

文章编号: 100221582(2001)0220143203

# CCD 在光学镀膜宽带膜厚监控系统中的应用研究<sup>x</sup>

刘晓元, 周宁平, 黄云, 龙兴武

(国防科学技术大学 理学院光电工程系, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 讨论了 CCD 的主要特性及对宽带膜厚监控系统的影响, 介绍了典型的 CCD 数据采集系统。建立了一套基于 CCD 的宽带膜厚监控系统, 并对该系统进行了光谱标定及光谱补偿, 给出了提高信噪比及减小非线性影响的处理方法。

**关 键 词:** CCD; 光学镀膜; 膜厚监控; 宽带膜厚监控

中图分类号: TB43 文献标识码: A

## The research of CCD applied in wideband monitoring of optical film thickness

LIU Xiaoyuan, ZHOU Ningping, HUANG Yun, LONG Xingwu

(Department of Optical Electronic Engineering, College of Theory,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** In this paper, the character of CCD and the effect on wideband monitoring of optical film thickness have been discussed. Some typical CCDs and their collecting data systems have been introduced. The system of wideband monitoring of optical film thickness has been made out. From the equation of diffraction grating, the method of accurately determining wavelength of pixels of CCD has been deduced. The compensation of spectrum has been done. The method of improving SN and reducing nonlinearity has been found.

**Key words:** CCD; optical coating; thickness monitoring; wideband monitoring of optical film thickness

## 1 引 言

由于 CCD 不仅具有存贮和转移信息电荷的能力, 而且电荷信号能在 CCD 内定向输出而实现自扫描, 因而它在以光谱测量为基础的系统中有广泛的应用。在宽光谱膜厚监控系统中可代替机械扫描式分光光度计接收宽光谱, 不仅避免了机械扫描的麻烦, 而且能同时接收宽光谱信号, 能实现光谱的快速测量, 满足镀膜过程中实时监控测试片的光谱变化的要求。

## 2 CCD 的特性<sup>[1]</sup>及对宽带膜厚监控系统的影响

### 2.1 饱和曝光量与灵敏度

与 CCD 满阱时的信号电荷量相应的曝光量称为饱和曝光量, 超过此量则使信号电荷自动溢出流入衬底。CCD 的光谱灵敏度定义为: 在一定波长  $\lambda$  的光照下, CCD 光敏面收集的光电流与其表面接受的光通量  $\Phi_K$  之比, 即

$$S_A = \frac{I_K}{\Phi_K} \quad (\text{LA} \cdot \text{ölm}) \quad (1)$$

CCD 的饱和曝光量越小, 灵敏度越高, 表示了它的低照度特性。由于经测试片和光谱仪后的光信号比较弱, 尤其当所镀膜层多时, 所以要求所用的 CCD 有较好的低照度特性。

### 2.1.2 CCD 的噪声及信噪比

CCD 的噪声源可归纳为三类: 散粒噪声、转移噪声及热噪声, 但以散粒噪声为主。CCD 的信噪比  $N_s \cdot \text{öN}_T$  主要由固有的散粒噪声决定, 因而当  $N_s$  大时, 信噪比好, 当  $N_s$  小时, 信噪比差。例如 TCD1206UD、RL2048DKQ、RL2048SCQ 三种 CCD 的饱和信号量分别为:  $618 \times 10^5$ ,  $511 \times 10^6$ ,  $1137 \times 10^8$  个光电子, 它们的光子噪声分别为:  $812 \times 10^2$ ,  $213 \times 10^3$ ,  $112 \times 10^4$  个光电子。若不考虑其它噪声, 它们在饱和曝光时的信噪比分别为: 820ö1, 2300ö1, 12000ö1; 在曝光量降为 10% 时, 它们的信噪比分别为: 260ö1, 714ö1, 3700ö1; 在曝光量降为 1% 时, 它们的信噪比分别为:

<sup>x</sup> 收稿日期: 2000209228

作者简介: 刘晓元(19672), 男(土家族), 湖南省慈利县人, 国防科技大学理学院光电工程系博士, 主要从事镀膜及监控方面的研究。

8201, 23001, 1 20001。可见饱和信号量越大的器件其信噪比越好。11 层高反膜的透射率约为 2%, 可见对能监控的膜层数来说, 希望 CCD 的饱和曝光量大。

