

热光源谱域光学相干层析成像系统

秦玉伟^{1,2}, 赵宏¹, 庄仲琴¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 渭南师范学院物理与电子工程系, 714000, 陕西渭南)

摘要: 根据热光源具有极短的相干长度、能够提高系统的轴向分辨率的特点,设计了一种使用热光源的谱域光学相干层析成像系统. 利用高斯函数计算得到的理想光谱密度与光谱仪测量的实际光谱密度之间的比值,得出了不同波长对应的光源光谱密度的校正系数,将校正系数与所测干涉光谱值相乘,得到了校正后的理想干涉光谱值. 实验结果表明:高斯校正后,样品的一维散射势得到锐化,散射势峰值变大,系统的轴向分辨率变高;高斯校正后使二维层析图像的质量得到了提高,样品的薄膜边界变得清晰. 因此,系统具有分辨率高、成像速度快、测量精度高和对样品无损伤的特点,在薄膜厚度的无损测量方面有着广泛的应用前景.

关键词: 光学相干层析成像;热光源;高斯校正;散射势

中图分类号: TH744. 3;O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)11-0068-04

Spectral-Domain Optical Coherence Tomography System with Thermal Light Source

QIN Yuwei^{1,2}, ZHAO Hong¹, ZHUANG Zhongqin¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Department of Physics and Electronic Engineering, Weinan Teachers University, Weinan, Shanxi 714000, China)

Abstract: A high resolution spectral-domain optical coherence tomography system with a thermal light source was introduced. The ratio of the ideal spectral density calculated with Gaussian function to the actual spectral density measured by spectrometer was used to obtain the calibration coefficient of different wavelength. The ideal interference spectrum after calibration was obtained once multiplying the coefficient by the measured interference spectrum. The experiment result shows that the one-dimensional scattering potential gets sharper, the peaks are heightened and the axial resolution of the system is improved by Gaussian calibration. In addition, the image quality is improved and the film boundary of the sample becomes clear. Thus, broadband thermal light source is suitable for high-resolution spectral-domain optical coherence tomography system.

Keywords: optical coherence tomography; thermal light source; Gaussian calibration; scattering potential

光学相干层析成像技术(OCT)是一种利用光学低相干干涉测量原理的成像技术,它能够对样品内部的微观结构进行无损伤、非侵入、无接触的横截面层析成像,分辨率可以达到微米量级^[1]. 由于 OCT

具有较高的分辨率,因此该技术已经引起了广泛关注,并被成功地应用于生物组织活体检验和半导体材料检测等领域^[1-4]. 按成像原理不同,OCT 可以分为时域 OCT(Time Domain OCT,简称 TD-OCT)

收稿日期: 2011-03-01. 作者简介: 秦玉伟(1979—),男,博士生;赵宏(联系人),男,教授,博士生导师. 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50975228); 陕西省教育厅资助项目(08JK282).

网络出版时间: 2011-09-09

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20110909.1654.001.html>

和傅里叶域 OCT(Fourier Domain OCT,简称 FD-OCT) 两类^[4]. TD-OCT 系统需要轴向的机械扫描装置,通过移动反射镜或样品来改变参考臂和样品臂之间的光程差,以获得样品的深度信息,因而限制了系统的成像速度,并且分辨率和信噪比较低^[5-6]. FD-OCT 采用频谱域干涉技术,无需轴向机械扫描,样品探测深度范围内的所有背向散射光同时参与干涉光谱成像,这种深度探测的并行性,解决了高速成像与分辨单元信号采集时间下降之间的矛盾,且具有更高的分辨率和信噪比^[5-6].

FD-OCT 可以分为谱域 OCT(Spectral Domain OCT,简称 SD-OCT)和扫频源 OCT(Swept Source OCT,简称 SS-OCT)^[4]. SD-OCT 的最大优势在于深度信息的获得不需要通过轴向机械扫描实现,只需通过光谱仪一次采集含样品深度信息的全部干涉光谱,对波数空间分布的干涉图谱进行傅里叶反变换,并进行图像重构就可得到样品深度信息的层析图像,因而大大提高了 SD-OCT 系统的成像速度和图像分辨率^[5-6]. 本文设计的 SD-OCT 系统使用热光源作为宽带低相干光源来提高系统的轴向分辨率,获取高分辨率的图像. 由于热光源具有极短的相干长度,能够提高系统的轴向分辨率,因此适合作为 SD-OCT 系统的光源.

