

文章编号: 0258-7025(2005)02-0156-05

光纤光栅外腔半导体激光器改进模型分析

徐庆扬, 陈少武

(中国科学院半导体研究所光电研发中心, 北京 100083)

摘要 改进了基于耦合腔激光器模型的光纤光栅外腔激光器静态分析模型,在考虑了激光器和光纤光栅之间的耦合效率后,将光从激光器耦合进光纤光栅的耦合系数 η_1 和从光纤光栅反馈回激光器的耦合系数 η_2 推导进描述耦合腔的散射矩阵元中,修正了耦合腔模型的表达式。发现两个耦合系数 η_1 与 η_2 之积的大小对增益曲线产生具体影响。分析表明短外腔及短的光纤光栅长度决定了损耗曲线最低处单纵模振荡,激光管芯与光纤端面的反射率也对阈值电流、边模抑制比产生明显影响,尤其对于激光器端面反射系数比较大的情况,可以通过仔细设计空气间隙的长度实现外腔模和法布里-珀罗(F-P)模式的匹配。

关键词 激光技术; 半导体激光器; 光纤光栅; 耦合效率

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Improved Model Analysis of Fiber Bragg Grating External Cavity Semiconductor Lasers

XU Qing-yang, CHEN Shao-wu

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract A complete and precise static modal of fiber grating external cavity semiconductor laser is improved based on the coupled-cavity laser model. By taking consideration of the coupling efficiency between the laser diode and the fiber grating, the coupling coefficient η_1 from the laser to the fiber grating and the coupling coefficient η_2 from the fiber grating to the laser diode are both involved in the elements of scattering matrix describing the coupled-cavity model, and the analytical expression of the coupled-cavity model is modified. It is found that the product of the coupling coefficient η_1 and η_2 affects the gain curve. Additionally, analysis indicates that shorter external cavity and shorter fiber grating length determine the single lasing mode oscillating in the lower region of the gain curve. Diode core and fiber facets reflectivity also play important roles in the threshold current and side mode suppression ratio (SMSR), especially in the case of relatively high reflectivity. This can be solved by carefully designing the length of air gap, resulting in the match of the external cavity modes and Fabry-Perot (F-P) modes of diode. Accordingly the optimized design principle is put forward by general considering of the parameters.

Key words laser technique; semiconductor laser; fiber grating; coupling efficiency

1 引言

长波长半导体激光器是波分复用(WDM)系统中最基本的有源器件,目前广泛使用的是分布反馈布拉格(DBF)激光器,由于制作时波长难以非常精

确地控制以符合波分复用信道,因此器件成品率很低,这无疑大大增加了系统的成本。同时分布反馈布拉格激光器线宽较宽,直接高频调制下容易产生较大啁啾。而光纤光栅外腔激光器却可以解决上述问题。利用光纤光栅的窄带反射特性,与普通法布

收稿日期:2003-09-22; 收到修改稿日期:2004-01-19

基金项目:国家自然科学基金(60007008)资助项目。

作者简介:徐庆扬(1977—),男,山东人,中国科学院半导体所硕士研究生,目前主要从事半导体集成光电子器件的研究。

E-mail:qyxu@red.semi.ac.cn

里-珀罗(F-P)腔半导体激光器管芯耦合形成外腔激光器,不但具有传统外腔激光器的优点,而且器件激光波长更容易由光纤光栅准确控制,并且光纤光栅参数温度稳定性比半导体材料好得多。因此可以形成稳定的单纵模振荡,制成激光器后可与光纤直接有效耦合。高成品率与低成本使光纤光栅外腔激光器成为极有竞争力的光源^[1~5]。

然而大多数报道属于实验结果,对该器件的理论研究还是沿用外腔激光器的模型^[2~4]。由于光纤光栅外腔激光器本质上属于四腔镜结构,因此沿用外腔激光器分析的方法便忽略了一些对光纤光栅激光器的优化设计极为重要的因素。本文从耦合腔激光器模型^[5,6]出发,改进并提出了完整的光纤光栅外腔激光器分析模型,给出了器件低阈值电流、高边模抑制比以及波长精确、稳定的单纵模振荡等条件,为实际优化器件的设计提供了理论依据。

