

# 光纤光栅的新型纯弯梁调谐

刘明生<sup>1,2</sup> 郑文华<sup>1</sup> 杨康<sup>3</sup> 李国玉<sup>3</sup> 李燕<sup>3</sup> 许爱雪<sup>1</sup>

<sup>1</sup>河北工业大学电子信息工程学院, 天津 300400

<sup>2</sup>石家庄铁路职业技术学院信息工程学院, 河北 石家庄 050000

<sup>3</sup>邯郸学院信息工程学院, 河北 邯郸 056000

**摘要** 因利用传统等截面简支梁调谐光纤布拉格光栅会产生啁啾现象,设计了一种新型的等边菱形纯弯梁结构,本结构不会产生啁啾现象,其理论研究和实验研究一致。新型菱形梁可以实现裸纤(光纤布拉格光栅)8 nm的调谐范围,调谐线性拟合度高达99.9%,调谐过程中光纤布拉格光栅3 dB带宽无畸变。该纯弯梁具有良好的对称性,实现了光纤布拉格光栅的线性无啁啾调谐。

**关键词** 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 纯弯梁; 无啁啾调谐

**中图分类号** TN253

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.020602

## Novel Beam Under Pure Bending Used for Tuning of Fiber Grating

Liu Mingsheng<sup>1,2</sup> Zheng Wenhua<sup>1</sup> Yang Kang<sup>3</sup> Li Guoyu<sup>3</sup> Li Yan<sup>3</sup> Xu Aixue<sup>1</sup>

<sup>1</sup>College of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300400, China

<sup>2</sup>College of Information Engineering, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang, Hebei 050000, China

<sup>3</sup>College of Information Engineering, Handan University, Handan, Hebei 056000, China

**Abstract** Because the simple beam of traditional equal section used for tuning fiber Bragg grating (FBG) can make the FBG produce chirp, a novel tuning structure utilizing the equilateral rhombic beam under pure bending is designed, which has no chirp appearing. The experimental research is consistent with theoretical research well. The novel rhombic beam can realize the tuning wavelength of 8 nm, the linearity of 99.9%. And the 3 dB reflection bandwidth shows no change during the tuning process. The beam under pure bending has good symmetry, which realizes the linearly chirp-free central wavelength tuning of FBG.

**Key words** fiber sensing; fiber Bragg grating; beam under pure bending; tuning without chirp

**OCIS codes** 280.4788; 060.3735; 230.1360

## 1 引言

光纤布拉格光栅的中心波长会随着应力和温度的改变而发生漂移,基于此特性可实现对光纤光栅布拉格波长的调谐,可调谐光纤光栅具有更广的适用性和较强的灵活性,在光纤传感、光网络、光器件等方面有着广泛的发展前景。目前基于光栅应力调谐的方法主要包括:简支梁<sup>[1]</sup>、悬臂梁<sup>[2-3]</sup>的侧向应力调谐方法;压电陶瓷<sup>[4-5]</sup>、磁致伸缩<sup>[6]</sup>等光栅轴向应力调谐。其中基于简支梁和悬臂梁调谐法可实现布拉格波长大范围漂移<sup>[7-9]</sup>,调谐简单易控制,所以被广泛采用。但横截面不变的弹性梁在应力调谐过程中光纤光栅局部受力分布不均匀,导致光栅啁啾<sup>[10-11]</sup>。文献[12]阐述了利用悬臂梁进行光栅调谐,调谐过程中对光栅产生了0.5513 nm啁啾量。当光纤光栅调谐较长或梁的形变较大时,啁啾程度相当大,导致3 dB带宽展宽,无法满足实际应用。为解决调谐过程中光栅布拉格波长的啁啾问题,本文设计了一种新型等强度纯弯梁结构,使

收稿日期: 2015-08-13; 收到修改稿日期: 2015-09-13; 网络出版日期: 2015-12-18

基金项目: 国家863计划(2013AA011303)、河北省自然科学基金青年基金(F2014109015)

作者简介: 刘明生(1960—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光网安全技术和光网器件方面的研究。

