

文章编号: 0253-2239(2003)03-0505-5

# 双光栅快速扫描光学延迟线的色散补偿\*

李 栋 丁志华 孟 婕

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 光学相干层析成像(OCT)系统的纵向分辨力不仅与光源的带宽有关,而且与系统中两干涉臂间的色散匹配有关。如果色散没有得到精确匹配,将使光学相干层析成像系统的纵向分辨力达不到所预期的理论值。色散问题在超高分辨光学相干层析成像系统中尤为突出。提出了一种基于双光栅快速扫描光学延迟线(RSOD),用于光学相干层析成像系统的色散补偿。该方法中新增的光栅引入了光栅间距这一独立变量,其与常规单光栅快速扫描光学延迟线机构中的光栅离焦量一起,可使光学相干层析成像系统中的群速度色散(GVD)和三阶色散(TOD)同时得到补偿。分析了双光栅快速扫描光学延迟线的色散特性和色散调节原则,并提供了一个典型光学相干层析成像系统中的色散补偿实例。

**关键词:** 医用光学与生物技术;色散补偿;光学相干层析成像;双光栅快速扫描光学延迟线;群速度色散;三阶色散  
中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Double-Grating Rapid Scanning Optical Delay Line for Dispersion Compensation

Li Dong Ding Zhihua Meng Jie

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract:** The axial resolution of optical coherence tomography (OCT) depends on not only the bandwidth of the light source but also the dispersion balance between the sample arm and reference arm. If the dispersion between two arms is not matched accurately, the axial resolution of optical coherence tomography system will degrade. Dispersion problem is very important especially in ultrahigh resolution optical coherence tomography system. A method for dispersion compensation in optical coherence tomography by a double-grating based rapid scanning optical delay line (RSOD) is put forward. The independent variable of the distance between gratings in the added gratings, along with the adjustable distance between grating and Fourier transform lens in a conventional rapid scanning optical delay line can be used to compensate the group velocity dispersion (GVD) and third order dispersion (TOD) of optical coherence tomography system simultaneously. The dispersion characteristics as well as the dispersion management scheme are discussed. Example of dispersion compensation in a typical optical coherence tomography system is provided.

**Key words:** medical optics and biotechnology; dispersion compensation; optical coherence tomography; double-grating rapid scanning optical delay line; group velocity dispersion; third order dispersion

## 1 引 言

光学相干层析成像术(Optical Coherence Tomography, OCT)是一种高分辨力、无损伤的生物医学成像技术<sup>[1]</sup>。在结构光学相干层析成像和各

种功能光学相干层析成像中,都需要引入较大的多普勒频移来实现高灵敏度的外差调制和解调。在这些应用中,多普勒频移通常是通过在参考臂中引入电光或声光调制器实现的<sup>[2,3]</sup>。然而调制器中的电光或声光晶体引入了较大的正色散,如果不对参考

\* 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)和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”的资助课题。

作者简介: 李 栋(1983—),男,彝族,云南个旧人,硕士研究生,主要从事生物医学光子学方面的研究。

E-mail: ld1208@163.com

导师简介: 丁志华(1967—),男,浙江开化人,研究员,博士生导师,主要从事光学相干层析成像技术与应用。

E-mail: zh\_ding@zju.edu.cn

收稿日期: 2006-06-01; 收到修改稿日期: 2006-10-20

臂中多余的正色散进行补偿的话,将使光学相干层析成像系统纵向分辨力达不到所预期的理论值<sup>[4]</sup>。目前,光学相干层析成像系统中的色散补偿方法大致分为硬件补偿和软件补偿两类。软件补偿主要用于参考臂和样品臂的色散基本匹配,图像有较好对比度时使用。但在使用电光或声光晶体作相位调制时,由于晶体引入的色散较大,软件补偿不再适用<sup>[5]</sup>。而且,软件补偿的实时性并不好,限制了其在实时光学相干层析成像系统中的应用。快速扫描光学延迟线(Rapid scanning optical delay line, RSOD)是目前广泛使用的色散补偿硬件,该方法通过调节光栅离焦量来引入色散。但是,快速扫描光学延迟线引入的群速度色散(GVD)和三阶色散(TOD)异号,所以不可能同时补偿上述晶体引入的群速度色散和三阶色散<sup>[5]</sup>。在快速扫描光学延迟线的光栅和透镜间增加一块棱镜,通过适当调节可使群速度色散和三阶色散同时得到补偿<sup>[6]</sup>,但此法没有方便遵循的色散调节原则。在样品臂中加一段单模光纤,利用光纤在工作波段引入的群速度色散和三阶色散,可以平衡参考臂中经快速扫描光学延迟线补偿后剩余的群速度色散和三阶色散<sup>[5]</sup>,但此法一般仅适用于光纤光学相干层析成像系统,而且所需的单模光纤长度一旦确定便不易更改,不利于系统的动态优化。

