

文章编号: 0258-7025(2010)08-1996-05

一种新型长周期光纤光栅扭曲特性的研究

关寿华^{1,2} 于清旭¹ 郑建洲^{1,2}

(¹ 大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024; ² 大连民族学院理学院, 辽宁 大连 116600)

摘要 发现高频聚焦 CO₂ 激光脉冲三束对称写入法制备的长周期光纤光栅(LPFG)具有新奇的扭曲特性:首先,当被扭曲光纤和长周期光纤光栅长度接近时,扭曲特性有明显的方向相关性,顺时针扭曲时,谐振波长和峰值损耗随扭曲率的增大而减小;逆时针扭曲时,谐振波长和峰值损耗随扭曲率的增大而增大,并与之成良好的线性关系,其平均灵敏度分别为 0.133 nm/(rad·m⁻¹)和 0.061 dBm/(rad·m⁻¹);其次,当被扭曲光纤远长于长周期光纤光栅时,扭曲特性随扭曲率变化周期性起伏,而且起伏次数(10次)超过光纤被扭曲周数(6周),但整体特性基本保持不变。利用扭转光栅导致椭圆双折射理论对扭曲特性进行了解释,并发现光栅内部固有线性双折射对扭曲特性有着重要的作用。

关键词 光栅;长周期光纤光栅;扭曲特性;高频 CO₂ 激光脉冲;三束对称写入法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103708.1996

Study on Torsion Characteristics of a New-Type Long-Period Fiber Grating

Guan Shouhua^{1,2} Yu Qingxu¹ Zheng Jianzhou^{1,2}

¹ School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China
² College of Sciences, Dalian Nationalities University, Dalian, Liaoning 116600, China

Abstract It is found that the torsion characteristics of the long-period fiber grating (LPFG) are novel, which is written symmetrically by three-beam focused high-frequency CO₂ laser pulses. Firstly, when the length of the twisted fiber is close to the length of the LPFG, the torsion characteristics have obvious relevance with the twisting direction. If the LPFG is twisted clockwise, the resonant wavelength and the peak loss will decrease linearly with the twist rate increasing. If the LPFG is twisted anticlockwise, the resonant wavelength and the peak loss will increase linearly with the twist rate increasing. The average sensitivities of resonant wavelength and peak loss are 0.133 nm/(rad·m⁻¹) and 0.061 dBm/(rad·m⁻¹) respectively. Secondly, when the twisted fiber is much longer than the LPFG, the torsion characteristics oscillate periodically; and the number of the oscillation (10 periods) overcomes the number of turns (6 turns) that the fiber has been twisted. The overall characteristics are basically unchanged if the volatilities are ignored. The torsion characteristics are analyzed theoretically by taking into the consideration of the twist-induced elliptic birefringence. Moreover it is found that the linear birefringence in the LPFG also plays a decisive role in the torsion characteristics.

Key words gratings; long-period fiber gratings; torsion characteristics; high-frequency CO₂ laser pulses; three-beam symmetrical writing method

收稿日期: 2009-11-16; 收到修改稿日期: 2010-03-07

基金项目: 国家自然科学基金(30470416)资助课题。

作者简介: 关寿华(1972—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事光纤传感技术方面的研究。

E-mail: gsh@dlnu.edu.cn

导师简介: 于清旭(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事激光器件、红外激光光谱学以及光纤传感技术等方面的研究。E-mail: yuqx@dlnu.edu.cn

1 引言

长周期光纤光栅(LPFG)是近年发展起来的一种新型光纤无源器件。自1996年Vengsarkar等^[1]制成世界上第一根长周期光纤光栅以来,人们对它的制备、光谱特性、敏感特性和应用等方面进行了大量研究^[2~7],其中扭曲特性是一个重要的敏感特性,由于光栅形成机理及写入方法不同,因此扭曲特性也各异。Wang等^[8]发现用腐蚀刻槽法所制长周期光纤光栅具有扭曲特性。王义平等^[9~11]用高频CO₂激光脉冲单束侧向曝光法制成长周期光纤光栅,并通过研究发现此种光栅的扭曲特性具有扭曲方向相关性,该相关性同时受到被扭曲光纤长度的影响。

本文对用高频聚焦CO₂激光脉冲三束对称写入法制备的长周期光纤光栅的扭曲特性进行了比较系统的研究,发现了未见于以往报道的扭曲特性,并用扭曲引起椭圆双折射从而致使偏振态发生变化的相关理论对此种独特的扭曲特性进行了比较合理的解释。

