

光学相干层析成像的图像重建*

孙 非 薛 平 高 瀚 松 袁 韬 陈 昶 延

(清华大学物理系单原子分子测控教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要 层析成像技术——光学相干层析术是基于光学低相干反射测量发展而来的。介绍了用图像恢复的基本原理在光学相干层析术图像增强方面的工作。通过实验测量得到了解卷积所必需的点扩展函数。重建后的膜层结构图像的深度分辨率提高了一个数量级, 图像也取得了更好的锐化、去噪的效果。

关键词 光学相干层析术, 去卷积, 图像重建。

1 引 言

光学相干层析以低相干测量为原理, 将新兴的半导体激光、超快光学技术和超灵敏探测、电子学、计算机控制和图像处理技术结合在同一系统之中, 形成一种新型的成像技术^[1]。它具有区别于传统光学成像方法的特殊优点——可以获得高散射样品(如生物组织)的层析图像。光学相干层析术的分辨率取决于低相干光源的相干长度, 但由于目前的低相干光源(如超快激光器, 超辐射发光二极管等)的相干长度较长(230 μm 左右), 因而光学相干层析术图像分辨率受到了限制^[2]。为了进一步提高图像分辨率, 利用现有的扫描图像获取更丰富的信息。本文使用图像重组中的去卷积等一些方法, 对由光学相干层析术系统获得的有机介质薄膜的层析图像进行了图像处理工作, 使实测的膜层结构图像的深度分辨率提高了一个数量级, 并且取得了很好的去噪、锐化图像的效果。

2 光学相干层析术系统工作原理

如图 1 所示, 光学相干层析术系统的主要结构是一个光纤迈克耳孙干涉仪。低相干光源(超辐射发光二极管或超快飞秒激光器)分别进入放有反射镜的参考端和放有被测样品的信号端。反射镜反射回来的光(参考光)与样品的背向散射光(信号光), 经光纤耦合器汇合产生干涉信号, 被探测器探测, 信号的强度反映样品的散(反)射强

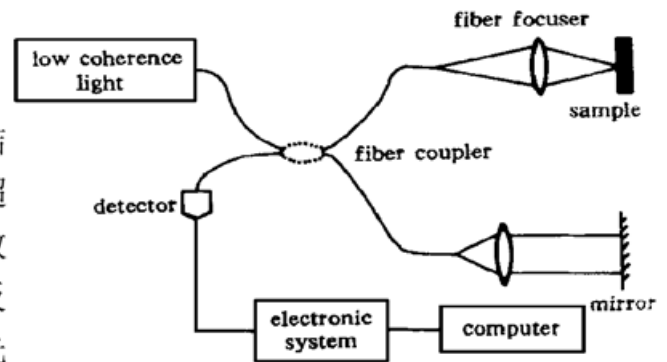


Fig. 1 The Schematic of optical coherence tomography (OCT)

* 教育部“211”工程、清华大学单原子分子测控中心和国家自然科学基金(69908004)的资助。

收稿日期: 1998-11-09; 收到修改稿日期: 1999-10-22

度。光学相干层析术利用相干长度极短的光源获得层析分辨^[3]。对应参考臂某一位置, 只有来自样品某一特定深度(方向 x) 的散射信号才能与参考光发生干涉^[4]。扫描参考臂, 便可获得层析图像。可以看出, 层析分辨率直接由光源的相干长度确定^[5]。

3 图像反演的基本原理

光电探测器所接收到的光强是信号光由样品调制所得^[6]。调制方程可以写成

$$\int p(w, q)f(q)dq = d(w), \quad (1)$$

其中 $p(w, q)$ 可以看成在调制系统在任一 q 点对应 $f(q)$ 的调制系数, 即点扩展函数, $f(q)$ 为 $q(w, q)$ 调制前的原始数据, $d(w)$ 为获得的测量数据, w 为相关的其它参量。由于是为了提高光学相干层析术图像的纵向分辨率, 故只考虑上述方程的一维情况:

$$\int p(x', x)f(x)dx = p \circledast f = d(x'). \quad (2)$$

若点扩展函数具空间不变性, 即满足 $p(x', x) = p(x' - x)$, 在这种情况下, 上述公式可进一步改写成卷积公式:

$$\int p(x' - x)f(x)dx = p \circledast f = d(x'). \quad (3)$$

对非连续的情况 (M 组测量数据), 假设空间离散化为 N 时, 有一组卷积方程:

$$\sum_{i=1}^N p_{ij}f(i) = d(j), \quad (j = 1, \dots, M). \quad (4)$$

这样求解原始光强分布的工作化成了求解 $f(i)$ 的大小。比较简单的解法是利用高斯 - 赛德尔公式^[7] 对 $f(i)$ 进行迭代。其初始值可以设定为 $f(i) = d(i)$ 。第 k 次的迭代公式可以是下面两个公式中的任意一个。

$$f_i^k = w(d_i - \sum_{j=1}^{i-1} p_{ij}f_j^k - \sum_{j=i+1}^N p_{ij}f_j^{k-1}) + (1-w)f_i^{k-1}, \quad (5)$$

$$f_i^k = \frac{w}{p_{ii}}(d_i - \sum_{j=1}^{i-1} p_{ij}f_j^k - \sum_{j=i+1}^N p_{ij}f_j^{k-1}) + (1-w)f_i^{k-1}, \quad i = 1, \dots, N \quad (6)$$

