

文章编号: 0253-2239(2001)11-1360-04

光纤光栅外腔半导体激光器的高频调制特性*

瞿荣辉 耿健新 张位在 曹根娣 罗颖 陈高庭 王向朝 方祖捷

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 201800 上海)

摘要: 报道了光纤光栅外腔激光器瞬态特性的理论分析, 引入了一个适用于外腔情况的等效光子寿命, 模拟计算表明, 要获得高于 2.5 GHz 的调制速率, 光纤光栅外腔的长度必须短于 4 cm 范围。对所研制的光纤光栅外腔激光器进行了高频调制测量, 得到了在 1 GHz 下的单模激光输出, 边模抑制比在 40 dB 以上, 3 dB 动态线宽为 0.1 nm 左右, 20 dB 动态线宽为 0.3 nm。

关键词: 光纤光栅; 外腔激光器; 高频调制

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

1 引 言

光纤光栅外腔半导体激光器(FBG-ECL), 利用光纤光栅的窄带高反特性, 可以从很宽的半导体激光器增益带宽中, 实现稳定单纵模工作^[1]。由于其输出波长决定于在石英光纤材料中制备的布拉格光栅, 因此具有良好的波长稳定性和可控性, 并且可以避免或减弱半导体激光器调制时的波长啁啾效应。这些特性使其能够较好地满足密集波分复用(DWDM) 光纤通信发射光源的要求。据文献报道^[2~4], 已经实现了高边模抑制比、窄线宽、波长间隔符合密集波分复用标准要求的激光输出。

但是, 由于外腔激光器的整个腔长比半导体激光器芯片要长得多, 因此它的高频调制特性是一个值得研究的重要课题。本文对外腔激光器的调制特性进行了模拟分析, 讨论了器件的物理和几何参数对高频光谱特性的影响。在实验上测量了从 140 MHz 到 1 GHz 的直接调制下器件的光谱, 在 1 GHz 调制下, 获得了边模抑制比达 40 dB、3 dB 线宽为 0.1 nm、20 dB 线宽小于 0.3 nm 的激光输出。

2 分析和模拟计算

文献[4]给出了分析光纤光栅外腔激光器稳态特性的物理模型。其直流阈值条件满足如下方程:

$$r_0 r_e \exp(i2\beta_1 l_1) = 1, \quad (1)$$

式中 r_0 为后腔面的场反射率, r_e 为外腔的等效场反射率:

$$r_e = \frac{r_1 + (t_1 t_2 - r_1 r_2) r - g \exp(i2\beta_2 l_2)}{1 - r_2 r_g \exp(i2\beta_2 l_2)}, \quad (2)$$

β_1 为半导体芯片内部的复传输常数, 其虚部代表腔内增益。 β_2 为外腔段(即光纤内)的传输常数。 l_1 、 l_2 分别为它们的腔长。 $t_1 t_2 - r_1 r_2$ 反映了芯片同光纤之间的耦合效率。在光纤光栅反射率线宽的范围, 等效反射率 r_e 达到一系列极大值, 代表外腔模的位置。目前器件的结构没有从外腔模中选择单一外腔模的机构, 在光纤光栅线宽范围内的所有外腔模激光器都有可能激射。

半导体激光器的高频特性, 一般采用速率方程来研究。对于外腔半导体激光器, 速率方程同样有效。本文着重研究其高频调制响应特性与器件结构的关系, 暂不考虑外腔模的特性。为了简明, 采用单模速率方程来讨论, 可以把激光模看作是相应外腔模的总和。本文不拟研究外腔激光模线宽问题, 因此也不讨论关于相位的方程。这样, 速率方程为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dn}{dt} &= \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_{sp}} - va(n - n_1)P, \\ \frac{dP}{dt} &= va(n - n_1)P - \frac{P}{\tau_p} + \frac{vn}{\tau_{sp}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

方程中的符号与常规半导体激光器的速率方程一样。在小信号近似下, 令电流密度 $J = J_0 + j \exp(i\omega t)$, J_0 为偏置电流, 可以得到:

$$P = \frac{j}{ed} \frac{c_0}{c_1 + i\omega c_2 - \omega^2}, \quad (4)$$

式中, j 为电流调制幅度, 系数 c_0 、 c_1 和 c_2 是微分增益系数 a 、光子寿命 τ_p 、载流子寿命 τ_{sp} 、直流偏置下

* 国家科委 863 高科技项目和上海市应用物理中心资助课题。

的光子密度 P_0 和腔内光速 v 等参数的函数。由此可以得到, 在类共振频率 ω_R 下, 调制度达到极大。

$$\omega_R \approx \sqrt{vaP_0/\tau_p}. \quad (5)$$

频率在 ω_R 以上, 调制度将迅速下降。因此 ω_R 表征了器件最高调制速率。由上式可见, 对于一定的输出功率, 它反比于光子寿命的平方根。

一般半导体激光器的光子寿命的定义, 正比于光子腔面损耗的倒数, 它是决定器件阈值的重要因素, 但是与外腔的结构参数无关。显然这样定义的光子寿命不能用于外腔的情况。对于外腔激光器, 从下面的关系引入等效的光子寿命:

