

# 太赫兹量子器件光电测试技术与系统\*

谭智勇<sup>1,2</sup> 曹俊诚<sup>1,2,†</sup>

(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)

2022-03-01 收到

† email: jccao@mail.sim.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220505

## Photoelectric measurement based on terahertz quantum devices and systems

TAN Zhi-Yong<sup>1,2</sup> CAO Jun-Cheng<sup>1,2,†</sup>

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

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

**摘要** 光电测试技术是太赫兹辐射研究的重要基础技术。文章首先介绍两种太赫兹量子器件的工作原理和最新进展，随后主要介绍太赫兹量子器件在脉冲激光功率测量技术、快速调制与直接探测技术、激光偏振转换与测量以及光纤损耗测量技术及相关测试系统中的应用。最后总结基于太赫兹量子器件的光电测试技术的特点和优势，并对未来的发展进行展望。

**关键词** 太赫兹辐射, 光电测试技术, 量子级联激光器, 量子阱探测器

**Abstract** Photoelectric measurement is an important basic technology in studies of terahertz radiation. This paper first describes the principle of operation of two terahertz quantum devices and their latest development, followed by an introduction to their applications in pulsed light power measurement, fast modulation and direct detection of terahertz light, optical polarization conversion and measurement, terahertz fiber loss measurement, and related test systems. Finally, the characteristics and advantages of photoelectric measurement techniques based on terahertz quantum well devices are summarized, and future developments assessed.

**Keywords** terahertz radiation, photoelectric measurement, quantumcascade laser, quantum well photodetector

## 1 引言

太赫兹(THz)频段介于红外光与毫米波之间，是一段有待深入和全面研究的电磁波段。太赫兹频段覆盖 0.1—10 THz，对应波长 0.03—3 mm。在 20 世纪八、九十年代把太赫兹频段单独划分出

来研究和发展之前，这段电磁波通常被称为极远红外波段和毫米波段，对该频段的研究也主要集中于天文学和材料科学。随着材料技术、激光技术和能带工程的发展，紧凑型的太赫兹辐射源和

\* 国家自然科学基金(批准号: 61927813, 62035014)、上海市“科技创新行动计划”(批准号: 21DZ1101102)资助项目

探测器逐渐出现并获得性能上的不断提高<sup>[1, 2]</sup>。随着太赫兹辐射产生和探测手段的快速发展，该频段的光电测试技术和系统逐步得到完善和更新换代，一些传统方法难以准确测量的物理参数也可以较为方便地获得。该频段的光电测试技术与系统跟红外光和可见光的类似，主要以1—10 THz频段的光电技术为主；而小于1 THz的频段更多的是类似于毫米波和微波的测试技术与系统。光电测试技术是太赫兹频段应用技术的重要基础，涵盖了该频段的器件测量技术、光谱测量技术、光调制解调和发射接收技术等，相对应的系统包括太赫兹功率测量系统、快速光谱测量系统、无线信号传输系统、功能器件测量系统以及成像系统等，上述技术与系统在太赫兹应用领域发挥着重要作用。

在太赫兹频段逐渐成熟的辐射源和探测器中，以太赫兹量子级联激光器(quantum-cascade laser, QCL)和量子阱探测器(quantum-well photodetector, QWP)为代表的半导体多量子阱结构器件，因其制备工艺成熟、性能稳定、体积小、寿命长等特点而被广泛研究，并逐步应用于本地振荡源、快速探测与成像系统、无线信号传输系统中<sup>[1—5]</sup>。

## 2 太赫兹量子器件概述

### 2.1 太赫兹量子级联激光器

太赫兹量子器件通常指基于低维半导体材料的THz QCL和THz QWP。THz QCL是THz频段的主要激光源之一，工作频率可覆盖1—5 THz。它具有结构紧凑、体积小、易集成、寿命长、能量转换效率高等优点。THz QCL的工作过程主要由电子参与，是一种单极器件，其工作原理为：采用分子束外延生长技术，通过交替生长的化合物半导体(主要为GaAs/AlGaAs)材料薄层形成周期性低维半导体模块，每个周期包含多层量子阱层(GaAs材料)和势垒层(AlGaAs材料)，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太赫兹频段的光子，多个周期辐射出的太赫兹光子通过级联

的方式汇集，并在器件脊条形成的腔体中不断增益，最后形成太赫兹辐射输出<sup>[1, 5]</sup>。这种级联结构就像多级瀑布的水流形成的水势能一样，通过多级串联，实现能量的多级叠加。THz QCL自2002年首次被验证以来<sup>[6]</sup>，在工作温度、输出功率、光束质量方面发展迅速<sup>[7]</sup>，截至目前，THz QCL的激射频率可覆盖1.2—5.2 THz范围<sup>[2]</sup>，在脉冲激射模式下，最高工作温度可达250 K<sup>[8]</sup>，最高脉冲峰值功率已达到瓦级以上<sup>[9, 10]</sup>；在连续波模式下，最高工作温度为129 K<sup>[11]</sup>，最大输出功率为230 mW<sup>[12]</sup>。在器件激光耦合输出方面，采用超半球透镜可将光束发散角减小至3°以内<sup>[13]</sup>，采用内置反射镜可将光束发散性减小至2°以内<sup>[7]</sup>。在光源装置开发方面，斯特林制冷型太赫兹激光源最大有效输出功率大于4 mW<sup>[14]</sup>；液氮冷却型太赫兹激光源最大有效输出功率大于1 mW<sup>[7]</sup>。上述THz QCL输出激光的各项性能已基本满足太赫兹频段光路校准、光电测量和成像系统等应用。总体来说，基于THz QCL的激光源，其辐射功率已远远超过光学泵浦源和热辐射源，且与庞大而昂贵的超快激光源或气体激光器相比，THz QCL在构建紧凑型太赫兹光电测试系统和太赫兹应用系统方面更具优势<sup>[7, 15]</sup>。