其中 $0 < \omega < 1$, 为松弛因子, 可以决定迭代的收敛速度。不同公式在处理不同问题的时候收敛速度不一样, 但最终结果相同。

由于 p_{ij} 就是单一点对应成像系统中获得的数据, 即点扩展函数。我们就利用平面镜作为被测物, 相当在 x 方向上的 δ 函数。固定参考臂, 在垂直平面镜的方向移动样品臂, 得到了一组一维干涉光强分布(如图 2), 也就是光学相干层析术在 x 方向的点扩展函数^[7]。将其数值化后, 拟合成高斯函数。在迭代过程中按照不同测量数据的间隔从拟合函数上取点, 作为 $p(k, i)$ 。由于目前影响光学相干层析术图像分辨率的主要因素是因为光源的相干长度过长, 从而影响对样品的精细结构测量。所以在点扩展函数中主要考虑光源的相干函数, 从反演结果(图 5、图 6)可以看出膜层界

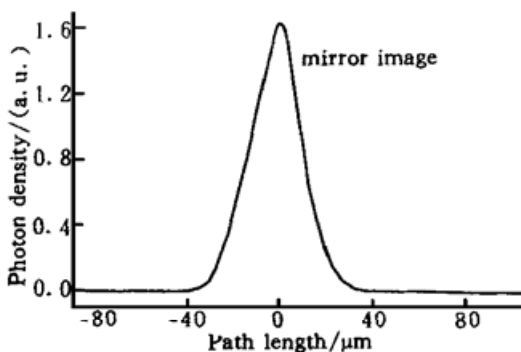


Fig. 2 Point spread function

面变锐利和清晰了, 效果良好。当然, 更细致的工作, 还应考虑其他因素, 如样品的散射和吸收等影响。

4 对油漆层析图像的重建

我们首先对一组在 z 轴方向上测量得到的一维数据(1000 个点, 如图 3) 进行解卷积, 结果如图 4 所示。发现以前重叠在一起的两个无法分清的峰值被锐化后分开了。说明此解卷积法在一定程度上能够提高系统的分辨率。

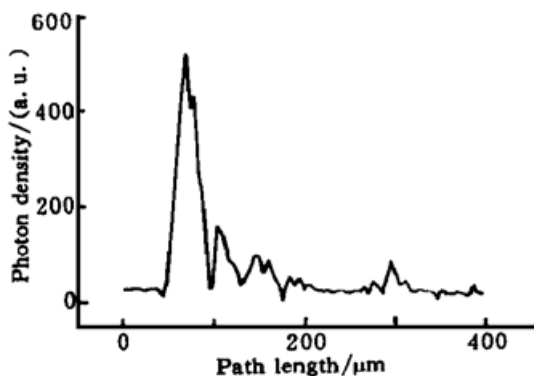


Fig. 3 Original optical coherence tomography signal

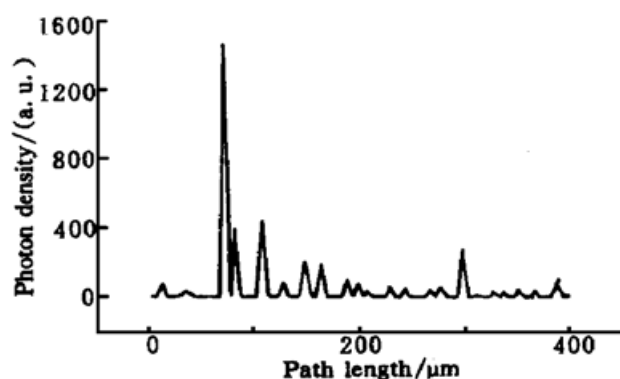


Fig. 4 Deconvoluted signal

再接下来对二维图像进行恢复。由于油漆层析图像只具有本文关心的 x 方向的分辨率, 所以反演图像是先单独在 x 方向上进行去卷积的工作, 再沿 x 方向拼接而成。发现即使原始数据在 x 方向上只有 80 个点, 依然可以取得很好的反演效果。图像重建前后结果如图 5、图 6 所示。

