第2卷 第15期
2009 年 8 月

www.paper.edu.cn
中国科技论文在线
Sciencepaper Online

Vol.2 NO.15
August 2009

光反馈垂直腔面发射激光器相干长度的调控

樊林林，王云才，王安帮，孔令琴

（太原理工大学理学院，太原 030024）

摘要：利用 Lang-Kobayashi 速率方程，分析了外光反馈下，反馈强度及偏置电流对垂直腔面发射半导体激光器（vertical-cavity surface-emitting lasers，VCSELs）相干长度的影响。研究发现：VCSELs 的相干长度随反馈强度的增加而减小，而偏置电流对其相干长度无明显影响。结果表明：通过引入光反馈并调节反馈强度的方法，可有效控制激光器的相干长度，使其从无反馈时的 30 m 连续调至 3 mm.

关键词：激光物理；垂直腔面发射激光器；相干长度；光反馈；非线性

中图分类号：TN248.4　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-2850(2009)08-1545-5

The controlled adjustment of the coherence length of vertical-cavity surface-emitting lasers with external optical feedback

FAN Linlin，WANG Yuncai，WANG Anbang，KONG Lingqin

(*College of Science*，*Taiyuan University of Technology*，*Taiyuan* 030024，*China*)

Abstract：This paper numerically analyzed the effects on the coherence length of vertical-cavity surface-emitting lasers（VCSELs）subject to optical feedback and bias current from the external cavities by using Lang-Kobayashi rate equations. It is found that the coherence length of VCSELs is decreased depending on the increase of the feedback intensity for long external cavities，but is insensitive to its bias current. Numerical results show that the coherence length of VCSELs can be shortened continuously in a wide range from thirty meters of solitary laser to three millimeters by the optical feedback technique，This property facilitates application in novel measurement technology in which coherence properties are of importance.

Key words：laser physics；vertical-cavity surface-emitting lasers；coherence length；optical feedback；nonlinear

0 引言

VCSELs 因其体积小、阈值电流低、发散角小、单纵模、与光纤耦合效率高以及易实现二维集成等优点，在光通信、光检测和光传感等领域有广泛的应用前景。然而，在实际应用中普遍存在外光反馈问题，微小反馈便可使其出现复杂的非线性现象，对激光器性能产生极大的影响。因此，对该问题的研究有助于深入揭示这类激光器在外部扰动下的物理和光学动态特性，及探寻其调控的措施，使之成为光通信和光测量等领域的理想光源。

实验和理论研究证实，光反馈的效应可以压窄或展宽半导体激光器的光谱线宽[1~3]。相干光纤通讯利用了激光良好的相干性，线宽越窄越好。而彩虹测量技术[4]、激光测距及层析成像[5]等，则需要宽谱、低相干的光源，测量的纵向分辨率直接由光源的相干长度决定。因此，为了使半导体激光器在通讯和光学测量等领域具有更广泛的应用，有必要对其输出光相干长度的调控进行研究。近年来，PEIL 等[6]分析了短腔反馈对传统面发射半导体激光器（edge-emitting laser，EEL）相干长度的影响[7]，获得了相干长度为 130 μm 的非相干光源，并将此非相干光源应用于彩虹测量技术，提高了彩虹

基金项目：国家自然科学基金（60577019，60777041）；山西省国际合作项目（2007081019）

作者简介：樊林林（1979—），女，助理工程师，主要研究方向：激光技术及应用

通信联系人：王云才，教授，主要研究方向：激光技术及应用、光纤通信、非线性光学等. E-mail：wangyc@tyut.edu.cn

技术的测量精度。光反馈对半导体激光器相干性的影响，使其可以成为相干长度可调的光源。然而，利用长腔反馈实现对半导体激光器相干长度连续调控的研究却很少。目前，对光反馈 VCSELs 的研究内容主要集中在非线性动态特性及动态行为的抑制与利用等方面[8~11]。利用数值模拟证实并分析了长腔反馈对 VCSELs 相干长度的调控作用。

