

基于差分反射光谱的多层薄膜厚度解耦方法及其在半导体测量中的应用

白承沛, 孙新磊, 刘墨燃, 牛宝新, 王子政, 胡春光

(精密测试技术及仪器全国重点实验室 天津 300072)

Email:cgchu@tju.edu.cn

摘 要: 在集成电路制造产业中, 薄膜结构是微纳器件的一类基础功能结构。随着制造工艺的不断发展, 薄膜厚度的精确测量成为保障制造质量的重要检测手段。薄膜的厚度范围通常从几纳米到几微米不等, 衬底厚度则在百微米量级。针对厚度差异明显的膜层结构, 提出了多层薄膜厚度复合光谱解耦测量方法, 完成了对 SiO_2/Si 、绝缘体上单晶硅(Silicon-On-Insulator, SOI)和高深宽比结构等硅基半导体结构进行表征研究。此外, 针对效率提升和特殊粗糙样品结构测量, 提出了宽面域光谱成像方法, 在视场 1cm^2 中完成了纳米级别的 TiO_2 薄膜的厚度成像式测量。

关键词: 反射光谱; 微纳检测; 薄膜

1 研究背景

在集成电路制造、MEMS制造等领域中, 均存在膜层厚度、深度等参数需要精确的测量, 来保证生产的良率、器件的性能等。其中大多数的功能器件均通过衬底上的薄膜沉积工艺制造^[1,2], 其厚度的准确性与器件的性能直接相关^[3-18], 此外, 由于存在薄膜和衬底厚度同步变化的制造过程, 同时高效的测量薄膜和衬底的厚度对于制造过程的质量控制非常重要^[19-22]。事实上, 随着制备工艺的不断发展, 多层膜结构在科学研究和技术应用中变得越来越常见, 半导体产业对测量的效率要求也越来越高。因此, 亟需一种针对多层膜结构测量方法, 另外, 在满足薄膜测量稳定性和准确性的基础上, 提高测量的效率对集成电路制造业发展也至关重要。

2 研究内容

针对多膜层结构测量以及提高测量效率的需求, 分别提出了多层薄膜厚度复合光谱解耦测量方法和宽面域光谱成像两种测量方案。

1. 多层薄膜厚度复合光谱解耦测量方法

根据多层薄膜样品的层间厚度差异提出了将反射光谱理论和差分反射光谱结合、白光和近红外波段结合的测量方法用于对多层膜厚度的解算。设计并搭建了一种膜层厚度测量系统, 将显微成像光路结构和测量光路结构集成为一体。该系统集成了白光和近红外两种波段测量光, 可以同时采集反射光谱和差分反射光谱。对典型的 SiO_2/Si 、绝缘体上单晶硅(Silicon-On-Insulator, SOI)和高深宽比结构等硅基半导体结构进行表征研究, 验证了测量系统的厚度测量能力。详细验证了 SiO_2 薄膜的测量重复性达到亚纳米级, 硅基底厚

度的测量重复性达到了纳米级。对SOI三层结构进行了表征, 并提出了基于光谱复合的双模式光谱测量方法的可靠解析策略, 成功完成了对SOI三层厚度差异较大的表征。此外, 还对高深宽比结构微阵列沟槽的深度和顶层氧化膜厚度进行了表征, 验证了系统的大范围测量能力和高精度。

2. 宽面域光谱成像测量方法

针对提升检测效率和精度, 提出了宽面域光谱成像测量方法用于薄膜样品的厚度全面测量。单次测量时长可达 1cm^2 。该系统可用于晶圆上薄膜的大视场测量。另外, 针对表面粗糙度较高, 表面不平整等特殊样品, 大视场成像能够一次性表征厚度、粗糙度等参数, 以支持制造过程的优化和控制。该方法采用差分光谱成像技术, 满足宽面域测量需求的同时还能兼顾纳米级薄膜的准确测量。利用该系统测量了粗糙衬底钛(Ti)上的二氧化钛(TiO_2)薄膜厚度。其厚度测量范围可达 $10\text{nm}\sim 500\text{nm}$, 膜厚测量分辨力小于等于 5nm ; 在粗糙表面和曲面样品上, 光的散射和反射可能导致测量信号的失真, 采用大视场大景深的低倍物镜, 系统依然能够呈现出良好的鲁棒性。

3 结 论

针对多层膜结构提出了多层薄膜厚度复合光谱解耦测量方法, 将白光与近红外光的集成用于测量多层且厚度差异明显的薄膜结构、完成了介质膜厚度、沟槽深度等类膜厚的参数测量、完成了纳米级薄膜到百微米级衬底的厚度测量。针对检测效率提升和特殊粗糙样品结构测量, 提出了宽面域光谱成像测量方法, 完成了粗糙衬底钛(Ti)上的纳米级二氧化钛(TiO_2)薄膜厚度表征, 单次测量视场可达 1cm^2 。

