

文章编号: 0253-2239(2006)11-1666-5

# 结合计算层析与光学相干层析测量折射率分布\*

戴 云<sup>1</sup> 张雨东<sup>1</sup> 史国华<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209  
<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 通过将计算层析技术与光学相干层析技术相结合, 测量散射介质非均匀折射率分布。该方法测量散射样品折射率分布时, 通过光学相干层析技术测量散射样品折射率分布在多个方向上的投影, 采用计算层析技术实现对样品折射率分布的层析重建, 克服了传统折射率光学测量方法如单纯的基于光学相干层析原理的焦点追迹法和光程匹配法, 不能测量散射介质非均匀折射率分布的缺点。采用该方法在实验中对梯度折射率棒的径向相对折射率分布进行层析重建, 取得了较好的实验结果。

**关键词:** 光学测量; 光学相干层析; 计算层析; 折射率

中图分类号: O438 文献标识码: A

## Refractive Index Distribution Measurement Combining Computed Tomography with Optical Coherence Tomography

Dai Yun<sup>1</sup> Zhang Yudong<sup>1</sup> Shi Guohua<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Optics and Electronics, the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209  
<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

**Abstract:** The inhomogeneous refractive index distribution of scattering medium is measured by combining computed tomography (CT) with optical coherence tomography (OCT). The refractive index distribution is reconstructed by CT technique and the needed projections in different directions are obtained by OCT system. This method gets advantages over traditional optical refractive index measurement method, focus tracking method simply based on OCT and optical path matching method which cannot measure inhomogeneous refractive index distribution of scattering medium. The refractive index distribution of a gradient refractive index bar is measured and a favorable result is obtained.

**Key words:** optical measurement; optical coherence tomography; computed tomography; refractive index

### 1 引 言

光学相干层析(Optical coherence tomography, OCT)是以低相干测量为原理, 结合共焦扫描显微术、光学外差探测和现代计算机图像处理等技术实现对散射介质的高分辨力层析成像。1991年 Huang 等<sup>[1]</sup>首次利用光学相干层析技术获得了人眼视网膜的细微结构和冠状动脉壁的结构成像。目前, 光学相干层析成像技术已广泛应用于生物组织结构成像<sup>[2]</sup>、厚度测量<sup>[3]</sup>、折射率测量<sup>[4,5]</sup>等诸多领域。

折射率是生物组织光学性质和光学材料的一项重要参量, 在光学相干层析成像系统中, 样品的折射率分布不均匀使得光学相干层析结构成像产生失真<sup>[6]</sup>。传统的折射率测量方法以折射率定律为基础, 通过测量光线的偏转角度求折射率。但是, 散射介质(如生物组织)的光学不均一性导致探测光在传播过程中发生多次散射, 出射光线方向界定模糊, 使得角度测量的不确定性大大增加。因此, 使用传统测量方法难以获得准确的测量结果。为此, 人们进行了新的尝试, 目前较为成功的测量方法是基于光

\* 中国科学院光电研究院知识创新工程宏观调控经费(A05K007)资助课题。

作者简介: 戴 云(1976~), 男, 四川人, 助理研究员, 博士, 主要从事光学计算/相干层析、自适应光学和信息处理的研究。E-mail: daiyunqq@163.com

收稿日期: 2005-11-22; 收到修改稿日期: 2006-02-28

学相干层析原理的焦点追迹法<sup>[3,4]</sup>、光程匹配法<sup>[7]</sup>，通过对光程长测量推导出待测样品的折射率，测量结果具有一定的精度。但是，焦点追迹法和光程匹配法只能对折射率均匀分布的散射样品进行测量，而不能实现非均匀折射率分布的测量。

通过将计算层析(Computed tomography, CT)成像技术与光学相干层析成像技术相结合，即投影光学相干层析(简便起见，本文称之为 POCT)，可以实现对散射介质非均匀折射率分布的层析测量。POCT 技术用于散射样品折射率分布测量时，通过光学相干层析技术测量散射样品折射率分布在多个方向上的投影，采用计算层析技术实现对样品折射率分布的层析重建。本文首先分别对光学相干层析技术与计算层析技术进行了简单介绍，在此基础上，详细介绍了 POCT 折射率测量的工作原理，并在实验中对具有散射表面的梯度折射率棒的折射率分布进行了层析重建，获得了较好的测量结果。

