

文章编号: 1005-5630(2004)02-0099-06

光学镀膜近红外膜厚监控的信号压噪*

马云飞, 王自鑫, 江绍基, 余卫龙, 朱 析, 蔡志岗, 李宝军
(中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 在光学真空镀膜膜厚监控过程中, 近红外波段信号弱、外界干扰大、信噪比低, 难于检测监控。运用相干检测、锁相放大原理, 在光学真空镀膜机可见光波段监控系统的基础上, 自行研制锁相放大器和改装近红外探头, 成功地实现了近红外信号的压噪、放大、滤波和检测监控。

关键词: 近红外; 光学薄膜; 膜厚监控; 锁相放大

中图分类号: TH 744 **文献标识码:** A

Depress noise of near infrared signal for optical coating

MA Yun-fei, WANG Zi-xin, JIANG SH ao-ji, SHE W ei-long, ZHU X i, CA I ZH i-gang, L I B ao-jun
(State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-Sen University,
Guangzhou 510275, China)

Abstract To amplify, filter, and monitor weak near infrared signal from strong noise during optical coating, a locking-in amplifier with near infrared detector has been designed based on the principle of visible optical monitoring system for optical coating. By using the designed locking-in amplifier, the weak near infrared signal was monitored successfully from the strong noise during optical coating and the characteristics of the weak near infrared signal was characterized easily.

Key words: near infrared; optical coatings; monitoring of coating thickness; locking-in amplify

1 引 言

在光学真空镀膜过程中, 膜厚的在线监控信号压噪是决定薄膜性能参数的重要因素。在光学膜厚监控系统中, 从光源到探测器有较长的光程, 信号在传播过程中能量损耗较大, 而且在近红外波段(按照 ASTM^[1]定义是指波长在 780nm ~ 2526nm 范围的电磁波), 一切发热的物体都会向外辐射近红外线, 强烈的外界辐射将不可避免地进入监控系统的光路, 这些干扰光经过光电转换器的转换后变成一定幅度的背景噪声信号, 其强度甚至比有用的监控信号大几个数量级, 导致在近红外膜厚监控时信号不够强、不稳定, 淹没在噪声中不能提取出来, 无法正常监控。国产的膜厚监控系统基本还停留在可见光波段, 近红外波段的光学膜厚监控系统普遍存在不稳定、信噪比低的缺点, 未能推广应用。高档镀膜机的近红外监控系统基本是靠进口外国整套监控系统, 成本居高不下。近红外波段中的 1300nm ~ 1550nm 波段正是光通信所用的波段, 有巨大的应用前景, 如果能增强膜厚监控仪的压噪性能, 提高信噪比, 做到近红外信号直接精准监控, 对于改进国产镀膜机的性能和提高国产光通信薄膜器件的档次将会有非常重要的意义。

* 收稿日期: 2003-11-30

作者简介: 马云飞(1978-), 男, 山东烟台市人, 硕士研究生, 主要从事光学真空镀膜机近红外膜厚监控系统的研发和测试工作。

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

2 监控原理

真空镀膜光学监控原理图如图 1 所示。

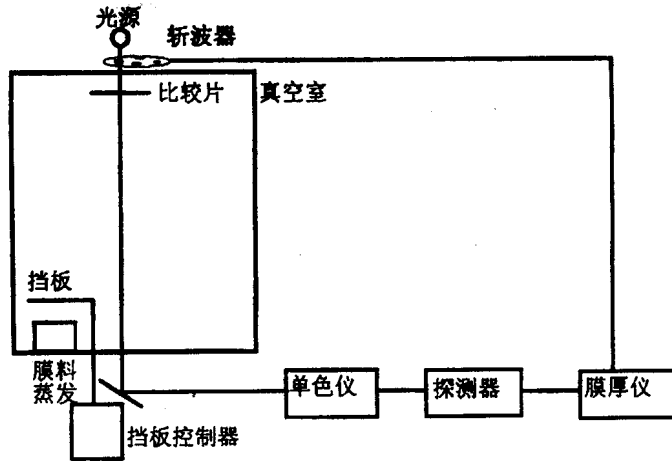


图 1 光学监控原理图

真空镀膜光学监控通常采用光电检测光,即实时测量监控薄膜的透射率或者反射率的方法。薄膜的透射率或者反射率是随薄膜厚度的变化而变化。

膜层的透射率为^[2]:

$$T = \frac{n_3}{n_1} \cdot \frac{t^2}{1 + r^2 - 2r \cos(\frac{4\pi nd}{\lambda})} \tag{1}$$

