

文章编号: 1672-8785(2021)06-0001-06

## 碲镉汞薄膜少子寿命测试研究

折伟林 申 晨 李 乾 刘 铭 李 达 师景霞

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 碲镉汞(HgCdTe)材料的少子寿命是影响碲镉汞红外探测器性能的重要参数。分别采用微波光电导衰减(Microwave Photoconductivity Decay,  $\mu$ -PCD)法和微波探测光电导(Microwave Detected Photoconductivity, MDP)法对 HgCdTe 薄膜的少子寿命进行了研究。结果表明, 随着激光功率的增强, 样品的少子寿命降低; 由于载流子复合机制的变化, HgCdTe 薄膜的少子寿命随温度的增加有先增后减的趋势。通过 HgCdTe 薄膜少子寿命面分布可以得出样品不同区域的载流子浓度分布与均匀性。对于 HgCdTe 薄膜材料来说, 以上两种测试结果的面分布状况相近。

**关键词:** 碲镉汞; 少子寿命; 微波光电导衰减法; 微波探测光电导法

**中图分类号:** TN213 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.06.001

## Research on Minority Carrier Lifetime Measurements of HgCdTe Thin Film

SHE Wei-lin, SHEN Chen, LI Qian, LIU Ming, LI Da, SHI Jing-xia

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The minority carrier lifetime of the mercury cadmium telluride (HgCdTe) material is an important parameter that affects the performance of the HgCdTe infrared detector. Microwave photoconductivity decay ( $\mu$ -PCD) and microwave detected photoconductivity (MDP) methods are used to study the minority carrier lifetime of HgCdTe thin films. The results show that with the increase of laser power, the minority carrier lifetime of the sample decreases; due to the change of the carrier recombination mechanism, the minority carrier lifetime of the HgCdTe thin film increases first and then decreases with the increase of temperature. The distribution and uniformity of the carrier concentration in different regions of the sample can be obtained through the minority carrier lifetime distribution of the HgCdTe thin film. For HgCdTe thin film materials, the surface distributions of the above two test results are similar.

**Key words:** HgCdTe; minority carrier lifetime; microwave photoconductivity decay method; microwave detected photoconductivity method

收稿日期: 2021-01-21

作者简介: 折伟林(1983-), 男, 陕西绥德人, 高级工程师, 主要从事红外材料制备与测试技术研究。  
E-mail: shwl.cn@gmail.com

## 0 引言

红外探测技术的产生和发展有着非常悠久的历史,其应用领域也十分广泛。由于具有禁带宽度可调、光吸收系数较大、电子空穴迁移率高等优点,碲镉汞材料在近几十年里被广泛用于制作高性能红外探测器,尤其在长波红外探测器研制方面有突出优势。长波碲镉汞薄膜质量直接影响到探测器的性能。一般采用与其晶格完美匹配的 CdZnTe 衬底进行薄膜生长<sup>[1]</sup>。作为一种由 HgTe 和 CdTe 混合而成的 (HgTe)<sub>1-x</sub>(CdTe)<sub>x</sub> 二元化合物材料,碲镉汞具有直接带隙。用该材料制成的探测器属于本征型红外探测器,对应着能带间的本征跃迁,避免了一些杂质型红外探测器的缺点。

少数寿命即少数载流子寿命,具体是指光生非平衡少数载流子从开始在半导体中产生直到消失的时间。它是半导体材料及器件的重要参数,反映了材料的质量和器件的特性。非掺杂 n 型碲镉汞材料的少数寿命被普遍认为是用 n 型材料能否制备出高性能碲镉汞红外探测器的重要指标,对研制高性能红外焦平面探测器起到关键作用<sup>[2]</sup>。

本文分别采用  $\mu$ -PCD 法和 MDP 法对 n 型长波 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料进行少数寿命测试,然后根据其结果对测试样品进行分析并比较两种测试方法的异同。

