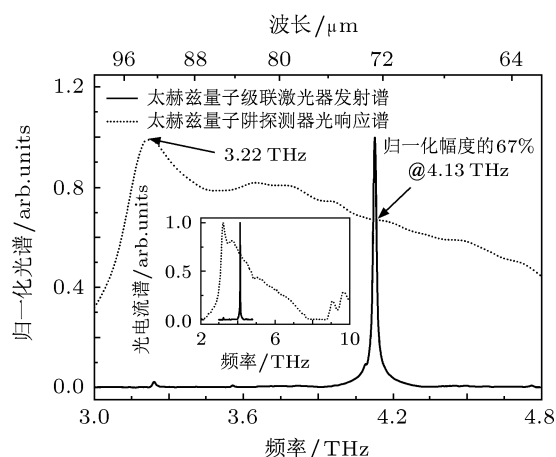


图 2 归一化的 THz QCL 发射谱与 THz QWP 光电流谱对比图 (其中插图为更宽频率范围内二者的对比)

传输带宽是 THz 无线传输系统的重要指标. 采用上述无线发射接收系统, 我们测量了不同 THz QCL 调制频率下 THz QWP 的响应波形. 测量时采用安捷伦 8114A 型脉冲电压源对 THz QCL 直接进行驱动, 测量结果如图 3 所示. 其中图 3 中的实线均表示 THz QCL 的驱动电压信号波形, 图 3(a) 和 (b) 中的短虚线分别表示 THz QCL 的调制频率 (重复频率, RP) 为  $1\ \text{kHz}$  和  $10\ \text{kHz}$  时 THz QWP 的响应信号波形. 由图 3(b) 可知, 随着发射端调制信号变为低电平, 接收端的信号响应在还未完全达到最大值便开始下降. 根据方波信号带宽和信号上升沿的经验关系式  $\text{BW} = 0.35/\text{RT}$ , 可得被测系统的传输带宽为  $5.8\ \text{kHz}$  (其中 RT 表示信号从方波幅度的  $10\%$  上升至幅度的  $90\%$  所经历的时间). 这主要是受系统接收端 THz QWP 器件制冷系统

中信号线带宽(约 10 kHz)的限制. 实验结果表明, 采用高频线连接, 接收端的响应带宽至少可以达到 455 kHz<sup>[24]</sup>. 因此, 通过提高系统中制冷部分信号线的带宽, 可大幅提高发射端的调制速率和接收端的响应速率, 进而大幅提高系统的传输带宽.