E-mail: liums601001@sina.com

得粘贴于梁上的某段光纤光栅轴向受力均匀,从而实现了光纤布拉格光栅的大范围、线性无啁啾调谐。

## 2 纯弯梁调谐光纤光栅结构和原理

纯弯梁调谐装置图如图1所示,等边菱形弹性梁由不锈钢材料构成,底座支点固定于梁的中间位置,弹性梁的两端位于微位移调节旋钮之下,利用微位移旋钮给梁的两端施加不同的位移量,微位移旋钮可调范围大于6 cm。将FBG沿轴向放置于等边菱形梁的左表面,含有布拉格光栅的光纤一端刚性粘贴于梁的左表面,另一端刚性粘贴于梁的右表面。当两端微位移旋钮向下旋转时梁两端受到两个向下的作用力 $P$ ,梁的双边同时产生弯曲,FBG处于双端拉应变调谐状态;固定梁的右端处于自由状态,旋转梁左端微位移旋钮,梁的左边弯曲,FBG处于单端拉应变调谐状态。

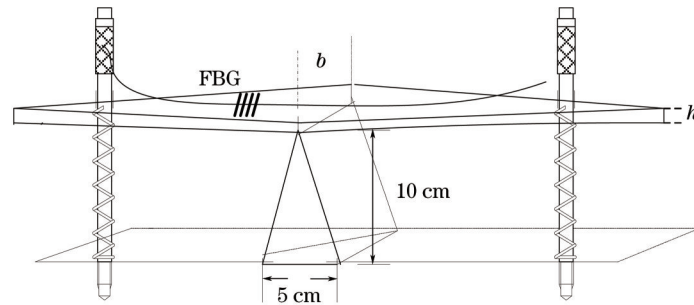


图1 纯弯梁调谐结构

Fig.1 Structure of beam under pure bending tuning

当等边菱形梁两端同时弯曲时为纯弯梁结构,当梁仅有一端弯曲时为悬臂梁结构,由于等边菱形梁双边对称,其单侧为等腰三角形,调谐原理遵循悬臂梁理论。梁的调谐原理的简化模型如图2所示。

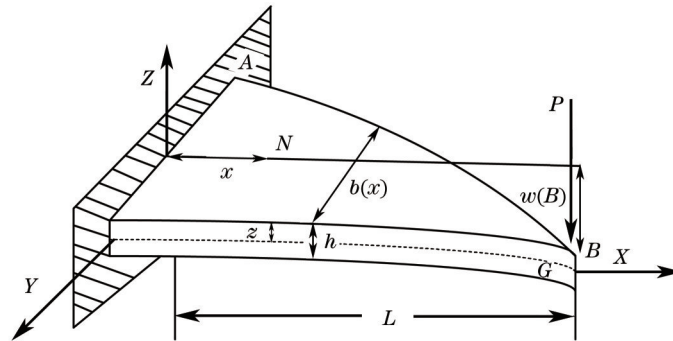


图2 等强度悬臂梁示意图

Fig.2 Schematic diagram of equal strength cantilever beam

图2中,梁长为 $L$ ,宽为 $b(x)$ ,高为 $h$ ,将FBG沿轴向刚性粘贴于距离 $A$ 平面 $x$ 处( $N$ 点)附近,旋转微位移旋钮,梁的 $B$ 端因受到一个向下的作用力 $P$ 而产生位移 $w(B)$ ,悬臂梁发生应变,FBG的布拉格波长 $\lambda_B$ 受到拉伸而产生漂移。保持外界温度恒定,应力产生的变化 $\varepsilon_x$ 与布拉格波长调谐量 $\lambda_B$ 满足<sup>[13]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon_x, \quad (1)$$