## 1 测试原理与实验方案

### 1.1 少数寿命测试原理

根据激发时间的不同,少数载流子寿命测试方法可以分为瞬态法和稳态法两类。其中,

瞬态法是将短时脉冲激光入射到半导体中,激发产生非平衡载流子,从而改变半导体的电阻率;然后通过测量电阻率的变化得到半导体材料的少数寿命。稳态法是利用持续的激发,使半导体中激发出的非平衡少数载流子达到稳定的分布,然后通过测量激光停止后一些物理量的变化来计算半导体材料的少数寿命。

根据载流子衰减过程的不同,检测手段可以分为直流检测、高频电流检测和微波反射检测等。由于具有非接触、无损伤的特点,微波反射检测近些年被广泛应用于少数寿命的测量。如图 1(a)和图 1(b)所示,微波反射测量主要包括通过激光注入产生电子-空穴对和利用微波探测少数浓度变化两个过程。

反射微波能量的变化可以反映出材料非平衡载流子的变化,其测试原理如下:对于少数寿命测试中的样品来说,当测试系统呈线性且光注入属于小注入(对于 n 型半导体,  $\Delta n \ll n_0$ )时,测得的微波反射信号可被认为是正比于样品电导率的<sup>[3]</sup>。在无辐照条件下,

$$P(\sigma_0) \propto \sigma_0 \quad (1)$$

式中,  $P(\sigma_0)$  为样品在无激光照射条件下的反射微波能量;  $\sigma_0$  为样品在无激光照射时的电导率。若有激光照射,则产生过剩少数载流子时  $\sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma$ 。此时反射强度为

$$P(\sigma) \propto \sigma = \sigma_0 + \Delta\sigma \quad (2)$$

用式(2)减去式(1)并在  $\sigma_0$  处用泰勒级数展开,忽略高次项后得到:

$$\Delta P = P(\sigma) - P(\sigma_0) \approx \left. \frac{\partial P}{\partial \sigma} \right|_{\sigma=\sigma_0} \cdot \Delta\sigma \quad (3)$$

可以看出,当激光强度较小时,样品电导率的

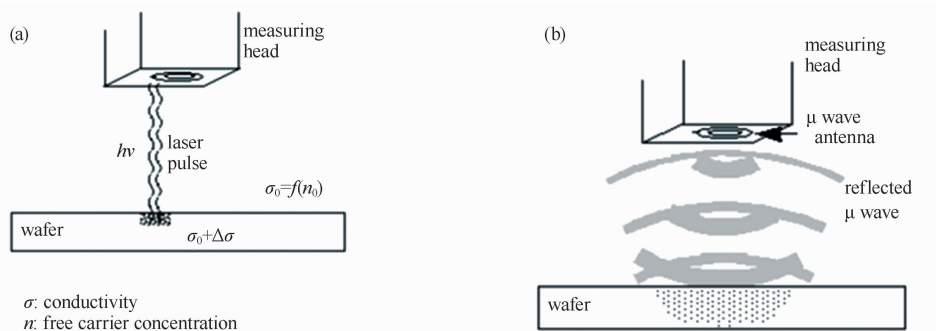


图 1 微波反射测量过程: (a)通过激光激发载流子; (b)利用微波探测电导率

变化正比于样品反射的微波能量的变化。我们可以通过测试反射微波能量的变化推导出电导率的变化。半导体材料电导率的定义如下:

$$\sigma_0 = q(\mu_n n + \mu_p p) \quad (4)$$

式中,  $\mu_n$  和  $\mu_p$  分别为半导体中电子和空穴的迁移率;  $q$  为电子电荷;  $n$  和  $p$  分别为无辐照条件下电子和空穴的密度。

