

# 基于 Gires-Tournois 标准具的色散补偿优化设计

刘玉红<sup>1,2</sup>, 刘宁亮<sup>1,2</sup>, 陈建军<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>华中农业大学理学院, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup>华中农业大学应用物理研究所, 湖北 武汉 430070

**摘要** 利用传输矩阵法推导了 Gires-Tournois(G-T)标准具的群时延和色散特性,分析了将 G-T 标准具用于多通道色散补偿的原理,并使用级联 G-T 标准具来提升色散补偿能力。介绍了一种基于温度控制的级联 G-T 标准具色散补偿装置;通过控制各级标准具的温度来调整标准具内折射率参数,以实现目标色散的拟合。利用 Matlab 软件进行仿真验证,模拟结果表明:该装置可以同时补偿 C 波段和 L 波段的全通道色散,并且色散补偿精度高,群时延抖动小,符合高速率光通信系统色散补偿的要求。

**关键词** 光通信; 可调色散补偿; Gires-Tournois 标准具; 温度控制

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0606003

## Optimized Design for Dispersion Compensation Based on Gires-Tournois Etalon

Liu Yuhong<sup>1,2</sup>, Liu Ningliang<sup>1,2</sup>, Chen Jianjun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup>Institute of Applied Physics, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** Group delay and dispersion properties of a Gires-Tournois (G-T) etalon are deduced with the transfer matrix, the principle of using G-T etalon in multi-channel dispersion compensation is analyzed, and the cascaded G-T etalons are proposed to improve the dispersion compensation capacity. A dispersion compensation device based on cascaded G-T etalons with temperature control is introduced. When we control the inner temperature of each etalon, the refractive index of etalon can be adjusted, and the fitting for the target dispersion can be realized. The simulation is carried out with Matlab software. The simulation results show that the device could compensate all channel dispersion of both C and L bands with high dispersion compensation precision and small group delay ripple. In conclusion, the device can meet the dispersion compensation requirement of high speed optical communication system.

**Key words** optical communications; tunable dispersion compensation; Gires-Tournois etalon; temperature control

**OCIS codes** 060.2330; 130.3120; 130.2035

## 1 引言

随着互联网技术的高速发展,运营商对光通信系统的容量需求越来越大。单通道通信速率已达到 100 Gbit/s,通信速率的大幅提高导致传输系统对色散的容限大幅降低,因此对色散补偿精度提出了更高的要求。传统利用色散补偿光纤(DCF)进行固定色散补偿的技术已经难以满足高速率下色散补偿精度的要求<sup>[1]</sup>。在固定色散补偿的基础上,结合可调色散补偿技术,可以精确、灵活地补偿线路中的残余色散,从而实现高精度色散补偿的目的。因此,高精度可调色散补偿技术是大容量、高速率光通信系统亟需解决的难题。

目前常见的可调色散补偿方案主要包括光纤布拉格光栅(FBG)色散补偿技术、光子晶体光纤(PCF)色

收稿日期: 2017-01-16; 收到修改稿日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(61308028)

作者简介: 刘玉红(1987—),女,硕士,工程师,主要从事集成光学、光纤传感和光器件等方面的研究。

E-mail: liuyuhong1234@163.com

\* 通信联系人。E-mail: chenjianjun@mail.hzau.edu.cn

散补偿技术、电子色散补偿(EDC)技术以及基于 Gires-Tournois(G-T)标准具的可调色散补偿方案<sup>[2-4]</sup>。信号光中不同波长的光谱分量通过 G-T 标准具后的传输光程不同,从而产生群时延,通过调整 G-T 标准具的厚度(或介质的折射率)和改变信号光经过标准具的群时延特性,即可实现动态色散补偿<sup>[4]</sup>。

利用 G-T 标准具原理实现的可调色散补偿方案具有结构简单、成本低廉和多通道补偿等优势<sup>[4]</sup>。此外,通过多个 G-T 标准具串行级联的方法,可以实现更大的色散补偿范围、更大的工作带宽以及更小的群时延抖动<sup>[4-8]</sup>。介绍了 G-T 标准具的传输矩阵色散计算方法和级联 G-T 标准具的色散补偿系统的设计原理,给出了基于级联 G-T 标准具实现的可同时补偿 C 波段和 L 波段的色散补偿器的设计实例及仿真结果。