### 2.2 太赫兹量子阱探测器

THz QWP<sup>[16]</sup>是太赫兹频段中颇具潜力的一种半导体光电探测器，它源于红外频段的量子阱结构探测器在太赫兹频段的延伸。与红外量子阱探测器一样，THz QWP具备有源区结构简单、探测响应速度快、工作性能稳定、易集成和损伤阈值高等优点，在2 THz以上频段具有较好的综合性能，特别适合太赫兹频段的高速探测与快速成像应用<sup>[7]</sup>。THz QWP的工作原理为：采用分子束外延生长技术，通过交替生长的化合物半导体(主要为GaAs/AlGaAs)材料薄层形成周期性低维半导体模块，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)，当外加太赫兹辐射作用于器件敏感面时，位于量子阱中束缚态的电子吸收太赫兹光子能量后跃迁至接近势垒边

的准连续态，形成光生载流子(电子)，并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，进而实现对太赫兹辐射的探测<sup>[7]</sup>。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，上述能量间隔可通过调节有源区势垒高度、量子阱宽度和阱中掺杂浓度等参数来改变，从而实现按需设计<sup>[17]</sup>。自从2004年世界上首个THz QWP由加拿大的Liu等研制成功后，器件在有源区结构优化、光电性能提高和应用研究<sup>[17-19]</sup>方面均取得了重要进展。截至目前，除了因GaAs材料剩余射线吸收带导致的器件无响应频段之外，太赫兹频段器件的峰值探测频率可覆盖1.5—10 THz，器件最大峰值响应率可达5 A/W以上，噪声等效功率(NEP)优于0.5 pW/Hz<sup>0.5</sup><sup>[20]</sup>。在器件应用研究方面，基于THz QWP的快速探测技术得到了较好的发展，分别应用于1 THz频段以上的太赫兹光无线信号传输系统<sup>[21]</sup>、快速调制激光的直接探测系统<sup>[22]</sup>以及太赫兹快速扫描成像系统<sup>[23]</sup>。此外，Fu等<sup>[24]</sup>采用频率上转换技术，实现了THz QWP与光电二极管(LED)在材料上的有效集成，研制出具有成像功能的太赫兹频率上转换探测芯片，并获得了很好的成像效果。

THz QCL和THz QWP器件性能的不断提高，为太赫兹频段技术和系统的发展提供了很好的辐射源和探测器，图1所示为一个峰值探测频率为

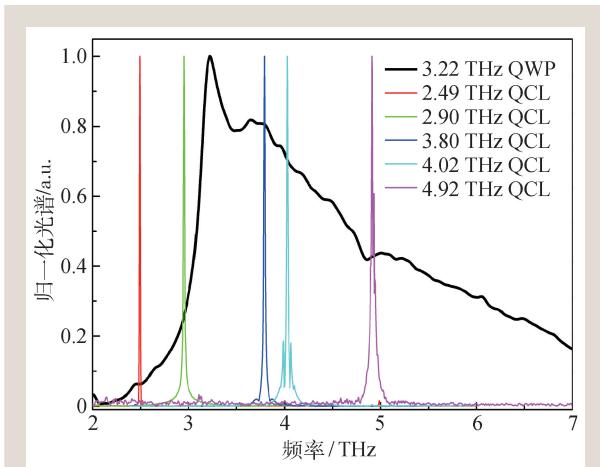


图1 1个THz QWP的归一化光响应谱与5个THz QCLs归一化发射谱对比图

3.22 THz的QWP器件光电流谱与多个THz QCLs激射频率的对照图。由图可知，在太赫兹光电测试系统中，一个THz QWP器件基本上可以覆盖2—5 THz频段所有THz QCL的工作频率，从而可以大大减少系统中探测器的数量，降低测试系统的构建成本。

### 3 基于太赫兹量子器件的光电测试技术与系统

#### 3.1 太赫兹脉冲激光峰值功率测量技术

输出功率是太赫兹频段激光器应用的重要性能指标，激光器输出功率的大小直接决定了其应用领域和范围。因此，如何精确地测量出器件的有效输出功率是器件应用之前的重要环节。脉冲激光是太赫兹应用系统中常用的激光状态，脉冲激光的重复频率通常在kHz量级以上，脉宽在微秒量级。在传统的基于热探测器的太赫兹脉冲光功率测量中，由于热探测器的响应时间大多数都在毫秒和亚毫秒量级，脉冲激光被热探测器以平均能量的形式测量到，然后再根据其占空比计算得到脉冲激光的峰值功率。然而，不同热探测器的响应时间和积分时间各有不同，得到的平均功率也有较大的起伏和差异，导致功率测量过程中因探测器带来的误差较大。为此，在太赫兹脉冲功率需要精确测量的系统中，需要一种可以将脉冲激光探测后还原成电驱动脉冲形状，并可根据探测信号的幅度直接得到脉冲激光功率的探测技术。

