

全光纤激光相干合成光谱响应特性研究

赵帅, 范万德, 盛秋琴

(南开大学 物理学院光电信息科学系,
光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071)

摘 要:基于 N-腔镜谐振腔理论对全光纤激光相干合成进行了理论分析, 数值模拟了迈克尔逊型相干合成激光器的光谱特性, 对两个光纤 Bragg 光栅的中心波长差和两路光的光程差对合成光谱特性的影响给出了理论解释. 用啁啾光纤光栅取代其中一个光纤 Bragg 光栅, 使激光相干合成的带宽由 0.3 nm 拓展到 1.0 nm.

关键词:全光纤; 相干合成; 光谱响应; 光纤光栅

中图分类号: TN242; TN253 **文献标识码:** A

文章编号: 1004-4213(2007)07-1191-4

0 引言

光纤激光器以其光纤化结构的特点, 能够方便地对光路进行调整, 便于多路激光的组束耦合. 利用这种技术, 不仅可以得到大功率, 相位偏振可控制, 有良好相干性以及近衍射极限光束质量的激光束, 而且全光纤的相干合成激光器与光纤有着良好的匹配性, 因此在光通讯, 光学传感以及大功率 EDFA 中有着重要的应用^[1-7]. 近年来, 在军事上随着激光武器的研制, 要求激光的输出功率在 100 kW 以上, 对于单个激光器, 由于内部物理因素和结构因素的限制, 其输出功率不可能达到要求, 多光束相干合成技术为解决这个问题提供了有效途径. 将相干激光束进行合成是现代激光科学中有挑战意义的重要领域, 该技术涉及了光学、电子学、物理学等多个学科知识的综合运用, 其中蕴含着诸多创新性的技术和理念, 这个领域的深入研究, 不仅对高功率光纤激光器, 而是将对整个光学领域产生深远的影响.

本文依据迈克尔逊干涉谐振腔理论, 分别引入布喇格光纤光栅 (FBG) 和啁啾光纤光栅 (CFBG), 对迈克尔逊相干合成激光器的光谱响应进行了研究; 对注入锁定现象^[8-9]提出了理论解释.

1 原理

迈克尔逊干涉谐振腔的结构如图 1. 整个装置围绕一个 3 dB 耦合器 C1 构建. 耦合器的输出端 1 处理成平面, 使其保持 4% 的非涅耳反射; 输出端 2 研磨成斜面以避免光的反馈. 耦合器的输入端 3, 4 分别连接一段光纤 L_1 、 L_2 , 并在末端分别熔接光纤光栅 FBG1 和光纤光栅 FBG2; 这样就构成了一个“干涉激光谐振腔”. 腔内的光波场在耦合器的耦合

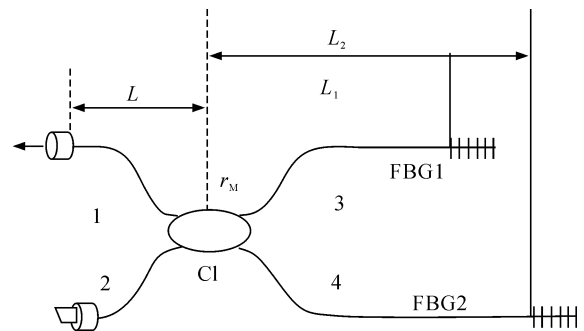


图 1 迈克尔逊干涉谐振腔结构

区 C1 发生干涉. 装置的振荡频率由装置的光谱响应 $R_{eqM}(\nu)$ 决定. 由图 1 以及环形腔理论可知^[9-11]: 由 3 dB 耦合器和 FBG1、FBG2 构成的迈克尔逊干涉谐振腔的光谱响应 $R_M(\nu)$ 为

$$R_M(\nu) = |r_M(\nu)|^2 \quad (1)$$

式中

$$r_M(\nu) = \frac{1}{2} \left(r_1 \exp\left(j \frac{4\pi\nu L_1}{c}\right) + r_2 \exp\left(j \frac{4\pi\nu L_2}{c}\right) \right) \quad (2)$$

r_1 和 r_2 分别为 FBG1 和 FBG2 的振幅反射率; c 为真空中的光速, ν 为光频率.

