

# Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si 薄膜厚度测试方法的研究

折伟林, 田璐, 晋舜国, 许秀娟, 沈宝玉, 王文燕  
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:**在分子束外延生长高质量的 CdTe/Si 复合衬底上, 分别通过 MBE 和 LPE 技术成功地研制出 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si 红外探测器所需的重要红外半导体材料。利用傅里叶变换红外光谱仪对 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si 红外半导体材料的红外透射光谱进行测试分析且计算薄膜厚度, 并配合扫描电子显微镜对其厚度计算分析进行校正, 最终获得一种无破坏、无污染、快捷方便的多层膜厚度测试方法。

**关键词:**碲镉汞/碲化镉/硅; 傅里叶变换红外光谱仪; 扫描电子显微镜; 分子束外延; 液相外延  
**中图分类号:**TH744.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.12.008

## Study on film thickness measurement of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si

SHE Wei-lin, TIAN Lu, JIN Shun-guo, XU Xiu-juan, SHEN Bao-yu, WANG Wen-yan  
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** High quality CdTe/Si composite substrate is grown by molecular beam epitaxy. We develop Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si which is an important infrared material and used for making infrared detector by MBE and LPE respectively. The infrared transmission spectrum of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si by FTIR is analyzed and then the film thickness is calculated. The SEM measurement result is used for correcting. Finally, we establish a non-destructive, non-polluted, fast and convenient measurement method for multilayer film thickness.

**Key words:** Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si; FTIR; SEM; MBE; LPE

### 1 引言

Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 是制备高性能红外探测器的关键材料, 目前 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外探测器技术的发展已进入第三代红外焦平面技术时代。第三代红外探测器技术有以下几个特点: 焦平面阵列趋向更大规模, 具有对目标多光谱特征同时探测的能力以及具有微型、智能化集成功能。其中制约 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外探测器像元规模最大瓶颈是难以获得低成本、大尺寸的 CdZnTe 衬底。相比而言, CdTe/Si 有以下优点: 大尺寸、低成本并且与读出电路(ROIC)热匹配<sup>[1]</sup>。从 20 世纪 90 年代开始, 美国、法国、日本等国多家研究机构开始对 CdTe/Si 复合衬底 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 外延技术进行研究工作, 并在 (211) CdTe/Si 复合衬底

技术和 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 外延上取得了重大突破<sup>[2-3]</sup>。但由于 Si 与 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 外延材料之间高达 19% 的晶格失配造成 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 外延材料的位错密度高居不下, 由位错引入的隧道辅助电流在 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外焦平面器件的漏电流中起主导作用, 对发展长波 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外焦平面器件造成了很大的困难。所以, 通过各种测试手段对 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te/CdTe/Si 的各项性能指标的评价在研究过程中显得非常重要。

本文主要研究傅里叶变换红外光谱仪对 MBE

作者简介: 折伟林(1983-), 男, 工程师, 主要从事红外半导体材料测试工作。E-mail: shwl.cn@gmail.com  
收稿日期: 2012-09-07; 修订日期: 2012-09-14

生长的 CdTe/Si 复合衬底薄膜材料厚度和  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  红外半导体薄膜材料的厚度以及 LPE 生长的  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  红外半导体材料厚度的评估方法,以扫描电子显微镜破坏性测试作配合,通过扫描电子显微镜测试结果对傅里叶变换红外光谱仪计算结果的校正,寻求一种适合于傅里叶变换红外光谱仪对  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  厚度表征的计算方法。

## 2 实验

以(211) Si 作衬底,先在 MBE 系统上完成 CdTe/Si 复合衬底的制备工作<sup>[4]</sup>,并测试 CdTe 薄膜厚度。再分别用 MBE 系统和 LPE 系统对表面处理过的 CdTe/Si 复合衬底进行  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  的外延工作,最后对  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  红外半导体材料的厚度进行测试。