THz QWP作为在1.5—10 THz频段响应非常快速的一种探测器，在脉冲激光功率的测量方面颇具优势。采用具有快速响应特性的THz QWP和离轴抛物面反射镜(OAP)来直接表征脉冲激光的峰值功率，无需像热探测器那样进行包络积分，可直接根据探测器和放大器的参数计算得到脉冲激光的峰值功率。

图2为太赫兹脉冲激光器峰值功率测量装置示意图，脉冲驱动电源给太赫兹激光器供电，使激光器输出与电脉冲波形一致的太赫兹激光，同时将脉冲同步信号输入到显示波形信号的示波

器, THz QWP 探测到脉冲激光后产生相对应的脉冲光电流, 上述脉冲光电流被电流放大器放大后转换成电压信号, 然后输入示波器与电驱动脉冲信号进行对比显示。根据示波器上显示的探测信号波形幅度、电流放大器灵敏度和探测器响应率, 计算出到达 THz QWP 上太赫兹脉冲激光的峰值功率。

脉冲工作模式下的 THz QCL 通常由重复频率为 100 Hz—100 kHz、脉宽为 0.5—50  $\mu$ s 的电流或电压驱动。采用如图 2 所示的装置, 测量并计算得到了一个 THz QCL 的脉冲峰值功率, 其中器件的中心工作频率为 4.02 THz(图 1)。测量过程中, THz QWP 为电流响应率已知的标准探测器, 所用器件与文献[7]中报道的相同, 器件的峰值电流响应率为 0.52 A/W。由图 1 计算得到器件在 4.02 THz 处的实际电流响应率, 再根据图 3 绿色波形测得的信号幅度(1.64 V)和探测器前置放大器的放大灵敏度, 计算得出到达 THz QWP 的脉冲激光峰值功率为 4.5 mW。由于太赫兹脉冲激光到达 THz QWP 之前, 被低温装置上的聚乙烯窗口衰减, 经傅里叶变换光谱仪的测量, 低温恒温器上的高密度聚乙烯(HDPE, 厚度 3 mm)窗口在 4.02 THz 处的透过率为 0.61<sup>[7]</sup>。因此, 在不考虑测量装置收集效率和大气吸收的情况下, 输出脉冲激光的有效功率为  $4.5 \text{ mW} \div 0.61 \approx 7.38 \text{ mW}$ 。而实际上, 当考虑测量装置收集效率和大气吸收时, 从太赫兹激光器窗口处输出的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得到光学镜会聚焦点处太赫兹脉冲激光的峰值功率, 进而计算出太赫兹激光器的脉冲峰值输出功率, 为标准太赫兹激光源的应用提供了很好的测量技术基础。

### 3.2 太赫兹光快速调制技术与直接探测系统

太赫兹频段具有丰富的通信带宽资源, 是未来超宽带、大容量通信系统的潜在应用频段。太赫兹量子器件作为该频段非常重要的发射端和接收端器件, 是实现太赫兹光通信的两个关键器件。要实现大容量的太赫兹光通信系统, 首先要

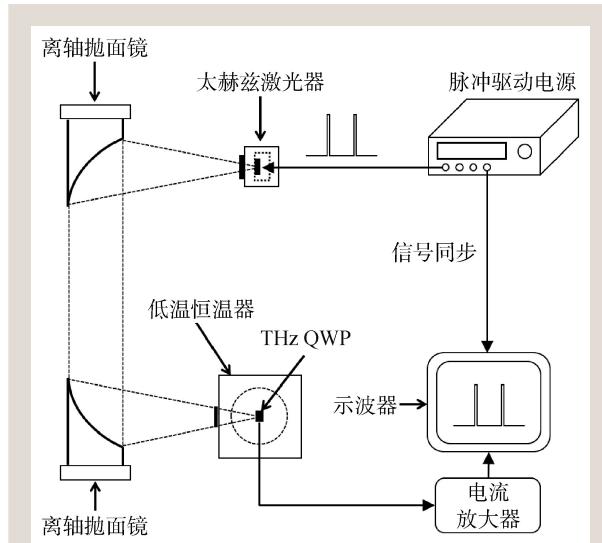


图 2 基于 THz QWP 的太赫兹脉冲激光器峰值功率测量装置示意图



图 3 THz QCL 驱动电压波形(上, 黄色)和 THz QWP 响应信号波形(下, 绿色)。

研究太赫兹量子器件的快速调制和探测响应性能。由于工作时, 器件内部具有皮秒量级的载流子跃迁过程, THz QCL 非常适合于快速的直接调制<sup>[25]</sup>, 因此, THz QCL 是 1—5 THz 频段首选的通信系统发射端器件。在探测端, THz QWP 的内在响应时间也在皮秒级, 是 2—7 THz 频段非常具有潜力的快速探测器, 也适合于高速探测和高速通信应用。于是 Chen 和 Gu 等<sup>[25, 26]</sup>采用 THz QCL 作为发射端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, 也充分验证了太赫兹量子器件在无线信号传输方面的应用性能。然而, 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