其中 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为空气、膜料、基片的折射率; d 是膜层的物理厚度。

由图 1 和(1)式看出:在真空镀膜的过程中,光源发出的光经斩波器斩波调制,变成带有一定调制频率的信号光透过监控片或被监控片反射,随着膜料的不断蒸镀,膜层的厚度 d 不断变化,膜层的透射率或反射率相应地发生变化,光纤束将变化的信号光引进单色仪,单色仪选择单色监控波长信号光从出射狭缝出射,单色的信号光最终被光电倍增管或光电池接收,将光信号转换成电信号送进光学膜厚监控仪,处理后的电信号通过光学膜厚仪的表头显示出来,通过对表头的监控达到控制膜层厚度的目的。

3 信号压噪电路设计

造成近红外监控信号信噪比低的主要原因有两个:第一是光电倍增管的测量范围长波极限只能到 1100nm,超过此波长就检测不到了,普通近红外探头的探测性能较光电倍增管弱很多;第二是近红外信号非常弱,加之外界干扰噪声强,造成信噪比低,无法从探测信号中将有用信号分离出来。针对上面两个因素,目前做了相应改进:第一是将 HP8152IB 光学探头的光电池改装成探测器,它具有较大的受光面积,较高的灵敏度,响应波长范围是 900nm~1700nm,覆盖了光通信波段的 1300nm~1550nm;第二是采用相干检测原理和锁相放大技术,自行设计锁相放大器(曾尝试使用 EG&G 公司的 MODEL 5209 型锁相放大器和镀膜机专用膜厚监控仪都不能解决问题),对近红外信号进行压噪、锁相放大和提取。

图 2 是一个典型的锁相放大器的原理框图,一个单相锁相放大器通常由三个主要部分组成:信号通道、参考通道、相关器(包括直流放大器)。

3.1 信号通道

信号通道主要包括低噪声前置放大器和有源滤波器,作用是将微弱信号放大到足够推动相关器工作的电平,抑制和滤除部分干扰和噪声,扩大仪器的动态范围。

信号通道要求有低噪声和高增益的性能,前置放大器是锁相放大器的第一级,一个放大系统性能优劣第一级放大是关键。被测信号光电流只有几个纳安,因此要求前置放大器的偏置电流和输入端短路噪声系

数都非常低,才能有效地将信号提取出来。目前 TIAD 等公司推出了多种高性能低噪声放大器,经过对比选用 TI 公司的 OPA111,其噪声电压系数为 $8\text{nV}/\text{Hz}$,偏置电流 1pA ,失调电压 0.25mV ,失调电压漂移 $1\mu\text{V}/$,是业界综合性能最好的放大器之一,尤其适用于光电转换。与 EG&G 公司在 MODEL 5209 锁相放大器中所采用的 LF411(噪声电压系数为 $25\text{nV}/\text{Hz}^{1/2}$,偏置电流 50pA ,失调电压 0.8mV ,失调电压漂移 $10\mu\text{V}/$)作为第一级电流转换成电压放大器相比,每一项性能都好很多,这也是 MODEL 5209 不能成功放大的原因之一。经过第一级放大,光电流信号被转换成 mV 量级的电压信号,然后经过高精度程控放大器组合 AD526 和 PGA202,可以将信号放大 1 倍~16000 倍。为了得到更好的动态范围,信号被送入一个由 DAC0832 控制的程控放大器,主要用于细调进入相关器的信号幅度,使信号有最好的动态范围。放大后的信号的信噪比仍然非常低,需要进一步滤波。信号光斩波频率为 1000Hz ,选择这个频率一是工频的整数倍可以避免工频干扰,二是经验所得在此频率附近 PN 管输出信噪比较高。由于斩波频率不是绝对稳恒的,会有飘动(飘动范围 $980\text{Hz}\sim 1020\text{Hz}$),所以需要使用跟踪带通滤波,即根据斩波器的频率漂移而不断自动改变中心频率,只有这样才能扣除由斩波器频率漂移所带来的误差。实现跟踪带通滤波器的方法有两种:一种是使用开关电容滤波器与锁相倍频电路,这种滤波器使用方便,可以轻松实现高 Q 值跟踪滤波,但是有时钟穿通噪声和其他混杂噪声,而且目前的开关电容的滤波的每个滤波周期内采样次数不超过一百次,输出的波形不连续,引进一些高倍频噪声;另一种是使用连续滤波器,用连续滤波器实现跟踪滤波器相对比较麻烦,但是跟踪滤波的效果比第一种方法好很多。经过反复试验比较,选用 BB 公司的连续滤波器 UAF42 组合 DA 转换器实现高 Q 值自动跟踪滤波,经过带通滤波后信号信噪比显著提高。