采用 WQF-310 型傅里叶变换红外光谱仪对 CdTe/Si 和  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  薄膜厚度进行非破坏性测量,通过透过干涉曲线的叠加图计算各层薄膜的厚度,并利用 SIRION 型扫描电子显微镜对  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  截面进行破坏性测量。为

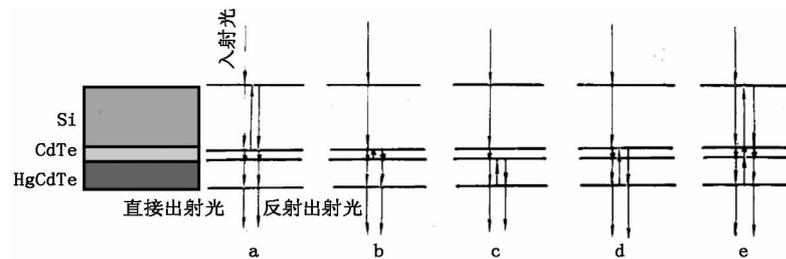


图1  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  材料中的透射光谱经2次反射类型

### 3.1 CdTe/Si 薄膜材料厚度测试

该薄膜材料结构只是一个单膜层,易于测量其厚度。干涉行为(如图2所示)与图1中第二种类型相似,只涉及一个光学行为。可以简单地利用干涉条纹之间的相位差来计算薄膜厚度:

$$\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{1}{2n_{CdTe}d_{CdTe}}$$

其中,取  $n_{CdTe} = 2.67$ ,可计算出 CdTe 厚度为  $7.24 \mu m$ 。

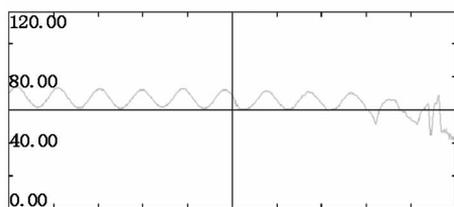


图2 CdTe/Si 薄膜透射光谱

此种干涉行为非常简单,干涉图也比较单一,目前我们利用自己编写的软件和傅里叶红外光谱仪测

了做进一步验证,对  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  薄膜表面进行腐蚀,改变  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  薄膜厚度和表面状态后再用两种方法做测试。最后对两种测量方法获得的结果进行比较,验证 FTIR 测量计算方法的准确性。

## 3 实验结果和分析

利用傅里叶变换红外光谱仪对外延薄膜厚度进行测试,主要是通过红外光在薄膜界面处多次反射后的光与直接出射的光之间的干涉曲线相位差来计算的。 $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe$  材料的折射率都在  $2 \sim 4$  之间,经过4次或者4次以上反射后出射光强远小于直接透过的出射光强,因此在计算中可忽略不记。图1是  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  材料中的透射光谱经2次反射后的5种类型出射光。第一种是 Si 衬底的干涉行为,在以往测量中没有发现干涉现象,其原因是由于衬底本身比较厚,相临干涉条纹波数差已经小于光谱仪的分辨率,所以不会产生干涉条纹。第五种类型也包括衬底的光学厚度  $n_{Si}d_{Si}$ ,所以也不会形成干涉。而第二、三和四这3种类型反射光因为波膜厚度较小,与直接透射光形成的干涉条纹正是我们需要研究的对象<sup>[5]</sup>。

试软件结合起来很方便就可以得到 CdTe 薄膜的厚度。

### 3.2 液相外延 $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$ 多层薄膜厚度测试

对于液相外延材料  $Hg_{1-x}Cd_xTe/CdTe/Si$  薄膜材料,其透射光谱只呈现一组干涉条纹,因为在  $450 \text{ } ^\circ\text{C}$  高温的生长条件下,CdTe 表面被熔化,与  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  形成互熔层,两层薄膜的界面趋于模糊,有一个折射率发生连续变化的过渡层,这不仅削弱了光的反射,而且过渡层中的干涉效应也相互抵消,只形成第四种类型的干涉行为,所以计算公式应该为:

$$\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{1}{2(n_{CdTe}d_{CdTe} + n_{HgCdTe}d_{HgCdTe})}$$

