

光纤光栅外腔半导体激光器的多参量优化分析*

何晓颖 黄德修 李 蔚

(华中科技大学光电子工程系, 武汉 430074)

摘要 基于等效腔模型, 采用多参量优化的多目标遗传算法优化了光纤光栅外腔半导体激光器 (FGECL) 管芯的两个端面反射率和外腔长度. 研究了 FGECL 的阈值特性, 并对多个参量优化和单个参量优化的结果进行了比较分析. 表明获取最低阈值电流, 要以激光器的电光转换效率和输出光功率为代价, 从而得到高边模抑制比、窄光谱线宽、良好动态特性和高调制速率的 FGECL. 并且发现当两端面的反射率增加, 同时激光波长在外腔长度中形成稳定谐振时, 激光器的阈值电流达到最小值, 但相应的电光转换效率和出光功率会急剧地减小.

关键词 光纤光栅外腔半导体激光器; 阈值电流; 遗传算法; 多参量优化

中图分类号 TN248.4

文献标识码

A

0 引言

在密集波分复用通信系统 (DWDM) 中, 要求发射光源的波长能被精确控制^[1,2]. 由于 DFB 激光器的价格昂贵导致波分多址以太无源光网络 (EPON) 收发器件的价格居高不下, 所以波分多址 EPON 收发器件中的光源只能选择波长合适、价格便宜的管芯. 随着光纤光栅制作技术的完善, 最近发展起来了一种用光纤光栅作为外反馈形成混合腔的激光器吸引了人们的注意力. FGECL 与 DFB 激光器相比其管芯制冷要求低、工作线宽小、直接调制时啁啾小、波长调谐方便, 而且制作工艺简单, 造价低廉, 被认为是波分复用通信系统和粗波分复用光纤通信系统以及无源接入网中较为理想的光源^[3~5]. 国内对 FGECL 也进行了大量的研究, 特别是对边模抑制比、线宽特性^[6]、波长调谐^[7]及其在全光波长转换方面^[8]的应用都有报道, 而且近期中科院半导体所还报道了光纤光栅和半导体激光器对接耦合如何影响 FGECL^[9]. 然而, FGECL 有着外腔激光器普遍存在的问题——阈值电流过高, 要解决这个问题, 必须优化激光器的多个参量获得最低的阈值电流. 本文选用遗传算法对 FGECL 的多个参量进行了优化和重构, 来获取最低的阈值电流. 从理论上分析了单个参量, 两个参量以及三个参量重构的情况, 并将这三种重构状态下的 FGECL 的边模抑制比、光谱线宽及 $P-I$ 特性曲线进行对比分析, 得出了有实际应用意义的结论.

1 理论模型

强反射 FGECL 的管芯为 Fabry-Pérot (F-P) 腔

结构, 其中一个端面镀增透膜后和光纤光栅耦合. 而另一端面镀高反膜. 光纤光栅的端部进行微透镜处理以提高耦合效率. LD 增透面出射的光, 在光纤光栅和增透面构成的子腔中来回振荡. 将外部的光纤光栅和 LD 右端镀有增透膜面等效为一个平面反射膜^[10,11].

由于在 F-P 腔中有多种模式振荡, 选用多模速率方程^[10]来分析 FGECL. 忽略温度和半导体中相位变化的影响, 速率方程为

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{N(t)}{\tau_{sp}} - \frac{c}{n_r} [\sum_m G_m S_m(t)] \quad (1)$$

$$\frac{dS_m(t)}{dt} = \frac{c}{n_r} \Gamma G_m S_m(t) - \frac{c}{n_r} [\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln(\frac{1}{R_1 R_{eff}})] + \frac{\Gamma \gamma K_m N(t)}{\tau_{sp}} \quad (2)$$