$$\Delta P/\tau_0 = P/\tau_p, \quad (6)$$

式中 τ_0 是光子在内外腔来回一次的时间; ΔP 是光子的损耗, 包括前、后腔面的输出以及芯片与光纤之间耦合的损耗。 P 是腔内 (包括管芯和外腔两部分) 的平均光子密度。求解速率方程可以得到腔内的光子密度的分布^[5], 可以导出阈值以上的等效光子寿命, 如下式所示:

$$\tau_p = \frac{2(n_1 l_1 + n_2 l_2)}{C(l_1 + l_2)} \left[\frac{l_1}{\ln[1/(r_0|r_e|)]} + \frac{l_2 T_2 (1 + R_g) r_0}{(1 - R_2 R_g)(1 - r_0|r_e|)(r_0 + |r_e|)} \right]. \quad (7)$$

光纤光栅外腔激光器的管芯、腔面是增透的, R_2 在 10^{-3} 到 10^{-4} 范围, 考虑到外腔模间隔一般比光纤光栅的反射线宽小得多, 有效反射率可以用对外腔模的积分平均来表示:

$$R_e = R_1 + \frac{T_1 T_2 R_g}{1 - R_2 R_g} = \frac{(T^2 - R_2^2) R_g}{1 - R_2 R_g} \approx T^2 R_g \approx \eta^2 R_g, \quad (8)$$

式中 η 为光纤耦合效率。这样, 等效光子寿命可表示为:

$$\tau_p \approx \frac{2(n_1 L_1 + n_e L_2)}{C(L_1 + L_2)} \left[\frac{L_1}{\ln[1/(\eta \sqrt{R_0 R_g})]} + \frac{L_2 \eta (1 + R_g) \sqrt{R_0}}{(1 - \eta \sqrt{R_0 R_g})(\sqrt{R_0} + \eta \sqrt{R_g})} \right]. \quad (9)$$

由此可见, 器件外腔段的长度增加, 将明显地增加光子寿命。同时光纤耦合效率也对光子寿命有影响。提高耦合效率会增加光子寿命, 影响高速调制。但是, 提高耦合效率是降低阈值、提高输出效率所必须的^[4], 因此不能通过降低耦合效率来提高调制速率。

根据以上的基本方程, 可以对光纤光栅外腔激光器的瞬态特性进行模拟研究。图 1(a) 为 ω_R 随外

腔光纤长度的变化。计算中, 耦合效率取为 40%; 后腔面反射率取为 30%; 光纤光栅反射率取为 60%。图 1(b) 为 ω_R 随光纤耦合速率的变化, 外腔长度取为 4 cm。图 1(c) 是 ω_R 随光纤光栅的反射率和管芯后腔面反射率的变化曲线, 耦合效率取 40%。由图可见, 如要求器件在 1 GHz 以上工作, 外腔长度应短于 4 cm。耦合效率、光纤光栅的反射率和管芯后腔面的反射率的增加减小了光子的损耗, 相当于延长了光子的寿命, 但它们对调制速率的影响相对来说比较小。而且对于外腔激光器的阈值、输出效率等特性, 它们存在一个最优值。要在降低阈值、提高效率的前提下获得较高的调制速率, 应在尽可能提高耦合效率、合理选择光纤光栅反射率的同时, 着重设计外腔的长度, 解决有关的工艺技术。

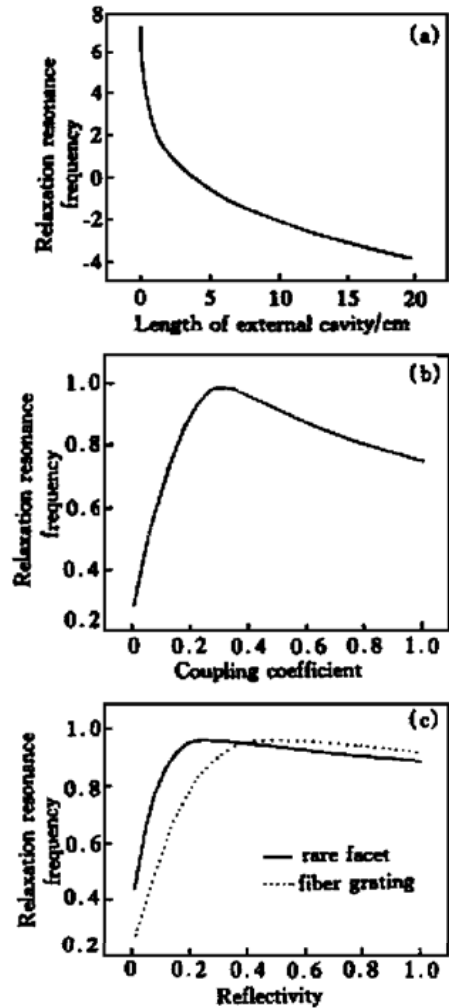


Fig. 1 Relaxation frequency of FBG-ECL vs. (a) Length of external cavity; (b) Coupling coefficient; (c) Reflectivity of fiber grating and rare facet