2 模型分析

如图 1 所示,光纤光栅外腔激光器的结构由多量子阱有源腔与光纤和光纤光栅构成的无源腔组成, L_1, L_g, L_2, L_{fg} 分别为有源腔、空气间隙、光纤光栅外腔以及光纤光栅长度。它可以简化成图 2 所示的耦合腔结构。对该耦合腔结构的分析采用了散射矩阵方法^[7]。腔中的光场可写为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $S_{11}, S_{12}, S_{21}, S_{22}$ 为散射矩阵元。当不考虑两个腔之间的多次反射时,它们就代表耦合腔两个端面的反射和透射系数。当考虑端面间的多次反射后,各矩阵元见文献^[7]。

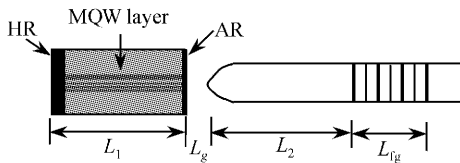


图 1 光纤光栅外腔激光器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of fiber grating external cavity laser diode

实际上,由于光在有源区和光纤之间的空气间隙传播时存在衍射损耗以及模式失配,因此从有源区到光纤的耦合系数 η_1 以及光从光纤中反馈回有源腔的耦合系数 η_2 必须考虑,一般来说 $\eta_1 \neq \eta_2$ 。通过对散射矩阵元的推导,得出修正的散射矩阵元为

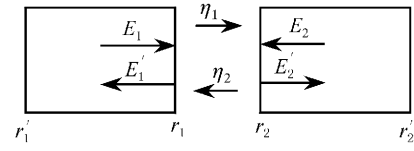


图 2 等价耦合腔结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equivalent coupled cavity structure

$$\begin{aligned} S_{11} &= r_1 - \frac{r_2(1-r_1^2)t_g\eta_1\eta_2}{1-r_1r_2t_g\eta_1\eta_2}, \\ S_{22} &= r_2 - \frac{r_1(1-r_2^2)t_g\eta_1\eta_2}{1-r_1r_2t_g\eta_1\eta_2}, \\ S_{12} &= \frac{[t_g(1-r_1^2)(1-r_2^2)\eta_2]^{1/2}}{1-r_1r_2t_g\eta_1\eta_2}, \\ S_{21} &= \frac{[t_g(1-r_1^2)(1-r_2^2)\eta_1]^{1/2}}{1-r_1r_2t_g\eta_1\eta_2}, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $t_g = \exp(2i\beta_g L_g)$, 为光在空气隙中传播一个来回的相移因子。 $\beta_g = k_0 + i\alpha_g/2$ 为计入损耗后场在空气间隙中的复传播常数, r_1, r_2 分别为耦合腔端面的反射系数。

将无源腔等效为有源腔的等效镜面,即可以用分析 F-P 腔激光器的方法分析耦合腔激光器。激光器的谐振条件为

$$1 - r'_1 R_{\text{eff}} \exp(2i\beta_1 L_1) = 0 \text{ 或 } 1 - r'_1 R_{\text{eff}} t_1 = 0, \quad (3)$$

而有源腔右端面的有效反射系数为^[6]

$$R_{\text{eff}} = S_{11} + \frac{r'_2 t_2 S_{12} S_{21}}{1 - r'_2 t_2 S_{22}}, \quad (4)$$

(3),(4) 式中 $t_n = \exp(i2\beta_n L_n)$, $n = 1, 2$ 为电场在各个光学腔中的相移因子, β_1 与 β_2 为复传播常数,但表达式不同。(4) 式可写为 $R_{\text{eff}} = |R_{\text{eff}}| \exp(i\phi)$ 。因此,耦合腔激光器损耗(或饱和增益系数 g) 和纵模模式波长满足的相位匹配条件为

$$g = \alpha = \frac{1}{L_1} \ln \left(\frac{1}{r'_1 |R_{\text{eff}}|} \right), \quad (5)$$

$$\left[\frac{4\pi m_1 L_1}{\lambda} - \gamma g L_1 + \phi(\lambda) \right] = 2m\pi, \quad (6)$$

式中 m 为纵模指数, γ 为线宽展宽因子, $\gamma g L_1$ 项表示考虑增益对管芯有源区材料折射率的影响^[8]。就光纤光栅外腔激光器而言, r'_2 具体为光纤光栅的反射系数,对于均匀光纤光栅,其反射系数可表示为^[9]

$$r'_2 = \frac{-\kappa \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{fg})}{\hat{\sigma} \sinh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{fg}) + i \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} \cosh(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_{fg})}, \quad (7)$$