### 213 CCD 的暗电流与动态范围

CCD 光敏元的动态范围是指势阱可能存贮的最大电荷量(输出的饱和电压)与暗场下噪声峰2峰电压之比, 即

$$D = \frac{V_{\text{sat}}}{V_{p2p}} \quad (2)$$

CCD 的动态范围从 100~ 60 000 不等。CCD 的暗电流的存在及波动不仅影响 CCD 的动态范围, 而且直接给测量带来误差。使 CCD 工作在致冷状态, 不仅能减小暗电流的大小及波动, 扩大动态范围, 而且能降低热噪声及热生散粒噪声, 改善 CCD 的信噪比。致冷温度达到 $-50 \pm 0.05$  的水平已不是件困难的事情, 这时, CCD 的暗电流及波动将大为降低, 信噪比也会有较大的改善。CCD 的动态范围是决定所能监控的膜系的光谱强度变化范围的最重要因素。

### 214 响应的均匀性和线性

CCD 由许多光敏元组成, 各光敏元的灵敏度不尽相同, 具有一定的不均匀性, CCD 的不均匀性一般为 5%~ 10%。在膜厚监控系统中, 由于对入射光进行了归一化, 不均匀性的影响不是很严重。

用于摄像、尺寸测量等场合的 CCD, 对采集的数据没有严格的定量要求, 因而也就不关心它的线性, 但在应用于类似光谱的绝对测量等方面的定量测量时, CCD 的线性度就显得特别重要, 因为如果 CCD 的线性不好, 当入射光强变化时, CCD 采集的数据不能正确反映光强的变化, 从而给测量带来误差, 在宽带膜厚监控系统中的 CCD 的线性就显得更重要了。TCD1206UD 的非线性为 3%, 经过相邻像元的光滑处理后已基本能满足测量要求。若要求更高的话, 可考虑采用线性更好的 CCD 器件, 目前好的 CCD 的非线性为 1%, 或对 CCD 各像元的非线性进行严格的标定。

### 215 分辨率

在宽带膜厚监控系统中, CCD 的像元尺寸决定了系统的光谱分辨率, 像元尺寸越小, 光谱分辨率越高。

## 3 典型 CCD 数据采集系统

### 311 CCD 器件的选用

应用在不同场合的 CCD 的性能要求差异很大, 必须根据不同的要求, 选择合适的器件。用于精确光谱测量中的 CCD, 要求它有好的线性, 大的动态范围, 低的暗电流及高的信噪比; 用于膜厚监控中的 CCD 除具

有上述要求外, 还要求有尽可能小的温漂, 并使 CCD 尽可能工作在致冷状态。

### 312 典型 CCD 数据采集系统

#### 31211 同步型线阵 CCD 驱动器和数据采集卡

天津大学开发的同步型线阵 CCD 数据采集系统由驱动器和采集卡组成。这种类型的数据采集卡具有采集速率高, 采样点好, 采样数据稳定及应用开发简单等优点。

31212 PI 生产的 ST2138, ST2135, ST2133 及 ST2130 等 CCD 控制器

PI 生产的 ST 系列 CCD 控制器是集驱动器、致冷控制及数据采集于一体的适用于面阵 CCD 的多功能控制系统。现以 ST2138 为例说明它的功能和特点。

(1) 高速、高动态范围: 在 1 MHz 的采集速率下可达 14 位, 在 50~ 100 kHz 时可达 16~ 18 位。

(2) 低读出噪声: 整个系统的读出噪声为 1~ 113 单位。

(3) 线性好: 非线性度在 1% 以内。

(4) 可通过软件方式将矩形区域内的若干电荷连为一体, 以增加电荷容量和加快采集速度, 从而提高信噪比, 改善微光性能。

(5) 将不需要的像元的电荷信息不予数字化而忽略过去, 以利更快地读出。

(6) 必要时, 自动快速(1 ms 以内)清除暗电流。

(7) 自动调整 CCD 的致冷温度(最低 $-50 \pm 0.050$  )。

可见它的最大的特点是采集速度快, 动态范围大, 线性好, 噪声低, 尤其是可根据需要将面阵 CCD 在不同区域内的若干像元连为一体的性能非常适合宽带膜厚监控系统, 可同时监控透、反射光及入射光。

