

文章编号: 1001-3806(2008)02-0113-03

## 相干耦合光栅调谐光纤激光器锁定范围分析

周 霞, 窦汝海, 陈建国\*  
(四川大学 光电系, 成都 610064)

**摘要:** 为了对用光纤光栅调谐的光纤激光器相干耦合系统的锁定波长范围进行研究, 采用光纤布喇格光栅的反射率分布函数对系统阈值进行比较的方法, 得到系统的相干振荡波长应该出现在大约为两个布喇格波长平均值的地方的结果。结果表明, 当两个子激光器的可调谐光纤光栅反射的布喇格波长差小到一定程度时, 两个子激光器就可以实现相干锁定。

**关键词:** 激光技术; 阈值; 相干合束; 光纤布喇格光栅

中图分类号: TN248 文献标识码: A

## Locking range of coherently combined fiber lasers with tunable fiber gratings

ZHOU Xia, DOU Ru-hai, CHEN Jian-guo

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract** The locking range in coherently combined fiber lasers was studied by means of the reflection distribution function of the tunable fiber gratings. After comparing the threshold, it was seen that the oscillation wavelength of the coherent radiation occurred near the average of the two Bragg wavelengths. The result shows that the constituent lasers can be coherently combined when the Bragg wavelength difference between the two fiber gratings is small enough.

**Key words** laser technique; threshold; coherently combined; fiber Bragg grating

### 引 言

近年来, 大功率高亮度的激光光源日益受到人们的关注。利用光纤激光器进行相干耦合是一种获得大功率激光光源的方法, 并且已经有了很多有价值的研究成果<sup>[1-5]</sup>。在这种系统中, 通常用一个公共反射镜来实现各个单元激光器间的相互注入。这种互注入对各个单元激光器光场的相干起着重要的作用。为实现相干合束, 实践中常利用光纤布喇格光栅 (fiber Bragg grating, FBG) 来调整各个单元激光器的波长, 必要时还可能用偏振控制器来控制各单元光场的偏振。实验表明, 当两光栅的布喇格波长接近到一定程度时, 通过互注入可以实现系统各单元光场的相干合束。SHIRAKAWA 等人的实验表明, 当两激光器的波长差  $\Delta\lambda = |\lambda_{B1} - \lambda_{B2}| \leq 0.5 \text{ nm}$  时, 系统会在大约为两个 FBG 的布喇格波长平均值的波长处产生相干输出<sup>[1]</sup>。换句话说, SHIRAKAWA 等人观察到的锁定范围为  $0.5 \text{ nm}$  左右。

据知, 迄今为止, 人们还没有对上面提到的锁定范围的实质进行分析。要考察锁定范围, 首先需要对锁定的物理机制有一个明确的认识。在半导体激光器中, 人们可以利用亨利因子来解释锁定问题, 而在其它激光器中, 亨利因子往往太小而不能用来说明激光器互注入锁定的问题<sup>[6]</sup>。通过对系统的分析, 作者认为这种锁定应该源于模式竞争。

众所周知, 一般情况下, 在激光器中应该是阈值最小的模式能够形成稳定振荡。由于实际的光纤光栅的反射总是有一定带宽的, 因而当两个激光器的调谐光栅的布喇格波长  $\lambda_{B1}$  和  $\lambda_{B2}$  接近到一定程度时, 波长处在  $\lambda_0 \approx (\lambda_{B1} + \lambda_{B2})/2$  的光波长在两个子激光器的光栅上获得一定的反射率  $R_0$ 。虽然  $\lambda_0$  的光波光栅上的反射率小于第 1 个激光器光栅对  $\lambda_{B1}$  的反射率和第 2 个激光器光栅对  $\lambda_{B2}$  的反射率 ( $R_1$  和  $R_2$ ), 但在由光纤耦合器和反射镜 M 构成的另一端处, 情况就颠倒过来了。由于  $\lambda_0$  可以是相干光, 因而在进入右端的光纤耦合器 (其分光比为  $\alpha$ , 通常  $\alpha = 0.5$ ) 时, 它可以因相长相干而全部进入带有反射镜 M (反射率为  $R$ ) 的那个支路。换句话说, 波长为  $\lambda_0$  的光在系统另一端的反射率比  $\lambda_{B1}$  和  $\lambda_{B2}$  的反射率高一倍。于是, 就会形成  $\lambda_0$  光在腔镜上获得的总反射率大于  $\lambda_{B1}$  和  $\lambda_{B2}$  光。在这种情况下, 系统就可能在  $\lambda_0$  处实现相干耦合输出。基于

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60578013)

作者简介: 周 霞 (1982), 女, 硕士研究生, 现主要从事光纤激光器合束方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: optics\_hl@163.com

