

文章编号 1004-924X(2014)11-2888-06

## 扫频激光器扫描非线性的优化 及其在光纤光栅解调中的应用

梅佳伟\*, 肖晓晟, 杨昌喜

(清华大学精密仪器系精密测试技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为了研究基于压电陶瓷的法布里-珀罗(F-P)波长滤波器扫描非线性的物理机理及优化方案, 搭建了基于 F-P 滤波器的扫频激光器。用基于梳状滤波器的透射时域法研究了扫频激光器输出的非线性特性, 获得了不同扫描频率下的扫频非线性特性的变化情况, 认为这是由于可调谐滤波器中的执行器——压电陶瓷的容性负载特性引起的。结合光谱测量法, 获得了动态扫频线性度、扫频范围与驱动频率的关系, 实验结果与理论分析结果相符。最后, 提出了优化扫频非线性的驱动参数方案。通过在驱动源后增加电压跟随器提高了驱动源的负载能力和高速扫频的线性响应特性, 并应用于光纤光栅解调。实验得到了 1 000 Hz 扫频速度下的线性解调结果, 即解调线性度为 0.998 44。

**关键词:** 光纤光栅解调; 扫频激光器; 法布里-珀罗可调谐滤波器; 扫描非线性

**中图分类号:** TN248; TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.2888

## Optimization of sweeping nonlinearity of wavelength-swept laser and its application in FBG demodulation

MEI Jia-wei\*, XIAO Xiao-sheng, YANG Chang-xi

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,  
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

\* Corresponding author, E-mail: mjw503@gmail.com

**Abstract:** To explore the physical mechanism of sweeping nonlinearity of a Fabry-Perot(F-P) tunable filter based on a PZT and to obtain the optimized scheme for the characteristics of linear wavelength sweeping, a wavelength-swept laser based on the F-P tunable filter was developed. The transmission time domain method was used to research the output nonlinearity of the wavelength-swept laser and the changed sweeping nonlinear characteristics in different sweeping frequencies were obtained. Then, it points out the change is caused by capacitive load characteristics of the PZT from the actuator in the tunable filter. With spectroscopy, the relationship among dynamical sweeping nonlinearity, sweeping range and driving frequency was obtained and it is in good agreement with that of the theoretical analysis. Finally, a new drive scheme based on a voltage follower was proposed to optimize the characteristics of linear wavelength sweeping. The experimental results show that this method promotes the linear responsibility of high-speed wavelength-sweeping. The scheme is applied in FBG interrogation system and

收稿日期: 2013-12-28; 修订日期: 2014-02-02.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(No. 2011BAF06B02)

obtained demodulation nonlinearity is 0.998 44 at a wavelength-swept speed of 1 000 Hz.

**Key words:** Fiber Bragg Grating(FBG) demodulation; wavelength-swept laser; Fabry-Perot(F-P) tunable filter; sweeping nonlinearity

## 1 引言

光纤光栅解调仪可实现光纤光栅中心波长变化的测量<sup>[1]</sup>,其中基于扫频激光器的光纤光栅解调仪因具有解调速度快、工作范围宽、多通道和可复用等优点而得到了越来越多的关注。扫频激光器作为一种新型激光光源可以产生周期性波长调谐输出,利用激光器的输出波长在时间域上的编码可将波长变化转化为时域上的变化,从而实现光纤光栅波长的快速解调<sup>[2]</sup>。扫频激光器的核心器件是可调谐滤波器,例如声光滤波器<sup>[3]</sup>、光栅与多面镜组合式滤波器<sup>[4]</sup>以及法布里-珀罗(Fabry-Perot,F-P)滤波器<sup>[5]</sup>。其中,F-P滤波器因结构紧凑、扫频速度快、扫频范围宽而成为扫频激光器中较为常用的扫频器件。