式中 κ 为耦合因子, $\hat{\sigma} = \delta + \sigma$, 其中 $\delta = \beta - \pi/\Lambda = 2\pi n_{\text{eff}}(1/\lambda - 1/\lambda_{\text{fg}})$, $\sigma = 2\pi\delta n_{\text{eff}}\eta$, β 为传播常数, Λ 为光纤光栅的周期, λ_{fg} 为布拉格波长, δn_{eff} 为光纤有效折射率空间调制幅度的平均值。

由(5),(6)式可以在 $g \sim \lambda$ 平面上画出损耗曲线和相位曲线(见图3)。两组曲线的交点即为可能的谐振模式。一些具体参数参考了文献[5]: $L_1 = 400 \mu\text{m}$, $L_g = 10 \mu\text{m}$, $L_2 = 1000 \mu\text{m}$, $n_1 = 3.4$, $r_1 = 0.077$, $r'_1 = 0.548$, $r_2 = 0.187$; 光纤光栅参数为: $L_{\text{fg}} = 8000 \mu\text{m}$, $n_{\text{eff}} = 1.46$, $\Lambda = 532 \text{ nm}$, $\delta n_{\text{eff}} = 0.7 \times 10^{-4}$ 。

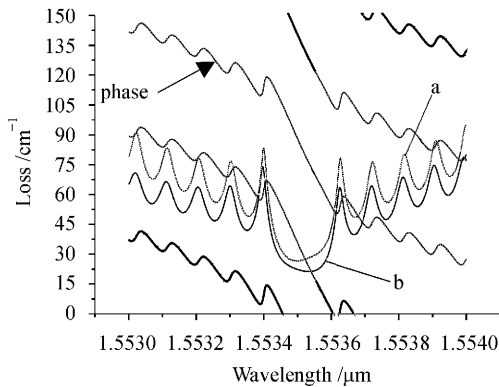


图3 不同耦合效率时的损耗和相位曲线

Fig. 3 Loss and phase curves considering different coupling efficiency
a: $\eta = 0.8$; b: $\eta = 1$

通过解多模稳态速率方程^[4], 求出主边模的光子密度 P_0, P_1, \dots , 从而光纤光栅外腔激光器的边模抑制比(SMSR)为^[10]

$$R_{\text{SMSR}} = 10\lg(P_0/P_1),$$

或者 $R_{\text{SMSR}} = 10\lg\left(\frac{\Delta\alpha + \Delta g}{\delta_G} + 1\right)$, (8)

其中 $\Delta\alpha$ 为主边模的损耗差, Δg 为主边模的增益差, δ_G 为主模模式的损耗与增益的差值, 可以根据激光腔的参数和驱动电流得到, 典型值^[10] 为 $10^{-3} I_{\text{th}}/(I - I_{\text{th}}) \text{ cm}^{-1}$ 。

一般来说在某一波长范围内的光增益可以看作是均匀的, 因此 $\Delta g \approx 0$ 。可以定性地看出, 主边模的损耗差 $\Delta\alpha$ 越大, 其边模抑制比越大。另外, 阈值电流密度 J_{th} 正比于阈值增益(损耗), 输出功率与光纤光栅的反射率、增益都有关系。

3 器件设计分析

3.1 耦合效率的影响

从(3)式可以看出, R_{eff} 的性质直接决定了增益

谱的性质, 端面反射率、外腔长度、光纤光栅长度、反射谱以及耦合效率等参数都集中反映在有效反射率谱中。可以看出, 有效反射率谱与光纤光栅反射率谱宽基本一致(图4), 因此制作精确波长激光器的关键是精确控制光纤光栅反射率的峰值波长及其半峰全宽。实际中由于耦合效率非常低, 必须通过光纤端面拉锥以及端面研磨处理, 处理后一般耦合效率可达到50%左右。一般来说耦合系数 η_1 和 η_2 对不同的光纤端面锥形是不同的, 首先假设向前和向后方向的耦合系数都为0.8时, 由图4发现最大有效反射率明显低于耦合系数为1的情况。通过分析(2)式和(4)式, 发现尽管耦合系数 η_1 和 η_2 一般不同, 但是若综合考虑二者的影响, 设 η_1 和 η_2 的乘积是一定的, 例如 η_1 为0.8, η_2 为0.5以及 η_1 为0.5, η_2 为0.8的情况, 那么由(4)式可以发现 R_{eff} 的表达式的值没有变化, 损耗曲线也没有变化, 因此振荡模式是相同的。实际制作过程中文献[3]提到要保持向前和向后的耦合效率尽量相同, 从本文的分析, 认为应尽量提高二者耦合效率之积, 以保证最优化的损耗曲线。