于上述两种器件的无线传输系统的链路带宽仅达到40 MHz水平<sup>[26]</sup>。我们必须寻找新的调制和解调方法，将两种太赫兹量子器件的内在高性能发挥出来。

尽管采用上转换探测的方法，THz QCL已被验证具有非常快速的被调制特性<sup>[27]</sup>，但对THz QCL输出的高速调制太赫兹光的直接探测因缺乏有效而快速的探测手段，一直未能解决。为此，Tan和Li等<sup>[22]</sup>提出了一种基于射频注入方法的太赫兹快速调制与直接探测系统，系统的电学连接与光路示意图如图4所示。为了实现对快速调制太赫兹光的直接探测，THz QWP采用传输线封装方式，其电极可以直接与传输线相连。具体的快速调制与探测过程为：首先给THz QCL施加直流偏压，使器件工作在激励阈值电压附近，随后将射频源产生的射频信号经电流加法器加载到THz QCL上，使其输出与射频信号同周期变化的太赫兹激光，THz QWP接收到被快速调制的太赫兹激光之后产生相应的光电流，通过另一个电流加法器输出至放大器，然后输入到示波器中进行显示，为了获得更稳定的信号波形，需将射频源的参考信号接入示波器或频谱分析仪中。根据示波器或频谱分析仪中显示的信号频率，得出被解调太赫兹激光的调制速率。

为了验证上述太赫兹光的快速调制与探测过程，我们使用图4所示装置，用一个激射频率4.2 THz的QCL和峰值探测频率4.3 THz的QWP，实现了对0.5 GHz快速调制太赫兹激光的直接探测<sup>[22]</sup>。快速调制与探测的信号波形如图5所示，其中绿色曲线为加载到THz QCL的射频驱动信号，黄色曲线为THz QWP的响应信号。从图5可以看出，探测器的响应信号与激光器的射频调制信号相比，二者在幅度变化上非常一致，只是时序上响应信号延迟了约1 ns，这一点主要是由系统延时所致。随后，Li和Tan等又将THz QWP上探测到的光学拍频信号进行了提取和放大，实现了6.2 GHz的探测性能<sup>[28]</sup>。上述演示实验充分展示了对太赫兹激光的快速调制及直接探测，为进一步发展基于太赫

兹量子器件的高速调制、探测与信号传输技术奠定了基础。

### 3.3 太赫兹偏振测试技术与系统

太赫兹频段的偏振特性测量与红外和可见光频段类似，测试系统中通常需要配置多个太赫兹线偏振片，本文介绍的太赫兹偏振测试系统主要包括太赫兹光偏转特性测量系统和太赫兹光偏振转换测量系统。

#### 3.3.1 太赫兹光偏转特性测量系统

异常折射是太赫兹频段特异材料研究的重要方向之一，通过在常规基底材料上设计和制备特定的微结构，实现对入射太赫兹光的异常折射，这种异常折射的太赫兹光会在与光传播方向的某个夹角处出现次极大信号，从而实现对入射太赫兹光的偏转传播功能。异常折射材料在光谱测

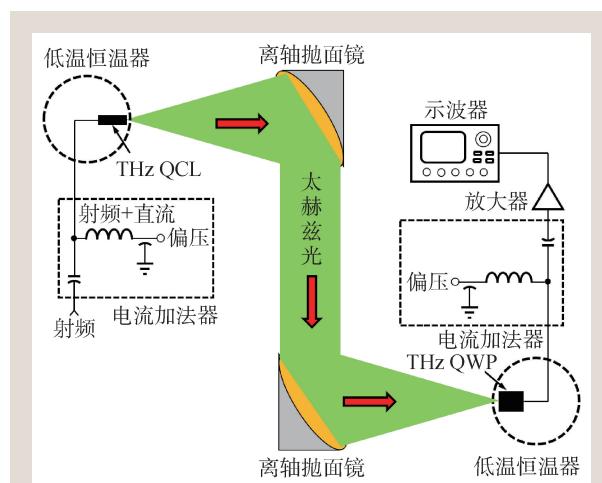


图4 基于THz QCL和THz QWP的高速调制与直接探测装置示意图

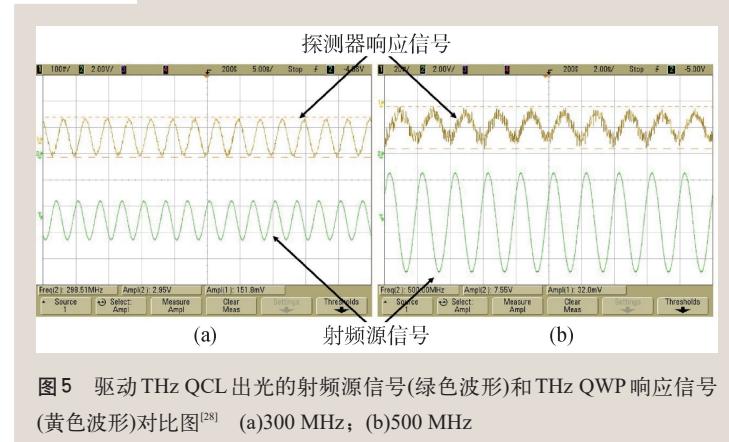


图5 驱动THz QCL出光的射频源信号(绿色波形)和THz QWP响应信号(黄色波形)对比图<sup>[28]</sup> (a)300 MHz; (b)500 MHz