本工作提出了双光栅快速扫描光学延迟线结构,用于光学相干层析成像系统的色散补偿。该结构较常规的快速扫描光学延迟线增加了光栅间距变量,可将色散补偿到三阶,并具备常规单光栅快速扫描光学延迟线分别控制相速度和群速度的功能<sup>[7]</sup>。

## 2 理论分析

图 1 所示为双光栅快速扫描光学延迟线结构布局。光栅 1 为新增加的光栅,与常规快速扫描光学延迟线中的光栅(图中的光栅 2)平行放置,两光栅间距  $L_2$  即为新增加的色散调节变量。光栅 2 到傅里叶变换透镜(焦距为  $f$ )的距离为  $L_1$ ,光栅离焦量为  $L_1 - f$ ,对应于常规快速扫描光学延迟线中的色散调节变量<sup>[7]</sup>。

中心角频率为  $\omega_0$  的宽频光入射到双光栅快速扫描光学延迟线中,入射光束首先在光栅 1 上发生衍射,入射点 A 到傅里叶变换透镜光轴的距离为  $L_3$ ,  $\beta$  为相应色光( $\omega$ )的衍射角。各衍射色光在光栅 2 上再次发生衍射,对应色光的入射点距傅里叶变换透镜光

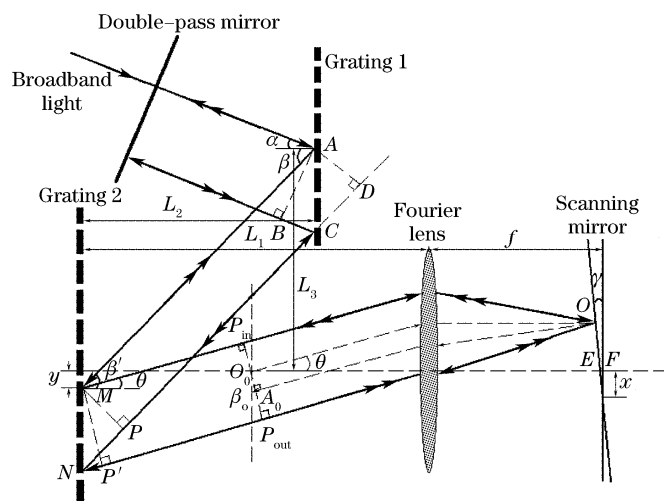


图 1 双光栅快速扫描光学延迟线结构布局  
和光线追迹图

Fig. 1 Schematic of double-grating based rapid scanning optical delay line and its ray tracing

轴的偏离为  $y$ ,入射角  $\beta$  由于两光栅相互平行而等于光栅 1 的衍射角  $\beta$ ,  $\theta$  则为相应色光( $\omega$ )的衍射角。 $\gamma$  为扫描振动镜的转角,其旋转中心距傅里叶变换透镜光轴的偏离为  $x$ 。假定中心色光经光栅 1 衍射后的衍射角为  $\beta_0$ ,经光栅 2 再次衍射后与傅里叶变换透镜光轴重合,即  $\theta_0 = 0$ ,因此  $L_3 = L_2 \tan \beta_0$ 。

忽略两光栅不平行对色散的影响<sup>[8]</sup>。根据对应色光在双光栅快速扫描光学延迟线中的路径,可以得到该色光的相位为

$$\phi(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} [ |P_{in}OP_{out}| + 2|MP_{in}| + |NP'| + 2|AM| + |CB| + 2|AQ| ] + R(\omega), \quad (1)$$

式中,路径点  $P_{in}, O, P_{out}, M, N, P', A, C, B, Q$  已在图 1 中标注。 $|\cdot|$  表示两点间的追迹光程,  $c$  为真空中的光速。 $R(\omega)$  为双光栅的相位补偿因子,如果定义光栅 1 的参考点为 A,光栅 2 的参考点为傅里叶变换透镜光轴与光栅的交点,则  $R(\omega)$  由下式决定:

$$R(\omega) = \frac{8\pi m(L_2 \tan \beta - L_2 \tan \beta_0)}{d_2} + \frac{4\pi mMN}{d_2} + \frac{4\pi m'AC}{d_1}, \quad (2)$$

