

基于自会聚多光束阵列的薄膜应力传感器*

林晓春¹ 郭艳艳² 胡志敏¹ 李存志² 郑亚娥² 安毓英¹

(1 西安电子科技大学技术物理学院, 西安 710071)

(2 西安电子科技大学理学院, 西安 710071)

摘要: 介绍了一种通过分析二元光束阵列的反射光图像, 利用 Stoney 方程解算出薄膜应力的在线测量传感器。传感器是以二维 Dammann 光栅和 Fresnel 波带板所组成的集成二元光学分束器为核心设计的。该传感器可进行各种单晶、多晶和非晶结构材料沉积过程的现场应力测量, 灵敏度优于 $2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$, 精度优于 4.27%。它具有结构简单、测量速度快、适应性强、设备集成度高而且易于安装调试等特点。与计算机自动控制系统相结合, 可以应用于半导体集成电路生产线的薄膜生长过程控制。

关键词: 二元光学分束器; 薄膜应力; 现场传感器; 测量精度

PACC: 4280

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)11-1491-05

1 引言

由于制造过程中应力变化可能导致薄膜内部连接失效和分层而使产品质量降级, 因而控制形变的程度有着重要意义。现代半导体加工过程要求电子和光电设备对薄膜材料的沉积过程进行精密控制。目前多数加工过程需要对气体流速、沉积室内压力、生长环境温度等参数进行测量以便控制。这些参数是为了生长出具有一定厚度、一定微结构和满足一定的电性能和光学性能的薄膜而预先设定的经验参数; 准确的薄膜特性往往是在沉积之后测得的。这种控制方式从控制理论的角度看叫做“半闭环控制”。尽管对这些参数传感器和控制系统加以改进可以使得薄膜生产设备更加稳定地运行, 但是设备状况和环境情况每天都发生着不同的变化, 这些改变经常导致在生产过程中沉积速率或薄膜结构发生不可预计的变化。若每次对沉积系统严格地进行维护和标校则会增加生产成本, 降低生产效率。

为了实现在沉积过程中对薄膜应力的直接测量, 并以此为依据调整气体流速、压力、温度等参数,

达到在沉积过程中控制薄膜应力的目的, 也就是实现沉积过程的“全闭环控制”, 光学传感器技术成为自然的选择。因为它们是非接触式, 可以安装在沉积室外部, 并且对薄膜生长设备产生的强电磁场不敏感。此外, 多数薄膜沉积需高压和化学反应环境, 这使得光学传感器成为现场检测惟一的选择。

目前国内薄膜应力检测设备大多为离线式检测设备。例如杨银堂等人^[1]用光反射原理研制了一种半导体基片上薄膜应力的测试装置, 张国炳等人^[2]用光偏振相移干涉原理测量多晶硅薄膜应力。国外 Bicker 等人^[3]提出了一种利用双路光反射现场测量薄膜应力的方法。它由二极管激光光源、分光镜、若干光学反射镜、两个光电位置探测器等组成。PSD 的光束检测分辨率为 100nm, 因而两束光必须严格聚焦在 PSD 表面上以使分辨能力最大化, 该装置的测量灵敏度为 $4.4 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。这种现场薄膜应力检测系统存在两个缺点: 两束激光必须严格聚焦, 这对光学系统的设计、安装、日常调试和保养要求太高; 由于 PSD 的惰性, 在样品高速旋转时, 只能检测全片应力的均值, 而对薄膜局部区域的应力检测无能为力。

* 陕西省自然科学基金(编号: 2002F13), 西安电子科技大学青年研究基金(编号: 03003)资助项目

林晓春 男, 1963 年出生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为数字图像处理、光散射测量与控制等。Email: xclin@mail.xidian.edu.cn.

