

光学相干层析应用于玉石亚表面结构的研究

许 鹏¹ 何 红¹ 丁志华²

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所光存储实验室, 上海 201800)
(²浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要 阐述了对玉石亚表面结构进行检测的频域光学相干层析(OCT)成像系统,以迈克耳孙干涉仪与光谱仪为主体,中心波长 830 nm 的超辐射发光二极管作为光源,纵向分辨率 10 μm ,横向分辨率 15 μm ,成像深度 2 mm。实验结果验证了光学相干层析技术可以对玉石亚表面结构进行定量检测,利用数字图像分析技术可以计算出缺陷的精确位置以及尺寸大小,同时提出了玉石材质的评价方法,并且通过与扫描电子显微镜(SEM)检测的对比分析,进一步证明了光学相干层析可以成为检测玉石亚表面结构的新的技术途径。

关键词 测量;亚表面结构;光学相干层析;数字图像分析

中图分类号 TN247;TP391 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0508004

Research in Subsurface Morphologies of Jades with Optical Coherence Tomography

Xu Peng¹ He Hong¹ Ding Zhihua²

¹Laboratory of High Density Optical Storage, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai, 201800 China
²State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A spectral domain optical coherence tomography (OCT) imaging system used to detect the subsurface morphologies of jades is described. It is mainly composed of Michelson interferometer and spectrograph with superluminescent diode light source of 830 nm central wavelength, the depth resolution is 10 μm , lateral resolution is 15 μm , penetration depth is 2 mm. The experimental results validate that the OCT technology can be applied in the quantificational detection of the jades' morphologies, making use of digital image analysis technology, the precise location and size of disfigurements can be calculated, simultaneously the quantificational method to evaluate the jades' quality is put forward. In addition, by means of comparing OCT with scanning electro microscope (SEM) detection, it demonstrates that OCT can become a new technological approach to detect subsurface morphologies of jades.

Key words measurement; subsurface morphology; optical coherence tomography; digital image analysis

OCIS codes 110.4500; 100.6950; 120.3180

1 引 言

光学相干层析(OCT)成像技术将先进的光学技术和现代计算机图像处理结为一体,发展成为一门新兴的层析成像技术。它采用了低相干干涉技术可以获取组织内部微观结构信息,具有无辐射损伤、非侵入性、高灵敏度、高分辨率等优点^[1~3],被广泛

应用于医学诊疗,如人眼、人体皮肤、前列腺组织成像以及龋齿的早期检测等^[4~6]。近年来随着 OCT 技术不断发展,其应用已扩展到了材料科学、薄膜技术等诸多基础研究领域。

玉石研究在考古中占有重要地位。目前已有的玉石检测方法有拉曼光谱、X 射线荧光分析、X 射线

收稿日期: 2010-12-29; **收到修改稿日期**: 2011-02-23

作者简介: 许 鹏(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学相干层析技术在玉石亚表面结构检测中的应用研究。

E-mail: pppxupeng@163.com

导师简介: 何 红(1966—),女,副研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: hehong@siom.ac.cn

衍射分析、扫描电子显微镜(SEM)、偏光显微镜等,这些检测技术都属于有损检测,对样品制备要求较高。由于玉石的珍贵历史价值,无损检测技术对玉石检测尤其重要。国内几个研究小组应用 OCT 对玉石内部的微观结构、钙化沁色、制作工艺、质地等进行了分析讨论^[7,8],但多停留于定性的研究分析,缺乏基于客观数据的科学方法辅助。Shoude Chang 等^[9]提出用纹理特征来分析玉石 OCT 图像,纹理分析对于区分不同种类的玉石具有良好的效果。本文结合图像分析技术实现了对玉石内部结构的定量描述,并与扫描电子显微镜图像进行对比分析,分析讨论了 OCT 图像中的结构特征,展现了 OCT 技术应用于玉石结构研究的意义。

2 实验装置和原理

实验中用于检测玉石亚表面结构的装置结构如图 1 所示。该系统为频域 OCT 系统,主要组成部分为迈克耳孙干涉仪和光谱仪^[10~14]。宽带光源发出的光被分光棱镜按振幅分为等光强的两束光,一束为参考光,一束为测试光,参考光被平面镜反射,测试光在样品中产生背向散射,两束光在分光棱镜相遇形成干涉信号,干涉信号被衍射光栅分光后由 CCD 阵列检测。样品的深度信息都包含在干涉光谱中,通过计算机对其进行傅里叶逆变换可以获得样品的深度图像。频域 OCT 系统的轴向分辨率为 $\Delta z = \frac{2 \ln 2}{\pi} \times$