## 4 实验数据及处理

选用 TCD1206UD 及天津大学开发的 12 位中速数据采集系统和北京光学仪器厂生产的 WQD2021 光栅多色仪、计算机等组成宽带膜厚监控系统, 对该系统进行了光谱标定、光谱补偿及响应的非线性的处理。

### 411 CCD 各像元对应波长的标定

所用光栅光谱仪为 WQD2021 光栅多色仪; 所用 CCD 及采集系统为天津大学开发的 TCD1206UD 12 位数据采集系统, 2 048 像元, 像元间隔  $d1 = 14 \text{ } \mu\text{m}$ 。所用光源为 HeNe 红(63218 nm)、橙(61118 nm)、绿(54313 nm)激光和 Hg 灯的 546107, 576196, 579107 nm, Hg 灯的 656129 nm 及 Hg 灯的 435183 nm 的二级光谱(相当于 871166 nm)等八条谱线。采集方法: 每连续采集 100 次为一组求平均, 找出

峰值在 CCD 上的像元位置, 连续测 5 组, 求出峰位的平均值作为各波长所对应的位置, 实验数据如表 1 所示。标定方法: 根据光栅方程直接导出标定 CCD 各像元的对应波长<sup>[2]</sup>和第  $N$  像元对应的衍射角  $H$  及  $K$ , 可求得如下:

$$H = \text{tg}^{-1}\{[-51741\ 244 - (47 - N) \times 01014] \div 1991876\} \quad (3)$$

表 1 CCD 标定实验数据及有关计算结果

| 谱线序号                       | 1      | 2      | 3      | 4       | 5       | 6       | 7      | 8      |
|----------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|
| 理论波长 $\lambda/\text{nm}$   | 543130 | 546107 | 576196 | 579107  | 611180  | 632180  | 656129 | 871166 |
| 峰值所在像元                     | 47     | 58     | 191    | 199 200 | 3406341 | 4306431 | 530651 | 1 456  |
| 像元对应波长 $\lambda/\text{nm}$ | 543130 | 545187 | 576189 | 578188  | 611179  | 632180  | 656115 | 871166 |
| 波长误差                       | 0      | 0120   | 0107   | 0119    | 0101    | 0       | 0114   | 0      |

412 CCD 的光谱特性与光谱补偿

由于光源中不同波长的光其发光强度有差异, 光栅光谱仪对不同波长的光具有不同的衍射效率, 并且 CCD 对不同波长的光的响应度也不一样, 所以 CCD 探测到的经未镀膜的测试片及光栅光谱仪后的幅度随波长的变化很大。如图 1 所示, 仅在 650~800 nm 的波长范围内既不饱和又较大; 而其它波段的光因幅度小, 使得 CCD 采集的信号的信噪比差, 这不利于有效监控。为增加监控波长范围, 必须在光栅光谱仪的入射狭缝前加光谱补偿元件, 使得 CCD 采集到的数据在较大光谱范围内的幅度均比较平坦。根据图 1 所示的 CCD 的光谱特性可知, 须将 700 nm 附近的光减弱, 而将两端的光相对增大, 可考虑用一个中心波长为 700 nm 的三层  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  的 164 膜来补偿。图 2 是加上补偿元件并加大光谱仪的入射狭缝宽度后的实际光谱曲线。由图 2 可以看出, 加上补偿元件后, 已将监控波段扩展到 570~910 nm, 对于 600~750 nm 为中心波长的高反膜来说已足够了。

