

基于掺铒光纤中动态粒子数光栅的振动检测

陈 溶, 陶 传 义 *

重庆理工大学理学院, 重庆 400054

摘要 根据动态粒子数光栅形成机理,设计了一种线性双波混频结构的光纤系统。系统中,1490 nm 波长分布式反馈(DFB)激光器光源发出的连续激光,通过环形器进入一根 3 m 长掺铒光纤作为注入光,被与掺铒光纤另一端光学耦合的压电振动镜反射后形成反射光。掺铒光纤中注入光与后向传播的反射光干涉形成驻波场,通过空间烧孔效应沿光纤纵向形成动态粒子数光栅。压电振动镜对反射光波进行相位调制时,环形器反射端口输出的双波混频(TWM)信号可视作输出光波的强度调制。实验中通过此双波混频系统对压电换能器产生的机械振动进行检测,结果表明:光纤双波混频检测系统具有良好的动态响应特性,能够测量 50 Hz~10 kHz 的振动信号,采集到的输出信号频率与压电驱动信号频率很好地吻合。

关键词 光纤光学;掺铒光纤;动态光栅;双波混频;振动检测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0906001

Mechanical Vibration Detection Based on Dynamic Population Gratings Recorded in Er-Doped Optical Fiber

Chen Rong, Tao Chuanyi *

*Department of Physics and Energy, School of Science, Chongqing University of Technology,
Chongqing 400054, China*

Abstract According to the dynamic population grating formation mechanism, a fiber-optic system with linear double-wave mixing structure is designed. In the system, light from a semiconductor distributed feedback (DFB) continuous wave(cw) laser operating at 1490 nm, as the incident light, is launched to a 3-m Er-doped optical fiber through a fiber optic circulator. The incident light is reflected from the vibrating mirror mounted on a piezoelectric actuator as reflected light. The dynamic population gratings are recorded along the longitudinal direction of the Er-doped optical fiber by spatial hole burning in standing-wave cavity formed by the two counter-propagating mutually coherent recording waves. The two-wave mixing (TWM) signal is observed as an intensity modulation wave in the output of the circulator when the reflected wave from vibrating mirror is phase modulated. Mechanical vibration induced by piezoelectric vibrating mirror can be detected through the designed two-wave mixing system. The results demonstrate that the two-wave mixing detection system displays a good dynamic response, with a frequency range of 50 Hz~10 kHz, and the frequencies of acquired vibration signals exactly agree with the driving signals from piezoelectric actuator.

Key words fiber optics; Er-doped fiber; dynamic population grating; two-wave mixing; vibrating detection

OCIS codes 050.2770; 060.2410; 190.2055; 190.7070; 120.7280

1 引 言

动态光栅因其在单频连续光纤激光器、可调谐窄带光纤滤波器、光纤传感器、自适应干涉仪和光储存元件等领域具有重要应用潜力^[1-3]。近年来的研究

和应用主要集中于工作波长范围为 1490~1570 nm 的掺铒光纤(EDF)和 1040~1080 nm 光谱区域的掺镱光纤,其他稀土元素如 Nd、Tm、Ho、Pr 和 Sm 的掺杂光纤在相应的波长处也可以观察到相似光栅写入。此类动态光栅通常由偏振相同的两束相干连

收稿日期: 2018-03-16; 修回日期: 2018-03-31; 录用日期: 2018-04-09

基金项目: 国家自然科学基金(51874064)、重庆市基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0152)、重庆市留学人员回国创业创新支持计划(cx2017079)

* E-mail: taochuanyi@cqut.edu.cn

续激光波在掺杂单模光纤中相向传播形成。根据稀土离子的吸收(或光抽运光纤的发射)光谱来选择引起吸收(或增益)饱和的写入波长。对于此波段的写入波长 λ , 掺铒光纤典型的饱和光功率 P_{sat} 约为 0.5 mW。事实上, 这种写入机制是基于相应稀土离子在基态能级 1 和亚稳态能级 2 之间光跃迁的空间选择性饱和(主要在亮条纹中)^[4]吸收, 通常称“空间烧孔”, 当空间烧孔与粒子数反转系统增益饱和有关的时候, 写入频繁。由于写入过程与基态和亚稳态之间的粒子数重新分布有关, 此动态光栅也可称为“粒子数光栅”。