$\frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_0}$,其中 λ_0 为光源中心频率, $\Delta \lambda_0$ 为光源带宽,但是

考虑到样品组织对不同波段光的吸收、散射等特性,一般采用近红外波段,实验中采用了中心波长 830 nm 的超辐射发光二极管(SLD)作为光源,对样品的穿透能力较好。频域 OCT 的横向分辨率为

$\Delta x = \frac{4 \lambda_0}{\pi} \times \frac{f}{d} = 0.61 \frac{\lambda_0}{d_{NA}}$,其中 d_{NA} 为聚焦物镜的

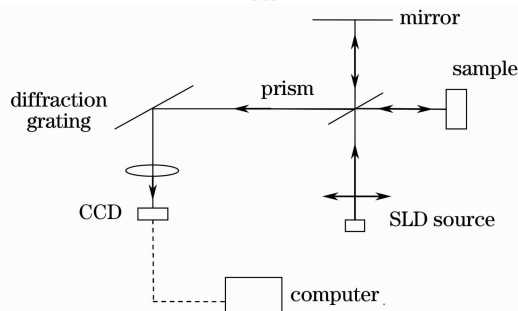


图 1 用于检测玉石亚表面结构的 OCT 系统示意图

Fig. 1 Scheme of OCT imaging system for detection of jades' morphologies

数值孔径。实验中用于检测玉石玉器样品的 OCT 系统的横向分辨率为 $15 \mu\text{m}$,纵向分辨率为 $10 \mu\text{m}$,对于透明度较好的玉石样品探测深度可以达到 2 mm。

3 实验结果和分析

应用 OCT 系统分别对多种材质的 4 个玉石样品进行了二维成像,并且与其他检测方法进行了对比分析^[15]。研究表明 OCT 系统对于玉石材质的均匀性以及玉石亚表面缺陷的检测具有良好的效果,通过数字图像分析的方法可以得到定量的分析。

3.1 OCT 检测与 SEM 检测的对比

传统的检测玉石内部结构的方法有偏光显微镜、SEM 等,而这些检测方法对于样品的制备有较高的要求,而且是有损检测。相比之下 OCT 检测对样品制备要求较低,而且能够较好地获得实验现象,因此可以作为一种有效的辅助检测方法。

图 2,3 分别是和田玉样品的 OCT 图像和 SEM 图像,图 2 成像深度为 2 mm。和田玉晶粒排列紧密且规则,使得和田玉结构致密,较细腻。光在致密且均匀的介质中散射效应比较小,而在折射率突变的区域将会产生较强的散射,两幅图像都清晰地表明在均匀的样品内部存在一些异常大的结晶颗粒。

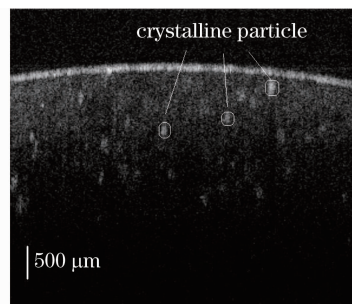


图 2 和田玉 OCT 图像

Fig. 2 OCT image of Hetian jade

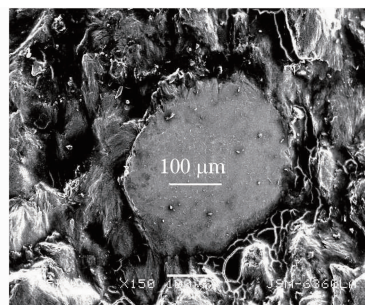


图 3 和田玉 SEM 图像

Fig. 3 SEM image of Hetian jade

图 4,5 分别是蓝田玉的 OCT 图像和 SEM 图像,图 4 成像深度为 2 mm。从 SEM 图像中可以获

得蓝田玉内部层状的结构,同层结构比较紧密,但是在层与层的过渡区域结构排列不规则,所以在 OCT 图像上在层状结构的过渡区域显现出较强的散射效应。通过两种检测方法的对比分析验证了 OCT 用于玉石结构检测的可行性。

