

扫频光源 OCT 对单晶硅片制绒质量的检测

于海民¹ 牛源¹ 刘桂林¹ 孟卓^{2,3} 姚晓天^{1,2,4} 李果华^{1*}

¹ 江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

² 天津大学精密仪器与光电工程学院, 天津 300129

³ 苏州光环科技有限公司, 江苏 苏州 215123

⁴ General Photonics Corporation, 5228 Edison Avenue, Chino, California 91710, USA

摘要 光学相干层析(OCT)是一种新型的光学信号获取与处理方式,它可以对光学散射介质进行扫描,获得的三维图像,分辨率可以达到微米级。尝试利用扫频光源 OCT 对在相同的制绒溶液配比下,不同制绒时间的单晶硅片进行检测,通过处理三维图像数据,判断制绒质量,为单晶硅制绒检测提供一种新方法。

关键词 医用光学;扫频光源 OCT;单晶硅制绒;后向散射;轴向信号

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.021701

Sweep Light Source OCT Method for the Test of Textured Monocrystalline Silicon

Yu Haimin¹ Niu Yuan¹ Liu Guilin¹ Meng Zhuo^{2,3} Yao Steve^{1,2,4} Li Guohua¹

¹ School of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China

² College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300129, China

³ Suzhou Optoring Technology Co. Ltd., Suzhou, Jiangsu 215123, China

⁴ General Photonics Corporation, 5228 Edison Avenue, Chino, California 91710, USA

Abstract Optical coherence tomography (OCT) is an novel optical signal acquisition and processing method which can capture micrometer-resolution three-dimensional images from optical scattering media. Monocrystalline silicon wafers obtained with different texturing time and same corrosion solution are measured by sweep light source OCT. Through processing the OCT acquired data, the quality of monocrystalline silicon in different texturing time can be estimated. It may provide a new method for the test of textured monocrystalline silicon.

Key words medical optics; sweep light source OCT; monocrystalline texturing; backscattering; axial signal

OCIS codes 170.4500; 180.1655; 290.1350; 040.5350

1 引言

现代化工业生产对检测技术的要求越来越高,非接触、无破坏、同时具有高分辨和高采集速度并且能够自动化地处理分析数据的检测技术被各行业所期待。光学相干层析(OCT)技术是20世纪末兴起的一种新型的光探测技术,它具有微米级的轴向分辨率,探测深度达到毫米级,可以进行高速、非接触的无损检测。凭借其优异的性能,OCT技术已经成熟地应用在生物医疗行业,尤其是在眼科疾病的治疗和检测中。目前,OCT技术在其他领域也有诸多尝试^[1~3]。本文尝试将这项技术应用在单晶硅片制绒质量检测中,为制绒检测提供一种新型的高效地实时检测技术。

收稿日期: 2012-10-22; **收到修改稿日期**: 2012-10-30; **网络出版日期**: 2013-01-04

作者简介: 于海民(1988—),男,硕士研究生,主要从事 OCT 技术应用方面的研究。E-mail: yuhaimin0608@163.com

导师简介: 姚晓天(1955—),男,博士,教授,主要从事光纤相干层析技术、光纤陀螺光纤环检测技术和光纤偏振传感技术方面的研究。E-mail: steveyao888@yahoo.com

* **通信联系人**。E-mail: guohua_li55@yahoo.com

2 原理

单晶硅绒面的制作是利用单晶硅的各向异性腐蚀,在硅片表面形成四面方锥体结构(也称金字塔结构)。单晶硅的各向异性腐蚀液通常使用热的碱性溶液,可用的碱有 NaOH、KOH、LiOH、联氨和乙二胺等。目前工业生产中最普遍使用的是 NaOH(或 KOH)、水和异丙醇(IPA)的混合物^[4]。