考虑整个装置的复光谱响应 $r_{eqM}(\nu)$, 装置可以看成是一个前端反射率为 r_C , 末端复反射率为 $r_M(\nu)$, 长度为 L 的 F-P 干涉谐振腔, 复光谱响应 $r_{eqM}(\nu)$ 可表示为

$$r_{eqM}(\nu) = \frac{r_C + r_M \exp\left(j \frac{4\pi\nu L}{c}\right)}{1 + r_C r_M \exp\left(j \frac{4\pi\nu L}{c}\right)} \quad (3)$$

$$R_{eqM}(\nu) = |r_{eqM}(\nu)|^2 \quad (4)$$

L, c 分别表示 F-P 腔长和光速.

光纤光栅的复反射率可以利用方程^[12-14]

$$\frac{dr}{dz} = -i\left(\delta\beta - \frac{Fz}{l^2}\right)r + k(z)[1 - r^2] \quad (5)$$

计算得出. 式 (5) 的边界条件为: $r\left(\frac{1}{2}\right) = 0$, 其中, l

为光纤光栅的长度. $\delta\beta$ 为相位失配因子, F 为啁啾度, $k(z)$ 为耦合因子.

利用四阶 Runge-Kutta 法对(4)式进行数值求解, 联立(3),(4),(5)式即可得出光谱响应 $R_{eqM}(\nu)$. 当 $R_{eqM}(\nu)$ 取得最大值时, 对应着谐振腔损耗最小的频率, 即激光器的输出频率.

2 数值模拟及分析

当取光纤光栅 FBG1 谐振波长为 1 526. 72 nm, 半峰全宽(FWHM)为 0. 12 nm, 反射率为 86. 2%;

FBG2谐振波长为1 526. 62 nm, 谐振波长在1 526. 12~1 527. 12 范围内连续可调, 半峰全宽(FWHM)为 0. 12 nm, 反射率为 86. 2%; 迈克尔逊干涉谐振腔两臂光程差 $\Delta L=10$ cm 时, 对应不同光栅谐振波长差 $\Delta\lambda_D=\lambda_{D1}-\lambda_{D2}$, 模拟中未考虑引入增益介质时对光谱响应的影响. 所得到的光谱响应如图 2.

可以看出, 谐振腔内存在多纵模振荡, 在此未考虑增益谱的影响, 假设增益谱是平坦的, 则位于光谱响应最大的频率才能振荡起来, 其他纵模被抑制, 激光器的输出波长与最大光谱响应频率相对应. 当

