

# 光学相干层析成像系统的实验研究

袁 韬 薛 平 谌 一 陈 炜 陈 颢 延

(清华大学现代应用物理系单原子分子测控教育部开放实验室, 北京 100084)

**摘 要** 介绍了作者研究建立的光学相干层析(OCT)成像系统, 给出了利用该系统得到的实际生物样品光学相干层析图像, 并对系统性能和结果作了分析, 讨论了影响系统性能的一些因素及改进方法。

**关键词** 光学相干层析, 光学成像, 低相干反射。

## 1 引 言

近年来, 国内外对光学相干层析的成像分析<sup>[1-16]</sup>、光在样品中传播等方面进行了一系列理论研究。我们所在的实验室建立了国内第一套可用于生物组织成像的光学相干层析系统, 得到了相关的实验结果和图像。

光学相干层析系统由低相干光源(超辐射二极管或超快激光器)和光纤迈克耳逊干涉仪组成<sup>[16]</sup>, 如图 1 所示。为了提高系统信噪比和动态范围, 调制参考光, 利用光学外差方法探测相干信号。

外差法探测得到的相干信号的振幅可由下式给出:

$$I_0(l_1 - l_2) = 2 \sqrt{I_1 I_2} \exp[-4 \ln 2 \left(\frac{l_1 - l_2}{l_c}\right)^2] \quad (1)$$

式中  $I_1$  和  $I_2$  分别为参考光和样品光的光强,  $l_1$ 、 $l_2$  分别为参考臂和样品臂的光程,  $l_c$  是所用光的相干长度, 可以推出

$$l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

式中  $\lambda$  和  $\Delta\lambda$  分别是所用光的波长和带宽。由于在本文的系统中, 样品中的光走的是往返的路径, 因此相干长度是单程光路中的相干长度的二分之一。对所用的波长为 850 nm, 带宽为 15 nm 的光, 相干长度约为 25  $\mu\text{m}$ 。

由相干光的强度公式可以看出, 只有当参考光和样品光的光程差在相干长度的范围

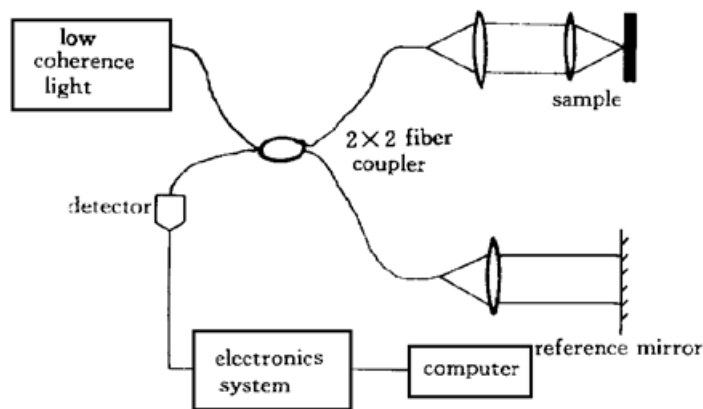


Fig. 1 Schematic of OCT system

之内, 才有足够强的信号。因而, 相干长度也被叫做光学相干层析系统的纵向分辨力。光学相干层析系统可以在样品内部得到  $10\sim 20\ \mu\text{m}$  的纵向分辨力, 而目前常用的 X 光 CT 和核磁共振成像的分辨力一般为毫米量级。

移动样品或探头(在本系统中是光纤聚焦器)作横向扫描就可以得到一幅样品内部光学性质的二维图像。由于所用的是波长为  $850\ \text{nm}$  的近红外光, 对一般的生物组织有几个毫米到厘米量级的穿透深度。

## 2 实验分析及讨论

分别测试系统的纵向分辨力、横向分辨力, 并验证了外差测量的光强与信号的关系。

以一面镜子作为样品, 挡住参考光, 调节光纤聚焦器与镜子的距离, 测量反射回来的光强, 可以得出光纤聚焦器的焦深。由图 2 可见, 光纤聚焦器的焦深约为  $0.5\ \text{mm}$ 。

用一块光栅常数逐步变化的光栅作为样品, 让样品探头作二维扫描, 可以得到系统的横向分辨力。由图 3 可以清晰地看到光栅的条纹, 所见位置光栅常数为  $45\ \text{l/mm}$  和  $50\ \text{l/mm}$ , 即系统横向分辨力将近  $10\ \mu\text{m}$ 。这与系统中光纤芯径  $5\sim 6\ \mu\text{m}$ 、光纤聚焦器放大倍数为 2 是相吻合的。

