

红外光热吸收成像技术在碲锌镉材料检测中的应用

徐超^{1,2,*}, 孙士文^{1,2}, 杨建荣^{1,2}, 董敬涛³, 赵建华³

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室 上海 200083;

2. 中国科学院大学 北京 100049;

3. 合肥知常光电科技有限公司 安徽 合肥 230031)

摘要: 红外光热吸收效应作为一种无损伤非接触的检测技术,已经被广泛用于硅等半导体材料中的微缺陷表征分析. 采用光热吸收技术对碲锌镉晶体中的缺陷进行扫描成像分析时发现了一种连续性的光貌相条纹,并对这些条纹的形成机理进行了研究. 研究表明碲锌镉晶体中的这种连续性条纹源自于光热测试系统中入射光的干涉,这种干涉和入射光参数、测试样品的厚度、禁带宽度以及热导率等材料特性密切相关. 最后,实验通过优化红外光热吸收测量系统获得了碲锌镉材料中的微缺陷结构及其在样品深度方向的三维分布图像.

关键词: 红外; 光热吸收; 碲锌镉

中图分类号: O474 **文献标识码:** A

Inspection of CdZnTe materials by infrared photo-thermal absorption imaging

XU Chao^{1,2,*}, SUN Shi-Wen^{1,2}, YANG Jian-Rong^{1,2}, DONG Jing-Tao³, ZHAO Jian-Hua³

(1. Key Laboratory of Infrared Image Materials and Devices, Shanghai Institute of Technical Physics of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. ZC Optoelectronic Technologies, Hefei 230031, China)

Abstract: Infrared photo-thermal absorption effect was used extensively in detecting the micro-defects in semiconductor materials (silicon wafers) as a nondestructive and non-contact technology. This effect was adopted initially to detect the structural characteristic of the defects in CdZnTe (CZT) crystal and images with obvious coherent fringes were obtained, which were investigated systemically. It was confirmed that the coherent fringes of the Infrared photo-thermal absorption images of CZT wafers come from the interference of incident light relative to parameters of incident light, wafer thickness, thermal conductivity and band gap of materials. Finally, the micro-defects of CZT materials and their distribution along depth direction were obtained by optimizing the test conditions.

Key words: Infrared, photo-thermal absorption, CdZnTe

PACS: 42.55.Px, 78.55.ET, 73.40.Kp, 78.30.Fs

引言

碲锌镉($Cd_{1-x}Zn_xTe$, CZT) 晶体作为一种重要的 II-VI 族半导体材料,广泛用于制备碲镉汞红外探测^[1]和室温核辐射探测器^[2]. 目前采用传统布里奇曼法制备的单晶体中存在较多的诸如多晶、夹杂/沉淀、孪晶、小角晶界等缺陷^[3-8]. 这些缺陷极大地影响

了探测器的性能. 当前表征 CZT 晶体中这些缺陷主要有 X 光貌相^[9]和红外透射显微镜^[10,11],但是它们无法反映缺陷的三维结构信息;而化学腐蚀^[12,13]等方法又会对材料产生了不可逆损伤. 为了获得 CZT 材料中更多的缺陷信息,尤其是三维缺陷的结构信息,本文尝试利用一种基于热透镜效应的无损伤无接触的红外光热吸收成像技术^[14-16]对 CZT 材

收稿日期: 2018-01-11 修回日期: 2018-04-17

Received date: 2018-01-11 revised date: 2018-04-17

基金项目: 中国科学院红外成像材料与器件重点实验室开放课题项目(11M0KFJJ-12-01)

Foundation items: Supported by the Key laboratory of Infrared Imaging Materials and Devices of CAS. (11M0KFJJ-12-01)

作者简介(Biography): 徐超(1986-)男,安徽宣城人,助理研究员,博士学位,主要研究领域为红外探测器用碲锌镉晶体生长和缺陷抑制. E-mail: charlesxu@mail.sitp.ac.cn

料进行了检测. 基于这一技术, 本文通过选择合适的入射光参数, 测试不同的材料, 以及改变材料的厚度等实验对测量系统进行了优化, 在分析了测试过程中出现的光貌相条纹的机理的基础上, 最终利用该技术获得了 CZT 材料中的微缺陷结构及其在样品深度方向的三维分布图像.