## 2 G-T 标准具的色散补偿原理

图 1 为 G-T 标准具结构示意图。G-T 标准具由两个平行反射面组成,其中一个反射面的反射率为  $R$ ,另一个反射面的反射率近似为 1,两个反射面  $S_1$ 、 $S_3$  之间由折射率为  $n$ 、厚度为  $d$  的介质  $S_2$  填充<sup>[3]</sup>。

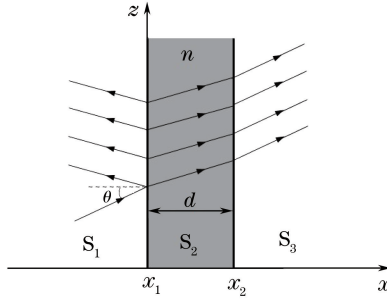


图 1 G-T 标准具结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of G-T etalon

利用传输矩阵分析 G-T 标准具的群时延和色散。根据传输矩阵理论,空间电场分布可以简化为沿  $x$  轴正向、反向传播的电场分量  $E_F$  和  $E_B$ ,求解矩阵  $\begin{bmatrix} E_F \\ E_B \end{bmatrix}$  便可得到 G-T 标准具的电场分布。定义 G-T 标准具的传输矩阵为  $T$ ,即

$$\begin{bmatrix} E_F(x_1^-) \\ E_B(x_1^-) \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} E_F(x_2^+) \\ E_B(x_2^+) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中上标-表示  $x$  负坐标区域,上标+表示  $x$  正坐标区域。G-T 标准具的传输矩阵  $T$  可以表示为  $x = x_1$  界面传输矩阵  $T_{12}$ 、中介质层传输矩阵  $T_2$  和  $x = x_2$  界面传输矩阵  $T_{23}$  的乘积,即

$$T = T_{12} T_2 T_{23} = \frac{1}{t_{12}} \begin{bmatrix} 1 & r_{12} \\ r_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\phi) & 0 \\ 0 & \exp(-j\phi) \end{bmatrix} \frac{1}{t_{23}} \begin{bmatrix} 1 & r_{23} \\ r_{23} & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{t_{12} t_{23}} \begin{bmatrix} r_{12} r_{23} \exp(-j\phi) + \exp(j\phi) & r_{12} \exp(-j\phi) + r_{23} \exp(j\phi) \\ r_{12} \exp(j\phi) + r_{23} \exp(-j\phi) & r_{12} r_{23} \exp(j\phi) + \exp(-j\phi) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $t_{12}$  为光从  $S_1$  入射到  $S_2$  介质的透射系数, $t_{23}$  为光从  $S_2$  入射到  $S_3$  介质的透射系数, $r_{12}$  为  $x = x_1$  腔面的反射系数, $r_{23}$  为  $x = x_2$  腔面的反射系数, $\phi$  为腔内相移。假设只有入射波  $E_F(x_1^-)$ ,即  $E_B(x_2^+) = 0$ ,令  $r_{12} = r = -\sqrt{R}$ , $r_{23} = -1$ , $\phi = 2\pi n d \cos \theta / \lambda$  ( $\theta$  为入射角),则 G-T 腔的反射系数为

$$r_{gt} = \frac{E_B(x_1^-)}{E_F(x_1^-)} = \frac{r_{12} \exp(j\phi) + r_{23} \exp(-j\phi)}{r_{12} r_{23} \exp(-j\phi) + \exp(j\phi)} = \frac{r \exp(j\phi) - \exp(-j\phi)}{-r \exp(-j\phi) + \exp(j\phi)}. \quad (3)$$

利用(3)式求反射波相对入射波的相位延迟  $\Phi_{gt}$ ,即  $r_{gt}$  的辐角主值,可得

$$\Phi_{gt} = \arctan \left[ \frac{(1-R) \sin(2\phi)}{(1+R) \cos(2\phi) - 2\sqrt{R}} \right]. \quad (4)$$

将群相移对角频率求导,可得 G-T 腔的群时延  $\tau_g$ ,利用 Mathematica 软件计算可得

$$\tau_g = \frac{d\Phi_{gt}}{d\omega} = \frac{1}{F_{FSR}} \frac{2(1-R)}{(1+R) - 2\sqrt{R} \cos(2\phi)}, \quad (5)$$

