

$$\int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R(h)R(h') \exp[i2kn(h-h')] dh dh' \} (1)$$

式中, $S(k)$ 为光源的光谱密度; $R(h)$ 为散射势; $k = 2\pi/\lambda$ 为光源波数; n 为样品的平均折射率。可以看出, $I(k)$ 由 3 项组成: 第 1 项是常数, 即光源光谱; 第 2 项为参考光和样品光互相关, 包含样品的结构信息, 它是余弦函数的和, 每个余弦函数的幅值与对应深度上样品的后向散射系数的大小成比例; 第 3 项为自相关项, 为样品后向散射的所有子波之间的干涉。本质上, (1) 式表示参考光发出的每一个波数为 k 的单体平面光波, 与样品散射的波数为 k 的单体平面光波之间发生干涉的结果。对 (1) 式作傅里叶逆变换得:

$$\mathcal{F}^{-1}[I(k)] \propto \mathcal{F}^{-1}[S(k)] \otimes \{\delta(h) + [R(h) + R^*(-h)] + A\} \quad (2)$$

式中, \otimes 表示卷积, $\delta(h)$ 为直流噪声, A 为自相关噪声, $\mathcal{F}^{-1}[S(k)]$ 为光源光谱的傅里叶逆变换; $R(h)$ 表示物体散射势, 含样品的结构信息; $R^*(-h)$ 表示样品的镜像, 可以对样品臂和参考臂增加固定光程差偏移, 将该信号与样品图像分开。对于散射极弱的物体, 自相关噪声可以忽略。

2 实验设计

谱域 OCT 系统的核心部分为低相干光源、迈克尔逊干涉仪和光谱仪。为提高探测灵敏性, 降低实验成本, 采用光纤结构的谱域 OCT 系统, 结构如图 1 所示^[10-11]。

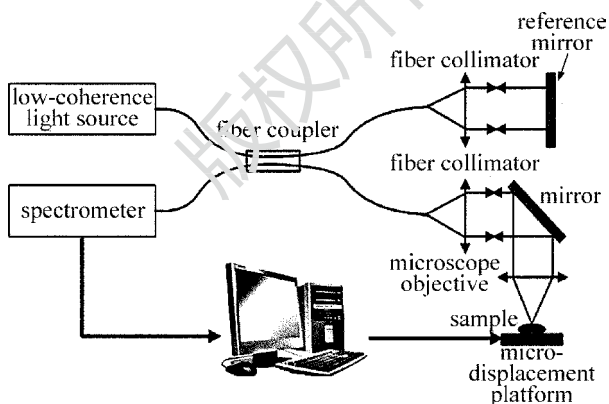


Fig. 1 Schematic of fiber-based spectral-domain OCT

低相干光源的出射光经光纤耦合后被单模光纤耦合器(分光比为 50:50)分成两束: 一束经光纤准直器平行照射在平面镜上, 另一束经光纤准直器平行出射后, 又被透镜聚焦到氧化锌薄膜上。氧化锌薄膜内部的后向散射光和参考镜返回的反射光经光

纤耦合器后重新会合, 然后发生干涉。干涉光谱由光谱仪采集, 并最终传输进计算机进行数据处理, 实现图像构建。2 维微位移平台的位移控制通过软件实现, 用来调整参考光路光程, 并对氧化锌薄膜进行横向扫描, 获取 2 维层析图像。实验样品为实验室内采用溶胶旋涂法制备的氧化锌薄膜。

3 结果分析

将氧化锌薄膜固定在微位移平台上, 对光路进行调整, 直至参考镜位置至参考臂与样品臂的光程差小于相干长度, 样品光和参考光发生干涉。近红外光谱仪 AvaSpec-NIR512-17FLC 采集干涉光谱, 并用 MATLAB 将得到的干涉光谱数据进行曲线拟合, 结果如图 2a 所示。根据谱域 OCT 的原理可知, 在样品的图像重构过程中, 需要对干涉光谱的进行傅里叶逆变换获取物体散射势。该干涉光谱信号必须是波数的函数, 实际上, 光谱仪采集的是在均匀波长空间分布的干涉光谱信号, 在波数空间并非均匀分布。如果对采集到的非均匀波数空间分布的干涉光谱数据直接进行傅里叶变换, 将造成系统的轴向分辨率和测量精度的下降。因此, 在对干涉光谱信号进行傅里叶逆变换的图像重构算法之前, 必须先得到各个采样点均匀分布于波数空间的干涉光谱信号。由于波长和波数之间的转化关系是非线性关系, 需要对以波长为变量的干涉光谱做线性标定, 将