1 理论模型

采用包含反馈项的 Lang-Kobayashi 速率方程描述垂直腔面发射激光器，方程如下：

$$\frac{\mathrm{d}S(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{G_0[N(t)-N_0]S(t)}{1+\varepsilon S(t)}-\frac{S(t)}{\tau_p}+2\frac{\kappa_c}{\tau_l}\sqrt{S(t)\cdot S(t-\tau)}\cos(\theta(t))+R_{sp}, \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\phi(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{\alpha G_0[N(t)-N_{th}]}{2}-\frac{\kappa_c}{\tau_l}\sqrt{S(t-\tau)/S(t)}\sin(\theta(t)), \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}N(t)}{\mathrm{d}t}=\frac{I}{q}-\frac{G_0[N(t)-N_0]S(t)}{1+\varepsilon S(t)}-\frac{N(t)}{\tau_s}, \tag{3}$$

其中，$\theta(t)=\frac{2\pi c}{\lambda}\tau+\phi(t)-\phi(t-\tau)$，与面发射激光器类似，反馈参数[9]$\kappa_c=(1-R_{DBR})\sqrt{R_{ext}/R_{DBR}}$，表示反馈光与输出端面处内反射光的电场幅度之比，用来衡量反馈光的强弱。其中，R_{DBR} 与 R_{ext} 分别为激光器输出端面强度反射率和外腔镜面强度反射率，因此反馈强度 $r=10\lg(\kappa_c^2)$.

上述模型中，S 和 N 分别为激光器腔内的光子数和载流子数；G_0 为物质增益；N_0 为传输载流子数；N_{th}为阈值载流子数；ε 和 α 分别为增益压缩因子和线宽增强因子；τ_p 和 τ_s 分别为光子寿命和载流子寿命；q 为电子电量；R_{sp}为自发发射率；τ_l 为激光器谐振腔的单次循环时间。数值模拟所用的参数取值[12]如下：

$$G_0=7.65\times10^{-6},\ N_0=1.73\times10^{7},\ \alpha=3,\ N_{th}=5\times10^{7},\ \tau_p=2\times10^{-12}\ \mathrm{s},\ \tau_s=2\times10^{-9}\ \mathrm{s},$$
$$R_{sp}=2\times10^{3}\ \mathrm{ns}^{-1},\ R_{DBR}=0.998,\ \tau_l=0.667\times10^{-14}\ \mathrm{s},\ \lambda=1\ 550\ \mathrm{nm}.$$

模拟中，定义光反馈半导体激光器的相干长度为 $L_c=\lambda^2/\Delta\lambda$，其中，$\Delta\lambda$ 为激光器光谱的 3 dB 线宽。下面分别研究反馈强度及偏置电流对 VCSELs 相干长度的影响。

2 模拟结果及分析

2.1 反馈强度对 VCSELs 相干长度的影响

VCSELs 应用于光探测或光互连领域时外腔长度一般为 1～2 cm（长外腔）[9]，此时的动态特性与短外腔情况有明显差别。模拟中，设偏置电流 $I_b=3.1I_{th}$，首先研究外腔长度为 2 cm 时 VCSELs 的输出受反馈强度的影响。VCSELs 在无反馈时处于稳定的输出状态，其光谱图、时序图及相图如图 1a、图 2a 和图 3a 所示，光谱展宽约 10 MHz，对应的相干长度为 30 m，此时由于系统的时序输出恒定，故相图为一定点。当反馈较弱时，由于反馈光相位与谐振腔内光场相位的关系不同，可以观察到激光器呈现光谱线宽的展宽或窄化效应；不同反馈强度下，输出对应的时间序列如图 2b～图 2d 所示。随着反馈强度的进一步增加，VCSELs 的输出依次经历单周期、倍周期和混沌振荡的非线性现象，如图 3 所示，对应的反馈参数 κ_c 分别为：2.178×10^{-4}，2.595×10^{-4}和 2.748×10^{-4}. 图 1b～图 1d 为相应的光谱图，由图 1d 可见：当 VCSELs 的输出为混沌时，光谱线宽迅速展宽且由单模变为多纵模，此时 VCSELs 的输出进入相干塌陷态，相干长度 L_{ext}大幅度下降。当反馈参数为 2.749×10^{-4}时，VCSELs 的输出又进入单周期区域，R_{ext}继续增大时将重复上述过程，但是该变化没有周期性。原因在于：固定反馈延时而增加 R_{ext}时，反馈强度越来越大，致使激光器最终工作在高维非线性状态下，因此，VCSELs 的输出不呈周期性。系统最后由混沌振荡进入稳定的混沌状态，此时 VCSELs 的相干性严重