2003-10-01 收到, 2004-03-05 定稿

©2004 中国电子学会

我们研究了 Bicker 等人的思想, 设计了一种基于多光束阵列的薄膜应力现场测试设备。其基本原理是: 当应力变化时半导体衬底及其薄膜表面将产生一定的曲率变化, $k = 1/R$, 这里 R 是薄膜表面的曲率半径。使用表面应力光反射测量方法实时检测因薄膜应力作用而使表面弯曲所导致的反射光点位置的位移。若衬底是一个弹性模型, 在薄膜物理化学性质已知情况下, 就可由 Stoney 方程^[4]来求得形变下的薄膜应力。

2 自会聚多光束阵列原理

Dammann 在 70 年代初提出了一种周期性可变间距的二元位相型光栅, 通过衍射把一束光分为等强度的多束光, 用于集成电路的光刻掩膜版的制造。这种光栅产生的 $0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm N$ 级衍射光的振幅相等。用一束相干光照射一维 Dammann 光栅可得到 $2N + 1$ 束沿不同方向传播的等强度衍射光; 对于二维 Dammann 光栅则可有 $(2N + 1)^2$ 束等强度衍射光, 如图 1 所示。

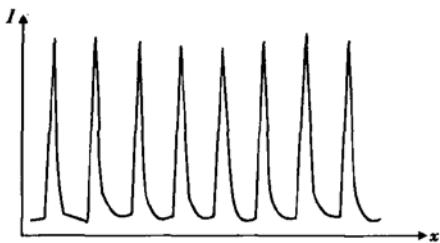


图 1 分束后任一行光点的光强分布曲线

Fig. 1 Light distribution curve of a line array being splitted

Fresnel 波带板是另一种常见的衍射光学元件。在这里我们将 Dammann 光栅和 Fresnel 波带板两者组合成一个元件, 使它同时具有分束和聚焦功能。分束器的透射率函数 $t(x, y)$ 是 Dammann 光栅的透射率函数 $f(x, y)$ 与 Fresnel 波带板的透射率函数 $t_{\text{L}}(x, y)$ 的乘积。

由于构成自聚焦分束的两分立元件都是二元位相型的, 若设 Fresnel 波带板和 Dammann 光栅的位相函数分别为 $\Phi_{\text{L}}(x, y)$ 和 $\Phi_{\text{d}}(x, y)$, 因为分束器的透射率函数 $t(x, y)$ 为:

$$\begin{aligned} t(x, y) &= f(x, y) t_{\text{L}}(x, y) \\ &= \exp[\Phi_{\text{L}}(x, y) + \Phi_{\text{d}}(x, y)] \end{aligned}$$

则集成分束器位相函数 $\Phi(x, y)$ 为:

$$\Phi(x, y) = \Phi_{\text{L}}(x, y) + \Phi_{\text{d}}(x, y)$$

因为 Φ_{L} 和 Φ_{d} 分别只取 0 和 π , $\Phi(x, y)$ 只有 0, π , 2π 这 3 种值, 而 2π 与 0 是同相位的, 因此集成分束器的位相 Φ 也只取 0, π , 即 Φ 可由下式得到^[5]:

$$\Phi = [(\Phi_{\text{L}}/\pi) \text{XOR} (\Phi_{\text{d}}/\pi)]\pi$$

式中 XOR 代表异或运算。这一位相特点, 为制作这种位相型元件带来了方便。这种以集成化二元光学分束器为核心制作的传感器我们称为直接成像观测的全反射激光阵列传感器, 由于传感器在沉积设备的薄膜生长现场使用方便, 也称为薄膜应力现场阵列传感器。

实际设计传感器时, 为了提高信噪比, Fresnel 波带板采用了离轴照明方式。用发散激光光束照明时, 改变光束的发散点到分束器的距离可改变点阵阵列的大小(即光点之间的距离)。

3 阵列传感器检测原理

图 2(a) 是现场检测传感器使用布置与测量原理图。激光器发出的激光束进入集成二元光栅, 出射光经半导体表面反射, 在 CCD 焦平面上衍射为等强度的多束光点阵列。图 2(b) 给出了在 CCD 上的激光点束阵列的图像。经过实时图像算法处理, 这些数据就反映了表面曲率的变化。

使用激光束阵列和 CCD 探测器有几个明显的优势: (1) 光学检测设备集成度高而且易于安装调试; (2) 由于激光阵列图像是与半导体载物平台同步采集, 硅片的移动和倾斜不会被当作曲率的改变而被探测到; (3) 测量中使用高分辨率的 CCD 阵列, 它可以精确地测量光点位置变化, 得到沉积过程中半径为 $10 \sim 20$ nm 的曲率变化数值, 从而高速实时获得薄膜应力变化趋势, 通过中心控制计算机处理, 达到对沉积过程全闭环控制的目的。