当激光照射时, 样品中产生电子-空穴对, 则  $\Delta n = \Delta p$ 。那么样品的电导率可以写为

$$\Delta\sigma = \sigma - \sigma_0 = q(\mu_n + \mu_p) \Delta n \quad (5)$$

由式(5)可见, 当激光照射时, 样品电导率的变化正比于样品过剩载流子的变化。结合式(3)和式(5)可以得出  $\Delta P \propto \Delta\sigma$ ,  $\Delta\sigma \propto \Delta n$ 。也就是说,  $\Delta P \propto \Delta n$ 。因此, 我们可以通过反射微波能量的变化反映样品过剩载流子的变化。当激光照射停止时, 产生的过剩载流子开始衰减, 导致反射的微波能量衰减。通过计算反射的微波能量衰减至最高值 75%~25% 的时间, 可以最终得到样品中的少子寿命。

基于脉冲激光瞬态法的微波反射少子寿命测试也称为  $\mu$ -PCD 法。具体地说, 该方法利用波长为 904 nm 的大功率激光器激发样品产生电子-空穴对, 其激发时间约为 200 ns。通过用微波探测样品电导率随时间的变化就可以得到少数载流子的寿命。

基于长激光稳态法的微波反射少子寿命测试也称为 MDP 法。由于不容易受表面载流子复合的影响, 这种方法近年被广泛研究和使。具体地说, 该方法利用波长为 980 nm 或 1480 nm 的小功率激光器激发样品, 其激发时

间可在 ns 级至 ms 级之间调节。

## 1.2 实验方案

我们采用 MDPpro 型少子寿命测试仪分别进行  $\mu$ -PCD 和 MDP 少子寿命测试。测试样品为水平液相外延生长的碲镉汞基长波碲镉汞薄膜材料, 经退火工艺后呈 n 型。本文从以下三个方面开展研究, 并对 MDP 法和  $\mu$ -PCD 法的测试结果进行对比。

(1) 变激光功率研究: 在液氮温度下, 改变两种方法的激光功率大小, 测得不同激光强度下的少子寿命值, 并研究激光功率对少子寿命值的影响。

(2) 变温测试研究: 从液氮温度开始, 每升温 3 K 就分别用两种方法进行一次少子寿命测试, 以研究温度对少子寿命值的影响。

(3) 面分布测试研究: 在液氮温度下, 分别用两种方法进行面分布少子寿命测试, 研究样品整体的少子寿命分布与均匀性。

## 2 测试结果与分析

### 2.1 激光功率对 HgCdTe 少子寿命的影响

#### 2.1.1 $\mu$ -PCD 法

$\mu$ -PCD 法使用波长为 904 nm、功率为 19 W 的激光激发样品, 其激发时间约为 200 ns。如图 2(a) 所示, 将激光功率从 1500 mW 调至 6500 mW, 每升高 500 mW 就进行一次少子寿命测试。从曲线中可以看出, 关闭激光后 (0  $\mu$ s), 微波反射信号呈指数型下降。随着激光功率的增强, 更多的电子-空穴对被激发出来, 载流子浓度增大, 电导率提高, 反射的微波能量增强, 导致曲线信号随激发功率的增大而增大。