## 2 光学相干层析技术

如图 1 所示，光学相干层析系统的主要结构是一个光纤迈克耳孙干涉仪。宽带光源发出的低相干光分别进入放有反射镜的参考臂和放有被测样品的样品臂。反射镜反射回来的光(参考光)与样品的背向散/反射光(信号光)，经光纤耦合器汇合产生干涉信号，被探测器接收，信号的强度反映样品的散/反射强度。光学相干层析术利用相干长度极短的光源获得层析分辨。对应参考臂的某一位置，只有来自样品某一特定深度的散射信号才能与参考光发生干涉。扫描参考臂便可获得层析图像，层析分辨力直接由光源的相干长度确定。

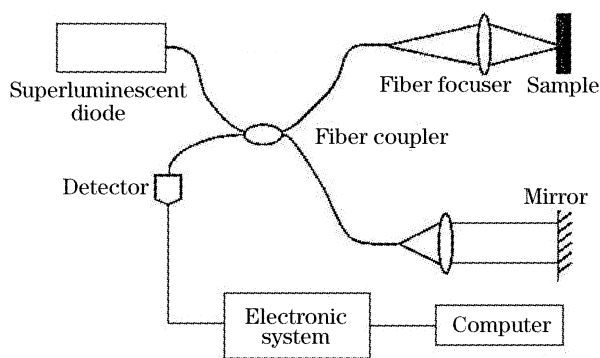


图 1 光学相干层析原理示意图

Fig. 1 Schematic of optical coherence tomography

## 3 计算层析技术

从数学角度来说，计算层析成像技术是由函数

投影重建函数本身的技术，其投影几何关系如图 2 所示。函数  $n(x, y)$  沿与  $x$  轴成  $\theta$  角的平行直线簇的积分称为函数在  $\theta$  方向上的投影，数学表示为

$$p(t, \theta) = \int_L n(x, y) dl = \mathcal{R}[n(x, y)], \quad (1)$$

计算层析理论中称投影  $p(t, \theta)$  为函数  $n(x, y)$  的拉东(Radon)变换。由测得的函数  $n(x, y)$  在多个方向上的投影数据  $p(t, \theta)$ ，经拉东逆变换或层析重建算法<sup>[8,9]</sup>即可重建函数  $n(x, y)$ ：

$$n(x, y) = \mathcal{R}^{-1}[p(t, \theta)]. \quad (2)$$

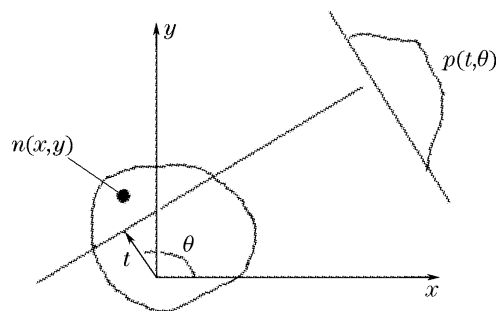


图 2 投影变换示意图

Fig. 2 Schematic diagram of projection transformation

计算层析重建技术与光学测量技术相结合形成了光学计算层析(Optical computed tomography, 为了与光学相干层析相区别，有的学者<sup>[10]</sup>也将其称为 Optical projected tomography, OPT)技术，已成功应用于流场测量<sup>[11]</sup>、等离子体诊断<sup>[12]</sup>等诸多领域。光学计算层析中，图 2 中的  $n(x, y)$  对应流场折射率分布； $p(t, \theta)$  为光线穿过流场后的光程差。依据不同的投影测量方式，发展了全息干涉法、叠栅偏折法、哈特曼法<sup>[13,14]</sup>等多种流场光学计算层析方法。但是，传统的光学计算层析技术基于几何光学或高相干干涉等理论来获取流场信息，因此只能实现光学透明场的投影探测和层析重建，不能实现对散射介质或具有散射边界对象进行层析重建。

## 4 POCT 折射率测量原理

POCT 技术用于散射样品折射率分布测量时，通过光学相干层析技术测量散射样品折射率分布在多个方向上的投影，采用计算层析技术实现对样品折射率分布的层析重建。

光学相干层析成像建立在低相干干涉的基础上，设从参考臂返回的光程为  $l_r$ ，从样品臂返回的样品反射/背向散射光的光程为  $l_s$ ，当两光程之差小于光源相干长度  $l_c$  (即  $l_r - l_s < l_c$ ) 时才能产生干涉信号。而样品臂光程为样品折射率分布  $n(x, y)$  沿探