基于扫频激光器的光纤光栅解调系统有 3 个参数至为关键:扫频频率、扫频线性度和扫频范围。其中,扫频频率决定了解调系统的采样速度,扫频线性度决定了光纤光栅的解调精度,所以提高扫频速度和扫频线性度对于实现高速、高精度解调至关重要。可调谐滤波器是由两个安装在压电陶瓷(PZT)上的高反射率腔镜构成的,它利用压电陶瓷的逆压电效应改变两个腔镜之间的距离来实现波长的快速调谐<sup>[6]</sup>。从电学角度来看,作为大容量器件的 PZT 的电学响应特性是受驱动参数影响的,通常扫频激光器的驱动电压波形为三角波,但因 PZT 的容性特性,其波长扫描往往呈非线性<sup>[7]</sup>,因此不利于解调精度的提高,尤其是在高速扫频时非线性呈现恶化的趋势。很多学者深入地研究了 F-P 扫描非线性。2008 年,K. Liu 等<sup>[8]</sup>发现基于 PZT 的 F-P 滤波器在扫描过程中存在非线性特性,并由此提出利用多个光纤光栅来测量此非线性。通过多项式函数对非线性扫描进行了拟合,从而将波长扫描精度提高到了

20 pm。2010 年,丁晖等<sup>[9]</sup>提出了利用粒子群优化算法来补偿 F-P 扫描非线性对光纤光栅波长解调精度的影响,在线建立了 F-P 扫描波长与控制电压的关系模型。此外,通过引入 F-P 梳状滤波器进行分段线性插值也可以降低非线性对解调精度的影响。Wang 等<sup>[10]</sup>报道的光纤光栅解调仪和 Park 等<sup>[11]</sup>报道的温度解调仪均采用了此方法。乔学光等<sup>[12]</sup>提出利用乙炔气体吸收来补偿 F-P 扫描过程中的非线性特性。目前,诸多研究均是通过补偿扫描过程中的非线性来提高解调精度的,但是并没有进一步研究此非线性的物理原因以及扫频非线性与扫频速度的关系,并从驱动源上对扫描非线性进行优化。

为了研究基于 PZT 的 F-P 波长滤波器扫描非线性的物理机理及优化方案,本文搭建了基于 F-P 滤波器的扫频激光器,使用半导体光放大器(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)作为增益介质,F-P 滤波器在三角波信号驱动下实现扫频输出。为了分析不同扫频速度下的扫描非线性特性,本文提出了针对扫频激光器扫描线性度的实时测量方法,即梳状滤波器(Fiber Fabry-Perot Interferometer, FFP-I)透射时域图测量法,结合光谱测量实验获得了动态扫频线性度、扫频范围与驱动频率的关系,并提出了优化非线性扫描的驱动参数方案,实验上提高了扫频的高频响应特性,得到了 1 000 Hz 的高速线性扫频,并应用于光纤光栅解调,得到了较好的线性解调结果。

## 2 实验装置

扫频激光器的结构如图 1 所示。激光器采用了环形腔结构,使用半导体光放大器(Covega, SOA1013S)作为增益介质,集成在半导体光放大器中的光隔离器用来保证激光器的单向运转,所采用的 F-P 滤波器为微光公司(Micron Optics, Inc)的 FFP-TF2 型滤波器,偏振控制器用来优化

腔内偏振态。激光通过光耦合器的 10% 输出端输出,通过耦合器分为 3 路:一路利用光谱仪 (Agilent 86142B,分辨率 0.06 nm)记录输出光谱,测量扫频激光器的扫频范围;另两路分别经过梳状滤波器(FFP-I,FSR:105 GHz)、环形器和光纤光栅,得到的透射谱和反射谱分别被光电探测器转换成电信号并通过示波器显示。

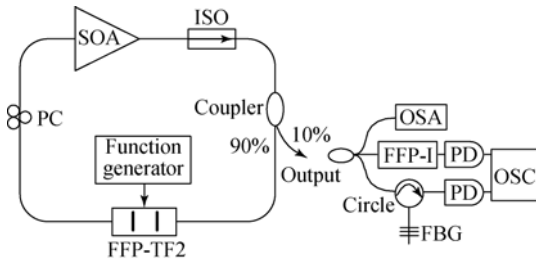


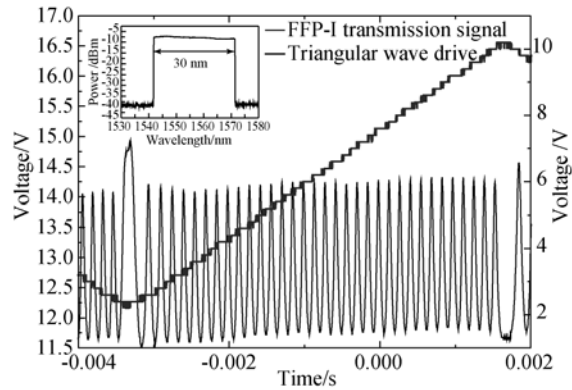
图 1 扫频激光器实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of wavelength-swept laser