式中 $P_e$ 为光纤的有效弹光系数,对于二氧化硅光纤, $P_e \approx 0.22$ ,因粘贴面和FBG的轴向应变一致,则

$$\varepsilon_x = z/R, \quad (2)$$

其中, $z$ 为 $N$ 点与中性面 $G$ 之间的距离, $R$ 为悬臂梁在 $N$ 点的曲率半径。

$$R = EI_y/M, \quad (3)$$

式中 $E$ 为不锈钢的杨氏弹性模量, $I_y$ 为 $N$ 处的惯性矩, $M$ 为弯矩。对于等腰三角形悬臂梁,梁宽 $b(x)$ 沿 $x$ 轴渐变,设值为

$$b(x) = C(L - x), \quad (4)$$

$C$ 为常数,对于高为 $h$ 的等腰三角形悬臂梁, $z = h/2$ ,则惯性矩

$$I_y = b(x)h^3/12. \quad (5)$$

综合以上公式,且  $M = P(L - x)$ , 则(1)式变为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \frac{12z(1 - P_c)}{CEh^3} P. \quad (6)$$

等腰三角形悬梁臂弯曲的微分方程为

$$\omega''(x) = \frac{M}{EI_y(x)} = \frac{12P}{CEh^3}, \quad (7)$$

式中  $\omega(x)$  叫挠度,表示悬梁臂  $B$  端在力  $P$  的作用下产生的偏移距离,当偏移距离不大时,挠度即为此处的位移量。由边界条件  $\omega(0) = 0$ ,  $\omega'(0) = 0$  求得

$$\omega(x) = \frac{6P}{CEh^3} x^2, \quad (8)$$

则悬梁臂  $B$  端挠度

$$\omega(B) = \frac{6PL^2}{CEh^3}, \quad (9)$$

结合(6)式、(9)式消去  $P$  求得:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\omega(B); k = \frac{2z(1 - P_c)}{L^2}. \quad (10)$$

由此可知,对于尺寸确定的等腰三角形悬臂梁,  $k$  为常数,所以光栅布拉格波长的相对漂移量与  $B$  端的挠度  $\omega(B)$  呈线性关系。因此,可以通过控制悬梁臂  $B$  端的位移来实现对 FBG 的线性调谐;调谐灵敏度与 FBG 的粘贴位置无关,既能保证对光栅布拉格波长进行线性调谐,又可避免调谐过程中出现啁啾现象<sup>[14-15]</sup>。

### 3 实验结果与分析

实验调谐装置中采用的不锈钢纯弯梁长  $L = 150 \text{ mm}$ , 中间支点处梁宽  $b_1 = 15 \text{ mm}$ , 微位移旋钮处自由端梁宽  $b_2 = 4 \text{ mm}$ , 厚度  $h = 5 \text{ mm}$ 。实验所用 FBG 是利用相位掩模法自行刻制而成,长度为  $4 \text{ mm}$ , 布拉格波长为  $1544.10 \text{ nm}$ ,  $3 \text{ dB}$  带宽为  $0.4 \text{ nm}$ , 透射深度为  $20 \text{ dB}$ 。

实验装置整体连接如图 3、图 4 所示,将含有布拉格光栅的光纤左端用高性能丙烯酸酯胶粘贴于距离梁中间  $45 \text{ mm}$  处的左上表面,右端粘贴于距离梁中间  $45 \text{ mm}$  的右上表面,光栅位于梁的左侧。实验中选用宽带光源(BBS)作为入射光源,入射光经过环形器后透过粘贴于调谐装置上的 FBG 进入光谱仪(AQ6370C),光谱仪用来检测调谐过程中 FBG 的透射谱和反射谱,以此检验调谐装置的性能。

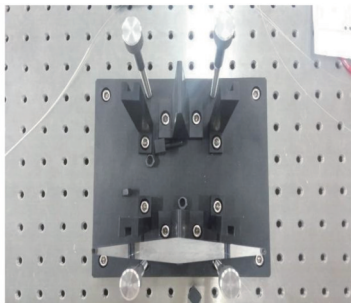


图3 实验装置俯视图

Fig.3 Experimental device vertical view

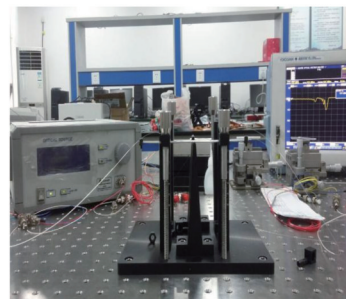


图4 纯弯梁调谐实验装置

Fig.4 Experimental setup of beam under pure bending tuning

实验通过旋转微位移旋钮来对菱形梁的两端施加不同的位移,微位移旋钮旋转一周,菱形梁两个自由端的垂直位移变化量为  $0.5 \text{ mm}$ 。同时旋转梁两端微位移旋钮,每旋转一周,光谱仪存入一次 FBG 透射谱的曲线图,经过多次调谐,将部分光栅透射谱的变化整合到一个图中,得到光栅透射谱漂移曲线如图 5。