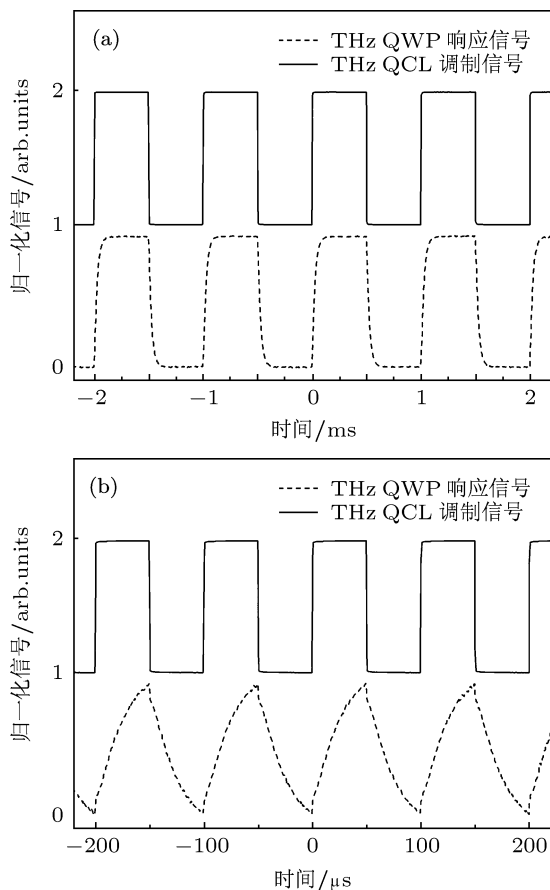


图3 THz QCL 的调制频率(重复频率, RP)分别为 1 kHz(a)和 10 kHz (b)时, THz QWP 的响应信号

最后, 我们采用该无线传输系统, 演示了基于 4.13 THz 波的文本文件和图片文件等电子文件的无线传输过程. 传输过程中, 我们首先采用编写的 LabView 软件将电子文件转换成二进制编码(见图 4), 通过 GPIB 数据线实现对 THz QCL 驱动电源的控制, 即编码“1”控制电源开启, THz QCL 激射出 4.13 THz 的电磁波, “0”控制电源关闭, THz QCL 不产生激射 THz 波. 上述被“调制”输出的 THz 辐射到达接收端后, THz QWP 对其进行响应, 产生相应的电信号, 将该信号进行提取并处理后得到与控制 THz QCL 驱动电源的信号相一致的二进制编码. 最后, 将二进制编码还原成电子文件, 即得到了与源图片文件相一致的信息(见图 4), 从而实现了基于 THz 波的电子文件的无线传输过程.

上述无线传输过程中, 因控制过程涉及控制电脑及 LabView 软件, 测量结果表明, 采用 LabView 软件控制电压源开关的过程产生的延时可达几百毫秒, 严重影响了传输系统的传输速率. 因此, 在今后的工作中需要采用单独的调制和解调电路来提高系统的传输速率, 如将发射端和接收端的基带数字信号部分均用单片机开发板或 ARM 板(advanced RISC machines)电路. 可以预见, 结合成熟的电路板制作技术, 有望将 THz QCL 的调制速率提高至 10 Mbps 甚至更高, 以实现更大速率的 THz 无线传输过程.

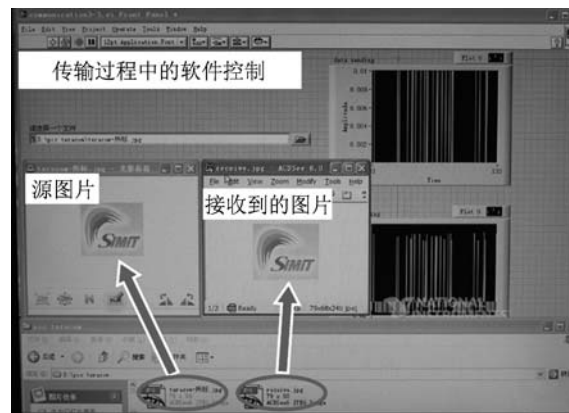


图4 基于 THz 波的图片文件无线传输过程中的软件控制及结果对比

## 4 结论

本文采用连续激射的 THz QCL 为发射端、THz QWP 为接收装置, 搭建了基于 THz 波的无线传输演示系统. 测量得到了传输系统的最大带宽为 5.8 kHz, 这一带宽值主要受限于接收端 THz QWP 器件制冷系统中信号线的带宽(约 10 kHz). 随后, 我们采用搭建的 THz 演示系统实现了图片文件的无线传输, 传输频点为 4.13 THz. 在对传输系统带宽和传输演示过程的分析中, 我们认为要提高系统传输速率必须实现对 THz QCL 的快速调制以及 THz QWP 响应信号的快速提取和处理. 可以预见, 结合成熟的电路板制作技术, 有望大幅度提高 THz QCL 的调制速率以及 THz QWP 响应信号的处理速率, 以实现更大速率的 THz 无线传输过程.

作者衷心感谢与上海交通大学刘惠春教授十分有益的讨论.