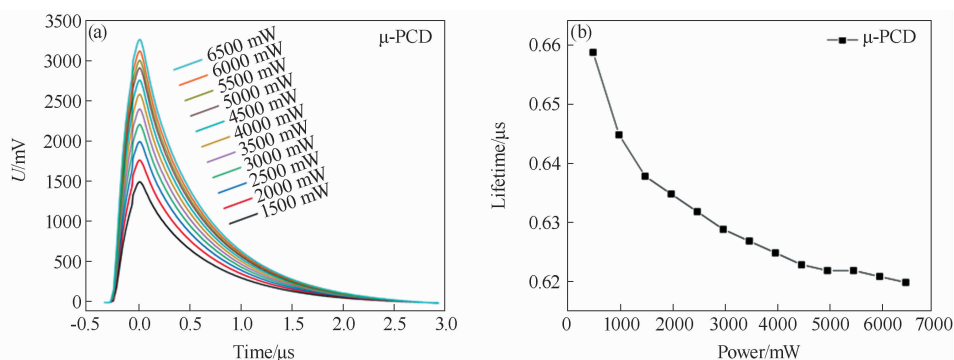


图 2 不同功率下的  $\mu$ -PCD 测试: (a) 曲线对比图; (b) HgCdTe 少子寿命变化

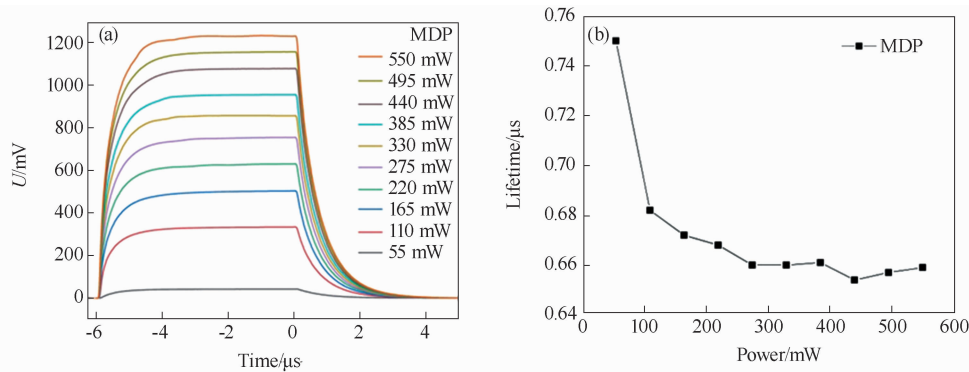


图3 不同功率下的MDP测试:(a)曲线对比图;(b)HgCdTe 少子寿命变化

分别计算不同功率下的 HgCdTe 少子寿命值。如图 2(b)所示,随着激光功率的增加,样品的少子寿命呈递减趋势。这是由于随着激光功率的增加,载流子浓度增大,造成电子-空穴对的复合速率加快,因此材料的少子寿命呈大致线性递减的趋势<sup>[4]</sup>。

### 2.1.2 MDP 法

MDP 法使用波长为 980 nm、功率为 500 mW 的激光激发样品,其激发时间为 6  $\mu$ s。如图 3(a)所示,将激光功率从 55 mW 调至 550 mW,每升高 55 mW 就进行一次少子寿命测试。可以看出,每条曲线在关闭激光之前均已达到稳定状态,说明在该激发功率下材料内的过剩载流子已完全激发。随着激光功率的增强,激发出的过剩载流子的浓度增加,电导率增大,探测到的微波反射光电导信号增强。关闭激光后,微波反射信号呈指数型下降。

与  $\mu$ -PCD 法相同,MDP 法在测试中随着激光功率的增加,样品的少子寿命符合递减趋势,如图 3(b)所示。

### 2.2 测试温度对 HgCdTe 薄膜少子寿命的影响

分别采用 MDP 法和  $\mu$ -PCD 法测试 HgCdTe 薄膜的少子寿命值随温度的变化(结果见图 4)。随着温度的升高,HgCdTe 薄膜的少子寿命值呈先增后减的趋势,并在约 150 K 时达到最大值。在低温区(温度小于 140 K),HgCdTe 薄膜的少子寿命主要取决于肖克莱-里德-霍尔(Shockley-Read-Hall, SRH)复合。随着温度的进一步升高,俄歇复合与辐射复合逐渐开始产生影响<sup>[5]</sup>,造成了少子寿命随温度的

