

文章编号: 0258-7025(2007)08-1140-06

# 应用于珍珠检测的光学相干层析技术

曾楠, 何永红, 马辉, 王淑霞

(清华大学深圳研究生院光学检测实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要** 珍珠质的内部微观分辨和测量是珍珠产业发展和学术研究的核心难题。光学相干层析(OCT)高清晰深度分辨技术通过探测珍珠质的光学反射散射特性, 提供了研究其结构形态和分布规律的新途径。阐述了对珍珠质进行成像扫描的原理和实验装置, 以光纤迈克尔逊干涉仪为主体, 利用中心波长1310 nm的宽带光源和傅里叶域光学延迟线实现了扫描速度1 frame/s, 纵向分辨率15  $\mu\text{m}$ , 成像深度3 mm的光学相干层析成像系统。实验结果验证了光学相干层析检测方法适用于珍珠质的定量检测和定性分辨的可行性, 初步的报道包括珍珠质层和珠核贝壳层的分辨鉴别, 珍珠质层平均测量误差在20  $\mu\text{m}$ 以内, 珍珠质内部各种反常生长分布信息也清晰可见。

**关键词** 测量; 光学检测; 珍珠质鉴别与检测; 光学相干层析

中图分类号 TN 247 文献标识码 A

## Pearl Detection with Optical Coherence Tomography

ZENG Nan, HE Yong-hong, MA Hui, WANG Shu-xia

(Laboratory of Optical Imaging and Sensing, Graduate School at Shenzhen,  
Tsinghua University, Shenzhen, Guangdong 518055, China)

**Abstract** Research on optical coherence tomography (OCT) applied in pearl identification and nacre measurement is represented. Due to the difference of scattering properties for various components, OCT image characteristics can exact the two-dimensional information of subsurface structure of pearls, which could only be previously accomplished by the conventional section. An OCT system mainly composed of fiber Michelson interferometer with wideband source of 1310 nm central wavelength and Fourier-domain optical delay line has been implemented. The system can complete the nondestructive and real time detection, with scanning speed of 1 frame/s, depth resolution of 15  $\mu\text{m}$  and penetration depth of 3 mm. Experimental results included determining the structural identity: nacreous layer or shell nucleus, quantifying the nacre thickness (measuring errors less than 20  $\mu\text{m}$ ), and showing abnormal information of shell-nucleous features.

**Key words** measurement; optical detection; nacre identification and measurement; optical coherence tomography

## 1 引言

光学相干层析(OCT)技术的成像模式, 如多普勒流速检测光学相干层析、偏振光学相干层析、光谱光学相干层析等<sup>[1,2]</sup>, 和方案设计改进, 如光源、参考扫描延迟线、信号处理等, 都已经大量的研究和报道。这些基础技术的迅速进展都是与光学相干层析在不同领域的广泛应用扩展相辅相成的。已报道的应用研究集中在生物医学领域, 包括眼科诊断<sup>[3]</sup>、牙科疾病检测<sup>[4]</sup>、内窥疾病探查<sup>[5]</sup>、发育生物学研究<sup>[6,7]</sup>等。光学相干层析在工业领域的应用最近有

一些报道, 主要是在材料分析, 如聚合物、镀膜层等<sup>[8]</sup>。

珍珠的基本科学检测包括珍珠质鉴别和厚度测量。目前的测量方法有两种, 一种是将珍珠质剖开利用高清晰显微镜进行观测。这类办法虽然可以获得可靠的检测结果, 但是不具备无损实时的实用性; 另一种是利用 X 射线方法对珍珠质内部形态进行观测<sup>[9]</sup>, 分为 X 射线照相和 X 射线衍射两种形式。前者可使珍珠内部结构直观形象化但不足以进行高精度的定量检测, 后者仅能通过衍射图样的解释提

收稿日期: 2006-12-22; 收到修改稿日期: 2007-03-07

作者简介: 曾楠(1979—), 女, 助理研究员, 研究方向为光学检测成像技术在材料检测和医学诊断中的应用。

E-mail: heyh@sz. tsinghua. edu. cn

供内部结构的辅助信息。这类方法并非对所有品种的珍珠质都有效,并且设备成本偏高,操作维护复杂,目前也没有形成实用可行的检测设备。

本实验室研制出专门针对珍珠质检测的光学相干层析成像设备,可以清晰分辨珍珠质层和贝壳层,准确测量珍珠质厚度,并可用于分析珍珠质内部的有机质分布、病变缺陷等异常情况。系统的中心波长为 1310 nm,珍珠质检测误差 20  $\mu\text{m}$ ,检测范围 0.06~3 mm,成像速度 1 frame/s。目前对大量珍珠样品的前期实验研究表明,该技术可以通过显示珍珠质的光学特性,反映现有技术不能反映的珍珠质层结构分布特性。

