

光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔对脉冲激光入射的响应

陈海燕¹ 陈 聪¹ 陈礼林¹ 王 蒙¹ 黎 琦¹ 黄凯强²

(¹ 长江大学物理科学与技术学院, 湖北 荆州 434023; ² 长江大学电子信息学院, 湖北 荆州 434023)

摘要 对光纤布拉格光栅法布里-珀罗(FBG-FP)腔的衰荡特性进行了理论分析,导出了 FBG-FP 腔输出光场与入射脉冲激光光场之间关系的数学表达式,讨论了 FBG-FP 腔的反射率对其衰荡特性的影响。结果表明,FBG-FP 腔对脉冲激光入射的响应包含振荡建立、饱和与衰荡三部分,当腔的功率反射率增加时,腔内稳定光强大幅增加,腔内光场的衰荡时间延长。最后,实验研究 FBG-FP 腔对脉冲激光入射的响应,所得结果与理论分析一致。

关键词 光纤光学;光纤布拉格光栅;法布里-珀罗腔;腔衰荡光谱

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.s105010

Response of Fiber Bragg Grating Fabry-Perot Cavity to Pulsed Laser Injection

Chen Haiyan¹ Chen Cong¹ Chen Lilin¹ Wang Meng¹ Li Qi¹ Huang Kaiqiang²

(¹ School of Physics Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)
(² School of Electronics and Information, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract Cavity ring-down (CRD) spectrum of fiber Bragg grating Fabry-Perot (FBG-FP) cavity is researched theoretically. The expression of output light intensity of FBG-FP cavity is derived, and the effect of the power reflectance of FBG-FP cavity on CRD spectrum is discussed. Numerical results show that the output performance of FBG-FP cavity includes three phases: build-up, stability and ring-down phase. The light intensity in the cavity and CRD time of cavity are proportional to the power reflectance of the FBG-FP cavity. Finally, the response of FBG-FP cavity to injected laser pulse is experimentally demonstrated. Experimental results are consistent with the theoretical analysis.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; Fabry-Perot cavity; cavity ring down spectrum

OCIS codes 060.2310; 230.1480; 140.4780; 120.6200

1 引 言

光学谐振腔在激光产生与变换、传感技术及光谱分析等方面具有重大作用^[1-5]。常见的光学谐振腔有法布里-珀罗(F-P)腔、环形腔、折叠腔等。光学谐振腔对入射光波的响应是其应用的物理基础,这一响应与入射光波的性质和谐振腔的结构有关^[6]。当脉冲激光入射到一个高精度 F-P 腔时,其输出光强表现出随时间指数衰减的特性,即衰荡(CRD)特性,可用衰荡时间来描述,当腔内损耗发生改变时,腔的衰荡时间会发生变化。目前开发较多的是 F-P 腔 CRD 测量技术^[6]。Chen 等^[6-8]对单模光纤 F-P 腔的 CRD

效应进行了详细研究,并成功应用于光生微波/毫米波技术及传感器等领域。最近,Chen 等^[9]研究了光纤环形腔对入射啁啾高斯脉冲激光的响应,并应用于光生微波毫米波领域。利用光纤布拉格光栅(FBG)代替传统的腔镜而构成的光纤布拉格光栅法布里-珀罗(FBG-FP)腔是一种全光纤的新型谐振腔,在激光技术、光束变换及光信息处理的领域都具有应用潜力。目前研究较多的是其对连续激光入射的响应,而其对脉冲激光入射的响应却鲜见研究。

本文报道了 FBG-FP 腔对脉冲激光入射响应的理论与实验研究结果。

收稿日期: 2013-08-24; **收到修改稿日期**: 2013-11-01

基金项目: 国家自然科学基金(60777020)、湖北省自然科学基金(2008CDB317)、湖北省高等学校省级教学研究项目(2012258)、长江大学学术会议资助计划

作者简介: 陈海燕(1965—),男,博士,教授,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: hychen@yangtzeu.edu.cn

2 理论分析与讨论

假设构成 FBG-FP 腔的两个 FBG 完全相同,光

栅周期为 Λ , 布拉格波长为 λ_B , FBG 的长度为 L_g , FBG 纤芯的有效折射率为 n , FBG 的振幅反射率为^[10]

$$r_g = \frac{-i\kappa \sinh[\sqrt{\kappa^2 - (\Delta\beta)^2} L_g]}{-\Delta\beta \sinh[\sqrt{\kappa^2 - (\Delta\beta)^2} L_g] + i\sqrt{\kappa^2 - (\Delta\beta)^2} \cosh[\sqrt{\kappa^2 - (\Delta\beta)^2} L_g]}, \quad (1)$$

式中 κ 为耦合系数, $\Delta\beta = \beta - \beta_0 = 2n\pi\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B}\right)$, $\lambda_B = 2n\Lambda$ 。在匹配条件 ($\Delta\beta = 0$) 下, FBG 的功率反射率为

$$R_g = r_g \times r_g^* = \tanh^2(\kappa L_g), \quad (2)$$

式中 r_g^* 为 r_g 的共轭。

FBG-FP 腔的功率反射率为^[11]

$$R_{FP} = \frac{F \sin^2(\beta L - \phi_r)}{1 + F \sin^2(\beta L - \phi_r)}, \quad (3)$$