在折射率的选取中,取  $n_{CdTe} = 2.67$ ,  $n_{HgCdTe}$  的选取随组分的变化而变化<sup>[6-8]</sup>,该  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  薄膜材

料属于中波材料,取折射率为 3.33。

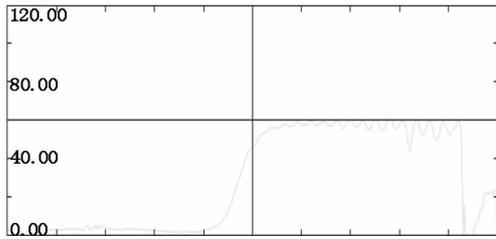


图3 CdTe/Si 复合衬底 LPE 生长  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜红外光干涉谱

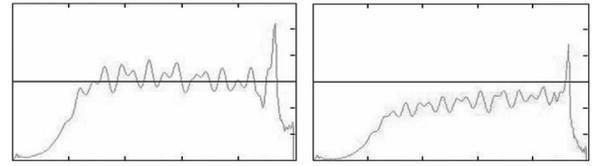
要想准确测量  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  厚度,则需要预先知道 CdTe/Si 衬底上 CdTe 薄膜的厚度,也就是需要知道 CdTe 的光学厚度,然后再计算  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜厚度。该种测试相对也比较简单,因为干涉光谱中峰、谷很均匀,很方便就能通过软件得到  $\Delta\left(\frac{1}{\lambda}\right)$ , 所以只要知道外延前 CdTe/Si 复合衬底中 CdTe 的厚度,就很容易在外延后获得  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的厚度。

### 3.3 分子束外延 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$ 多层薄膜厚度测试

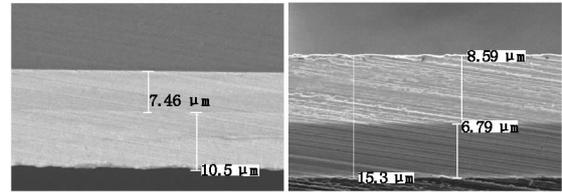
而对于 MBE 生长的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  薄膜材料,由于每层界面非常清晰,所以会发生多重干涉现象,即图 1 中第二、三和四中干涉行为均会发生,这时能在透射图谱上观察到多重干涉现象。但是一般来说,在透射图谱上能明显观察到两套干涉条纹,即第二和三种类型的干涉条纹,仔细观察后就能发现第四种干涉行为对透射图谱也会产生一定的影响。

在同一个样品上分别用傅里叶变换红外光谱仪和扫描电子显微镜做测试,为了做进一步验证,对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜表面进行腐蚀,改变  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜厚度和表面状态后再用两种方法做测试。图 4 显示的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  薄膜材料透射光谱有三组干涉谱图,周期最短的一组干涉谱对应的是  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}$  双层薄膜光学厚度,中间的一组是  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜的光学厚度,而周期最大的一组干涉图谱对应的是 CdTe 薄膜的光学厚度。通过计算,获知未经腐蚀的干涉谱对应的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜厚度约  $11.16 \mu\text{m}$ , CdTe 薄膜厚度约  $6.94 \mu\text{m}$ ; 腐蚀后的干涉谱对应的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜厚度约  $8.26 \mu\text{m}$ , CdTe 薄膜厚度约  $6.85 \mu\text{m}$ 。而图 5 显示的 SEM 截面图上可以获得未经腐蚀的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜厚度约  $10.5 \mu\text{m}$ , CdTe 薄膜厚度约  $7.46 \mu\text{m}$ ; 腐蚀后的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  薄膜厚度约  $8.59 \mu\text{m}$ , CdTe 薄膜

厚度约  $6.79 \mu\text{m}$ 。



(a) 未经腐蚀红外干涉谱 (b) 腐蚀后红外干涉谱  
图4 MBE 生长  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  薄膜典型红外光干涉谱