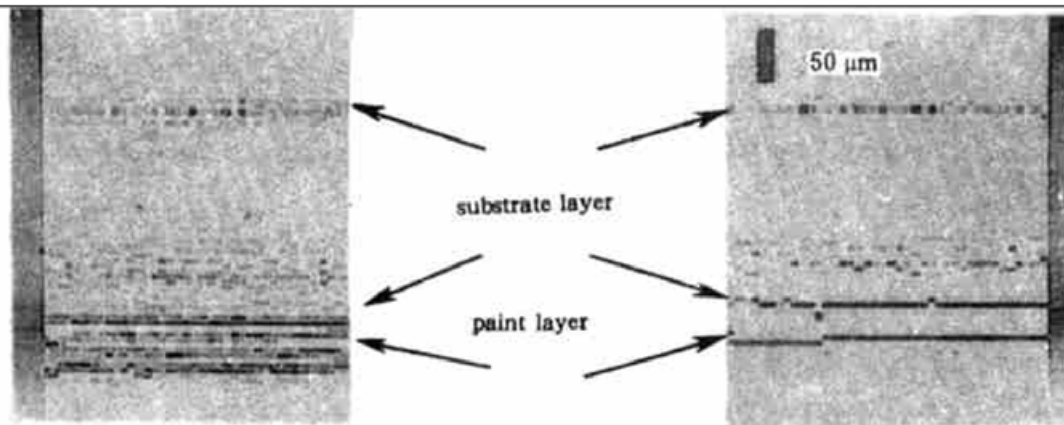


Fig. 5 Original image

Fig. 6 Deconvoluted image

分辨率由原始图像中的 $25 \mu\text{m}$, 达到了反演图像中的与步长相当的分辨率 $2 \mu\text{m}$ 。由此可以看出, 经过处理的图像分辨率提高了一个数量级。

实际处理过程中, 根据已知结构的油漆层析图像的实验数据分析出各个峰值所代表的意义, 也由此确定了噪声本底的上限。为了获得清晰的图像, 将所有小于此值的数据赋零, 在一定程度上提高了图像的清晰度。

图像恢复算法的迭代收敛速度很快, 处理一次 1000 个点的的数据, 迭代 100 次后达到稳定, 需要的时间约 15 秒。对油漆纵向的 80 个点, 仅用 60 次迭代就可以得到很满意的结果。反演一组 40×80 的数据, 只需不到 5 秒钟。这为以后的实时成像提供了很好的技术支持。

由于本文只关心图形纵向分辨率的提高, 所以只进行了 x 方向上的去卷积的工作, 这对层状膜样品已经足够了。如果对一般样品, 除了要高层析图像的纵向分辨率, 还必须同时

提高层析图像的横向分辨率,则必须在现有工作基础上,进一步加入样品横向 $y-z$ 平面的反演算法,也就是通常的光学成像的处理方法,这样才可以获得令人满意的结果。

总 结 为了进一步提高光学相干层析术的图像分辨率,根据图像恢复技术中的一些基本原理,利用平面镜作为纵向的 δ 函数,实测了光学相干层析术系统深度方向的点扩展函数,对获得的有机介质薄膜(油漆涂层)的层析图像进行了去卷积等图像处理工作,使图像的分辨率由接近光源的相干长度(25 μm)提高到与步长相当(2 μm)的程度,并且取得了很好的去噪、锐化图像的效果。这一方法对于提高光学相干层析术生物医学和材料成像的分辨率,是非常有意义的。

作者感谢与中科院高能所李惕培院士的有益讨论和清华大学物理系李家明院士的帮助。

参 考 文 献

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P *et al.*. Optical coherence tomography. *Science*, 1991, **254**(5035): 11781181
- [2] Kulkarni M D, Thomas C W, Izatt J A. Image enhancement in OCT using deconvolution. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(16): 13651367
- [3] Yuan T, Xue P, Chen Y *et al.*. The theoretical simulation and experimental research on optical coherence tomography (OCT). *Proc. SPIE*, 1998, **3548**: 142147
- [4] 谌 玮, 薛 平, 袁 韬等. 激光相干层析成像的光散射模拟计算. *光学学报*, 1999, **19**(4): 486490
- [5] 袁 韬, 薛 平, 谌 玮等. 光学相干层析成像系统的实验研究. *光学学报*, 1999, **19**(10): 13861389
- [6] Li T, Wu M. A direct restoration method for spectral and image analysis. *Astrophys. Space Sci.*, 1993, **206**(4): 91102
- [7] Stoer J, Bulirsch R. *Introduction to Numerical Analysis*. New York: Springer-Verlag, 1980. 179200

The Reconstruction of Optical Coherence Tomography Image

Sun Fei Xue Ping Gao Jianshong Yuan Tao Chen Dieyan

(Department of Physics, Laboratory for Molecular and Nano Sciences, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 9 November 1998; revised 22 October 1999)

Abstract The development of tomographic imaging technique—optical coherence tomography (OCT) is based on the low interference reflectometry. The study on imaging enhancement with some basic technologies of image reconstruction is presented. The point-spread function, which was necessary for the deconvolution, was obtained in our experimental measurement. The depth resolution of reconstructed image was enhanced by one order of magnitude and the image became sharper and cleaner.

Key words optical coherence tomography, deconvolution, image reconstruction.