收稿日期: 2007-02-05; 收到修改稿日期: 2007-03-06

此,作者定量计算了相干耦合光纤激光器的锁定范围,并且得到了与前人实验相符的结果。

### 1 理论分析与讨论

#### 1.1 布喇格光栅的反射率的变化

图 1 中给出了一个光纤激光器相干耦合系统的结

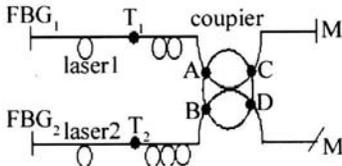


Fig 1 System schematic

构示意图,这个相干耦合系统包括两个光纤光栅(FBG<sub>1</sub>和FBG<sub>2</sub>),一个反射率为R的公共反射镜M,两个光纤激光器(1和2),一个分光比α=0.5的光纤耦合器。公共反射镜M放在光纤耦合器输出端口C并为两个光纤激光器提供反馈,端口D的尾部斜切以防止反射。激光腔内只有一部分是掺杂光纤,如激光器1的掺杂光纤是从FBG<sub>1</sub>到T<sub>1</sub>(其长度为L<sub>1</sub>);此外,还要用一根普通光纤来连接T<sub>1</sub>与耦合器的输入端口A。这两个激光腔的长度可以不同,事实上,在实践中人们有意扩大这种不同(比如每个激光器中普通光纤长度不同),从而可以用Vernier效应来保证复合腔纵模间距远小于光栅反射带宽,从而保证相干耦合系统可以选择到合适的振荡纵模<sup>[1-2]</sup>。为了简便后面的分析和计算,忽略普通光纤以及光纤间的连接损耗。

光纤光栅FBG<sub>1</sub>和FBG<sub>2</sub>的反射率是波长的函数,可以写为<sup>[7]</sup>:

$$R(\lambda) = \frac{k^2 \sin^2(qL_g)}{[q^2 \cos^2(qL_g) + \delta^2 \sin^2(qL_g)]} \quad (1)$$

式中,  $\delta = 2\pi/\lambda - 2\pi/\lambda_B$ ,  $k = \pi n_g \Gamma / \lambda_B$ ,  $q^2 = \delta^2 - k^2$ , 参数Γ为模式与纤芯的重叠因子, n<sub>g</sub>为光栅的调制深度, L<sub>g</sub>为光栅长度。

在实验中,FBG<sub>1</sub>与FBG<sub>2</sub>的布喇格波长可以根据需要而调整。在两个光栅的布喇格波长差|Δλ|=|λ<sub>B1</sub>-λ<sub>B2</sub>|小到一定程度时(见图2),FBG<sub>2</sub>对λ<sub>B1</sub>的

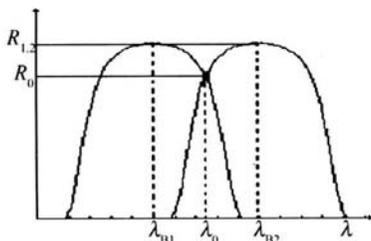


Fig 2 The reflection distribution of FBG

反射率很低(甚至为0),那么波长为λ<sub>B1</sub>的模式就有可能在激光器2中振荡,系统不能实现相干耦合。与此同时,在FBG<sub>1</sub>与FBG<sub>2</sub>的反射率曲线的相交点波长λ<sub>0</sub>

处,两个FBG提供相同的反射率。如果Δλ足够小,R<sub>0</sub>就会足够大;再考虑到光纤耦合器加反射镜M构成的复合系统对波长为λ<sub>0</sub>的相干光提供的实际反射率是对λ<sub>B1</sub>光的反射1/α,对λ<sub>B2</sub>光的反射(1-α)<sup>-1</sup>倍,那么,以λ<sub>0</sub>为波长的相干振荡就会发展起来。

由于反射率R<sub>0</sub>随两FBG的布喇格波长差Δλ变化而变化,因此,FBG<sub>1</sub>与FBG<sub>2</sub>的布喇格波长差对系统的锁模范围有很大影响。图3是FBG<sub>1</sub>与FBG<sub>2</sub>反

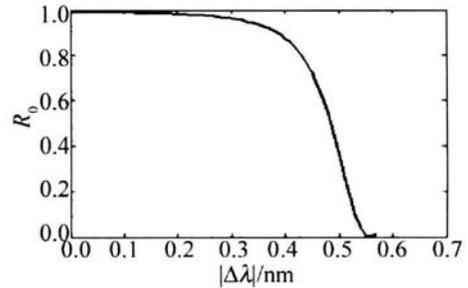


Fig 3 Change of R<sub>0</sub> with the Bragg wavelength difference |Δλ|

射率曲线交点波长的光波的反射率随它们波长差的变化图。计算中使用的参数为<sup>[8]</sup>: k<sub>1</sub>L<sub>g1</sub> = k<sub>2</sub>L<sub>g2</sub> = 3, λ<sub>B1</sub> = 1530nm, c = 3 × 10<sup>8</sup> m/s, Γ = 0.6, n<sub>g</sub> = 4.2 × 10<sup>-4</sup>。从该图可以看到,随着|Δλ|的增大,R<sub>0</sub>逐渐减小;当|Δλ|不是很大的时候,R<sub>0</sub>与R<sub>1</sub>和R<sub>2</sub>的差别很小。

