

文章编号: 0258-7025(2007)06-0825-04

基于光谱光学相干层析技术的 膜系反射光谱测量

陈宇恒^{1,2,3}, 丁志华³, 孟 婕³

¹ 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006

² 江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006; ³ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 根据光谱光学相干层析(OCT)技术的原理,建立了光谱光学相干层析系统,并利用该系统测量了膜系的反射光谱。该方法通过傅里叶变换实现了光学相干层析信号光谱信息的提取,克服了传统反射测量方法测量结果不直观、受非测量面干扰等问题。测量所得的光谱反射率,与商业仪器的测量值吻合较好,均方差仅为0.0488。

关键词 薄膜;光谱测定;光谱光学相干层析;傅里叶变换;多层膜系;反射率

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

Reflectance Spectrum Measurement of Multilayer Film by Spectroscopic Optical Coherence Tomography

CHEN Yu-heng^{1,2,3}, DING Zhi-hua³, MENG Jie³

¹ Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

² Jiangsu Provincial Key Laboratory of Modern Optical Technology, Suzhou, Jiangsu 215006, China

³ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A spectroscopic optical coherence tomography (OCT) system based on the principle of spectroscopic OCT was built, and the reflectance spectrum of multilayer film was measured. This method uses the Fourier transform to pick out the spectral information of OCT signals, and overcomes such limitations of existent film reflectivity measurement methods as lack of intuitionistic results and non-metrical surface interference. The gained spectral reflectivity matches well with the result calibrated by commercial instrument, and the mean square error turns out to be only 0.0488.

Key words thin films; spectrum mensuration; spectroscopic optical coherence tomography; Fourier transform; multilayer film; reflectivity

1 引言

光学相干层析(OCT)术^[1]一般依据探测信号的包络幅度来确定图像的灰度值,反映的是样品后向散射的光强差异,而忽略了光源带宽范围内的光谱信息。光谱光学相干层析主要应用于与样品波长相关的吸收系数和散射系数的测量^[2~6]。利用光谱

光学相干层析在含氧血色素的光吸收参数测定等领域获得了一定的研究成果^[7]。目前,该技术已向分子特异性方向发展,基于对比剂光谱吸收特性的光谱型分子成像研究已成为国际研究热点。

多层膜系是电光源、光通信、光纤传感等光电子器件中的重要部件,反射率是光学膜系设计中非常重要的参数。膜系反射率测量方法有法布里-珀罗

收稿日期:2006-10-20;收到修改稿日期:2007-01-18

基金项目:国家 863 计划(2006AA02Z4EO),国家自然科学基金(60378041,60478040),浙江省自然科学基金(Z603003),教育部博士点基金(20030335099),霍英东青年教师基金(91010),教育部新世纪优秀人才支持计划和浙江省“新世纪 151 人才工程”资助项目。

作者简介:陈宇恒(1980—),男,江苏人,助教,硕士,主要从事生物医学成像和光谱成像探测方面的工作。

E-mail:chenyh_suda@126.com, yuhengcheng@suda.edu.cn

(F-P)干涉法、光腔衰荡法等^[8,9]。这些方法计算较复杂,对于多层膜系及弱吸收薄膜的测量较为困难,必须对计算模型进行修正,或者结合透射谱的测量才能完成。在薄型器件的测量中,如何消除非测量面干扰是一个难题。

利用现有的时域光学相干层析系统^[10],结合后期的软件算法,实现了光谱光学相干层析的功能拓展,利用该系统可以测量深度分辨的膜系光谱反射率,有效排除非测量面的干扰影响,尤其适合薄型微小光学元件的反射光谱测量。

2 光谱光学相干层析原理

光谱光学相干层析作为光学相干层析的功能拓展,是在光学相干层析技术上发展起来的。光学相干层析样品臂位于不同位置时,参考臂和样品臂光程差 Δ 在一定范围内变化,系统探测器采集不同光程差时的干涉信号 $\Gamma(\Delta)$ 。普通光学相干层析仅需通过数字希尔伯特(Hilbert)变换对所获干涉信号实现解析拓展^[11],得到代表待测样品后向散射信号强弱的振幅信号,即可生成反应样品结构特性的黑白位图。

为了从干涉信号中得到光谱信息,需要对干涉信号进行时频变换。基于傅里叶变换实现光谱光学相干层析的方法非常直观。通过理论推导,可以得到^[12]

$$\Gamma(\Delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(k) e^{ik\Delta} dk, \quad (1)$$

式中 k 为波数。可见谱密度 $I(k)$ 为干涉信号 $\Gamma(\Delta)$ 的傅里叶变换。只要利用光学相干层析系统记录下作为光程差函数的干涉信号 $\Gamma(\Delta)$,就可以由傅里叶变换得到谱密度 $I(k)$ 。