## 2 实验装置和原理

光学相干层析的检测信号是散射介质内部的背向单次散射光,由此反映的散射系数和折射率的变化可用于反映物质内部结构。珍珠质的若干品质因素(珠层厚度、光泽、形状)等本身就是一种光学现象和效果的反映。珍珠质是由多层文石晶体同心层叠而成,在近红外光作用下比生物组织表现出更明显的背向反射散射特性。因此相比生物组织更容易检测和校准,利用光学相干层析获取珍珠质的高清晰结构成像,可建立珍珠质光学特性和其生物形成过程与质量评估间的联系。

实验用的珍珠质光学相干层析成像装置原理结构如图 1 所示,光路基于迈克尔逊干涉方式,超辐射发光二极管光源(SLD)发出的弱相干光分束后分别进入到参考光程扫描模块和样品组织。参考光束  $E_R$  被参考镜面反射,而测量光束  $E_S$  进入待测量的生物组织或材料后有一定的穿透深度,同时组织自其表面开始的不同深度各个层面对此光束都有一定的背向反射。这样,两束来自参考镜和生物组织样品的背向反射光(下称参考光和样品光)将会在分束

器相遇并叠加而形成干涉仪的输出。

假设进入干涉仪的光振幅为  $A$ ,经过参考光程扫描光路与经过样品的两路光的叠加会在探测器处发生干涉,探测到的光强为

$$I_0 = \frac{1}{4}A^2 |E_R|^2 + \frac{1}{4}A^2 |E_S|^2 + \frac{1}{2}E_R E_S \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda}\Delta l\right), \quad (1)$$

其中  $\Delta l$  为参考光路与样品光路之间的光程差。光学相干层析采用宽带光源,光源弱相干性导致干涉信号仅能出现在参考光程与样品光程匹配时,由此伴随参考镜的深度扫描,探测光强中包含干涉信息的最后一项具有选择性仅反映与参考光程相匹配的、来自珍珠质特定深度层面的背向散射信号,在参考光路的一个扫描周期内也就实现了对珍珠质深度信息的一维层析,进而对样品表面进行横向扫描就可以得到珍珠质的二维深度分辨图像信息。

通过选择适当的入射角,使光源的中心波长的衍射光线刚好与光栅法线平行,且光栅平面位于透镜焦平面内。光栅和振镜分别位于傅里叶变换透镜的两侧焦面上,振镜的振动轴与透镜光轴垂距为  $x_0$ ,透镜焦距为  $f$ ,振镜的最大转角为  $\varphi$ ,中心波长为  $\lambda_0$  的衍射光沿光栅法线方向, $p$  为光栅周期,整个光路中因振镜转动产生的相位变化为<sup>[1]</sup>

$$\Phi(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda}x_0\varphi + \frac{8\pi f\varphi \cdot (\lambda - \lambda_0)}{p\cos\theta_0\lambda}, \quad (2)$$

因此引入的群光程差  $\Delta l_g$  和相位光程差  $\Delta l_\phi$  分别为

$$\Delta l_g = 4x_0\varphi - \frac{4f\varphi\lambda_0}{p}, \quad (3)$$

$$\Delta l_\phi = 4x_0\varphi. \quad (4)$$

当参考臂中延迟线扫描改变光程时,探测器响应为关于延迟线扫描速度的干涉自相关时域信号,该信号的载频是为关于延迟线相位延迟扫描速度的自相关载频,载频的中心频率为

$$f_0 = \frac{d\Delta l_\phi/dt}{\lambda_0} = \frac{4x_0}{\lambda_0} \frac{d\varphi}{dt}. \quad (5)$$

由于参考光路扫描移动造成的中心波长的多普勒频移与载频对应,且等于外差探测的拍频,探测相应信号的频率带宽可以写为

$$\Delta f = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \frac{d\Delta l_g}{dt} = \frac{4\Delta\lambda}{\lambda_0^2} \left(x_0 - \frac{f\lambda_0}{p}\right) \frac{d\varphi}{dt}, \quad (6)$$