1 实验方法

实验用碲锌镉 ($\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$, CZT) 晶体通过垂直布里奇曼法进行生长, 且在 $\langle 111 \rangle$ 定向后被切成 1 mm ~ 9 mm 之间的 CZT 晶片, 晶片的表面通过机械化学方法进行抛光处理.

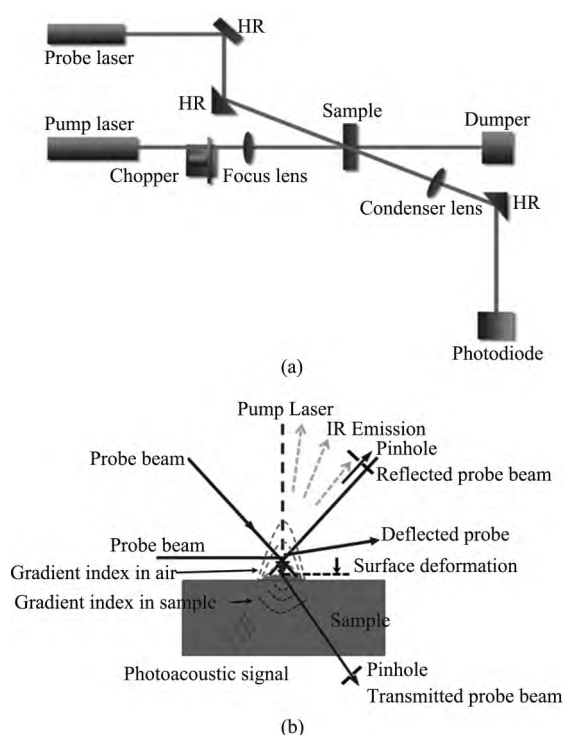


图 1 光热扫描系统测试原理图 (a) 装置示意图 (b) 测试技术原理图

Fig. 1 Schematic of the photo-thermal measurement system. (a) structure of device, (b) photothermic effect

实验测试的 Si 衬底和 GaAs 也是表面经过精抛处理, 厚度都是 1 mm. 实验采用的光热吸收分析测试装置是合肥知常光电的 PTS-2000 光热扫描系统, 结构及原理见图 1 所示.

光热吸收成像技术利用泵浦光聚焦成高能量密度的点来进行热激发, 利用探测光探测被测物由于热激发而产生的形变, 得到样品的光热特性, 从而反映出样品的吸收不均匀性, 间接得到材料的不均匀性. 测试过程中, 探测光斑尺寸略大于受热区, 造成

受热区部分的波前畸变, 并且与未受热区部分的波前产生相干叠加, 形成探测光波前的中心区域发生干涉, 光热信号正是通过这种干涉信号的幅值强度来测吸收, 实验采用的 1 064 nm 激光功率为 300 mw, 1 319 nm 激光功率为 400 mw, 探测器采集信号为透射的探测光. 为了便于对比光热吸收技术在缺陷检测方面应用的效果, 本文采用了红外透射显微镜 (Olympus BX-51) 作为补充表征手段. 此外, 还采用了 Nicolet 公司生产的 NEXUS670 型傅里叶红外光谱仪 (采用 DGTS 探测器, 光斑直径 3 mm, 测试波数范围为 $8\,600\text{ cm}^{-1} \sim 15\,000\text{ cm}^{-1}$ 范围) 对选择的三种不同材料进行了红外光谱吸收测试.

2 实验结果与讨论

2.1 影响光热吸收图像的因素及机理分析

实验采用 1 064 nm 泵浦光和 1 319 nm 探测光组合的光热分析系统, 对 1 mm 厚度的 CZT 样品进行缺陷扫描时, 检测到了一种类似干涉的条纹状貌相, 见图 2, 扫描区域范围为 $25\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. 为了探明该条纹状貌相的形成机理, 本文设计了一系列实验进行类研究分析.

