

# 基于步进扫描傅里叶变换的红外光致发光研究

周旭昌, 杨彦, 覃钢, 张阳, 李东升, 木迎春

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 搭建了红外波段的傅里叶变换光致发光谱测试系统, 结合 FTIR 光谱仪的步进扫描功能, 在室温条件下对短波和中波碲镉汞材料进行了光致发光测试。测试结果表明, 相对于常规连续谱扫描, 步进扫描的方式成功地抑制了背景辐射的影响, 同时还显著提高了 PL 谱信号的信噪比, 在室温下获得了光滑的 PL 谱曲线。

**关键词:** 红外光致发光; 傅里叶变换光谱; 步进扫描

中图分类号: TN06 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2018)01-0011-03

## Infrared Photoluminescence Spectroscopy with a Step-scan Fourier-transform Infrared Spectrometer

ZHOU Xuchang, YANG Yan, QIN Gang, ZHANG Yang, LI Dongsheng, MU Yingchun

(Kunming Institute of physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** An infrared photoluminescence (PL) measurement system was set up based on the Fourier-transform infrared spectrometer with step-scan mode. PL measurements of two HgCdTe thin films with cut-off wavelengths at short-wavelength and middle-wavelength were tested with the step-scan mode and conventional continuous-scan mode at room temperature. The measurement results with the step-scan mode indicated that the thermal background emission disturbance can be reduced, and the signal-to-noise ratio of the PL signal was significantly improved; hence, a rather smooth PL spectrum was obtained for the HgCdTe samples.

**Key words:** infrared photoluminescence, Fourier transform infrared spectrum, step scan

### 0 引言

光致发光 (Photoluminescence) 指的是以光作为激励手段, 激发材料中的电子从而实现发光的过程。对于半导体而言, 光致发光测试能在不破坏材料的前提下对材料的晶体质量、杂质和缺陷进行检测评价, 是一种有效和常见的材料表征手段, 已经广泛应用于半导体材料性能测试。在可见光波段, 常规的方法是采用光栅分光的方法来进行光致发光谱的测试。而对于红外波段的碲镉汞等窄禁带半导体, 俄歇非辐射过程随着能带隙的减小而迅速增强, 引起光致发光信号的急剧下降, 同时红外波段检测器的灵敏度较低, 所以测试所得的信号强度很弱。同时系统常温热背景具有较强的红外黑体辐射, 针对  $3\ \mu\text{m}$  以上的波段测试, 红外背景辐射往往要比窄禁带半导体正常发光信号要强很多倍, 采用常规方法难以将半导体材料发光信

号提取出来, 所以窄禁带材料的红外 PL 谱测试困难。解决方法之一是将碲镉汞材料的温度降低到 80 K 甚至 10 K 以下, 减小材料中的非辐射复合, 提高材料的光致发光强度。但这种方法需采用配低温制冷机或液氮液氮的杜瓦, 增加了试验复杂性和试验时间。此外这种方法由于无法将室温背景辐射消除, 针对中波和长波红外波段的材料, 特别是发光强度较弱的碲镉汞等材料, PL 谱测试还是存在很大的难度。

针对光栅分光的弱点, 人们发展了傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 来进行红外波段光致发光谱的测试, 利用傅里叶变换红外光谱仪的多通道和高光通量等优点, 获得了强度更高的发光信号。但常规的傅里叶光谱仪方法将样品发光信息和室温热背景辐射信号同时采集, 波长高于  $3\ \mu\text{m}$  的发光峰信号容易被室温热背景辐射掩盖, 所以难以测试获得中波和长波碲镉汞材料的发光信息。近年来, 傅里叶光谱仪发展出步

收稿日期: 2017-04-09; 修订日期: 2017-12-11.

作者简介: 周旭昌 (1976-), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为红外半导体材料和器件。

通信作者: 李东升 (1974-), 男, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为红外焦平面探测器。E-mail: lds@irdc-km.com.