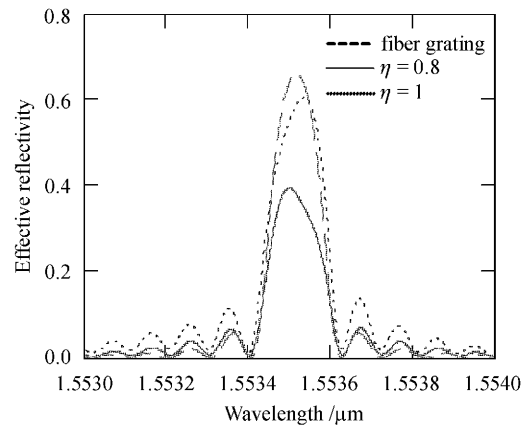


图4 光纤光栅反射率谱与两种有效反射率谱的比较
Fig. 4 Comparison of fiber grating reflectivity spectrum with two effective reflectivity spectra

根据图3所示, 对较短的外腔(此时外腔长度为1 mm)的模拟表明, 耦合系数为0.8(图3曲线a)时的阈值损耗曲线明显高于耦合系数为1(图3曲线b)时的损耗曲线, 而相位曲线差别不大, 因此图中忽略两种情况的相位差别。谐振波长向短波长有微小移动, 但移动范围在有效反射率的半峰全宽范围内。因此耦合效率不但影响阈值损耗, 而且可以导致激光波长的移动。这一因素应在实际设计精确波长的激光器时给予考虑。由图3还可看出, 曲线a

的主边模的损耗差比曲线 b 的要小,但总体差别仍足够大,足以满足(8)式的高边模抑制比,达到大于 40 dB,这与实验结果一致^[5]。由图 3 可以明显看出,随着耦合效率的降低,其边模抑制比便会下降。另外,耦合效率降低时它的最低损耗点则增大,从而导致了阈值电流的升高。

3.2 外腔长度的选择

文献[5]中认为短外腔可以提高激光器的输出稳定性,指出获得稳定单纵模的外腔长度应小于 5 mm,大于 5 mm 时损耗曲线凹陷处就出现振荡,而且随着腔长的增加振荡增多。通过模拟发现,凹陷处的振荡幅度主要由激光器与光纤端面的剩余反射率引起的多个残余 F-P 腔对增益曲线的调制形成(如图 5 曲线 1)。当激光器和端面镀有较高质量的增透膜时,凹陷处振荡便消除(如图 5 曲线 2)。从图 5 中的插图有效反射率谱可以看出,端面剩余反射率对有效反射率在反射峰带宽范围内形成振荡。由图中的等相位线(如图 5 曲线 3)可以看出,它们在凹陷处的密集程度取决于总的腔长,外腔长度越长,纵模模式就越多,因此长外腔激光器可以形成在光纤光栅反射带宽的波长范围内的多纵模振荡。

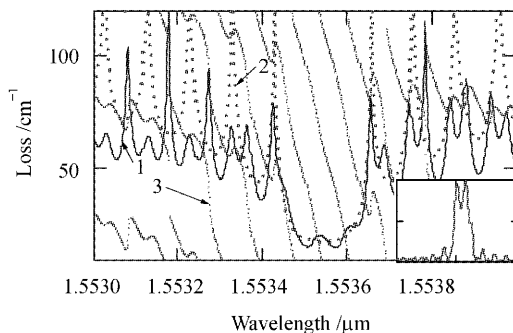


图 5 长外腔下损耗曲线(实线)与分布布拉格反射率损耗曲线(虚线)的比较,插图为有效反射率谱

Fig. 5 Loss curve of long external cavity (solid line) compared with that of DBR laser (dash line), inserted chart is the effective reflectivity spectrum