信号解调部分运用差分放大、带通滤波处理将多普勒频移项解调出来即得到测试样品的背向反射散射光特性。

由于光学弱相干干涉信号的强度随着光程差

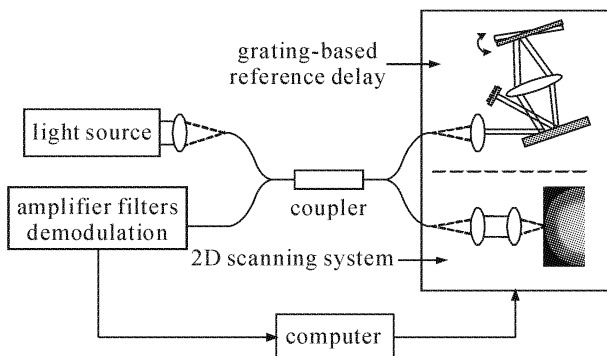


图 1 珍珠质检测用的光学相干层析系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of OCT nacre imaging system

$\Delta l$  的变化也呈现一个高斯线形的分布,其半峰全宽即光学相干层析深度探测的分辨率  $\Delta z_R$  为

$$\Delta z_R = \frac{2 \ln 2}{\pi} \left( \frac{\lambda_0^2}{\Delta \lambda_0} \right). \quad (7)$$

实验中珍珠质检测时的纵向分辨率受光源特性和光路色散的综合作用,实际值为  $15 \mu\text{m}$ 。

珍珠质检测时光学相干层析系统的横向分辨率  $\Delta x_R$  取决于样品探测部分的光学聚焦特性

$$\Delta x_R \approx \frac{4 \lambda_0}{\pi} \frac{f}{d}, \quad (8)$$

式中  $d$  为聚焦透镜上的光斑直径。光斑在样品上聚焦得越小则横向分辨率越高,而相应的焦深也会越小,实际测量中横向分辨率的选择需要综合考虑纵向焦深的因素。实验中的实际横向分辨率为  $40 \mu\text{m}$ 。

如图 2 所示,珍珠的剖面结构从内到外可分平行层板状结构的贝壳珠核层、珠核与珍珠质之间由角质蛋白组成的疏松层(很薄)、以及由晶体微层和壳角蛋白交替年轮状同心分布的珍珠质层。珍珠的光泽实际是珍珠质从表面到疏松层由光的反射散射综合作用形成的。检测的背向光学信号来源于两个方面,一是由于珍珠质中晶体结晶度和有机质含量差异造成的背向光散射;二是珍珠质中晶体微层和蛋白质折射率交替改变引起的界面光反射叠加,即信号强度  $I_R$  由被测珍珠质的背向反射特性  $R_{\text{ref}}$  和背向散射特性  $R_{\text{scatt}}$  共同决定

$$I_R \propto R_{\text{ref}} R_{\text{scatt}}. \quad (9)$$

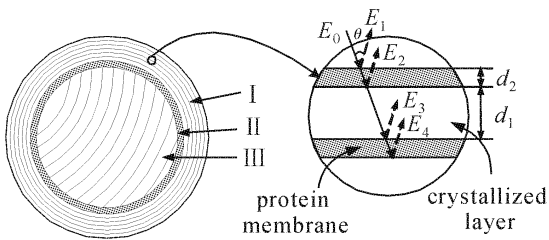


图 2 珍珠内部结构示意图

I: 珍珠质层; II: 贝壳珠核层; III: 角质蛋白疏松层

Fig. 2 Typical internal structure of pearl

I: nacreous layer; II: shell nucleus; III: keratin protein

背向散射由晶体的背向衰减率  $u_{n1}$  和有机质的背向衰减率  $u_{n2}$  来描述

$$R_{\text{scatt}} = \exp\left(-2 \frac{u_{n1} l_1 + u_{n2} l_2}{l_1 + l_2} L_C\right), \quad (10)$$

假设光学相干层析系统分辨率  $L_C$  范围内晶体微层均匀等厚为  $l_1$ , 有机质层均匀等厚为  $l_2$ , 界面光反射部分用多层介质模型模拟其中的光传输,用光学