为了去除光源光谱以及光学相干层析系统的谱响应非均衡的影响,测量时应先采集作为参考背景的背景干涉信号,通过傅里叶变换得到光源光通过光学相干层析系统后的背景光谱 $I_0(k)$ 。利用数值计算工具或者自编软件对干涉信号数据进行傅里叶变换后,并在纵向数轴标注归一化后的光谱强度。横向数轴光波长的标注较为复杂,执行傅里叶变换后,得到的横坐标 f_d 为数字频率,与光谱信息的物理频率 f_p (正比于波数 $1/\lambda$)呈正比关系,与数据点的采样频率 f_s 成反比关系。即

$$f_d = K \frac{f_p}{f_s}. \quad (2)$$

采样频率 f_s 是已知的,根据标准样品(如普通

玻璃板)先测得已知光谱在极大处或者零点处对应的数字频率,由此计算得到比率系数 K ,从而建立一定采样频率下物理频率与数字频率的对应关系,完成横坐标的标注。

得到单位化标注的背景光谱 $I_0(k)$ 以后,再采集待测样品的干涉信号,用同样方法得到样品的反射光谱 $I(k)$ 。样品的光谱反射率可以由样品反射光谱 $I(k)$ 与背景光谱 $I_0(k)$ 相除得到。

3 光谱光学相干层析测量多层膜系光谱反射率

用于实验中的多层膜系结构为:Air|(HL)ⁿH|Sub,其中H代表高折射率材料二氧化钛(TiO₂),L为低折射率材料二氧化硅(SiO₂),Sub代表玻璃基板。通常光学相干层析测定的是样品反向散射,对于平整的玻璃片,测定的主要是样品的反射。薄膜厚度只有3 μ m,按普通成像深度2mm对应图像纵向500pixel的比率,该薄膜层只能对应1pixel。尽管可以通过降低振镜的驱动电压来减小振镜振动的单位幅度以实现在成像深度方向更为细致的探测,但在总成像深度范围内只采样数十次,用这些采样数据是无法在软件中进行后续的傅里叶变换的。在光学相干层析的样品臂将光聚焦在玻璃表面处,仅探测该位置的完整的干涉信号(图1左图),在该位

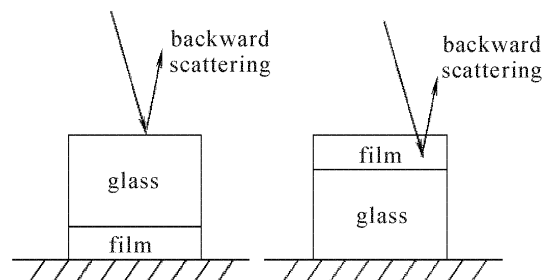


图1 膜系反射光谱的测量

Fig. 1 Film reflectance spectrum measurement

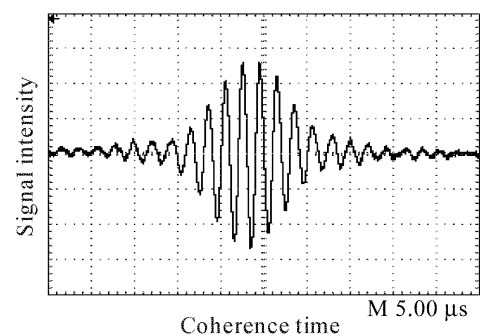


图2 光学相干层析干涉信号

Fig. 2 OCT interference signal

置采样 2500 点,干涉信号数据如图 2 所示,通过后期的傅里叶变换和定标得到背景光谱。然后在光学相干层析的样品臂将光聚焦在玻璃表面膜系处(图 1 右图),用相同方法测量处理得到膜系的反射光谱。膜系的光谱反射率即为反射光谱与背景光谱的比值。

4 结果与讨论

利用光谱光学相干层析方法测得自行制备的多层膜系的光谱反射率,其反射率曲线如图 3 中 R_S 曲线,而用商业化光谱仪(SHIMADZU corporation, uv-3101PC)测得膜系的光谱反射率如图 3 中 R_E 曲线。