式中 m 为频率 (或波长) 的纵模数, 本文取为 23; N 是载流子浓度, 单位为 cm^{-3} ; S_q 是第 q 阶模式的光子密度, 单位为 cm^{-3} ; I 为注入的电流, 单位 A; 其他的参量及其单位值参见表 1. FGECL 的等效强度反射率 R_{eff} , 定义为

$$\sqrt{R_{eff}} = r_{eff} = \frac{r_2 + \eta r_g(\lambda) \exp(-2i\beta l_{ext})}{1 + \eta r_2 r_g(\lambda) \exp(-2i\beta l_{ext})} \quad (3)$$

式中的 r_2 是镀有增透膜面的振幅剩余反射率; r_g 是光纤光栅的振幅反射率, 在计算中光纤光栅的振幅反射率为 0.91; l_{ext} 是外腔长度; η 是光纤与 LD 之间的耦合效率; $\beta = 2\pi n/\lambda$ 为光在光纤中的传播常量.

为了模拟激光器的自发辐射谱, 引入了符号 K_m ^[12], 定义为

$$K_m^{-1} = 1 + (\lambda_m - \lambda_g)^2 / Q_g \quad (4)$$

式中 λ_g 是自发辐射中心波长; λ_m 是第 m 阶模式的激光波长; Q_g 是指自发辐射谱宽. 速率方程中的 G_m 为激光器的 m 阶模的增益值, 表示为

$$G_m = a(N - N_0) - b(\lambda - \lambda_g)^2 \quad (5)$$

式中 a 为微分增益, 取值为 $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $b =$

* 国家 863 高技术发展计划 (No. 2002AA312050) 资助项目
Tel: 027-87549657 Email: hexiaoying@hust.edu.cn
收稿日期: 2005-03-03

0.23 nm⁻². 用于数值计算的 LD F-P 腔长度取固定值(见表 1)300 μm, 而 FGECCL 外腔长度、LD 两端面反射率由遗传算法优化计算出的数值以及文献中的数值给出.

表 1 用于光纤光栅激光器数值模拟参量值

参量	符号	值
F-P 腔激光器有源区厚度	d	0.15 μm
F-P 腔激光器有源区长度	L	300 μm
F-P 腔激光器有源区宽度	W	2 μm
光场限制因子	Γ	0.37
光在真空中的速度	c	3×10^{10} cm/s
有源区的折射率	n_r	3.4
布拉格波长	λ_B	1556.1 μm
电子电量	e	1.6×10^{-19} c
电子的自发辐射寿命	τ_{sp}	3 ns
自发辐射模式分配因子	γ	1×10^{-4}
损耗系数	α	40 cm ⁻¹
后端面剩余反射率	R_2	$10^{-3} - 10^{-5}$
前端面反射率	R_1	0.92-0.99
透明载流子密度	N_0	0.45×10^{18} cm ⁻³
耦合效率	η	0.4
增益谱的中心波长	λ	1.5561 nm
有效增益谱线宽	$\Delta\lambda$	30 nm
光子寿命	τ_p	1.5 ps
外腔长度	l_{ext}	0.1 mm-25.7 mm
微分增益	a	2.5×10^{-16} cm ²
增益常量	b	0.23 nm ⁻²

假定 FGECCL 的光是从 LD 的高反膜面出射, 那么出光功率和光子数的关系表达式为

$$P_m = \frac{1}{2} R_1^{-1/2} (1 - R_1) V \nu_g h \nu_m S_m \quad (6)$$

式中的 V 为有源区的体积, h 为普朗克常量, ν_m 为 m 模式的频率. FGECCL 的边模抑制比为

$$SMSR = 10 \log \left(\frac{p_{12}}{p_{11}} \right) \quad (7)$$

激光器的光谱线宽主要是由自发辐射场相位的波动引起的. FGECCL 的外部耦合腔的相位条件限制了激光器相位的波动, 从而压缩光谱线宽. 仅考虑激光器没有达到增益饱和的情况, 这时光谱线宽和激光光强度成反比, 采用文献[13]的方法可得到

$$\Delta\nu = \frac{h\nu_g^2 n_{sp} \alpha_m g}{8\pi P} \left\{ \frac{1}{D(r) + D_1(r)} + \frac{\alpha^2 \beta^2}{D(r)} \right\} \quad (8)$$