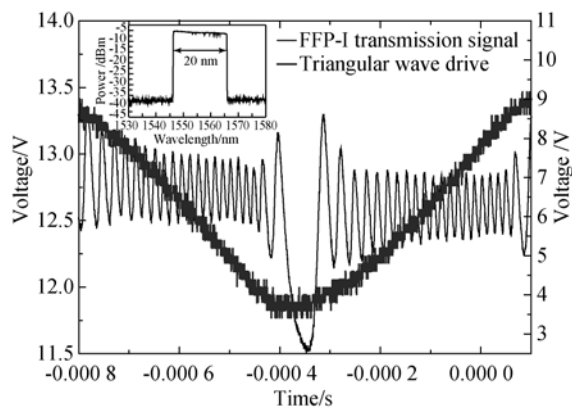
### 3 实验结果与分析

首先实验研究了不同扫描频率下扫频激光器的非线性特性。采用函数发生器 (RIGOL DG1022)产生三角波电压来驱动 F-P 滤波器,保证扫频范围位于 F-P 滤波器的单个 FSR 内即可实现单波长输出。设置峰峰值电压为 8.0 V,直流偏置为 6.0 V,三角波初始频率设定为 100 Hz。利用光谱仪记录激光器的扫频光谱,得到最大值锁定光谱图,它对应于扫频激光器的扫频范围为 30 nm,平均输出功率为 0.5 mW,如图 2(a)插图所示。扫频激光器的输出光入射到梳状滤波器,透射光经过探测电路转换为时域电信号,在示波器上显示的是多脉冲时域图,如图 2(a)所示。考虑到扫频范围较小,扫频区间内相邻透射谱线的波长间隔基本一致。每个脉冲对应于梳状滤波器的透射谱线,因此时域脉冲位置的线性度直接决定了扫频的线性度。该方法实现了扫频过程中的动态非线性标定,相比于传统的静态逐点测量法<sup>[6]</sup>,其实时性更好;相比于多光纤光栅测量法<sup>[8-9]</sup>,它更为简单,取样点较多且透射峰间隔均相等,有利于得到整体扫频区间的特性。增加单个扫频周期内的标定点数,即减小梳状滤波器的自由光谱程,可以对扫频区间进行更高精度的细

分,从而进一步提高动态非线性测量的准确性。



(a) 100 Hz



(b) 1 000 Hz

图 2 扫频激光经过 FFP-I 后的透射时域信号和三角波加载到滤波器后测量到的两端电压波形

Fig. 2 Transmission time-domain signal of swept wavelength through FFP-I. Inset: peak-hold spectrum

增大三角波频率至 1 000 Hz,峰峰值电压和直流偏置电压保持不变,扫频范围减小到 20 nm,同时 FFP-I 时域透射峰的间隔不均匀,扫描线性度变差,且扫描滤波器两端的电压波形也发生畸变,如图 2(b)所示。为了对比两种频率下的线性扫频特性,对 100 Hz 和 1 000 Hz 下半个周期内每个脉冲中心在时域上的位置进行了线性拟合,如图 3 所示。线性相关度分别为 0.999 95 和 0.996 75,可见 1 000 Hz 下的扫描线性度明显恶化。由于扫频激光器的扫频非线性现象是由 F-P 滤波器的扫描特性决定的,所以系统研究 F-P 可调谐滤波器在不同频率三角波下的响应特性有助于分析扫频激光器的线性扫描特性。