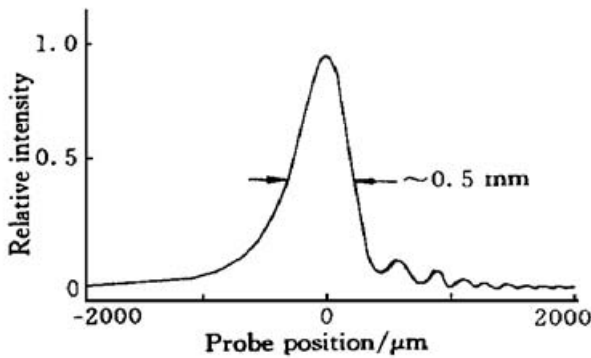


Fig. 2 Focus property of probe

将样品调整在光纤聚焦器的焦点位置, 移动参考镜的位置就可以测出相干光强随光程差的分布规律。

图 4 即为由测得的数据所作的图, 由图可见只有当光程差在 0 附近时才有较大的相干信号。图中信号峰的半宽也即系统的纵向分辨力约为  $25\ \mu\text{m}$ , 与前面理论预测相符。

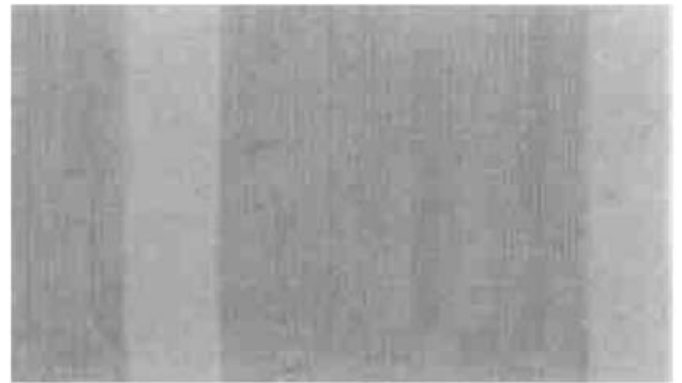


Fig. 3 Crosswise resolution

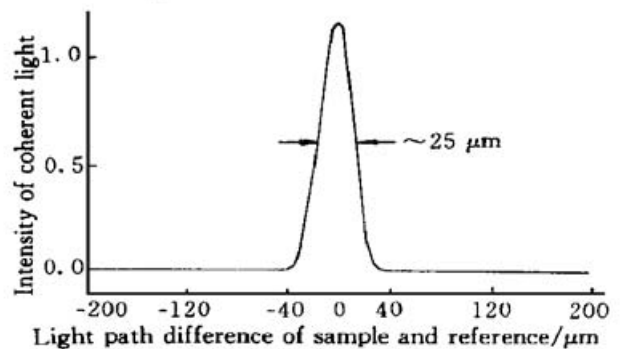


Fig. 4 Longitude resolution

Table 1. The verification of coherent detection formula

No.	1	2	3	4
signal				
$V(I_1)/V$	0.68	0.34	0.67	0.74
$V(I_2)/V$	4.54	2.52	2.63	1.52
$V(I_{int})/V$	1.40	0.77	1.05	0.86
$V(I_c)/[V(I_1)V(I_2)]^{1/2}$	0.80	0.82	0.79	0.81

改变样品臂光强和参考臂光强,得到不同的相干信号光强。将光强转换为电信号,在探测器和放大器都是线性的情况下,由(1)式应有  $V(I_c) \propto (I_1 I_2)^{1/2}$ ,由表 1 可见,(1)式中的正比关系与实验相符。

### 3 生物样品断层扫描图像



Fig. 5 OCT image of scallion

作为探索光学相干层析系统在生物样品测量中的可能性,首先用它对一些植物样品进行了测量。图 5 为利用本系统测得的大葱表皮的断层扫描图像,扫描范围为  $10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ ,扫描步长为  $20 \mu\text{m}$ ,由图 5 可见,穿透深度超过  $1 \text{ mm}$ ,可以看到导管筛管等的细胞组织结构。此图显示了本系统在生物医学领域的应用前景。