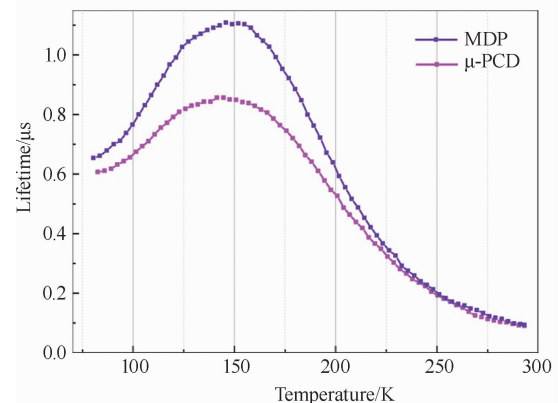


图4 HgCdTe 少子寿命随温度的变化

升高而先增后减的趋势。

两种方法的测试结果的趋势相同,且都在 150 K 附近得到最大值。但在同一温度下,MDP 法的测试结果普遍高于  $\mu$ -PCD 法的测试结果。由 2.1 节可知,激光功率越高,载流子浓度越高,少子寿命就越低。由于  $\mu$ -PCD 法采用的激光功率较高,因此在同一温度下, $\mu$ -PCD 法的测试结果低于 MDP 法的测试结果。

### 2.3 HgCdTe 薄膜少子寿命面分布研究

在液氮温度下,分别采用 MDP 法和  $\mu$ -PCD 法对 HgCdTe 薄膜进行面分布扫描(步距为 0.1 mm)。图 5 和图 6 为液氮温度下样品的少子寿命分布图。可以看出,该样品的少子寿命呈现上部较低而下部较高的状态,说明样品下部的载流子浓度较低;横向少子寿命变化较小,说明样品横向的组分分布比较均匀。MDP 法测得的少子寿命值高于  $\mu$ -PCD 法,但两种方法测得的面分布状况比较接近,说明它们均适用于 HgCdTe 少子寿命面分布的测试评价。

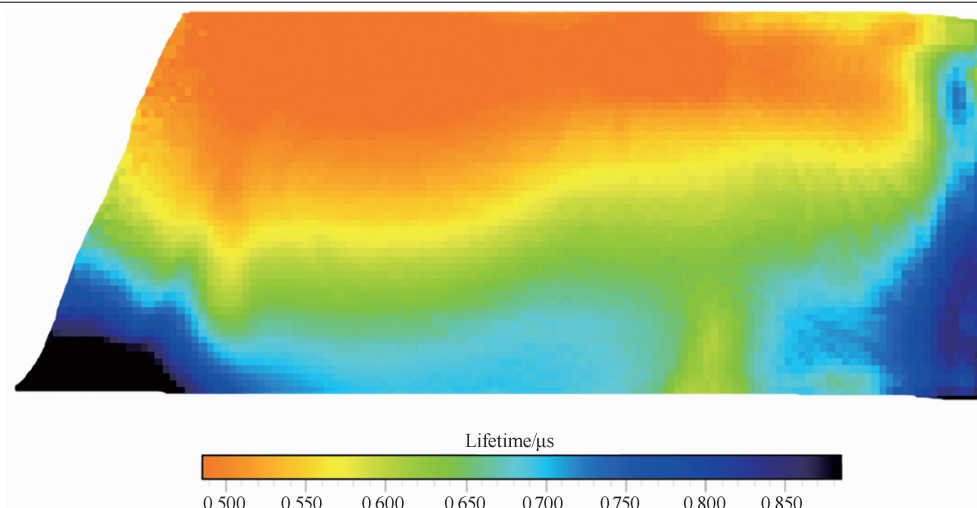
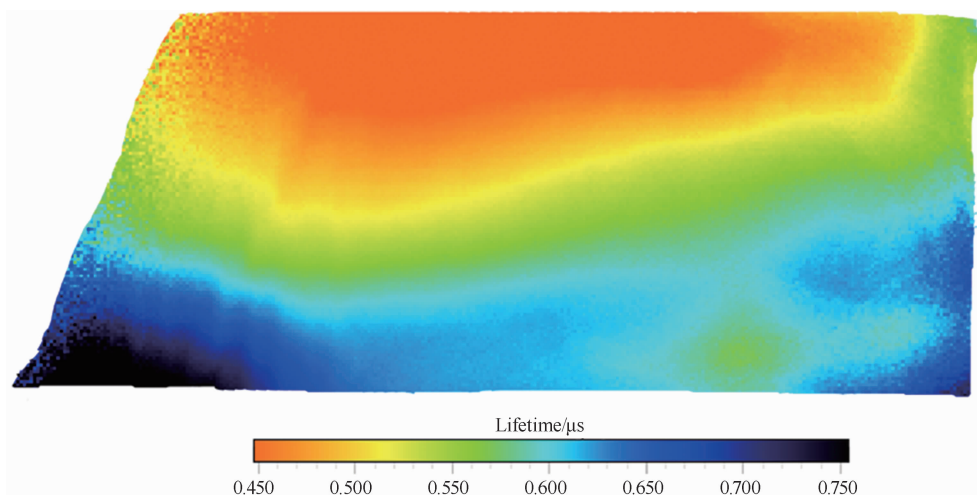