进扫描 (step scan) 功能, 结合适当的信号采集方式可压制室温热背景信号, 提取红外波段半导体材料的光致发光信号, 为中长波碲镉汞等红外半导体材料的发光测试提供了一条新的技术方向<sup>[1-5]</sup>。

本文搭建了傅里叶变换光致发光谱测试系统, 通过对入射到测试样品的激发光进行幅度调制, 结合 FTIR 光谱仪的步进扫描功能, 完成了对室温短波和中波碲镉汞材料的光致发光测试。

### 1 试验设置

傅里叶 PL 光谱测试系统如图 1 所示, 系统由激光、斩波器、样品架、尼高力傅里叶光谱仪、锁相放大器, 计算机组成。在测试中, 连续激光通过斩波器以后形成调制激光, 激发到样品上以后产生红外调制光致发光, 同时该调制激光的调制频率信号作为参考频率输入到锁相放大器。红外调制光致发光信号通过光学元件导入傅里叶光谱仪, 通过迈克尔逊干涉仪以后由检测器收集, 将检测器的信号输入到锁相放大器。锁相放大器放大调制频率的信号 (即红外 PL 信号) 并只检测此频率的放大信号, 从而滤掉没有频率特性的背景热辐射热信号, 即通过相敏检测得到长波中红外的发光信号。在此过程中, 采用 FTIR 光谱仪的步进扫描功能, 消除傅里叶频率, 使得傅里叶变换频率与激光调制频率的截然分开, 能够在更大范围内选择和优化激光调制频率。通过以上设置能够保证尽可能高的谱信噪比, 尤其有利于对弱发光材料 PL 过程的检测。

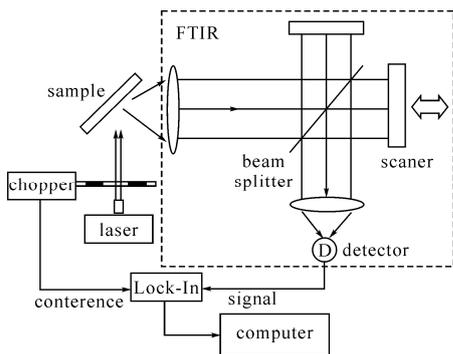


图 1 傅里叶 PL 光谱测试系统结构图

Fig.1 Schematic of the experimental setup for photoluminescence spectroscopy with a FTIR spectrometer

我们准备了两个碲镉汞样品进行测试。第一个样品为短波碲镉汞材料, 其设计 Cd 组分为 0.463, 室温带隙为 0.512 eV, 室温截止波长 2.42  $\mu\text{m}$ 。第二个样品为中波碲镉汞材料, 设计 Cd 组分为 0.312, 室温带隙为 0.307 eV, 室温截止波长 4.04  $\mu\text{m}$ 。在测试中, 激发光源采用波长为 532 nm 的半导体激光, 激发功率 100

mW, 用 KBr 分束器, 检测器采用液氮冷却的 HgCdTe 探测器。

为便于比较, 我们还进行了连续扫描 (continuous scan) 的测试方式。即不采用斩波器, 激光直接激发样品, 样品的发光信号导入傅里叶光谱仪; 迈克尔逊干涉仪采用连续扫描的方式, 直接采集样品的发光信号, 通过傅里叶变换获得光谱。

### 2 测试结果和分析

对短波碲镉汞材料 (SW201501) 的红外透射谱如图 2 所示, 其 50%截止波长为 2.44  $\mu\text{m}$ , 满足材料设计要求。

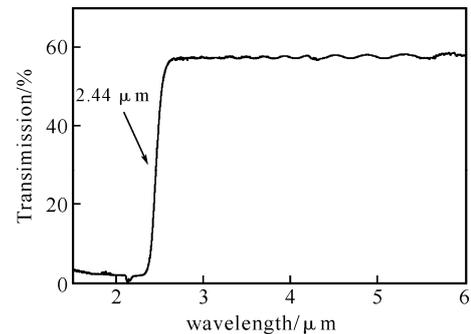


图 2 短波碲镉汞材料的室温红外透射谱

Fig.2 Infrared transmission result of SW HgCdTe epitaxial layer at room temperature