相干层析进行样品检测时入射和接收的都是小角度的光信号。为计算方便,仅考虑正入射出射情况。如图 2 圆框部分,对于某一界面的入射光束振幅  $E_0$ ,不同界面返回的光束振幅分别满足

$$\begin{aligned} E_1 &= RE_0, \\ E_2 &= -T^2 RE_0, \\ E_3 &= T^4 RE_0 e^{i\delta}, \\ E_4 &= -T^6 RE_0 e^{i\delta}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中  $R$  为晶体和有机质界面的反射振幅比,  $T$  为透射振幅比,在正入射近似下满足

$$\begin{aligned} R &= \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \\ T^2 &= 1 - R^2 = \frac{4n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2}, \end{aligned} \quad (12)$$

$\delta$  为由光程差引起的相位差

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 l_1 + n_2 l_2), \quad (13)$$

在分辨率深度内总的反射振幅叠加为

$$R_N = \frac{R(1 - T^2)(1 - T^{4N} e^{iN\delta})}{1 - T^4 e^{i\delta}}, \quad (14)$$

$$N = \frac{L_C}{l_1 + l_2}, \quad (15)$$

由此可以推导出晶体和有机质交替的多层界面造成的总光强背向反射率

$$R_{\text{ref}} = \frac{(1 - T^2)^4 [1 - 2\cos(N\delta) T^{4N} + T^{8N}]}{1 - 2\cos\delta T^4 + T^8}. \quad (16)$$

以上推导可以看出光学相干层析检测信号与珍珠质结构参数的关系,其中晶体微层的透光性(参数  $n_1$  和  $u_{n1}$ )、排列方式和密度(参数  $l_1$  和  $N$ )、壳角蛋白的组成(参数  $l_2$  和  $u_{n2}$ )会分别影响珍珠质中光传输的反射散射现象。例如结晶度高则成像微层的透光性好,晶体排列有序紧密则入射光可产生集中的背向反射,壳角蛋白含量愈高会使得珍珠质微层散射愈强。珍珠质的结构分布参数差异是在珍珠质形成过程中由于季节、水温、盐分等环境因素和植核、消毒等人为条件造成的,因此寻找珍珠质结构信息和光学特性之间的相关性可直接或间接应用于分析和评估珍珠质的形成过程和质量因素。

图像处理中采用了相干增强各向异性扩散算法<sup>[10]</sup>,算法中引入了二阶导数项以控制相干方向的扩散强度。根据图像预处理校正对照结果调整参数,在保证图像不失真前提下提高信噪比,增强图像的分层特征,便于进行图像数据中分层结构的定量测量。

为满足珍珠质检测中珠层识别测量的需要,实验中搭建的光学相干层析系统具有以下特点:1)珍珠质的探测深度范围在 1~3 mm,而珍珠质在近红外光区没有明显的吸收特性。为此选用了能同时保证穿透深度和无损检测的发光二极管光源宽带光源(中心波长1310 nm,功率8 mW,谱宽50 nm);2)实验装置中参考光程扫描采用了基于衍射光栅的傅里叶域光学快速扫描延迟线技术,这种方式既可以满足快速成像(1 frame/s)的需要,又可以通过光路调节实现色散补偿,同时对偏振态不敏感;3)实验装置采用了光纤光学元件、光电模块分离和软件控制测量界面,使得成像系统整体具备便携性和易操作性。

### 3 实验结果和讨论

利用针对珍珠质检测的光学相干层析系统,对国家珠宝玉石质量监督检验中心提供的百余颗珍珠样品进行了二维成像。研究表明,光学相干层析技术通过高清晰分辨珠层内部光学特性,可反映现有技术不能反映的珍珠质结构特性。

图 3 是珍珠内部典型结构的光学相干层析图像。正常的珍珠内部结构主要包括珍珠质层和贝壳珠核层,二者由于光学特性差异和有序分布方向的不同,在光学相干层析微观图像上有着显著区分。珍珠质层(见图 3 中 I)的主要成分为同心年轮状规则生长的文石晶体,对近红外光具有良好的穿透特性和较强的背向小角度散射信号;而贝壳层(见图 3 中 II)则为平行层状特性,背向反射散射信号较弱。光学相干层析深度方向的层析图像可清晰分辨珍珠