式中  $F_{\text{FSR}}$  为自由光谱区,  $F_{\text{FSR}} = c / (2nd \cos \theta)$ 。由(5)式可知,群时延  $\tau_g$  为周期性函数,其频率周期为  $F_{\text{FSR}}$ ,幅度由  $F_{\text{FSR}}$  和  $R$  共同决定。将群时延对波长求导,得到色散的表达式为

$$D = \frac{d\tau_g}{d\lambda} = \frac{16\pi (nd \cos \theta)^2 (1-R) \sqrt{R} \sin(2\phi)}{c\lambda^2 [1-R-2\sqrt{R} \cos(2\phi)]^2}, \quad (6)$$

式中  $\lambda$  为入射光波长。通过合理地选择 G-T 标准具的介质材料、入射角及厚度,可使 G-T 标准具的  $F_{\text{FSR}}$  与光纤通信系统中的实际信道间隔相匹配,从而实现多信道同时补偿<sup>[7-8]</sup>。

### 3 级联 G-T 标准具的色散补偿系统设计

在色散补偿系统设计中,利用 G-T 标准具自身的物理特性,通过温度和应力等控制方法,精确地调整 G-T 标准具的厚度或材料的折射率。改变信号光经过标准具的群时延和色散特性,以获取期望的色散补偿效果<sup>[9]</sup>。此外,让信号光经过多个级联的 G-T 标准具,根据时延的可叠加性可得输出信号的群时延特性为所有通道群时延  $\tau_g$  的叠加。通过合理的整体设计,可以实现更大的色散补偿范围和更宽的工作带宽,并获取更小的群时延抖动。

介绍了一种基于温度调节的级联 G-T 标准具色散补偿方案,级联 G-T 标准具原理框图如图 2 所示。G-T 标准具通过光纤串联,待补偿信号光从入口输入,经过多级 G-T 标准具传输后输出。光纤与 G-T 标准具的耦合可以通过双芯光纤准直器与 G-T 腔形成的反射光路实现<sup>[10-11]</sup>,其单级损耗可控制在 0.4 dB 左右,即耦合效率约为 91.2%。光信号经过多级 G-T 标准具后损耗增加,以 10 级级联 G-T 标准具为例,系统最大损耗约为 5 dB。色散补偿模块一般用于较长距离的光传输网中,在工程应用中,一般都会配置如掺铒光纤放大器(EDFA)等光放大器来对光信号进行放大。介质层采用硅晶体材料,硅晶体具有良好的热光特性和加工特性,便于温度控制<sup>[9]</sup>。多路温控系统可以实时监控并调节各个 G-T 标准具内的温度,利用硅晶体的热光效应,通过改变介质折射率,即可实现色散调节。

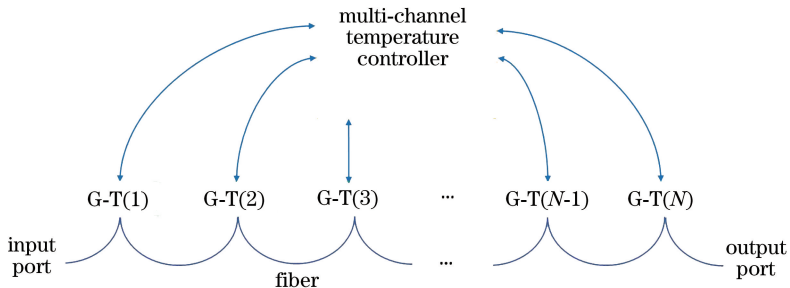


图 2 级联 G-T 标准具原理框图

Fig. 2 Schematic of cascaded G-T etalons

利用硅晶体良好的热光特性,通过调节 G-T 标准具的温度来改变信号光经过标准具的群时延和色散。图 3 为不同温度下单个 G-T 标准具的群时延和色散仿真曲线。图中,  $F_{\text{FSR}} = 100 \text{ GHz}$ , 反射率  $R = 30\%$ , 当温度从  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  变为  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  时,群时延曲线和色散曲线的波峰位置偏移了  $0.43 \text{ nm}(54 \text{ GHz})$ 。