1 SD-OCT 系统的原理

SD-OCT 系统的基本原理是散射势理论,即散射光强的傅里叶逆变换可得到含样品深度结构信息的散射势^[7]

$$F_S(z) \propto F_1\{E_S(P,k)\} \quad (1)$$

式中: $F_S(z)$ 为样品的散射势; z 为轴向深度; k 为波数; $E_S(P,k)$ 为样品在测量点 P 处的散射光强; F_1 为傅里叶逆变换. 对于迈克尔逊干涉仪,干涉光谱信号为

$$I(k) \propto S(k) \left(1 + 2 \int_0^\infty F_S(z) \cos(2knz) dz \right) \quad (2)$$

式中: $I(k)$ 为干涉光谱信号; $S(k)$ 为光源的光谱密度; n 为样品的平均折射率. 式(2)中的第 1 项为直流项,表现为直流噪声;第 2 项为互相关项. 样品的深度信息可由式(2)经傅里叶逆变换获得

$$F_1\{I_S(k)\} \propto F_1[S(k)] \otimes [F_S(z) + F_S^*(-z) + \delta(z)] \quad (3)$$

利用 5 步相移法^[4]去除式(3)中的第 2 项和第 3 项,即直流噪声和镜像,即可得到样品内部不同深度处的 $F_S(z)$.

轴向分辨率是 OCT 技术的一个重要指标,理想高斯光源 SD-OCT 系统的轴向分辨率为

$$\delta_z = l_c/2 = 2 \ln(2/\pi) (\lambda_0^2/\lambda_h) \quad (4)$$

式中: l_c 为相干长度; λ_0 为光源中心波长; λ_h 为光源半谱宽度. 可以看出,SD-OCT 系统的轴向分辨率除与光源中心波长、光谱的带宽有关外,还与光谱形状有关. 传统 SD-OCT 系统常用的宽带光源为超连续谱激光器和超辐射发光二极管(SLD),而热光源很少作为 SD-OCT 系统的光源使用. 在高分辨率 SD-OCT 系统中,由于卤钨灯具有极短的相干长度,因此可使系统获得较高分辨率的层析图像^[4,8-9].

2 实验系统设计

热光源的光纤 SD-OCT 系统主要由宽带光源、迈克尔逊干涉仪和光谱仪构成,结构^[9]如图 1 所示. 图 1 中,由 2×2 光纤耦合器(分束比为 50:50)和 2 个光纤准直器构成光纤迈克尔逊干涉仪,显微物镜将光束聚焦在样品上,不仅提高了 OCT 系统的横向分辨率,而且滤除了焦点外返回的杂散光,保证了系统的成像质量.

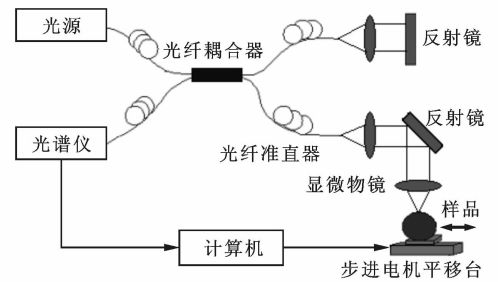


图 1 热光源的光纤 SD-OCT 系统图

由于样品的背向散射光强远低于参考光强,为了能够较好地发生干涉,因此需要增加样品臂的背向散射光强度. 但是,由于单层薄膜样品膜表面与基片上表面对入射光的背向散射均较强,导致干涉光谱的自相关项增大,引起图像模糊、信噪比降低,因此采用分束比为 50:50 的光纤耦合器. 系统所用的热光源为光谱形状近似高斯分布的卤钨灯,光源发出的入射光经过光纤耦合器后分成两部分,并分别进入样品臂和参考臂. 样品的背向散射光中含有样品的深度信息,可以看成是多种准单色光的叠加. 背向散射光返回后与来自参考臂的反射光经过耦合器发生干涉,干涉光谱信号由光谱仪接收,并送入计算机进行处理和图像重构. 步进电机驱动平移台对样品进行水平扫描,以获得二维层析图像.

