

文章编号: 0258-702X(2002)04-0301-03

# 考虑光纤光栅反射率分布的外腔半导体激光器的理论模型

夏光琼<sup>1,2</sup>, 吴正茂<sup>1,2</sup>, 陈建国<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西南师范大学物理系, 重庆 400715; <sup>2</sup>四川大学光电系, 四川成都 610064)

**提要** 提出了等效腔近似下, 包含光纤光栅反射率分布的光纤光栅外腔半导体激光器(FGECL)的理论模型。数值分析表明, 用该模型所得到的模式抑制比(MSR)明显小于把光纤光栅反射率当成点函数(即只在某一波长处有反射率, 其余波长处反射率为 0)来处理时所得到的模式抑制比。

**关键词** 光纤光栅, 外腔半导体激光器, 反射率分布, 模式抑制比

中图分类号 TN 241 文献标识码 A

## Theoretical Model of External Cavity Semiconductor Lasers Including the Reflectivity Distribution of Fiber Grating

XIA Guang-qiong<sup>1,2</sup>, WU Zheng-mao<sup>1,2</sup>, CHEN Jian-guo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Department of Physics, Southwest Normal University, Chongqing 400715)  
(<sup>2</sup>Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064)

**Abstract** Using the equivalent external cavity approximation, a theoretical model of fiber grating external cavity semiconductor laser(FGECL) has been presented after taking into account the reflectivity distribution of fiber grating. The numerical analysis shows that the obtained mode suppression ratio(MSR) by the model is obviously lower than that by regarding the reflectivity distribution of fiber grating as a dot function.

**Key words** fiber grating, external cavity semiconductor laser, reflectivity distribution, mode suppression ratio

### 1 引言

密集波分复用(DWDM)是光纤通信系统的发展趋势已是一个不争的事实。它对系统重要组成部分的发射光源有很高的要求,即要求它发射波长准确、输出线宽窄等。目前商用的分布反馈(DFB)半导体激光器尽管有较好的单模运行特性,但受温度的影响较大,且在高速调制下线宽展宽明显,因而已不能满足要求。而光纤光栅外腔半导体激光器在很大程度上能够符合 DWDM 光纤通信系统的要求,因而近几年来成为该领域的一个研究热点<sup>[1~3]</sup>。

图 1(a)中给出了一个光纤光栅外腔半导体激光器(FGECL)的典型结构示意图及简化的光路图,

图 1(b)给出了相应的等效腔近似示意图。目前对 FGECL 的理论处理,大多把光纤光栅的反射率分布当成一个点函数<sup>[1]</sup>。实际上,理论和实验研究的结果均表明光纤光栅的反射率分布总具有一定的带宽<sup>[4,5]</sup>。尽管大多数能实现峰值反射率为 1 的光纤光栅的反射谱带宽均较窄(0.2~0.8 nm),但是由于 FGECL 是直接由光纤输出,故设计的光纤光栅的峰值反射率不能太高,相应的反射谱带宽相比于峰值反射率为 1 时的情形要宽,有些情况甚至会大于 1 nm,与 F-P 半导体激光器的模式间距相当。此时如果还用点函数来描述光纤光栅的反射率分布,这在物理上就不太适合了。本文基于以上的物理事实,提出了一个考虑光纤光栅反射率分布的 FGECL 的