与紫外光照射掺铒光纤写入的永久性光纤布拉格光栅相比, 此动态光栅是瞬态的, 即当具有特定形成/擦除特征时间 τ_g 的注入光相干场图样被移除之后, 动态光栅随之消失。此特征时间通常比亚稳态寿命 τ_0 短(EDF 中 τ_0 约为 10 ms)^[5], 并且随平均注入光功率增加而下降, 但是它明显大于光纤在布里渊或拉曼激发散射过程中形成动态光栅的特征时间^[6], 而且也比二氧化硅中相同条纹间距热光栅的特征时间大得多^[7]。与光折射材料中形成的体动态光栅相比^[8], 动态光纤光栅对不同类型的应用具有吸引力, 这是因为其具备以下两个重要优点: 第一是可兼容商业化的各种光纤元件^[9], 如掺杂光纤、连续激光器、调制器、耦合器、隔离器和抽运系统等; 第二是可用于开发全光纤设备, 如光纤传感器或全光纤自适应干涉仪, 这对于工业或现场应用来说非常重要。

在基于暂态双波混频(TWM)的自适应干涉仪中, 掺铒光纤可以很好地代替光折变晶体^[10-11]。在两相向传输相干注入光形成的干涉亮条纹中, 掺铒光纤的光学吸收(或增益)发生局部饱和, 故可在掺铒光纤中写入动态粒子数光栅。对其中一个光波进行相位调制时, 双波混频信号可视作输出光波的强度调制。当注入光波长接近掺铒光纤基础吸收的最大值(约 1532 nm)时, 暂态 TWM 响应取决于调制振幅的平方, 这对应于饱和掺杂光纤中写入的吸收光栅。

本文分析了掺铒光纤中两个相向传输相位调制波的暂态双波混频原理, 设计了一种基于掺铒光纤写入动态光栅的光纤双波混频系统, 研究此光纤动态光栅在激光机械振动测量中应用。这为动态粒子数光栅应用于工业激光超声无损检测奠定了基础。

2 吸收饱和的动态光栅形成原理

通过掺铒光纤中两列相向传输的相干波“R”和

“S”, 写入动态光栅, 如图 1(a)所示, 此过程中, 稀土离子在基态、亚稳态两能级之间的光跃迁发生空间选择性饱和效应, 如图 1(b)所示。图 1(c)表示注入光正弦相干场图样以及饱和的光吸收剖面图。如果两能级系统粒子数反转(如经由激发态 3 的光抽运), 则通过光增益中相同的注入光相干场图样可形成类似剖面图。根据二能级系统动力学过程, 简要分析吸收饱和光栅的形成原理。在写入动态光栅期间, 光纤暴露于正弦相干场的图样表示为

$$I(z) = I_0(1 + m \cos kz), \quad (1)$$

式中: I_0 为沿光纤轴向平均光强; m 为相干场图样调制深度; $k = 2\pi/\Lambda$ 为空间频率(Λ 为光栅条纹间距); z 为光纤轴向位置。如果不存在光抽运, 仅仅存在与两个较低能级间基本光学跃迁相对应的注入光强 I , 并且假设有效吸收截面 σ_a 和发射截面 σ_e 不同, 激活离子总浓度为 N_0 , 亚稳态能级[图 1(b)]的粒子数密度 N_2 的速率方程可表示为

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -\tau^{-1} \left(N_2 - \frac{N_0}{1 + \sigma_e/\sigma_a} \times \frac{I/I_{\text{sat}}}{1 + I/I_{\text{sat}}} \right), \quad (2)$$