3 实验结果和讨论

本文研制的光纤光栅外腔激光器, 其基本结构

和工艺见文献[6]。器件所用的光纤外腔腔长在 4 cm~ 10 cm 范围。直流阈值约为 20 mA, 光纤光栅尾纤输出功率约为 1 mW。图 2(a) 为一个器件在 140 Mb/s 非归零(NRZ) 伪随机码调制下的光谱。可以看到, 边模抑制比接近 35 dB, 3 dB 线宽为 0.19nm。图 2(b) 为接收信号的眼图。

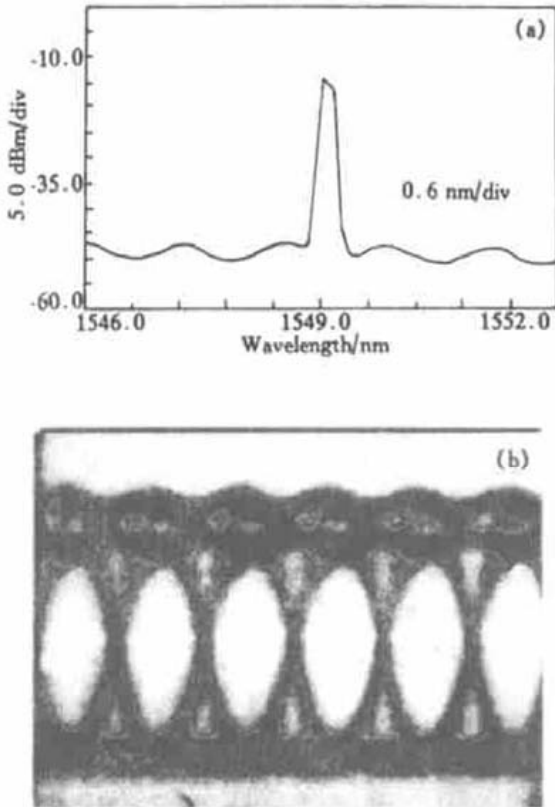


Fig. 2 (a) Spectrum and (b) eye diagram of FBG-ECL modulated by 140 Mbit/s code

图 3 为另一个外腔激光器在 1 GHz 速率调制下的实验结果。高频信号和直流偏置通过一个偏置三通一起加到器件上。所用的光纤光栅峰值反射率为 70%, 外腔长度为 3 cm~ 4 cm。图 3(a) 为用高速探测器测到的信号波形, 图 3(b) 为所测得的光谱, 图 3(c) 为展宽的光谱曲线, 可看到器件具有动态单纵模工作的特性。边模抑制比大于 40 dB, 3 dB 线宽约为 0.1 nm, 20 dB 线宽约为 0.3 nm。由图 3(b) 可以看到, 光纤光栅的峰值波长位置偏离芯片增益谱峰值大约为 40 nm, 器件仍然可以在良好的单纵模状态下工作。这是由于光纤光栅的窄带谱特性, 充分地抑制了附近的边模。同时半导体激光介质的均匀展宽特性, 也抑制了增益谱峰值上的纵模。图 3(c) 记录了直流工作的光谱和 1 GHz 调制下的光谱。二条曲线基本上重合。图 3(d) 是在 700 MHz 调制下的光谱, 故意把直流和交流的信号在纵坐标位移 10 dB 显示。可以看到二者没有多大差别。实际上, 在曲线下包含了许多的外腔模。由