由图 3 可见,标准具内温度的变化对群时延及色散曲线周期的影响几乎可以忽略,而群时延及色散曲线发生了明显的横向位移。这是由于相比  $F_{\text{FSR}}$ ,群时延和色散中的相位因子对折射率变化更为敏感。利用这一特性,当信号光经过多个相同的 G-T 标准具后,通过独立控制各个标准具的温度,可以在几乎不影响周期的情形下叠加获得满足需求的群时延曲线。

### 4 优化设计和仿真

图 4 为 10 级级联 G-T 标准具在 C 波段色散补偿的仿真曲线。图中 10 个 G-T 标准具的  $F_{\text{FSR}} = 100 \text{ GHz}$ , 反射率  $R = 30\%$ , 实现的色散为  $-400 \text{ ps/nm}$ , 带宽为  $40 \text{ GHz}$ 。图 4(a)、(b)为截取原始仿真结果的部分波段( $1545.8 \sim 1548 \text{ nm}$ )的结果,原始仿真结果对应的波长范围为  $1528 \sim 1568 \text{ nm}$ , 涵盖整个 C 波段。

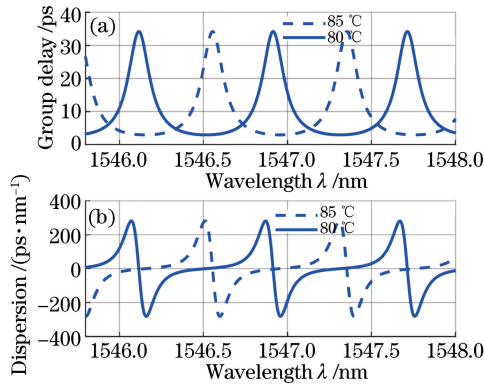


图 3 不同温度下单个 G-T 标准具的群时延和色散仿真曲线。(a)群时延;(b)色散

Fig. 3 Simulation curves of group delay and dispersion of single G-T etalon under different temperatures.

(a) Group delay; (b) dispersion

图 4(a)中黑色曲线为单个 G-T 标准具群时延曲线;蓝色曲线为级联 G-T 标准具群时延拟合曲线,由各级标准具群时延叠加而成,其在中心波长(1546.12,1546.92,1547.72 nm)附近近似为直线,其斜率表示色散。色散曲线如图 4(b)所示,中心波长附近的色散值为 $-400 \text{ ps/nm}$ 左右。图 4(c)、(d)分别为整个 C 波段所有通道的色散和群时延抖动。

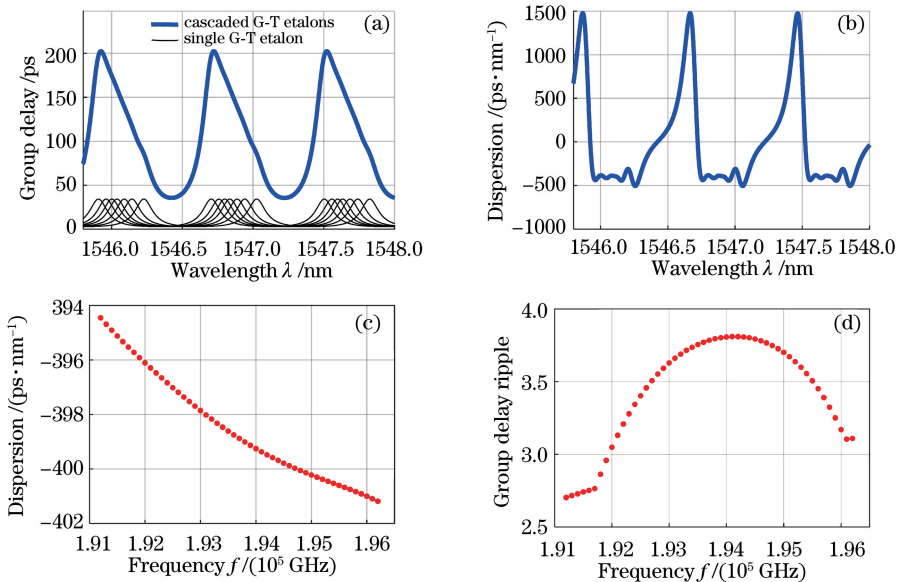


图 4 10 级级联 G-T 标准具在 C 波段色散补偿的仿真曲线。(a)群时延;(b)色散;

(c)所有通道的色散;(d)所有通道的群时延抖动

Fig. 4 Simulation curves of dispersion compensation of ten-level cascaded G-T etalons at C band.