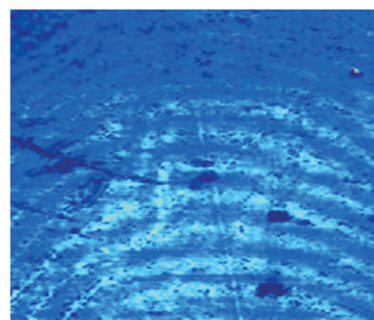


图 2 探测光-泵浦光 1 319 nm-1 064 nm 组合下 CZT 材料扫描图

Fig. 2 Image of CZT by 1 064 nm pump and 1 319 nm probe

2.1.1 入射光参数对测试结果的影响

不同热射光的扫描结果如图 3 所示, 扫描区域为 $25\text{ mm} \times 30\text{ mm}$. 由图可知, 针对碲锌镉晶体, 不同的泵浦光-探测光组合能够获得不同形状的光貌相条纹. 图 3(a) 单独的 1 064 nm 的泵浦光直接照射样品的时候, 没有产生光貌相条纹, 而图 3(b) 1 319 nm 的探测光单独照射的时候, 会产生光貌相条纹, 从信号强度上来看, 当采用 1 064 nm 的泵浦光加 1 319 nm 的探测光的时候, 条纹的信号强度会变强, 如图 3(c) 所示.

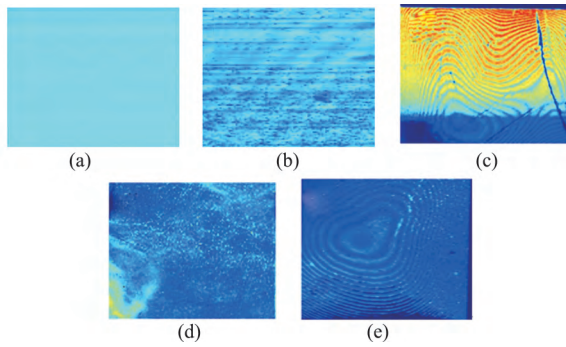


图3 不同波长泵浦光-探测光扫描 CZT 的光热吸收图像。(a) 1064 nm 单泵浦光 ,(b) 1319 nm 单探测光 ,(c) 1064 nm 泵浦光 -1064 nm 探测光 ,(d) 1319 nm 泵浦光 -1064 nm 探测光 ,(e) 1064 nm 泵浦光 -1319 nm 探测光
Fig. 3 Images of CZT samples by different pump-probe wavelengths. (a) only 1064 nm pump ,(b) only 1319 nm probe ,(c) 1064 nm pump - 1064 nm probe ,(d) 1319 nm pump - 1064 nm probe ,(e) 1064 nm pump - 1319 nm probe

图3(c)和(d)说明1064 nm的探测光只有在1064 nm的泵浦光作用时,才能检测出条纹,而当泵浦光是1319 nm时,1064 nm的探测光无法检测出条纹.图3(c)和(e)说明当1064 nm的泵浦光作用于样品上时,无论是1064 nm的探测光还是1319 nm的探测光,都可以在样品上检测到条纹,只是在信号强度上有差别.这说明1064 nm的泵浦光在条纹的产生过程中起了关键的作用.泵浦光的存在改变了材料的光学性质,在满足干涉条件时,便可能产生条纹.而在干涉的形成过程中,可以是反射光,也可以是透射光,且干涉和材料上下表面面形,材料的厚度,材料的吸收特性,材料的折射率都密切相关.因此,干涉可以发生在材料的表面或者材料的内部.图4和图5是光入射后的两种干涉模式.

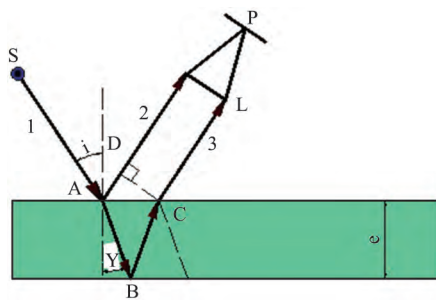


图4 单入射光反射模式形成的干涉
Fig. 4 Diagram of interference of mono-incident light in reflection model

在图4所示的反射模式中,入射的探测光或者泵浦光激光会在样品的上下表面分别反射,两束光

产生的附加光程差为:

$$\Delta 2n_2e \sqrt{1 - \sin^2 \gamma} = 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} \quad (1)$$

因此,若激光信号不会在材料的传播过程中由于吸收,散射等因素而衰减较多,且满足干涉相长或者相消的光程差条件时,便会产生明显的干涉条纹.

在图5所示的透射模式中,当激光照射到材料上后,若能透过材料而不被完全吸收,那么这些透射光也能发生干涉,假设光束1'和2'产生干涉,结合上述推导,则光程差也可以表示为(1)中的:

$$\Delta = 2e \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$$

同反射模式一样,当样品折射率厚度以及入射角都满足干涉相长或者相消的光程差条件时,也会形成条纹.因此当只采用1319 nm单探测光扫描实验时,也会出现干涉条纹.

