

基于消光椭偏原理的立式纳米薄膜厚度计量装置的研制

杜陈伙^{1,2}, 施玉书^{2,3}, 张树², 胡佳成¹

(1. 中国计量大学 杭州 310018;

2. 中国计量科学研究院 北京 100029,

3. 深圳中国计量科学研究院技术创新研究院 深圳 518107)

Email:757162083@qq.com; shiys@nim.ac.cn

摘要: 对消光式椭偏法测量的原理进行了介绍, 包括光的偏振态、反射的多光束干涉原理、相位差的计算原理、菲涅尔公式等, 最后得出薄膜厚度与各个参量之间的关系, 主要参量包括入射角、起偏角和检偏角。纳米薄膜厚度计量装置主要负责对起偏角和检偏角的测量, 在传统消光椭偏法中, 整体结构采用卧式, 这对晶圆的固定方式会有所限制, 由此会导致晶圆的破损和污染, 采用立式结构, 能够使晶圆在测量中处于水平状态, 实现无损检测, 采用多入射角的测量方式, 实现多角度测量和对薄膜厚度周期的测量。

关键词: 计量学; 光学参数; 晶圆薄膜; 椭偏法; 无损检测。

1、研究背景

在集成电路制造工艺中, 对纳米薄膜厚度的测量是常见的, 例如硅上二氧化硅、掩膜层的厚度、溅射法沉积薄膜、抛光液在晶圆表面产生的氧化膜等, 这些关键的厚度尺寸极大地影响了集成电路制造的质量和效率, 椭偏仪^[1]作为测量薄膜厚度的仪器应运而生。椭偏仪的原理是: 入射光波在与待测样品表面相互作用时, 会在其薄膜的外侧和内侧发生多光束反射和折射^[2], 在这个过程中, 反射光的偏振状态会发生变化, 结合入射光偏振状态的变化, 便可确定待测样品的光学参数, 包括薄膜厚度和介质折射率。

消光式椭偏法作为椭偏法中的一个重要分支, 在每一个波长通过旋转起偏器和补偿器后找到合适的角度, 使经样品反射后的偏振光为线性偏振光, 并调整检偏器角度产生消光效果。这种精细的调整过程确保了测量结果的准确性, 使得消光式椭偏法具有较高的测量精度。同时消光式椭偏法具有非破坏性, 使用消光式椭偏法对样品进行测量, 是非接触, 对样品表面的损伤和表面结构改变是最小的。在测量过程中, 对于三个重要角度包括入射角、起偏角、检偏角, 分别进行了量值溯源, 测量的准确性进一步提高。

2、研究内容

本文研究的消光式椭偏理论, 设计了高精度测量系统, 该系统主要包括起偏臂、检偏臂、自准直仪、晶圆真空吸盘, 实现了对入射角的校准和起偏角、检偏角的测量, 同时采用可变量入射角

装置对测量的入射角进行改变，实现多角度测量和对薄膜厚度周期的测量。

2.1 消光式椭偏法测量原理

当光波从一种介质入射到另一种不同折射率的介质材料中，会在介质表面与介质内部发生反射与折射，光路传播如 Figure 1 所示：

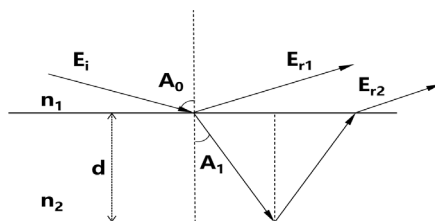


Figure 1 multibeam interference

其中 E_i 为入射光波， E_{r1} 为第一反射光波， E_{r2} 为第二反射光波， A_0 为入射角， A_1 为折射角，设介质的厚度为 d ，介质 1 的折射率为 n_1 ，介质 2 的折射率为 n_2 。

由 Figure 1 可知，定义波 E_{r1} 和 E_{r2} 的相位变化量为 β ， β 的计算公式如下：

$$\beta = 2\pi \frac{d}{\lambda} \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2(A_0)} \quad \#(1)$$

利用菲涅尔反射系数 (p, t) 和透射系数计算光波反射和透射的方法，入射光波 E 的总反射波可表示为：

$$E_r = (\rho_{01} + \tau_{01}\tau_{10}\rho_{12}e^{-j2\beta} + \tau_{01}\tau_{10}\rho_{12}\rho_{10}^2\rho_{12}^2e^{-j6\beta} + \dots)E \quad \#(2)$$

在此定义： $R = (\rho_{01} + \tau_{01}\tau_{10}\rho_{12}e^{-j2\beta} + \tau_{01}\tau_{10}\rho_{12}\rho_{10}^2\rho_{12}^2e^{-j6\beta} + \dots)$ 为总反射系数。

将 R 进行化简，得：

$$R = \frac{\rho_{01} + \rho_{12}e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{10}\rho_{12}e^{-j2\beta}} \quad \#(3)$$

由椭偏测量的定义可知，椭偏仪测量薄膜厚度实质上是通过对偏振光束偏振状态的改变（振幅和相位），获取被测薄膜样品的厚度^[3]。椭偏测量中的偏振状态变化与椭偏参数之间的关系推导可表示为：

$$\chi = \frac{R_p}{R_s} = \tan \psi \cdot e^{j\Delta} \quad \#(4)$$

将式 3 代入可得：

$$\tan \psi \cdot e^{j\Delta} = \frac{R_P}{R_S} = \frac{\rho_{01,p} + \rho_{12,p}e^{-j2\beta}}{1 + \rho_{10,p}\rho_{12,p}e^{-j2\beta}} \cdot \frac{1 + \rho_{10,s}\rho_{12,s}e^{-j2\beta}}{\rho_{01,s} + \rho_{12,s}e^{-j2\beta}} \quad \#(5)$$