(a) Group delay; (b) dispersion; (c) dispersion of all channels; (d) group delay ripple of all channels

分析上述仿真结果可得,对于频率范围为 $191.2 \sim 196.2 \text{ THz}$ 、波长间隔为 $100 \text{ GHz}$ 的 51 个信道,理论色散值的范围为 $-394.49 \sim -401.19 \text{ ps/nm}$ ,群时延抖动最大值仅为 $3.81 \text{ ps}$ 。该结果证明上述设计的色散补偿器具有较高的色散精度,可以同时补偿多个信道的色散。

随着通信容量不断增大,未来光纤通信系统要求光器件能够同时支持 C 波段和 L 波段的信号传输。对所设计的色散补偿系统在 $186.2 \sim 196.2 \text{ THz}$ 频率范围内的仿真结果如图 5 所示。由图 5 可见,该系统无法正常工作于频率为 $186.2 \sim 191.2 \text{ THz}$ 的 L 波段。

通过增加 G-T 标准具的级联数目,可以实现 C 波段和 L 波段的全通道色散补偿。图 6 为 14 级级联 G-T 标准具在 C 波段和 L 波段的色散仿真结果。将 14 个 $F_{\text{FSR}} = 100 \text{ GHz}$ 、反射率 $R = 30\%$ 的 G-T 标准具进行级联,实现 C 波段和 L 波段处的色散为 $-400 \text{ ps/nm}$ ,带宽为 $40 \text{ GHz}$ 。图 6(a)为对 C 波段 $1545.8 \sim$

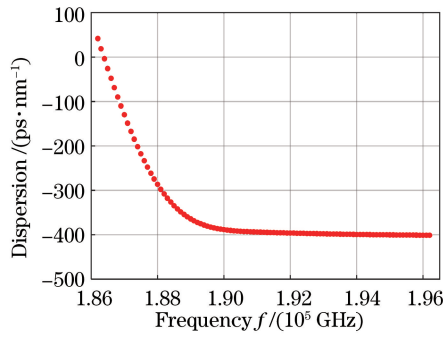


图 5 10 级级联 G-T 标准具在 C 波段和 L 波段的色散

Fig. 5 Dispersion of ten-level cascaded G-T etalons at C band and L band

1548 nm 范围的群时延进行拟合的结果,图 6(b)为对 L 波段 1606.8~1609 nm 范围的群时延拟合结果,原始仿真结果的对应波长范围为 1528~1610 nm,涵盖整个 C 波段和 L 波段。图 6(c)、(d)为整个 C 波段和 L 波段的所有通道的色散和群时延抖动。可见,在 186.2~196.2 THz 频率范围内,理论色散值分布在  $-391.13 \sim -407.67$  ps/nm 之间,群时延抖动最大值为 3.1 ps。

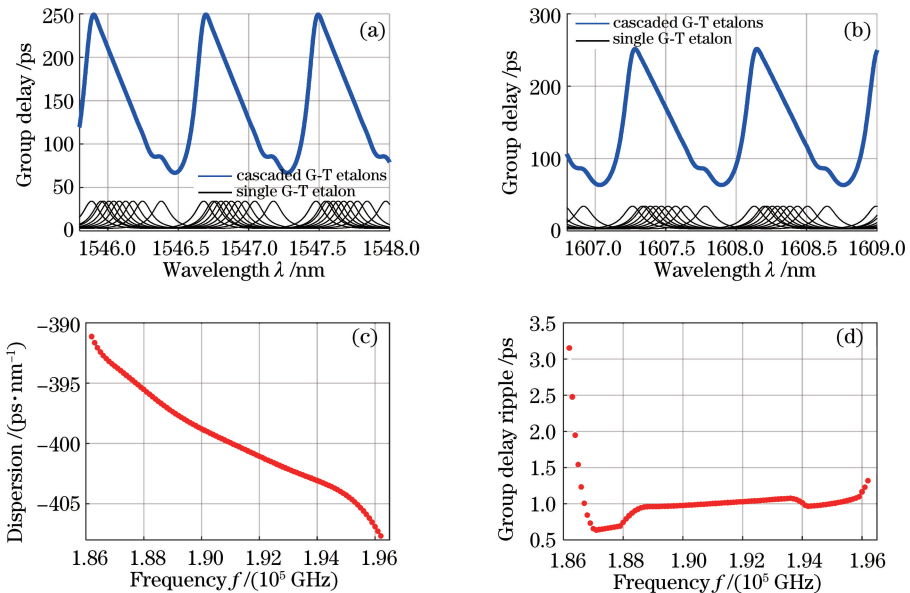


图 6 14 级级联 G-T 标准具在 C 波段和 L 波段的仿真结果。(a) C 波段群时延;(b) L 波段群时延;(c)色散;(d)群时延抖动

Fig. 6 Simulation results of 14-level cascaded G-T etalons at C band and L band. (a) Group delay at C band;