由图 5 可知,利用新型调谐装置调谐时光栅的透射谱没有产生带宽展宽、波形畸变等啁啾现象,实现了中心波长的无啁啾调谐。实验中纯弯梁挠度每变化  $1 \text{ mm}$  记录一次 FBG 的中心波长和反射谱  $3 \text{ dB}$  带宽的变化,得到图 6、图 7。

图 6 为梁的双端同时对 FBG 调谐时,FBG 的中心波长  $\lambda_B$  随挠度  $w$  变化的曲线。由图可知,在调谐过程

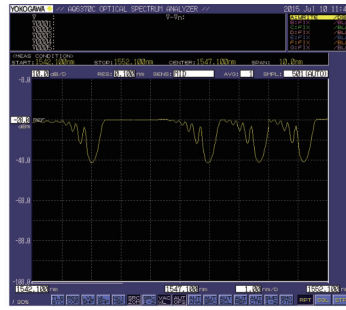


图5 纯弯梁调谐时部分FBG透射谱的变化

Fig.5 Transmission spectrum of FBG tuned by part beam under pure bending

中,FBG的中心波长与微位移旋钮推进距离具有良好的线性关系。中心波长调谐量与挠度的拟合方程: $\lambda_B = 0.261w + 1544.085$ ,线性拟合度高达99.9%,从式中可以看出,实验调谐中的挠度灵敏度为0.261 nm/mm,即挠度每变化1 nm,FBG的中心波长变化0.261 nm。由理论公式得出的挠度灵敏度为0.268 nm/mm,由此可知,理论值与实验得出的数据基本吻合。从图7中看出,FBG的3 dB带宽没有因挠度的变化而改变,说明梁双端调谐光纤光栅时,光栅各点受力均衡,没有造成光纤光栅反射谱的形变。

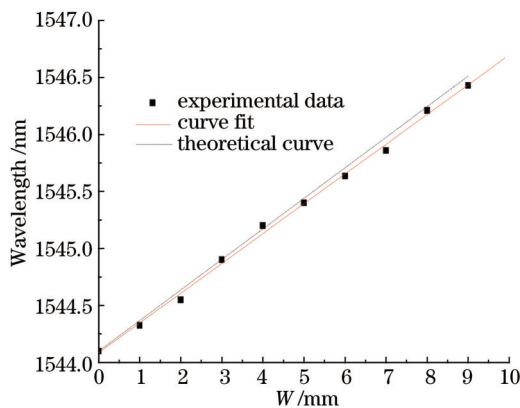
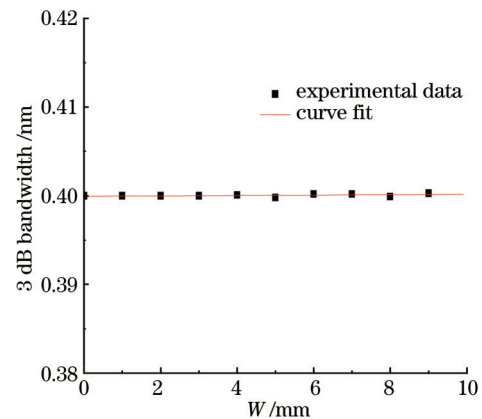
图6 对FBG双端调谐时 $\lambda_B \sim w$ 的纯弯梁调谐理论与实验曲线Fig.6 Theoretical and experimental  $\lambda_B \sim w$  curve for the beam under pure bending when FBG is double-ended tuned

图7 对FBG双端调谐时光栅反射谱的3 dB带宽变化

Fig.7 3 dB bandwidth of the grating reflection spectrum versus the deflection of the beam when FBG is double-ended tuned