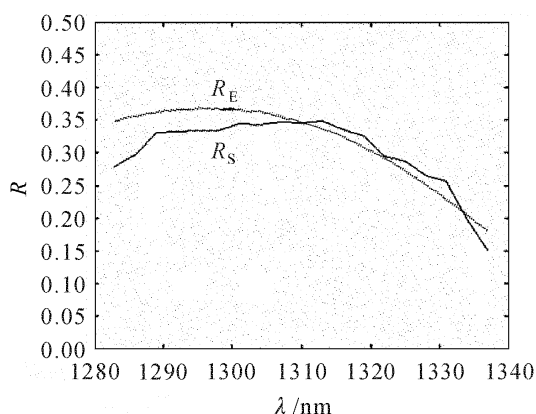


图 3 多层膜系的光谱反射率曲线

Fig. 3 Spectral reflectivity curves of multilayer film

由图 3 可以发现,用光谱光学相干层析方法测得的反射率曲线与光谱仪测得的反射率曲线基本吻合,而在光源中心波长 1310 nm 附近及长波区域,两曲线吻合得非常好。1280~1300 nm 区段用两种方法测得的样品光谱反射率误差较大。考虑到自身膜系加工工艺的局限,膜系实际的光谱反射率与设计时得到的理论值不完全一致,而用光谱仪测定的光谱反射率是实验结果参比的唯一依据。值得提出的是,光谱仪本身是有一定误差的。排除光谱仪测量的误差存在的一个局限是实际测量和背景测量需要分两次完成,样品在两次测量中要经过一次翻转,在两个时刻完成测量,这样不可避免地存在着光源和系统的时间稳定性对测量结果的影响。国外科研小组^[4]采用的测量样品光谱吸收的方法(考虑到吸收和反射之间的关系,也可以用本法来完成实验),测量可以在一个时刻完成,即同时获取上下表面的干涉信号,通过傅里叶变换得到两个光谱,相除即可近似得到样品的光谱吸收曲线。但是这样的测量方法

至少存在两个问题,第一是需把基底对光谱的吸收近似看作是完全均匀的,但其实整个基底带来的非测量面干扰是客观存在的;第二是通过该方法尽管可以在一个时刻能获得两簇干涉信号,但每簇信号对应的采样点数将大为减少,对于后期傅里叶变换的精确性会产生较大影响。测量尽管有时间上不一致的局限性,但是两次测量均仅需对表面采样从而排除了非测量面干扰,并且保证了较多的采样点数。从最后结果看,测得曲线和实际值变化趋势一致,均方差为 0.0488,数值上的误差在容错范围之内。

5 结 论

利用已有的光学相干层析系统实现了光谱功能的拓展,完成了光谱光学相干层析的系统搭建。利用该系统测量了自行制备的多层膜系的反射率,测量值与实际值吻合得较好。本方法对膜系等样品的反射率等光学特性的测量研究有借鉴意义,初步揭示了光谱光学相干层析的应用前景。

参 考 文 献

- David Huang, Eric A. Swanson, Charles P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, **254**:1178~1181
- R. Leitgeb, M. Wojtkowski, A. Kowalczyk *et al.*. Spectral measurement of absorption by frequency domain optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):820~822
- U. Morgner, W. Drexler, F. X. Kartner *et al.*. Spectroscopic optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):111~113
- B. Hermann, K. Bizheva, A. Unterhuber *et al.*. Precision of extracting absorption profiles from weakly scattering media with spectroscopic time-domain optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(8):1677~1688
- Chenyang Xu, Daniel L. Marks, Minh N. Do *et al.*. Separation of absorption and scattering profiles in spectroscopic optical coherence tomography using a least-squares algorithm [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20):4790~4803
- Chenyang Xu, P. Scott Carney, Stephen A. Boppart. Wavelength-dependent scattering in spectroscopic optical coherence tomography [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(14):5450~5462
- Dirk J. Faber, Egbert G. Mik, Maurice C. G. Aalders *et al.*. Light absorption of (oxy-)hemoglobin assessed by spectroscopic optical coherence tomography [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(16):1436~1438
- Li-Jin Chen, Tzeng-Fu Kao, Ja-Yu Lu *et al.*. A simple terahertz spectrometer based on a low reflectivity Fabry-Perot interferometer using Fourier transform spectroscopy [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(9):3840~3846
- Gong Yuan, Li Bincheng. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1247~1250
- 龚元,李斌成. 连续激光光腔衰荡法精确测量高反射率[J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1247~1250

10 Yu Xiaofeng, Ding Zhihua, Chen Yuheng *et al.*. Development of fiber-based optical coherence tomographic imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2):235~238
俞晓峰,丁志华,陈宇恒等. 光纤型光学相干层析成像系统的研制[J]. *光学学报*, 2006, **26**(2):235~238

11 Chen Yuheng, Ding Zhihua, Yu Xiaofeng *et al.*. Signal processing and image reconstruction in optical coherence tomography based on digital Hilbert transformation [J].

Opto-Electronic Engineering, 2006, **4**:31~34
陈宇恒,丁志华,俞晓峰等. 基于数字希尔伯特变换的 OCT 信号处理与系统实现[J]. *光电工程*. 2006, **4**:31~34

12 Liang Quanting, Kong Xianyan. *Optics* [M]. Guangzhou: Guangdong High Education Publishing House, 1999. 160
梁铨廷,孔宪炎. *光学*[M]. 广州:广东高等教育出版社, 1999. 160

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的“会员企业”栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年 12 册,请在《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和 Chinese Optics Letters 中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告) 10 条,每篇不过 2000 字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的 80 %优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。



二、会员义务:

1. 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
2. 每年交纳会员费 2800 元,会员资格从交费之日起计算,一年内有效。
3. 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
4. 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
5. 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- ① 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- ② 来信至 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- ③ 银行汇款 2800 元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户 名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐 号:1001700809026400195
- ④ 联系人:郑继承; 电话:021-69918253; Email:expert@mail.siom.ac.cn