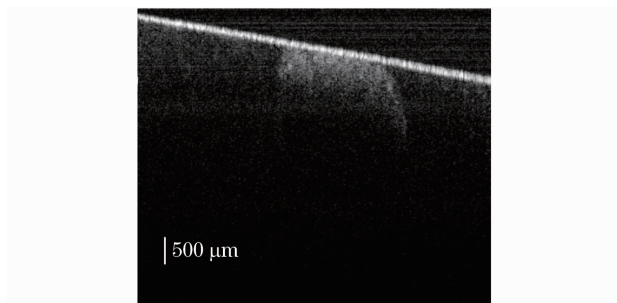


图 4 蓝田玉 OCT 图像
Fig. 4 OCT image of Lantian jade

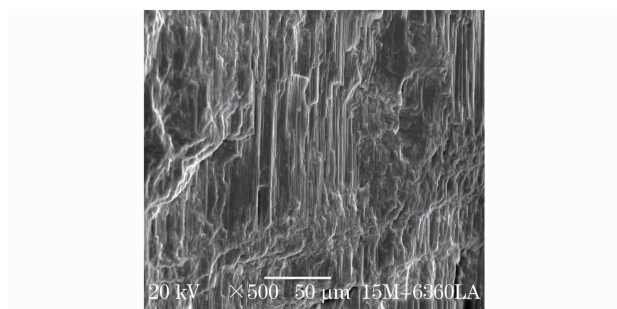


图 5 蓝田玉 SEM 图像
Fig. 5 SEM image of Lantian jade

3.2 玉石亚表面的缺陷

OCT 系统检测的是样品的单次背向散射光,光在样品内部传播时如果遇到折射率突变,背向散射光就会增强,而缺陷在物理结构上的表现就是折射率的突变,因此 OCT 系统对于缺陷的检测有较好的效果。

OCT 系统用于玉石的检测,它的优势在于它是一种能够深入样品亚表面的无损检测技术,而且相对于超声、核磁共振等检测方法具有高的空间分辨率。图 6 是青白玉样品的 OCT 图像,图中可以看出此样品内部光散射均匀,但是存在一个异常的结晶颗粒。通过采用数字图像技术,可以精确地获得结晶颗粒的位置以及颗粒大小。

提取包含结晶颗粒的轴向一维灰度信号[图 7(a)],存在两个比较大的尖峰,第一个尖峰表征的是空气与样品界面镜面反射,因为样品表面比较光滑,光反射较强,第二个尖峰表征在结晶颗粒处较强的背向散射。为了从一维信号中提取出这两个强散射的部位,采用最大类间方差法将信号进行二

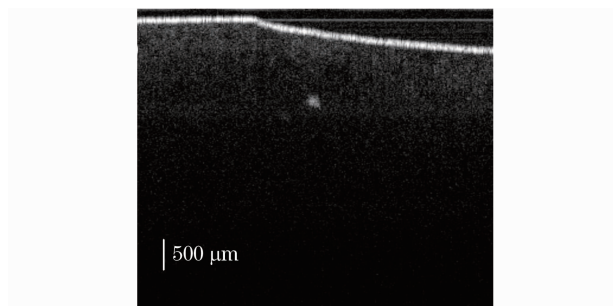


图 6 具有结晶颗粒的青白玉 OCT 图像
Fig. 6 OCT image of light greenish white jade with crystalline particle

值化[图 7(b)]。通过二值化信号可以计算出结晶颗粒的位置,距离样品表面 1 mm,结晶颗粒的大小为 200 μm, OCT 图像成像深度[图 7(a)]为 2.5 mm。