2 长周期光纤光栅扭曲实验

实验所用长周期光纤光栅是用高频聚焦CO₂激光脉冲三束对称写入法^[12]在Corning SMF-28单模光纤中制成的。其周期为400 μm,长度L₀为50 mm,谐振波长和峰值损耗分别为1544.665 nm和-9.965 dB。由于长周期光纤光栅对温度比较敏感,因此是在比较稳定的室温环境中,利用如图1所示实验装置测试此种光纤光栅扭曲特性^[13]。光栅左侧光纤固定在角度盘轴心处,可以随着角度盘的旋转而转动;右端光纤连接光纤光谱分析仪,中间光纤一点被固定在一个二维位移系统上,使光纤光栅处于水平直线状态。中心波长为1550 nm的宽谱光源作为输入光源,光谱分析仪用来测量光栅透射

谱。设光纤固定点和角度盘之间距离(即被扭曲的光纤长度)为L₁,当L₀和L₁的值相近时,可称为纯长周期光纤光栅扭曲实验;当L₀ ≪ L₁时,称之为较长光纤被扭曲的长周期光纤光栅扭曲实验。

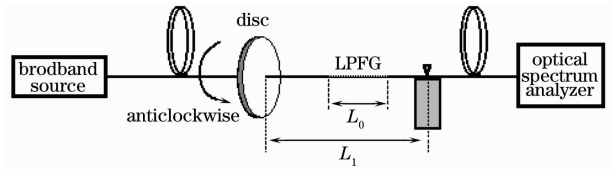


图1 长周期光纤光栅扭曲特性测试装置

Fig.1 Experimental configuration for testing torsion characteristics of the LPFG

2.1 纯长周期光纤光栅扭曲实验

调整位移系统使L₁为150 mm,此时L₁和L₀的值比较接近。测试前,角度盘读数为0°。测试第一步,顺时针旋转角度盘(以逆着光传播方向观察角度盘为准)并带动光栅一起转动,每隔10°观测一次谐振波长和峰值损耗,共旋转100°,此即顺时针扭曲率增加过程;第二步,逆时针逐渐回转,直至角度盘读数为0°;第三步,逆时针继续转动角度盘并观测谐振波长和峰值损耗,共旋转100°,此即逆时针扭曲率增加过程。

测试中谐振波长和峰值损耗的变化如图2所示。图中横坐标表示扭曲率τ = θ/L₁,θ为角度盘的扭转角度,规定逆时针为正,顺时针为负。由图2(a)可见,顺时针扭曲时,随着扭曲率的增加谐振波长向短波方向变化;逆时针扭曲时,随着扭曲率的增加谐振波长向长波方向变化。这说明谐振波长具有扭曲方向相关性。无论顺时针或逆时针扭曲,谐振波长随着扭曲率的增加基本成线性变化,而且整体上也呈线性变化,平均扭曲灵敏度为0.133 nm/(rad·m⁻¹),并且谐振波长在两个方向的变化幅度基本相同。由图2(b)可见,顺时针扭曲

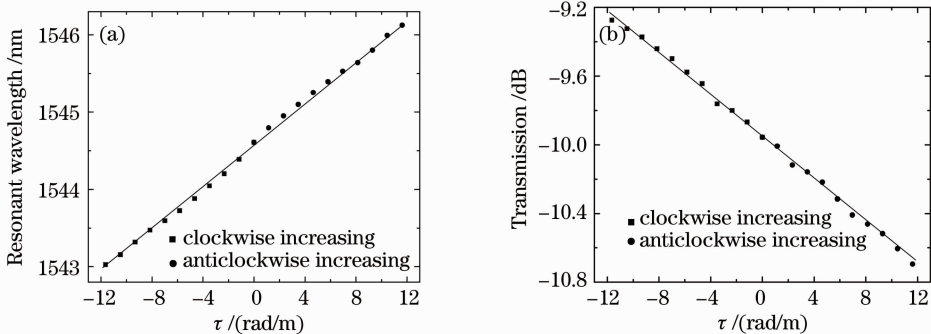
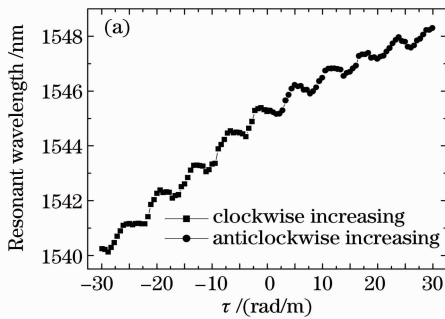


图2 纯长周期光纤光栅的扭曲特性。(a)谐振波长随扭曲率的变化;(b)峰值损耗随扭曲率的变化
Fig.2 Torsion characteristics of pure LPFG. (a) resonant wavelength changes with the torsion rate;
(b) peak loss changes with the torsion rate

