

doi: 10.3788/lop47.041402

光纤光栅外腔半导体激光器的输出特性

李松柏¹ 邓涛² 吴加贵²(¹长江师范学院物理学与电子工程学院, 重庆 408100; ²西南大学物理学院, 重庆 400715)

摘要 采用射线法, 计及增益随波长的变化, 导出了光纤光栅外腔半导体激光器输出谱及输出功率的表达式。结合载流子速率方程, 对外腔半导体激光器的输出谱的精细结构以及 $P-I$ 特性进行了数值模拟研究。结果表明: 光纤光栅外腔的输出谱在反射带宽内呈现出多峰结构, 随着前端面反射率越小, 输出谱相应地比较稳定; $P-I$ 特性曲线抖动越来越小, 趋于线性变化。

关键词 光纤光学; 输出特性; 射线法; 外腔半导体激光器; 前端面反射率

中图分类号 TN242 OCIS 140.3510 060.2310 文献标识码 A

Output Characteristics of Fiber Bragg Grating External Cavity Semiconductor Laser

Li Songbai¹ Deng Tao² Wu Jiagui²

(¹*School of Physics & Electronic Engineering, Yangtze Normal University, Chongqing 408100, China*)
(²*School of Physics, Southwest University, Chongqing 400715, China*)

Abstract Based on the ray tracing method, considering the gain distribution with wavelength, the expressions of the output spectrum and output power of the fiber grating external cavity semiconductor lasers (FGECL) are deduced firstly. Combining with carrier rate equation, the fine structure of output spectrum and output power are numerically simulated. The results show that, in the reflective band width of grating the multi-peak structure appears, and the output spectrum becomes firmer with the decrease of the front facet reflectivity. The $P-I$ characteristic of FGECL has been investigated. With the decrease of the front facet reflectivity, the fluctuation of the output power tends minimized and the $P-I$ curve becomes generally a straight line.

Key words fiber optics; output characteristics; ray tracing; external cavity semiconductor lasers; front facet reflectivity

1 引言

随着密集波分复用(DWDM)系统的发展, 具有稳定波长、高边模抑制比(SMSR)和窄线宽的激光器越来越受到人们的关注^[1]。光纤光栅外腔半导体激光器(FGECL)具有窄的线宽输出, 高的边模抑制比, 较大的波长调谐范围, 稳定的温度性能, 低廉的价格等突出特点, 在很大程度上能够符合DWDM光纤通信系统的要求, 因而近年来成为国内外的研究热点^[2~9]。然而在这些对FGECL的研究大多是基于激光谐振的相位和增益条件, 在假定能量只分布在一系列的离散波长处的条件下, 根据多模速率方程对其输出特性进行研究。这种思路忽略了真实的FGECL的输出谱特征应是连续的, 并且起振波长值会因FGECL的工作条件变化发生复杂漂移的物理事实。

本文基于射线法^[10], 推导了 FGECL 的连续输出谱和输出功率的隐函数表达式^[11], 突破了传统基于离散

收稿日期: 2009-06-11; 收到修改稿日期: 2009-10-30

基金项目: 重庆自然科学基金(KJ091307)资助课题。

作者简介: 李松柏(1964—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事半导体激光与光通信等方面的研究。

E-mail: lsbftc@163.com

波长分析 FGECL 的局限。在此基础上, 就光纤光栅的前端面反射率对 FGECL 的输出谱及 $P-I$ 特性影响进行了研究。

2 理论分析

光纤光栅外腔半导体激光器(LD)是由半导体激光器管芯和光纤光栅构成。假定激光从光纤光栅一端输出, LD 前端面(面向光纤光栅的一面)的反射率为 $R_2=r_2^2$, 其中 r_2 为反射系数, LD的另一端以及光纤光栅的反射率分别为 R_1 和 $R_g(\lambda)$, 其相应的反射系数分别为 r_1 和 $r_g(\lambda)$ 。由于外腔内部不含发光中心, 因而可以用标准具的公式来描述。将LD前端面和光纤光栅外腔一起等效成一个复合面, 其等效反射率为 $R_c(\lambda)=|r_c(\lambda)|^2$, 其中 $r_c(\lambda)$ 为反射系数, 这个复合面与LD后端面一起构成谐振腔。考虑到光线在外腔中的多次反射, $r_c(\lambda)$ 可表示为

$$r_c(\lambda) = \frac{r_2 + \eta r_g(\lambda) \exp(-i\rho)}{1 + \eta r_2 r_g(\lambda) \exp(-i\rho)}, \quad (1)$$

