

文章编号: 1001-3806(2006)03-0283-03

高精度数字式光学膜厚监控系统

鞠 兵¹, 马 孜², 蔡邦维¹

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064 2 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 通过对光学膜厚监控系统中光路部分、电路部分以及信号处理部分的噪声分析, 设计出频率稳定性良好的斩波器、低噪声光接收电路和具有较强抗噪声性能的数字式锁相放大器, 从而显著地提高了系统的精度和稳定性, 为提高镀膜成功率和薄膜性能创造了有利的条件。将该系统应用于镀膜系统中, 实验结果证实了该系统具有较高的精度和稳定性。

关键词: 薄膜; 光学膜厚监控; 数字式锁相放大器; 精度; 信噪比

中图分类号: O484.4 文献标识码: A

High precision digital optical monitor

JU Bing¹, MA Zi², CAI Bangwei¹

(1. College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China 2 Southwest Institute of Technical Physics Chengdu 610041, China)

Abstract After analyzing the noise in light path circuit and signal process in the system of optical monitor, the frequency-stabilized chopper low noise receiving circuit and digital lock-in amplifier with excellent performance of noise restraint are designed. Thereby the precision and stability of the system is improved greatly. Applying the system in optical coating system, the optical monitor shows high precision and stability.

Key words thin films; optical thickness monitoring; digital lock-in amplifier; precision; signal noise ratio

引 言

对于光学薄膜的制备, 通用的膜厚监控方法是光学监控方法。由于光信号经真空光路和单色仪后, 其光强变得很弱, 此时外界各种干扰噪声可能比有用光信号强得多, 导致系统稳定性较差。目前, 国产光学膜厚监控系统精度较低, 稳定性较差, 而国外光学膜厚监控系统精度高, 稳定性好, 但价格昂贵。为此, 作者自行设计出高精度数字式光学膜厚监控系统, 提高了监控系统的精度和稳定性, 为提高镀膜成功率和薄膜性能创造了有利的条件。

1 原 理

一般光学膜厚监控系统结构如图 1 所示。来自光源的光信号由光斩波器调制成一定频率的交流光信号。该光信号一部分经镀膜机真空室到单色仪, 再通过光接收放大电路, 成为锁相放大器的主信号输入; 另一部分光信号直接经光接收放大电路成为锁相放大器的参考信号。最后, 由锁相放大器进行相敏检波测得

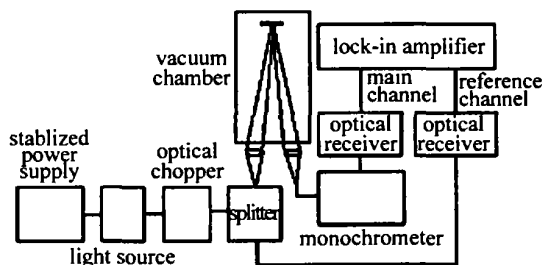


Fig 1 The average structure of optical monitoring system

光信号的幅度。

锁相放大器是一种常用的微弱信号检测设备, 而锁相放大器一般是以相敏检波器 (PSD) 为核心的^[1]。在一般情况下, PSD 的主信号 V_i 和参考信号 V_r 是两个正弦波, 且其频率相同, 而 V_i 中含有宽带噪声项, 即: $V_i = E_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) + \sum E_n \cos(2\pi f_n t + \phi_n)$ (1)

式中, E_i 为主信号的振幅, f_i 为主信号的频率, t 为时间, ϕ_i 为主信号的初相位, E_n 为噪声的振幅, f_n 为噪声的频率, ϕ_n 为噪声的初相位。
($V_r = E_r \cos(2\pi f_r t)$) (2)

式中, E_r 为参考信号的振幅, f_r 为参考信号的频率, 在这里 $f_i = f_r$ 。

PSD 的乘法器之后输出为:

$$V = V_i V_r = (1/2) E_i E_r \cos \phi_i + (1/2) E_i E_r \times \cos(4\pi f_i t + \phi_i) + \sum (1/2) E_n E_r \cos[2\pi(f_n - f_i)t +$$