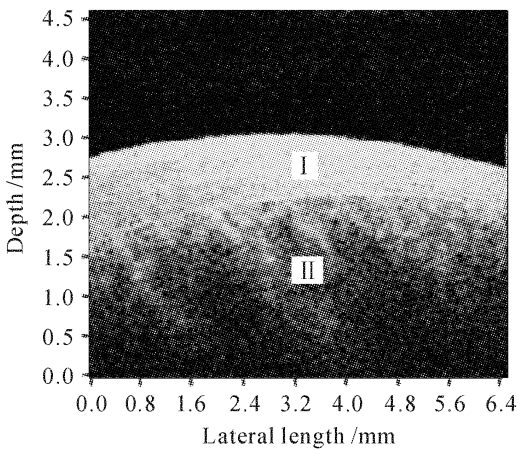


图 3 珍珠质典型光学相干层析图像  
I:珍珠质层;II:贝壳珠核层  
Fig.3 Typical OCT images of nacre  
I: nacreous layer; II: shell nucleus

质层和珠核层之间的界限,而珍珠质成分相对稳定的折射率(1.53),以及光学相干层析检测方法的高深度分辨率,可实现现有检测技术都不能解决的珍珠质层的准确测量,目前可实现的检测范围为0.06~3 mm。图 4 是利用剖面显微方法作为光学相干层析方法测量的参考标定,将测定结果与光学相干层析珍珠质层测量的对照结果。横坐标表示剖面显微标定的被测珍珠质厚度,纵坐标表示每个对照样品运用光学相干层析检测方法的测量结果。可以看出光学相干层析测试结果(图中圆点)与显微标尺测量结果(图中直线)吻合良好,平均误差为在 20 μm 以内。同时对照结果包括了不同级别、不同色彩和不同品种的珍珠样品,可验证光学相干层析技术广泛适用于各类珍珠质检测。

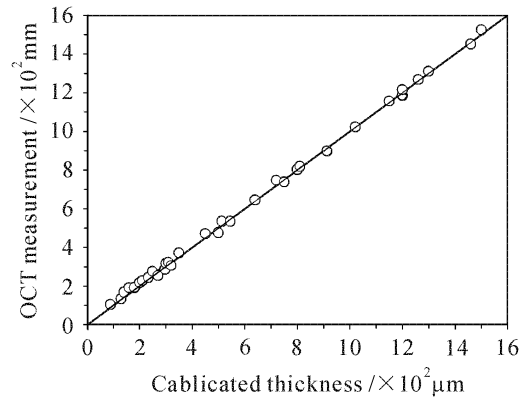


图 4 珍珠质层光学相干层析测量相对剖面显微参考的误差分布

Fig.4 Nacre thickness measurement with OCT versus calibration by section inspection

图 5~图 7 是反映珍珠质内部不同结构异常的光学相干层析图像。图 5(a)中珍珠在传统观测中仅可发现其具有光泽缺陷(图中箭头所示),通过光学相干层析图像(图 5(b))可清晰观察到珠核交界处有机质局部堆积造成珍珠质生长不均匀现象,从而明确显示该缺陷是由于插核处理不当造成的。图 6(a)和图 7(a)均为珍珠质剖面照片,图 6(a)中珠核贝壳层和珍珠质晶体层之间的有机质疏松层反常增厚现象(见图中箭头),可在图 6(b)的光学相干层析图像中清晰显示出来。图 7(a)中珍珠质生长层中病变造成的疏松缺陷(见图中箭头)也可在图 7(b)的光学相干层析图像中明确标明位置。这些实验结果都验证了光学相干层析微观图像可以反映目前仅能通过剖面显微的破坏性方法获得的珍珠质内部的瑕疵病变信息,从而为珍珠质的生长状态提供其他检测技术所不能提供的无损实时综合评估信息。

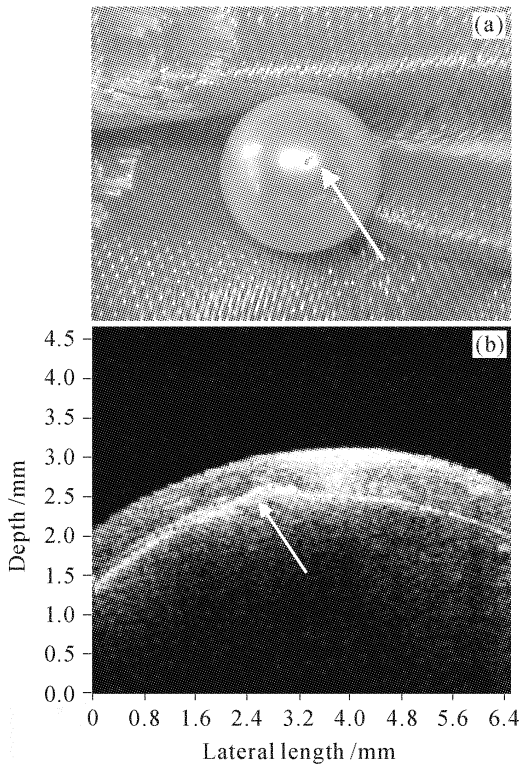


图 5 具有光泽缺陷的珍珠表面照片(a)和珍珠质光学相干层析图像(b)