3 实验结果和讨论

由于光源的光谱形状、中心波长和带宽决定了OCT系统的轴向分辨率,因此实验前先要测量卤钨灯的光谱(见图2)。

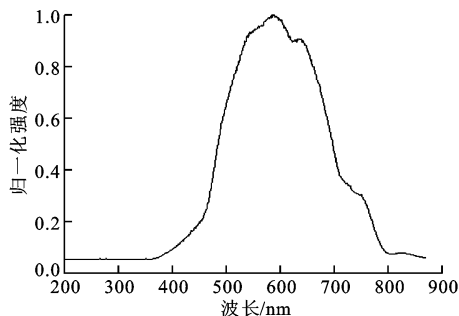


图2 卤钨灯光源光谱图

由图2可知,卤钨灯光源的中心波长和光谱半宽分别为650 nm和225 nm,根据轴向分辨率的表达式可知,系统的理论轴向分辨率为0.83 μm 。由光源光谱图中可以看出光谱并非理想高斯分布,这将会导致轴向响应函数的展宽和旁瓣产生,从而降低系统轴向分辨率和成像质量^[10],因此需要对卤钨灯光源的原始光谱进行高斯光谱校正^[4,11-12]。对于理想高斯分布的光源,光谱密度可以表示为

$$S_i(\lambda) = \frac{2(\ln 2/\pi)^{1/2}}{\lambda_h} \exp\{-4\ln 2[(\lambda - \lambda_0)/\lambda_h]^2\} \quad (5)$$

式中: λ 为光源的波长。设由光谱仪采集到的卤钨灯的实际光谱密度为 $S_r(\lambda)$,对应于相同的 λ ,可由式(5)计算得出理想情况下的光谱密度。根据实际光谱密度和理想光谱密度可以得到校正系数

$$c(\lambda) = S_i(\lambda)/S_r(\lambda) \quad (6)$$

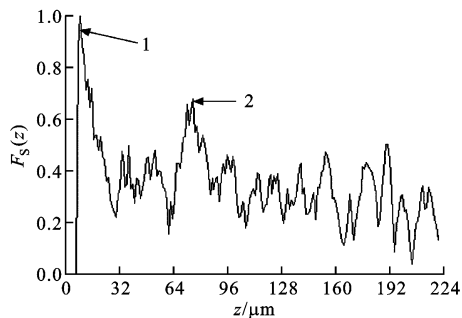
若光谱仪采集到的实际干涉光谱强度为 $I_r(\lambda)$,则可以得到高斯校正后的干涉光谱强度为

$$I_i(\lambda) = c(\lambda)I_r(\lambda) \quad (7)$$

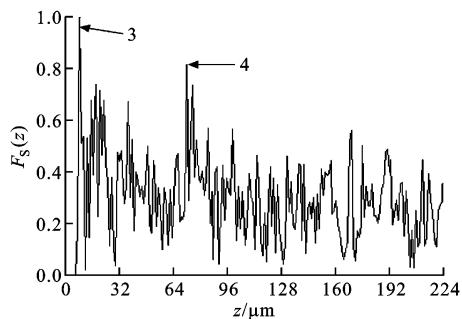
由于光谱仪采集到的干涉光谱信号为波长的函数,而深度方向的空间坐标与波数互为傅里叶变换对,因此在傅里叶逆变换前,需将波长空间分布的 $I_i(\lambda)$ 转化到波数空间分布的干涉光谱强度 $I_i(k)$ 。由于波长与波数之间的非线性关系,因此利用三次样条插值算法对干涉光谱进行波数空间的非线性校正,以确保系统轴向分辨率和图像质量^[10]。

实验样品是以玻璃为基片、厚度为60 μm 的聚苯乙烯单层薄膜,非线性校正、高斯光谱校正和图像重构等数据处理过程通过MATLAB编程软件实

现。高斯校正后,光源的中心波长和光谱半宽分别为670 nm和165 nm,因此系统实际轴向分辨率约为1.2 μm ,比理论轴向分辨率低,这是由波数的非线性校正误差引起的。图3a和图3b分别为高斯光谱校正前后样品轴向(深度方向)的一维散射势图,其中纵坐标为归一化散射势。从图3中可以看出,一维散射势具有4个明显的峰值,高斯光谱校正前后,散射势峰值的尖锐程度不同。在高斯光谱校正前,散射势峰值1、2较平坦,范围较宽,表明系统轴向分辨率较低,不利于边界定位。当高斯光谱校正后,散射势峰值得到锐化,系统轴向分辨率提高,与校正前的峰值2相比,峰值4变大,从而有利于边界定位和薄膜厚度的测量。由图3中散射势的2个主要峰值的位置可知,聚苯乙烯薄膜厚度约为67.8 μm 。