413 监控过程中对采集数据的处理

开始镀膜的同时, 让 CCD 进行采集, CCD 可在 35

$K = 1\ 000 \div 300 \times \sin H + 01639\ 00\ (\text{Im})\ (4)$  由式(3)和式(4)可求得其它谱线对应位置的波长如表 1 所示, 以及相邻像元的波长差  $\Delta K_{\text{in}} = 01233\ \text{nm}$ , 此值也是该系统光谱的极限分辨率。由表 1 可得均方根波长误差为 0114 nm, 可见这种标定方法的精度是非常高的。

ms 的时间内完成一次采集。由于光子照射噪声的影响, 单次采集的数据不稳定, 信噪比差, 图 3 为单次采集未镀膜的测试片的透射率, 各像素 20 次的均方差, 各像素均方差的平均值达 012%。在实际镀制高反膜时, 每一层的镀制时间长达 10~25 min。采用多次采集后求平均的办法, 可有效降低噪声, 提高信噪比。图 4 为每连续采集 18 次后求平均值, 总共 20 次的均方差, 其误差仅为 0105%~0107%。

图 5 为镀制单层 164 波长  $\text{TiO}_2$  膜的实际透射率曲线, 透射率沿波长方向的起伏较大, 这主要是由于 CCD 各像元的非线性造成的。由于 CCD 相邻像元间的波长差仅为 0123 nm, 故可采用将某像元附近一定数目像元的透射率平均后作为其透射率, 从而减小 CCD 各像元的非线性的影响。实际中

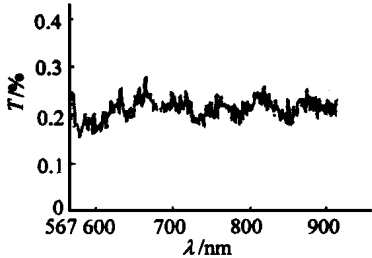


图 3 单次采集测试片的透射率, 20 次的均方差

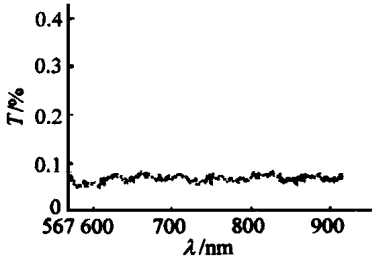


图 4 连续采集 20 次为一组求平均, 20 组的测试片的透射率均方差

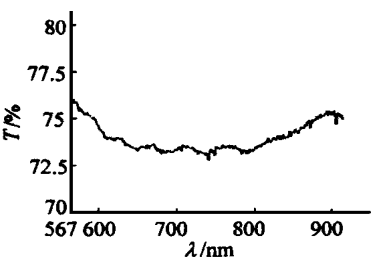


图 5 光滑处理前反射膜第一层的实际透射率曲线

(下转第 149 页)

较经济实用。目前大多数也只是停留在试验阶段, 要想商业化还有很长的路要走。

就现存的几种方法而言, 虽然都存在着一定的局限性, 但是有一定的适用范围和发展潜力。可以预见, 随着光学技术的发展, 这些方法通过改进将在活体测量、生长检测等领域中发挥其应用活力。

参考文献:

[1] Born M, Wolf E Principles of Optics, 6<sup>th</sup> edn [M] Oxford: Pergamon Press, 19861

[2] Cogswell C J, Sheppard C J R Confocal differential interference contrast (DIC) microscopy: including a theoretical analysis of conventional and confocal DIC imaging [J] J Microscopy, 1992, Jan: 81—1011

[3] Delbert L, Lessor, et al Quantitative surface topography determination by Nomaski reflection microscopy Theory [J] J Opt Soc Am, 1979, Feb: 357—3661

[4] 高宏 1 表面形貌非接触测量方法的研究[D] 1 北京: 清华大学, 19911

[5] 张志利 1 微分干涉相衬法原理与设计[D] 1 北京: 清华大学, 20001

[6] 徐福候 1 诺马斯基棱镜的原理及其计算方法[J] 1 光学仪器, 5 (2) 1

[7] 陈峻堂 1 微分干涉相衬显微术[J] 1 光学仪器, 6(1): 1—151

[8] Holzwarth G, et al Improving DIC microscopy with polarization modulation [J] 1 Journal of Microscopy, 1997, Dec: 249—2541

[9] Preza C 1 Rotational diversity phase estimation from differential interference contrast microscopy images [J] 1 J Opt Soc Am A, 2000, March: 415—4241

