

文章编号: 0258-7025(2001)10-0877-04

弱反馈光纤光栅外腔半导体激光器特性研究^{*}

薛 林 赵华凤 李栩辉 叶亚斌

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘要 分析了弱反馈光纤光栅外腔半导体激光器的工作原理,将反馈作用等效为光子寿命的改变,利用激光器简化多模速率方程理论计算了外腔激光器输出功率和边模抑制比随光栅反射率的变化关系,得出外腔激光器存在光栅最佳反射率的结论。并对用不同反射率光栅作外腔的半导体激光器进行了实验比较,对此结论进行了验证。实验中获得了边模抑制比达 25 dB 的单模输出。

关键词 光纤光栅,外腔半导体激光器,多模速率方程

中图分类号 248.4 文献标识码 A

Characteristic of the FBG External Cavity Semiconductor Laser with Weak Feedback

XUE Lin ZHAO Hua-feng LI Xu-hui YE Ya-bin

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract The theory of FBG external cavity semiconductor laser with weak feedback is simply explained. Regarding the effects of feedback as a change of photons' life and using the simple multimodes rate equation, the effect of FBG reflectivity on both the output power and SMSR is revealed. The conclusion is that there exists an optimum FBG reflection. The experiments using FBGs with different reflection show the same conclusion. A single laser mode with 25 dB SMSR is achieved.

Key words fiber Bragg grating, external cavity semiconductor laser, multimodes rate equation

1 引 言

光纤光栅外腔激光器线宽窄、波长调谐方便,成为一种发展潜力巨大的激光光源。通常在半导体激光器端面镀增透膜,消除端面 32% 的反射,这样避免原半导体激光器本征腔模的振荡,从而获得单外腔模。这种激光器称为强反馈外腔半导体激光器^[1]。但在半导体激光器端面镀增透膜工艺上较为复杂,成本也高。若利用不镀膜的普通 F-P 腔半导体激光器与光纤光栅组成弱反馈外腔激光器,通过控制激光器电流和温度,调谐光纤光栅布喇格波长也可获得单模输出,虽其边模抑制比和稳定性都不如强反馈半导体激光器,但对于一些对边模抑制比要求不高的应用,如 980 nm 波长 EDFA 抽运源和传感方面仍有应用前景,而且成本比

强反馈外腔半导体激光器低得多^[2]。

由于 F-P 腔半导体激光器腔长(几百微米)比激光波长大两个数量级,腔内无选纵模机制,导致多纵模激射。在激光器输出端外接光纤光栅,处于其反射带宽内的激光模式被反馈注入激光管芯,当反馈光与有源区光相位匹配时可增加该模式光子寿命,降低其阈值,通过模式竞争抑制其他模式振荡获得单模输出。理论和实验表明,光纤光栅的反射率对外腔激光器的边模抑制比、输出功率影响较大,为了获得较好的单模输出必须选取合适的光栅反射率和布喇格波长。本文研究了不镀膜 F-P 腔半导体激光器外接光纤光栅,光功率从光栅端输出的外腔激光器结构,理论计算中将外反馈作用等效为光子寿命的改变,从而得到简化多模速率方程,计算了光栅反射率对输出激光的边模抑制比(SMSR)和单模输出功率的影响,指出存在最佳光纤光栅反射率,并进行了实验验证。

^{*} 国家“863”高技术计划(863-307)资助项目。

收稿日期 2000-07-24;收到修改稿日期 2000-09-18

2 光栅反射率对激光器特性影响的理论计算

图 1 是光纤光栅外腔半导体激光器的示意图。激光器端面 2 和光纤光栅形成一个等效反射面,其反射率^[3,4]

$$r_{\text{eff}} = \frac{r_2 + \eta r_3}{1 + \eta r_2 r_3} \quad (1)$$

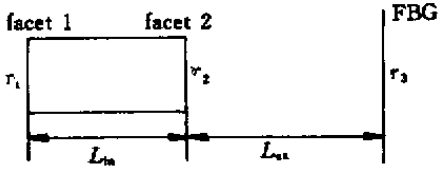


图 1 光纤光栅外腔半导体激光器示意图

Fig.1 Schematic of FBG ECSL

2.1 外反馈引起的光子寿命的改变

外反馈使激光器阈值降低, 阈值增益 G_{th} 满足

$$\frac{G_{\text{th}}}{G_{\text{th0}}} = 1 + \frac{\ln(r_2/r_{\text{eff}})}{\alpha_{\text{in}} L_{\text{in}} + \ln(1/r_1 r_2)} \quad (2)$$