测光方向  $L$  的积分,数学表示为

$$l_r = \int_L [n(x, y) - n_0] dl, \quad (3)$$

式中  $n_0$  为周围环境的折射率,直观表示如图 3(a) 所示。样品具有非均匀折射率分布  $n(x, y)$ , 样品边界虽然为散射表面,但由于其与周围环境(如大气)折射率存在差异,因此会产生较强的光学反射,通过光学相干层析的纵向/横向扫描可以对样品结构进行低相干成像。但是由于样品折射率分布不均匀使得所得图像产生畸变,如图 3(b) 所示,此时由于样品折射率大于周围环境折射率,使得图像沿成像方向拉长,其拉长的距离等于样品折射率沿探测方向上的积分,

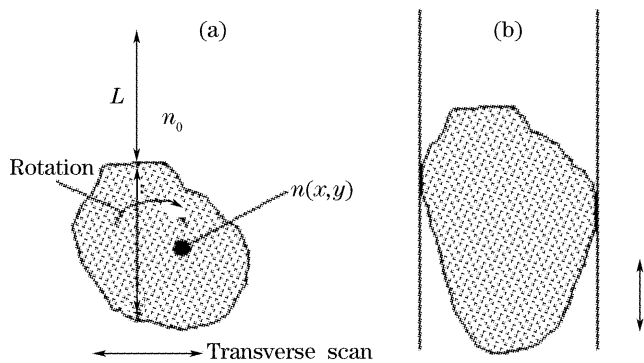


图 3 POCT 原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of POCT

即  $l_r$  (相应的,如果样品折射率小于周围环境折射率,则会使图像沿成像方向压缩)。如果已知样品的几何形状,则可以通过测量图像的几何畸变获得样品折射率沿探测光方向的积分,即样品折射率沿探测光方向的投影。将样品绕其中心旋转,在多个方向上对样品进行低相干成像,则可以获得样品折射率在多个方向上的投影,因而可以采用计算层析重建技术重建出样品内部的折射率分布。

## 5 折射率测量实验

图 4 是我们搭建的光学相干层析系统布局图,系统由宽带光源(中心波长  $\lambda_0 = 1305 \text{ nm}$ , 带宽  $\Delta\lambda = 94 \text{ nm}$ , 功率  $P = 6.9 \text{ mW}$ )、耦合器(分光比 50/50)、电光相位调制器、频域快速扫描延迟线、偏振控制器、横向扫描装置、外差平衡接收装置、前置放大器和计算机处理系统组成。电光相位调制器的作用是提高信号的信噪比,通过对干涉信号进行高频调制,可以有效地避免低频  $1/f$  噪声的干扰。调制后的干涉信号被外差平衡接收装置接受,实现对微弱信号的有效提取。偏振控制器使得只有单一偏振态的光束进行干涉,消除光纤偏振模式色散对成像分辨力的影响。频域快速扫描延迟线可以获得很高的成像速度,并可对系统进行色散补偿以获得高的纵向分辨力和信噪比。