式中: 特征弛豫率 $\tau^{-1} = \tau_0^{-1}(1 + I/I_{\text{sat}})$, 其中 τ_0 为

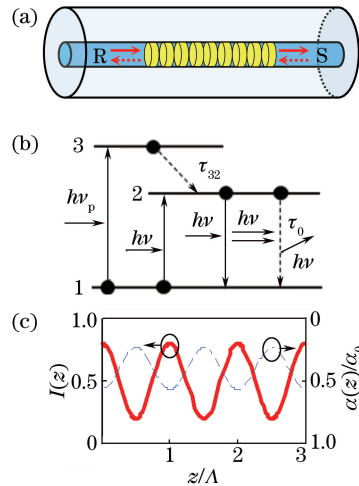


图 1 吸收饱和的动态光栅形成原理示意图。(a)掺铒光纤中两列相向传输相干波写入动态光栅原理图;(b)稀土离子三能级系统示意图;(c)条纹间距为 Λ 、对比度 $m=0.6$ 的注入光相干场图样 $I(z)$ 和写入光栅的光吸收系数 $a(z)/a_0$ 归一化剖面图

Fig. 1 Schematic diagram of the formation principle of absorption saturation-based dynamic grating. (a) Population grating recorded by two counter-propagation coherent waves in an Er-doped optical fiber; (b) three level energy system of rare-earth ion; (c) profile of the recording interference pattern $I(z)$ with fringe spacing Λ and contrast $m=0.6$ and a corresponding normalized profile of the optical absorption $a(z)/a_0$ in the recorded grating

Er^{3+} 离子亚稳态的自发弛豫时间;特征饱和和吸收强度 $I_{\text{sat}} = h\nu / [\tau_0(\sigma_a + \sigma_e)]$, $h\nu$ 为光子能量。

在二能级系统中,光吸收 α 的动力学明显受相同弛豫时间 τ 的控制,其稳态值对信号强度的依赖性可表示为

$$\alpha_{\text{st}} = N_1\sigma_a - N_2\sigma_e = \frac{\alpha_0}{1 + I/I_{\text{sat}}}, \quad (3)$$

式中: N_2 为基态激活粒子密度; α_0 为初始不饱和光吸收, $\alpha_0 = N_0\sigma_a$ 。将注入光强图样(1)式代入(3)式得到吸收曲线 $\alpha(z)$,通常该曲线为倒立且变形的初始正弦光干涉场图样 $I(z)$ 。第一空间谐波的振幅(在大多数情况下它对应于布拉格光栅分量)可以在普遍接受的近似条件(如低对比度 $m \ll 1$)下获得:

$$\alpha_{\text{st}}(z) = \frac{\alpha_0}{1 + \frac{I_0}{I_{\text{sat}}}(1 + m \cos kz)} \approx \alpha_{\text{st}} + \delta\alpha \cos kz = \alpha_{\text{st}}(1 + m' \cos kz), \quad (4)$$

式中:光栅振幅等于 $\delta\alpha = -\frac{m\alpha_0 I_0/I_{\text{sat}}}{(1 + I_0/I_{\text{sat}})^2}$;光栅对比度 $m' = -\frac{mI_0/I_{\text{sat}}}{1 + I_0/I_{\text{sat}}}$ 。实际上,仅仅对于高对比度 m 趋近于 1 时^[12],第一空间谐波的振幅才与精确值不一致,故可以认为上述导出的(4)式是非常精确的近似。分析表明,没有光抽运时写入的粒子数动态吸收光栅是无位移的、反转的,并且其振幅随 m 线性增加,在 $I_0/I_{\text{sat}} = 1$ 时达到最大值。光栅对比度 m' 达到这个平均强度后饱和^[13]。

3 双波混频实验装置

掺铒光纤中双波混频形成动态光栅以及激光振动检测系统的装置如图 2 所示,该检测系统主要由半导体分布式反馈(DFB)连续激光器、光纤环形器(CIR)、3 m 长掺铒光纤(EDFC-980-HP)、压电振动镜和光电探测器等器件构成。实验中使用工作波长