量、成像和探测领域均有很好的应用前景。

我们采用小型化太赫兹激光源和戈莱盒(Golay cell)探测器搭建了异常折射材料样品的太赫兹光偏转测量系统，测量装置光路示意图如图6所示。测量系统的工作原理为：将样品放置于平行传播的太赫兹线偏振光中，保持样品表面的法向与太赫兹光传播方向一致，经过样品异常折射后的太赫兹线偏振光会出现偏振状态和传播方向的改变(即偏转)，采用配置了太赫兹检偏器的戈莱盒沿水平方向旋转，测量不同角度上太赫兹线偏振光的信号强度，根据测量结果绘制出经过样品后的太赫兹线偏振光随传播角度的变化曲线，最后根据测量结果判断样品的偏转水平。图6所示测量系统可测量入射线偏振太赫兹光经异常折射样品后 $-55^{\circ}$ — $55^{\circ}$ (即 $\theta$ 值)角度范围内的折射偏振光，测量系统的工作频率由THz QCL的激射频率确定，探测端采用戈莱盒探测器。

我们采用图6所示测量系统，测量了聚酰亚胺(PI)基V型金属微结构薄膜<sup>[29]</sup>对太赫兹偏振光传播方向的改变，通过测量样品两个放置角度(微结构排列与太赫兹光偏振方向的夹角分别为 $0^{\circ}$ 和 $90^{\circ}$ )下的太赫兹线偏振信号，获得了线偏振光信号随偏转角度 $\theta$ 的分布(图7)。由图可知，当微结构排列方向与太赫兹光偏振方向呈 $0^{\circ}$ 时(黑色实心方形线)，经过异常折射样品后的太赫兹光除了在 $0^{\circ}$ 方向有极大信号之外，在 $-21^{\circ}$ 的地方有次极大信号，说明太赫兹光在传播过程中发生了偏振传播，实现了对太赫兹线偏振光的异常折射效应。以上测试系统和测量结果为进一步研究太赫兹光的传播和偏振测量提供了很好的手段。

### 3.3.2 太赫兹光偏振转换测量系统

太赫兹线偏振片本质上是平行排列的金属条，它是在聚合物基底上蒸镀V型金属条，再用金属架固定后制作而成。太赫兹线偏振片除了对偏振光具有起偏和检偏作用外，还具有一定的透射和反射功能，利用这一点，Luo和Tan等<sup>[30]</sup>构建出一种宽谱的太赫兹偏振转换器，其光路示意图如图8所示。THz QCL发出的线偏振光被一个离轴抛物面镜(OAP)收集和准直成平行太赫兹光，

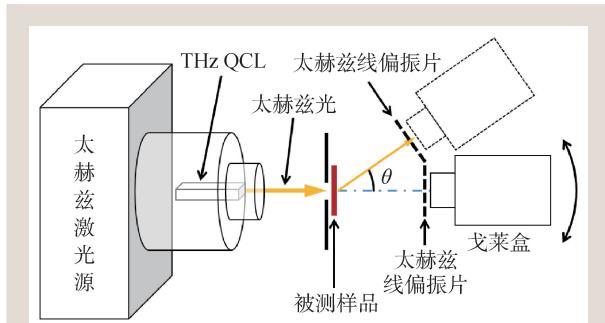


图6 太赫兹光偏转测量系统光路示意图

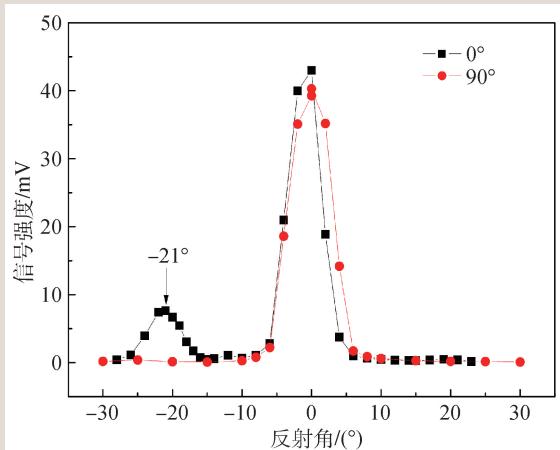
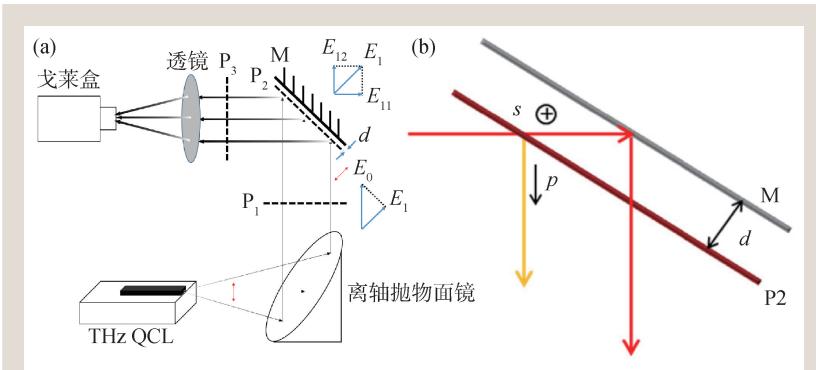
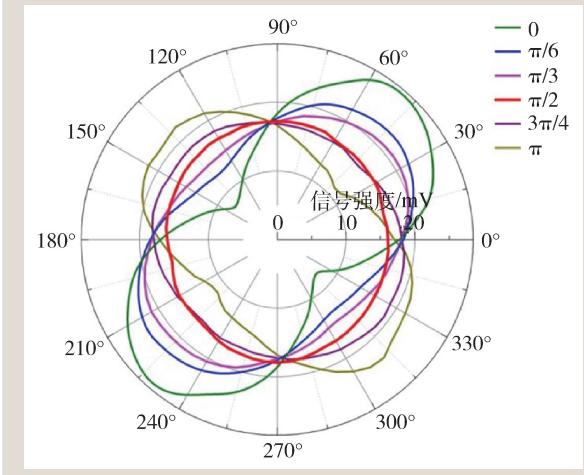