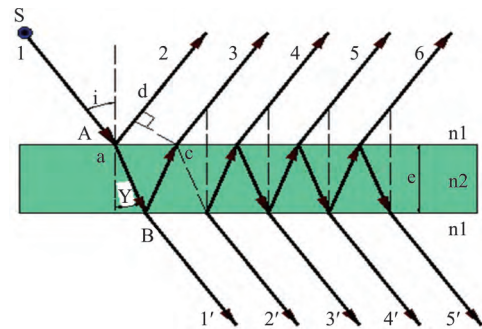


图5 单入射光透射模式形成的干涉
Fig. 5 Diagram of interference of mono-incident light in transmission model

当泵浦和探测光同时存在时,即有第三种导致干涉的情况.根据图6(a),探测光斑尺寸略大于受热区,造成受热区部分的波前畸变,并且与未受热区部分的波前产生相干叠加,形成探测光波前的中心区域发生干涉,光热信号正是通过这种干涉信号的幅值强度来测吸收.若是图6(b)中的弱吸收泵浦光模式,结合图3(d)的结果可知:CZT材料对1319 nm的泵浦激光吸收系数较低,材料的局部温度变化较小,材料的折射率变化也较小,故当使用1064 nm的探测光时,难以观察到明显可辨的干涉条纹.

若是图6(c)中的强吸收泵浦光模式,受泵浦光照射区域温度和未照射区域温度差异较大,折射率差异较大.实验中,如图3(c)和(e)所示,当使用的泵浦激光(1064 nm)吸收系数较高时,材料的局部区域的温度,折射率都会发生变化.当探测光透过该区域时,和未透过该区域的探测光束相比,会产生明

显的附加光程差,当光程差满足干涉条件时,会在特定区域形成明场或暗场,被探测器接收后宏观上体现为条纹.

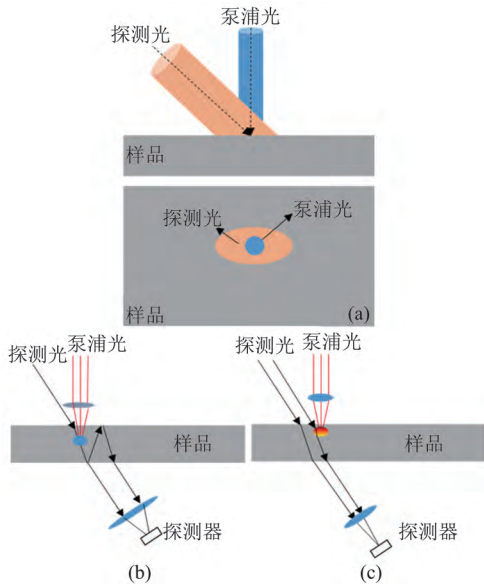


图6 探测光+泵浦光透射形成的干涉。(a)探测光束和泵浦光束大小示意图,(b)弱吸收泵浦光照射,(c)强吸收泵浦光照射

Fig.6 Diagram of interference of probe-pump light in transmission model. (a) schematic diagram of the size of the probe light and pump light, (b) weak absorption of pump light, (c) strong absorption of pump light

2.1.2 材料特性对测试结果的影响

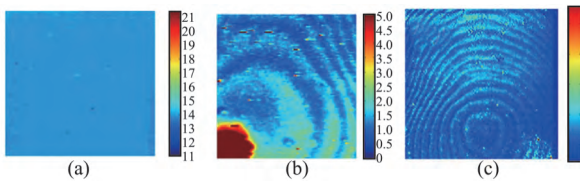


图7 不同材料在1064 nm~1319 nm 泵浦光-探测光扫描成像。(a) Si (Eg = 1.12 eV), (b) GaAs (Eg = 1.43 eV), (c) CZT (Eg = 1.48 eV)

Fig.7 Images of different materials with pump-probe of 1064 nm ~ 1319 nm. (a) Si (Eg = 1.12 eV), (b) GaAs (Eg = 1.43 eV), (c) CZT (Eg = 1.48 eV)