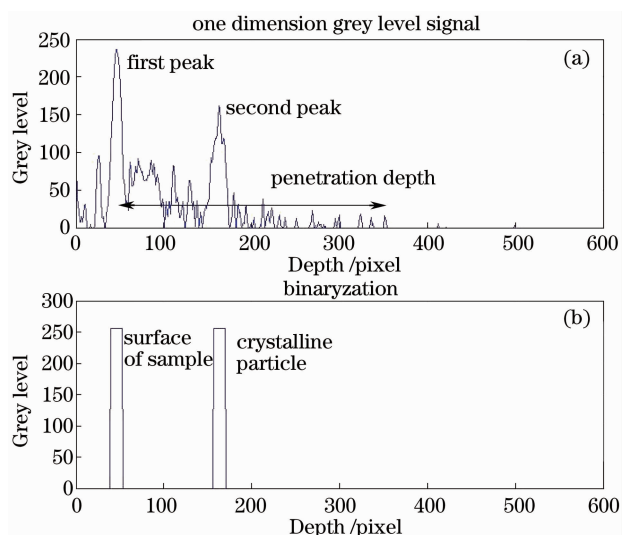


图 7 包含结晶颗粒的一维灰度信号
Fig. 7 One dimension grey scale signal containing crystalline particle

3.3 玉石材质的均匀性

对于矿物组成成分比较多或者内部密度变化不均匀的样品,光在样品内部的散射是不具备统计规律的,而对于一些透明度较好且材质均匀的样品它的 OCT 图像灰度应该具有一定的统计规律,因此可以从 OCT 图像中提取这个特征,用来定量地分析玉石材质的均匀性特性。

对于材质均匀性好的玉石,如和田玉样品 a 和 b(分别如图 8,9 所示),OCT 图像的灰度分布也是均匀的,用图像灰度的均方差可以作为一种评判材质均匀性的标准。考虑到光在玉石中传播的光强随穿透深度呈指数衰减的变化规律^[7],要先对灰度图像取对数然后做出线性补偿之后,再对不同位置进

行求均方差操作。取 20 pixel×20 pixel 的模板分别在 5 个不同的位置求得均方差。

比较和田玉样品 a, b 分别在 5 个不同位置(图 8,9)求得的均方差值(表 1),样品 a 在位置 1,2 灰度分布比较均匀,对应均方差值较小,而在位置 3,4,5 由于样品内部存在一些大的结晶颗粒散射强度变化比较大,求得的均方差值较大。相比之下样

品 b 则显现出比较好的均匀性,位置 3 均方差值稍大,灰度分布图(图 10)显示存在一些吸收峰,这是由于样品材料对光的吸收特性,导致散射效应减弱。通过这种定量的评价方法可以判定和田玉样品 b 的材质更均匀一些,这为玉石等级的鉴定提供了一个参考依据。

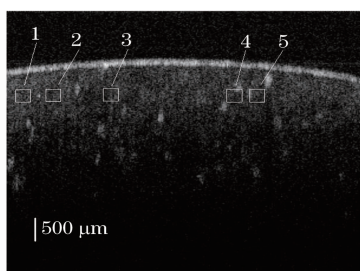


图 8 和田玉样品 a

Fig. 8 OCT image of Hetian jade sample a

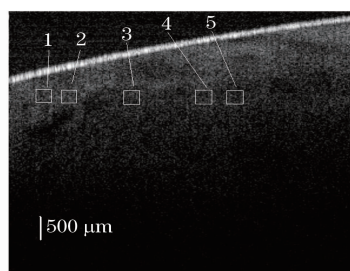


图 9 和田玉样品 b

Fig. 9 OCT image of Hetian jade sample b

表 1 评价和田玉材质均匀性的均方差判据

Table 1 Mean-variance criterion for evaluation of Hetian jade's quality

Samples	Position				
	1	2	3	4	5
a	0.3590	0.4410	0.9093	0.8945	0.9007
b	0.3083	0.4214	0.6619	0.3783	0.4566

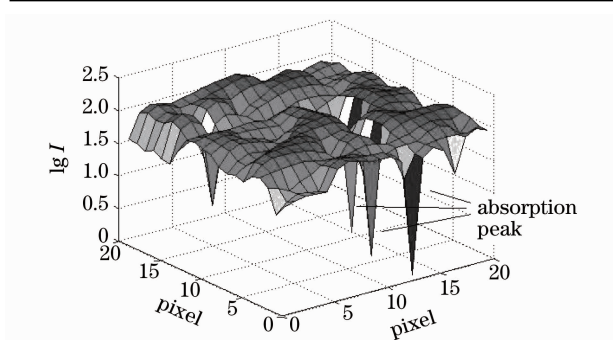


图 10 位置 3 灰度分布

Fig. 10 Gray level distribution of location 3

4 结 论

研究发展了一种古代玉石玉器亚表面结构的无损检测方法。对于多种玉石样品,研究分析了光在样品中的散射、吸收等光学特性,并给出了基于 OCT 图像检测定位玉石样品亚表面缺陷的方法,以及评价玉石样品材质均匀性的定量描述。同时与扫描电子显微镜检测进行对比分析,显示了 OCT 系统用于玉石亚表面结构研究的意义。目前 OCT 成像检测存在的研究难点包括:1)图像对比度较低,且受样品内部折射系数分布的影响,使重建图像产生不同程度的畸变;2)成像深度较小,对样品具有选择