收稿日期 2001-02-26;收到修改稿日期 2001-05-25

基金项目 重庆科委项目和高等学校骨干教师资助计划项目。

作者简介 夏光琼(1970—),女,教授,博士生,主要从事激光与光通信研究。E-mail:xiaguangq@263.net

## 理论模型。

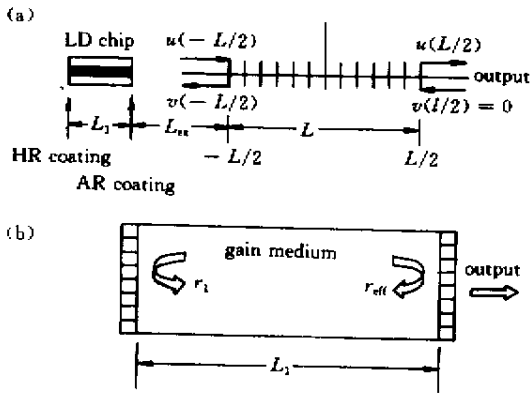


图 1

(a) 光纤光栅外腔半导体激光器的结构示意图；

(b) 光纤光栅外腔半导体激光器的等效腔近似示意图

Fig. 1

(a) schematic of a fiber grating external cavity semiconductor lasers ;

(b) an equivalent external cavity model

## 2 理论分析

## 2.1 光纤光栅的反射率分布

长度为  $L$  的光纤光栅 (如图 1 所示), 其折射率分布可表示为<sup>[6]</sup>

$$n(z) = n_0 \{ 1 + \alpha(z) + 2h(z) \cos[2\pi z/\Lambda + 2\phi(z)] \} \quad (1)$$

式中  $n_0$  为纤芯原折射率,  $\alpha(z)$  为本地平均折射率改变率,  $2h(z)$  为折射率变化的条纹可见度,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\phi$  表征光纤光栅的啁啾。当  $\phi$  不随  $z$  变化时 (无啁啾情况), 布喇格反射波长  $\lambda_B = 2\Lambda n_0 \alpha(z)$  和  $h(z)$  均为远小于 1 的数, 因而等式右边第二和第三项均可看成微扰项。

光在光纤光栅中传输的波动方程为

$$d^2 E/d\xi^2 + [\beta n(\xi)(k_0 n_0)] E = 0 \quad (2)$$

式中  $k_0 = \pi/\Lambda$ ,  $\xi = k_0 z$ ,  $\beta = n_0 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光波长。定义入射光波长与布喇格反射波长的失谐量  $\Delta = \lambda_B/\lambda - 1$ , 结合(1)(2)两式, 并利用条件  $\alpha(\xi)$  和  $h(\xi)$  均为远小于 1, 可得

$$d^2 E/d\xi^2 + [1 + \chi(\sigma + \Delta) + 2h \exp(i\theta) + 2h \exp(-i\theta)] E = 0 \quad (3)$$

式中  $\theta = 2\xi + 2\phi$ 。考虑到光栅中同时存在前向和后向传播的波, 因而电矢量可表示为

$$E = a_+ \exp(i\xi) + a_- \exp(-i\xi) \quad (4)$$

把(4)式代入(3)式并利用慢变振幅近似可得

$$i(da_+/d\xi) \exp(i\xi) - i(da_-/d\xi) \exp(-i\xi) + [(\sigma + \Delta) + h \exp(i\theta) + h \exp(-i\theta)] \times [a_+ \exp(i\xi) + a_- \exp(-i\xi)] = 0 \quad (5)$$

在(5)式中再令代换  $a_+ = u(\xi) \exp(i\phi)$  和  $a_- = v(\xi) \exp(-i\phi)$ , 化简后令  $\exp(i\theta/2)$  和  $\exp(-i\theta/2)$  系数项分别相等, 最后可得前向和后向传播波振幅的耦合模方程

$$du/d\xi = i[(\sigma + \Delta - d\phi/d\xi)u + hv] \\ dv/d\xi = -i[(\sigma + \Delta - d\phi/d\xi)v + hu] \quad (6)$$

定义  $r = v/u$ , 则  $r' = v'/u - u'v/u^2$ , 代入(6)式可得

$$dr/d\xi = -i[h + \chi(\sigma + \Delta - d\phi/d\xi)r + hr^2] \quad (7)$$

由于光栅的反射率  $r_g = r(-L/2)$ , 通过(7)式从  $L/2$  到  $-L/2$  积分, 并根据边界条件  $r(L/2) = 0$ , 在给定光栅的各参量条件下, 可利用计算机数值求解得到不同入射波长下光栅的反射率  $r_g(\lambda)$ 。

