

文章编号: 1001 - 9014(2009)06 - 0432 - 04

外部光反馈对 980nm 垂直腔面发射 激光器振荡特性的影响

张 星^{1,2}, 宁永强^{1*}, 孙艳芳¹, 崔锦江^{1,2}, 张 岩^{1,2}, 刘光裕^{1,2},
李再金^{1,2}, 秦 莉¹, 刘 云¹, 王立军¹, 崔大复³, 许祖彦³

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激发态物理重点实验室, 吉林 长春 130033;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 中国科学院物理研究所, 北京 100080)

摘要:研究了外部光反馈对 980nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 振荡特性的影响. 计算了垂直腔面发射激光器及边发射半导体激光器的光反馈灵敏因子. 基于复合腔理论, 分析了外部光反馈对垂直腔面发射激光器的阈值电流及微量子效率等振荡特性参数的影响. 实验结果表明, 当反馈率为 10% 时, 垂直腔面发射激光器的阈值电流由 0.63A 下降至 0.59A, 同时斜率效率和输出功率也有所下降. 实验结果和理论分析符合得较好.

关键词:垂直腔面发射激光器; 外部光反馈; 振荡特性; 阈值电流

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

EFFECTS OF EXTERNAL OPTICAL FEEDBACK ON THE OSCILLATING CHARACTERISTICS OF 980nm VERTICAL-CAVITY SURFACE-EMITTING LASERS

ZHANG Xing^{1,2}, NING Yong-Qiang^{1*}, SUN Yan-Fang¹, CUI Jin-Jiang^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2},
LI Guang-Yu^{1,2}, LI Zai-Jin^{1,2}, QIAN Li¹, LU Yun¹, WANG Li-Jun¹,
CUI Da-Fu³, XU Zu-Yan³

(1. Key laboratory of Excited State Physics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics
and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The effects of external optical feedback (OFB) on the oscillating characteristics of 980nm vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL) were investigated. The OFB sensibility of VCSEL and edge emitting lasers (EEL) were evaluated by calculating OFB parameters. Based on the compound cavity theory, the effects of external optical feedback on the oscillating characteristic parameters of VCSEL, such as the threshold current and the differential quantum efficiency, were analyzed. The experimental results indicate that the threshold current of the VCSEL decreases from 0.63A to 0.59A when the feedback ratio is 10%. Meantime, the slope efficiency and the output power also decrease. The result of experiment is in good agreement with the calculation.

Key words: vertical-cavity surface-emitting lasers; external optical feedback; oscillating characteristics; threshold current

引言

垂直腔面发射激光器 (Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, VCSEL) 是一种新型半导体激光器, 近年来受到了国内外研究人员的广泛关注^[1-3]. 与

常见的边发射半导体激光器 (Edge Emitting Lasers, EEL) 不同, VCSEL 具有极短的谐振腔长 (波长量级) 以及较高的镜面反射率^[1] (> 99%). 由于镜面反射率较高, 一贯认为 VCSEL 对外部光反馈 (External Optical Feedback, OFB) 是不敏感的^[2]. 而由于

收稿日期: 2008 - 11 - 28, 修回日期: 2009 - 05 - 25

Received date: 2008 - 11 - 28, revised date: 2009 - 05 - 25

基金项目: 国家自然科学基金 (60636020, 60676034, 60706007, 60476029, 60577003) 和吉林省科技发展项目 (20050318) 资助项目

作者简介: 张 星 (1983-), 男, 吉林辉南人, 博士研究生, 研究方向为新型半导体光电子器件.

* 通信作者: ningyq@ciomp.ac.cn

EEL的镜面反射率较低(~30%),外部光反馈会影响其性能^[4~7].但研究发现,VCSEL具有与EEL相同的外部光反馈敏感性^[8~10].

先前的工作主要集中于研究外部光反馈对VCSEL光谱特性及动态特性的影响^[9,11],并未详细研究外部光反馈对VCSEL振荡特性的影响.本文计算了VCSEL及EEL的光反馈灵敏因子,基于复合腔理论分析了外部光反馈对VCSEL振荡特性的影响,并对理论分析的结果进行了实验验证.