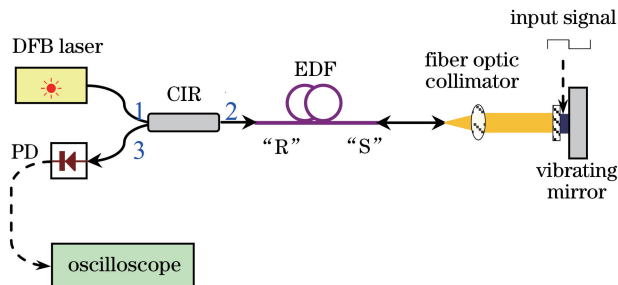


图 2 用于机械振动探测的全光纤双波混频系统示意图
Fig. 2 Schematic of the all-fiber TWM configuration for detection of mechanical vibrations

为 1490 nm 的半导体 DFB 连续激光器作为输入光源,其最大输出功率为 10 dBm。使用的掺铒光纤在 1530 nm 处的吸收系数为 6 dB/m,饱和功率为 0.18 mW。激光器发出的连续激光输入光纤环形器端口 1,环形器端口 2 连接掺铒光纤,在掺铒光纤另一端配置光纤准直镜,准直的激光束对准压电振动镜,振动镜与准直镜的距离大约为 60 mm;环形器端口 3 接入光电探测器(PD)和示波器,将 TWM 系统的反射光信号转化为电信号显示在示波器上。此振动镜由一个压电陶瓷换能器(PZT)和一个镀金反射镜构成,使用光学胶将二者粘连。压电振动镜通过与之连接的信号发生器输出机械振动,并将激光器注入掺铒光纤的激光反射回来同时进行相位调制。

当注入光“R”被振动镜反射后,反射光“S”与注入光在掺铒光纤中干涉形成光强的纵向空间调制,引起增益粒子的空间调制,从而形成动态粒子数光栅。通过信号发生器控制的压电振动镜对“S”光波进行相位调制时,显示的双波混频信号可视作输出光波的强度调制。

4 实验结果与讨论

4.1 双波混频系统中动态粒子数光栅的形成

图 3(a)和(b)分别给出 3 m 长掺铒光纤对应 1490 nm 光源在不同注入光功率下的透射模式光谱和反射模式光谱。测量方式如图 3 中插图所示,其中,透射模式是:移除振动镜,将掺铒光纤直接连接光谱分析仪(AQ6370D, OSA)进行观测;反射模式光谱是振动镜无振动时,注入光通过系统后经振动镜反射,此时,将环形器端口 3 连接光谱分析仪进行观测。从图 3(a)可知实验测量的掺铒光纤透射模式光谱是宽谱,光谱强度随着注入功率增大而增大。图 3(b)所示的反射模式光谱相比于透射模式光谱均有 3 dB 左右的衰减,掺铒光纤中铒离子对注入光有较大的吸收,峰值吸收位于 1530 nm 附近。

在反射模式中,注入光被反射镜反射后,反射光与注入光在掺铒光纤中干涉形成光强的纵向空间调制,引起增益粒子的空间调制,从而形成损耗光栅。在反射镜振幅为 $0.75 \mu\text{m}$ 和频率为 50 Hz 条件下,分别测试了双波混频系统接入普通单模光纤(SMF)与掺铒光纤的示波器轨迹,如图 4 所示。系统接入普通单模光纤时不能观察到双波混频信号的轨迹,只观察到一些环境和仪器产生的噪声信号。而系统在无光抽运条件下接入掺铒光纤时可从示波