经过腐蚀的硅片形成金字塔状的绒面,光在通过粗糙的绒面时,不再是简单地发生反射。微米级的金字塔结构绒面可以近似看做散射面。近红外光源入射进入散射介质中,入射光会经过不同程度的散射事件,产生不同路径种类的光子,大致可分为4类:1)不受任何碰撞的直进光子,2)受到微碰撞的蛇行光子,3)经过许多次碰撞的多重散射光子,4)因大角度散射而形成的后向散射光子^[5]。OCT 是通过后向散射光干涉获得三维(3D)图像的。在腐蚀过程中,如果时间较短,硅片的表面就不能被金字塔完整覆盖;但若时间过长,形成的金字塔的顶部就会坍塌。绒面形貌的改变会引起后向散射光的强度的变化,制绒的效果越好,硅片的陷光能力越强,后向散射光强越弱。后向散射光的强度决定 OCT 图像信号的强度,后向散射光强越强,OCT 信号越强^[6~8]。本文利用 OCT 采集不同制绒时间的硅片 3D 图像数据,通过处理图像数据,得到后向散射强度的变化规律,来判断不同时间的制绒质量。

3 实验

实验使用的是中心工作波长为 1300 nm 的扫频光源 OCT(SS-OCT)。最大采集体积($L \times W \times D$)为 10 mm × 10 mm × 3 mm(空气中),最大分辨率为 1024 pixel × 1024 pixel × 512 pixel,轴向扫描频率为 16 kHz^[9,10]。硅在 1300 nm 波长下的折射率为 3.504,使得 OCT 轴向分辨率可以达到 1.7 μm (在硅片中),横向分辨率约为 10 μm 。SS-OCT 的基本原理如图 1 所示。

实验使用的 Si 片是(100)晶向的单晶 Si 片,大小为 125 mm × 125 mm,电阻率为 2~4 $\Omega \cdot \text{cm}$ 。用激光刻槽机将单晶 Si 片划成同样大小的 4 份,每次实验取其中 1 份作为样品。在恒温水浴箱的控制面板上设定好温度,在烧杯中配好腐蚀溶液,放入水浴箱的水中,待水浴箱中水温升高到设定温度时,将一小片 Si 片垂直放入烧杯中,没入腐蚀溶液。所取烧杯的容积为 250 mL,小 Si 片放入其中保持直立,不会倾倒^[11~13]。

在相同实验条件下对单晶硅片进行不同时间的制绒处理,分别为 5、15、25、35 min,制绒完毕后用 SS-OCT 分别对不同制绒时间的硅片取四组不同区域进行扫描,采集硅片的 3D 数据。扫描面积设置为 5 mm × 5 mm,扫描精度设置为 200 pixel × 200 pixel。对采集数据进行图像处理,3D 重建立体形貌,分析轴向信号以确定制绒效果。同时分别测量不同制绒时间的硅片的反射率,验证实验结论。

4 结果与讨论

4.1 数据处理

光在通过硅片时,硅片上下两个表面以及内部一些颗粒状杂质缺陷会对光进行散射,所以在 OCT 采集的 3D 图像中只会出现上下两个表面以及内部的一些缺陷。OCT 系统会自动将最大光强信号进行灰度值归一化处理,最大光强信号出现在样品上表面,所以无法同过比较样品上表面的信号强度来判断制绒效果。后向散射光强的变化规律会体现在下表面的信号强度值上。数据处理过程中将利用样品下表面的信号强度与样品上表面信号强度的比值来判断制绒的效果。通过 OCT 采集数据重建的单晶硅片的 3D 形貌如图 2 所示。

将采集的 200 pixel × 200 pixel × 512 pixel 的 3D 信号利用最大值切割对齐轴向信号,从而将硅片的上表面对齐,然后将 40000 个轴向信号进行平均处理得到 1 pixel × 512 pixel 的一维轴向信号。由于硅片表面