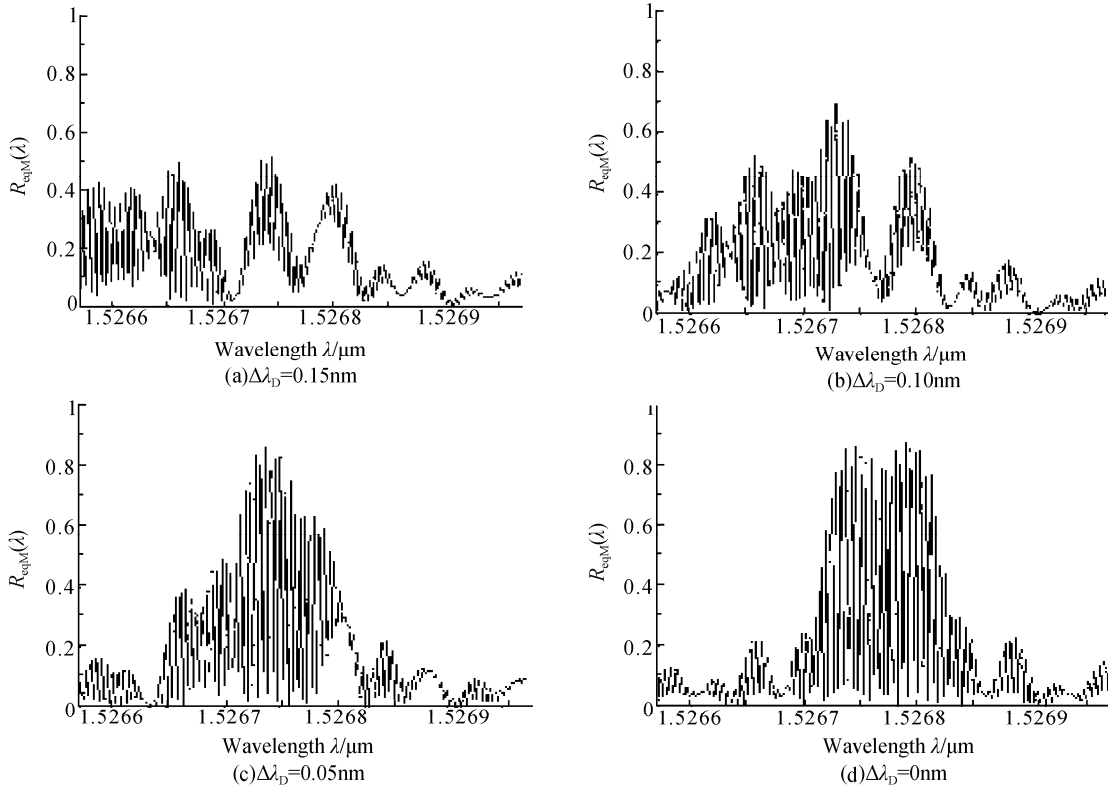


图 2 迈克尔逊干涉谐振腔波长光谱响应
Fig. 2 Wavelength spectral response of Michelson interferometer resonator

FBG1 和 FBG2 的谐振波长差 $\Delta\lambda_D$ 较大时, 迈克尔逊谐振腔两臂中传输的两路光束是非相干的, 激光器出现双波长输出, 输出波长与 FBG1 和 FBG2 的谐振波长相对应, 如图 2(a). 当 FBG2 的谐振波长逐渐向 FBG1 的谐振波长靠近时, 两路光束部分相干, 开始注入锁定过程, 这时激光器输出波长逐渐靠近, 向单波长输出演化, 对应图 2(b)、(c). FBG2 与 FBG1 的谐振波长相同时, 两路光束完全相干, 激光器的输出最大, 与图 2(d)对应. 此时激光器输出波长相对图 2(c)的输出波长移动 0. 013 nm. 这和 Kozlov V A 和 Shirakawa A 等人的实验结果符合得很好^[3,8]. 他们只观察到出现注入锁定过程后, 输出功率随着两个光纤光栅的谐振波长的靠近而增大. 这是由于受光谱仪的分辨率限制, 未能观察到激光器输出波长的变化. 对于 $\Delta\lambda_D < 0$ 的情况, 光谱响

应与图 2(a),(b)和(c)对称, 这里不再赘述.

最大光谱响应 $\max(R_{eqM}(\lambda))$ 随光程差 ΔL 变化的规律由图 3 中的曲线给出. 由于在实际操作中,

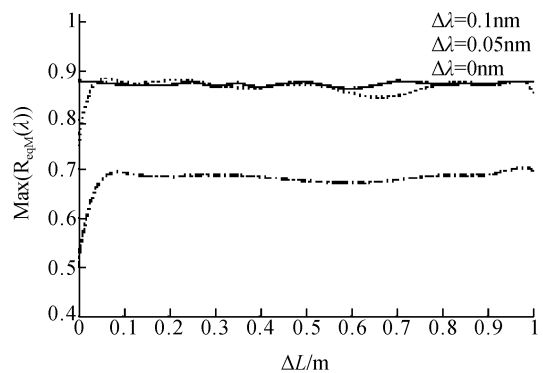


图 3 最大光谱响应随光程差变化曲线
Fig. 3 Calculated evolution of $\max(R_{eqM}(\lambda))$, as function of the average arm length difference ΔL