### 4 影响系统性能的一些因素与改进可能

光纤的偏振效应对实验有影响。系统使用短焦距透镜聚焦样品光时,横向分辨力高,焦深范围较小,探测折射率大于 1 的样品时,等光程点和焦点分离严重,信号衰减快。使用长焦透镜可减小焦深的影响,但横向分辨力差<sup>[15]</sup>,而且数值孔径小,对样品光的收集效率低,因此需要根据实际要求作进一步研究。另外进一步提高成像速度也是方向之一。

实验发现相干信号存在不规则的低频扰动,这可能是压电器件的非线性和回差特性引起调制相位不稳造成的,有待进一步的研究。使用带反馈控制的无回差压电陶瓷器件,周期拉伸光纤,产生调制信号,采用数字滤波等等,有可能解决这个问题。

另外,使用不同波段和功率的光源进行研究,对照光学相干层析系统在生物样品中不同图像响应,也需作进一步的研究。

**结 论** 建立了一套可对实际生物样品成像的光学相干层析系统,验证了光学相干层析的理论,获得了生物组织光学相干层析图像。还对系统性能和结果作了分析,研究了影响系统性能的一些因素,并给出了进一步的改进方案。

### 参 考 文 献

- [1] Huang D, Swanson E A, Lin C P *et al.*. Optical coherence tomography. *Science*, 1991, **254**(5035): 1178~ 1181
- [2] Tearney G J, Brezinski M E, Bouma B E *et al.*. In vivo endoscopic optical biopsy with optical coherence tomography. *Science*, 1997, **276**(5321): 2037~ 2039
- [3] Tearney G J, Boppart S A, Bouma B E *et al.*. Scanning single-mode fiber optic catheter-endoscope for optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(7): 543~ 545
- [4] Wang Xiaojun, Milner T E *et al.*. Measurement of fluid-flow velocity profile in turbid media by the use of optical Doppler tomography. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 144~ 149
- [5] Devaraj B, Kobayashi M, Usa M *et al.*. First demonstration of laser computed tomography of human tooth by coherent detection imaging. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(11): 874~ 876

- [6] Chan K P, Yamada M, Devarajet B *et al.*. Optical imaging through highly scattering media by use of heterodyne detection in the 1.3  $\mu\text{m}$  wavelength region. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(5) : 492~ 494
- [7] Bashkansky M, Duncan M D, Kahn M *et al.*. Subsurface defect detection in ceramics by high-speed high-resolution optical coherent tomography. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(1) : 61~ 63
- [8] Hee M R, Huang D, Swanson E A *et al.*. Polarization-sensitive low-coherence reflectometer for birefringence characterization and ranging. *J. Opt. Soc. of Am. (B)*, 1992, **9**(6) : 903~ 908
- [9] de Boer J F, Milner T E, van Gemert M J *et al.*. Two-dimensional birefringence imaging in biological tissue by polarization-sensitive optical coherence tomography. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12) : 934~ 936
- [10] Pan Yingtian, Birngruber R, Rosperich J *et al.*. Low-coherence optical tomography in turbid tissue: Theoretical analysis. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28) : 6564~ 6574
- [11] Schmitt J M, Knuttel A, Yadlowsky M *et al.*. Optical-coherence tomography of a dense tissue: Statistics of attenuation and backscattering. *Phys. Med. Biol.*, 1994, **39**(10) : 1705~ 1720
- [12] Schmitt J M, Knuttel A, Bonner R F. Measurement of optical properties of biological tissues by low-coherence reflectometry. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(30) : 6032~ 6042
- [13] Massoud Motamedi, Sohi Rastegar. Light and temperature distribution in laser irradiated. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(10) : 2230~ 2235
- [14] Pan Yingtian, Birngruber R, Engelhardt R. Contrast limits of coherence-gated imaging in scattering media. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13) : 2979~ 2983
- [15] 曾绍群, 骆清铭等. OCT 系统二维图像形成分析. 红外与毫米波学报, 1995, **14**(6) : 429~ 434
- [16] 湛 一, 薛 平, 袁 韬等. 激光相干层析成像的光散射研究. 光学学报, 1999, **19**(4) : 486~ 490

## Experimental Research of Optical Coherence Tomography

Yuan Tao    Xue Ping    Chen Yi    Chen Wei    Chen Dieyan

(Department of Physics, Center for Atomic and Molecular Science, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 5 June 1998; revised 14 September 1998)

**Abstract** An Optical Coherence Tomography (OCT) system is developed. The properties and experimental results of the OCT system are analyzed. Some factors that affect the property of the system are studied and some improving ideas are presented.

**Key words** optical coherence tomography, optical imaging, low-coherence light.