[10] Munster E B Van, et al Reconstruction of optical pathlength distributions from images obtained by a wide field differential in2

terference contrast microscope [J] 1 Journal of Microscopy, 1997, Nov: 149—1571

[11] Gleyzes P, et al Multichannel Nomaski microscope with polarization modulation: Performance and applications [J] 1 Optics Letters, 1997, 15: 1529—15311

[12] Etienne Cuhe, et al Digital holography for quantitative phase contrast imaging [J] 1 Optics Letters, 1999, March: 291—2931

[13] Etienne Cuhe, et al Quantitative phase contrast microscopy of living cells by numerical reconstruction of digital holograms [J] 1 SPIE, 3604: 84—881

[14] Barty A, et al Quantitative optical phase microscopy [J] 1 Optics Letters, 1998, June: 817—8191

[15] Chrysanth Preze, Snyder Donald L 1 Theoretical development and experimental evaluation of imaging models for differential interference contrast microscopy [J] 1 J Opt Soc Am A, 1999, Sep: 2185—21911

[16] Munster E B Van, et al Measurement based evaluation of optical pathlength distributions reconstructed from simulated differential interference contrast images [J] 1 Journal of Microscopy, 1998, August: 170—1761

[17] Young D, et al Towards automatic cell identification in DIC microscopy [J] 1 Journal of Microscopy, 1998, Nov: 186—1931

[18] Stanley Koszelak, et al Protein crystal growth rates determined by time lapse microphotography [J] 1 Journal of Crystal Growth, 1991, 110: 177—181

[19] Lang W 1 Nomaski differential interference contrast microscopy. Formation of the interference image [J] 1 Zeiss Inf, 1969, (17): 12—161

[20] Allen R D, David G B, Nomaski G 1 The Zeiss Nomaski differential interference equipment for transmitted light microscopy [J] 1 Z Wiss Mikrosk, 1969, 69: 193—2211

(上接第 145 页)

可采用每 11 个像元为一组, 作为中心位置处像元的透射率。表 2 为 1~ 6 层反射膜的各像元的理论透射率与 11 个相邻像元的理论透射率平均后在 550 ~

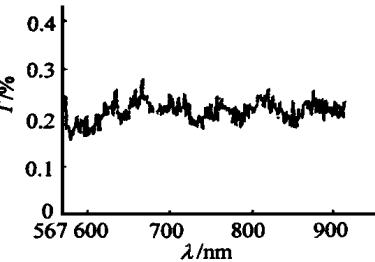


图 6 光滑处理后反射膜第一层的实际透射率曲线

950 nm 波长范围内的最大偏差。由表 2 可见, 由于最大偏差不会超过 0.183%, 故上述处理方法是合理的, 它对膜系的实际透射率并无多大影响。图 6 是 11 个相邻像元求平均后的单层 104 波长 TiO<sub>2</sub> 膜实际透射率曲线, 起伏明显减小, 而且光滑处理前后的透射率差很小, 仅为 0.15%。

表 2 反射膜的各像元的理论透射率与 11 个相邻像元的理论透射率平均后在 550~ 950 nm 波长范围内的最大偏差

| 层次   | 1       | 2       | 3      | 4      | 5      | 6      |
|------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|
| 最大差值 | 0.1072% | 0.1024% | 0.145% | 0.133% | 0.144% | 0.183% |

5 结束语

影响用于宽带膜厚监控系统中的 CCD 的主要因素是它的饱和曝光量、动态范围、信噪比、暗电流以及非线性。目前 CCD 的动态范围已能满足监控 9~ 11 层高反膜的需要, 暗电流可通过致冷的办法来降低。利用 CCD 能高速采集的特点, 通过多次采集后求平均的方法可明显减少光子照射噪声的影响, 提高信噪比; 通过相邻像元的光滑化处理, 可有效降低 CCD 各像元的非线性的影响。因而经过适当选取和处理, 用 CCD 做宽带膜厚监控系统中的光谱接收器件已能达到比较理想的效果。

参考文献:

[1] 王庆有, 等 1 CCD 应用技术[M] 1 天津: 天津大学出版社, 19931 62—661

[2] 刘晓元 1 光学镀膜宽带膜厚监控系统的研究[D] 1 长沙: 国防科学技术大学, 2000127—291