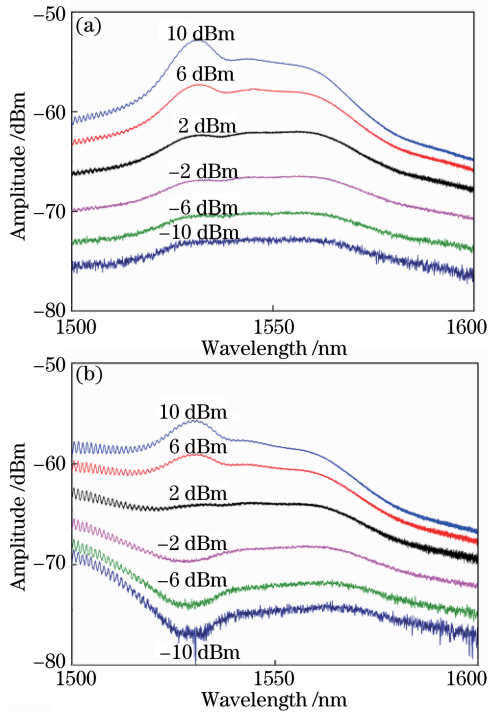


图3 不同功率条件下掺铒光纤的光谱图。
(a)透射模式光谱；(b)反射模式光谱

Fig. 3 Spectra of EDF in different input powers.

(a) transmission mode spectrum; (b) reflection mode spectrum

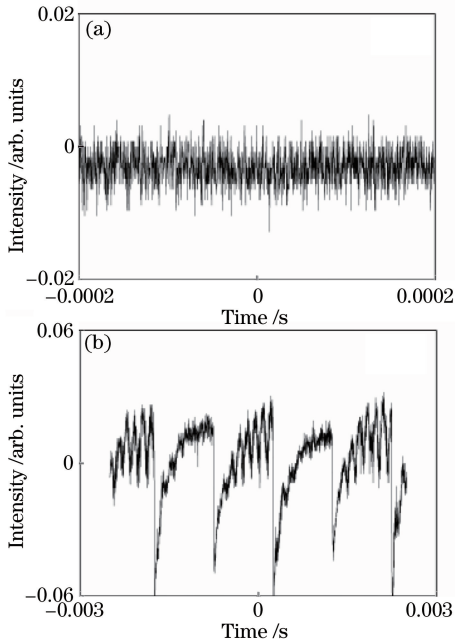


图4 系统在反射镜振幅为 $0.75 \mu\text{m}$ 和频率为 50 Hz 条件下的双波混频信号轨迹。(a)普通单模光纤；(b)掺铒光纤

Fig. 4 Trace of two-wave mixing signals under 50 Hz frequency and $0.75 \mu\text{m}$ amplitude. (a) Using single-mode fiber; (b) using Er-doped fiber

器观察到双波混频信号的轨迹,表明已形成有效的粒子数光栅。粒子数光栅的写入是基于在掺铒光纤

干涉图样亮条纹处光的饱和吸收,通常稳态光学吸收依赖于入射光强度^[14]。此外动态光栅是瞬态的^[15],即当移除具有特定特征时间的注入光相干场图样之后,动态光栅也随之消失。

4.2 激光振动测量

图5给出激光光源在不同注入光功率时对应的双波混频瞬态响应信号。实验中通过PZT输入方波脉冲振动信号,反射镜振幅为 $0.37 \mu\text{m}$,注入光功率范围为 -2 dBm 到 5 dBm 。从图5可以看出,随着注入光功率增加,总体上动态光栅建立时间依次缩短。注入光功率决定掺杂光纤中上能级粒子数浓度,从而影响动态光栅的弛豫时间 τ_g 和反射率等瞬态响应^[16-17]。在基于TWM响应的自适应干涉结构中,探测信号带宽没有基本的限制。这可以从响应峰的尖锐边沿看出,其持续时间仅仅受光电二极管和电子器件的响应时间限制。自适应构型的传递函数具有高通滤波器的形式,其中截止频率 $F_0 = (2\pi\tau_g)^{-1}$ 受限于特征光栅形成时间 τ_g 。在最简单的情况下,此参数由自发弛豫时间 τ_0 和注入光总功率 P 确定^[14]:

$$\tau_g = \tau_0 / (1 + P/P_{\text{sat}}), \quad (5)$$

式中: P_{sat} 为特征饱和吸收强度 (0.18 mW @ 1530 nm)。根据(5)式,注入光功率越高,光栅响应时间越短。

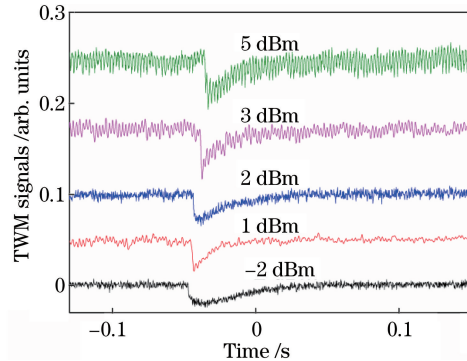


图5 不同注入光功率时双波混频信号轨迹

Fig. 5 Trace of TWM signals under different input powers

双波混频系统使用信号发生器控制振动镜产生周期性的矩形相位调制波,图6给出在不同频率方波相位调制情况下观察到的双波混频响应信号轨迹,其中频率观测范围为 $50 \text{ Hz} \sim 10 \text{ kHz}$,对于更低频率的振动,由于双波混频响应信噪比较大而无法测量。为了获得同等信噪比条件下的示波器波形,实验参数统一设置为:激光器输出功率为 3 dBm ,振动镜振幅为 $0.75 \mu\text{m}$ 。

图7给出图6中不同振动频率响应信号对应的傅里叶频域分析结果。结合图7频谱图和图6呈现

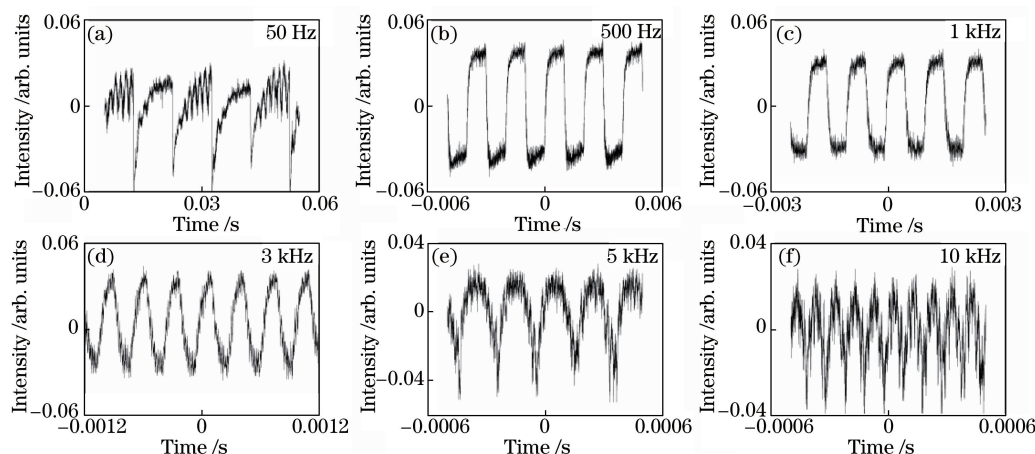


图 6 振动镜产生的不同频率方波相位调制的双波混频响应信号。

(a) 50 Hz; (b) 500 Hz; (c) 1 kHz; (d) 3 kHz; (e) 5 kHz; (f) 10 kHz

Fig. 6 TWM response signal phase-modulated by square wave with different frequencies generated by vibrating mirror.

(a) 50 Hz; (b) 500 Hz; (c) 1 kHz; (d) 3 kHz; (e) 5 kHz; (f) 10 kHz

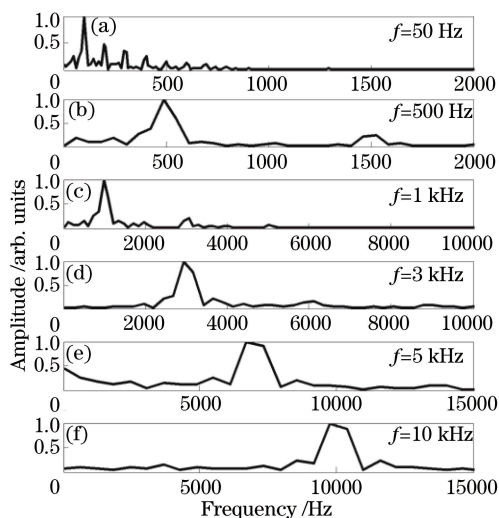


图 7 双波混频响应信号在不同频率下对应的傅里叶变换频谱。(a) 50 Hz; (b) 500 Hz; (c) 1 kHz;