1 理论分析

1.1 VCSEL对外部光反馈的敏感性

为了分析外部光反馈的影响,在描述激光器电场的Van der Pol方程中引入光反馈导致的时间延迟项.忽略噪声项后,该方程可写为^[6]:

$$\frac{dE}{dt} = \left[-i\omega_0 + \frac{G}{2}(1-i) \right] E(t) + E(t-\tau_e) \quad (1)$$

其中, ω_0 是激光频率; G 是外部光反馈所引起增益条件的改变; τ_e 是线宽展宽因子^[12]; τ_e 是外部光反馈带来的时间延迟; $\tau_e = \frac{1}{s} \frac{1-R_2}{\sqrt{R_2}} \sqrt{R} \sqrt{1+\epsilon^2}$, 称为光反馈

灵敏因子^[8],其中 τ_e 是激光器本身谐振腔循环时间, R_2 是激光器输出镜面反射率, R 是反馈率,定义为:

$$R = \frac{\text{反射能量}}{\text{出射能量}} = \epsilon^2 R_{\text{ext}} \quad (2)$$

R_{ext} 在本文中是外加反射镜的反射率; ϵ 是耦合效率,包括各种光学元件及VCSEL出光表面的损耗.

当 $\epsilon > \frac{1}{\sqrt{1+\epsilon^2}}$ 并且外部光反馈强度达到一定程度时, Van der Pol方程存在多个解,此时将出现外部光反馈引起的各种效应^[6].设VCSEL及EEL的光反馈灵敏因子分别是 τ_{e1} 及 τ_{e2} , 出射镜面的反射率分别是 99.7% 及 30%, 腔长分别是 $1\mu\text{m}$ 及 $300\mu\text{m}$, 可得 $\tau_{e1}/\tau_{e2} \approx 0.6$. 由此可见, VCSEL与EEL的光反馈灵敏因子处于同一量级, 主要是由于VCSEL较高的镜面反射率补偿了短谐振腔长对腔内光子寿命的影响, 使其光子寿命与EEL处于同一量级^[10].

1.2 外部光反馈对VCSEL振荡特性的影响

1.2.1 对阈值电流密度的影响

VCSEL 阈值电流密度 J_{th} 的表达式为^[13]:

$$J_{\text{th}} = J_s \exp \left\{ \frac{2}{g_N} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{L} \left(\text{diff} d + \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_2}} \right) \right) \right) \right] \right\} \quad (3)$$

其中, J_s 是名义电流密度, 为常数; g_N 是材料增益系数; α_z 是限制因子; α_{in} 是腔内吸收系数; α_{diff} 是衍射

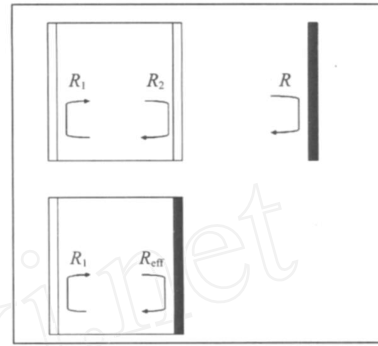


图 1 通过引入等效复合谐振腔来研究外部光反馈对 VCSEL 性能的影响

Fig 1 Through the introduction of compound cavity, the influence of external OFB on the oscillating characteristics is investigated

损耗系数; L 是谐振腔有效腔长; d 是有源区厚度; R_1 和 R_2 是 VCSEL 的镜面反射率, 其中 R_2 是出射镜面反射率.

如图 1 所示, 根据复合腔理论^[5], 可通过等效复合谐振腔研究外部光反馈对 VCSEL 性能的影响.

当反馈率较强 ($> 1\%$) 时, 可忽略反馈元件与出光表面距离对反馈率的影响^[6]. 如图 1 所示, 等效复合谐振腔的两个镜面反射率分别为 R_1 及 R_{eff} , 其中 R_{eff} 为等效反射率, 其表达式为^[5]:

$$R_{\text{eff}} = \left[\frac{\sqrt{R_2} + \sqrt{R}}{1 + \sqrt{R_2 R}} \right]^2 \quad (4)$$

引入 R_{eff} 之后, 式 (3) 改写为:

$$J_{\text{th}} = J_s \exp \left\{ \frac{2}{g_N} \left[\ln \left(1 + \frac{1}{L} \left(\text{diff} d + \ln \left(\frac{1}{\sqrt{R_1 R_{\text{eff}}}} \right) \right) \right) \right] \right\} \quad (5)$$

由式 (3) 和 (5) 可得到存在外部光反馈时 VCSEL 的阈值电流密度 J_{th} 与不存在外部光反馈时的阈值电流密度 J_{th} 之比:

$$\frac{J_{\text{th}}}{J_{\text{th}}} = \exp \left[\frac{\ln \frac{1}{R_1 R_{\text{eff}}} - \ln \frac{1}{R_1 R_2}}{L \alpha_z g_N} \right] \quad (6)$$

设 $a = J_{\text{th}}/J_{\text{th}}$, 可得 a 与反馈率 R 的关系如图 2 所示, 计算所用数据取自表 1.