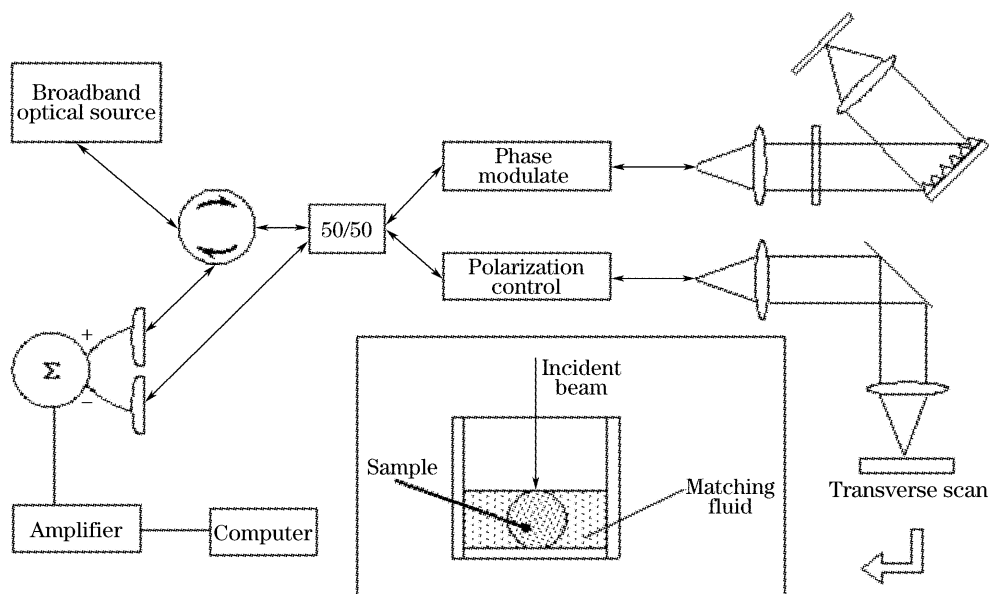


图 4 光纤型光学相干层析系统布局

Fig. 4 Block diagram of optical coherence tomographic system

为了简单起见,实验选择折射率分布具有圆对称性的梯度折射率棒作为被测样品,其两个端面为通光面,圆柱面为粗糙表面。据厂家提供的参量,其径向折射率分布为

$$n(r) = n_0 \left( 1 - \frac{A}{2} r^2 \right), \quad (4)$$

式中  $r$  为梯度折射率棒半径,  $n_0$  为中心折射率,  $A$  为折射率分布常数。实验中,  $r = 1, n_0 = 1.513 (\lambda =$

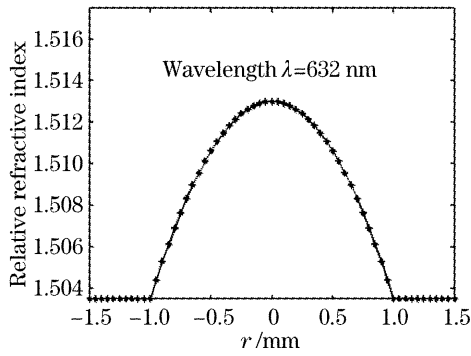


图 5 样品理论折射率分布曲线

Fig. 5 Refractive index distribution curve of sample

632 nm),  $\sqrt{A} = 0.1122$ , 据此, 其折射率分布如图 5 所示。由于计算层析重建中, 投影数据建立在探测光束直线穿过样品的基础之上, 因此为了消除梯度折

射率棒边沿与环境折射率相差过大引起的光线偏折, 实验中将样品置于折射率  $n = 1.5163$  ( $\lambda = 632$  nm) 的匹配液中, 如图 4 中的局部放大图所示。为了便于提取样品折射率投影数据, 样品池底板上表面为光洁度较好的光学表面。

由于被测样品折射率分布具有圆对称性, 只需获得样品在一个方向上的投影即可实现折射率的层析重建。实验中, 通过光学相干层析系统的纵向/横向扫描, 获得被测样品和样品池底板的层析图像。图 6(a) 为不加匹配液直接对梯度折射率棒进行扫描获得的层析图像。图中的水平亮线为样品池底板, 向上弯曲的亮线为梯度折射率棒下半部结构图像, 可以看到, 由于成像区域折射率不均匀使得其层析图像产生明显的畸变(纵向拉长)。

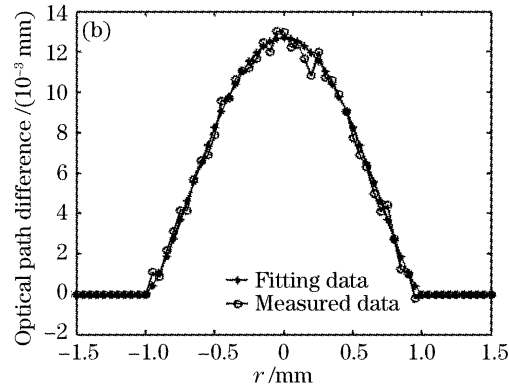
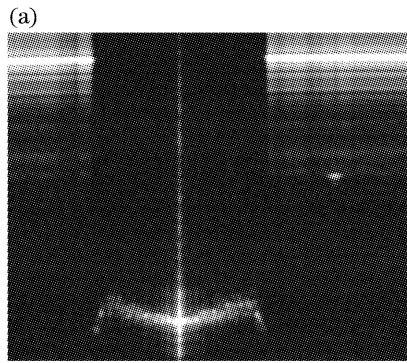