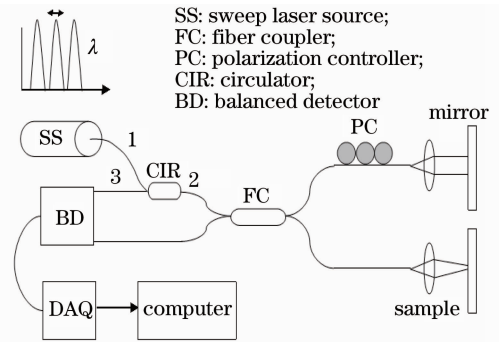


图 1 SS-OCT 原理图

Fig. 1 Schematic of SS-OCT system

的不平整和散射的光程不一致,使得下表面分布在一定的深度范围内,利用微分算子与阈值判读识别信号边界,对范围内的信号求平均得到上、下表面的信号平均值。

4.2 实验结果

对齐平均后的一维轴向信号如图 3 所示。第一个峰值对应被测样品硅片的上表面,大约在轴向 140 pixel 深度附近分布着展宽后的下表面信号。对图像数据进行计算分析得到表 1,其中 I_U 表示上表面平均信号强度, I_D 表示下表面平均信号强度, R 表示下表面与上表面平均信号强度之比。通过对比图 3 和表 1,可以得出 25 min 时的制绒效果最好。

表 1 OCT 测量不同制绒时间硅片的数据处理结果

Table 1 Results of OCT signal data processing at different texturing time

Time /min	I_U (gray scale)	I_D (gray scale)	R /%
5	208.7	47.4	22.7
15	192.2	35.0	18.2
25	194.9	21.7	11.1
35	198.0	26.4	13.3

4.3 测量角度的影响

样品的倾斜角度会对 OCT 测量信号带来影响。为保证实验的准确性,采用不同的测量角度重复测量,经过数据处理的结果如表 2 所示。结果显示依旧是 25 min 时的制绒效果最好,测量角度的轻微改变并没有对实验结果造成影响。

表 2 不同测量角度数据处理结果

Table 2 Results of data processing in different measuring angles

Time /min	R /%		
	0°	4.4°	11.3°
5	22.7	21.3	21.7
15	18.2	17.3	15.8
25	11.1	13.4	12.4
35	13.3	14.3	13.2

4.4 验证实验结果

通过测量样品硅片的反射率来验证实验结果的正确性,测量结果如图 4 所示,反射率显示 25 min 时的制绒效果最好。反射率的测量结果与 OCT 的测量结果一致,验证了实验结果的正确性。

5 结 论

通过上述实验可以明确地得出:硅片上下表面灰度的比值可以准确地反应硅片的制绒效果。利用 OCT 的高采集速度,在常温检测条件下,采用厘米级的测试距离时,轻微的角度改变并不影响测量,可以轻松地将 OCT 集成在硅电池的工业生产中,简单快捷地检测单晶硅片的制绒效果。

致谢 本实验在苏州光环科技 OCT 研发中心完成,衷心感谢苏州光环科技有限公司的支持与帮助。

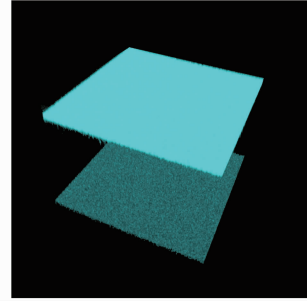


图 2 OCT 采集数据重建的单晶硅片的 3D 形貌
Fig. 2 3D morphological image of the monocrystalline silicon wafer rebuilt by OCT data