图 3(a)为短波碲镉汞材料连续扫描的室温红外光致发光谱, 该发光谱由两部分组成。一是在 3  $\mu\text{m}$  以上出现了一个连续谱, 根据室温黑体辐射谱特点和文献, 可以判断这是室温条件下的热背景辐射谱。而在 3  $\mu\text{m}$  以下的短波区域出现了一个发光峰, 其峰值响应波长为 2.41  $\mu\text{m}$ , 对应于 0.515 eV, 非常接近于红外透射谱的 50%截止波长结果, 与材料设计组分的带隙相匹配, 可以确认为该峰为短波碲镉汞材料带间跃迁所引起的发光峰。但该发光峰强度较弱, 信噪比较差。通过步进扫描技术对短波碲镉汞材料测试的红外光致发光谱结果如图 3(b)所示, 在 1.8  $\mu\text{m}$ ~2.7  $\mu\text{m}$  之间出现了一个发光峰, 峰值在 2.41  $\mu\text{m}$ , 与连续谱扫描所获得发光峰位相一致。从图中没有观察到热背景辐射谱, 表明热背景辐射已经被很好的抑制。同时该 PL 发光峰具有较高的强度, 曲线光滑, 其信噪比相对于连续谱扫描大大提高。

对中波碲镉汞材料 (MW201503) 的红外透射谱如图 4 所示, 其 50%截止波长为 4.01  $\mu\text{m}$ , 符合碲镉汞材料的组分设计。

图 5(a)为中波碲镉汞材料连续扫描的室温红外光致发光谱测试结果, 在室温背景谱的 4.0  $\mu\text{m}$  附近左右没有出现明显的发光峰, 在 4.2  $\mu\text{m}$  处出现了一个对应于 CO<sub>2</sub> 的吸收。通过步进扫描技术对中波碲镉汞材料

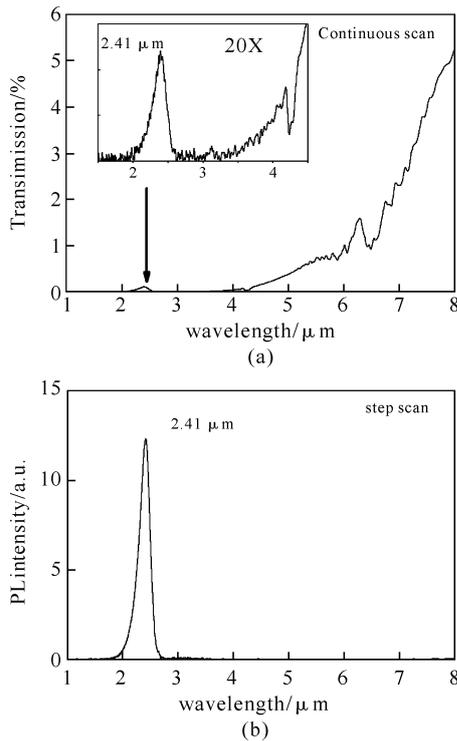


图3 短波碲镉汞材料室温红外光致发光谱, 连续扫描(a), 步进扫描(b)

Fig.3 Infrared photoluminescence results of SW HgCdTe epitaxial layer at room temperature, (a) continuous scan, (b) step scan