式中的 P 为输出光功率; n_{sp} 为载流子分布没有完全反转的统计因子; α_m 为激光器终端面的损耗, 可表示为: $\alpha_m = (1/L) \ln(1/r_1^2)$; ν_g 为激光器半导体中的光子群速度; g (FGECCL 的阈值增益) 为

$$g = \alpha_i + (1/2L) \ln(1/R_1 R_{ext}) \quad (9)$$

$D(r)$ 和 $D_1(r)$ 分别定义为

$$D(r) = \frac{(1 + r_1 r_{ext}^{-1})(1 - r_1 r_{ext}) \ln(1/r_1^2)}{2(1 - r_1^2) \ln(1/r_1 r_{ext})} \quad (10)$$

$$D_1(r) = \left(\frac{n_1^2 L_c}{2n_r L} \right)^2 \left(\frac{1 - r_2^2}{1 - r_1^2} \right) r_0^2 r_{ext} r_1 \ln(1/r_1^2) \quad (11)$$

式(10)和式(11)中 n_1 为光纤光栅的折射率, L_c 为相干长度, 近似用 l_{ext}/n_1 来代替.

2 多参量优化的特性分析

本文算法优化选取的三个参量分别为 F-P 腔半导体激光器两端面的反射率和外腔长度. 该三个参量重构的范围分别是: 外腔长度为 1 mm~25.7 mm, LD 前端面的反射率为 0.92~0.99, LD 后端面的剩余反射率为 $10^{-3} \sim 10^{-5}$. 本文将文献中的参量值与单参量、两个参量和三个参量优化获得的数值(参见表 2)带入式(1)、式(2)、式(7)和式(8)中, 得到下面的四幅图.

图 1、图 2、图 3 和图 4 中点线是采用表 1 和表 2 中第二行的参量模拟计算出的, 虚线是采用表 1 和表 2 中第三行(仅用遗传算法优化外腔长度)的参量值模拟计算出的曲线, 虚点线是采用表 1 和表 2 中第四行(用遗传算法优化外腔长度和后端面的剩余

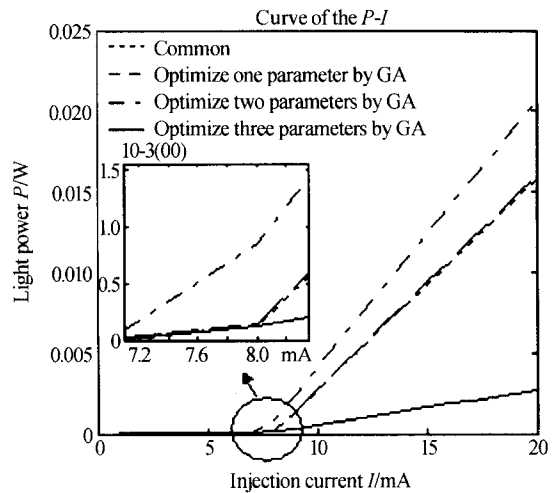


图 1 光纤光栅外腔半导体激光器的 P-I 特性曲线
Fig. 1 Curves of light power versus injection current of FGECCL

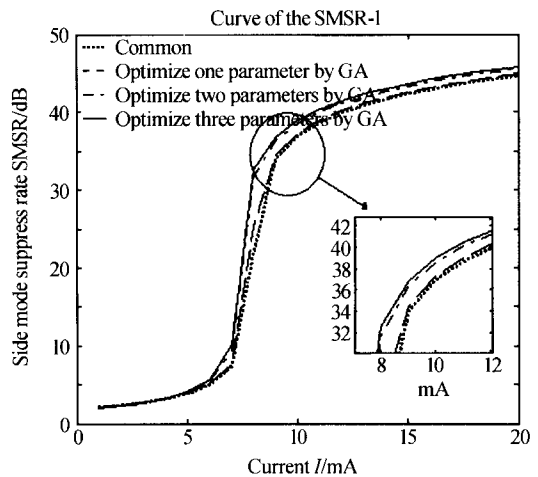


图 2 光纤光栅外腔半导体激光器的 SMSR-I 曲线
Fig. 2 Side mode suppression rate versus injection current of FGECCL