作者简介: 鞠 兵 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光与光通信和光学薄膜的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ziman@sc.cn@yahoo.com

收稿日期: 2005-04-04 收到修改稿日期: 2005-04-15

$$\phi_n] + \sum (1/2)E_n E_r \cos[2\pi(f_n + f_i)t + \phi_n] \quad (3)$$

经低通滤波器后,上式中第 2 第 4项被滤除掉,第 3项中只剩下带内噪声,只有第 1项为直流项,保持不变。当参考信号振幅 E_r 已知时,适当调节主信号和参考信号之间的相位差为 0 或 2π 的倍数,则可获得主信号的振幅 E_s 。

2 方案设计

在一般光学膜厚监控系统中,斩光器的频率稳定性差,光探头的光谱响应范围窄,稳定性也差,锁相放大器采用全模拟电路,有诸多缺点,导致整个系统稳定性和抗噪声能力都较差,其精度(短时间稳定性)约 $\pm 0.2\%$ 。为提高监控性能,从以下 3 方面进行优化,设计出高精度数字式光学膜厚监控系统。

2.1 光信号部分

光信号部分噪声主要来自光源及其驱动电源和斩光器。选择高稳定性、低噪声的卤钨灯作光源,其光噪声(30s内光变化)小于 0.02%;光源的驱动电源为恒流源,其电流稳定性约 0.05%;另外,笔者自行设计的斩光器频率稳定性优于 1%(普通斩光器的频率稳定性约为 5%),基本消除了光调制频率的稳定性和位相抖动噪声带来的影响。

2.2 电信号部分

一般光学膜厚监控系统的光探头采用光电倍增管,它的光谱响应范围较窄(500nm ~ 900nm),且要求 500V ~ 1500V 的高压电源供电,电源电压稳定性会直接影响探头的稳定性。为此,选择了无须高压供电的 PN 管作为光探头,且针对可见光区和红外光区,分别选择 SiPN 管和 InGaAs PN 管,从而增大了光控系统的监控范围(500nm ~ 1700nm)。

光学膜厚监控系统中的干扰噪声有光噪声和电噪声,而电噪声主要来自光接收电路的前置放大电路,为此,精心设计了低噪声、高增益的光电二极管前置放大电路,其原理见图 2。对前置放大电路设计的目标是提高其信噪比,而不是单方面的信号增益最大化或噪声最小化。

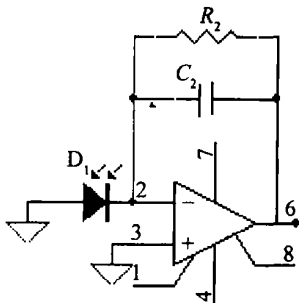


Fig 2 Pre-amplifier circuit

前置放大电路为 I-V 转换电路,其输出为:

$$V_{out} = Z_e I \quad (4)$$

式中, I 为光电二极管产生的光电流, Z_e 为由电容 C_2 、电阻 R_2 组成的反馈网络的等效阻抗:

$$Z_e = 1/(1/R_2 + j2\pi f C_2) \quad (5)$$

式中, f 为信号频率。

电路噪声包括光电二极管的热噪声 (Johnson 噪声) 和散粒噪声、反馈电阻的热噪声和过剩噪声、运算放大器的电压噪声和电流噪声。由于所设计光电二极管工作在光伏模式^[2]下,其散粒噪声可忽略;系统工作频率较高,几乎无直流电流通过电阻,并选用了金属膜电阻,其过剩噪声较小,可忽略^[1]。故前置放大电路噪声主要有光电二极管热噪声、反馈电阻 R_2 的热噪声和运算放大器的电压噪声、电流噪声。