Fig. 5 Photo (a) and OCT image (b) indicating the stain due to bad embedded nucleus

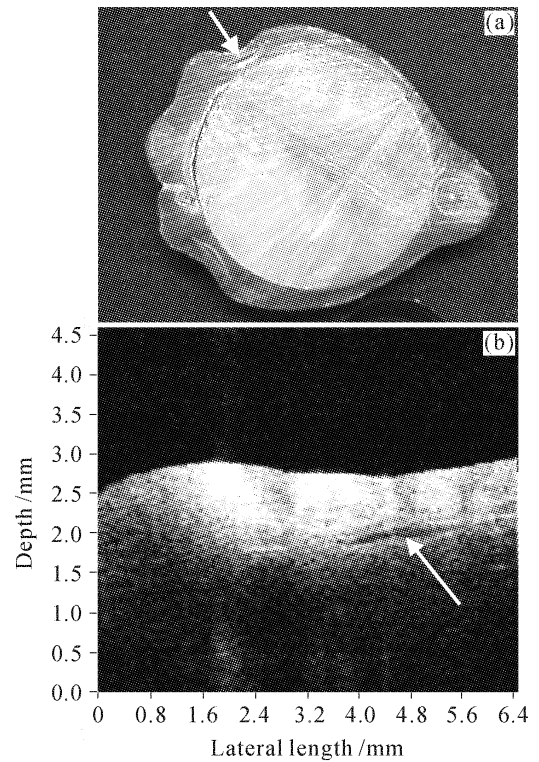


图 7 病变疏松部位的珍珠质剖面照片(a)和光学相干层析图像(b)

Fig. 7 Section photo (a) and OCT image (b) of a sample with a pathological change within nacre

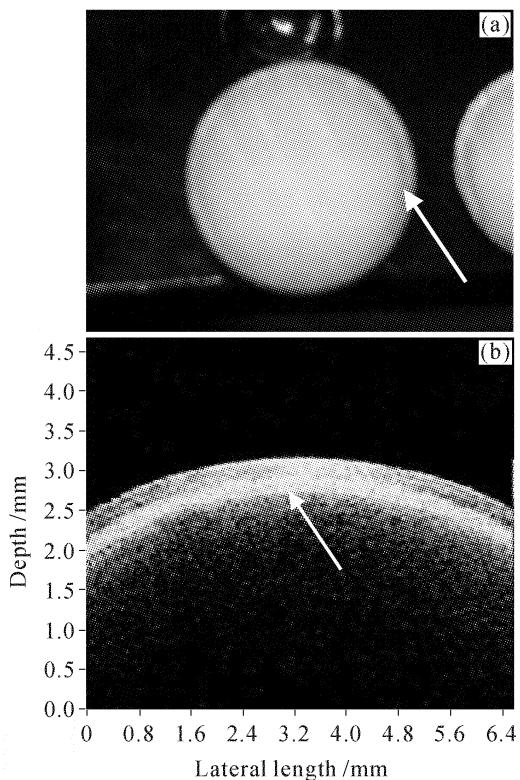


图 6 疏松层有机质反常增厚的珍珠质剖面照片(a)和光学相干层析图像(b)

Fig. 6 Section photo (a) and OCT image (b) of a sample with an abnormal tectorium

## 4 结 论

光学相干层析珍珠质检测方法在研究中已经显示出其在实用便携、快速无损成像、微观结构分辨、珠层测量精度上的优势,目前存在的研究难点包括:1) 相比于 X 射线检测,光学相干层析珍珠质检测的一次成像区域较小,需要通过设计二维旋转探头完成对样品的横向面扫描和多次成像综合分析扩大成像区域和检测完整度;2) 对某些特殊珍珠样品存在图像分层不够突出明晰,仅根据光学相干层析成像数据的直接测量精度不够,需要通过进一步的数据处理和特征提取来保证测量可靠性;3) 珍珠质晶体层内某些细微特征分辨通过时域光学相干层析图像难以表征,正在研究通过偏振光学相干层析增加各向异性表征来实现细微结构的分辨。