(d) 3 kHz; (e) 5 kHz; (f) 10 kHz

Fig. 7 Fourier spectra of the detected TWM signals under different frequencies. (a) 50 Hz; (b) 500 Hz;

(c) 1 kHz; (d) 3 kHz; (e) 5 kHz; (f) 10 kHz

的示波器轨迹,可以从实验中得出振动镜的频率正好与双波混频响应信号的频率一致。这说明使用此光纤双波混频系统可测量 50 Hz~10 kHz 的振动信号,采集到的输出信号频率与驱动信号频率完全吻合。但是,随着振动频率增加,从 3 kHz 开始频谱的峰值愈来愈宽,这可能与 PZT 的动态响应特性或迟滞效应有关。此外,由于光栅形成时间的限制,双波混频信号曲线形状会随着压电振动镜的振动频率变化而变化。

实验进一步研究了 PZT 控制的振动镜振幅对双波混频响应信号的影响,参数设置如下:振动调制频率为 50 Hz,激光器输入功率为 3 dBm,振动镜振幅的位移值分别为 0.19,0.37,0.75 μm (分别对应于 $\pi/8, \pi/4$ 和 $\pi/2$ 相位调制振幅)。图 8 给出在不同振动镜振幅的方波相位调制下观察的掺铒光纤中双波混频响应信号,可以看出振幅从 0.19 μm 到 0.75 μm 时,双波混频响应信号振幅(峰-峰值)随着振动镜振幅增加有明显增加,但是双波混频响应振

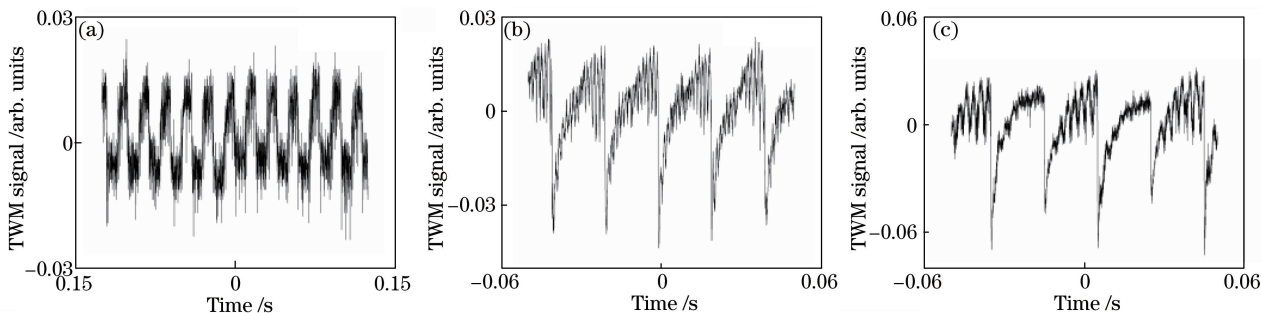


图 8 在不同振动镜振幅的方波相位调制下观察的掺铒光纤中双波混频响应信号。(a) 0.19 μm ; (b) 0.37 μm ; (c) 0.75 μm

Fig. 8 TWM signals observed in EDF phase-modulated by square wave with different amplitudes. (a) 0.19 μm ; (b) 0.37 μm ; (c) 0.75 μm