## 2.2 光纤光栅外腔的等效反射率

采用等效腔近似, FGECL 可等效为一个 LD, 其左端面的反射率为  $r_1$ , 而右端面的反射率等效为  $r_{\text{eff}}$ , 考虑到光线在外腔中的多次反射,  $r_{\text{eff}}$  可表示为

$$r_{\text{eff}} = \frac{r + r_{\text{ext}} \exp(-i\phi)}{1 + r r_{\text{ext}} \exp(-i\phi)} \quad (8)$$

式中  $r$  表示半导体激光器右端面的反射率,  $\phi = 4\pi L_{\text{ex}}/\lambda$ ,  $L_{\text{ex}}$  表示外腔的长度)表示光线在外腔中传播一周的相移, 以及

$$r_{\text{ext}} = \eta r_g(\lambda) \quad (9)$$

其中  $\eta$  为激光器与光纤光栅之间的耦合效率。因此, 只要利用 2.1 中的方法求出光栅的反射率分布  $r_g(\lambda)$ , 再结合(8)和(9)式, 即可求出外腔等效反射率。

## 2.3 等效腔近似下 FGECL 的速率方程

在平均场近似下, FGECL 的多模稳态速率方程可表示为<sup>[7]</sup>

$$0 = \frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{ac}{n_r} \sum (NH_m - N_0) S_m - \frac{N}{\tau_{\text{sp}}} \quad (10)$$

$$0 = \frac{dS_m}{dt} = \left\{ a \frac{c}{n_r} \Gamma (NH_m - N_0) - \frac{c}{n_r} \left[ \alpha + \frac{1}{2L_1} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}} \right) \right] \right\} S_m + \frac{\Gamma \gamma N K_m}{\tau_{\text{sp}}} \quad (11)$$

式中  $I$  代表注入电流,  $e$  为电子电荷,  $V$  为有源层的体积,  $L_1$  为有源区长度,  $a$  为微分增益系数,  $c$  为真

空中光速  $c$ ,  $n_r$  为介质的折射率,  $\tau_{sp}$  为电子的自发辐射寿命,  $\alpha$  为损耗系数,  $\Gamma$  为限定因子,  $N$  为载流子密度,  $N_0$  为透明载流子密度,  $S_m$  为第  $m$  模的光子密度,  $\gamma$  为自发辐射耦合进振荡模式的最大耦合系数,  $R_1$  为半导体激光器左端面的强度反射率,  $R_{eff}$  ( $= |r_{eff}|^2$ ) 为外腔等效强度反射率, 以及

$$H_m^{-1} = 1 + (\lambda_m - \lambda_g)^2 / Q_g^2$$

$$K_m^{-1} = 1 + (\lambda_m - \lambda_p)^2 / Q_p^2 \quad (12)$$

式中  $\lambda_m$  为第  $m$  模的波长,  $\lambda_g$  和  $\lambda_p$  分别是增益曲线和自发辐射的中心波长,  $Q_g$  和  $Q_p$  表征增益和自发辐射的线宽。

对于某一折射率分布的光纤光栅, 利用 2.1 和 2.2 可求出光纤光栅的反射率分布  $R_{eff}(\lambda)$ , 代入 (10)(11) 式, 就可求  $S_m$ , 从而可研究 FGECCL 的输出模谱、模式抑制比 (MSR) 等输出特性。

