

金属材料次表面缺陷成像检测系统及其应用*

沈剑峰 施柏煊

(现代光学仪器国家重点实验室 浙江大学光电系, 杭州 浙江 310027)

摘要 介绍了一种基于光热光偏转检测技术的原理,可以检测金属材料次表面缺陷空间分布的激光热波探测系统. 该系统具有结构紧凑,调试简便,运行稳定,测试结果可靠的特点,它用半导体激光作泵浦光源和探测光源,采用电源调制的方式对泵浦光束进行调制,有频率稳定、噪音小的优点,同时系统可以用低压直流电源供电,为仪器化和便携化研究创造了条件. 利用该系统对金属铝片次表面不同深度的凹槽作了检测,得到了与实际样品一致的检测结果.

关键词 光热偏转技术;无损检测;次表面成像

中图分类号 TB303;TN247

文献标识码 A

0 引言

光热光声效应作为材料所具有的物理效应而被用于检测材料的次表面缺陷,这一技术在20世纪70年代起就已有学者开始研究和应用,这种技术的优越性在于它对材料的检测是非接触及非破坏性的,目前,很多学者对这一技术的机理及实际应用进行着大量的研究^[1-6].

光热探测技术主要有光热光偏转技术、光热位移检测技术及热透镜检测技术等几种,利用光热探测技术检测薄片材料次表面缺陷的光学布置又很多. 本文采用的横向光热光偏转方法,其基本原理是用一束泵浦光加热材料表面,材料吸收光能通过无辐射去激发而产生微弱的升温效应,从而导致材料表面的气体有一定的温度梯度分布,也即产生气体折射率的梯度分布,另一探测光束通过这一有折射率梯度分布的区域时,光线就会产生偏折,检测这个偏折的量,就能检测到材料表面的温度变化,而材料表面的温度变化又与材料次表面的缺陷相联系,因而通过对材料样品表面的扫描检测,可以得到材料次表面的缺陷图像,如果将泵浦光作周期调制,则不同的调制频率会引起热扩散长度的变化,频率越低,热扩散长度就越长,能反映材料次表面信息的深度就越深,因此通过控制泵浦光的调制频率就可以检测材料次表面不同深度处的缺陷情况.

最先的探测系统是采用数百瓦的氙灯作泵浦光源,由于氙灯光的能量分散,检测的效果并不理想,为了提高检测的信噪比,后来就采用了能量密度大的激光器^[7,8]. 而探测光束则是采用小功率的氦氖激光器,功率一般在2~5 mW,泵浦光的调制一般

采用切光器或声光器^[9]来实现,但切光器的频率低、声光器的光学效率低. 本文采用半导体激光作泵浦源和探测束,通过电源直接调制的方式对泵浦光束进行调制,具有结构小巧、调制频率动态范围大、泵浦光光学效率高的特点,可开拓为实际用于检测材料次表面缺陷的成像检测系统.

1 次表面缺陷成像探测系统的结构

图1为材料次表面缺陷成像检测系统的结构框图. 如图所示,波长为810 nm,出射功率为0~600 mW可调的泵浦光束通过聚焦镜在被测样品的表面形成直径为0.5 mm的光斑,象限检测器接收掠过样品表面的小孔径平行束探测光(650 nm, 5 mW),光敏二极管接收泵浦束3%的分束光以监视其漂移的情况,两路信号都经锁相放大器处理后,由采样控制器进行模数转换,送入计算机实现数据的存储和处理,样品次表面缺陷的成像采用扫描方式获取,三维样品的扫描移动由计算机通过控制器实现.

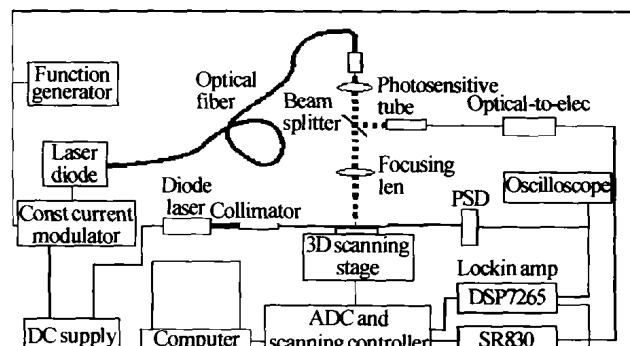


图1 次表面缺陷激光探测系统的结构框图
Fig. 1 Block diagram of subsurface defects detecting system

1.1 恒流调制电源

为适合不同深层次表面缺陷的检测,对泵浦光的调制频率提出大动态范围可调的要求,为此,特别自行设计了泵浦激光器的恒流调制电源,用以控制激光器的输出功率和频率,图2为激光二极管的输

*国家自然科学基金资助项目(10174067)
Tel:0571-87953049 Email:jfshen@zju.edu.cn
收稿日期:2003-09-19

输出功率与输入电流的关系曲线,因此通过控制激光器的输入电流可以控制激光的输出功率,恒流调制电源输出恒定的方波电流控制激光器输出稳定的调制光束.