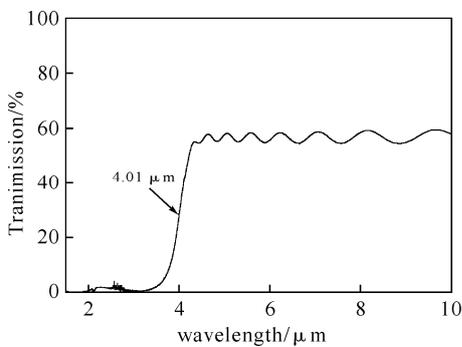


图4 中波碲镉汞材料的室温红外透射谱

Fig.4 Infrared transmission result of MW HgCdTe epitaxial layer at room temperature

测试的红外光致发光谱结果如图 5(b)所示。其结果中只有一个峰值为 3.98  $\mu\text{m}$  的发光峰, 该峰具有较高的强度和较好的信噪比; 同时在 4.2  $\mu\text{m}$  处出现了一个对应于  $\text{CO}_2$  的吸收。通过与设计组分带隙和红外透射谱截止波长的比较可判断出, 该发光峰对应于碲镉汞材料带间跃迁。从图 5 结果中可看出, 室温下该碲镉汞样品的发光很弱, 在具有较强背景辐射干扰的情况下, 连续扫描方式的测试结果中已经完全被室温背景谱湮没, 而采用步进扫描的方式能有效压制背景热辐射, 获得具有较高信噪比的中红外波段 PL 信号。

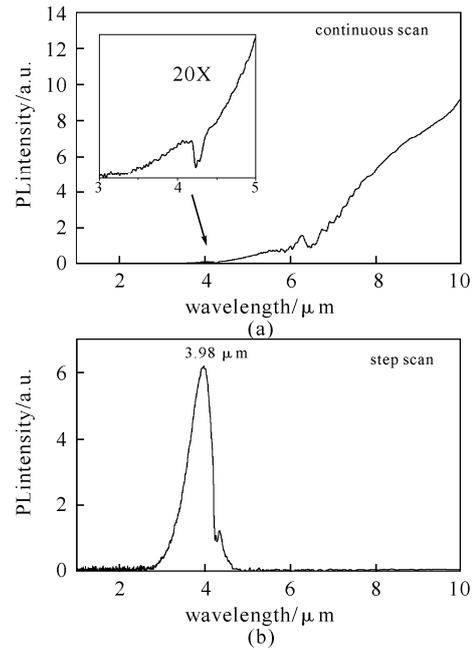


图5 中波碲镉汞材料室温红外光致发光谱, 连续扫描(a), 步进扫描(b)

Fig.5 Infrared photoluminescence results of MW HgCdTe epitaxial layer at room temperature, (a) continuous scan, (b) step scan

### 3 结论

基于 FTIR 光谱仪的步进扫描模式, 完成了傅里叶变换红外光致发光谱测试系统的搭建。在室温下对短波和中波碲镉汞材料的光致发光测试结果表明, 相对于常规连续谱扫描, 步进扫描的方式成功地抑制了背景辐射的影响, 同时还显著提高了 PL 谱信号的信噪比。下一步准备开展变温测试, 分析红外半导体材料发光的温度特性。

### 参考文献:

- [1] SHAO Jun, CHEN Lu, LU Wei, et al. Backside-illuminated infrared photoluminescence and photo reflectance: Probe of vertical nonuniformity of HgCdTe on GaAs[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**: 121915-1.
- [2] ZHA F X, SHAO Jun, JIANG J, et al. "Blueshift" in photoluminescence and photovoltaic spectroscopy of the ion-milling formed n-on-p HgCdTe photodiodes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 201112.
- [3] SHAO Jun, LV Xiang, LU Wei, et al. Cutoff wavelength of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  epilayers by infrared photo reflectance spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**: 171101.
- [4] SHAO Jun, LU Wei, LV Xiang, et al. Modulated photoluminescence spectroscopy with a step-scan Fourier transform infrared spectrometer[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, **77**: 063104.
- [5] JIANG E Y. *Advanced FT-IR Spectroscopy*[M]. Madison: Thermo Electron, 2003.