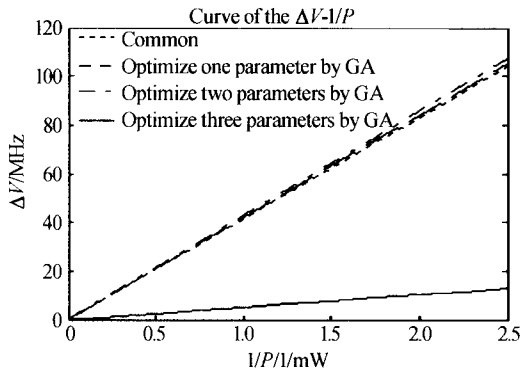


图 3 光纤光栅外腔半导体激光器的光谱线宽与光功率倒数的关系曲线

Fig. 3 Line-width of optical spectrum versus reciprocal relation of light power of FGECCL

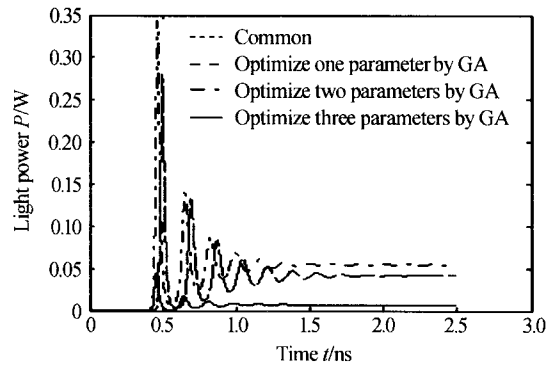


图 4 光功率随时间的变化的瞬态过程

Fig. 4 Transient states of light power with the change of time

表 2 遗传算法优化参量所得阈值电流和文献中的阈值电流对比

	前端面的 反射率 R_1	后端面的 反射率 R_2	外腔长度 l_{ext}/mm	阈值电流 I/mA	$P-I$ 曲线斜 率值 (mW/mA)
一般的文献选用	0.92	10^{-5}	7	7.9228	1.3071
仅用遗传算法优化 L_{ext}	0.92	10^{-5}	4.9	7.8969	1.3229
采用遗传算法优化 L_{ext} 和 R_2	0.92	0.009981	4.9	7.4655	1.6483
用遗传算法优化 L_{ext} 、 R_2 和 R_1	0.9898	0.009981	4.9	7.3816	0.2130

反射率)的参量值计算的,直线是采用表 1 和表 2 中第五行(用遗传算法优化外腔长度和 LD 前后端面反射率)的参量值画出的曲线. 图 1 描述的是 FGECCL 的输出光功率和注入电流之间的关系. 从图 1 中的内插图可看到,三个参量重构时,前端面的反射率很高,后端面的剩余反射率也是比较高,最优的外腔长度值不变,FGECCL 的电光转换效率($P-I$ 曲线的斜率)最低仅为 $0.2130 \text{ mW}/\text{mA}$ (参见表 2). 两个参量重构时:阈值电流值不是最小,而此时 FGECCL 的 $P-I$ 曲线的斜率是优化结果中最高的 ($1.6843 \text{ mW}/\text{mA}$). 观察可知:LD 前端面的值增加使得 FGECCL 的 $P-I$ 曲线的斜率减少. 图 2 是 FGECCL 的边模抑制比和注入电流之间的关系图. 三参量重构时的边模抑制比最高,和两个参量重构的比较,发现高反面的反射率剧烈增加使得边模抑制比有微小的增加;又和没有采用遗传算法优化的比较其值有很大的提高. 当注入电流达到 10 mA 时,FGECCL 的边模抑制比将近 40 dB . 图 3 是 FGECCL 的光谱线宽和光功率倒数的关系曲线图. 图中用遗传算法对三个参量优化后得到的 FGECCL 的光谱线宽与其它的三根曲线相比较是最小的,而且光谱线宽随着光功率的减小,变化也是最小的. 在图 4 中光功率随时间的波动是 FGECCL 的弛豫振荡. 当调制频率接近弛豫振荡频率时,强度调制状态发生畸变,这个弛豫振荡频率决定了强度调制的上限频率. 从图 4 中明显地看到,三参量重构的瞬态输出光功率值最低,且在 1 ns 之后达到稳定. 图