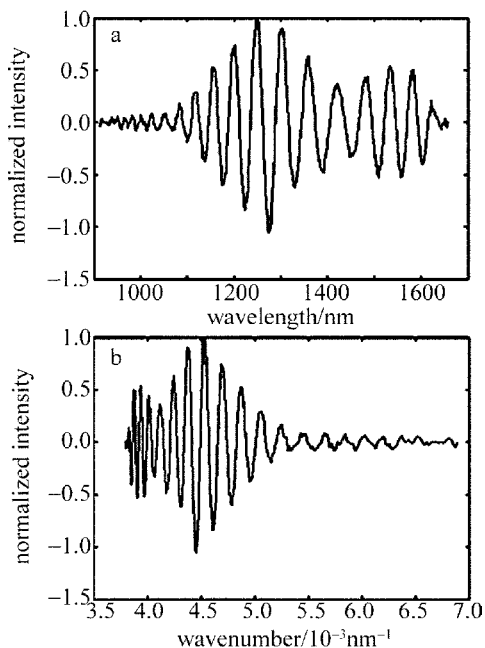


Fig. 2 Interference spectrum

a—wavelength-domain b—wavenumber-domain

光谱仪采集的均匀波长空间分布的干涉光谱信号映射到波数空间, 然后进行重采样, 通过 3 次样条插值的方法, 将其转换为均匀波数空间分布的干涉光谱信号, 如图 2b 所示。

对该干涉光谱数据进行傅里叶逆变换, 得到如图 3a 所示的散射势曲线, 即 1 维深度 (axial-scan) 图像。可以看出, 图 3a 中含有明显的峰值, 其中横坐标 0 右侧的散射势的主峰值和最小峰值分别表示氧化锌薄膜的表面以及薄膜与基片的界面, 而坐标 0 左侧的峰值为它们的镜像。通过峰值坐标可以得到薄膜的厚度约为 $10.2\mu\text{m}$, 该测量结果与理论尺寸 $10\mu\text{m}$ 基本一致。控制另一微位移平台, 对氧化锌薄膜进行横向扫描 (x -scan), 得到横向位置 x 相邻的多个干涉光谱, 分别对这些干涉光谱做傅里叶逆变换, 得到多个 1 维深度图像, 分别对其赋灰度值, 得到如图 3b 所示的 2 维层析图像。由 2 维层析图像可以看出氧化锌薄膜的内部结构。因此, 谱域 OCT 技术可以对氧化锌薄膜质量进行检测。

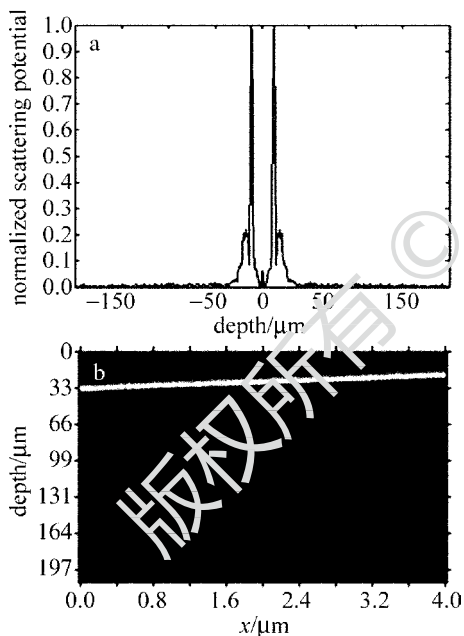


Fig. 3 OCT image

a—1-D depth image b—2-D cross-sectional image

化锌薄膜的 1 维深度和 2 维层析图像。通过 1 维深度图像的分析, 得到了氧化锌薄膜的厚度, 测量结果与理论值基本相同, 表明谱域 OCT 测量值准确有效。通过 2 维层析图像, 可以清晰地看出薄膜的内部结构, 表明谱域 OCT 技术可以为薄膜的质量检测提供技术支持。

参 考 文 献

- [1] HUANG Y Q, LIU M D, ZENG Y K, *et al.* Progress of study on ZnO thin film and its properties [J]. Journal of Inorganic Materials, 2001, 16(3): 391-395 (in Chinese).
- [2] HUANG D, SWANSON E A, LIN C P, *et al.* Optical coherence tomography [J]. Science, 1991, 252(5073): 1178-1181.
- [3] CHANG S D, MAO Y X, FUEPARIU C, *et al.* Optical coherence tomography: technology and applications [J]. Proceedings of the SPIE, 2009, 7156: 1-8.
- [4] FERCHER A F, DRECELER W, HITZENBERGER C K, *et al.* Optical coherence tomography—principles and applications [J]. Reports on Progress in Physics, 2003, 66(2003): 239-303.
- [5] FERCHER A F. Ophthalmic interferometry: optics in medicine, biology, and environmental research [C]//Proceedings of the International Conference on Optics Within Life Sciences. Garmisch-Partenkirchen, Germany: Conference on Optics Within Life Sciences, 1990: 221-228.
- [6] 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.
- [7] FERCHER A F, HITZENBERGER C K, KAMP G, *et al.* Measurement of intraocular distances by backscattering spectral interferometry [J]. Optics Communications, 1995, 117(1/2): 43-48.
- [8] LEITHEB 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.
- [9] de BOER J F, CENSE B, PARK B H, *et al.* Improved signal-to-noise ratio in spectral-domain compared with time-domain optical coherence tomography [J]. Optics Letters, 2003, 28(21): 2067-2069.
- [10] QIN Y W. Study on micro-electromechanical system measurement using optical coherence tomography [J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 664-667 (in Chinese).
- [11] QIN Y W, ZHAO H, ZHUANG Z Q, *et al.* High resolution spectral-domain optical coherence tomography using a thermal light source [J]. Optical and Quantum Electronics, 2012, 43(6): 83-90.

4 结 论

通过谱域 OCT 对氧化锌薄膜的检测, 得到了氧