参考文献

- [1] Mbam S O, Nwonu S E, Orelaja O A, et al. Thin-film coating; historical evolution, conventional deposition technologies, stress-state micro/nano-level measurement/models and prospects projection: a critical review[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(12): 122001.
- [2] Ross B . Special Issue: Current Research in Thin Film Deposition: Applications, Theory, Processing, and Characterisation[J]. *Coatings*, 2020, 10(12): 1228-1228.
- [3] Abadias G, Chason E, Keckes J, et al. Review Article: Stress in thin films and coatings: Current status, challenges, and prospects[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2018, 36(2): 020801.
- [4] Bor Kai W, Tsai L, Shorey A, et al. Metrologies for characterization of flatness and thickness uniformity in temporarily bonded wafer stacks[C]. 2012 7th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), 2012: 263-266.
- [5] Feng X, Huang Y, Rosakis A J. On the Stoney Formula for a Thin Film/Substrate System With Nonuniform Substrate Thickness[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2007, 74(6): 1276-1281.
- [6] Griesmann U, Wang Q, Tricard M, et al. Manufacture and Metrology of 300 mm Silicon Wafers with Ultra - Low Thickness Variation[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2007, 931(1): 105-110.
- [7] Huang Y, Ngo D, Rosakis A J. Non-uniform, axisymmetric misfit strain: in thin films bonded on plate substrates/substrate systems: the relation between non-uniform film stresses and system curvatures[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2005, 21(4): 362-370.
- [8] Kwak S, Shim Y-S, Yoo Y K, et al. MEMS-Based Gas Sensor Using PdO-Decorated TiO₂ Thin Film for Highly Sensitive and Selective H₂ Detection with Low Power Consumption[J]. *Electronic Materials Letters*, 2018, 14(3):305-313.
- [9] Lee H, Chae H-S, Joo W-S, et al. Multi-objective design of thickness and curvature of a bendable structure considering delamination and strength characteristics[J]. *Journal of Computational Design and Engineering*, 2019, 6(1): 60-69.
- [10] Lee H-S, Suk J, Kim H, et al. Enhanced efficiency of crystalline Si solar cells based on kerfless-thin wafers with nanohole arrays[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3504.
- [11] Lewis J, Grego S, Vick E, et al. Mechanical Performance of Thin Films in Flexible Displays[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 2004, 814(1): 307-316.
- [12] Park J S, Yong S H, Choi Y J, et al. Residual stress analysis and control of multilayer flexible moisture barrier films with SiN_x and Al₂O₃ layers[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(8): 085101.
- [13] Sai H, Umishio H, Matsui T, et al. Impact of silicon wafer thickness on photovoltaic performance of crystalline silicon heterojunction solar cells[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2018, 57(8S3): 08RB10.
- [14] Nakata M, Tsuji H, Sato H, et al. Influence of Oxide Semiconductor Thickness on Thin-Film Transistor Characteristics[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2013, 52(3S): 03BB04.
- [15] Trolier-McKinstry S, Murali P. Thin Film Piezoelectrics for MEMS[J]. *Journal of Electroceramics*, 2004, 12(1): 7-17.
- [16] Zhang H-T, Zhang L, Mukherjee D, et al. Wafer-scale growth of VO₂ thin films using a combinatorial approach[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 8475.
- [17] Zhang Y, Li H, Wang H, et al. Thickness Considerations of Two-Dimensional Layered Semiconductors for Transistor Applications[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 29615.
- [18] Pinos A, Tan W-S, Chitnis A, et al. Excellent uniformity on large diameter GaN on silicon LED wafer[J]. *Physica Status Solidi(c)*, 2014, 11(3-4): 624-627.
- [19] *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*[M]. Springer New York:DOI:10.1007/978-1-4614-5491-5.
- [20] Sami F. Introduction to Microfabrication[M]. John Wiley Sons, Ltd:2010-09-17.DOI:10.1002/9781119990413.
- [21] Tian J, Bartek M. Simultaneous through-silicon via and large cavity formation using deep reactive ion etching and aluminum etch-stop layer[C]. 2008 58th Electronic Components and Technology Conference, 2008: 1787-1792.
- [22] Ni S ,Berenschot W J E ,Westerik J P , et al. Wafer-scale 3D shaping of high aspect ratio structures by multistep plasma etching and corner lithography[J]. *Microsystems Nanoengineering*, 2020, 6(1): 1721-1754.