时,随着扭曲率的增加峰值损耗减小;而逆时针扭曲时,随着扭曲率的增加峰值损耗增大。说明峰值损耗也具有扭曲方向相关性。同样可以发现,无论顺时针还是逆时针扭曲,峰值损耗随着扭曲率的增加也成线性变化,整体上也呈线性变化,平均灵敏度为 $0.061 \text{ dBm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

2.2 较长光纤被扭曲的长周期光纤光栅扭曲实验

为了分析较长光纤的扭曲对长周期光纤光栅扭曲特性的影响,重新调整位移系统使 L_1 变为 610 mm ,满足 $L_0 \ll L_1$,测试此时扭曲特性。第一步,顺时针旋转角度盘带动光纤光栅一起转动,每隔 20° 观测一次谐振波长和峰值损耗,一共旋转 1080° (3 周),此即顺时针扭曲率增加过程;第二步,逆时针逐渐回转角度盘,直至读数为 0° ;第三步,继续逆时针转动角度盘,同时每隔 20° 观测谐振波长和峰值损耗,一共旋转 1080° (3 周),此即逆时针扭曲率增加过程。这样测试中角度盘一共旋转了 6 周。



测试中透射光谱损耗峰的谐振波长和峰值损耗的变化如图 3 所示。由图 3(a)可知,逆(顺)时针扭曲长周期光纤光栅,随着扭曲率的增加,谐振波长呈波浪式向长波(短波)方向变化,谐振波长平均扭曲灵敏度为 $0.132 \text{ nm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$,并且在扭曲率增加和减少过程中变化幅度基本相同,起伏变化次数也相同(各为 5 次)。谐振波长随着扭曲率增加的变化,类似于一种线性变化和一种周期性变化的叠加。值得注意的是,虽然长周期光纤光栅整体上被扭曲 6 周,但谐振波长却周期性起伏变化了 10 次,大约角度盘每旋转 200° ,则谐振波长就起伏变化一次。由图 3(b)可知,逆(顺)时针扭曲长周期光纤光栅,随着扭曲率的增加,峰值损耗波浪式地增强或减弱,呈现周期性地起伏,起伏周期也为 200° 左右。与谐振波长随扭曲率的变化类似,峰值损耗随扭曲率的变化,也类似于一种线性变化和一种周期性变化的叠加,其平均灵敏度为 $0.060 \text{ dBm}/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

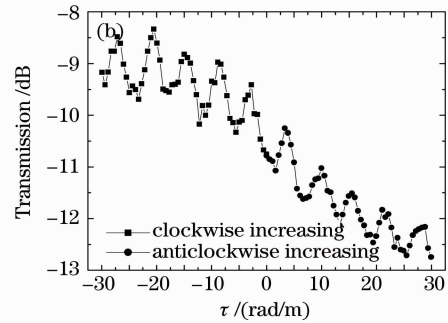


图 3 被扭转光纤较长时的长周期光纤光栅扭曲特性。(a)谐振波长随扭曲率的变化;
(b)峰值损耗随扭曲率的变化

Fig. 3 Torsion characteristics of LPFG twisted with long fiber. (a) resonant wavelength changes with the torsion rate; (b) peak loss changes with the torsion rate

3 扭曲特性分析

高频 CO_2 激光脉冲写入长周期光纤光栅的机制是:由于 SiO_2 对 $10.6 \mu\text{m}$ 波长处的 CO_2 激光有较强吸收,使其温度升高并导致光纤内残余应力释放,从而使折射率发生改变。由于采用的是侧面曝光法,光纤的吸收致使入射光能量沿入射方向逐渐减小,如图 4 所示^[14]。面向入射光的一侧激光能量较强,残余应力释放多,折射率变化大;背向入射光的一侧能量较弱,残余应力释放少,折射率变化较小。因而此种光纤光栅具有固有的线性双折射。本文所用长周期光纤光栅是在如图 5 所示的烧写台^[12]上制成的,垂直入射的 CO_2 激光经过两个成 120° 角的平面镜的反射,形成三束互成 120° 对称入射的激光并对光纤同一点进行曝光致使折射率变

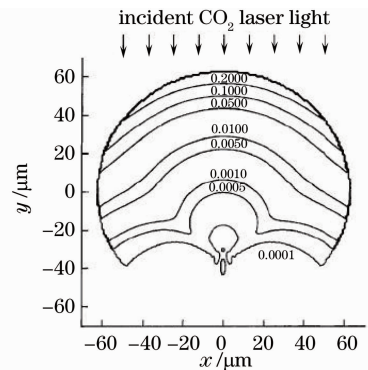


图 4 单侧入射的 CO_2 激光在光纤内的能量分布
Fig. 4 Single-inside CO_2 laser energy distribution across the fiber