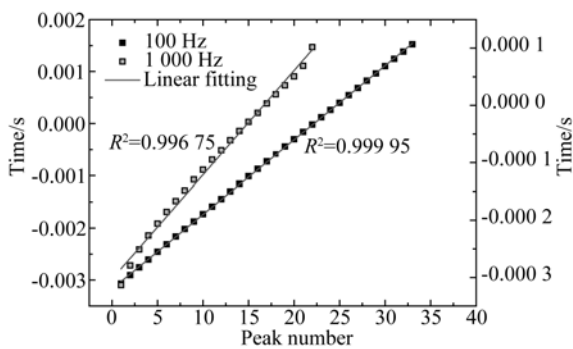


图 3 FFP-I 透射脉冲位置时域拟合图

Fig. 3 Fitting curves of time positions of FFP-I transmission pulses

为了定量描述 F-P 滤波器对正弦波的电压响应特性,由函数发生器加载正弦波,并保持幅值不变和直流偏置不变,测量了 0~2 000 Hz 不同频率正弦波驱动下的幅值变化情况,其响应曲线如图 4 所示。值得注意的是,随着频率的增加,幅值响应越来越低,但响应电压波形始终保持为正弦波。此外,实验中还记录了不同频率下扫频范围的响应特性,其曲线与两端电压的响应曲线一致,由此说明滤波器的波长扫描曲线与两端电压波形是一一对应的。

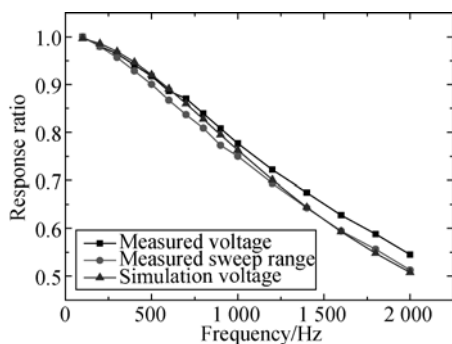


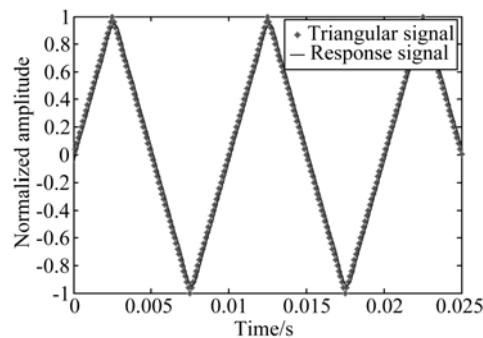
图 4 实测及模拟压电陶瓷两端电压和滤波器扫频范围对正弦波驱动响应曲线

Fig. 4 Measured and simulated response curves of PZT's voltages and sweep ranges of F-P filter to sinusoidal voltage signals

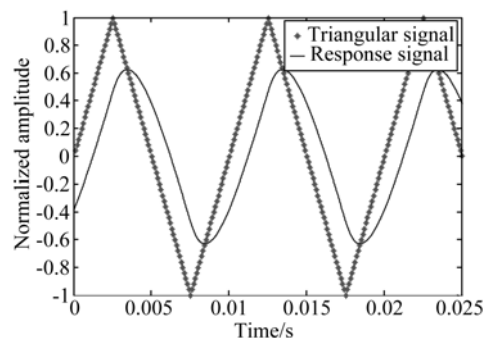
为了解释此实验现象,将 F-P 滤波器等效为一个电容<sup>[13]</sup>,由其响应曲线估计出等效电容值为  $C=2.70 \mu\text{F}$ ;函数发生器等效成一个恒压源  $U$  与一定值的内阻串联,实验测得其内阻近似为  $R=$

$50 \Omega$ 。设正弦波频率为  $\omega$ ,则 PZT 两端电压对正弦波幅值的响应曲线为  $U_{\text{PZT}}/U = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C^2 R^2 + 1}}$ ,

如图 5 所示,与实验测量得到的幅值响应曲线基本吻合。另外由傅里叶变换定理可知,三角波由奇数次谐波叠加而成,即当三角波频率增加时,因高频正弦波的响应差,PZT 的线性响应特性变差。图 5 分别为 100 Hz 和 1 000 Hz 的模拟响应图,可见 100 Hz 时,PZT 两端电压的跟随性很好,因此表现出很高的线性度;而 1 000 Hz 时,电压跟随性变差,且幅值降低。因此对于此类型的扫频激光器,其线性扫频优化方案有两种:一是降低驱动内阻,即提高三角波驱动的负载能力;二是降低驱动频率以获得线性响应。



(a) 100 Hz



(b) 1 000 Hz

图 5 模拟得到的压电陶瓷对不同频率三角波的响应情况  
Fig. 5 Response curves of PZT's voltages to triangular drive signals with different frequencies by numerical simulation