式中  $m'$  和  $m$  分别为光栅 1 和光栅 2 的衍射级次,  $d_1$  和  $d_2$  分别为光栅 1 和光栅 2 的光栅常量。

根据图 1 中的几何参量和三角关系,(1)式可以转化为以下形式:

$$\phi(\omega) = 2 \frac{\omega}{c} \delta + \text{I} + \text{II} + \text{III}, \quad (3)$$

其中

$$\delta = |O_0FO_0| + 2|AQ|, \quad (3a)$$

$$I = 4 \frac{\omega}{c} (L_1 - f) \cos \theta, \quad (3b)$$

$$II = 4 \frac{\omega}{c} \left[ \frac{L_2}{\cos \beta} - (L_2 \tan \beta - L_2 \tan \beta_0) \sin \theta \right] + 8\pi m (L_2 \tan \beta - L_2 \tan \beta_0) / d_2, \quad (3c)$$

$$III = 4 \frac{\omega}{c} (x\gamma - f\gamma \sin \theta), \quad (3d)$$

路径点  $O_0$  和  $F$  已在图 1 中标注。将(3)式展开为  $\omega_0$  处的泰勒级数可以得到

$$\phi(\omega) = \phi(\omega_0) + \phi'(\omega_0)(\omega - \omega_0) + \phi''(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^2}{2!} + \phi'''(\omega_0) \frac{(\omega - \omega_0)^3}{3!} + \dots, \quad (4)$$

(4)式中第一项和第二项分别定义为相位延迟和群延迟:

$$t_p = \frac{\phi(\omega_0)}{\omega_0} = \frac{2\delta}{c} + \frac{4(L_1 - f)}{c} + \frac{4L_2}{c \cdot \cos \beta_0} + \frac{4x\gamma}{c}, \quad (5)$$

$$t_g = \left. \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} = \frac{2\delta}{c} + \frac{4(L_1 - f)}{c} + \frac{4L_2}{c \cdot \cos \beta_0} + \frac{8\pi m L_2 \sin \beta_0}{d_1 \cos^3 \beta_0 \omega_0} + \frac{16\pi^2 m^2 c L_2}{d_1 d_2 \cos^3 \beta_0 \omega_0^2} + \frac{8\pi m f \gamma}{d_{\text{eff}} \omega_0} + \frac{4x\gamma}{c}, \quad (6)$$

式中  $d_{\text{eff}}$  为双光栅的等价光栅常量,由下式决定:

$$1/d_{\text{eff}} = 1/d_2 - 1/d_1, \quad (7)$$

由(5)式和(6)式可见,与常规快速扫描光学延迟线一样,双光栅快速扫描光学延迟线也可以分别控制相位延迟和群延迟。特别地,当  $x=0$  时,  $t_p=0$  而  $t_g \neq 0$ <sup>[7]</sup>, 可以用电光或声光相位调制器引入较高的载频,从而提高系统的信噪比。

仅考虑光栅面与傅里叶变换透镜光轴垂直的情况,所以(4)式中的第三项和第四项只由(3)式中的 I 项和 II 项引入的静态色散  $GVD_I + GVD_{II}$  和  $TOD_I + TOD_{II}$  决定,而 III 项引入的动态色散  $GVD_{III}$  和  $TOD_{III}$  都等于零<sup>[9]</sup>。由此可定义:

$$GVD_{\text{total}}(\omega) = GVD_I(\omega) + GVD_{II}(\omega), \quad (8)$$

$$TOD_{\text{total}}(\omega) = TOD_I(\omega) + TOD_{II}(\omega), \quad (9)$$

I 是光栅离焦量  $L_1 - f$  的函数:

$$GVD_I(\omega) = \frac{d^2\phi(\omega)}{d\omega^2} = \frac{-16\pi^2 m^2 c (L_1 - f)}{d_{\text{eff}}^2 \omega^3 \cos^3 \theta}, \quad (10)$$

$$TOD_I(\omega) = \frac{d^3\phi(\omega)}{d\omega^3} = \frac{48\pi^2 m^2 c (L_1 - f)}{d_{\text{eff}}^2 \omega^4 \cos^3 \theta} \left( 1 + \frac{2\pi m c \sin \theta}{d_{\text{eff}} \omega \cos^2 \theta} \right), \quad (11)$$