其中 G_{th0} 为无外反馈时的阈值增益。

外反馈使被反射光子寿命增长, 光子寿命变为 τ_p'

$= \tau_p \frac{G_{\text{th0}}}{G_{\text{th}}}$, 由(2)得到

$$\tau_p' = \tau_p \left(1 + \frac{\ln|r_2/r_{\text{eff}}|}{\alpha_{\text{in}} L_{\text{in}} + \ln(1/r_1 r_2)} \right)^{-1} \quad (3)$$

其中 τ_p 为无外反馈时的光子寿命。

2.2 输出光功率

由于端面 2 与光纤光栅之间存在多次反射, 所以在光栅反射带内的主模透射光强应是多级光强叠加。设内腔场强为 $E^{(i)}$, 则不经反射直接透射场强

$$E_1^{(t)} = t_2 t_3 \sqrt{\eta} e^{j\frac{\phi}{2}} E^{(i)}$$

在端面 2 和光栅间往返一次后透射的场强

$$E_2^{(t)} = t_2 t_3 \sqrt{\eta} e^{j\frac{\phi}{2}} (-\eta r_3 r_2 e^{j\phi}) E^{(i)}$$

同理

$$E_3^{(t)} = t_2 t_3 \sqrt{\eta} e^{j\frac{\phi}{2}} (-\eta r_3 r_2 e^{j\phi})^2 E^{(i)}$$

$$E_N^{(t)} = t_2 t_3 \sqrt{\eta} e^{j\frac{\phi}{2}} (-\eta r_3 r_2 e^{j\phi})^N E^{(i)}$$

总透射场强

$$E^{(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n^{(t)} = \frac{\sqrt{\eta} t_2 t_3 e^{j\frac{\phi}{2}}}{1 + \eta r_2 r_3 e^{j\phi}} E^{(i)} \quad (4)$$

激光工作模式满足 $\phi = 2m\pi$, 得到 $E^{(t)} = \sum_{n=1}^{\infty} E_n^{(t)} = -$

$\frac{\sqrt{\eta} t_2 t_3}{1 + \eta r_2 r_3} E^{(i)}$, 又 $I \propto E \cdot E^*$, 得到光栅透过光功率

$$I^{(t)} = \frac{\eta(1-r_2^2)(1-r_3^2)}{(1+\eta r_2 r_3)^2} I^{(i)} = \frac{\eta T_2 T_3}{(1+\eta r_2 r_3)^2} I^{(i)} \quad (5)$$

2.3 简化多模速率方程求解方法

以前大多数文献^[5]采用多模速率方程模型研究半导体激光器的反馈问题, 方程中包含相位和噪声项, 求解非常复杂。若忽略相位和噪声项得到简化多模速率方程, 可获得边模抑制比、主模输出功率与外反馈间的数值关系。

无外反馈时半导体激光器的简化多模速率方程为^[6]

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \sum_q A(N - N_0) \cdot \left[1 - \frac{(\lambda_p - \lambda_q)^2}{W^2} \right] S_q \quad (6a)$$

$$\frac{dS_q}{dt} = \frac{\gamma N}{\tau_s} + \left\{ A(N - N_0) \left[1 - \frac{(\lambda_p - \lambda_q)^2}{W^2} \right] - \frac{1}{\tau_p} \right\} S_q \quad (6b)$$