高频振动信号的测量在实际应用中具有重要意义,是光纤光栅解调仪的重要应用方向之一,因此要求扫频激光器能够实现高速线性扫频。由前

面的分析可知,通过降低高频三角波驱动源的内阻可以提高三角波驱动的负载能力,因此本文在函数发生器后增加了电压跟随器电路,以有效减小输出电阻。电压跟随器具有输入阻抗高、输出阻抗低的特点,在输出三角波幅值为4 V的情况下,实测输出阻抗接近于0,而压电陶瓷对不同频率正弦波的响应率则接近于1,当加载1 000 Hz三角波时,PZT 两端电压的响应曲线如图6所示,可见扫频线性度得到了优化;扫频光谱如图6插图所示,扫频范围为15 nm。

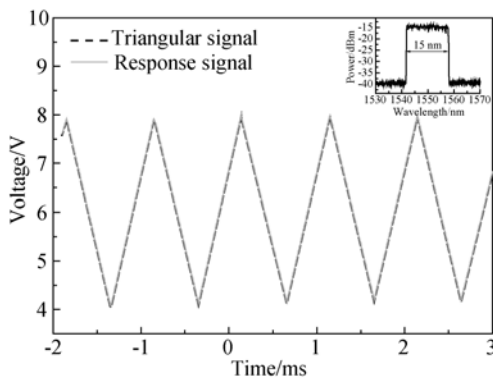


图6 减小输出内阻后的1 000 Hz三角波的扫频响应图,插图为扫频光谱保持图

Fig. 6 Response curves of PZT's voltages to triangular drive signals at 1 000 Hz after reducing output resistance. Inset is peak-hold spectrum

为了验证此扫频激光器的线性解调性能,将此扫频激光器应用于光纤光栅波长解调中,使用手动可调谐光纤光栅滤波器作为传感光纤光栅,其波长为1 532~1 570 nm,带宽为0.4 nm。通过手动调节旋钮来改变光纤光栅的中心波长,同时串联了一个中心波长为1 548.0 nm,带宽为0.2 nm的参考光纤光栅,用来补偿扫频过程中的起始点漂移,两个光纤光栅均位于恒定的实验温度下。调节可调谐滤波器的中心波长,依次记录8个位置点,测量各个位置点传感光纤光栅和参考光纤光栅反射峰之间的时间位置差,并进行线性拟合,结果如图7所示。由图可知,线性相关度达到了0.998 44,由此验证了线性解调效果。

值得注意的是,1 000 Hz三角波驱动下的扫频范围只有15 nm,远小于半导体光放大器的增益带宽,这是因为受电压跟随器的饱和电流的限制,增加三角波幅值会增大驱动源的输出电流。当输出电流超过电压跟随器的饱和电流时,输出电流将无法继续提高,因此高幅值会造成压电陶瓷响应曲线恶化,无法实现线性扫频,所以只能通过降低三角波电压幅值来匹配饱和输出电流。如果要实现更大范围的扫频,则需要提高电压跟随器的饱和电流值。

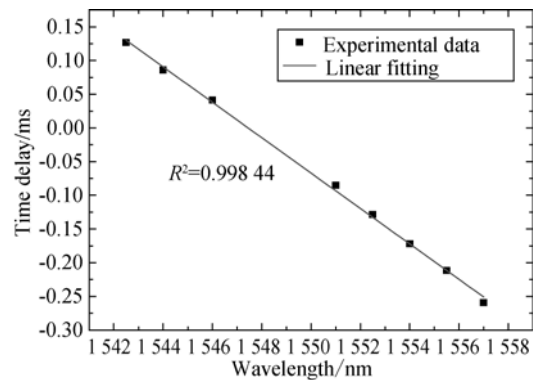


图7 解调结果线性拟合图

Fig. 7 Relationship between time delay and central wavelength of sensing FBG

## 4 结 论

本文采用基于梳状滤波器透射时域法,系统地研究了基于F-P滤波器的扫频激光器在函数发生器输出三角波驱动下线性扫频特性,获得了不同扫描频率下的扫频非线性特性的变化情况,并指出这是由于可调谐滤波器中的执行器——压电陶瓷的容性负载特性引起的。实验结果表明,提高电源的负载驱动能力或降低扫描速度有利于线性扫频。为了获得高速线性扫频,在驱动源后增加了电压跟随器,通过降低输出电阻提高了驱动源的负载能力,从而优化了高速扫频线性的响应特性。将优化后的扫频激光器应用于光纤光栅解调,在1 000 Hz扫频速度下得到的解调线性度达到了0.998 44。