4 中其它的曲线在 1.5 ns 的时才达到稳定的趋势. 在模拟计算中,采用文献中的参量算出调制速率的上限约为 5.675 GHz ,而仅优化外腔长度得到的上限频率约为 5.65 GHz . 用遗传算法优化外腔长度和增透膜的反射率,带入动态的速率方程得到调制速率的上限频率约为 5.79 GHz . 同理,也可得到三参量重构的 FGECCL 调制速率的上限频率约为 5.88 GHz . 结果表明重构参量越多,得到的激光器的调制速率的上限频率值越大.

FGECCL 中外部相位的波动主要由外腔长度的改变引起的. 分析外部相位的波动对激光器性能的影响,可知外腔长度微小的变化对 FGECCL 的影响. 图 5 表示相位波动和阈值电流的关系. 从图中观测到实线(增透膜反射率为 10^{-2})随相位的改变大,而增透膜的反射率值为 10^{-6} (虚线)时,阈值电流随相

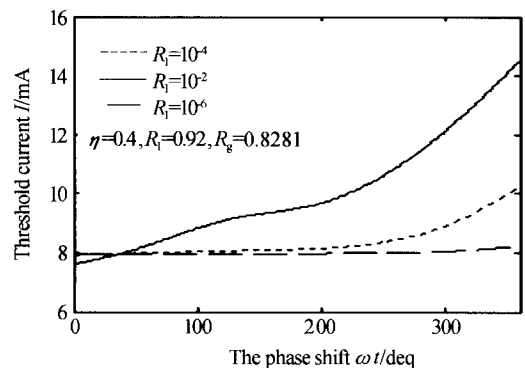


图 5 阈值电流随相位变化的曲线图

Fig. 5 The curves of threshold current versus the phase shift

位几乎没变化. 因此说明镀有增透膜面的反射率高时, 激光器的阈值电流随着相位(或外腔长度)的改变波动很大. 那么低质量的增透膜使得激光器的稳定性降低, 即外腔有微小的变化都会使激光器处于不稳定状态. 将图 1、图 2、图 3 和图 4 的结果比较分析, 发现采用遗传算法多个参量重构可以得到最低的阈值电流值, 同时发现此时 FGECL 的边模抑制比高, 光谱线宽最窄, 激光器的出光功率最快达到稳定, 调制速率上限也最高, 但是牺牲了激光器的电光转换效率和输出光功率.

3 结论

本文基于等效腔模型, 采用多参量优化的多目标遗传算法优化了 FGECL 的半导体管芯两端面的反射率和外腔长度, 获取了最低阈值电流. 将这些优化的参量带入速率方程和光谱线宽的公式中得到了优化后的 FGECL 的一些特性, 例如 $P-I$ 特性、边模抑制比特性、光谱线宽和动态特性. 并对采用多个参量重构的和单个参量重构获得的结果进行了对比分析. 为了获取最低阈值电流, 以激光器的电光转换效率和输出光功率为代价, 得到了边模抑制比很高、光谱线宽很窄、动态特性好、调制速率比较高的 FGECL. 并且发现当 LD 两端面的反射率增加, 激光波长在外腔长度中形成稳定谐振时, 激光器的阈值电流达到最小值, 同时发现激光器的 $P-I$ 曲线的斜率和出光功率急剧地减小. 然而镀增透膜面的反射率的增加导致激光器的稳定性降低, 即当激光器的外腔长度有微小的改变, 激光器都容易处于不稳定的状态. 所以这种多参量重构获得最低阈值电流也是以牺牲激光器的稳定性为代价的. 即当增反面的反射率过高反而使得 $P-I$ 曲线的斜率劣化, 合适的增反面的反射率值既能得到低的阈值电流, 又能得到高的电光转换效率.