表 1 参数列表

| 参数 | 名称 | 数值 | 单位 |
|----------------------|-----------|-------|------------------|
| R_1 | P-DBR 反射率 | 99.9% | — |
| R_2 | N-DBR 反射率 | 99.7% | — |
| L | 谐振腔长 | 1 | μm |
| i | 内量子效率 | 1 | — |
| α_z | 限制因子 | 0.12 | — |
| g_N | 材料增益常数 | 2000 | cm^{-1} |
| α_{in} | 腔内吸收系数 | 10 | cm^{-1} |
| | 激光波长 | 980 | nm |

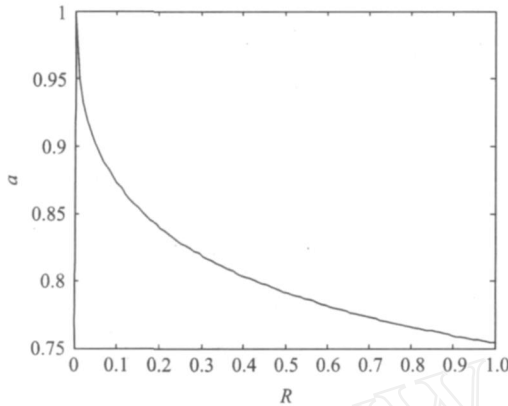


图 2 a与反馈率 R的关系

Fig2 The relationship between a and the feedback ratio R

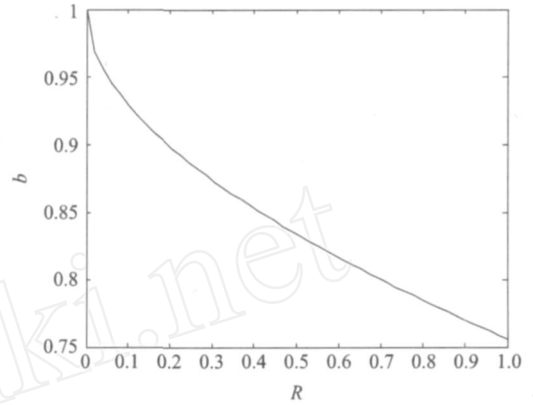


图 3 b与反馈率 R的关系

Fig.3 The relationship between b and the feedback ratio R

1.2.2 对微分子量子效率及输出功率的影响

当注入电流处于较低水平时, VCSEL 的输出功率 P_{out} 随注入电流 I 的变化关系为^[1-3]:

$$P_{out} = \frac{h\nu}{q} \eta_i \eta_d (I - I_{th}) \quad (7)$$

其中, $h\nu$ 是光子能量; η_i 是内量子效率; η_d 是微分子量子效率, 其表达式为:

$$\eta_d = \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)}{2 L + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right)} \quad (8)$$

这里由于 VCSEL 的出光孔径较大, 忽略了衍射损耗的影响. 存在外部光反馈时, 将 R_{eff} 代入式 (8), P_{out} 的表达式变为:

$$P_{out} = \frac{h\nu}{q} \eta_i \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)}{2 L + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)} (I - I_{th}) \quad (9)$$

其中, $I_{th} = A_s J_{th}$, A_s 为有源区的面积.

VCSEL 的斜率效率定义为: $\frac{dP_{out}}{dI}$, 由式 (9) 可知, 存在外部光反馈时, VCSEL 的斜率效率为:

$$\frac{dP_{out}}{dI} = \frac{h\nu}{q} \eta_i \frac{\ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)}{2 L + \ln\left(\frac{1}{R_1 R_{eff}}\right)} \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 外部光反馈对斜率效率的影响与对微分子量子效率的影响相同. 设存在外部光反馈时 VCSEL 的微分子量子效率为 η_d , 不存在外部光反馈时微分子量子效率为 η_{d0} . 设 $b = \frac{\eta_d}{\eta_{d0}}$, 计算得到 b 与反馈率 R 的关系示于图 3, 所用数据取自表 1.

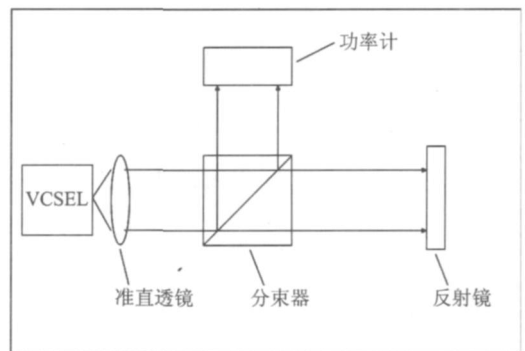


图 4 实验装置图

Fig.4 Schematic diagram of the experimental setup

2 实验研究

实验研究外部光反馈对 VCSEL 振荡特性影响的装置如图 4 所示. VCSEL 发出的光束经双凸透镜准直后, 被镀有 980nm 高反膜的平面反射镜反射. 放置在光路中的分束器将一部分光耦合输出至功率计, 用来测量 VCSEL 输出功率的变化, 分束器的透反比为 1:1. 实验中使用的 VCSEL 出光口径为 300 μ m, 镜面反射率分别为 99.9% 及 99.7%, 激光波长为 980nm. 平面反射镜到激光器的距离为 60mm, 其上所镀多层膜能够对 980nm 激光提供 70% 的反射率.