式中 η 为LD与光纤间的耦合效率, ρ 为光线在外腔中传播一周的相移。采用均匀光纤光栅作为外腔, 其反射系数为^[12]

$$r_g(\lambda) = \frac{i\kappa \sin(qL_g)}{q \cos(qL_g) - i\delta\beta \sin(qL_g)}, \quad (2)$$

式中 L_g 为光纤光栅的长度, κ 为耦合因子, $q=[(\delta\beta)^2 - \kappa^2]^{1/2}$, $\delta\beta = \beta(\lambda) - \beta_g$, $\beta(\lambda)$ 为不同波长 λ 对应的传播常数, β_g 为光纤光栅布拉格波长 λ_g 对应的传播常数。

由(1), (2)式求得 $R_c(\lambda)$ 后, 利用射线法就可以求出腔内任意位置的光子数, 然后对其输出特性进行研究。为了便于讨论, 谐振腔仅限于一维模型, 如图1所示。

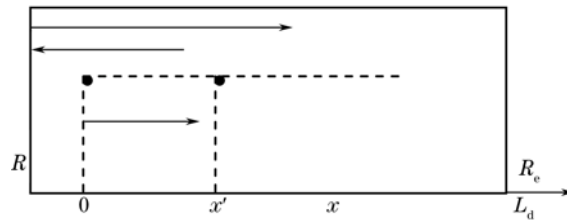


图1 光纤光栅外腔半导体激光器等效腔示意图
Fig.1 Schematic of the FGECL

利用射线法方法^[10], 假设在激光器增益介质 x' 处, 由于自发辐射的作用在单位时间单位体积里产生的光子数为 BN^2 , 其中 B 为辐射复合系数, N 为载流子数密度. 那么这些光子中耦合进单位波长间隔内的光子数为 rBN^2 , 其中 r 为单位波长间隔内自发辐射耦合进LD腔 $+x$ 或 $-x$ 方向中的份额, 并且这些光子在腔内将沿着 $+x$ 或 $-x$ 方向继续传播。

等效腔内任意位置 x 处放大的自发辐射来自于 x' 处的贡献(见图1), 并且在 $x > x'$ 和 $x < x'$ 两种情况下自发辐射的传播路径不同, 在考虑到自发辐射相位的随机性后, 在单位波长间隔内沿 $+x$ 方向传播的光子数密度与波长的关系式为

$$S^+(x, \lambda) = \frac{rBN^2 H}{u \left\{ \exp(Gx) \int_0^x \left[\exp(-\varepsilon x') + \sqrt{R_1} \exp(\varepsilon x') \right]^2 dx' + R_1 \exp[G(L_d + x)] \times \int_x^{L_d} \left[\sqrt{R_c} \exp[\varepsilon(L_d - x')] + \exp[\varepsilon(x' - L_d)] \right]^2 dx' \right\}}, \quad (3)$$

式中 u 为激光腔内的光速,

$$H = [1 + R_1 R_c \exp(2GL_d) - 2\sqrt{R_1 R_c} \exp(GL_d) \cos(2\varphi)]^{-1}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = G/2 + i2n_d\pi/\lambda, \quad \varphi = 2n_d\pi L_d/\lambda, \quad G = \Gamma g - \alpha, \quad (5)$$

式中 α 为损耗系数, Γ 为限定因子, g 为 LD 有源层介质的小信号增益系数, 其与载流子数密度 N 以及波长的关系可表示为

$$g = a \left[\frac{N}{1 + (\lambda_p - \lambda)^2 / Q_g^2} - N_0 \right], \quad (6)$$

a 为微分增益系数, λ_p 为增益峰值波长, $2Q_g$ 为增益谱线的 3 dB 带宽, N_0 为透明载流子数密度。

n_d 为 LD 有源层介质的折射率, 它与载流子数密度的关系可以表示为

$$n_d = n_{d0} - K_d(N - N_s), \quad (7)$$

式中 N_s 为参考载流子数密度, n_{d0} 对应此时 LD 有源层介质的折射率, K_d 为有源区折射率的变化斜率。

由(3)式积分可以得到

$$S^+(x, \lambda) = rBN^2H / \left\{ u \left[(k-1)(1+R_1k)/G + 2k\sqrt{R_1} \lambda \sin(4n\pi x/\lambda)/(4n\pi) + R_1(J-k)(R_eJ+k)/G + 2JkR_1\sqrt{R_e} \lambda/(4n\pi) \sin[4n\pi(L_d-x)/\lambda] \right] \right\}, \quad (8)$$