图 5 在液氮温度下用 MDP 法测得的 HgCdTe 少子寿命面分布

图 6 在液氮温度下用  $\mu$ -PCD 法测得的 HgCdTe 少子寿命面分布

### 3 结论

随着激光功率的增强, 激发出的过剩载流子的浓度增高, 电导率增大, 反射的微波能量增强。因此, 曲线信号随激发功率的增大而增大。同时, 随着载流子浓度的增高, 样品的少子寿命降低。另外, HgCdTe 薄膜的少子寿命随温度的增加有先增后减的趋势, 并在 150 K 附近达到最大值。这取决于不同温度区间的电子-空穴对复合原理的不同。在同一温度下, 由于  $\mu$ -PCD 法采用的激光功率较高, 其少子寿命测试结果低于 MDP 法。通过 HgCdTe 薄膜少子寿命面分布可以得出样品不同区域的载流子浓度分布与均匀性。以上两种测试结果的面分布状况相近。

有研究表明, 对于体寿命不同的样品来说, 高体寿命的样品受表面复合速率影响较大, 且  $\mu$ -PCD 法的测试偏差更大些<sup>[6]</sup>。而对于低体寿命的样品来说, 两种方法测得的有效少子寿命与实际体寿命值的偏差不大。

另外, 对于厚度不同的样品来说, 由于  $\mu$ -PCD 法的激发时间较短, 激发出的电子-空穴复合对靠近表面, 因此更容易被表面载流子复合所影响。MDP 法的激光照射时间较长, 穿透深度较深, 不倾向于被表面载流子复合所影响, 因此对厚度较厚样品的测量更加准确。而对于厚度较薄的样品来说, 两种方法的测试结果相近。

本文所用 HgCdTe 样品的厚度小于 10  $\mu\text{m}$ , 属于较薄的样品, 因此两种方法的测试结果相

差不大, 与理论相符。样品厚度对少子寿命值的影响还有待研究, 其结果能帮助我们根据样品参数和研究重点选择更合适的测试方法。

### 参考文献

- [1] 折伟林, 周立庆, 刘铭, 等. 长波碲镉汞薄膜外延用碲锌镉衬底筛选方法研究 [J]. *红外*, 2019, **40**(4): 12-17.
- [2] Balcerak R, Brown L. Mercury Cadmium Telluride Material Requirement for Infrared System [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 1992, **10**(4): 1353-1358.
- [3] Eikelboom J A, Leguijt C, Frumau C F A, et al. Microwave Detection of Minority Carriers in Solar Cell Silicon Wafers [J]. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 1995, **36**(2): 169-185.
- [4] 杨建荣. 碲镉汞材料物理与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [5] Dhar N K, Tidrow M Z. Large-Format IRFPA Development on Silicon [C]. *SPIE*, 2004, **5564**: 34-43.
- [6] Hahn T, Schmerler S, Hahn S, et al. Interpretation of Lifetime and Defect Spectroscopy Measurements by Generalized Rate Equations [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2008, **19**(2): 79-82.