参考文献

- 1 Nasu H, Omura H. High power fiber grating lasers for 2.5 Gbit/s WDM transmitters. *IEEE, LEOS'98*, 1998, **2**: 356~357
- 2 Sato T, Yamamoto F, Tsuji K, *et al.* An uncooled external cavity diode laser for coarse-WDM access network

- systems. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, **14**(7): 1001~1003
- 3 Hashimoto J, Takagi T, Kato T, *et al.* Fiber-bragging external cavity semiconductor laser module for DWDM transmission. *J Lightwave Technol*, 2003, **21**(9): 2002~2009
- 4 Timofeev F N, Kostko I A, Bayvel P, *et al.* 10Gbit/s directly modulated, high temperature-stability external fiber grating laser for dense WDM networks. *Electron Lett*, 1999, **35**(20): 1737~1739
- 5 Timofeev F N, Bayvel P, Mikhailov V, *et al.* 2.5 Gbit/s directly-modulated fiber grating laser for WDM networks. *Electron Lett*, 1997, **33**(6): 1406~1407
- 6 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. *光子学报*, 2001, **30**(14): 478~482
Zhou K M, Hu X W, Liu H T, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(14): 478~482
- 7 Zhao Chunliu, Ma Ning, Liu Zhiguo, *et al.* Tunable wavelength semiconductor laser using a fiber bragg grating. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(12): 1514~1517
- 8 马军山, 耿建新, 陈高庭, 等. 基于光纤光栅外腔半导体激光器的全光波长转换器的阈值转换特性. *光子学报*, 2001, **30**(18): 981~984
Ma J S, Geng J X, Chen G T, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(18): 981~984
- 9 Xu Qingyang, Chen Shaowu. Theoretical study on the butt-coupling of semiconductor laser and fiber bragg grating. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 1~5
- 10 Cheng W H, Chiu S F, Hong C Y, *et al.* Spectral characteristics for a fiber grating external cavity laser. *Opt and Quant Electron*, 2000, **32**(2): 349~365
- 11 Zorabedian P, Trutna W, Cutler Jr L S. Bistability in grating-tuned external-cavity semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **23**(11): 1855~1860
- 12 Xia G, Wu Z, Chen J, *et al.* Studing semiconductor lasers with multimode rate equation. *J Appl Opt*, 1995, **34**(9): 1523~1527
- 13 Sato H, Ohya J. Theory of spectral linewidth of external cavity semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1986, **QE-22**(7): 1060~1063

Analysis of a Fiber Bragg Grating External-Cavity Semiconductor Laser by Multi-parameter Optimization

He Xiaoying, Huang Dexiu, Li Wei

Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

Received date: 2005-03-03

Abstract Based on the equivalent cavity model, the threshold characteristics of an fiber grating external-cavity semiconductor laser (FGECL) are investigated by the multi-parameter optimization of two antireflection and high reflection coatings, and the external-cavity length, and the results of the multi-parameter optimization are compared with that of the single-parameter optimization. To obtain the lowest threshold current needs the cost of the reduction of the slope efficiency (namely, the efficiency of electro-optical conversion) and the power of the output light so that the FGECL is of high side-mode-suppression-ratio (SMSR), narrow line-width, excellent dynamic property and high modulation rate. Also it is found that when the reflectivities of two antireflection and high-reflection coatings increase, and the stable oscillation of the master wave is established in the external cavity, the threshold current is the lowest, but the efficiency of the electro-optical conversion and the power of the output light reduce sharply.

Keywords Fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser; Threshold current; Genetic algorithm; Multi-parameter optimization



He Xiaoying was born in Hubei province in 1981. She received the bachelor's degree from Hubei Normal University. She studies in the Huazhong University of Science and Technology, and she is currently pursuing the M. S. degree in the Department of Optoelectronic Engineering. Her interesting research is in the field of Optics Communications.