为了验证材料特性对光热吸收的影响,实验选择了 Si, GaAs, CZT 三种材料在 1064 nm-1319 nm 的泵浦光-探测光组合下进行光热成像扫描,结果如图 7 所示.实验表明: Si 当中并未观察到条纹,而在 GaAs 和 CZT 中都观察到了明显的光貌相条纹.从光的本征吸收的角度来来看,本征吸收主要和材料的禁带宽度密切相关,禁带宽度和对应的截止波长

有以下关系:

$$\lambda(\text{nm}) = \frac{1240}{E_g(\text{eV})} \quad (2)$$

该实验计算得到 2.1.2 的三种材料对应的理论截止吸收波长分别为: 1107 nm 867 nm 838 nm. 根据傅里叶红外光谱仪的测试结果,如图 8 所示,其中实线部分是实际测试结果,受设备波段所限,虚线部分是外推至文献报道的材料的透过率值.

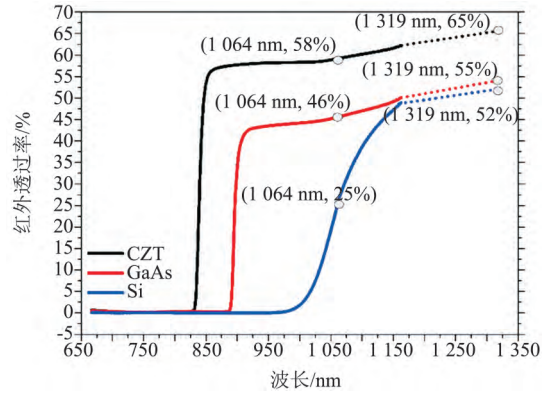


图8 不同材料的短波红外光谱
Fig.8 Infrared spectrum of different materials

因此,使用 1064 nm 激光作为泵浦光,对 Si 而言容易以本征吸收的方式被大部分吸收,而对于 GaAs 和 CZT,则透过率为 46% 和 58% 左右.当使用 1319 nm 波长作为探测光时,对 Si 而言,透过率约为 52%,而对 GaAs 和 CZT,则透过率分别达到了 55% 和 65%.故相比 GaAs 和 CZT,短波波段的红外光在单晶硅中被吸收的比较严重.

结合三种材料的热导率系数来看,CZT, GaAs, Si 的热导率^[17]分别为 55 mW · cm⁻¹ · K⁻¹, 500 W · cm⁻¹ · K⁻¹, 1235 W · cm⁻¹ · K⁻¹,其中 CZT, GaAs 的导热率相比 Si 较差,当入射光被吸收后容易形成受热不均匀区,而 Si 的导热率较好(且实验中使用的激光功率较低),激光被吸收后产生的热量容易耗散,不易形成热不均匀区,难以形成折射率差异较大的区域,因此相同的测试条件下, Si 难以像 GaAs 和 CZT 一样容易观察到干涉条纹.

2.1.3 材料厚度的影响

为了探明这种光貌相条纹的产生是否和材料的厚度相关,实验设计了不同厚度的 CZT 晶片.实验结果如图 9 所示:当材料的厚度在 1 mm 及以下厚度时候,能观察到明显的光貌相条纹,而随着测试晶片厚度的增加,这些光貌相条纹逐渐消失,而材料表面的点线等缺陷则被明显的观测到,这说明随着材

料厚度的增加,光程增加,光强在材料中衰减的非常厉害,难以形成观察到的明场或暗场条纹.根据朗伯特定律^[18]:

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3)$$

其中: α 为吸收系数, x 为传送距离.

当激光照射在 CZT 样品上时,受制于电磁辐射与材料表面、近表面以及材料内部的电子、原子、缺陷之间的相互作用,激光会被材料反射、透射以及吸收.同时由于 CZT 材料内部的空洞、夹杂、多晶晶界等缺陷会引起折射率变化,因而光在通过时会产生散射,造成透过率下降.当材料厚度越大,入射光被吸收的程度就越高,就越难以观测到干涉条纹.