式中 FBG-FP 腔的腔长为 L ,

$$F = \frac{4R_g}{(1 - R_g)^2}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}, \quad (5)$$

$$\phi_r = \pi + \arctan \frac{\text{Scosh}(SL_g)}{\Delta\beta \sinh(SL_g)}, \quad (6)$$

$$S = (k^2 - \Delta\beta^2)^{1/2}. \quad (7)$$

为简单起见, 忽略了腔中损耗、单模光纤的双折射效应和非线性响应。假设入射电场振幅与强度分别为 E_0 、 I_0 , 且 $I_0 \propto E_0^2$ 。

当振幅为 E_0 的连续光波注入 FBG-FP 腔时, 经过腔内 p 次往返之后, 腔内光场的复振幅为^[12]

$$E_p = \frac{1 - r_{FP}^{p+1} \exp[-i\varphi(p+1)]}{1 - r_{FP} \exp(-i\varphi)} E_0, \quad (8)$$

式中 r_{FP} 为 FBG-FP 腔的振幅反射系数, φ 为腔内往返 1 次, 光束所经历的相移, 且

$$\varphi = \frac{4n\pi L}{\lambda}, \quad (9)$$

$$R_{FP} = r_{FP} \times r_{FP}^*, \quad (10)$$

式中 λ 为光波波长, r_{FP}^* 为 r_{FP} 的共轭。

当上述光注入过程停止时, 腔内剩余的光波将继续在腔内传输 q 个来回后消失, 光场振幅可表示为

$$E_{pq} = r_{FP}^q \exp(-iq\varphi) E_p. \quad (11)$$

将(8)式代入(11)式有

$$E_{pq} = r_{FP}^q \frac{1 - r_{FP}^{p+1} \exp[-i\varphi(p+1)]}{1 - r_{FP} \exp(-i\varphi)} \exp(-iq\varphi) E_0. \quad (12)$$

输出光信号强度为

$$I = E_{pq} \times E_{pq}^*, \quad (13)$$

式中 E_{pq}^* 为 E_{pq} 的共轭。

当 FBG-FP 腔的腔长为 1 m, 入射激光波长为 1552.975 nm, 入射脉冲波形为方波, 光纤折射率为 1.5, FBG-FP 腔的功率反射率为 0.99 时, FBG-FP 腔的输出特性如图 1 所示。可知, FBG-FP 腔对脉冲激光入射的响应具有衰荡特征, 包含振荡建立、饱和与衰荡三部分。

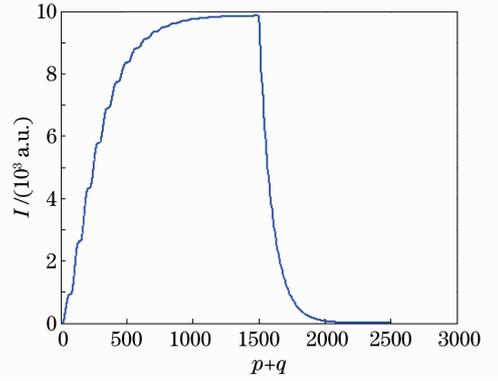


图 1 FBG-FP 的输出特性

Fig. 1 Output performance of FBG-FP cavity

FBG-FP 腔的功率反射率对其输出特性的影响如图 2 所示。可知, 当腔的功率反射率增加时, 腔内稳定光强大幅增加, 腔内光场的衰荡时间延长。这是由于在不考虑其他损耗的情况下, 腔的反射率越高, 腔的精细度就越大, 腔内损耗就越低, 导致腔内

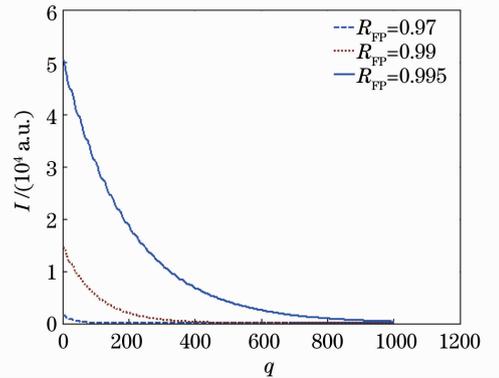


图 2 FBG-FP 腔反射率对衰荡时间的影响

Fig. 2 Effect of the reflectance of FBG-FP cavity on ring-down time

光强增加,腔内光束衰减时间延长。腔的反射率(损耗)对腔的输出特性影响较大,选择高精度的FBG-FP腔,有利于延长谐振腔的衰荡时间。

3 实验分析与讨论

图3为测试系统的实验装置图,包含一个1550 nm分布反馈(DFB)(Opwit CA9005 DFB-EML)激光器、一个射频信号(RF)发生器(Opwit Laser CA8004 System)、两个完全相同的FBG,一段标准单模光纤(SMF-28),一台系统控制仪(Opwit Laser CA8004 System),一个光电探测器(PD, Thorlabs DET01CFC),一台示波器(OSC, Tektronix TDS2022B)。利用温度控制仪精确控制激光器及