II 是光栅间距  $L_2$  的函数:

$$GVD_{II}(\omega) = \frac{d^2\phi(\omega)}{d\omega^2} = \frac{16\pi^2 m'^2 c L_2}{d_1^2 \cos^3 \beta \omega^3} (3 \tan^2 \beta - 1), \quad (12)$$

$$TOD_{II}(\omega) = \frac{d^3\phi(\omega)}{d\omega^3} = \frac{-48\pi^2 m'^2 c L_2}{d_1^2 \cos^3 \beta \omega^4} \left( 3 \tan^2 \beta + \frac{2\pi m' c \sin \beta}{d_1 \omega \cos^2 \beta} + \frac{10\pi m' c \tan^3 \beta}{d_1 \omega \cos \beta} - 1 \right), \quad (13)$$

(4)式中的第三项和第四项分别定义为群速度色散(GVD)和三阶色散(TOD),根据(8)式和(9)式可知,  $\phi''(\omega_0) = GVD_{\text{total}}(\omega_0)$ ,  $\phi'''(\omega_0) = TOD_{\text{total}}(\omega_0)$ 。

对于(12)式和(13)式,当  $\beta$  取值使得  $3 \tan^2 \beta - 1 \approx 0$  时,就可在  $GVD_{II}$  取较小正值的情况下获得较大的负的  $TOD_{II}$ 。若此时使  $L_1 - f > 0$ ,则  $GVD_I < 0$ ,  $TOD_I > 0$ 。由于 I 和 II 分别依赖于不同的变量,可分别控制取值,使得  $GVD_{\text{total}} < 0$  且  $TOD_{\text{total}} < 0$ , 这样,就能对高色散晶体引入的正的  $GVD$  和  $TOD$  同时补偿。

### 3 典型实例

选择双光栅快速扫描光学延迟线中光栅参数:  $1/d_1 = 200 \text{ lp/mm}$ ,  $1/d_2 = 500 \text{ lp/mm}$ 。根据(8)式和(9)式可得  $GVD$  和  $TOD$  随光栅离焦量和光栅间距的变化情况,如图 2 所示,  $GVD$  和  $TOD$  在中心波长处同时为负。

当光栅离焦量和光栅间距在 100 mm 范围内变化时,  $GVD$  调节范围为  $0 \geq GVD \geq -50.9 \times 10^3 \text{ fs}^2$ ,  $TOD$  的调节范围为  $0 \geq TOD \geq -11.7 \times 10^4 \text{ fs}^3$ 。实际上,光栅离焦量( $L_1 - f$ )和两光栅间距( $L_2$ )调

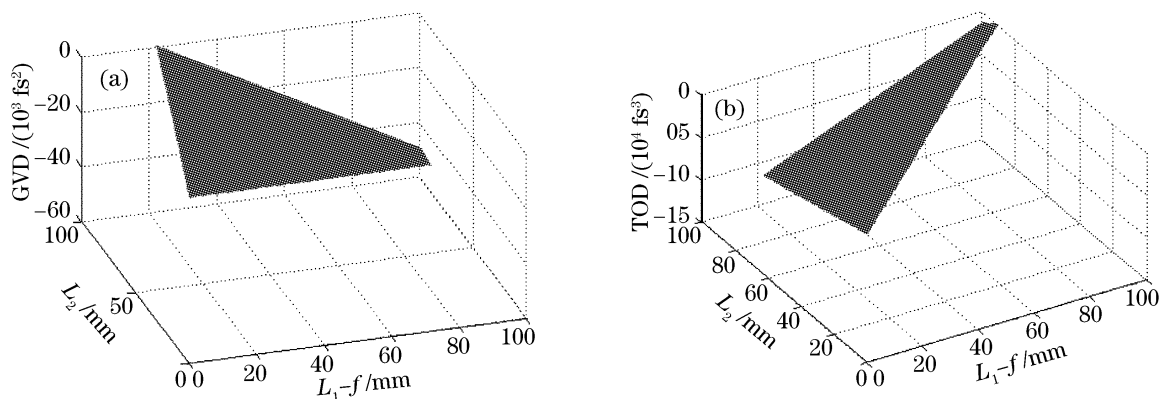


图 2 GVD 和 TOD 随光栅离焦量和光栅间距变化的曲线

Fig. 2 GVD and TOD versus defocusing amount  $L_1 - f$  and distance between gratings  $L_2$ 