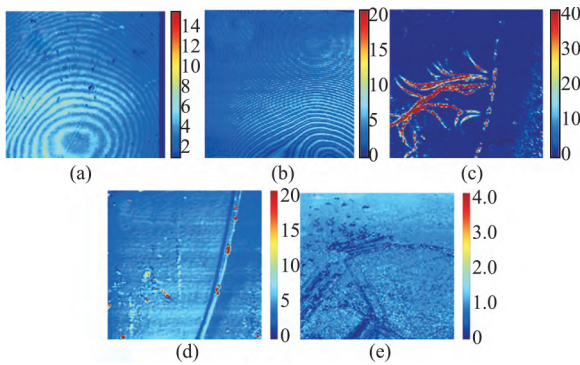


图9 1064 nm-1319 nm 泵浦光-探测光光热扫描下不同厚度的 CZT 材料成像. (a) 700 μm, (b) 1 mm, (c) 2 mm, (d) 2.5 mm, (e) 9 mm
Fig.9 Images of CZT samples with different thickness using pump-probe of 1064 nm-1319 nm. (a) 700 μm, (b) 1 mm, (c) 2 mm, (d) 2.5 mm, (e) 9 mm

2.2 光热吸收技术在 CZT 材料缺陷检测中的应用

基于前面的实验和分析,条纹的出现主要和材料的吸收特性、厚度,以及选择的入射光波长相关,其中厚度的影响最为明显.因此,针对碲锌镉材料,实验可以通过增加测试样品的厚度来避免出现干涉条纹.当这种干涉条纹不出现时,如果材料中存在缺陷,缺陷和基体材料的物理特性差异可以被系统检测出来.系统将光电探测器的信号和斩波器的输出信号经过锁相放大器的比较后再输入到计算机,由软件处理后得到所需要的信息,转换为缺陷的图像.其中优化的测试条件如下:1064 nm 泵浦光垂直入射,1319 nm 探测光 30°斜入射,三维扫描显示平面范围 1.5 mm × 1.3 mm,三维扫描深度为 1.1 mm.在表面聚焦完成后,通过软件控制定标的载物台垂直方向的移动,实现深度定位,通过载物台水平方向的移动,完成平面扫描,从而对材料中的缺陷进行了 3D 表征,获得其在材料中的空间分布情况.图 10 为

CZT 孪晶附近的夹杂物缺陷在空间上的分布,通过光热逐层扫描分析,实验获得了样品表面到内部 900 μm 范围内的缺陷空间分布截面图,并通过计算机合成为空间三维分布图.从测试结果可以看出,相比红外透射显微技术,该技术能获得缺陷在空间上的分布特征,有助于对缺陷的形成机理进行深入的研究.

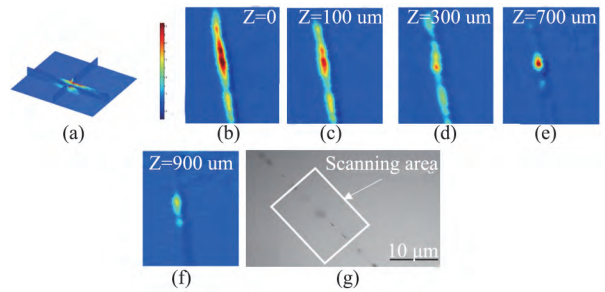


图 10 CZT 晶体的光热三维扫描成像和红外透射图像对比. (a) 缺陷的光热吸收三维图, (b)-(f) 缺陷在不同深度的光热吸收形貌图, (g) 缺陷的红外透射显微图像
Fig.10 Images of defects in CZT materials. (a) 3-D images of defects in CZT materials, (b)-(f) defects in different depths, (g) infrared transmission images of defect in CZT

3 结论

在结合 CZT 材料的特殊物理特性的基础上,对红外光热吸收测试装置的一些参数进行了优化.研究表明测试过程中存在以下两类容易产生干涉条纹的情形:①在探测光或者是透射光单独入射热导率较低的材料时,入射光波长满足干涉条件,且不被材料完全吸收.②当探测光和泵浦光同时入射时,入射光的波长,材料的禁带宽度,热导率以及厚度合适时.最后,实验将优化后的光热吸收技术用于 CZT 材料的内部缺陷结构的扫描分析上,获得了 CZT 内部孪晶线附近夹杂的在 1000 μm 的纵深空间上的三维分布图.因此,红外光热吸收技术在表征 CZT 材料中的三维缺陷的空间特征时具有一定优势,有助于对缺陷的形成机理进行深入的研究.