固定梁右端自由状态下的微位移旋钮,仅旋转左端微位移旋钮,得到梁单端调谐FBG的实验数据。图8为梁单端调谐时,FBG的中心波长 $\lambda_B$ 随挠度 $w$ 变化的实验曲线,图9为调谐中光栅3 dB带宽随挠度变化的实验曲线。由图8可知,挠度与中心波长调谐量呈线性关系,拟合方程为: $\lambda_B = 0.118w + 1544.097$ ,拟合度为

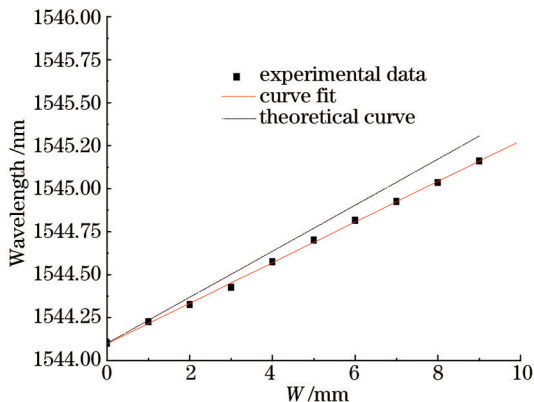
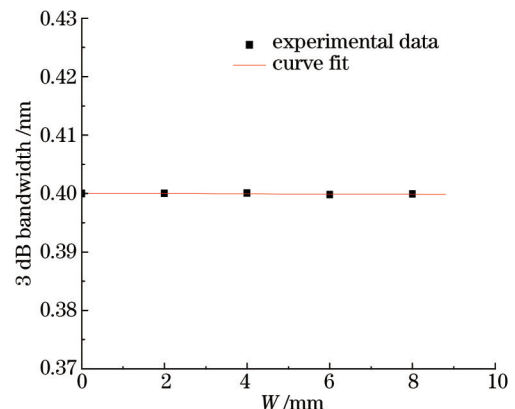
图8 对FBG单端调谐时 $\lambda_B \sim w$ 的纯弯梁调谐理论与实验曲线Fig.8 Theoretical and experimental  $\lambda_B \sim w$  curve for the beam under pure bending when FBG is single-ended tuned

图9 对FBG单端调谐时光栅反射谱的3 dB带宽变化

Fig.9 3 dB bandwidth of the grating reflection spectrum versus the deflection of the beam when FBG is single-ended tuned

99.9%。同理,挠度灵敏度实验值和理论值分别为 0.118 nm/mm、0.134 nm/mm,在调谐过程中,光栅 3 dB 带宽无变化,说明也没出现啁啾现象。对比图 7 和图 9 可知,无论对光纤光栅进行单端还是双端调谐,光栅反射谱 3 dB 带宽保证恒定,且值相等,均为 0.4 nm,说明此纯弯梁具有很好的线性度。实验结果显示,挠度相同时,梁单端调谐时光栅中心波长漂移量为双端调谐时的一半,这也证实该梁对称度高。

图 10 中横纵坐标分别表示相同挠度值下对应的光栅中心波长  $\lambda_B$  的理论值和实验值。由图 10(a)可知,当梁的双端同时弯曲调谐 FBG 时,光栅中心波长随挠度线性变化的实验值是理论值的 0.975 倍,误差为 2.5%;当梁仅有一端弯曲调谐 FBG 时,如图 10(b),光栅中心波长的实验值为理论值的 0.882 倍,误差为 11.8%。因此,采用等边菱形梁双端调谐 FBG 理论值与实验值误差更小,精度更高。图 11 为光栅调谐过程中,光栅反射谱的峰值功率随挠度  $w$  变化的实验数据,图中实验数据 A 代表梁双端调谐光栅时峰值功率的改变值,实验数据 B 为光栅反射谱的初始峰值功率,实验数据 C 为梁单端调谐光栅时的峰值功率。分析可知,梁单端调谐光栅时,平均峰值功率减小值为 0.16 dB;而梁双端调谐时,平均峰值功率减小值为 0.19 dB。可见,梁双端或单端进行光栅调谐时,峰值功率衰减量都很小,且减小值几乎相等,反射谱无畸变。因此,由以上讨论可知,变截面等强度菱形梁能够很好地实现对 FBG 的线性无啁啾调谐。