电阻 R 的热噪声谱密度 V_r 由下式给出:

$$V_r^2 = 4kTR \quad (6)$$

式中, k 是玻耳兹曼常数, T 是绝对温度。

运算放大器的电压噪声和电流噪声谱密度可查其产品参数获得。

前置放大电路的这些噪声折合到输出端的谱密度大小可计算^[2]。事实上,通过对光电二极管、运算放大器的特别筛选和对前置放大电路的精心设计,可以使得前置放大电路的噪声以反馈电阻 R_2 的热噪声为主,而其它噪声可忽略。这时,前置放大电路的信噪比主要由 R_2 决定,也就是说,对于给定的反馈电容 C_2 和系统工作频率 f ,可优化 R_2 以获得最大的信噪比。例如,当 $C_2 = 3pF$, $f = 166Hz$ 时,可由 (5) 式获得等效阻抗 Z_e 跟电阻 R_2 的关系(见图 3),由 (6) 式获得 R_2 的热噪声谱密度跟 R_2 的关系(见图 4)。由图可以看出:

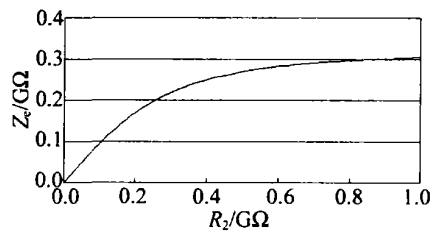


Fig 3 Relation between Z_e and R_2

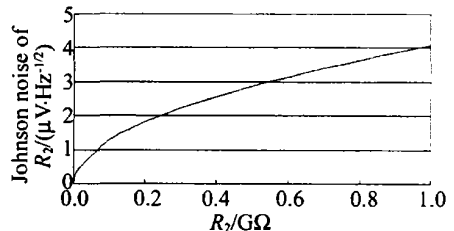


Fig 4 Relation between Johnson noise of R_2 and R_2

若光电二极管输出电流 I 一定,当 $R_2 < 300M\Omega$ 时,随着 R_2 的增加,放大器的信号增益(跟 Z_e 成正比)的增长率大于 R_2 的热噪声增长率,当 $R_2 > 300M\Omega$ 时,随着 R_2 的增加,放大器的信号增益的增长率会小于 R_2 的

热噪声增长率, 从而导致信噪比反而降低。

另外, 在电路板设计上要求做好线路保护以防止电流泄露, 并使用接地金属外壳屏蔽电力系统干扰, 可有效减小电噪声对系统的影响。

2.3 信号采集 处理部分

模拟锁相放大器通常采用方波作为参考信号, 峰-峰值为 2 的方波信号 $S(t)$ 可表示为:

$$S(t) = 1.273\sin(2\pi ft) + 0.4244\sin(6\pi ft) + 0.2546\sin(10\pi ft) + \dots \quad (7)$$

方波中的奇次谐波成分使得模拟锁相放大器的谐波抑制能力较差, 并且, 参考信号的振幅变化会引起增益误差, 另外, 模拟锁相放大器中的积分器和直流放大器所用运算放大器的失调电压漂移会导致锁相放大器零点漂移, 尤其是温度漂移, 例如, 对于漂移特性较好的斩波自稳定运算放大器 765Q 其失调电压的温度漂移典型值为 $0.02\mu V/^{\circ}C$ 。

为克服模拟锁相放大器的上述缺点, 设计出高精度数字式锁相放大器, 它采用双相(正交)锁相放大器的方法^[1], 消除主信号和参考信号之间相位差的影响, 使得锁相放大器无须相位调节, 并通过计算机软件实现了两个相敏检波器的功能, 其结构如图 5 所示。

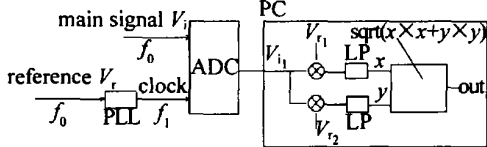


Fig 5 The structure of digital lock-in amplifier

该设计中, 锁相放大器的主信号 V_i 经采样板(ADC)转换为数字信号 V_i , 参考信号是根据锁相环输出的时钟信号由计算机直接产生两个相互正交的高精度(双精度十进制数)数字信号(振幅为 1 相位相差 $\pi/2$ 的余弦信号, 即图 5 中 V_1 和 V_2), 用这两个参考信号分别与 V_i 相乘, 再经低通滤波器后, (3)式中的交流项被滤除掉, 只剩下第一项直流输出 x 和 y , 即:

$$x = \frac{1}{2}E_i \cos\phi_i \quad (8)$$

$$y = \frac{1}{2}E_i \cos\left(\phi_i - \frac{\pi}{2}\right) = -\frac{1}{2}E_i \sin\phi_i \quad (9)$$