化,所制成的光栅横截面内折射率的不均匀性与单光束侧面曝光法所制的光栅不同,因而线性双折射

也不同。当这种具有线性双折射的光栅被扭曲时，光栅扭曲变形及其产生的剪切应力通过弹光效应在光栅中引起椭圆双折射。椭圆双折射的大小与扭曲率成正比，方向与扭曲方向有关，即顺时针扭曲光栅时引起右旋椭圆双折射，逆时针扭曲时引起左旋椭圆双折射^[9]。

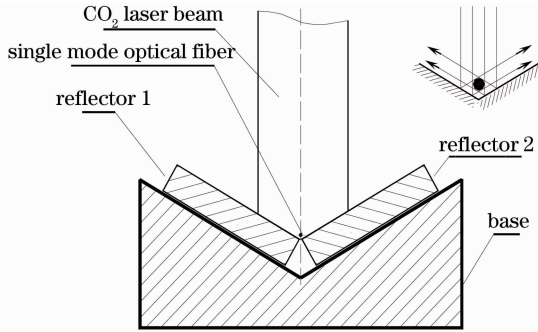


图5 三束对称写入法长周期光纤光栅烧写台

Fig. 5 Writing stage of the LPG with three-beam symmetrical writing method

长周期光纤光栅写入过程中谐振波长 λ_{res}^m 可表示为^[15]

$$\lambda_{\text{res}}^m = (n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}) \Lambda \left[1 + \frac{(\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{\text{eff}}^{\text{cl},m})^2} \frac{d\lambda_{\text{D}}^m}{d\Lambda} \right], \quad (1)$$

式中 $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 分别是纤芯基模和一阶 m 次包层模的有效折射率， $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 是变化量， λ_{D}^m 为对应一阶 m 次包层模的初始谐振波长。由(1)式可看出，谐振波长受 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 的影响，当 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 发生变化时谐振波长也随之变化。当扭曲具有线性双折射的长周期光纤光栅时，光栅扭曲变形和剪切应力通过弹光效应引起的椭圆双折射将使 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 发生变化，进而使纤芯基模和包层模之间的耦合系数发生变化，导致谐振波长和峰值损耗发生变化。由于扭曲引起的椭圆双折射与扭曲率成比例，所以谐振波长和峰值损耗随扭曲率线性变化。不同方向扭曲光栅引起的椭圆双折射的旋转方向相反，而不同旋向的椭圆双折射对 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 和 $\delta n_{\text{eff}}^{\text{cl},m}$ 的影响是反向的，所以逆时针扭曲和顺时针扭曲的效果是相反的：谐振波长分别向长波和短波方向变化，峰值损耗分别增大和减小。

根据实验结果可知，当被扭曲的光纤较长时，本文所制备的长周期光纤光栅的扭曲特性具有扭曲方向相关性，而且有明显的周期性，即随着扭曲率的增加，谐振波长和峰值损耗的变化都出现周期性的起伏，好像是一个线性变化信号和另一个周期性变

化信号的合成。对比 L_1 与 L_0 相近和 $L_0 \ll L_1$ 两种情况下的扭曲特性，可以发现两者的谐振波长和峰值损耗的整体趋势相同（略掉 $L_0 \ll L_1$ 情况下起伏），平均灵敏度也基本相等。因此，较长光纤的扭曲特性的线性变化部分是纯长周期光纤光栅被扭曲引起的。通过折合计算，在顺时针、逆时针一共扭转6周的过程中，纯光栅的扭转仅约为 177° ，因此扭曲特性的周期性起伏应是由光纤扭曲引起的圆双折射所导致的，但这一作用是基于光栅自身固有的线性双折射及扭转所致的椭圆双折射而产生的，并不能孤立存在^[16]；并且光栅自身固有的线性双折射对扭曲特性的影响是很大的^[13]。本文中光纤光栅被扭曲6周，但扭曲特性中的周期性起伏为10次，而单光束侧面曝光法所制备的长周期光纤光栅扭曲实验中，光栅扭转周数与扭曲特性的起伏次数是一样的^[10]。究其原因，是由于这两种光栅自身固有的线性双折射不同，这种不同导致了这两种光纤光栅在“纯”光栅扭转时具有不同的扭曲特性：文中长周期光纤光栅在“纯光栅”扭曲时，谐振波长和峰值损耗都具有扭曲方向相关性，而且与扭曲率具有良好的线性相关性；而单光束侧面曝光法制备的长周期光纤光栅在“纯光栅”扭曲时，仅谐振波长具有扭曲方向相关性并与扭曲率成线性关系。