(a)高斯校正前

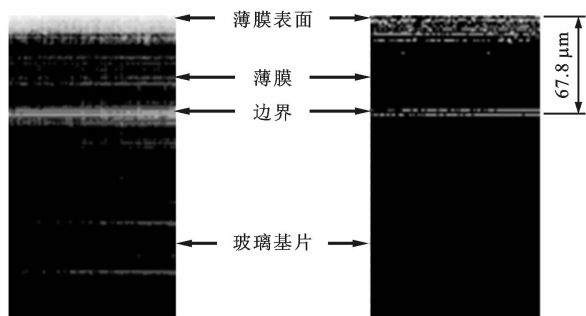


(b)高斯校正后

1、3:薄膜上表面散射势峰值;2、4:薄膜下表面散射势峰值

图3 样品的一维散射势峰值的变化趋势

图4为高斯光谱校正前、后样品的二维层析图像,图中亮线表示折射率突变的界面处,图像顶端的亮线代表聚苯乙烯薄膜上表面,中间亮线位置代表薄膜与玻璃基片的交界处。由于实验样品为单层薄膜结构,为获取高质量的二维层析图像并精确测量薄膜厚度,对样品的二维层析图像进行直方图均衡化处理,并设定灰度值阈值,这样既可以滤掉高频噪声,又可以提高图像的清晰度和对比度,获得精确薄膜厚度。由图4a可以看出,高斯校正前的图像模糊,



(a)高斯校正前

(b)高斯校正后

图 4 样品的二维层析图像

薄膜与基片之间的边界较宽,但经过高斯光谱校正、直方图均衡化和阈值设定等处理后,图像的质量和分辨率得到了提高,薄膜的边界清晰地显示出来,2条亮线之间的杂散干扰信号得到了去除,薄膜的厚度约为 $67.8 \mu\text{m}$ (见图 4b)。

4 结 论

本文设计了一种使用宽带热光源的光纤迈克尔逊干涉仪结构的 SD-OCT 系统,采用高斯校正算法对卤钨灯光源的原始光谱进行校正,提高了系统的轴向分辨率和图像质量。实验结果表明,经过高斯校正,样品的一维散射势峰值得到了锐化,系统的分辨率和层析图像质量都得到了提高,并且滤除掉了杂散信号的干扰,使薄膜与基片的边界更加清晰。本文系统具有较高的分辨率,测量过程中无需与样品发生接触,对样品无损伤,具有成像速度快、测量精度高的特点,因此在薄膜厚度的无损测量方面具有广泛的应用前景。

参考文献:

- [1] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, et al. Optical coherence tomography [J]. Science, 1991, 254 (5035):1178-1181.
- [2] CHANG S D, MAO Y X, CHANG G M, et al. Jade detection and analysis based on optical coherence tomography images [J]. Optical Engineering, 2010, 49 (6):1-6.
- [3] WIESAUER K, PIRCHER M, GOTZINGER E, et al. En-face scanning optical coherence tomography

with ultra-high resolution for material investigation [J]. Optics Express, 2005, 13(3): 1015-1024.

- [4] FERCHER A F, DREXLER W, HITZENBERGER C K, et al. Optical coherence tomography-principles and applications [J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(2003): 239-303.
- [5] LEITGEB R, HITZENBERGER C K, FERCHER A F. Performance of Fourier domain vs. time domain optical coherence tomography [J]. Optics Express, 2003,11(8): 889-894.
- [6] CHOMA M A, SARUNIC M V, YANG C H, et al. Sensitivity advantage of swept source and Fourier domain optical coherence tomography [J]. Optics Express, 2003,11(18):2183-2189.
- [7] FERCHER A F, HITZENBERGER C K, KAMP G, et al. Measurement of intraocular distances by back-scattering spectral interferometry [J]. Optics Communication, 1995,117:43-48.
- [8] FERCHER A F, HITZENBERGER C K, Sticker M, et al. A thermal light source technique for optical coherence tomography [J]. Optics Communication, 2000,185:57-64.
- [9] CHEN Y P, ZHAO H, WANG Z. Investigation on spectral-domain optical coherence tomography using a tungsten halogen lamp as light source [J]. Optical Review, 2009,16(1):26-29.
- [10] 陈玉平, 赵宏, 杨琦, 等. 谱域光学相干层析成像系统的实验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(7): 816-817.
- CHEN Yuping, ZHAO Hong, YANG Qi, et al. Experiment research on spectral-domain optical coherence tomography [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008,42(7):816-817.
- [11] 吴彤, 丁志华. 20 kHz 扫频光学相干层析系统 [J]. 中国激光, 2009,36(2):503-507.
- WU Tong, DING Zhihua. Development of 20 kHz swept source optical coherence tomography system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(2):503-507.
- [12] DUBERY S K, GYANENDRA S, TULSI A, et al. Full-field swept-source optical coherence tomography with Gaussian spectral shaping [J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 7155: 1-7.

(编辑 管咏梅)