2.2 消光式椭偏法测量过程

具体内容：激光器出射稳频激光，出射光经过起偏器后获得偏振方向固定的线偏振光，该线偏振光经过电压相位延迟器获得椭圆偏振光，特别地，当延迟器方位角为 45° 时，椭圆偏振光为特殊状态即等幅椭圆偏振光，圆偏振光入射到被测样品表面时会发生反射，在反射的过程中，其 S 轴与 P 轴方向的偏振状态发生变化，通过调节起偏方向可以使得反射光再次变为线偏振光，通过无偏分光镜后分别射入偏振测试仪和检偏器，偏振测试仪用来检测反射光的偏振状态，检偏器用于检测反射后线偏光的偏振角度，当光电流最小时，此时找到消光点，通过旋转过程中起偏角的变化和检偏器的方位角变化，可以计算出被测样品的椭偏参数 ψ 和 Δ 。

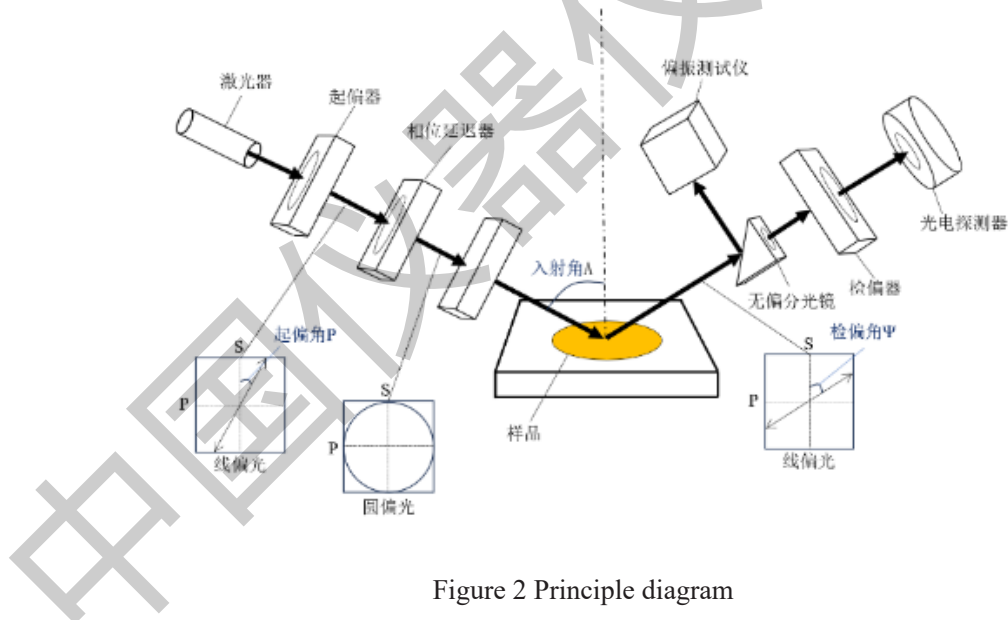


Figure 2 Principle diagram

将测得的椭偏参数代入式 5 即可分析出薄膜厚度。

2.3 膜厚标准片测量结果

在温度 $T=22^\circ\text{C}$ 、入射角 $A_0=70^\circ$ 、激光波长 $\lambda=633\text{nm}$ 实验条件下，对标称值 $Th_a=42.2\text{nm}$ 的硅上二氧化硅样品中心点进行重复性测量，得到的数据如 Table 1 所示：

Table 1 Sample Measurement Data

	$An1/^\circ$	$An2/^\circ$	Th/nm
1	158.7090	69.96	42.1892
2	158.7135	69.94	42.2185
3	158.7168	69.97	42.1642
4	158.7193	69.92	42.2465
5	158.7185	69.96	42.1794
6	158.7143	69.95	42.2007
7	158.7193	69.94	42.2126
8	158.7158	69.95	42.1992
9	158.7148	69.93	42.2342
10	158.7180	69.90	42.2819

从表中可知测量结果为 $Th_a=42.2126nm$ ，与标称值 $Th_a=42.2nm$ 之间误差 $E_a=0.0126nm$ ，仪器测量重复性 $\sigma=0.0346nm$ 。

3、结论

在传统的卧式消光式椭偏仪中，晶圆安装方式多为夹具，对晶圆产生一定损伤，采用立式结构对薄膜厚度进行测量，能够实现对晶圆的无损检测，同时对薄膜厚度进行不同入射角的测量。本文采用的消光式椭偏法测量重复性 $\sigma \leq 0.1nm$ ，不确定度 $U \leq 0.5nm$ ，晶圆薄膜厚度的测量精度进一步提高。

参考文献

- [1] 莫党. 固体光学 [M]. 高等教育出版社,1996.
Mo D. Solid State Optics [M]. Higher Education Press,1996
- [2] 郭小花, 张明霞. 多光束干涉的扩展研究 [J]. 天水师范学院学报, 2016,36(05):13-14.
GUO X H, ZHANG M X. Extended study of multibeam interference[J]. Journal of Tianshui Normal College,2016,36(05):13-14.
- [3] 黎雄威. 纳米膜厚椭偏计量方法及装置的研究 [D]. 合肥工业大学, 2022.DOI:10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.001760.
Li X W. Research on the method and device of nanometer film thickness ellipsometry [D]. Hefei University of Technology, 2022.DOI:10.27101/d.cnki.ghfgu.2021.001760.