References

[1] Reddy M, Peterson J M, Lofgreen D D, et al. HgCdTe Growth on 6 cm x 6 cm CdZnTe Substrates for Large-Format Dual-Band Infrared Focal-Plane Arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39** (7): 974-980.
[2] Luke P N, Eissler E E. Performance of CdZnTe coplanar-grid gamma-ray detectors [J]. *Ieee Transactions on Nuclear Science*, 1996, **43** (3): 1481-1486.
[3] Hurlle D T J. A Mechanism for Twin Formation during Czochralski and Encapsulated Vertical Bridgman Growth of Iii-V Compound Semiconductors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1995, **147** (3-4): 239-250.

- [4] Y. Yan K M J, M. M. Al-Jassim. Atomic Structure of Twin Boundaries in CdTe [J]. *National Center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting*, 2003.
- [5] Zeng D M, Jie W Q, Wang T, et al. Transmission electron microscopy observations of twin boundaries and sub-boundary networks in bulk CdZnTe crystals [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2009, **311** (19): 4414-4417.
- [6] Zhu J Q, Chu J H, Zhang X P, et al. Study of zinc inclusions/precipitates in CdZnTe crystals [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, **171** (3-4): 357-360.
- [7] Bolotnikov A E, Abdul-Jabbar N M, Babalola O S, et al. Effects of Te Inclusions on the Performance of CdZnTe Radiation Detectors [J]. *Ieee Transactions on Nuclear Science*, 2008, **55** (5): 2757-2764.
- [8] Sheng F F, Zhou C H, Sun S W, et al. Influences of Te-Rich and Cd-Rich Precipitates of CdZnTe Substrates on the Surface Defects of HgCdTe Liquid-Phase Epitaxy Materials [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43** (5): 1397-1402.
- [9] Clajus M, Tumer T O, Visser G I, et al. Scanned x-ray images from a linear CdZnTe pad array with monolithic readout electronics [J]. *Hard X-Ray Gamma-Ray and Neutron Detector Physics II*, 2000, **4141**: 274-280.
- [10] Jeoung Y, Lee T, Kim H, et al. New method of the determination of HgCdTe/CdZnTe composition by infrared transmission [J]. *Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers*, 1996, **35** (1a): 134-139.
- [11] Huang G S, Yang J R, Chen X Q, et al. Study of interdiffusion in HgCdTe/CdZnTe structures by infrared transmission spectroscopy [J]. *Fourth International Conference on Thin Film Physics and Applications*, 2000, **4086**: 270-273.
- [12] Hou Q R, Chen Y B, Chen H, et al. Characterization of CdZnTe crystals by resistivity measurements and chemical etching [J]. *Modern Physics Letters B*, 2002, **16** (17): 615-619.
- [13] Benson J D, Bubulac L O, Jaime-Vasquez M, et al. Analysis of Etched CdZnTe Substrates [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45** (9): 4502-4510.
- [14] Chen L, Zhang S Y. Photothermal Detection for Light-Scattering Material by Laser Interferometry [J]. *Applied Physics Letters*, 1987, **50** (19): 1340-1342.
- [15] Penchev S, Pencheva V, Nedkov I, et al. Laser Photothermal Analysis of Magnetolectric Materials [J]. *7th International Conference of the Balkan Physical Union Vols 1 and 2*, 2009, **1203**: 273-276.
- [16] Dong J T, Chen J, Sun S W, et al. Evaluation of surface and bulk qualities of semiconductor materials by a laser-induced photothermal technique [J]. *Third International Symposium on Laser Interaction with Matter*, 2015, 9543.
- [17] CAPPER P, J G. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications [J]. *Wiley Series in Materials for Electronic and Optoelectronic Applications*, 2011.
- [18] Jin zhonghui. university Fundamental Physics [M] (金仲辉. 大学基础物理学) 2000. 311.