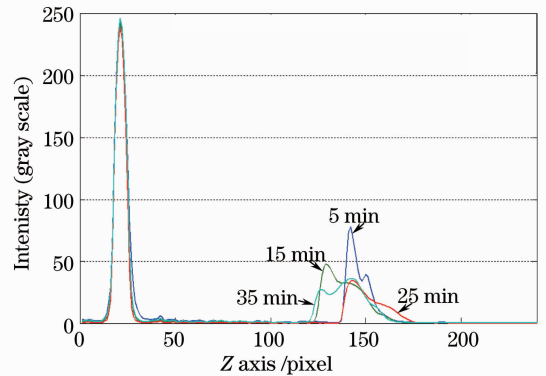


图 3 不同制绒时间的硅片轴向平均信号
Fig. 3 OCT axial mean signals at different texturing time

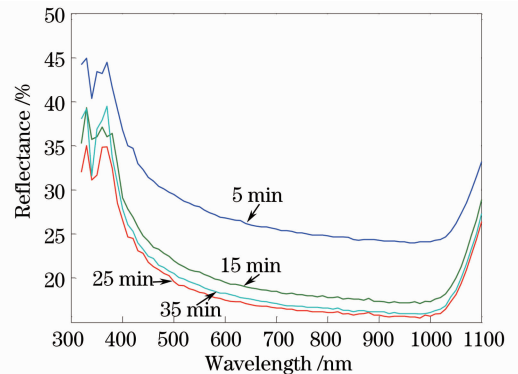


图 4 不同制绒时间的硅片反射率
Fig. 4 Reflectance of silicon wafer at different texturing time

参 考 文 献

- 1 Rong Su, Mikhail Kirillin, Peter Ekberg *et al.*. Optical coherence tomography for quality assessment of embedded microchannels in alumina ceramic[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(4): 4603~4618
- 2 Yu Libo. Overview and forecast of fiber optic white-light interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900137
苑立波. 光纤白光干涉技术的回顾与展望[J]. 光学学报, 2011, **31**(9): 0900137
- 3 Xu Peng, He Hong, Ding Zhihua *et al.*. Research in subsurface morphologies of Jades with optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508004
许 鹏, 何 红, 丁志华. 光学相干层析应用于玉石亚表面结构的研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0508004
- 4 Wu Wenjuan, Zhang Song, Zhang Liyuan *et al.*. Application of tetramethylammonium hydroxide in texturing of monocrystalline silicon[J]. *J. Chinese Ceramic Society*, 2011, **39**(5): 125~129
吴文娟, 张 松, 张立元 等. 四甲基氢氧化铵应用于单晶硅高效制绒[J]. 硅酸盐学报, 2011, **39**(5): 125~129
- 5 Yu Liping. Diffused Photon-Pair Density Wave in a Multiple Scattering Medium [D]. Taiwan: National Yang-Ming University, 2005. 4~7
俞力平. 高浓度散射介质中的扩散光子对密度波[D]. 台北: 国立阳明大学, 2005. 4~7
- 6 Mark E. Brezinski. Optical Coherence Tomography: Principles and Applications [M]. New York: Academic Press, 2006. 297~306
- 7 Huang Bingjie, Bu Peng, Wang Xiangzhao *et al.*. Optical coherence tomography based on depth resolved dispersion compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0217002
黄炳杰, 步 鹏, 王向朝 等. 用于频域光学相干层析成像的深度分辨色散补偿方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 217002
- 8 Yang Liu, Wang Chuan, Ding Zhihua *et al.*. Image reconstruction in dioptric media for spectral domain optical coherence tomography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0504001
杨 柳, 王 川, 丁志华 等. 屈光介质中谱域光学相干层析成像的重构[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0504001
- 9 Meng Zhuo. Research on Method and System Development of All Fiber Oral OCT[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. 16~29
孟 卓. 全光纤口腔 OCT 方法研究与系统研制[D]. 天津: 天津大学, 2008. 16~29
- 10 Meng Zhuo, Steve Yao, Yao Hui *et al.*. Detecting early artificial caries by using optical coherence tomography[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2709~2713
孟 卓, 姚晓天, 姚 晖 等. 光学相干层析用于检测早期人工龋齿[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2709~2713
- 11 Wu Wenjuan, Zhang Song, Han Peiyu *et al.*. Research on surface texturization of monocrystalline silicon based on reaction [J]. *J. Synthetic Crystals*, 2011, **40**(2): 287~293
吴文娟, 张 松, 韩培育 等. 快速制备单晶 Si 片绒面的研究[J]. 人工晶体学报, 2011, **40**(2): 287~293
- 12 Wang Shuzhen, Qiao Qi, Chen Xiaojing *et al.*. Research on the texture and cleaning process of silicon wafer [J]. *Semiconductor Technology*, 2010, **35**(4): 305~308
王淑珍, 乔 琦, 陈肖静 等. 制绒 Si 片清洗工艺的研究[J]. 半导体技术, 2010, **35**(4): 305~308
- 13 Wang Zhihua, Liu Yuling, Zhang Jianxin. Application of the electrochemical cleaning method before solar texturing of solar cells[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2009, **46**(2): 119~122
王志华, 刘玉岭, 张建新. 电化学清洗在太阳能电池制绒前的应用[J]. 微纳电子技术, 2009, **46**(2): 119~122