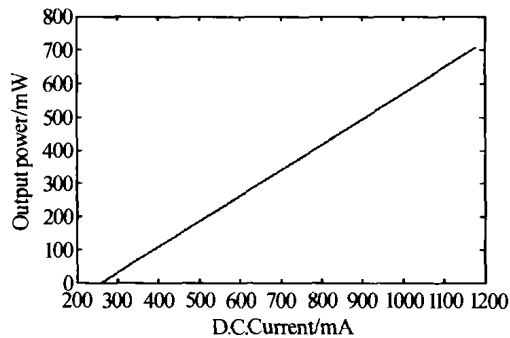


图2 激光二极管的输出功率

Fig. 2 Varying curve of diode laser output power

在恒流调制电源的设计上需要考虑输出电流大(0~2 A)、调制频率范围宽(0~100 KHz)、恒流稳定性好等因素,因此电路中采用了大功率场效应管作电流调整管、用高速运放作恒流反馈控制,由于电路还有低频工作的需要,因此对数字函数发生器输入的调制信号必须作直流耦合.图3为恒流调制电源的电路原理图,这个电源很好地符合了探测系统中泵浦激光器的工作要求,通过信号源(函数发生器)的改变可以获得多种波形(方波、正弦波、三角波、不等占空比方波)及调制频率动态范围大的激光输出.

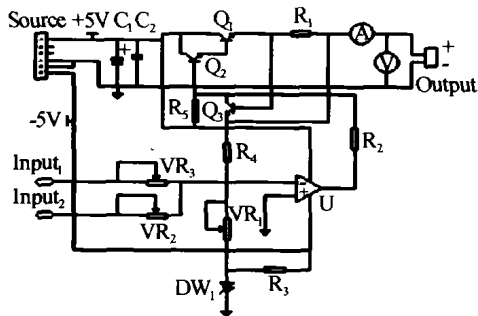


图3 恒流调制电源电路原理图

Fig. 3 Schematic diagram of modulator constant current source

1.2 信号采集和处理

在光热偏转信号幅值成像的检测中,偏转信号的大小与样品材料的特性及泵浦光的能量相关,信号检测通常使用象限检测器,目前的象限检测器可以检测到 $1.5 \times 10^{-9} \text{ rad/Hz}^{1/2}$ 的偏转.由象限检测器获取的光热偏转调制信号经过锁相放大器作放大和转换,由于泵浦光为非连续波形光,因此泵浦光归一信号的获得也需通过一台锁相放大器,将非连续信号转为直流输出,双通道模数转换器将两个锁相放大器输出的信号转换成数字信号送入计算机.

计算机采集到的信号数据为一维数组,经格式转换后,在 Excel 界面中根据扫描参数进行二维数组重排,实现数据的图像灰度编码或三维成像显示.

2 金属铝片次表面缺陷的检测

应用上述激光探测系统装置,对金属铝片样品^[10]的次表面缺陷进行检测,铝片的背面开了两条倾斜度分别为 $33 \mu\text{m/mm}$ 和 $34.5 \mu\text{m/mm}$ 的槽,因而形成了深度不同的空腔.

将样品放在三维扫描台上,使探测光束刚好掠过样品的表面,用调制频率为 65 Hz、功率为 180 mW 的泵浦光束照射样品表面,调整探测光束与样品表面的距离,使光热偏转信号最大;控制步进电机的扫描间隔 ΔX 为 $50 \mu\text{m}$ 、 ΔY 为 $100 \mu\text{m}$,扫描行程 X 为 4 mm、 Y 为 4 mm,因此这幅扫描图像由 80×40 个像素数据组成,通过对样品正面的光热偏转信号的扫描检测,得到样品的灰度编码图像和三维图像分别为图4、图5,检测结果很好地反映了样品的次表面缺陷(空腔斜槽).

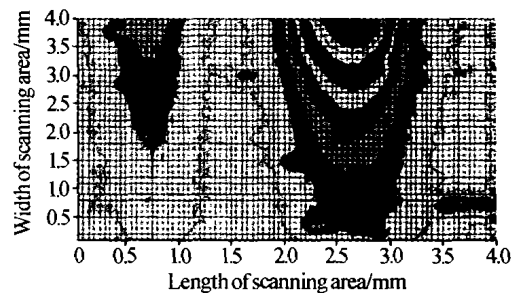


图4 样品成像检测的灰度编码图像

Fig. 4 Gray level pattern of detected sample

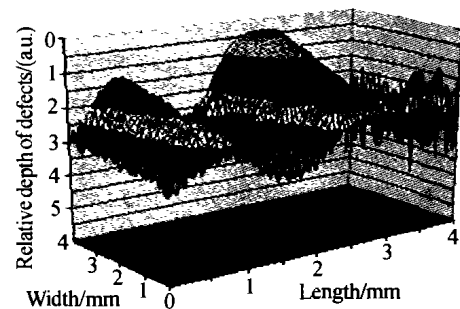


图5 样品成像检测的三维图像

Fig. 5 3-D pattern of detected sample

3 讨论

系统的泵浦光源及探测光源全采用了半导体激光器,因此可用低压直流电源供电,避免了传统装置中的高压系统,使系统光源的体积更小、操作更安全、结构更紧凑,为检测系统的仪器化和便携化研究提供了条件.