性,对于高散射介质样品不能进行成像;3)能够获取的信息量不足,玉石内部某些结构特征难以用散射系数的分布来表征,因此需要研究发展各种功能光学相干层析成像系统,如偏振光学相干层析系统、光谱光学相干层析系统,从而能够更全面有效地研究分析玉石亚表面结构。

参 考 文 献

- 1 D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, **254**(5035): 1178~1181
- 2 Brett E. Bouma, Guillermo J. Tearney. Handbook of Optical Coherence Tomography[M]. New York: Marcel Dekker, Inc. 2002
- 3 Duan Lian, He Yonghong, Zhu Rui *et al.*. Development of a spectrum domain 3D optical coherence tomography system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2528~2533
段 炼, 何永红, 朱 锐等. 三维谱域光学相干层析成像系统的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2528~2533
- 4 Li Peng, Huang Run, Gao Wanrong. Experiment research on optical coherence tomography of human skin[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2498~2502
李 鹏, 黄 润, 高万荣. 光学相干层析术在人体皮肤成像方面的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2498~2502
- 5 Shahab Chitchian, Michael A. Fiddy, Nathaniel M. Fried. Denoising during optical coherence tomography of the prostate nerves via wavelet shrinkage using dual-tree complex wavelet transform[J]. *J. Biomed. Opt.*, 2009, **14**(1): 014031
- 6 Meng Zhuo, X. 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
- 7 Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui. Imaging and analyzing subsurface morphologies of jade objects with optical coherence tomography [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1336~1342
- 曾 楠, 何永红, 马 辉. 用于玉石结构分析的光学相干层析技术[J]. 光学精密工程, 2008, **16**(7): 1336~1342
- 8 M.-L. Yang, C.-W. Lu, I.-J. Hsu *et al.*. The use of optical coherence tomography for monitoring the subsurface morphologies of archaic jades[J]. *Archaeometry*, 2004, **46**(2): 171~182
- 9 Shoude Chang, Youxin Mao, Guangming Chang *et al.*. Jade detection and analysis based on optical coherence tomography images[J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(6): 063602
- 10 Song Guiju, Wang Xiangzhao, Zhang Lianying *et al.*. Optical coherent tomography about lotus root [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(1): 83~86
- 宋桂菊, 王向朝, 张莲英 等. 藕断面光学相干层析成像[J]. 中国激光, 2000, **A27**(1): 83~86
- 11 Zhang Yudong, Dai Yun, Shi Guohua *et al.*. Application of one-dimensional wavelet transformation in time domain optical coherence tomography imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1013~1016
- 张雨东, 戴 云, 史国华 等. 一维小波变换在时域光学相干层析成像中的应用[J]. 中国激光, 2008, **35**(7): 1013~1016
- 12 Li Peng, Gao Wanrong. Signal-to-noise ratio analysis and optimization of optical coherence tomographic imaging system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 635~640
- 李 鹏, 高万荣. 光学相干层析系统的信噪比分析及优化[J]. 中国激光, 2008, **35**(4): 635~640
- 13 C. Buranachai, P. Thavarungkul, P. Kanatharana *et al.*. Application of wavelet analysis in optical coherence tomography for obscured pattern recognition [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2009, **6**(12): 892~895
- 14 Zeng Nan, He Yonghong, Ma Hui *et al.*. Pearl detection with optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1140~1145
- 曾 楠, 何永红, 马 辉 等. 应用于珍珠检测的光学相干层析技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(8): 1140~1145
- 15 Kirk W. Gossage, Cynthia M. Smith, Elizabeth M. Kanter *et al.*. Texture analysis of speckle in optical coherence tomography images of tissue phantoms [J]. *Phys. Med. Biol.*, 2006, **51**(6): 1563~1575