图7 聚酰亚胺(PI)基V型金属微结构薄膜对入射太赫兹光的偏转效果

然后依次经过第一线偏振片(P1)、第二线偏振片(P2)、平面反射镜(M)和第三线偏振片(P3)后被太赫兹透镜收集，会聚到戈莱盒探测器中。其中，P1与太赫兹光的线偏振方向成 $45^{\circ}$ 夹角，P2的反射面与入射太赫兹光的方向成 $45^{\circ}$ 夹角，平面反射镜与P2平行且与P2的距离( $d$ )控制在几个太赫兹光波长范围内。P3则对偏振转换后的太赫兹光进行检偏，太赫兹透镜的作用是将检偏后的太赫兹光尽可能多地收集到太赫兹探测器上。图8(b)为入射太赫兹线偏振光经过平面反射镜M与线偏振片P2组成的干涉结构后，形成不同偏振光状态的原理示意图。透过P2的太赫兹偏振光被M反射后在P2表面与P2直接反射的太赫兹偏振光干涉，且二者的相位差与距离 $d$ 相关，从而形成偏振状态可调的合束太赫兹偏振光。

我们采用图8(a)所示的装置，实现了对THz QCL输出线偏振光的有效转换，通过调节平面反射镜M与线偏振P2的距离 $d$ ，可实现太赫兹光从

图8 (a)太赫兹偏振转换装置光路示意图; (b)偏振转换原理示意图<sup>[30]</sup>图9 调节M与P<sub>2</sub>之间的距离d实现的偏振转换结果，相位差在0—π变化，对应于偏振状态从线偏振→椭圆偏振→圆偏振→椭圆偏振→线偏振<sup>[30]</sup>

线偏振(相位差为 $n\pi$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ )到椭圆偏振(相位差介于 $(n/2)\pi$ 和 $n\pi$ 之间,  $n=0, 1, 2, \dots$ )再到圆偏振(相位差为 $(n/2)\pi$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ )的周期性切换(图9), 该THz QCL的工作频率为4.3 THz, 对应波长为70 μm。

由于所采用的太赫兹线偏振片上金属线条的尺寸较小, 工作频率宽, 因此该太赫兹偏振转换器具有工作频率覆盖范围广、易于调节等特点, 该太赫兹偏振转换器的实现, 为研制基于太赫兹量子器件的偏振转换与测量系统, 研究2—5 THz频段的椭偏技术奠定了基础。

### 3.4 太赫兹光纤损耗测量系统

光纤是电磁波获得应用的一种重要媒介。与红外和可见光一样, 太赫兹领域的研究和应用,

尤其是系统的小型化和集成化发展都离不开光纤的使用。目前在太赫兹频段, 还没有找到特别合适的材料, 能像1550 nm和1310 nm光纤那样实现近红外光的低损耗传输。因此, 开发具有低损耗、可弯曲的太赫兹光纤并将其应用于光电测试技术和成像等系统中, 对缩小系统体积, 提高系统稳定性有重要作用。

太赫兹光纤损耗的测量由于没有像近红外波段那样的标准测量产品, 研究过程中需要搭建非标的测量系统。为了研究THz QCL输出激光在定制太赫兹光纤中的传输特性, 同时实现对太赫兹空芯光纤损耗的准确测量, 我们搭建了基于THz QCL激光源的空芯光纤损耗测量系统。该系统的结构和光路示意图如图10所示, THz QCL发出的激光经一组离轴抛面镜后会聚于光纤入口, 在光纤入口处安装三维调节架及夹具, 将太赫兹激光准确地耦合进光纤中; 在光纤中段, 采用特定夹具对光纤进行固定, 且固定装置可以移动, 以形成弯曲的空芯光纤, 便于弯曲损耗的测量; 在光纤出口处放置太赫兹功率计或阵列探测器, 分别用于测量经光纤传输后的太赫兹光功率和光能量二维分布(即光斑模式分布)。通过对比测量光纤入口处和出口处的太赫兹光功率, 获得光纤的传输损耗; 再通过夹具将空芯光纤弯曲, 获得不同弯曲曲率下的损耗。需要说明的是, 为了消除大气对太赫兹激光的吸收影响, 上述光纤损耗测量时, 太赫兹空芯光纤充入了用于减小大气吸收的氮气。