节范围越大的话, GVD 和 TOD 的调节范围也会相应增大。

考虑利用快速扫描光学延迟线对铌酸锂晶体引入的 GVD 和 TOD 进行补偿, 比较双光栅快速扫描光学延迟线和单光栅快速扫描光学延迟线的色散补偿能力。以光学相干层析成像系统为例<sup>[3]</sup>, 光源中心波长为  $1310 \text{ nm}$ , 带宽  $\Delta\lambda = 65 \text{ nm}$ ; 单光栅快速扫描光学延迟线的光栅参数  $1/d = 236.8 \text{ lp/mm}$ ; 相位调制器内置铌酸锂晶体, 其长度约为  $75 \text{ mm}$ , 晶体引入的 GVD 和 TOD 由下式决定<sup>[10,11]</sup>:

$$GVD_{\text{material}}(\omega) = \frac{\lambda^3 l_m}{2\pi c^2} \frac{d^2 n_m(\omega)}{d\lambda^2}, \quad (14)$$

$$TOD_{\text{material}}(\omega) = \frac{-\lambda^4 l_m}{4\pi^2 c^3} \left[ \frac{3d^2 n_m(\omega)}{d\lambda^2} + \frac{\lambda d^3 n_m(\omega)}{d\lambda^3} \right], \quad (15)$$

如果将单光栅快速扫描光学延迟线的光栅常量看作  $d_{\text{eff}}$ , 则其色散性质可由(10)式和(11)式决定。对中心波长处 GVD 补偿后, 剩余色散由下式决定:

$$GVD_{\text{residual}}(\omega) = GVD_{\text{material}}(\omega) + GVD_{\text{I}}(\omega), \quad (16)$$

$$TOD_{\text{residual}}(\omega) = TOD_{\text{material}}(\omega) + TOD_{\text{I}}(\omega), \quad (17)$$

如果使用上述光栅常量的双光栅快速扫描光学

延迟线替代光学相干层析成像系统中的单光栅快速扫描光学延迟线, 则根据双光栅快速扫描光学延迟线的色散公式(8)和(9)可知, 当  $L_1 - f = 62.3 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 86.4 \text{ mm}$  时, GVD 和 TOD 在中心波长处能同时得到补偿, 剩余色散由下式决定:

$$GVD_{\text{residual}}(\omega) = GVD_{\text{material}}(\omega) + GVD_{\text{total}}(\omega), \quad (18)$$

$$TOD_{\text{residual}}(\omega) = TOD_{\text{material}}(\omega) + TOD_{\text{total}}(\omega). \quad (19)$$

根据(16)式~(19)式和上述补偿条件, 光谱范围内剩余 GVD 和 TOD 如图 3 所示, 曲线 A 和 B 分别对应于双光栅快速扫描光学延迟线和单光栅快速扫描光学延迟线。

由图 3 可见, 与单光栅快速扫描光学延迟线相比, 双光栅快速扫描光学延迟线可同时对 GVD 和 TOD 在中心波长处进行补偿, 而单光栅快速扫描光学延迟线只能对 GVD 进行补偿, TOD 在中心波长处还剩大约  $10^5 \text{ fs}^3$  没能补偿。而且, 在光源光谱范围内, 使用单光栅快速扫描光学延迟线进行色散补偿后剩余 GVD 和 TOD 的范围分别为