4 结 论

高频聚焦 CO_2 激光脉冲三束对称写入法制备的新型长周期光纤光栅具有新奇的扭曲特性：有明显的扭曲方向相关性，顺时针扭曲时谐振波长向短波方向变化，峰值损耗减小；逆时针扭曲时谐振波长向长波方向变化，峰值损耗增大。光纤自身扭曲所致圆双折射对光栅扭曲特性有重要影响，但只有当被扭曲光纤长度较长时才会明显显现，从而使扭曲特性产生周期性起伏。光栅内部固有线性双折射对扭曲特性有着决定性的作用，其不仅决定了谐振波长、峰值损耗扭曲特性的整体趋势，而且也影响了较长光纤扭曲特性中起伏的周期性。综合以上实验结果，可以在光纤制造或长周期光纤光栅制备时控制固有的线性双折射，从而控制扭曲特性，制成功能优异的光纤传感/通信器件。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, Y. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long-period fiber grating as band-rejection filters[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(1): 58~64
- 2 R. Falciai, A. G. Mignani, A. Vannini. Long-period gratings as

- solution concentration sensors [J]. *Sens. Actuators B*, 2001, **74**(1-3): 74~77
- 3 Chen Shaohua, Tong Zhengrong, Zhao Qida *et al.*. A smart bending sensor with a novel temperature-and strain-insensitive long-period grating [J]. *Sens. Actuators A*, 2004, **116**(1): 103~106
- 4 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681~1685
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681~1685
- 5 Gu Zhengtian, Xu Yanping, Deng Chuanlu. Dual-peak resonance and transmission spectrum in coated long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 219~225
顾铮先, 徐艳平, 邓传鲁. 表面镀层长周期光纤光栅双峰谐振及其透射谱研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 219~225
- 6 Yu Xiujuan, Zhang Min, Wang Liwei *et al.*. Characteristics of long-period optical fiber grating with high refractive index nm-thick film overlay [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2665~2672
于秀娟, 张敏, 王利威等. 镀高折射率纳米膜的长周期光纤光栅特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2665~2672
- 7 Deng Chuanlu, Gu Zhengtian, Zhang Jiangtao. Resonant characteristics of long-period fiber grating coated with double-layer films including metal film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2656~2664
邓传鲁, 顾铮先, 张江涛. 金属镀层两层膜系长周期光纤光栅谐振特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2656~2664
- 8 L. A. Wang, C. Y. Lin, G. W. Chern. A torsion sensor made of a corrugated long period fibre grating [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 793~799
- 9 Y. P. Wang, Y. J. Rao. Long-period fibre grating torsion sensor measuring twist rate and determining twist direction simultaneously[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(3): 164~166
- 10 Y. P. Wang, Y. J. Rao. CO₂-laser induced LPFG torsion characteristics depending on length of twisted fibre[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(18): 1101~1102
- 11 Zhu Tao, Rao Yunjiang, Mo Qiuju. A high sensitivity fiber-optic torsion sensor based on a novel ultra long-period fiber grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(1): 249~253
朱涛, 饶云江, 莫秋菊. 基于超长周期光纤光栅的高灵敏度扭曲传感器[J]. *物理学报*, 2006, **55**(1): 249~253
- 12 Yu Qingxu, Song Shide, Zhang Guiju *et al.*. A novel method for fabrication of long period fiber grating with CO₂ laser [J]. *J. Optoelectron • Laser*, 2004, **15**(11): 1372~1375
于清旭, 宋世德, 张桂菊等. CO₂激光对称烧写长周期光纤光栅的方法研究[J]. *光电子 • 激光*, 2004, **15**(11): 1372~1375
- 13 Guan Shouhua, Yu Qingxu, Song Shide *et al.*. A novel long-period fiber grating torsion sensor [C]. *SPIE*, 2006, **6344**: 63440W
- 14 G. D. Van Wiggeren, T. K. Gaylord, D. D. Davis *et al.*. Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂-laser-induced long-period fibre gratings[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(16): 1354~1355
- 15 C. Y. Lin, L. A. Wang. Loss-tunable long period fiber grating made from etched corrugation structure [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(21): 1872~1873
- 16 Wang Yiping, Chen Jianping, Rao Yunjiang. Study on torsion characteristic of novel long-period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(8): 1091~1096
王义平, 陈建平, 饶云江. 新型长周期光纤光栅的扭曲特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1091~1096