VCSEL 输出的激光分为两部分, 一部分通过分束器耦合输出至功率计, 另一部分达到平面反射镜并被反射而形成外部光反馈. 反射光有一部分会被分束器再次反射, 无法回到 VCSEL 谐振腔, 因此虽然平面反射镜的反射率为 70%, 但计入各种光学原件的损耗, 得到的实际反馈率仅为 10% 左右.

图 5 所示为引入外部光反馈之前及之后 VCSEL 的 $P-I$ 曲线, 可见引入外部光反馈之后, VCSEL

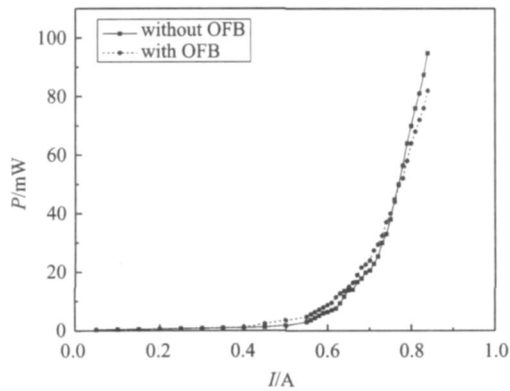


图 5 引入光反馈之前 VCSEL 的 $P-I$ 曲线及反馈率为 10% 时 VCSEL 的 $P-I$ 曲线

Fig 5 The $P-I$ curve of VCSEL with and without OFB, the feedback ratio is 10%

的阈值电流及斜率效率有所下降. 当反馈率为 10% 时, VCSEL 的阈值电流从 0.63A 下降至 0.59A; 当注入电流为 0.8A 时, 其输出功率较之无外部光反馈时下降了 8%, 说明其斜率效率也发生了下降.

3 结论

研究了外部光反馈对 VCSEL 阈值电流及微分量子效率等振荡特性参数的影响. 理论分析和实验研究的结果表明, VCSEL 具有与 EEL 类似的光反馈敏感性. 外部光反馈一方面会使 VCSEL 的阈值电流略有降低, 同时还会导致 VCSEL 斜率效率的降低. 因此存在外部光反馈时, VCSEL 的输出功率会有所降低. 外部光反馈会对 VCSEL 的正常工作产生负面的影响, 因此在实际应用中应尽量避免 VCSEL 受到外部光反馈的影响.

REFERENCES

[1] Iga K, Koyama F, Kinoshita S Surface emitting semiconductor lasers[J].

IEEE J. Quantum Electronics, 1988, **24** (9): 1845—1855.

- [2] Jewell J. Surface-emitting lasers reach R&D threshold[J]. *Laser Focus World*, 1990, **May**: 151—156.
- [3] LI Hui-Qing, ZHANG Jie, CU I Da-Fu, *et al* Optimal designs for high-power vertical cavity surface emitting lasers [J]. *ACTA Physica Sinica* (李惠青, 张杰, 崔大复, 等. 高功率垂直腔面发射半导体激光器优化设计研究. *物理学报*) 2004, **53** (9): 2986—2990.
- [4] Lang R, Kobayashi K External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1980, **16** (3): 347—355.
- [5] Olsson A, Tang C L. Coherent optical interference effects in external-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1981, **17** (8): 1320—1323.
- [6] Tkach R, Chraplyvy A. Regimes of feedback effects in 1.5 μ m distributed feedback lasers[J]. *J. Lightwave Technology*, 1986, **4** (11): 1655—1661.
- [7] Kakiuchida H, Ohtsubo J. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1994, **30** (9): 2087—2097.
- [8] Chung Y C, Lee Y H. Spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with external optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1991, **3** (7): 597—599.
- [9] Jiang S J, Dagenais M, Morgan R A. Spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with strong external optical feedback[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1995, **7** (7): 739—741.
- [10] Spencer P, Mirasso C, Shore K. Effect of strong optical feedback on vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10** (2): 191—193.
- [11] Hsu A, Seurin J F P, Chuang S L, *et al* Optical feedback in vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2001, **37** (12): 1643—1649.
- [12] Lenstra D, Verbeek B H, Boef A J D. Coherence collapse in single-mode semiconductor lasers due to optical feedback [J]. *IEEE J. Quantum Electronics*, 1985, **QE-21** (6): 674—679.
- [13] Yu S F. *Analysis and Design of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*[M]. New York: Wiley, 2003.