其中 q 为纵模序数, 各变量物理意义和数值计算所取值(量子阱激光器典型参数)分别为: N : 载流子浓度, 单位 cm^{-3} ; N_0 : 透明载流子浓度, 取值 10^{18} cm^{-3} ; J : 注入电流单位面积浓度, 取值 500 A/cm^2 ; e : 电子带电量, 取值 $1.6 \times 10^{-19} \text{ 库仑}$; d : 有源层厚度, 取值 $0.2 \mu\text{m}$; A : 增益系数, 取值 $10^{-6} \text{ cm}^3/\text{s}$; λ_p : 增益峰波长, 取值 $1.552 \mu\text{m}$; λ_q : 各模式的波长, 模式间距 $|\lambda_q - \lambda_{q-1}| = 1.5 \text{ nm}$; W : 增益峰 3 dB 半宽度, 取值 10 nm ; S_q : 各模式光子密度, 单位 cm^{-3} ; γ : 自发辐射模式分配因子, 取值 3.5×10^{-5} ; τ_s : 载流子寿命, 取值 2 ns ; τ_p : 光子寿命, 取值 1.5 ps 。

在平衡状态下, 多模速率方程变为

$$\frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \sum_q A(N - N_0) \left[1 - \frac{(\lambda_p - \lambda_q)^2}{W^2} \right] S_q = 0 \quad (7a)$$

$$\frac{\gamma N}{\tau_s} + \left\{ A(N - N_0) \left[1 - \frac{(\lambda_p - \lambda_q)^2}{W^2} \right] - \frac{1}{\tau_p} \right\} S_q = 0 \quad (7b)$$

此方程组为多元非线性方程组, 利用数值计算可以得到 N, S_q 的数值解。数值计算中取激光模式数为 9, 图 2(a) 为计算所得半导体激光器多模输出谱, 纵坐标为 S_q 的相对 dB 值。

当引入外反馈后, 计算中假设 FBG 反射峰与增益

峰重合, 设光栅反射峰处模式为 q_0 模, 则 q_0 模式光子寿命变为 τ_p' , 由(3)式给出。

这时半导体激光器的多模速率方程变为

$$\frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \sum_q A(N - N_0) \left[1 - \frac{(\lambda_p - \lambda_q)^2}{W^2} \right] S_q = 0 \quad (8a)$$

$$\frac{\gamma N}{\tau_s} + \left\{ A(N - N_0) \left[1 - \frac{(\lambda_p - \lambda_q)^2}{W^2} \right] - \frac{1}{\tau_p} \right\} S_q = 0 \quad (q \neq 0) \quad (8b)$$

$$\frac{\gamma N}{\tau_s} + \left\{ A(N - N_0) - \frac{1}{\tau_p} \right\} S_0 = 0 \quad (q = 0) \quad (8c)$$

由于光栅对 q_0 模式光的反射, 根据(5)知道主模输出功率满足 $\frac{P_0}{P_q} = \frac{\eta T_3}{(1 + \eta r_2 r_3)^2} \frac{S_0}{S_q}$ 经过数值计算得到如图 2(b) 所示的外反馈条件下的激光输出谱 (R_3 取 50%)。