其中

$$k = \exp(Gx), \quad J = \exp(GL_d). \quad (9)$$

在(8)式中, 用 L_d-x 代替 x , R_1 与 R_e 互换, 就可以得到单位波长间隔内沿 $-x$ 方向传播的光子数密度与波长的关系式 $S^-(x, \lambda)$ 为

$$S^-(x, \lambda) = rBN^2H / \left\{ u \left[(Jk^{-1}-1)(R_eJk^{-1}+1)/G + 2r_e Jk^{-1} \lambda/(4n\pi) \sin[4n\pi(L_d-x)/\lambda] + R_eJ^2k^{-1}(R_1k+1)(1-k^{-1})/G + 2r_1R_eJ^2k^{-1} \lambda/(4n\pi) \sin(4n\pi x/\lambda) \right] \right\} \quad (10)$$

在(8)式中, 令 $x=L_d$ 可求得在前端面沿 $+x$ 方向传输的光子数密度 $S^+(x, \lambda)$, 从而得到输出功率的密度 $P(\lambda)$ (即输出谱) 以及输出功率 P_{out} 为

$$P(\lambda) = u(hc/\lambda)(1-R_e)(\sigma/\Gamma)S^+(L_d, \lambda), \quad P_{out} = \int P(\lambda)d\lambda, \quad (11)$$

式中 h 为普朗克常数, σ 为 LD 有源层的横截面积。基于(11)式, 在已知腔内载流子密度的条件下, 可以对 FGECCL 的输出谱的精细结构以及输出功率特性进行数值研究。

在实际应用中, 人们更关心的是注入电流与 FGECCL 输出特性之间的函数关系。因此需要给出注入电流与腔内载流子数密度的关系式。在稳态情况下, 根据激光器中载流子所满足的速率方程可得到^[11]

$$I = eV \left\{ F(N) + \left[\frac{N}{1 + (\lambda_p - \lambda)^2 / Q_g^2} - N_0 \right] \int au[\overline{S^+(\lambda)} + \overline{S^-(\lambda)}]d\lambda \right\}, \quad (12)$$

式中 e 为电子电量, $F(N) = AN + BN^2 + CN^3$ (A , B , C 分别表示非辐射俘获系数、辐射复合系数和俄歇复合系数), $\overline{S^+(\lambda)}$ 及 $\overline{S^-(\lambda)}$ 分别为单位波长间隔内沿 $+x$ 和 $-x$ 方向传播的平均光子数密度。根据(5)式可得到

$$\overline{S^+(\lambda)} = rBN^2/(uL_d) \left\{ \frac{L_d(R_1R_eJ^2-1)}{G} + \frac{(J-1)[(1-R_1)+R_1J(1-R_e)]}{G^2} + \frac{2r_1\Pi - 2Jr_1(1+r_e r_1) \cos(4n\pi L_d/\lambda) + 2r_1(1+J^2 r_e r_1)}{G^2 + (4n\pi/\lambda)^2} \right\}, \quad (13a)$$

$$\overline{S^-(\lambda)} = rBN^2/(uL_d) \left\{ \frac{L_d(R_eR_1J^2-1)}{G} + \frac{(J-1)[(1-R_e)+R_eJ(1-R_1)]}{G^2} + \frac{2r_e\Pi - 2Jr_e(1+r_e r_1) \cos(4n\pi L_d/\lambda) + 2r_e(1+J^2 r_e r_1)}{G^2 + (4n\pi/\lambda)^2} \right\}, \quad (13b)$$