#### 1.2 系统阈值分析

采用等效模型<sup>[9]</sup>来对系统在λ<sub>0</sub>处实现相干振荡的阈值进行分析。利用耦合器的传输矩阵<sup>[7]</sup>,可以得到,再相干振荡时,在激光器1和2中传输的相干光在右端T<sub>1</sub>和T<sub>2</sub>处的等效反射率为:

$$R_{c1} = \alpha P_c R P_1(L_1) \quad (2)$$

$$R_{c2} = (1 - \alpha) P_c R P_2(L_2) \quad (3)$$

式中,P<sub>c</sub>为当两激光器发生相干时,在公共反射镜处的功率。

$$P_c = [\sqrt{\alpha P_1(L_1)} + \sqrt{(1 - \alpha) P_2(L_2)}]^2 \quad (4)$$

对于这样的相干耦合系统,由于模式竞争,只有那些阈值最低的模可以振荡。那么在交点λ<sub>0</sub>处的波长如果要实现相干,则它的阈值就必须低于每个激光器在布喇格波长λ<sub>B</sub>处振荡的阈值。对掺Er光纤激光器,它的抽运阈值P<sub>th</sub>为<sup>[8]</sup>:

$$P_{th} = \frac{h\nu_p A \nu \tau_{32} [N_0 L \sigma_{as} \Gamma_s - \ln(r_1 r_2)]}{[\tau_3 \sigma_{ap} (1 - Q_{th}) (\tau_{21} + \tau_{32})]} \quad (5)$$

其中:

$$Q_{th} = (r_1 r_2)^{-\nu} \exp[(\nu \sigma_{as} \Gamma_s - \Gamma_p \sigma_{ap}) N_0 L] \quad (5a)$$

$$\nu = \frac{\Gamma_p \sigma_{ap} (\tau_{21} + \tau_{32})}{\sigma_{as} (\tau_{21} + \tau_{32})} \quad (5b)$$

$$\tau_3 = \tau_{31} \tau_{32} / (\tau_{31} + \tau_{32}) \quad (5c)$$

式中,h为普朗克常数,ν<sub>p</sub>为抽运光的频率,A为纤芯

横截面积,  $\tau_{32}$ ,  $\tau_{3b}$ ,  $\tau_{21}$  为粒子分别从能级  $|3\rangle$  到  $|2\rangle$ ,  $|3\rangle$  到  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  到  $|1\rangle$  的弛豫时间,  $N_0$  为掺杂浓度,  $L$  为 Er 光纤长度,  $\sigma_{as}$  ( $\sigma_{ap}$ ) 为信号光 (抽运光) 的吸收截面,  $\sigma_{es}$  ( $\sigma_{ep}$ ) 为信号光 (抽运光) 的发射截面,  $\Gamma_s$  和  $\Gamma_p$  分别为信号光和抽运光在纤芯的重叠因子,  $r_1 = \sqrt{R_b}$ ,  $r_2 = \sqrt{R_2}$ 。为了方便后面的分析和计算, 假设激光器 1 和激光器 2 完全相同, 并且抽运功率也相同, 在计算过程中采用  $L_1 = L_2 = 6\text{m}$ ,  $P_1(L_1) = P_2(L_2)$ , 而其它的光纤参数与文献 [9] 中相同, 即  $\alpha = 0.5$ ,  $N_0 = 10^{25} \text{m}^{-3}$ ,  $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$ ,  $A = 1.52 \times 10^{-11} \text{m}^2$ ,  $\sigma_{ap} = 5 \times 10^{-25} \text{m}^2$ ,  $\sigma_{as} = 4.39 \times 10^{-25} \text{m}^2$ ,  $\sigma_{es} = 7.4 \times 10^{-25} \text{m}^2$ ,  $\Gamma_p = 0.8$ ,  $\Gamma_s = 0.6$ ,  $R = 0.04$ ,  $\lambda_p = 980\text{nm}$ ,  $\tau_{32} = 10^{-7} \text{s}$ ,  $\tau_{31} = 1.1 \times 10^{-2} \text{s}$ ,  $\tau_{21} = 1.1 \times 10^{-2} \text{s}$ 。光纤光栅参数则与图 3 相同。

图 4 为系统在  $\lambda_0$  处的阈值随两个 FBG 的布喇格波长差  $|\Delta\lambda|$  变化的曲线。虚线处为激光器 1 在布喇格