## 参考文献:

- [1] 唐炜, 史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 79-83.  
TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002, 10(1): 79-83. (in Chinese)
- [2] CHEN D R, SHU C, HE S L. Multiple fiber Bragg grating interrogation based on a spectrum-limited Fourier domain mode-locking fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(13): 1395-1397.
- [3] WYSOCKI P F, DIGONNET M J F, KIM B Y. Broad-spectrum, wavelength-swept, erbium-doped fiber laser at 1.55  $\mu\text{m}$  [J]. *Optics Letters*, 1990, 15(16): 879-881.
- [4] YUN S H, BOUDOUCX C, TEARNEY G J, *et al.*. High-speed wavelength-swept semiconductor laser with a polygon-scanner-based wavelength filter[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(20): 1981-1983.
- [5] YUN S H, RICHARDSON D J, KIM B Y, *et al.*. Interrogation of fiber grating sensor arrays with a wavelength-swept fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1998, 23(11): 843-845.
- [6] 吴伟伟, 余有龙, 李勋涛, 等. 法布里-珀罗滤波器的锯齿波驱动技术[J]. 电子科技, 2012, 25(8): 16-19.  
WU W W, YU Y L, LI X T, *et al.*. The drive technology of sawtooth wave for Fabry-Perot filter [J]. *Electronic Science and Technology*, 2012, 25(8): 16-19. (in Chinese)
- [7] 肖嘉, 赵建伟, 田蔚. 压电陶瓷驱动器三角波频率特性[J]. 压电与声光, 2003, 25(3): 203-206.  
XIAO J, ZHAO J W, TIAN SH. Frequency characterization of piezoelectric ceramic actuators driven by triangle-wave [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2003, 25(3): 203-206. (in Chinese)
- [8] LIU K, JING W C, PENG G D, *et al.*. Investigation of PZT driven tunable optical filter nonlinearity using FBG optical fiber sensing system [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(12): 3286-3290.
- [9] 丁晖, 吴相楠, 梁建奇, 等. 粒子群优化算法在光纤光栅传感器波长解调中的应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(2): 563-566.  
DING H, WU X N, LIANG J Q, *et al.*. Application of PSO algorithm in wavelength detection of FBG sensors [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 563-566. (in Chinese)
- [10] WANG Y, ZHANG X, LIU Y CH, *et al.*. High multiplexing capability and ultrahigh resolution interrogation for optical fiber Bragg grating sensing system [C]. *22nd International Conference on Optical Fiber Sensor, International Society for Optics and Photonics, Beijing: SPIE*, 2012: 842146. 1-842146. 4.
- [11] PARK H J, SONG M H. Linear FBG temperature sensor interrogation with Fabry-Perot ITU multi-wavelength reference [J]. *Sensors*, 2008, 8(10): 6769-6776.
- [12] 乔学光, 王瑜, 傅海威, 等. 可调谐法布里-珀罗滤波器的高精度大范围实时定标[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 852-855.  
QIAO X G, WANG Y, FU H W, *et al.*. High-accuracy real time calibration of tunable Fabry-Pérot filter on large range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 852-855. (in Chinese)
- [13] 叶会英, 浦昭邦. 自由振动压电振子的一种复参数等效电路[J]. 压电与声光, 1999, 21(4): 332-336.  
YE H Y, PU ZH B. An complex parameter circuit of the free piezoelectric vibration [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 1999, 21(4): 332-336. (in Chinese)

## 作者简介:



梅佳伟(1989—),男,安徽无为,博士,2010年于清华大学获得学士学位,主要研究方向为光纤激光器和光纤传感技术。E-mail: mjw503@gmail.com

## 导师简介:



杨昌喜(1963—),男,湖南人,研究员,博士生导师,1986年,1989年于南开大学分别获得学士、硕士学位,1992年于中国科学院物理研究所获得博士学位,主要从事光纤超短脉冲的产生及传输、光纤传感和非线性光纤光学等方面的研究。E-mail: cxyang@tsinghua.edu.cn