4 薄膜应力的计算

当薄膜刚刚在衬底上沉积时, 薄膜应力就开始引起衬底曲率变化。由衬底曲率的改变量可以计算薄膜应力, 其方程由 Stoney 给出:

$$\sigma = \frac{1}{6} \times \left[\frac{1}{R_{\text{post}}} - \frac{1}{R_{\text{pre}}} \right] \times \frac{E}{1 - v} \times \frac{t_s^2}{t_f} \quad (1)$$

其中 σ 为沉积后的薄膜应力; R_{post} 为沉积之后的衬底曲面曲率; R_{pre} 为沉积之前的衬底曲面曲率; E 为

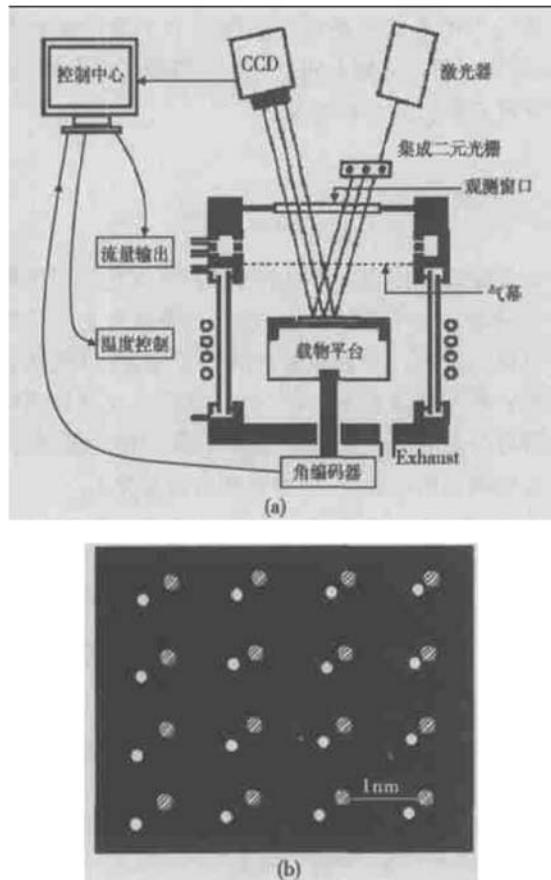


图 2 基于自会聚多光束阵列的薄膜应力传感器测量原理
(a) 全闭环测控布置方案; (b) 激光光束阵列在焦平面上的像
Fig. 2 Principle of the thin film stress sensor based on a focused multi-beam array (a) Schematic diagram of the full closed-loop measuring and control system; (b) Image of the laser spots array imaged at focal plane.

杨氏模量; v 为 Poisson 系数; t_s 为衬底厚度; t_f 为薄膜厚度. 杨氏模量 E 和 Poisson 系数 v 是测量值, 可查表获得. 上式也可写作:

$$K = \frac{6t_f\sigma}{Et_s^2} = \frac{1}{R_{\text{post}}} - \frac{1}{R_{\text{pre}}} \quad (2)$$

K 为表面曲率变化率. 由于该检测方法属于激光束偏转测量法, 抽象图 2(a) 的简化光路图如图 3 所示.

在图 3 中, 入射激光束阵列距离为 d , 出射光与表面夹角为 α ; 由于沉积过程中应力作用使晶片表面弯曲, 光束的出射角度发生偏离, 在距离 L 处出射光位置与表面未发生弯曲时的偏移距离为 Δd . 假设薄膜厚度 t_f 比衬底厚度 t_s 小得多, 则有下面关系:

$$K = \frac{1}{R_{\text{post}}} - \frac{1}{R_{\text{pre}}} \approx \frac{\Delta d}{d} \times \frac{\cos\alpha}{2L} \quad (3)$$

从而

$$\sigma t_f = \frac{\Delta d}{d} \times \frac{M_s t_s^2 \cos\alpha}{12L} \quad (4)$$

式中 $M_s = \frac{E}{1-v}$; L 为样品与阵列传感器间的相对距离, 且 $L \gg d, L \gg \Delta d$.