(b) group delay at L band; (c) dispersion; (d) group delay ripple

## 5 结 论

提出的基于温控系统的级联 G-T 标准具色散补偿方案相对于其他补偿技术具有更多优势。通过调整各级 G-T 标准具的温度,能够实现动态可调的色散补偿功能,以满足各种系统的需求。以光纤通信 C 波段和 L 波段色散补偿作为设计案例,验证了该色散补偿方案具有同时对 C 波段和 L 波段多通道进行高精度色散补偿的能力,并且色散补偿的群时延抖动较小,能够满足 100 Gbit/s 高速率光通信系统的色散容限要求。硅材料的设计工艺简单成熟且成本低廉,可以大规模应用于光纤通信系统中。

## 参 考 文 献

[1] Pan Xiaolong, Zhang Jinsong. Dispersion compensation technology in high-speed optical transmission system[J]. World Telecommunications, 2002(7): 41-43.

潘小龙, 张劲松. 用于高速光传输系统的色散补偿技术[J]. 世界电信, 2002(7): 41-43.

- [2] Wang Rui, Zhang Guoping, Chen Wei. Latest progress in dispersion compensation technologies[J]. Study on Optical Communications, 2008, 34(6): 27-29.  
王 锐, 张国平, 陈 伟. 色散补偿技术的最新进展[J]. 光通信研究, 2008, 34(6): 27-29.
- [3] Zhu Zhen. Chromatic dispersion compensation for high-speed communication systems[J]. Electronics Optics & Control, 2003, 10(2): 51-54.  
朱 震. 高速光通信系统中的色散补偿技术[J]. 电光与控制, 2003, 10(2): 51-54.
- [4] Li Lin, Zhao Ling, Gao Kan, *et al.* Design of a dual-cavity Gires-Tournois interferometer for multi-channel chromatic dispersion[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(8): 802-805.  
李 琳, 赵 岭, 高 侃, 等. 用于多信道色散补偿的复合腔 G-T 干涉仪设计[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(8): 802-805.
- [5] Gerd Keiser. Optical fiber communications[M]. Pu Tao, Xu Junhua, Su Yang, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015: 91-113.  
格尔德·凯瑟. 光纤通信[M]. 蒲 涛, 徐俊华, 苏 洋, 译. 北京: 电子工业出版社, 2015: 91-113.
- [6] Sugden C A, Shu X, Kennedy L A, *et al.* Gires-Tournois etalons and dispersion compensation: US7263257[P]. 2007-08-28.
- [7] Zhang Q, Zhang J Z, Yang J. Multi-channel compensation of chromatic dispersion slope using etalons with wavelength dependent variable reflectivity: US20030035608[P]. 2002-08-09.
- [8] Moss D J, McLaughlin S, Randall G, *et al.* Multichannel tunable dispersion compensation using all-pass multicavity etalons[J]. Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 2002: 7581537.
- [9] Ye Hui, Hou Changlun. Optical materials and optical components fabrication process[M]. Zhejiang: Zhejiang University Press, 2013: 10-50.  
叶 辉, 侯昌伦. 光学材料与元件制造[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2013: 10-50.
- [10] Li Xuyou, Xu Zhenlong, Liu Pan, *et al.* Short polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(6): 0605006.  
李绪友, 许振龙, 刘 攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 0605006.
- [11] Kang Zexin, Sun Jiang, Ma Lin, *et al.* Decoupling dual measurement sensor system of temperature and strain based on twin-core fiber cascaded with fiber Bragg grating[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0506004.  
康泽新, 孙 将, 马 林, 等. 基于双芯光纤级联布拉格光纤光栅的温度与应力解耦双测量传感系统[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0506004.