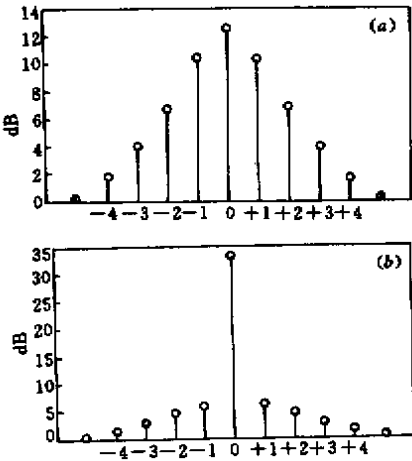


图 2 理论计算得到的激光器输出谱

(a) F-P 半导体激光器的输出谱; (b) 光栅外腔激光器的输出谱

Fig. 2 Theoretically calculated spectrum of laser

(a) the spectrum of F-P LD; (b) the spectrum of FBG ECLS

对于光从光栅端输出的外腔结构, 光纤光栅反射率高有利于增大 S_0 , 减小其他模式光子数 $S_q (q \neq 0)$, 但过高的光栅反射率会使主模输出光功率下降, 使边模抑制比下降。所以如何选取光栅反射率对提高外腔激光器性能十分重要。利用数值计算可以得到光栅反射率与主模输出功率、边模抑制比的关系, 计算结果如图 3 所示。从图 3 看出在光栅反射率小于 30% 时随着反射率的增加主模输出功率和边模抑制比同时增加; 反射率为 30% 时主模输出功率最大, 再增加反射率导致主模输出功率下降; 虽然主模功率下降, 但因反馈增大使边模得到抑制, 所以边模抑制比没有跟随下降, 在

反射率为 20% ~ 60% 内变化不大, 维持在 25 dB 以上; 当反射率过高达到 90% 以上时主模输出功率过小, 使边模抑制比开始明显下降。所以对图 3 的情况选择光栅反射率在 20% ~ 40% 之间较为合适。实际应用中最佳光栅反射率应根据所用激光器特性如激光器增益谱、腔内损耗、载流子寿命以及激光器与光纤耦合效率确定。但边模抑制比和主模输出功率与光栅反射率的变化关系对所有激光器是适用的。

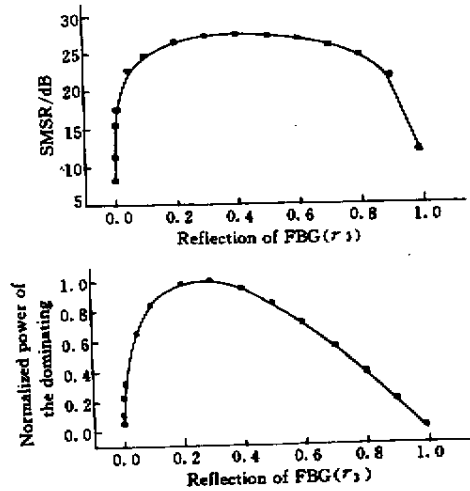


图 3 数值计算得到的光栅反射率与主模输出功率、边模抑制比的关系

Fig. 3 Calculated dominating mode power and side modes suppressed ratio (SMSR) versus different FBG reflection

3 实验讨论

利用不镀膜的中心波长为 1550 nm 的量子阱 F-P 型半导体激光器与布喇格波长为 1552 nm 的光纤光栅组成弱反馈外腔激光器, 光纤光栅与激光器尾纤焊接相连, 激光器的温度由半导体制冷器控制, 温控精度 0.1℃。外腔长取 50 cm。通过改变激光器温度和对光栅调谐使反馈光与有源区光满足相位匹配得到最佳单模输出。实验装置如图 4 所示。

实验中选用不同反射率的光纤光栅, 在电流为 20 mA, 温度 20℃ 下进行了比较, 结果见表 1。

实验与理论计算较一致, 说明光栅反射率与边模抑制比的变化关系, 确实存在最佳光栅反射率。实验结果与理论计算的差别主要来源于计算所用参数与实际值的差异, 以及理论模型是对激光器工作情况的简单近似, 是不精确的。

表 1 不同反射率光栅获得的外腔激光器边模抑制比实验数据

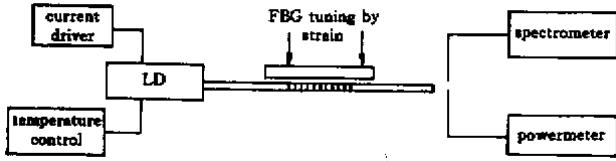


图 4 弱反馈光纤光栅外腔半导体激光器实验装置图

Fig.4 Experimental setup of semiconductor laser with weak coupling FBG external cavity

Table 1 Experimental data of SMSR under different reflection of FBG

Reflection of FBG	99%	90%	70%	40%	20%
SMSR/dB	15	20	23	30	23

实验中用反射率为 40% 的光纤光栅作半导体激光器的外腔,在温度 18℃, 阈值电流 ($I_{th} \approx 9 \text{ mA}$) 下调谐光栅得到边模抑制比为 35 dB 的单模输出。然后维持温度不变,增大电流至 25 mA,边模抑制比可保持在 25 dB 以上,图 5 为实验获得的单模输出。需要说明的是,由于激光管芯端面没镀增透膜,所以存在较强的内腔模,这样激光器输出光谱对外腔反馈光的相位变化十分敏感。若反馈光和有源区光满足相位匹配,能得