图 6 (a) 实验获得的样品层析图像, (b) 光学相干层析图像拟合得到样品折射率分布投影

Fig. 6 (a) Tomographic image of sample, (b) refraction index projection from optical coherence tomographic image of sample

图 6(b) 中的圆圈数据为加入匹配液后通过光程匹配法<sup>[7]</sup> (在纵向上匹配折射率棒边界光程) 获得的样品相对折射率分布在探测方向上的投影, 即光线穿过样品后相对于穿过匹配液产生的光程差:

$$\Delta p = \int_L [n(x, y) - n_0] dl = \int_L \Delta n(x, y) dl, \quad (5)$$

式中  $\Delta n(x, y)$  即为样品折射率与匹配液折射率之差。上式中光程差  $\Delta p$  即为样品折射率与匹配液折射率差在成像方向上的投影。因此, 结合计算层析技术即可重建出其相对折射率分布。为了提高测量精度, 将实验获得的投影数据进行曲线拟合, 图 6(b) 中的星形数据为拟合得到的投影分布。将获得的投影数据输入计算机层析重建算法即可获得样品折射率的空间分布。

作为我们前期研究工作的延续, 这里的计算机层析重建算法采用适用于少投影“非完全数据”层析重建的经典代数重建算法, 其迭代公式为<sup>[8]</sup>

$$f^m = f^{m-1} - \frac{(w_m f^{m-1} - p_m) w_m}{w'_m \cdot w_m}, \quad (6)$$

式中  $f$  为重建图像, 即(5) 式中的  $\Delta n(x, y)$ , 即样品折射率分布;  $p_m$  为第  $m$  个投影,  $w_m$  为第  $m$  条投影射线的投影矩阵,  $m$  代表第  $m$  条投影射线。当  $\|f^m - f^{m-1}\| \leq \epsilon$  时终止迭代。

由于样品折射率分布具有圆对称性, 因此获得一个方向上的投影也就获得了样品在多个方向上的投影。在计算机层析重建时, 将实验获得投影数据合成  $180^\circ$  范围内以  $5^\circ$  为间隔共 36 个方向上的投影 (原则上还可以合成更多方向的投影, 但会增加系统开销且重建精度并无明显改善, 因此实验中选取 36 个投影方向)。图 7 为计算层析重建结果, 可以看到, 层析重建结果与厂家提供的折射率分布 (如图 5 所示) 相当吻合 (中心与边沿折射率差为 0.092), 从而验证了 POCT 系统实现散射样品非均匀折射率分布层析测量的正确性。

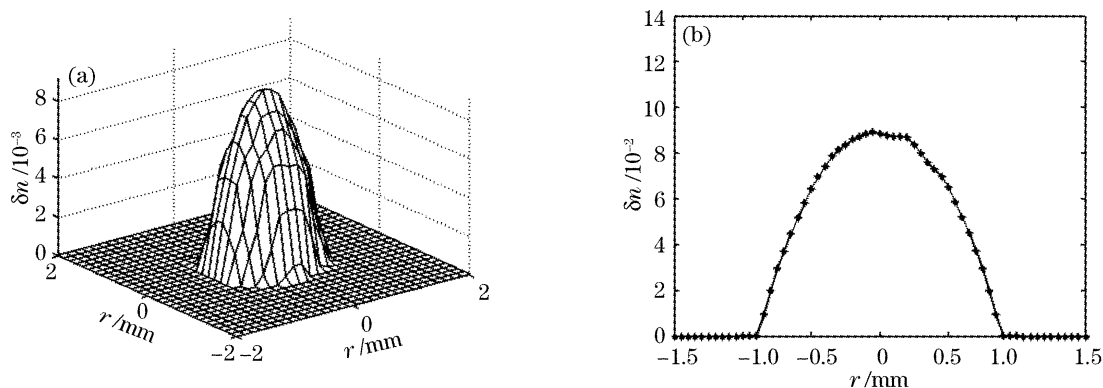


图 7 (a)样品相对折射率的二维分布图,(b)径向分布图

Fig. 7 (a) Two-dimensional relative refractive index distribution of sample, (b) radial refractive index distribution

由于实验用折射率匹配液是在 632 nm 波长下配置的,而实验系统成像波长为 1305 nm,如果需要得到样品在 1305 nm 下的绝对折射率数值,则须精确测定匹配液在实验波长下的折射率大小。因此,图 7 反映的是样品相对于匹配液的相对折射率分布,实验结果与样品绝对折射率分布情况相同而仅在数值上相差一个常数。需要指出的是,由光学相干层析成像的原理可知,本文所指的折射率均为群折射率。