恶化，其相干长度迅速下降至厘米量级。

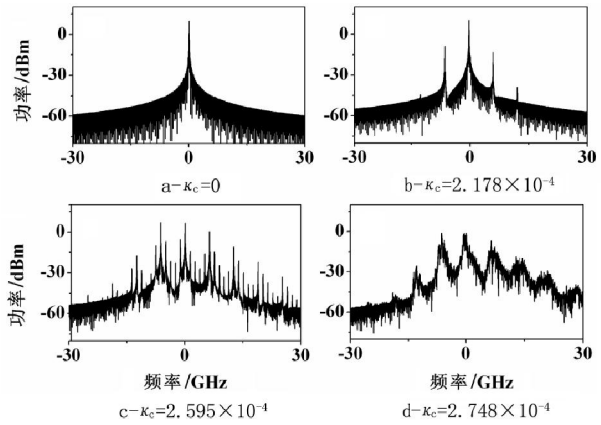


图 1 外腔长度为 2 cm 时 VCSELs 输出光的光谱图
Fig. 1 Power spectrum of the VCSELs' output when the external cavity length L_{ext}=2 cm

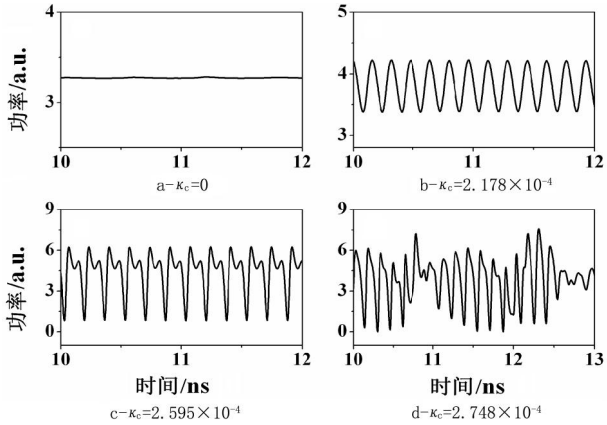


图 2 外腔长度为 2 cm 时 VCSELs 输出光的时序图
Fig. 2 The time series of the VCSELs' output when the external cavity length L_{ext}=2 cm

图 4 中的曲线分别表示外腔长为 10 cm 和 20 cm 时，VCSELs 的输出光在混沌状态下，相干长度随反馈强度的变化趋势。图中的点为模拟的实验数据点，所在的曲线是数据点的直接拟合，以下图类似。模拟发现：随着反馈强度的增大，VCSELs 的输出依次出现稳态、单周期、倍周期、准周期以及混沌振荡的过程。由于 VCSELs 的端面反射率极高，强反馈下，系统没有再出现周期现象，而是由混沌振荡一直进入稳定的混沌状态，其相干长度一直减小，并且实现了激光器线宽最大可达约 100 GHz 的展宽，此时，对应的相干长度为 3 mm.