不可能使干涉谐振腔的两臂长完全相等,引入臂长误差 δl (定义 $\Delta L = L_2 - L_1 + \delta l$), δl 取值在 ± 1 mm 范围内. 当 ΔL 非常小时, δl 对谐振腔的最大光谱响应 $\max(R_{\text{eqM}}(\nu))$ 影响比较明显,容易引起谐振腔的不稳定,随着 ΔL 的增大, $\max(R_{\text{eqM}}(\lambda))$ 起伏趋向比较平缓,在 $\Delta L > 10$ cm 时, $\max(R_{\text{eqM}}(\nu))$ 接近于常数. 在 $\Delta\lambda_D$ 为 0 时,此时两个光栅反射的光束完全相干,最大光谱响应比较平稳,如图中实线所示. 因此在设计腔体时,可以不必考虑光程差 $\Delta\lambda$, 并适当使其大一些,为实际应用带来方便.

在整个 FBG2 调谐过程内,最大光谱响应随两个光纤光栅的谐振波长差 $\Delta\lambda_D$ 的变化规律如图 4, $\max(R_{\text{eqM}}(\lambda))$ 随着 $|\Delta\lambda_D|$ 增大而减小,其半峰全宽(FWHM)为 0.30 nm,略大于光纤光栅半峰全宽的 2 倍. 曲线末端开始增大的原因是两个光纤光栅的一级衍射光出现相干,导致 $\max(R_{\text{eqM}}(\lambda))$ 增大.

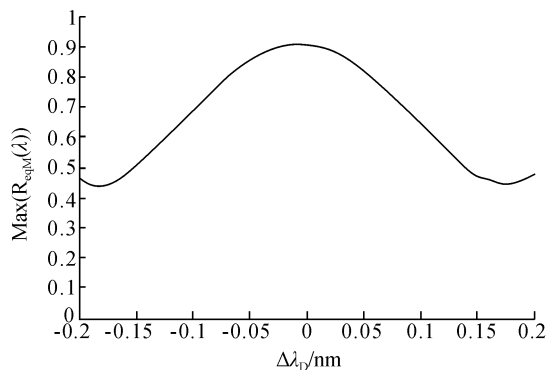


图 4 $\max(R_{\text{eqM}}(\lambda))$ 随光栅谐振波长差 $\Delta\lambda_D$ 变化曲线 ($\Delta L = 10$ cm)

Fig. 4 Calculated evolution of $\max(R_{\text{eqM}}(\lambda))$, as a function of resonance wavelength difference $\Delta\lambda_D$ ($\Delta L = 10$ cm)

图 4 的计算结果表明为了达到多光束相干的要求,要求 FBG1 和 FBG2 谐振波长差相 $\Delta\lambda_D$ 差小于 0.1 nm,要实现完全相干,要求 FBG1 和 FBG2 的谐振波长完全相同. 实际中不可能保证写出谐振波长完全相同的一对光纤光栅. 所以在实际应用当中,为了实现完全相干,就必须对一个光纤光栅进行温度或者应力调谐,这就限制了迈克尔逊型相干合成激光器的应用.

为了避免两个光栅谐振波长不匹配带来的限制,引入啁啾光栅(CFBG)代替 FBG1,其他装置不变. 取啁啾光栅的中心波长为 1 526.72 nm,啁啾度 $F = 180$,半峰全宽(FWHM)为 1 nm,反射率为 92%. 保持 FBG2 不变,所得到的光谱响应如图 5.