在众多被研究的太赫兹光纤中, 介质/金属膜结构空芯光纤<sup>[31]</sup>是非常重要的一种。它具有制作工艺成熟、传输损耗和弯曲损耗相对较小等特点, 未来有望在太赫兹标准光源、光电测试系统、成像系统中获得应用。介质/金属膜结构的空芯光纤的制备顺序为: 在基管内先镀制金属薄膜, 再镀制增透介质层, 利用光纤内壁的多层膜实现高反射率从而降低传输损耗, 这种结构的空

芯光纤要求基管的表面光滑、均匀性好。考虑到弯曲损耗测量涉及到可弯曲等形变因素，基管材料通常选择高分子聚合物。此外，根据测量系统中 THz QCL 的工作波长(120 μm)，为了获得低损耗及与太赫兹激光波长相匹配的耦合效果，空芯光纤的内径选择为 4 mm。

为了对比介质膜及其浓度变化在降低传输损耗上的效果，我们制备了内表面只镀金属银(Ag 光纤)、镀 12% 浓度 COP/Ag 和镀 18% 浓度 COP/Ag 三种光纤，其中 COP 为 Cyclo Olefin Polymer，是一种环烯烃聚合物。采用图 10 所示装置测量了三种太赫兹空芯光纤的传输损耗和弯曲损耗。在弯曲损耗测量时，通过夹具将光纤两端固定，进行不同角度(45°、90°、180°)状态下弯曲损耗的测量，测量结果如图 11 所示。由图可知，18% 浓度 COP/Ag 光纤对 120 μm 太赫兹激光的传输损耗和弯曲损耗最小，分别为 3.93 dB/m 和 0.62 dB/m<sup>[31]</sup>，即采用 1 m 长度的光纤传输 120 μm 太赫兹激光的效率为 40%(只有 40% 的光从光纤出口输出)。从上述研究结果来看，太赫兹空芯光纤的性能距离理想状态下的应用型光纤(传输效率大于 99%)还有很大差距，但作为减小光学系统元件体积、提高系统集成度的一种手段，目前的传输效率可以在一些实验室级别的测量系统中开始应用了。

#### 4 总结与展望

太赫兹光电测试与表征结果的好坏，依赖于所使用的太赫兹激光源和探测器的性能与水平，太赫兹领域的诸多技术目前还不是很成熟，因此构建一套稳定可靠的表征系统是发展太赫兹技术、实现可重复测量的重要基础。本文围绕基于太赫兹量子器件的光电测试技术和相关系统，从脉冲激光峰值功率测量、太赫兹光快速调制与直接探测技术、太赫兹光偏振转换与光偏转测试技术以及光纤损耗测量技术等方面，结合相关测试技术的实例进行了详细介绍。其中，采用

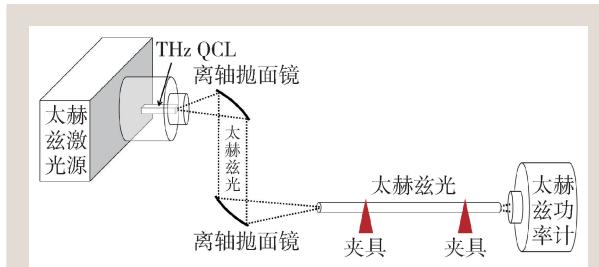


图 10 太赫兹介质膜空芯光纤损耗测量装置示意图

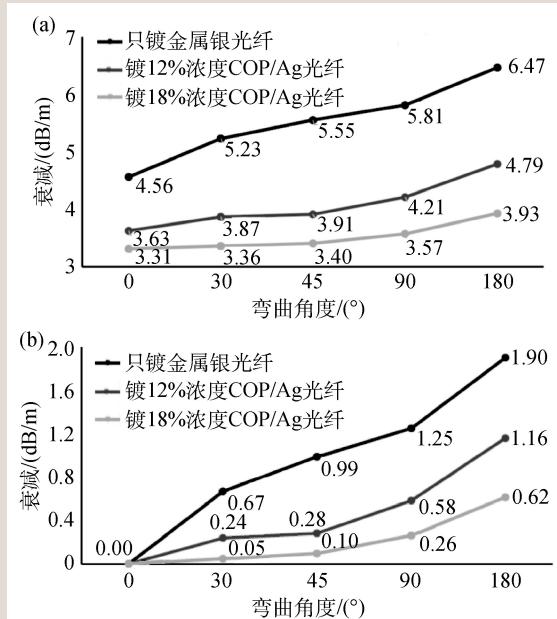


图 11 三种光纤在不同弯曲角度下测得的光纤损耗(a)和附加弯曲损耗(b)<sup>[31]</sup>

THz QWP 测量的脉冲激光峰值功率更为直观和准确，采用射频注入的调制技术可实现更高速率的直接探测验证，太赫兹光偏振转换系统具有工作频率范围宽、可调谐性强等特点，光纤损耗测量技术有效地获得了直接传输及弯曲部分的损耗测定，通过充氮操作更加准确地测量出光纤本身的损耗。对于太赫兹光电测试技术及系统的未来发展，我们认为，太赫兹辐射源和探测器的性能还需要进一步提高，测试系统的小型化和集成化还需要进一步完善，以便为太赫兹领域提供测量重复性好、稳定可靠的光电测试系统，有效地促进太赫兹器件和技术在标准源、本地振荡源、高速探测技术、光频梳技术和近场显微成像技术等方面的应用。