(上接第 324 页)

- [8] Barnes W L, Murray W A, Dintinger J, et al. Surface Plasmon Polaritons and Their Role in the Enhanced Transmission of Light through Periodic Arrays of Subwavelength Holes in a Metal Film [J]. *Ph Ysica L R Ev I Ev L Et T Ers*, 2004, **9**: 107401-107404.
- [9] Zhang X Q, Gu J Q, Cao W, et al. Bilayer-fish-scale ultrabroad terahertz bandpass filter [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**: 906-908.
- [10] Han N R, Chen Z C, Lim C S, et al. Broadband multi-layer terahertz metamaterials fabrication and characterization on flexible substrates [J]. *Optics Express*, 2011, **19**: 6990-6998.
- [11] Lan F, Yang Z Q, Qi L M, et al. Terahertz dual-resonance bandpass filter using bilayer reformativcomplementary metamaterial structures [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**: 1709-1711.
- [12] Krishnan A, Thio T, J Kim T, et al. Evanescently coupled resonance in surface plasmon enhanced transmission [J]. *Optics Communications*, 2001, **200**: 1-7.
- [13] Liang L J, Jin B B, Wu J B, et al. A flexible wideband bandpass terahertz filter using multi-layer metamaterials [J]. *Appl. Phys. B*, 2013, **113**: 285-290.
- [14] WANG L, GENG Z X, HE X J, et al. Realization of band-pass and low-pass filters on a single chip in terahertz regime [J]. *Optoelectronics Letters*, 2015, **11**: 33-35.
- [15] Zhong M, Experimental and numerical study of a broad pass-band low-loss optical metamaterials filter [J]. *Optical Materials*, 2015, **47**: 62-66.
- [16] Kats M A, Sharma D, Lin J, et al. Ultra-thin perfect absorber employing a tunable phase change material [J]. *Applied Physics Letters* 2012, **101**: 221101-221106.
- [17] Kats M A, Blanchard R, Ramanathan S, et al. Thin-film interference in lossy, ultra-thin layers [J]. *Opt. Photonics News*, 2014, **25**: 40-47.
- [18] Dotan H, Kfir O, Sharlin E, Oshri Blank et al. Resonant light trapping in ultrathin films for water splitting [J]. *Nat. Mater.* 2013, **12**: 158-164.
- [19] Corrigan T D, Park D H, Dennis Drew H, et al. Broadband and mid-infrared absorber based on dielectric-thin metal film multilayers [J]. *APPLIED OPTICS* 2012, **51**: 1109-1114.
- [20] Yang C Y, W Shen W D, Zhang Y G, et al. Compact Multilayer Film Structure for Angle Insensitive Color Filtering [J]. *Scientific Reports* 2015, **5**: 9285-95.
- [21] Ji D X, Song H M, Zeng X, et al. Broadband absorption engineering of hyperbolic metafilm patterns [J]. *Scientific Reports*, 20104, **4**: 4498-4506.
- [22] Dong Z G, Zhu S N, Liu H, Numerical simulations of negative-index refraction in wedge-shaped metamaterials [J]. *Phys Rev E*, 2005, **72**: 016607-016610.
- [23] Zhang S, Fan W J, Paniou N C, et al. Experimental demonstration of near-infrared negative index metamaterials [J]. *Phys. Rev. Lett.* 95(2005): 137404-137407.
- [24] Kats M. A., Blanchard R., Ramanathan S. et al, ultra-thin layers. *Opt. Photonics News*, 2014, **25**: 40-47.
- [25] Cleary J. W, Soref R., Hendrickson J R. Long-wave infrared tunable thin film perfect absorber utilizing highly doped silicon-onsapphire [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**: 19363-19374.
- [26] Ding F, Cui Y X, Ge X C, Ultra-broadband microwave metamaterial absorber [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**: 103506-103509.
- [27] Yi J J, Piau G P, André de Lustrac, et al, Electromagnetic field tapering using all-dielectric gradient index materials [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 30661-30667.
- [28] Yang C Y, Shen W D, Zhang Y G, et al, Compact Multilayer Film Structure for Angle Insensitive Color Filtering [J]. *Scientific Reports*, 2015, **5**: 9285-9289.
- [29] Corrigan T D, Park D H, Dennis H, et al, Broadband and mid-infrared absorber based on dielectric-thin metal film multilayers [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**: 1109-1114.
- [30] Hedayati M K, Javaherirahim M, Mozooni B, et al, Design of a Perfect Black Absorber at Visible Frequencies Using Plasmonic Metamaterials [J]. *Adv. Mater.* 2011, **23**: 5410-5414.
- [31] Mary A, Rodrigo S G, Garcia-Vidal F G, et al, Theory of negative-refractive-index response of double-fishnet structures [J]. *Phys. Rev. Lett.* 2008, **101**: 103902-103905.
- [32] Smith D R, Vier D C, Koschny T, et al, Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, **71**: 036617-036627.