- [1] Kumar S 2011 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17** 38
- [2] Zhang R, Guo X G, Song C Y, Buchanan M, Wasilewski Z R, Cao J C, Liu H C 2011 *IEEE Electron Dev. Lett.* **32** 659
- [3] Cooper K B, Dengler R J, Chattopadhyay G, Schlecht E, Gill J, Skalaré A, Mehdi I, Siegel P H 2008 *IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett.* **18** 64
- [4] Lee A W M, Qin Q, Kumar S, Williams B S, Hu Q, Reno J L 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 141125
- [5] Tonouchi M 2007 *Nature Photonics* **1** 97
- [6] Nagatsuma T, Song H J, Kado Y 2010 *THz. Sci. Technol.* **3** 55
- [7] Takahashi H, Kosugi T, Hirata A, Murata K, Kukutsu N 2010 *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* **58** 4072
- [8] Zhang R, Cao J C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3924 (in Chinese) [张戎, 曹俊诚 2010 物理学报 **59** 3924]
- [9] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F, Beere H E, Linfield E H, Davies A G, Ritchie D A, Iotti R, Rossi F 2002 *Nature* **417** 156
- [10] Liu H C, Song C Y, Spring Thorpe A J, Cao J C 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 4068
- [11] Kumar S, Hu Q, Reno J L 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 131105
- [12] Wanke M. C., Young E W, Nordquist C D, Cich M J, Grine A D, Fuller C T, Reno J L, Lee M 2010 *Nat. Photon.* **4** 565
- [13] Kumar S, Chan C W I, Hu Q, Reno J L 2011 *Nat. Phys.* **7** 166
- [14] Amanti M I, Fischer M, Scalari G, Beck M, Faist J 2009 *Nat. Photon.* **3** 586
- [15] Gellie P, Barbieri S, Lampin J -F, Filloux P, Manquest C, Sirtori C, Sagnes I, Khanna S P, Linfield E H, Davies A G, Beere H, Ritchie D 2010 *Opt. Express* **18** 20799
- [16] Tan Z Y, Guo X G, Cao J C, Li H, Han Y J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2391 (in Chinese) [谭智勇, 郭旭光, 曹俊诚, 黎华, 韩英军 2010 物理学报 **59** 2391]
- [17] Grant P D, Dudek R, Buchanan M, Liu H C 2006 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **18** 2218
- [18] Luo H, Liu H C, Song C Y, Wasilewski Z R 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 231103
- [19] Patrashin M, Hosako I 2008 *Opt. Lett.* **33** 168
- [20] Guo X G, Tan Z Y, Cao J C, Liu H C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 201101
- [21] Graf M, Dupont E, Luo H, Haffouz S, Wasilewski Z R, SpringThorpe A J, Ban D, Liu H C 2009 *Infrared Phys. Technol.* **52** 289
- [22] Patrashin M, Hosako I, Merken P 2006 *Proc. SPIE* **6038** 60380H
- [23] Hosako I, Sekine N, Patrashin M, Yasuda H 2007 *Proc. SPIE* **6772** 67720R
- [24] Grant P D, Laframboise S R, Dudek R, Graf M, Bezinger A, Liu H C 2009 *Electron. Lett.* **45** 952

# Experimental realization of wireless transmission based on terahertz quantumcascade laser\*

Tan Zhi-Yong Chen Zhen Han Ying-Jun Zhang Rong Li Hua  
Guo Xu-Guang Cao Jun-Cheng<sup>†</sup>

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

(Received 1 August 2011; revised manuscript received 6 September 2011)

## Abstract

A terahertz wireless transmission system is constructed by using a continuous wave terahertz quantum-cascade laser (THz QCL) and a spectrally-matched terahertz quantum-well photodetector (THz QWP). The transmission bandwidth of the system is measured. The transmission processes at 4.13 THz of a picture file are demonstrated by employing the above system, and the both message totally consistent with the original one are received correctly. Hence, the feasibility of wireless transmission based on THz QCL and THz QWP devices is confirmed. Finally, we analyze the transmission rate of the demonstrating system and give the improving methods.

**Keywords:** terahertz, quantum-cascade lasers, quantum-well photodetectors, terahertz wireless communication

**PACS:** 87.50.U–, 42.55.Px, 85.60.–q, 42.79.Sz

---

\* Project supported by the 863 Program of China (Grant No. 2011AA010205), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61131006, 61021064, and 61176086), the Major National Development Project of Scientific Instrument and Equipment (Grant No. 2011YQ150021), the Major Project (Project No. YYYJ-1123-1), the Chinese Academy of Sciences, and the Shanghai Municipal Commission of Science and Technology (Grant Nos. 10JC1417000, 11ZR1444200).

<sup>†</sup> E-mail: jccao@mail.sim.ac.cn