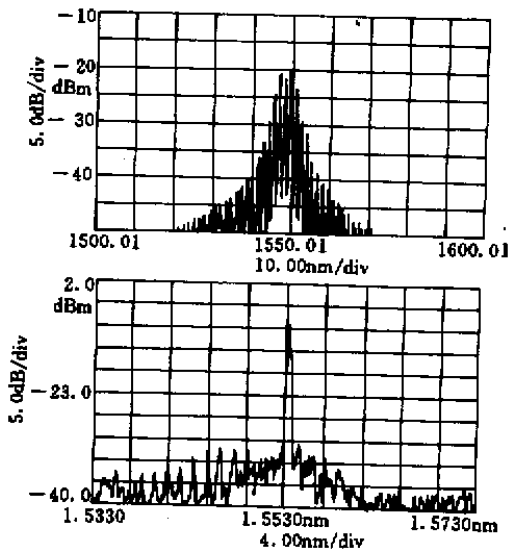


图 5 光栅外腔对 LD 的边模抑制作用

(a) F-P 型 LD 的输出谱;

(b) 25 dB 边模抑制比的外腔激光器激光光谱

Fig.5 Suppressing side modes of LD utilizing FBG cavity

(a) spectrum of F-P LD;

(b) spectrum of ECSL with 25 dB SMSR

到较高的边模抑制比。当温度或光栅布喇格波长改变导致相位不匹配时,输出激光边模抑制比下降,实验中当温度偏离最佳值 1℃或光栅布喇格波长偏离 0.1 nm 时边模抑制比下降 5 dB,若偏离 6℃或布喇格波长偏离 0.5 nm 就重新变为多模振荡。所以为获得单模输出需要精细地调谐光栅布喇格波长和控制温度,这是弱反馈激光器的最大缺点。

4 结 论

端面不镀增透膜的半导体激光器可利用光纤光栅选择性反馈实现对主模的增强和边模的抑制。要想提高边模抑制比,光纤光栅的反射率应适当选择。较低的光栅反射率不能有效降低主模腔内损耗,不利于选出单模,而过高的光栅反射率导致主模输出光功率下降,也使输出光的边模抑制比降低,所以应适当选取光栅反射率,以获得较高的边模抑制比。在半导体激光器的多模速率方程的基础上,将外反馈作用等效为主模光子寿命的改变,通过数值计算验证了上述结论。实验中对用了不同反射率的光纤光栅作外腔的效果。采用不镀增透膜的量子阱半导体激光器和反射率 50% 的光纤光栅组成的外腔激光器实现了边模抑制比 25dB 以上的单模输出。由于较强的内腔模存在,温度和光栅布喇格波长的变化对激光输出谱影响很大,需要严格控制。

参 考 文 献

- 1 An Honglin, Lin Xiangzhi, Yan Hong. Semiconductor laser with weak coupling fiber grating external cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(8):1031 ~ 1035 (in Chinese)
- 2 J. N. Walpole, E. S. Kintzer, S. R. Chinn *et al.*. High-power strained-layer InGaAs/AlGaAs tapered traveling wave amplifier. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **61**(7):740 ~ 742
- 3 Hiroshi Kakiuchida, Junji Ohtsubo. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1994, **30**(9):2087 ~ 2097
- 4 J. H. Osmundsen, N. Gade. Influence of optical feedback on laser frequency spectrum and threshold conditions. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1983, **19**(3):465 ~ 469
- 5 R. Lang, K. Kobayashi. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **16**:347 ~ 355
- 6 Huang Dexiu. *Semiconductor Optical Electronics*. 1st Edition. Chengdu: Press of Electronic Science and Technology University, 1989. 139 (in Chinese)