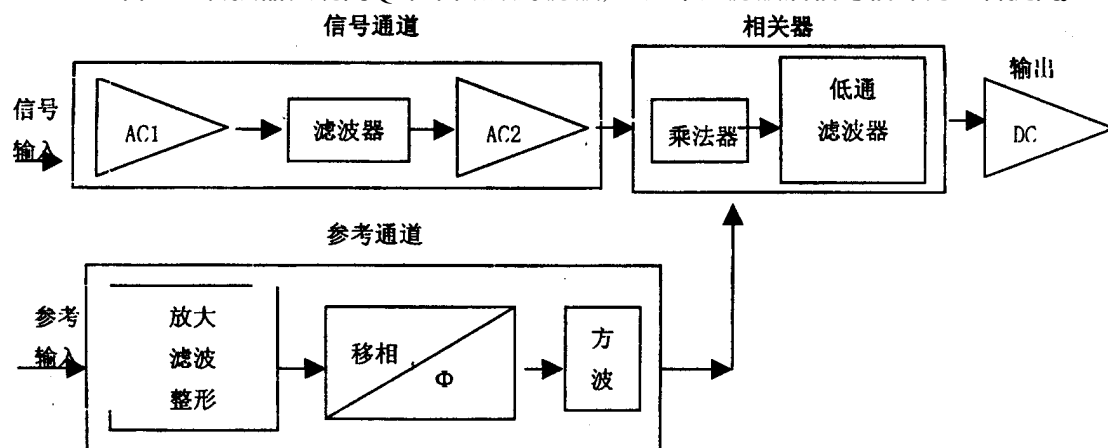


图 2 锁相放大器原理方框图

3.2 参考通道

互相关检测除了被测信号外需要有参考信号送到相关器中,因此参考通道是锁相放大器中必不可少的一个部分。参考通道由放大滤波整形和移相两部分组成。

参考信号是从斩波器附近的光电池中提取出来的,信号只有 20mV 左右的峰峰值,因此需要经过交流放大,再经过比较器形成方波。由于形成的方波的占空比不是 50% ,不利于后面的处理,所以在交流放大进入比较器前加入一中心频率为 1kHz 的带通滤波器,这样得到的便是 50% 占空比的方波。

得到方波后将它送入 74hc4040 进行 32 分频,然后由 AVR MEGA 16 单片机测量 32 分频后的周期,换算成频率,用以跟踪滤波器和数字移相器的控制。移相器是依靠高速单片机(运行速度 16MIPS) MEGA 16 内部的计数器和外部中断完成。专用于移相的 CPU 的运算速度很高,处理后移相精度可以达到 0.03° ;稳定性可以达到 0.1° 。移相后的方波送入相关器。

3.3 相关器

相关器是锁相放大器的核心部分,采用相干检测技术,将信号从噪声淹没中提取出来,由乘法器和积分器两部分组成^[3]。现选用锁相放大电路专用模拟乘法芯片实现参考信号和被检测信号相乘的功能。

假设被检测信号为:

$$S_i(t) = A_i \sin(\omega t + \phi) + B_i(t) \tag{2}$$

参考信号为:

$$S_r(t) = A_r \sin(\omega t) \tag{3}$$

被测信号和参考信号在乘法器中相乘并由积分器积分得到

$$\begin{aligned} S_0 &= \lim_n \frac{1}{nT} \int_0^{nT} S_i(t) S_r(t) dt \\ &= \lim_n \left\{ \frac{1}{nT} \left[A_i A_r \int_0^{nT} \sin(\omega t + \phi) \sin(\omega t) dt + \int_0^{nT} B_i(t) \sin(\omega t) dt \right] \right\} \\ &= \frac{1}{2} A_i A_r \cos \phi \end{aligned} \tag{4}$$

式中 T 是周期信号的周期, $T = \frac{2\pi}{\omega}$, 由于噪声与 $\sin(\omega t)$ 是不相关的, 所以经过多次平均后为零, 与参考信号相同频率的有用信号与参考信号相乘得到 $S_0(t)$, 积分器积分后得到直流信号 S_0 . S_0 与参考信号和被测信号的固定相位 ϕ 成余弦关系, 调节参考通道的移相器改变 ϕ 的值, 通常让 ϕ 等于零, S_0 有最大值.

4 实验数据

探测器将接收到的监控光信号(1300nm)转换为电信号, 经可存贮示波器 Tektronix TD S3032 探测并将记录结果输出, 如图 3 所示.