式中

$$P = JG\lambda / (4n\pi)(1 - r_1 r_c) \sin(4n\pi L_d / \lambda), \quad (14)$$

根据以上理论分析, 可对 FGECL 的输出谱分布以及 $P-I$ 特性进行研究。

3 结果与讨论

模拟计算中所用到的数据为: $n_f=1.44$, $L_d=200 \mu\text{m}$, $n_{d0}=3.30$, $K_d=1.490 \times 10^{-20} \text{cm}^3$, $N_s=1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $R_1=0.8$, $L_g=8 \text{mm}$, $L_{ex}=3 \text{mm}$, $c=3 \times 10^8 \text{m/s}$, $\eta=0.6$, $e=1.6 \times 10^{19} \text{C}$, $V=6 \times 10^{-10} \text{cm}^3$, $A=5 \times 10^7 \text{s}^{-1}$, $N_0=1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, $B=1 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$, $C=1 \times 10^{-29} \text{cm}^6/\text{s}$, $a=2.5 \times 10^{-16} \text{cm}$, $Q_g=20 \text{nm}$, $r=5 \times 10^{-5}$, $\Gamma=0.32$, $h=6.63 \times 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}$, $\alpha=20 \text{cm}^{-1}$, $\lambda_g=1550 \text{nm}$, $\lambda_p=1545 \text{nm}$, $\kappa=200 \text{m}^{-1}$ 。本文主要讨论前端面反射率对输出特性的影响, 所以假定其他参量均为恒定值, 也不考虑折射率随温度的变化。

图 2 给出了不同前端面反射率 R_2 下光纤光栅外腔半导体激光器的输出谱。从图中可以看出, 随着前端面反射率的减小, 越能体现外腔的作用, 外腔模越明显, 在反射带宽内呈的多峰输出谱结构越来越平滑。这是因为随着 R_2 的减小, 内腔模的作用越来越小, 越来越能体现光纤光栅外腔的选模作用。所以在外腔半导体激光器的理论或实验研究中, 都希望 R_2 能够尽量地小。在 FGECL 理论研究中, 为了更清楚地了解外腔的特性, 不少研究者假定 $R_2=0$, 在 FGECL 的实验中, 一般都会在前端面镀减反膜来使 R_2 尽可能地小, 从而使得光纤光栅外腔起的作用更加明显。

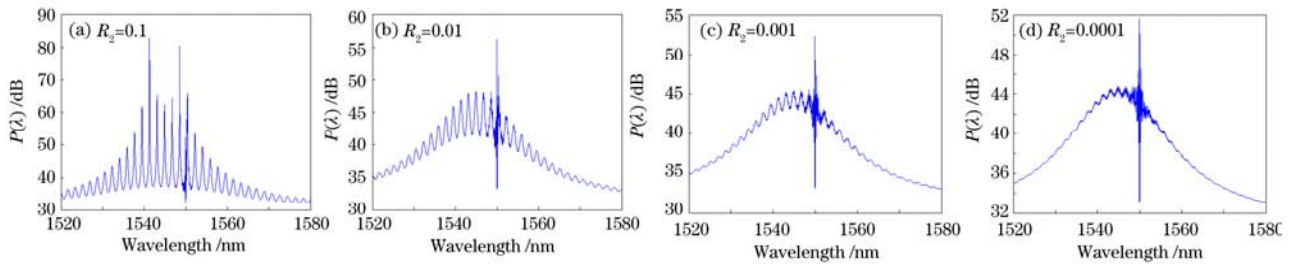


图 2 不同前端面反射率光纤光栅外腔半导体激光器的输出谱
Fig.2 Output spectra of the ESECSL at different reflectivities of the front facet

图 3 给出了不同前端面反射率 R_2 下光纤光栅外腔半导体激光器的输出功率。从图中可见, 随着前端面反射率的减少, 光纤光栅外腔半导体激光器的输出功率呈减少的趋势, 但功率曲线抖动现象越来越弱; 当 $R_2=0.0001$ 时, $P-I$ 曲线几乎没有抖动, 呈线性变化。这可解释为: 在前端面反射率较大时, 内腔模起主要作用, 内部模式竞争加强, 阈值载粒子浓度较大, 满足激光阈值相位条件的激光模式分布发生了变化, 导致相邻激光模式间的净增益差值发生变化, 并能较好满足相干条件, 从而造成外腔半导体激光器的输出功率曲线比较陡峭和发生抖动, 并且输出功率达到 1.2mW 。当前端面反射率较小时, 起主要作用的是外腔, 通过外腔的选模作用, $P-I$ 曲线越来越平缓稳定。