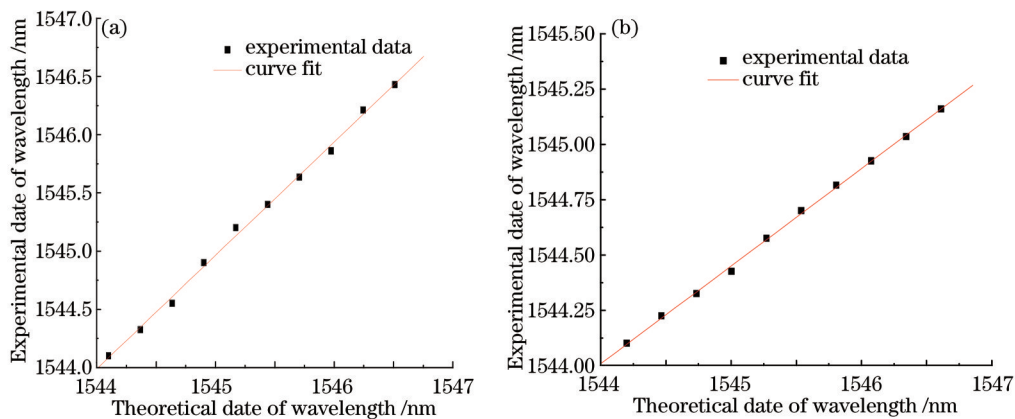


图 10 光栅中心波长理论值与实验值的关系。(a) 梁双端同时弯曲;(b) 梁单端弯曲

Fig.10 Relationship between theoretical  $\lambda_B$  and experimental  $\lambda_B$ . (a) Beam under double-ended bending;

(b) beam under single-ended bending

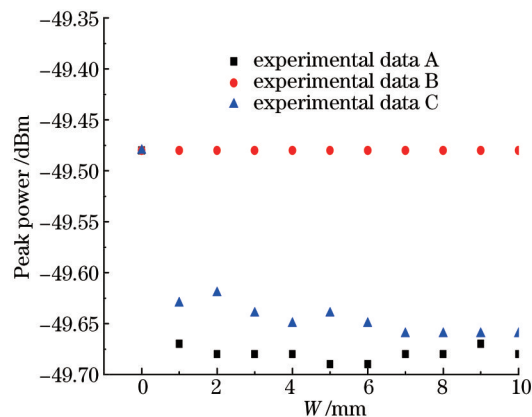


图 11 光栅调谐过程中的峰值功率

Fig.11 Peak power of Grating tuning process

## 4 结 论

本文设计了一种结构新颖的等边菱形纯弯梁调谐结构,通过分别控制梁两端微位移旋钮,可以实现对 FBG 的双端或单端拉伸调谐,单端调谐量为双端调谐量的一半,本结构对 FBG 的线性无啁啾调谐量最大可达 8 nm。由数据分析可得,实验测量值与理论值存在一些误差,造成这种误差的主要原因:1) 微位移旋钮与梁接触不牢,旋转时造成一些滑动,使得挠度值不准确;2) 光纤不能刚性粘贴于梁表面,粘贴不理想,造成粘贴面和 FBG 应变不一致;3) 由于光纤掺杂量不同,造成  $P_c$  取值不准确。以上原因都能造成理论与实际挠

