

文章编号: 1001-3806(2014)03-0372-03

白光照明谱域光学相干层析成像研究

陈玉平

(西安航空职业技术学院 航空制造工程学院, 西安 710089)

摘要: 为了降低成本,同时改善光学相干层析成像技术的图像获取率和轴向分辨率,采用白光源照明的谱域光学相干层析成像的方法,进行了理论分析和实验验证,通过对薄膜等样品的测量,取得了一些基本的数据和图像。结果表明,样品内部结构的图像清晰可见,该系统切实可行,并能够实现工程和生物材料内部结构的实时 3 维图像重构。

关键词: 测量与计量;白光;光学相干层析成像;光谱干涉法

中图分类号: TH744.3;O439 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.03.019

Research of spectral-domain optical coherence tomography under white light irradiation

CHEN Yuping

(Department of Aviation Manufacturing Engineering, Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to improve image acquisition rate and axial resolution of optical coherence tomography at lower cost, spectral-domain optical coherence tomography (SD-OCT) was studied both theoretically and experimentally. Some basic data and images were obtained based on the measurement of film workpieces. The results show that the images of their internal structure are visible clearly and SD-OCT under white light illumination is feasible and enables to realize the real-time 3-D imaging reconstructions of internal structure of engineering and biological materials.

Key words: measurement and metrology; white light; optical coherence tomography; spectral interferometry

引 言

光学相干层析成像技术(optical coherence tomography, OCT)是一种非接触性和非破坏性的高灵敏度、高分辨率的检测技术,已在许多无损检测领域得到应用,特别是生物医学和材料科学方面^[1-3]。当前主流的 OCT 技术是所谓的时域光学相干层析成像技术(time-domain optical coherence tomography, TD-OCT)系统,它是通过参考臂进行来回的机械扫描逐点采集样品臂中与参考臂等光程的样品干涉信号来获得轴向深度信息的,由于有严重的散粒噪声等问题,它在图像获取速度等方面有明显不足。

谱域光学相干层析成像技术(spectral-domain

optical coherence tomography, SD-OCT)是当前研究的热点,它不需要深度扫描而同步获得深度结构并改善了信噪比,其主要优势是快的图像获取速度^[4]。在国内谱域光学相干层析成像也得到了广泛的研究,例如 WANG 等人研究了谱域 OCT 中基于解卷积方法的像质优化^[5],ZHANG 等人研究了它的量化技术并应用于生物组织的定量分析中^[6]。

OCT 的光源一般是部分相干宽带光源,如超辐射发光二极管(super luminescent diode, SLD)和飞秒激光器,它们具有低的时间相干性和高的空间相干性,通常条件,SLD 可获得的系统轴向分辨率是 $15\mu\text{m} \sim 20\mu\text{m}$ 。为了在低成本和结构紧凑的条件下提高 OCT 系统分辨率,一些研究者尝试在 TD-OCT 中使用白光光源,例如 FERCHER 等人用钨卤灯和氙弧灯等在 TD-OCT 系统中使用白光作为系统照明光源^[7],而 OHMI 等人则在一个光纤 TD-OCT 中应用白光技术是达到了 $1\mu\text{m}$ 的分辨率^[8]。

为了同时提高图像获取率和系统轴向分辨率并降低成本,作者设计和搭建了一套基于白光(钨卤

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划资助项目(12JK0672)

作者简介:陈玉平(1962-),男,讲师,博士,主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: ypc-0828@163.com

收稿日期:2013-07-26;收到修改稿日期:2013-08-21

灯)的 SD-OCT 系统,并进行了相应的原理性实验以验证该系统的可行性。

1 白光谱域光学相干层析成像系统的设计

最早进行 SD-OCT 研究的是 FERCHER 等人,他根据波恩光学中的散射光场理论推导出一个结论,即样品散射势函数的傅里叶变换等于后向散射光的复振幅^[9],其等式为:

$$\begin{cases} E(P, k) = C \int_0^T F(z) \exp(-ikz) dz \\ F(z) = \frac{1}{4\pi} k^2 [n^2(z) - 1] \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E(P, k)$ 是被测点散射光复振幅; k 是波数; P 是探测点; $\exp(-ikz)$ 在此处表示光的相位; C 是比例常数; T 是取值范围(一般为无穷大); z 是被测样品到探测点的距离即轴向深度; $n(z)$ 则是样品的折射率函数; $F(z)$ 就是反映样品结构的散射势函数。