## 参 考 文 献

- 1 Brett E. Bouma, Guillermo J. Tearney. Handbook of Optical Coherence Tomography [M]. New York: Marcel Dekker, Inc. 2002
- 2 Yu Xiaofeng, Ding Zhihua, Chen Yuheng *et al.*. Functional expansion of optical coherence tomography for Doppler imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1717~1720  
俞晓峰,丁志华,陈宇恒 等. 光学相干层析多普勒成像功能拓展研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11):1717~1720

3 E. A. Swanson, J. A. Izatt, M. R. Hee *et al.*. In vivo retinal imaging by optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(21):1864~1866

4 F. I. Feldchtein, G. V. Gelikonov, V. M. Gelikonov *et al.*. In vivo OCT imaging of hard and soft tissue of the oral cavity [J]. *Opt. Express*, 1998, **3**(6):239~250

5 P. R. Herz, Y. Chen, A. D. Aguirre *et al.*. Micromotor endoscope catheter for in vivo, ultrahigh-resolution optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(19):2261~2263

6 Stephen A. Boppart, Mark E. Brezinski, Brett E. Bouma *et al.*. Investigation of developing embryonic morphology using optical coherence tomography [J]. *Developmental Biology*, 1996, **177**:54~63

7 Song Guiju, Wang Xiangchao, 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

8 Shao Yonghong, He Yonghong, Ma Hui *et al.*. Research of a novel method to inspecting engineering polymer [J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(9):878~885  
邵永红,何永红,马辉等.检测工程聚合物材料新方法研究[J].激光与红外, 2006, **36**(9):878~885

9 Zhang Gangsheng, Xie Xiande, Qi Shaoqi *et al.*. X-ray to diffraction study of nacre in shell of *Hyriopsis cumingii* II (LEA) [J]. *J. Mineralogy and Petrology*, 2002, **12**(4):8~11  
张刚生,谢先德,戚绍棋等.贝壳珍珠层的X射线衍射研究[J].矿物岩石, 2002, **12**(4):8~11

10 Zhu Yi, He Yonghong, Li Peng *et al.*. Enhancement and quantitative measurement of layer structure in optical coherence tomographic images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3):515~520  
朱毅,何永红,李鹏等.光学相干层析图像层状结构的增强与定量测量[J].光学学报, 2007, **27**(3):515~520



· 广告 ·



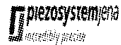
# 天津微纳制造技术有限公司

Tianjin MicroNano Manufacturing Tech Co., Ltd.

天津微纳制造技术有限公司, 2005年11月成立于天津经济技术开发区, 公司将先进制造技术中前沿的光学非球面与自由曲面、脆性材料复杂曲面、超精密及微纳元器件的制造技术的研究与开发作为发展方向, 以生产光学仪器、生物医疗仪器、日用及计算机外围设备中微小精密关键器件为发展目标。同时公司将引进微纳领域的海外先进仪器设备作为主要业务之一, 目前是德国SIOS Messtechnik GmbH (SIOS) 和Piezosystem Jena GmbH (PSJ) 公司的中国总代理, 为国内引进了SIOS公司的纳米级精度激光干涉仪和PSJ公司的纳米级压电致动与定位系统。这两类产品为微纳技术领域提供了纳米级测量与驱动的手段。



- 应用: 1.超高精度长度、角度测量;  
2.构建多维工作台, 应用于显微、定位、坐标测量系统及精密机床装备;  
3.振动模态分析。
- 特点: 1.纳米级精度激光干涉仪;  
2.分辨率优于0.01 nm;  
3.干涉头与电器箱分离;  
4.采用氦-氖稳频激光光源。



- 应用: 1.微电子、分子生物领域显微定位系统;  
2.超精密加工领域微纳定位系统;  
3.激光加工领域光束方向精密调节系统。
- 特点: 1.压电陶瓷多维微纳致动系统;  
2.行程高达1500 um;  
3.分辨率优于0.01 nm;  
4.具有高谐振频率、高稳定性、高负载能力。

- 应用: 1.微电子、分子生物领域显微定位系统;  
2.超精密加工领域微纳定位系统;  
3.激光加工领域光束方向精密调节系统。

地址: 天津经济技术开发区第四大街  
80号A2座三层 (300457)  
电话: 022-59813868  
传真: 022-59813870  
E-mail: chenjinping@tju.edu.cn