(a) 未经腐蚀 SEM 图 (b) 腐蚀后 SEM 图  
图5 MBE 生长  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  薄膜厚度 SEM 标定图

可以看出,两种方法测量出的  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  各层薄膜厚度在误差范围内基本相当,所以只要能分辨开三组干涉光谱就能利用公式:  $\Delta(1/\gamma) = 2nd$  很容易计算出各膜层的厚度,这里的难点恰恰是如何给三组干涉谱分组。另外,因为多层薄膜透射光谱内部反射较多,再加上干涉谱的互相干扰,计算结果会有一些的误差,有文献表明应用红外透射光谱法对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  厚度的计算结果精确度优于  $\pm 0.2 \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>, 但实际应该会比这个大一些。

## 4 结论

通过傅里叶变换红外透射光谱仪对 CdTe/Si 复合衬底的薄膜厚度测试以及对 MBE 和 LPE 外延生长  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  红外半导体材料多层膜厚度的测试,并配合扫描电子显微镜的校验,可以获得一种无破坏、无污染、快捷方便的厚度表征方法。在本次测试过程中取 CdTe 的折射率为 2.67,  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的折射率随组分的变化而变化,为方便实验室研究工作,计算时取中、短波  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  折射率为 3.33,长波  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  折射率为 3.54,得出的厚度与实际厚度基本吻合。

由于光学测试与薄膜界面态有很大的关系,如何判断干涉现象将成为计算分析  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{Si}$  薄膜厚度的关键因素,这也给厚度测试带来难点。目前多层膜厚度测试仅限于单点测试,如果要批量测试,需要光学软件配合傅里叶变换红外光谱仪一起会有更为理想的效果。

## 参考文献:

[1] De Lyon T J, Rajavel R D, Jensen J E, et al. Heteroepita-

- xy of HgCdTe (112) infrared detector structures on Si (112) substrates by molecular-beam epitaxy [J]. *J Electron Materials*, 1996, 25(8): 1341 – 1346.
- [2] Smith F T, Norton P W, Vecchio P Lo, et al. Te-rich liquid phase epitaxial growth of HgCdTe on Si-based substrates [J]. *J Electron Materials*, 1995, 24(9): 1287 – 1292.
- [3] Johnson S M, De Lyon T J, Cockrum C A. Direct growth of CdZnTe/Si substrates for large-area HgCdTe infrared focal plane arrays [J]. *J Electron Materials*, 1995, 24(5): 467 – 473.
- [4] Zhou L Q, Liu M, Gong F, et al. Study on MBE CdTe layer on 3 inch silicon substrate [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(5): 537 – 541 (in Chinese)  
周立庆, 刘铭, 巩锋, 等. 3 英寸 CdTe/Si 复合衬底外延技术研究 [J]. *激光与红外*, 2011, 41(5): 537 – 541.
- [5] Yang J R, He J, Shen S Z, et al. Study of infrared absorption spectra of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{GaAs}$  films grown by MOCVD [J]. *J Infrared Millim. Waves*, 1994, 13(3): 191 – 198. (in Chinese)  
杨建荣, 何进, 沈寿珍, 等. MOCVD- $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}/\text{CdTe}/\text{GaAs}$  外延材料红外吸收光谱研究 [J]. *红外与毫米波学报*, 1994, 13(3): 191 – 198.
- [6] Finkman E, Nenirowsky Y. Infrared optical absorption of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  [J]. *J Appl. Phys.*, 1979, 50(6): 4356 – 4361.
- [7] Kucera Z. Dispersion of the refractive index of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  [J]. *Phy s. Status Solidi (a)*, 1987, 100(2): 659 – 665.
- [8] Liu K, Chu J H, Li B, et al. Measurement of composition in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  epilayers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, 64(21): 2818 – 2820.
- [9] Chu J H. *Narrow bandgap semiconductors physics* [M]. Beijing: Science Press, 2005.  
褚君浩. *窄禁带半导体物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.