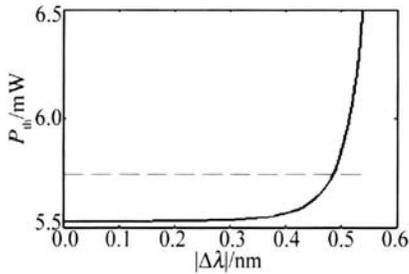


Fig 4 Change of threshold  $P_{th}$  with the Bragg wavelength difference  $|\Delta\lambda|$ 。格波长  $\lambda_B$  处振荡的阈值, 为方便计算, 忽略了 FBG<sub>2</sub> 对  $\lambda_{B1}$  的反射。从该图可见, 在  $|\Delta\lambda| < 0.49\text{nm}$  时, 系统在波长  $\lambda_0$  处系统的阈值低于激光器 1 在 FBG<sub>1</sub> 的布喇格波长  $\lambda_{B1}$  处的阈值, 对激光器 2 也可以得到类似的结果。换言之, 系统实现相干耦合的锁定范围约为  $0.49\text{nm}$ 。在  $|\Delta\lambda| > 0.49\text{nm}$  时, 激光器 1 和激光器 2 将会在各自的布喇格波长处振荡, 系统不能实现相干。

下面讨论当 FBG 的带宽不相同, 系统实现相干的锁定范围, 如图 5 所示。其中点为文献 [1] 中的实

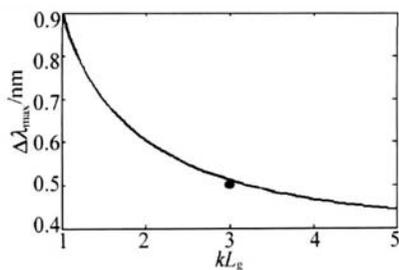


Fig 5 Dependence of the locking range  $\Delta\lambda_{max}$  on the parameter  $kL_g$

验数据。从图中可以看到, 系统的锁定范围与布喇格光栅的反射带宽有关。随着  $kL_g$  变大, FBG 的反射率带宽减小, 系统的锁定范围也跟着减小。当  $kL_g = 3$  时,  $\Delta\lambda_{max} \approx 0.5\text{nm}$ , 与 SHIRAKAWA 等人的实验结果相符<sup>[1]</sup>。

## 2 结 论

在光纤激光器相干耦合系统中, 光纤布喇格光栅的布喇格波长的选择对系统的振荡波长有很大的影响。本文中利用光纤布喇格光栅的反射率分布函数对用光纤光栅调谐的光纤激光器相干耦合系统的锁定波长范围进行了研究。对于这样的系统, 只有那些阈值最小的波长能够振荡, 因此计算系统的阈值, 并且发现当两子激光器的可调谐光纤光栅反射的布喇格波长差小到一定程度时, 系统的最低阈值出现在大约为两个布喇格波长平均值的的地方, 从而在该波长处可以实现相干锁定。此外, 还进一步给出了锁定范围与布喇格光栅反射率带宽的关系。

## 参 考 文 献

- [1] SHIRAKAWA A, SAITOU T, SEKIGUCHI T, *et al*. Coherent addition of fiber lasers by use of a fiber coupler [J]. *Optics Express* 2002, 10 (21): 1167-1172.
- [2] SABOURDY D, KERMENE V, AGNES D B, *et al*. Efficient coherent combining of widely tunable fiber lasers [J]. *Optics Express* 2003, 11 (2): 87-97.
- [3] SIMPSON T B, GARVER ELDES A, PETERSON P. Extraction characteristics of a dual fiber compound cavity [J]. *Optics Express* 2002, 10 (20): 1060-1073.
- [4] CHEN S P, LIY G, LU K C. Branch arm filtered coherent combining of tunable fiber lasers [J]. *Optics Express* 2005, 13 (20): 7878-7883.
- [5] XIAO R, HOU J, JIANG Z F. Coherent combining of fiber lasers [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(5): 516-518 (in Chinese).
- [6] TARTWIK G H M V, AGRAWAL G P. Laser instabilities: a modern perspective [J]. *Progress in Quantum Electronics* 1998, 22(4): 43-122.
- [7] AGRAWAL G P. *Fiber optic communication system* [M]. 3rd ed Beijing: Tsinghua University Press, 2002, 293-294 (in Chinese).
- [8] ZHANG L P, DUAN Z C, CHEN J G. Analytical solutions to rate equations of fiber lasers containing three energy-level ions [J]. *Opt Commun*, 2006, 267: 149-153.
- [9] XIA G Q, WU Z M, CHEN J G. A theoretical study of a fiber grating external cavity semiconductor laser [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2000, A27(6): 488-492 (in Chinese).