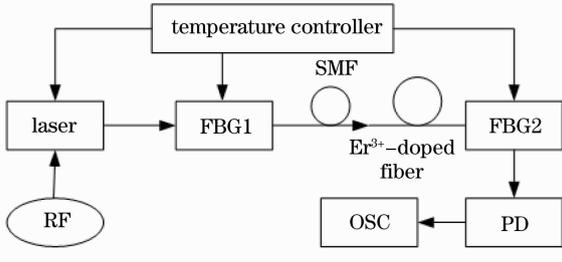


图3 实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

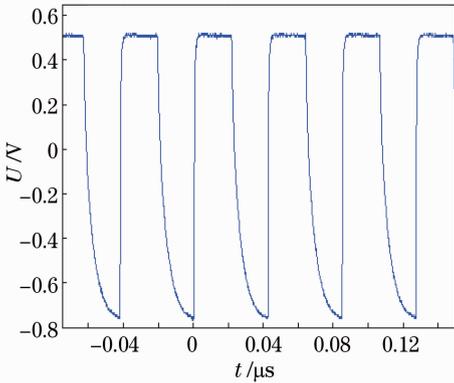


图4 FBG-FP腔的衰荡特性

Fig. 4 Ring-down performance of FBG-FP cavity

FBG的工作温度,两个完全相同的FBG和一段单模标准光纤构成FBG-FP腔,示波器用于测量FBG-FP腔的输出时域特性。

射频信号发生器的输出频率为25 kHz,该信号直接调制1550 nm DFB激光器以产生脉冲激光信号。当FBG的工作温度为20 ℃时,其中心波长是1552.975 nm,FBG-FP腔的输出特性如图4所示。由图可知,在脉冲激光入射时,FBG-FP腔的输出表现出衰荡特性,该结果与(9)式所描述的理论结果一致。

4 结论

在脉冲激光入射时,FBG-FP的输出表现出衰荡特性,腔的功率反射率(损耗)对腔的输出特性影响较大。选择高精度的FBG-FP腔,有利于腔内稳定光强建立和延长腔的衰荡时间,有利于改善CRD光谱特性。所得结论可应用于传感技术、光谱分析等领域。

参考文献

- Long Jingming, Zhou Weidong, Wu Zhiwei. A high sensitive spectral detection system of gaseous measurement based on LabVIEW [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0115003. 龙精明, 周卫东, 吴志伟. 基于LabVIEW的气体高分辨率光谱探测系统[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0115003.
- Ling Liuyi, Xie Pinhua, Qin Min, *et al.*. Open-path incoherent broadband cavity enhanced absorption spectroscopy for measurements of atmospheric NO₂ [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0130002. 凌六一, 谢品华, 秦敏, 等. 开放光路非相干宽带腔增强吸收光谱技术测量大气NO₂ [J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0130002.
- Guo Haifeng, Lü Shasha, Liu Fang, *et al.*. Analysis of the vibration sensitivity of Fabry-Perot cavities [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202004. 郭海凤, 吕莎莎, 刘芳, 等. 法布里-珀罗腔振动敏感度的分析[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1202004.
- Cheng Jie, Yang Minghong, Wang Min, *et al.*. Mach-Zehnder interference hydrogen sensor based on femtosecond laser processing [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0706001. 成洁, 杨明红, 王闵, 等. 基于飞秒激光加工的马赫-曾德尔干涉氢气传感器[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0706001.
- Luo Binbin, Zhao Mingfu, Zhou Xiaojun, *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306004. 罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤Bragg光栅的折射率梯度传感器研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306004.
- H Y Chen. Output characteristics measurement of a single-mode fiber Fabry-Perot resonator at 1.55 μm [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2010, 52(1): 101-103.
- H Y Chen. Fiber optic pressure sensor based on a single-mode fiber FP cavity [J]. Measurement, 2010, 43(3): 370-374.
- H Y Chen. Optical microwave and millimeter generation by using birefringent fiber FP cavity with pulse laser injection [J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2007, 28(11): 979-986.
- L L Chen, H Y Chen, C Chen. Response of a fiber ring cavity to chirped Gaussian pulse laser injection [J]. Journal of Modern Optics, 2012, 59(20): 1753-1756.
- D K W Lam, B K Garside. Characterization of single-mode optical filters [J]. Appl Opt, 1981, 20(3): 440-445.
- Guan Baiou, Yu Yonglong, Ge Chunfeng, *et al.*. Theoretical studies on transmission characteristics of fiber grating Fabry-Perot cavity [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(1): 34-38. 关柏鸥, 余有龙, 葛春风, 等. 光纤光栅法布里-珀罗腔透射特性的理论研究[J]. 光学学报, 2000, 20(1): 34-38.
- Chen Haiyan, Chen Cong, Chen Lilin. Research of nonlinear single-mode fiber Fabry-Perot cavity ring-down [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(s1): s106004. 陈海燕, 陈聪, 陈礼林. 非线性单模光纤法布里-珀罗腔衰荡研究[J]. 光学学报, 2012, 32(s1): s106004.

栏目编辑: 王晓球