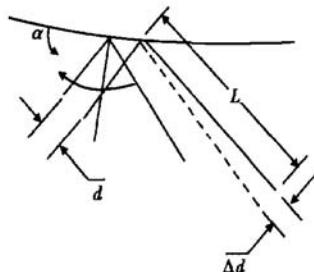


图 3 测量简化光路图

Fig. 3 Diagram of the optical path

二极管激光器输出的平行光束入射到集成分束元件上时, 改变光束发散点到分束器的距离可改变点阵列的大小, 即光点之间的距离 d .

若 x 是衬底半径上的位置坐标, y 是沿 x 方向的衬底的高度, $y = f(x)$, 则表面曲率半径表达式为

$$R(x) = \frac{(1 + y'^2)^{3/2}}{y''} \quad (5)$$

其中 $y' = \frac{dy}{dx}, y'' = \frac{d^2y}{dx^2}$.

(4) 式右边均为可测值或已知参数值, (5) 式建立了薄膜厚度与曲率半径间的关系. 联立(4), (5) 式, 若测得某光点位移 Δd , 即可求得薄膜应力和薄膜厚度. 通过不同温度下的应力测量, 可以得到应力与温度的关系 $\sigma(T)$, 从而进一步分析样品应力的构成, 得到其热膨胀系数. 当然, 也要考虑表面曲率变化跟一些基本的沉积条件如压力、气体流量、薄膜组分等之间的关系^[2, 6].

5 应力测量灵敏度与测量精度的计算

多光束光学传感器的测量灵敏度取决于可检出的最小光点位移 Δd_{\min} , 也就是说很大程度上取决于 CCD 传感器的像素密度. 若使用的 CCD 摄像机像素数为 $1300(H) \times 1030(V)$, 像素点距为 $6.7\mu\text{m}$, 则 $\Delta d = 6.7\mu\text{m}$; 取 $d = 2.68\text{mm}$. 取衬底厚度 $t_s = 250\mu\text{m}$, 薄膜厚度 $t_f = 300\text{nm}$. 反射光程 $L = 0.5\text{m}$, α

$= 5^\circ$. 衬底为硅材料, 杨氏模量为 155.8GPa, Poisson 系数为 0.2152, 则测量灵敏度:

$$\Delta\sigma_{\min} = \frac{Et_s^2}{6(1-v)t_f} \times \Delta\left(\frac{1}{R}\right) \approx 2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$$

测量精度由(4)式中各参数的测量精度决定. 根据它们的测量方法, 有 $\Delta t_s = 2\mu\text{m}$, $\Delta t_f = 2\text{nm}$, $\Delta L = 0.05\text{m}$, $\Delta(\Delta d) = 0.67\mu\text{m}$. 由误差传递公式得:

$$E_\sigma = 2 \frac{\Delta t_s}{t_s} + \frac{\Delta t_f}{t_f} + \frac{\Delta W}{W} + \frac{\Delta(\Delta d)}{\Delta d} \\ \approx 0.042666 = 4.27\%$$

可见, 该灵敏度和测量精度完全能够满足半导体器件工艺中薄膜应力测量的要求^[1].

6 可能的问题与解决的策略

作为沉积过程诊断和控制的传感器, 有两个主要问题必须要解决. 首先要注意的是沉积室内的连续旋转的样品, 样品的旋转是为了提高材料的均匀性. 由于阵列光束图像的采集与数据分析必须与样片的不同区域位置相关, 以便对样片的不同位置处的应力进行反馈监控. 这可以通过在载物平台转轴上安装光学角编码器, 使 CCD 图像采集电路与角编码器的某一角度信号同步来解决. 另外, CCD 的电子快门的速度选取比较重要. 成像帧速应比较高(如 1/5000s), 以消除成像模糊, 这样就可以在旋转样品上获得稳定的应力数据及其在样品上的应力分布.

第二个要注意的是样品反射率会在沉积过程中发生改变; 所有的光学传感器探测方式都存在这个问题. 例如, 在硅半导体衬底上沉积铜, 将使样品的反射率在开始几秒内快速增加, 从而使反射光的强度增加, CCD 探测器饱和, 导致 CCD 上光点位置的探测精度降低, 引起应力测量的误差.