## 6 结 论

本文结合计算层析技术与光学相干层析成像技术实现对散射介质非均匀折射率分布的计算机层析重建,该技术通过光学相干层析技术测量散射样品折射率分布在多个方向上的投影,采用计算层析技术实现对样品折射率分布的层析重建。它克服了传统折射率光学测量方法难以实现对散射介质、不能测量非均匀折射率分布的缺点。POCT 技术作为现有折射率测量方法的补充,将在生物医学、光学材料和光纤工业折射率测量中具有良好的应用前景。

**致谢** 作者感谢与浙江大学丁志华教授的有益讨论。

## 参 考 文 献

- 1 David Huang, Eric A. Swanson, Charles P. Lin *et al.*. Optical coherence tomography[J]. *Science*, 1991, **254**(5035): 1178~1181
- 2 Yuan Tao, Xue Ping, Chen Yi *et al.*. Experimental research of optical coherence tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(10): 1386~1389 (in Chinese)  
袁 韬, 薛 平, 谌 一 等. 光学相干层析成像系统的实验研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(10): 1386~1389
- 3 Masamitsu Haruna, Masato Ohmi, Teruki Mitsuyama *et al.*. Simultaneous measurement of the phase and group indices and the thickness of transparent plates by low-coherence interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(12): 966~968
- 4 G. J. Tearney, M. E. Brezinski, J. F. Southern *et al.*. Determination of the refractive index of highly scattering human

- tissue by optical coherence tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(21): 2258~2260
- 5 Li Maohe, Zhang Meidun. Refractive index measurement by optical fiber Michelson interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(9): 1294~1296 (in Chinese)  
李毛和, 张美敦. 用光纤迈克耳孙干涉仪测量折射率[J]. *光学学报*, 2000, **20**(9): 1294~1296
- 6 Volker Westphal, Andrew M. Rollins, Sunita Radhakrishnan *et al.*. Correction of geometric and refractive image distortions in optical coherence tomography applying Fermat's principle[J]. *Opt. Exp.*, 2002, **10**(9): 397~404
- 7 Wang Xinyu, Zhang Chunping, Zhang Lianshun *et al.*. A simple method for refractive index measurement of bio-tissue[J]. *J. Optoelectronics*, 2002, **13**(9): 976~978 (in Chinese)  
王新宇, 张春平, 张连顺 等. 生物组织折射率测量的一种简便方法[J]. *光电子激光*, 2002, **13**(9): 976~978
- 8 Gabor T. Herman. *Image Reconstruction from projections* [M]. Transl. Yan Hongfan *et al.*, Beijing: Science Press, 1985 (in Chinese)  
G. T. 赫尔曼. 由投影重建图像[M]. 严洪范等译, 北京: 科学出版社, 1985
- 9 Dean Verhoeven. Limited-data computed tomography algorithms for the physical sciences[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(20): 3736~3754
- 10 Yi Wang, Da Xing. Optical projection tomography: Theory and optimization[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5486**: 67~71
- 11 Yao Hongbing, He Anzhi. Improvement of the reconstruction algorithm of optical computerized tomography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2): 158~161 (in Chinese)  
姚红兵, 贺安之. 光学层析重建算法改进的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2): 158~161
- 12 Wan Xiong, He Xingdao, Gao Yiqing. A novel limited-view tomography algorithm based on maximum entropy and its application[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1433~1438 (in Chinese)  
万 雄, 何兴道, 高益庆. 一种少投影光学层析新算法及其应用[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1433~1438
- 13 Dai Yun, Li Ende, Yang Zeping *et al.*. Simulation of flow tomography reconstruction from Shack-Hartmann wave-front sensing[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(8): 13~15 (in Chinese)  
戴 云, 李恩德, 杨泽平等. 基于哈特曼波前探测的流场层析重建系统仿真[J]. *光电工程*, 2005, **32**(8): 13~15
- 14 Dai Yun, Zhang Yudong, Li Ende *et al.*. Tomographic reconstruction of 3-D temperature field based on Hartmann wavefront sensing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1406~1410 (in Chinese)  
戴 云, 张雨东, 李恩德 等. 基于哈特曼波前探测层析重建三维温度场[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1406~1410