度灵敏值的差别,影响菱形梁的线性无啁啾调谐。解决上述问题可以通过添加修正因子加以弥补,同时对调谐系统继续改进提高精密度来降低理论值与实验值的误差。

### 参考文献

- 1 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack of concrete [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.  
田石柱, 曹长城, 王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- 2 Wang Lei, Liu Ailian, Li Yingna, *et al.*. The change of fiber Bragg grating in uniform strain zones and finite element analysis [J]. Optical Technique, 2015, 41(3): 221-224.  
王 雷, 刘爱莲, 李英娜, 等. 光纤光栅在等强度悬臂梁均匀应变区的转换与有限元分析[J]. 光学技术, 2015, 41(3): 221-224.
- 3 Peng Weihong, Wang Ying, Mei Lin, *et al.*. Linear tuner of fiber Bragg grating based on a cantilever[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2006, 4(4): 36-39.  
彭伟鸿, 王 英, 梅 林, 等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐器研究[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(4): 36-39.
- 4 Wang Xueliang, Gong Yan. Dynamic performance of the PZT driver used in a lithographic objective[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1071-1075.  
王学亮, 巩 岩. 光刻物镜中压电陶瓷驱动器的动态性能研究[J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1071-1075.
- 5 Yu Youlong, Tan Ling, Zou Ligang, *et al.*. Piezoelectric ceramic characteristics using fiber grating sensor[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(7): 994-997.  
余有龙, 谭 玲, 邹李刚, 等. 用光纤光栅传感器研究压电陶瓷的特性[J]. 光子学报, 2011, 40(7): 994-997.
- 6 Tong Rongguang, Zhao Jianlin, Cheng Zhenlong, *et al.*. Weak magnetic field response characteristics of magnetostrictive materials[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(2): 311-314.  
佟荣光, 赵建林, 成振龙, 等. 磁致伸缩材料弱磁场响应特性的实验研究[J]. 光子学报, 2009, 38(2): 311-314.
- 7 Qin Zixiong, Zeng Qingke, Xiang Yang, *et al.*. Grating wavelength shifter with a broad-range tunability by using a beam of uniform strength[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 21(12): 1421-1425.  
秦子雄, 曾庆科, 项 阳, 等. 大调谐范围的等强度梁光纤光栅波长调节器[J]. 光学学报, 2001, 21(12): 1421-1425.
- 8 Li Bing, Zhao Yuejin, Zhang Chao, *et al.*. Design and realization of staring laser warning system based on microcantilever focal plane array[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0316001.  
李 冰, 赵跃进, 张 超, 等. 基于微悬臂梁阵列的凝视型激光告警系统的设计与实现[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0316001.
- 9 Duan Hongcheng, Wu Jin, Zhao Zhilong, *et al.*. Frequency drift measurement on single-frequency laser by short fiber delayed self-heterodyne[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702008.  
段洪成, 吴 谨, 赵志龙, 等. 短光纤延时自外差测量单频激光器频率漂移[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0702008.
- 10 Guo Ailin, Yang Qingwei, Xie Xinglong, *et al.*. Chirped pulse spectrum shaping by spatial grating with variable line-space [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 27(2): 272-274.  
郭爱林, 杨庆伟, 谢兴龙, 等. 变栅距光栅实现啁啾脉冲光谱整形[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 272-274.
- 11 Tian Xiaocheng, Zhang Kun, Zhu Na, *et al.*. Research on linear chirped pulse generated by direct phase modulation[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0302002.  
田小程, 张 崑, 朱 娜, 等. 直接相位调制产生线性啁啾脉冲特性研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0302002.
- 12 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi, *et al.*. Linear tuning of fiber Bragg grating based on a cantilever[J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 19(5): 621-625.  
余有龙, 刘治国, 董孝义, 等. 基于悬臂梁的光纤光栅线性调谐[J]. 光学学报, 1999, 19(5): 621-625.
- 13 Yu Youlong, Liu Zhiguo, Dong Xiaoyi, *et al.*. Optimization about the cantilever used for linearly tuning of fiber Bragg grating [J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(8): 714-718.  
余有龙, 刘志国, 董孝义, 等. 用于光纤光栅线性调谐的悬臂梁结构优化[J]. 光子学报, 1998, 27(8): 714-718.
- 14 Li Li. Study on the Key Technology of Fiber Grating Displacement Sensor System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.  
李 丽. 光纤光栅位移传感系统关键技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- 15 Ni Yi, Zhang Jie, Kong Xuan. Designing and testing of tunable DFB laser array using REC technology[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(5): 0502003.  
倪 屹, 张 杰, 孔 轩. 基于REC技术的可调谐DFB激光器阵列设计与测试[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502003.