从 FERCHER 等人开始,人们设计了很多种 SD-OCT 系统。根据本实验室条件等,作者选择了光谱干涉形态的 SD-OCT 系统。它一般由宽带部分相干光源、光纤迈克尔逊干涉仪、光谱仪、参考镜和横向扫描装置等构成^[10-11]。

为降低成本及提高轴向分辨率,并考虑白光的性能和光路的灵活性,作者尝试用白光(钨卤灯)代替部分相干光源来设计和搭建一套光纤型的谱域光学相干层析成像实验系统,如图 1 所示。

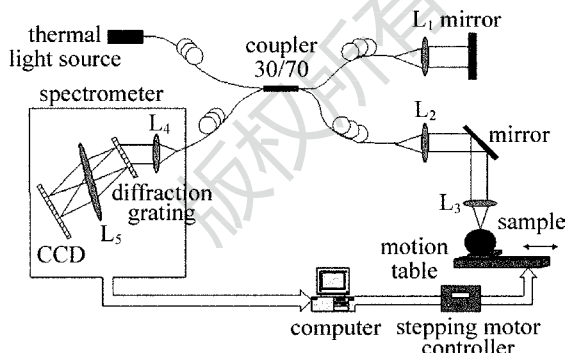


Fig. 1 Schematic of SD-OCT under white light illumination

在光纤迈克尔逊干涉仪(光纤耦合器)的输入端耦合进白光源(白光的波长范围是 400nm ~ 850nm,中心波长是 670nm),此时,光束在耦合器中被分成两路,一路经光纤准直器(自聚焦透镜)射向参考镜,被反射后原路返回;另一路则指向被测样品,从样品反射或散射的光部分被耦合进光纤输出端并按原路返回。两束光在耦合器重新会合后产生干涉,其中一部分干涉光射向与光谱仪耦合的光纤

迈克尔逊干涉仪的输出端;干涉信号输入光谱仪后,由其内部的衍射光栅展成光谱干涉信号并由电荷耦合元件(charge-coupled device, CCD)采样后输出到计算机上。衍射光栅是由美国海洋公司提供的光谱仪内置的反射式衍射光栅,由玻璃基底镀金属薄膜并刻划而成,600line/mm,波长范围 200nm ~ 850nm。取得的数据需经一系列的数据处理程序如三次样条重采样、傅里叶逆变换、非高斯光源的修正、图像优化等,才能得到样品的散射势函数,从而获得样品的 1 维深度信息,再经横向扫描即可得到样品的层析图像。这是因为一般用于 OCT 的部分相干宽带光源其光谱密度曲线都是近似理想的高斯曲线,而白光的光谱密度曲线却不是理想的高斯曲线,因此测量的结果就会有误差,这就需要修正补偿。具体的方法是用最小二乘法拟合光源的光谱,再与理想的高斯光源的谱密度相比,获得不同波长的修正系数并保存。当获得实际测量数据时乘以该系数即可。另外由前述 SD-OCT 原理,重构图像需进行傅里叶逆变换。它需以波数为自变量并等间隔分布,而光谱仪所获的数据是以波长为自变量的,它们是倒数的关系,这就需要进行重采样,本文中采用了三次样条插值算法实现。此外由于色散、成像误差等等,还需对重构的图像进行优化,结果就使得图像比较清晰。

2 实验和讨论

首先测量光源的功率谱密度(见图 2),然后根据 Wiener-Khinchine 定理,确定了光源的相干长度,测量过程就是用一个高反射镜取代样品得到系统的点扩散函数即轴向分辨率,如图 3 所示。