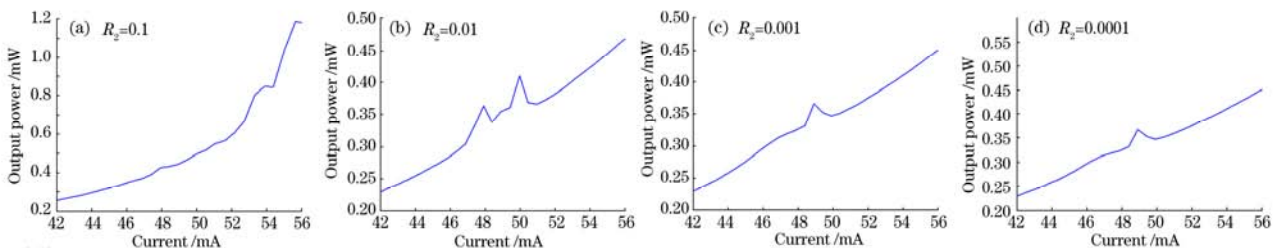


图 3 不同前端面反射率光纤光栅外腔半导体激光器的输出功率
Fig.3 Output powers of ESECSL at different reflectivities of the front facet

4 结 论

基于射线法, 计及激光器增益随波长的分布, 导出了FGECL输出谱和输出功率的表达式, 克服了传统基于离散波长分析FGECL特性的局限。在此基础上, 结合载流子所满足的速率方程, 研究了前端面反射率对FGECL输出谱和输出功率的影响, 当前端面反射率很小($R_2=0.0001$)时, 外腔激光器的多峰输出谱结构消失, 变成了光滑的曲线; $P-I$ 特性曲线变得比较平滑, 几乎呈线性变化关系。研究结果有助于进一步深入研究和理解光纤光栅外腔半导体激光器的工作特性。

参 考 文 献

- 1 P. A. Morton, V. Mizrahi, T. Tanbour-Ek *et al.*. Stable single mode hybrid laser with high power and narrow linewidth[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **64**(20): 2634~2636
- 2 H. G. Yu, Y. Wang, Q. Yang *et al.*. Characteristics of multimode fiber Bragg grating and their influences on external cavity semiconductor laser[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4): 1903~1912
- 3 H. Marie, F. Bruno, D. Michel. Simulation of the frequency behavior of external cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **39**(7): 833~837
- 4 Wu Zhengmao, Xia Guangqiong, Chen Jianguo. Theoretical model on multi-wavelength output of a fiber grating external cavity semiconductor laser[J]. *J. Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2003, **28**(3): 399~402
吴正茂, 夏光琼, 陈建国. 基于光纤光栅的外腔半导体激光器多波长输出的理论模型[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2003, **28**(3): 399~402
- 5 He Xiaoying, Huang Dexiu, Li Wei. Analysis of a fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser by multi-parameter optimization [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7): 961~965
何晓颖, 黄德修, 李蔚. 光纤光栅外腔半导体激光器的多参量优化分析[J]. 光子学报, 2006, **35**(7): 961~965
- 6 Li Songbai, Xia Guangqiong, Deng Tao *et al.*. Studying on mode suppression ratio of fiber grating external cavity semiconductor laser[J]. *Laser J.*, 2006, **27**(5): 20~21
李松柏, 夏光琼, 邓涛等. 光纤光栅外腔半导体激光器的模式抑制比研究[J]. 激光杂志, 2006, **27**(5): 20~21
- 7 W. H. Cheng, S. F. Chiu, C. Y. Hong *et al.*. Spectral characteristics for a fiber grating external cavity laser[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2000, **32**: 339~348
- 8 T. S. Lay, M. H. Chen, H. M. Yang *et al.*. 1.55- μm non-anti-reflection-coated fiber grating laser for single-longitudinal mode operation[J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2002, **34**: 687~696
- 9 An Honglin, Lin Xiangzhi, Yan Hong *et al.*. Fiber grating external cavity semiconductor laser with strong optical feedback[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(12): 1609~1613
安宏林, 林祥芝, 闫宏等. 强反馈光纤光栅外腔半导体激光器[J]. 光学学报, 1997, **17**(12): 1609~1613
- 10 G. Q. Xia, Z. M. Wu, J. G. Chen *et al.*. Carrier deficit from the nominal threshold density and mode suppression ratio of an above-threshold biased semiconductor laser[J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(10): 731~733
- 11 Wu Jiagui, Wu Zhengmao, Xia Guangqiong *et al.*. Investigation of the output characteristics of extremely short external cavity semiconductor laser using the ray tracing method[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6457~6461
吴加贵, 吴正茂, 夏光琼等. 利用射线追踪法研究超短外腔半导体激光器的输出特性[J]. 物理学报, 2007, **56**(11): 6457~6462
- 12 G. P. Agrawal. Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.*. Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1995
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌等译. 北京: 电子工业出版社, 1995