由图 5 可以看出,啁啾光栅的作用极大的拓宽了相干带宽,可以使 FBG2 在相对较宽的范围内自由变化,而保持相干的状态. 激光器的输出波长只与 FBG2 的谐振波长相对应,避免了由于布喇格光栅

的谐振波长不匹配造成的相干范围小,需要对光纤光栅进行调谐等缺点,并且提高了最大光谱响应,拓展迈克尔逊型相干合成激光器在实际中的应用范围. 图中的边瓣由于啁啾光栅反射谱比较宽,与 r_c 形成 F-P 干涉腔所导致. 如果需要调整激光器的输出波长,调谐 FBG2 的谐振波长即可,只要保证调谐范围在啁啾光栅的带宽内即可.

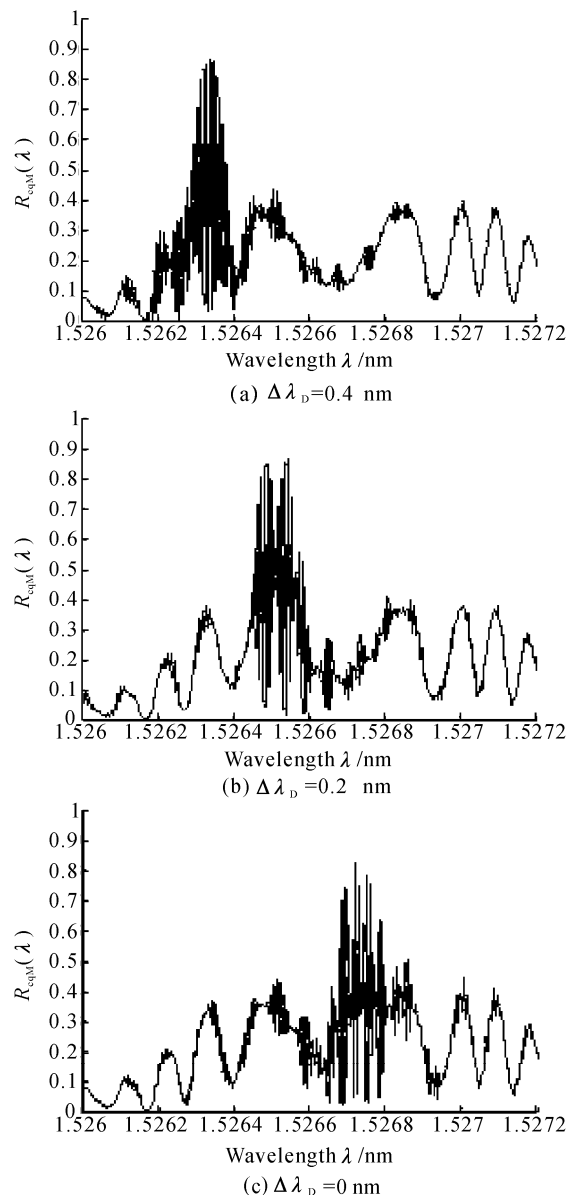


图 5 一端连接有啁啾光栅的迈克尔逊干涉谐振腔波长光谱响应

Fig. 5 Wavelength spectral response of Michelson interferometer resonator with one arm ended by chirped fiber Bragg grating

3 结论

采用多镜谐振腔理论和光纤光栅理论,对全光纤迈克尔逊型激光相干合成的光谱响应特性进行了理论分析和数值模拟,得出各种谐振波长差的光谱响应,并给出了保持相干条件的谐振波长差范围. 对

光程差 ΔL 对最大光谱响应的影响进行了研究、给出了模拟结果. 还研究了引入啁啾光栅对迈克尔逊型相干合成激光的光谱响应的影响. 文中得出的结论对激光束相干合成研究有参考价值, 尤其对实验现象的分析有重要的指导意义.