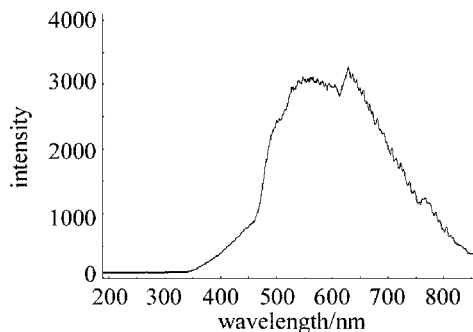


Fig. 2 Spectrum-density diagram of the tungsten halogen lamp

随后把 1 个镀有薄膜的样品固定在步进电机移动平台上,并使其与样品臂对准,在光路准直后,即可由光谱仪采样。实验结果如图 4 所示。

由实验结果图可知,薄膜的形态清晰可见,从

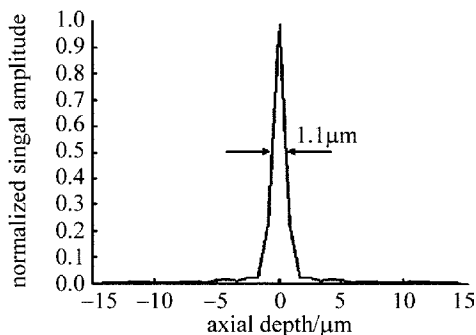


Fig. 3 Point spread function of the SD-OCT system

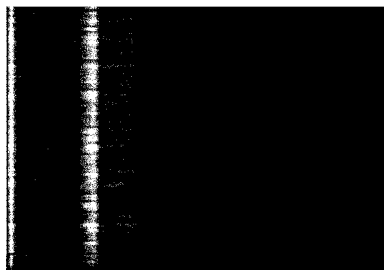


Fig. 4 Chromatography grayscale of a coated reflector

而在原理上基本验证了此方案的可行性,在后续的研究中还将进一步得到验证^[12]。用白光(钨卤灯)代替部分相干光作为照明光源,不仅降低了成本,还提高了系统轴向分辨率并使结构紧凑。为使光路灵活、适用范围更广,作者采用了光纤迈克尔逊干涉仪作为主要干涉装置。为此,设计和调整了整个光路系统以满足白光光源及光纤干涉仪。在后续的数据处理过程中,采用了三次样条的重采样技术和非高斯光源的修正算法及改善色散等的图像优化技术,以提高重构图像的质量。

3 结 论

为降低成本、提高系统轴向分辨率和图像获取率并使结构紧凑,本文中设计和搭建了一套用白光照明的谱域光学相干层析成像系统,并进行了实验

验证。结果表明,该系统是可行的,完全能胜任实时重构图像的测量任务。

参 考 文 献

- [1] SHAO Y H, HE Y H, MA H, *et al.* Study on mildew infecting skin of naked mouse by optical coherence tomography [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2006, 15(5):536-539 (in Chinese).
- [2] ZHU Y K, ZHAO H, WANG Z, *et al.* Rotary scanning method applied to optical coherence tomography system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2004, 38(9):913-915 (in Chinese).
- [3] WANG S X, HE Y H, ZENG N, *et al.* Tooth structure imaging with optical coherence tomography [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2007, 16(3):355-358 (in Chinese).
- [4] LEITGEB R A, DREXLER W, UNTERHUBER A, *et al.* Ultra-high resolution Fourier domain optical coherence tomography [J]. *Optics Express*, 2004, 12(10):2156-2165.
- [5] WANG K, ZENG Y, DING Zh H, *et al.* Imaging quality enhancement by deconvolution in spectral domain optical coherence tomography [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(4):2471-2778 (in Chinese).
- [6] ZHANG Q Q, WU X J, ZHU S W, *et al.* Quantitative spectral domain optical coherence tomography and its application to quantitative analysis of biological tissues [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6):1188-1193 (in Chinese).
- [7] FERCHER A F, HITZENBERGER C K, STICKER M, *et al.* A thermal light source technique for optical coherence tomography [J]. *Optics Communications*, 2000, 185(1):57-64.
- [8] OHMI M, HARUNA M. Ultra-high resolution optical coherence tomography (OCT) using a halogen lamp as the light source [J]. *Optical Review*, 2003, 10(5):478-481.
- [9] FERCHER A F, HITZENBERGER C K, KAMP G, *et al.* Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry [J]. *Optics Communications*, 1995, 117(1):43-48.
- [10] CHEN Y P, ZHAO H, WANG Zh. Investigation on spectral-domain optical coherence tomography using a tungsten halogen lamp as light source [J]. *Optical Review*, 2009, 16(1):26-29.
- [11] CHEN Y P, ZHAO H, YANG Q, *et al.* Experiment research on spectral-domain optical coherence tomography [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(7):815-817 (in Chinese).
- [12] QIN Y W. Film thickness measurement based on optical coherence tomography [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5):662-664 (in Chinese).