$$3.6 \times 10^3 \text{ fs}^2 \geq GVD \geq -3.6 \times 10^3 \text{ fs}^2,$$

$$10.9 \times 10^4 \text{ fs}^3 \geq TOD \geq 9.5 \times 10^4 \text{ fs}^3,$$

使用双光栅快速扫描光学延迟线进行色散补偿后剩

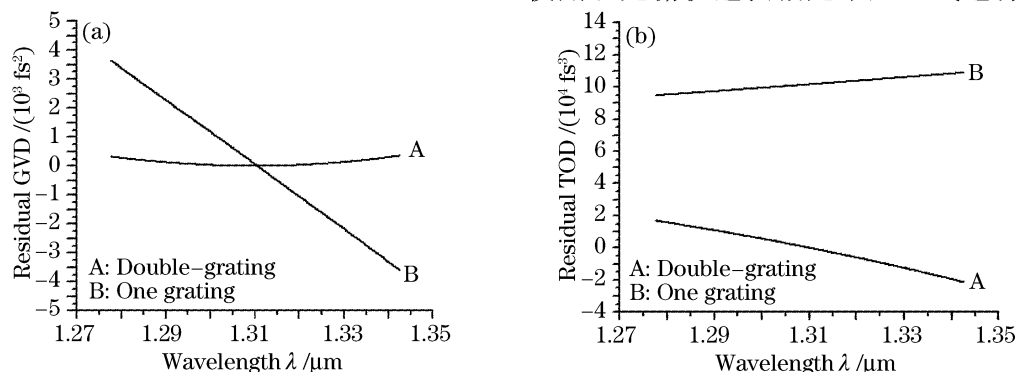


图 3 双光栅快速扫描光学延迟线和常规快速扫描光学延迟线色散补偿后剩余 GVD(a)和 TOD(b)曲线

Fig. 3 Residual GVD (a) and TOD (b) compensated by double-grating based rapid scanning optical delay line (curve A) and conventional rapid scanning optical delay line (curve B)

余  $GVD$  和  $TOD$  的范围分别为

$$0.36 \times 10^3 \text{ fs}^2 \geq GVD \geq 0,$$

$$1.7 \times 10^4 \text{ fs}^3 \geq TOD \geq -2.1 \times 10^4 \text{ fs}^3,$$

因此,利用双光栅快速扫描光学延迟线可以对晶体引入的  $GVD$  和  $TOD$  同时进行很好的补偿。

## 4 结 论

提出了光学相干层析成像中基于双光栅快速扫描光学延迟线的色散补偿方法。双光栅快速扫描光学延迟线不仅具备了常规单光栅快速扫描光学延迟线分别控制群延迟和相延迟的能力,而且可以同时对其  $GVD$  和  $TOD$  进行理想补偿。实例中的双光栅快速扫描光学延迟线,如果光栅离焦量和光栅间距在 100 mm 范围内变化,对应的色散调节能力为

$$0 \geq GVD \geq -50.9 \times 10^3 \text{ fs}^2,$$

$$0 \geq TOD \geq -11.7 \times 10^4 \text{ fs}^3.$$

利用该双光栅快速扫描光学延迟线替代原光学相干层析成像系统中的单光栅快速扫描光学延迟线,对铌酸锂晶体引入的色散进行补偿,则当  $L_1 - f = 62.3 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 86.4 \text{ mm}$  时,可同时对中心波长处的  $GVD$  和  $TOD$  完全补偿,其它波长处的剩余色散比常规单光栅快速扫描光学延迟线补偿效果要好得多。基于双光栅快速扫描光学延迟线的色散补偿方法,适用性范围广,可适用光纤光学相干层析成像和自由空间光学相干层析成像系统,而且不受工作波段限制。

## 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 Jun Zhang, Bin Rao, Zhongping Chen. Fourier domain functional optical coherence tomography[C]. *Pro. SPIE*, 2004, **5771**: 8~14
- 3 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 (in Chinese)  
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
- 4 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
- 5 Yuchuan Chen, Xingde Li. Dispersion management up to the third order for real-time optical coherence tomography involving a phase or frequency modulator[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24): 5968~5978
- 6 I-Jen Hsu, Chih-Wei Lu, Meng-Tsan Tsai *et al.*. Time-independent dispersion compensation in rapid-scanning optical coherence tomography[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5316**: 187~195
- 7 Andrei V. Zvyagin, Elwyn D. J. Smith, David D. Sampson. Delay and dispersion characteristics of a frequency-domain optical delay line for scanning interferometry[J]. *Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(2): 333~341
- 8 Wang Yong, Zhang Weili, Chai Lu *et al.*. Calculation of the dispersion with angular misalignment of grating pair compressor by ray-tracing method[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(5): 481~483 (in Chinese)  
王勇,张伟力,柴路等. 压缩光栅不平行度对色散影响的光线追迹分析[J]. *光电子 • 激光*, 2000, **11**(5): 481~483
- 9 Elwyn D. J. Smith, Andrei V. Zvyagin, David D. Sampson. Real-time dispersion compensation in scanning interferometry[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(22): 1998~2000
- 10 R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker *et al.*. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation[J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(7): 483~485
- 11 Gan Fuxi. *Information Materials* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2000. 579~581 (in Chinese)  
干福熹. *信息材料*[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000. 579~581