3.3 端面反射率的影响

如上模拟,一般情况下,对接耦合处的激光器端面反射率最好要比较低以减少多个残余的 F-P 模式^[5,6],从而提高器件的边模抑制比。通过对短外腔激光器的模拟显示,激光器端面与光纤耦合处不同的反射率对损耗曲线的影响不同(为简单起见,考虑耦合效率为 1 时的情况)。例如图 6 为当激光器和光纤端面都未有镀增透膜的情况下($r_1 =$

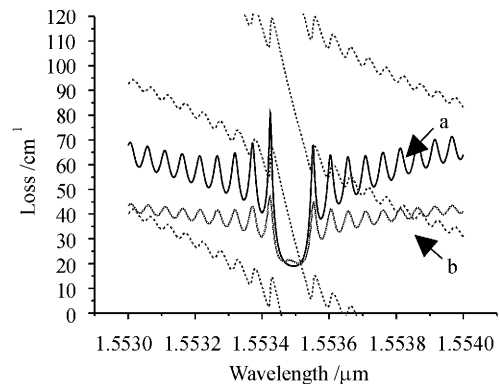


图 6 不同激光器端面反射率的增益(损耗)相位曲线
a: r_1 为 0.077; b: 自然解理面

Fig. 6 Gain (loss) and phase curve of different diode facet reflectivity

a: facet reflectivity r_1 is 0.077; b: cleaved facet

0.5477, $r_2 = 0.187$)短外腔激光器与镀消反射膜后的损耗曲线比较,通过微小地改变外腔的长度 L_2 至 1004 μm ,同样可以形成比较高的边模抑制比的输出(主边模损耗差约 20 cm^{-1} ,由此计算的边模抑制比约 40 dB)。这意味着即使激光器端面反射率比较大(未镀有增透膜),通过调节外腔的长度,使激光器本征腔模式和外腔模式在光纤光栅峰值反射波长处达到相位匹配,从而也可以实现激光器以高边模抑制比的单纵模振荡。

4 结 论

通过修正耦合腔激光器散射矩阵模型,得到了光纤光栅外腔激光器稳定的单纵模振荡、低阈值电流、高边模抑制比等静态工作特性的理论依据。通过综合考虑各个参数并优化设计即可以制作符合密集波分复用(DWDM)系统要求的波长准确、高边模抑制比、高输出功率的光源。

参 考 文 献

1. P. A. Morton, V. Mizrahi, T. Tanbun-Ek *et al.*. Stable single mode hybrid laser with high power and narrow linewidth [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(20):2634~2636
2. 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
3. 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*, 2000, **20**(3):357~362
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[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3):357~362
4. Xia Guangqiong, Wu Zhengmao, Chen Jianguo. Theoretical

- model of external cavity semiconductor lasers including the reflectivity distribution of fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):301~304
- 夏光琼, 吴正茂, 陈建国. 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[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(4):301~304
- 5 Zhou Kaiming, Hu Xiongwei, Liu Haitao *et al.*. Fiber grating external cavity semiconductor lasers (FGECSL) with narrow linewidth high MSR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4):478~482
- 周凯明, 胡雄伟, 刘海涛 等. 高边模抑制比窄线宽的光纤光栅外腔半导体激光器[J]. *光子学报*, 2001, **30**(4):478~482
- 6 Honggang Yu, Chang-Qing Xu, Na Li *et al.*. Effects of the facet reflectivity of a laser diode on fiber Bragg grating semiconductor lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23** (suppl.):429~430
- 7 G. P. Agrawal. *Semiconductor Lasers* [M]. Second Edition. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 391~395
- 8 R. F. Kazarinov, C. H. Henry. The relation of line narrowing and chirp reduction resulting from the coupling of a semiconductor laser to a passive resonator [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(9):1401~1409
- 9 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- 10 L. A. Coldren, S. W. Corzine. *Diode Laser and Photonic Integrated Circuits* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1995. 107~108



重 要 堪 误

本刊于2004年31卷第5期635~639页刊出署名文章“低强度 He-Ne 激光辐照对兔透明软骨细胞活性的影响”一文,今收到核定的揭发文件,指出该文确有造假、剽窃行为。

由于该文已刊出,为挽回影响,本刊将该文从网上及目录中删除。凡今后引用该文引起争议和后果,本刊不再负责。并向读者致歉,望专家与读者对本刊工作给予监督、批评和指正。

《中国激光》编辑部

2005年2月