幅与振动振幅不呈线性变化,这是由于振幅动态光栅的 TWM 响应遵循理论依赖关系:

$$\Delta V/V_0 \propto \sin^2(A/2), \quad (6)$$

式中: $\Delta V/V_0$ 为 TWM 信号的相对振幅; A 为矩形相位调制的峰-峰值振幅^[17]。

5 结 论

设计了一种基于掺铒光纤写入动态光栅的光纤双波混频系统,实现了对机械振动的检测。此系统中 1490 nm DFB 连续激光通过环形器进入一根 3 m 长掺铒光纤作为注入光,掺铒光纤中注入光与压电振动镜形成的后向传播反射光干涉形成驻波场,通过空间烧孔效应沿光纤纵向形成动态粒子数光栅。通过该系统监测由压电振动镜产生的微小振动,实现了 50 Hz 到 10 kHz 动态信号的检测,并且系统具有较好的时域和频谱响应。这种光纤双波混频系统在工业领域应用前景很大,因为它可以作为一种结构简单而坚固、成本低的全光纤系统来实现。为开发用于工业激光超声无损检测(NDT)的激光振动测量实用系统,还需要进一步缩短光栅形成时间或研究多模掺杂光纤双波混频效应。

参 考 文 献

- [1] Fischer B, Zyskind J L, Sulhoff J W, *et al.* Nonlinear four-wave mixing in erbium-doped fiber amplifiers[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(21): 1858-1859.
- [2] Frisken S J. Transient Bragg reflection gratings in erbium-doped fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(24): 1776-1778.
- [3] Amin M Z, Qureshi K K. Investigation of clustering effects on erbium-doped fiber laser performance[J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(1): 010601.
- [4] Zhang L, Zhang X, Tang W. Detection of water surface capillary wave by analysis of turning-point local signal data using a laser interferometer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(7): 071201.
- [5] Hernandez E, Stepanov S, Sanchez M P. Accelerated two-wave mixing response in erbium-doped fibers with saturable optical absorption [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(8): 085502.
- [6] Becker P M, Olsson AA, Simpson J R. Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology [M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [7] Zhu J, Tu X B, Yao Q, *et al.* Brillouin dynamic grating and its applications in distributed sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 100007.
- [8] Eichler H J, Günter P, Pohl D W. *Laser-induced dynamic gratings*[M]. Berlin: Springer Press, 1986.
- [9] Zang Q, Deng X, Liu J, *et al.* Optimization design for bidirectional Er-doped fiber amplifier used in long distance optical frequency transfer link [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0306006.
- [10] Montero P R, Stepanov S, Cota F P, *et al.* Adaptive detection of laser induced ultrasound via two-wave mixing in saturable erbium-doped optical fiber[C] // *European Conference on Lasers and Electro-Optics and the European Quantum Electronics Conference*, June 14-19, 2009, Munich, Germany. New York: IEEE, 2009: 1-1.
- [11] Abrams R L, Lind R C. Degenerate four-wave mixing in absorbing media[J]. *Optics Letters*, 1978, 2(4): 94-96.
- [12] Damzen M J. Self-adaptive loop resonators with gain gratings [M] // Brignon A, Huignard J P, *Phase conjugate laser optics*. Wiley: John Wiley & Sons, Inc, 2004: 367-406.
- [13] Stepanov S, Santiago C N. Intensity dependence of the transient two-wave mixing by population grating in Er-doped fiber[J]. *Optics Communications*, 2006, 264(1): 105-115.
- [14] Stepanov S. Dynamic population gratings in rare-earth-doped optical fibres[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(22): 224002.
- [15] Stepanov S. Two-wave mixing via reflection population gratings[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2006, 117(4): 151-162.
- [16] Xu P, Hu Z L, Ma M X, *et al.* Measurements of transient reflectance spectra of dynamic gratings by optical frequency modulation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(17): 174208.
- [17] Stepanov S, Cota F P, Quintero A N, *et al.* Population gratings in rare-earth doped fibers for adaptive detection of laser induced ultra-sound [J]. *Journal of Holography and Speckle*, 2009, 5(3): 303-309.