于光谱仪的分辨率的关系, 不能显示出来。这些实验结果说明器件在高频调制下, 由光纤光栅线型决定的线宽包络没有展宽, 这是光纤光栅外腔激光器的一个很重要的性能。

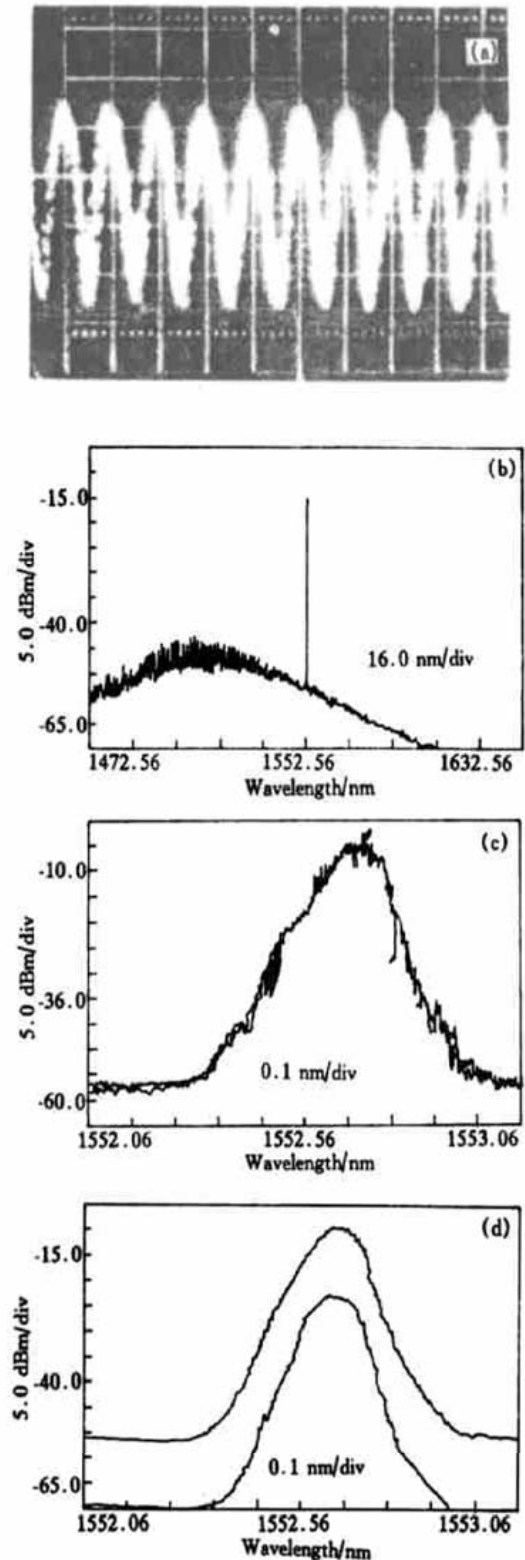


Fig. 3 (a) Output waveform and (b) spectrum of FBG-ECL modulated by 1 GHz signal; (c) Broadened spectra of CW and modulated by 1 GHz; (d) Spectra of CW and modulated by 700 MHz signal

本工作表明, 除了管芯本身必须具有良好高频性能之外, 光纤光栅外腔的长度对于高速调制特性

是一个重要的因素。器件的其他参数,如管芯增透膜的质量、光纤耦合效率、管芯增益谱峰值位置距离光纤光栅峰值的偏差等,也是决定器件动态光谱特性的重要因素。因此必须对器件结构进行仔细的设计,对器件制备工艺进行优化。

参 考 文 献

- [1] Giles C R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1391~ 1404
 [2] Park C A, Rowe C J, Buus J *et al.*. Single-mode behavior

- of a multimode 1.55 μm laser with a fiber grating external cavity. *Electron. Lett.*, 1986, **22**(21): 1132~ 1133
 [3] Goyal A K, Gavrilovic P, Po H. 1.35 W of stable single-frequency emission from an external cavity tapered oscillator utilizing fiber Bragg grating feedback. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(5): 575~ 577
 [4] 罗 颖,曹根娣,耿健新等. 光纤光栅外腔半导体激光器纵模特性研究. *光学学报*, 2000, **20**(3): 357~ 362
 [5] Tsang W T. 半导体注入型激光器. 北京:清华大学出版社和电子工业大学出版社, 1990
 [6] 耿健新,曹根娣,罗 颖等. 光纤光栅外腔半导体激光器的实验研究. *中国激光*, 2000, **A27**(6): 488~ 492

Characteristics of Fiber Bragg Grating External Cavity Semiconductor Lasers under High Frequency Modulation

Qu Ronghui Geng Jianxin Zhang Weizai Cao Gendi Luo Ying Chen Gaoting
 Wang Xiangzhao Fang Zujie

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, 201800 Shanghai)
 (Received 21 July 2000; revised 3 January 2001)

Abstract: Transient characteristics of fiber Bragg grating external cavity laser are presented. An effective photon lifetime is introduced to describe the photon behavior in external cavity condition. Simulation results show that the length of external cavity should be shorter than 4 cm in order to ensure the modulation frequency to be larger than 2.5 GHz. Single mode emission of an external cavity laser was obtained experimentally at 1 GHz modulation with side mode suppression ratio better than 40 dB, 3 dB dynamic line-width about 0.1 nm, and 20 dB dynamic line-width about 0.3 nm.

Key words: fiber grating; external cavity laser; high-frequency modulation