### 3 结果与讨论

以下我们以无啁啾的均匀光纤光栅为例进行讨论。均匀光栅的折射率分布为

$$n(z) = n_0 [1 + 2h_0 \cos(2\pi z / \Lambda)] \quad (13)$$

式中  $h_0$  为常数。

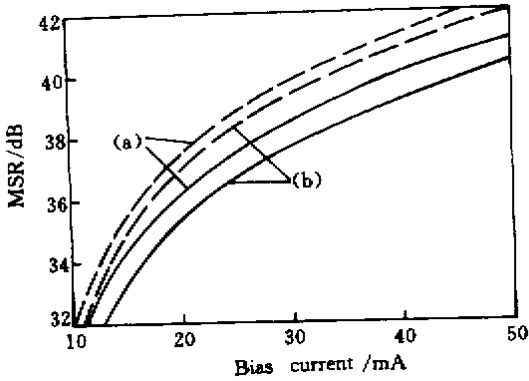


图 2 不同偏置电流下光纤光栅外腔半导体激光器输出的模式抑制比

曲线 (a) 和 (b) 分别对应光纤光栅的峰值反射率为 0.8 和 0.5

Fig.2 Dependence of mode suppression ratio on the bias current with the peak reflectivity of fiber grating equal to (a) 0.8, (b) 0.5

图 2 中给出了用均匀光纤光栅作为外腔的 FGECCL 输出的模式抑制比随注入电流的变化曲线。作图时使用的数据如下： $c = 3 \times 10^8$  m/s,  $n_r = 3.4$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $Q_g = Q_p = 30$  nm,  $N_0 = 4.5 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup>,  $\alpha = 40$  cm<sup>-1</sup>,  $\gamma = 1 \times 10^{-4}$ ,  $R_1 = 0.92$ ,  $\Gamma = 0.5$ ,  $r = 0.1$ ,  $L_1 = 300$   $\mu$ m,  $L_{ex} = 1.5$  cm,  $h_0 = 2.7 \times 10^{-4}$ ,  $n_0 = 1.44$ ,  $\tau_{sp} = 3$  ns,  $\lambda_g = \lambda_p = \lambda_B = 1550.5$  nm。图中实线是在考虑了光栅的反射率分布得到的, 虚线是在把光纤光栅反射率视为点函数时得到的, 曲线 (a)(b) 分别对应均匀光纤光栅的峰值反射率为 0.8 和 0.5。从图中可以看出, 与把光纤光栅的反射率看作点函数时相比, 考虑了光栅的反射率分布后 FGECCL 输出的模式抑制比明显下降。并且光纤光栅的峰值反射率越小, 两者之间的差距越大。由于在光纤光栅外腔半导体激光器中, 所用的光纤光栅的峰值反射率不能太高, 因而, 为了正确反映 FGECCL 的输出特性, 必须考虑光纤光栅的反射率分布。

### 参 考 文 献

- 1 W. H. Cheng, S. F. Chiu, C. Y. Hong *et al.*. Spectral characteristics for a fiber grating external cavity laser [ J ]. *Optical and Quantum Electronics*, 2000, **32**(3) 339 ~ 348
- 2 Luo Ying, Cao Gendi, Geng Jianxin *et al.*. Longitudinal mode characteristics of an external-cavity semiconductor laser with fiber Bragg gratings [ J ]. *Acta Optica Sinica* ( 光学学报 ), 2000, **20**(3) 357 ~ 362 ( in Chinese )
- 3 Hu Zhaoyang, Zhang Yansheng, Ma Xinyu *et al.*. Study of the characteristics of laser diode with fiber Bragg grating external cavity [ J ]. *Chinese J. Lasers* ( 中国激光 ), 2000, **A27**(8): 677 ~ 681 ( in Chinese )
- 4 M. McCall. On the application of coupled mode theory for modeling fiber Bragg gratings [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 2000, **18**(2) 236 ~ 242
- 5 D. Huang, W. Liu, C. Wu *et al.*. Reflectivity-tunable fiber Bragg reflectors [ J ]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(2): 176 ~ 178
- 6 C. R. Giles. Lightwave applications of fiber Bragg gratings [ J ]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8) : 1391 ~ 1404
- 7 G. Xia, Z. Wu, J. Chen *et al.*. Studying semiconductor lasers with multimode rate equations [ J ]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(9) : 1523 ~ 1527