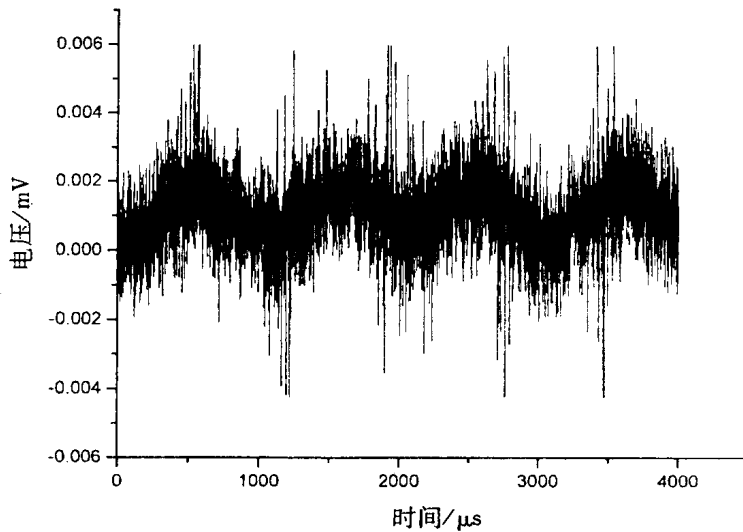


图 3 探测器信号输出(噪声淹没信号)

从图 3 可以看出强大的噪声将纳伏级的微弱信号淹没, 普通的检测手段无法将信号从噪声中提取并测量出来. 运用自行研制的锁相放大器对信号进行跟踪放大滤波处理后, 输出的信号如图 4 所示.

由图 4 可以看出信号被放大 9 个量级到伏特量级, 信号清晰稳定, 频率与斩波器调制频率 1000Hz 吻合, 验证检测的正确性. 放大后的信号和参考信号在相关器中相乘, 输出信号如图 5 所示.

通过移相器调节移相角度 ϕ 为 0 或 π , 输出信号达到最大值.

运用此近红外监控系统进行近红外膜厚监控实验: 监控中心波长为 1300nm, 膜系设计为 A (HL)⁶HG, 高折射率膜料选用硫化锌(ZnS, $n_{ZnS} = 2.35$), 低折射率膜料选用氟化镁(MgF₂, $n_{MgF_2} = 1.38$). 单片监控一次完成, 膜片经 Perkin-Elmer 公司的 LAMBDA 900 分光光度计测量得到透过率谱线如图 6 所示.

由图 6 可以看出最低透射率出现在 1305nm, 透过率为 0.6134%, 在 1236nm ~ 1414nm 的带宽内透过率小于 1%.