## 参考文献

- [1] Liang G Z, Liu T, Wang Q J. IEEE J. Sel. Top. Quant., 2017, 23(4):1200118
- [2] Tonouchi M. Nat. Photon., 2007, 1(2):97
- [3] Mittleman D M. Opt. Express, 2018, 26(8):9417
- [4] Sizov F. Semicond. Sci. Technol., 2018, 33(12):123001
- [5] 谭智勇, 万文坚, 黎华等. 中国光学, 2017, 10(1):68
- [6] Köhler R, Tredicucci A, Beltram F et al. Nat., 2002, 417(6885):156
- [7] 谭智勇, 曹俊诚. 中国激光, 2019, 46(6):0614004
- [8] Khalatpour A, Paulsen K A, Deimert C et al. Nat. Photon., 2021, 15:16
- [9] Li L H, Chen L, Freeman J R et al. Electron. Lett., 2017, 53(12):799
- [10] Tan Z Y, Wang H Y, Wan W J et al. Electron. Lett., 2020, 56(22):1204
- [11] Wienold M, Röben B, Schrottke L et al. Opt. Express, 2014, 22(3):3334
- [12] Wang X M, Shen C L, Jiang T et al. AIP Adv., 2016, 6(7):075210
- [13] Wan W J, Li H, Cao J C. Opt. Express, 2018, 26(2): 980
- [14] 谭智勇, 万文坚, 黎华等. 中国光学, 2017, 10(1):68
- [15] Richter H, Greiner-Bär M, Pavlov S G et al. Opt. Express, 2010, 18(10):10177
- [16] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J et al. Appl. Phys. Lett., 2004, 84(20):4068
- [17] Guo X G, Cao J C, Zhang R et al. IEEE J. Sel. Top. Quant., 2013, 19(1):8500508
- [18] Zhang R, Shao D X, Fu Z L et al. IEEE J. Sel. Top. Quant., 2017, 23(4):3800407
- [19] Tan Z Y, Zhou T, Cao J C et al. IEEE Photon. Technol. Lett., 2013, 25(14):1344
- [20] 符张龙, 李锐志, 李弘义等. 光电工程, 2020, 47(5):5
- [21] Chen Z, Tan Z Y, Han Y J et al. Electron. Lett., 2011, 47(17):1002
- [22] Tan Z Y, Li H, Wan W J et al. Electron. Lett., 2017, 53(2):91
- [23] Qiu F C, Tan Z Y, Fu Z L et al. Opt. Commun., 2018, 427:170
- [24] Fu Z L, Gu L L, Guo X G et al. Sci. Rep., 2016, 6:25383
- [25] Chen Z, Gu L, Tan Z Y et al. Chin. Opt. Lett., 2013, 11(11):112001
- [26] Gu L, Tan Z Y, Wu Q Z et al. Chin. Opt. Lett., 2015, 13(8):081402
- [27] Gellie P, Barbieri S, Lampin J F et al. Opti. Express, 2010, 18(20):20799
- [28] Li H, Wan W J, Tan Z Y et al. Sci. Rep., 2017, 7:3452
- [29] 汪云, 章少华, 沈云等. 光学学报, 2020, 40(7):0713001
- [30] Luo X Q, Tan Z Y, Wan W J et al. J. Appl. Phys., 2019, 125:144901
- [31] 李怡卿, 谭智勇, 曹俊诚等. 光学学报, 2016, 36(1):0106003

## 读者和编者

户名: 中国科学院物理研究所  
 帐号: 11 250 1010 4000 5699  
 (请注明《物理》编辑部)  
 咨询电话: 010-82649029, 82649277  
 Email: physics@iphy.ac.cn



## 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕  
—<物理>四十年集萃》

为答谢  
广大读者长  
期以来的关  
爱和支持,  
《物理》编辑

部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅2年《物理》杂志, 将获赠《岁月留痕—<物理>四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章, 476页精美印刷, 定价68元, 值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

### 订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

#### (1) 邮局汇款

收款人地址: 北京市中关村南三街8号中科院物理所, 100190

收款人姓名: 《物理》编辑部

#### (2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行



## 设备检漏好帮手

### —安捷伦干式检漏仪

- 干式无油方便运输
- 全触屏中文操作，并预置多种应用设置，简单易上手
- 一分钟快速关机，两万帕粗真空检漏
- 超强氦气本底抑制，环境氦气浓度高达 1000ppm 时仍能达到最高精度
- 多种抽速型号可选，丰俭由己



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部

800 820 6778 (固定电话拨打)

400 820 6778 (手机拨打)

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，  
或登陆安捷伦官方网站：[www.agilent.com](http://www.agilent.com)  
(点击“产品”选择“真空产品”)。