参考文献

- [1] SHIRAKAWA A, MATSUO K, UEDA K. Power summation and bandwidth narrowing in coherently-coupled fiber laser array[C]. *Proceedings of CLEO*, 2004, **2**: 16-21.
- [2] SHIRAKAWA A, SEKIGUCHI T, UEDA K. Scalable coherent beam combining of fiber lasers[J]. *Solidstate Photonics*, 2003, **83**: 82-86.
- [3] SABOURDY D, KERMENE V, DESFARGES-BERTHELEMOT A, *et al.* Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2002, **11**(2): 87-97.
- [4] CHEN S P, LI Y G, LU K C. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers[J]. *Opt Express*, 2005, **13**(20): 7878-7883.
- [5] SABOURDY D, DESFARGES-BERTHELEMOT A, KERMENE V, *et al.* Coherent combining of Q-switched fibre lasers[J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(20):1524-1525.
- [6] SABOURDY D, DESFARGES-BERTHELEMOT A, KERMENE V, *et al.* Power scaling of Q-switched fiber lasers in a multi-arm resonator[C]. *SPIE*, 2004, **5622**: 306-310.
- [7] SHIRAKAWA A, SAITOU T, SEKIGUCHI T, *et al.* Coherent addition of fiber lasers y use of a fiber coupler [J]. *Opt Express*, 2002, **10**(21):1667-1672.
- [8] KOZLOV V A, HERNANDEZ-CORDERO J, MORSE T F. All-fiber coherent beam combining of fiber lasers[J]. *Optics Letters*, 1999, **24**(24): 1814-1816.
- [9] SABOURDY D, DESFARGES-BERTHELEMOT A, KERMENE V, *et al.* 975 nm single-mode laser source: external coherent combining of two pigtailed laser diodes[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2004, **10**(5):1033-1038.
- [10] PEDERSEN C, SKETTRUP T. Laser modes and threshold conditions in N-mirror resonators[J]. *JOSA*, 1996, **13**(5): 926-937.
- [11] PEDERSEN C, SKETTRUP T. Signal-flow graphs in coupled laser resonator analysis[J]. *JOSA*, 1997 **14**(8):1791-1798.
- [12] LI Zhi-hong, GE Chun-feng, DONG Xiao-yi, *et al.* Theoretical research on chirped fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(10): 911-914.
李志红, 葛春风, 董孝义, 等. 线性啁啾光纤光栅的数值分析[J]. 光子学报, 1997, **26**(10): 911-914.
- [13] HUANG Nai-rong, WANG Qian. Local coupled-mode theory for fiber grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **13**(10): 1274-1278.
黄耐容, 王谦. 光纤光栅的局域耦合模分析[J]. 光子学报, 2001, **13**(10): 1274-1278.
- [14] JIA Hong-zhi, LI Yu-lin. Analysis of linearly chirped gratings with mode-coupling theory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **19**(2):147-150.
贾宏志, 李育林. 线性啁啾光纤光栅的耦合模理论分析[J]. 光子学报, 2000, **19**(2): 147-150.

Numerical Analysis of Spectral Response of All-fiber Coherent Beam Combining

ZHAO Shuai, FAN Wan-de, SHENG Qiu-qin

(*Institute of Physics, Nankai University, Photoelectrical Communication Technology Key Laboratory of the Ministry of Education, Tianjin 300071, China*)

Received date: 2006-04-04

Abstract: Theoretical analysis of all-fiber coherent beam combining is presented in this paper by using N-mirror resonator theory. The spectral behavior of Michelson type coherent fiber laser is numerical simulated. Theoretical explanation is given out on the resonant wavelength difference of the two fiber Bragg gratings and optical length difference influenced the spectral character. Coherent bandwidth is expanded from 0.3 nm to 1.0 nm, when the chirped fiber grating substitutes one of the FBGs.

Key words: All-fiber; Coherent beam combining; Spectral response; Fiber grating

ZHAO Shuai was born in 1981, in Jinlin Province. He received his B. S. degree in applied optics from Nankai University. Now he is pursuing his M. S. degree at Department of Photoelectricity Information Science of Physics Institute, Nankai University. His research interests focus on fiber optics and modern optical communication.