由于采用了电源直接调制的光束调制技术,避免了切光器产生的机械震动,提高了检测系统稳定性,同时还可以产生多种波形的调制光束和多频调制光束,为进一步的理论和实验方法的研究提供了条件.

检测中发现,当材料的厚度远小于材料的热扩

散长度时,检测的信噪比更好,因此这一检测技术,更适宜于薄膜材料的均匀性检测。

在材料次表面缺陷扫描成像检测中,该技术推广应用直接面临的困难是费时问题。扫描一幅 $4\text{ mm} \times 4\text{ mm}$ 如图 5 的图像,需采样 3200 点,设置锁相放大器的时间常数为 300 ms,约需耗时 1 h,检测一个大面积的材料样品所耗时间显然太长,因此提高系统的扫描检测速度就成为本项研究的新目标。

4 结论

本文应用光热偏转的检测原理,建立了以半导体激光器为泵浦源和探测源的热波探测系统,用来检测材料次表面的缺陷情况,检测结果与实际样品符合得比较好,具有很好的实用性。

若对检测信号进行定标,则该技术还可以发展为薄膜厚度的非接触检测,这种无损检测的方法,将在更广的领域得以运用。

参考文献

- 1 Busse G. Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal. *Appl Phys Lett*, 1979, **35**(10): 759 ~ 760
- 2 Thomas R L, Pouch J J, Wong Y H, et al. Subsurface flaw detection in metals by photoacoustic microscopy. *J Appl Phys*, 1980, **51**(2): 1152 ~ 1156
- 3 Boccara A C, Fournier D, Badoz J. Thermo-optical spectroscopy: Detection by the 'mirage effect'. *Appl Phys Lett*, 1980, **36**(2): 130 ~ 132

- 4 施柏焯,殷浩,王聪和,等. 横向激光光热偏转相位法测量金刚石薄片的热扩散率. *光子学报*, 2000, **29**(5): 474 ~ 477
Shi B X, Yin H, Wang C H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(5): 474 ~ 477
- 5 施柏焯,谈恒英,缪进. 利用激光引发的热透镜效应无损检测固体薄片中的深度缺陷. *光子学报*, 2001, **30**(2): 174 ~ 178
Shi B X, Tan H Y, Mao J. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(2): 174 ~ 178
- 6 Busse G, Renk K F. Steroscopic depth analysis by thermal wave transmission for nondestructive evaluation. *J Appl Phys Lett*, 1983, **42**(4): 366 ~ 368
- 7 Salnick A, Faubel W, Klewe-Nebenius H, et al. Photothermal non-destructive evaluation and image of copper patina. *Progress in Natural Science, Supplement to Vol. 6*, 1996. 150 ~ 153
- 8 Abdalla S, Negm S, Hassan A F, et al. Thermal wave depth profile of subsurface defect in opaque solids using mirage effect. *CP463, PA and PT Phenomena: 10th International Conference*, 1999. 164 ~ 166
- 9 Cretin B. Multi-acquisition photothermoelastic imaging with optical probing: which image for which application? *CP463, PA and PT Phenomena: 10th International Conference*, 1999. 147 ~ 151
- 10 施柏焯,赵杰,龚健. 激光偏转法检测金属表面层的缺陷. *激光与红外*, 1994, **24**(2): 53 ~ 58
Shi B X, Zao J, Gong J. *Laser & Infrared*, 1994, **24**(2): 53 ~ 58

Structure and Application of a Sub-surface Mapping System for Examining the Defects of Metal Material

Shen Jianfeng, Shi Baixuan

State Key Lab. of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2003-09-19

Abstract A thermal wave examining system, which is based on the theory of photo-thermal deflection technique and can examine the spatial distribution of subsurface defects of metal material is described. The system has features of compact structure, easy adjusting procedure and stable test result. Two semiconductor lasers are used as pumping and detecting sources in the system. The pump beam is modulated by the power supply modulating method, which made the system have the advantages of more stable frequency and lower noise. The pump beam and the detecting beam can be supplied by low voltage DC supply source made the examining system have the possibility of integrate and portable. A satisfied examining result is got by using this system on an aluminum chip sample which has different deep channel on its subsurface.

Keywords Photo-thermal deflection technique; Nondestructive examination; Sub-surface mapping



Shen Jianfeng a senior engineer, was born in 1965. He graduated from Hangzhou University with M. S. degree in 1993. Currently he is a Ph. D. candidate on optics engineering in Zhejiang University. He has engaged in research on applied spectroscopy and photo-electronic detecting for long time. Now he is researching project "Research on differential detection theory of photo-thermal wave and its applications in nondestructive evaluation of solid thin films" supported by NSFC.