解决的方法是使用可控性好的半导体激光器. 技术进步使泵浦激光器鲁棒性大为提高, 激光输出功率稳定且可调整. 通过一定的图像处理算法, 由电路反馈来控制激光器输出功率, 从而改变反射在 CCD 传感器上的激光束的光强.

另外, 薄膜表面的反射光和衬底表面的反射光会发生相干干涉, 随着薄膜厚度的增加, 观测点检测到的激光反射强度将随着膜厚而呈周期性的变化.

振荡波形的形状与单色光在薄膜上干涉的模式有关. 通过分析^[7]可知不同位置处的薄膜光学参数, 比如反射系数和偏振特性等.

7 结束语

实际设计传感器时可将 CCD、集成光学元件和激光器做一个结构件中, 还可以将红外测温传感器也做在结构件中使传感器具有多用途. 尽管还有其他的精密在线检测方法, 但薄膜应力现场检测传感器可以实时测量薄膜应力特性, 探测精度极高, 并且安装调试简单易行, 必将在我国普及使用.

参考文献

- [1] Yang Yintang, Fu Junxing, Zhou Duan, et al. Thin film stress measurement instrument used in semiconductor samples. China Journal of Scientific Instrument, 1997, 18(3): 298 (in Chinese) [杨银堂, 付俊兴, 周端, 等. 半导体基片上薄膜应力的测试装置. 仪器仪表学报, 1997, 18(3): 298]
- [2] Zhang Guobing, Hao Yilong, Tian Dayu, et al. Residual stress properties of polysilicon thin film. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(6): 463 (in Chinese) [张国炳, 郝一龙, 田大宇, 等. 多晶硅薄膜应力特性研究. 半导体学报, 1999, 20(6): 463]
- [3] Bicker M, Von Hülsen U, Laudahn U, et al. Optical deflection setup for stress measurements in thin films. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(2): 460
- [4] Stoney G. The tensions of metallic films deposited by electrolysis. In: Proc Roy Soc, London, 1909: 82
- [5] Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian, et al. Binary optics. Beijing: National Defence Industry Press, 1998: 55 (in Chinese) [金国藩, 严瑛白, 邬敏贤, 等. 二元光学. 北京: 国防工业出版社, 1998: 55]
- [6] Zhao Yongjun, Wang Minjuan, Yang Yongjun, et al. Study on stress of PECVD SiN_x film. Chinese Journal of Semiconductors, 1999, 20(3): 183 (in Chinese) [赵永军, 王民娟, 杨拥军, 等. PECVD SiN_x 薄膜应力的研究. 半导体学报, 1999, 20(3): 183]
- [7] Breiland W G, Killeen K P. A virtual interface method for extracting growth rates and high temperature optical constants from thin semiconductor films using in situ normal incidence reflectance. J Appl Phys, 1995, 78(11): 6726

A Kind of Thin-Film Stress Sensor Based on Beam-Focusing Multi-Beam Array^{*}

Lin Xiaochun¹, Guo Yanyan², Hu Zhimin¹, Li Chunzhi², Zheng Yao² and An Yuying¹

(1 School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(2 School of Science, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: A new sensor measuring in real time is introduced, which is based on the analysis of the reflected light images of the binary optical array and the solution of Stoney equation. The sensor is designed with the core of a binary optical splitter, which is made up of a two-dimension Dammann grating and a Fresnel zone plate. With the sensitivity over 2.5×10^6 Pa and precision over 4.27%, it can be used in the in-situ stress measurement of the materials with structures such as single-crystal, multi-crystal, or non-crystal in their deposition process. Also it has advantages of simple structure, high speed, powerful adaptability, high integration, and easy fitting. Combined with the computer automatic control system, the sensor can be used in the measurement and control of thin-film growth in the product line of semiconductor integrated circuits.

Key words: binary optical splitter; thin film stress; in-situ sensor; measurement precision

PACC: 4280

Article ID: 0253-4177(2004)11-1491-05

* Project supported by Natural Science Foundation of Shanxi Province (No. 200F13) and Youth Research Foundation of Xidian University (No. 03003)

Lin Xiaochun male, was born in 1963, associate professor, adviser of master candidate. He is engaged in research on photoelectronics, including digital image processing, light scattering measurement and control. Email: xclin@mail.xidian.edu.cn.