从而求得输入信号 V_i 的幅度 E_i :

$$E_i = 2\sqrt{x^2 + y^2} \quad (10)$$

在上述数字式锁相放大器中, 参考信号是由计算机产生的频谱单一、振幅恒定的高精度数字化的纯余弦信号, 这使得它有相当强的谐波抑制能力且不会因参考信号振幅变化引起增益误差。另外, 作者设计出高精度、高性能的数字低通滤波器代替模拟积分器, 克服了模拟锁相放大器零点漂移的缺点, 从而提高了整个光学膜厚监控系统抗噪声能力和稳定性。

3 实验演示装置及实验结果

为证明该优化设计方案的可行性, 构建了一套实验演示系统。该系统在一般光学膜厚监控系统基础上, 采用作者自行设计的斩光器、光接收电路和数字式锁相放大器。当光电二极管输出光电流较小(约 $1nA$), 锁相放大器的低通滤波器时间延迟为 $1.5s$ 时, 测出了该系统的精度(短时间稳定性)优于 $\pm 0.05\%$, 长时间(2h)稳定性也优于 $\pm 0.1\%$, 见图 6 和图 7。

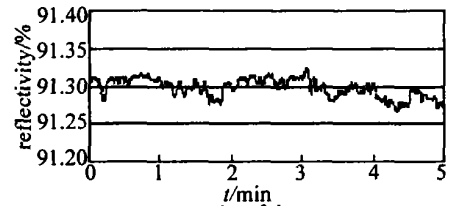


Fig 6 Precision of the system

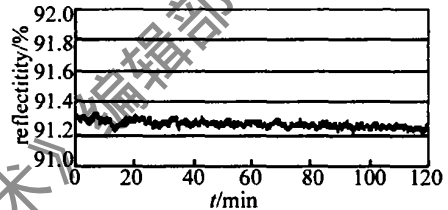


Fig 7 Long time stability of the system

4 结 论

通过对光学膜厚监控系统中的噪声分析, 设计出频率稳定性良好的斩光器、低噪声光接收电路和具有较强抗噪声性能的数字式锁相放大器, 增大了光控系统的监控范围, 并使得系统精度达到 $\pm 0.05\%$, 接近于光源的驱动电源的精度。若要进一步提高系统精度, 驱动电源和光源与驱动电源之间的连接方式等都需要作进一步改进。

参 考 文 献

- [1] GU P F. Thin film technology [M]. Hangzhou Zhejiang University Press 1990 1~ 102 (in Chinese).
- [2] YANG B Ch, WANG W Sh. Thin film physics and technology [M]. Chengdu University of Electronic Science and Technology of China Press 1994 1~ 150 (in Chinese).
- [3] ZENG Q Y. Small signal detection [M]. Hangzhou Zhejiang University Press 2002 47~ 106 (in Chinese).
- [4] YE JX, CHANG D D, CHEN R J. Photoelectric system and signal processing [M]. Beijing Science Press 1997 1~ 170 (in Chinese).
- [5] GAO G T. Practical design techniques for sensor signal conditioning [M]. Beijing Science Press 2002 43~ 50 (in Chinese).
- [6] TAN B X, MAO H J. Integrated circuit principles and applications [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry 2003 130~ 286 (in Chinese).
- [7] LI Y, XU Zh. MATLAB assisted digital signal processing for modern engineering [M]. Xi'an Xidian University Press 2002 143~ 170 (in Chinese).
- [8] ZHANG H J. Visual C++ programming details [M]. Beijing Science Press 2002 1~ 254 (in Chinese).