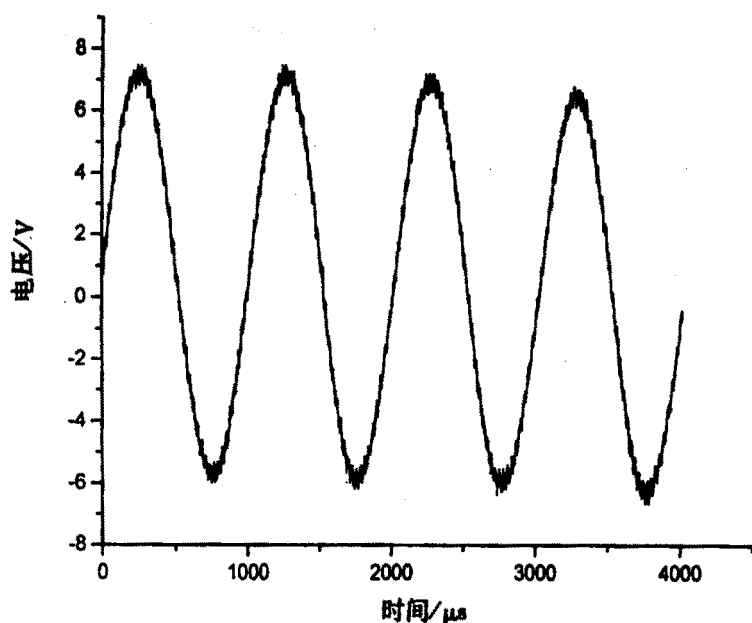


图 4 放大滤波输出

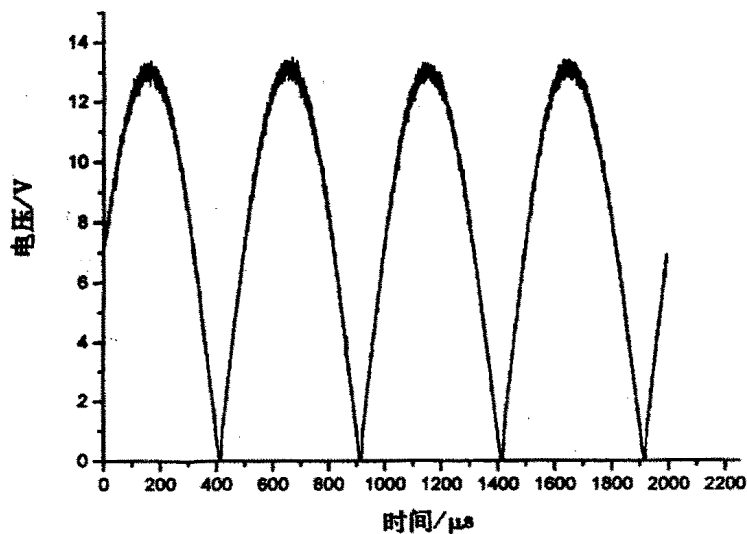


图 5 相关器输出

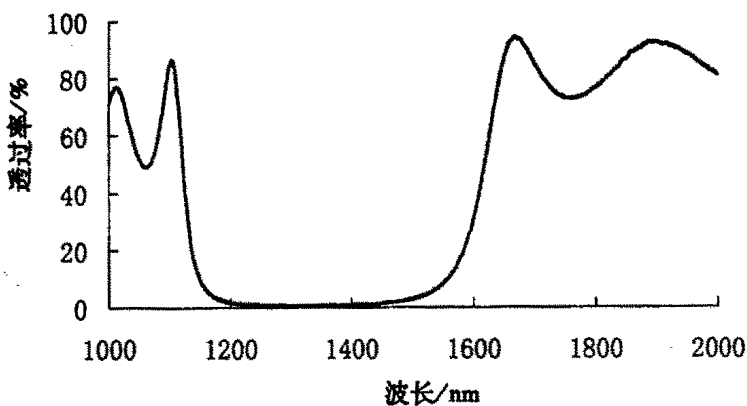


图 6 (HL)⁶H 膜系透过率曲线

5 结束语

系统经实验检测信号稳定, 在近红外(1000nm~ 1700nm)膜厚监控过程中显示出出色的压噪性能, 成

功地将纳伏量级的微弱信号从强大的噪声中提取出来,经过锁相放大后可以达到伏特量级,放大了九个量级,信号稳定,信噪比高。在镀制高反膜系时,使用单片监控片即可监控透过率从 100% 到 0.5% 的信号,满足使用要求。

6 参考文献

- [1] 占细雄,林 君,周志恒. 近红外光谱仪中的微弱信号检测技术[J]. 仪器仪表学报, 2002, 23(3): 29~ 31.
- [2] 林永昌,卢维强. 光学薄膜原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989. 323.
- [3] 曾庆勇. 微弱信号检测(第二版)[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 47~ 74.

消 息

第二届全国信息获取与处理学术会议征文通知

第二届全国信息获取与处理学术会议将于 2004 年 8 月召开(具体时间和地点另行通知),本次会议由中国仪器仪表学会主办,沈阳市仪器仪表与自动化学会承办。本次会议的征文内容如下:

一、征文范围

(1) 各种测量、计量、检测、监测、探测、测试、实验、试验(以下统称测量)等方法研究; (2) 各类传感器、敏感元件、仪器仪表、测量装置的新原理、新技术、新元件、新材料、新工艺的研究; (3) 测量过程中的信号传输(如现场总线技术等); (4) 模式识别(图像、语音、生物特征识别等); (5) 数据处理; (6) 化学分析方法与仪器; (7) 环境监测技术; (8) 天体、大地、海洋测量; (9) 地质矿产勘探,地热、地震、火山、地磁、地电、水文观测,大气探测,矿山安全检测; (10) 临床医学影像检测、实验室检验; (11) 金属材料与金属腐蚀试验、实验室应力分析; (12) 生产过程自动化; (13) 其它。

会议相关信息和进一步要求,请浏览《沈阳测控信息网》的相关内容。网址: [http://www. syias org cn](http://www.syias.org.cn)

二、投稿地址

沈阳市铁西区南十三路 1 号 29 信箱(邮编 110023),沈阳市仪器仪表与自动化学会贾冬娜收。电话: 024-25691417; 024-25415320。传真: 024-25415320。

E-mail: webmaster@meeting.org.cn 或 webmaster@syias.org.cn

网址: [http://www. syias org cn](http://www.syias.org.cn)