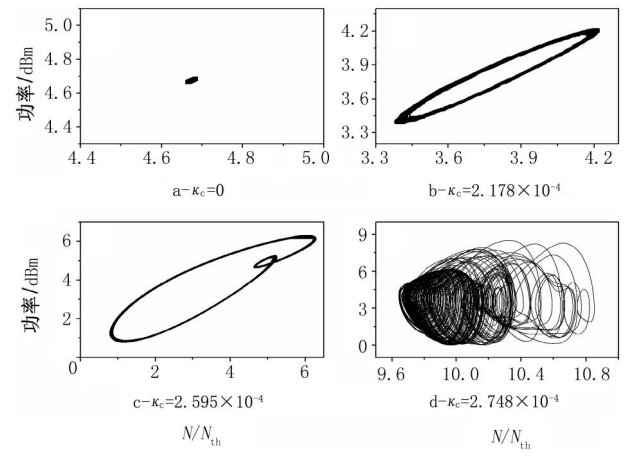


图 3 外腔长度为 2 cm 时 VCSELs 输出光的相图
Fig. 3 The phase of the VCSELs' output when the external cavity length L_{ext}=2 cm

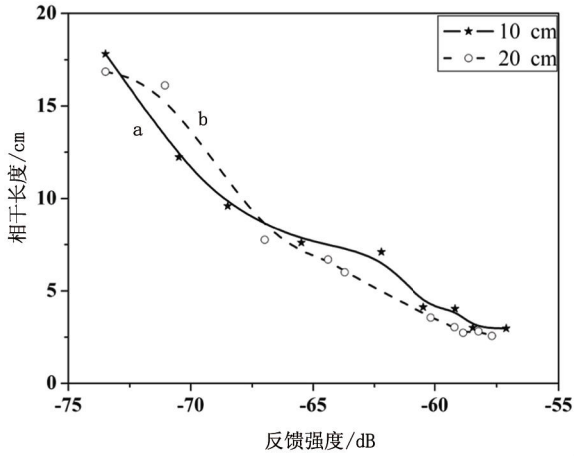


图 4 激光器的输出光在混沌状态下相干长度随反馈强度的变化
Fig. 4 Coherence length of the laser with chaos versus the feedback intensity at different external cavity lengths

2.2 偏置电流对 VCSELs 相干长度的影响

如图 5 所示，激光器的输出光在混沌状态下，当外镜反射率为 0.2%，外腔长度分别为 10 cm 和 20 cm 时，VCSELs 的相干长度随偏置电流的增加基本保持不变。此结论可以由图 6 得到证实，当长度 L_{ext}=10 cm 时，同一反馈强度下，偏置电流对 VCSELs 的相干长度几乎没有影响；而随着反馈参数的增加，相干长度明显减小，这与图 4 的结论相吻合，图 6 中 a，b，c 3 条曲线对应的反馈参数分别为

0.04%，0.09%和0.2%. 图7为长腔下（L_{ext}=20 cm），不同电流（4.8，7.26，11.48 mA）对应的光谱图。其中，随着电流的增加，光谱变化不明显，系统的输出状态受偏置电流的影响不大，这与前面的分析一致。

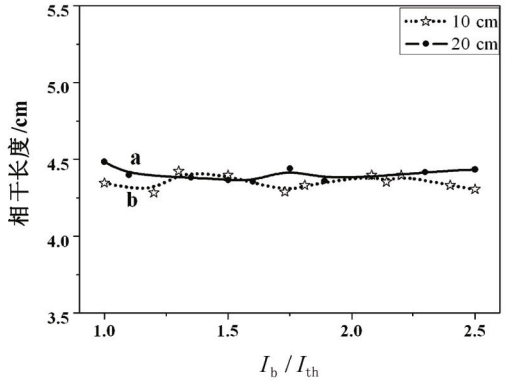


图5 不同外腔长度下相干长度随偏置电流的变化

Fig. 5 The current ratio I_b/I_{th} at different external cavity lengths

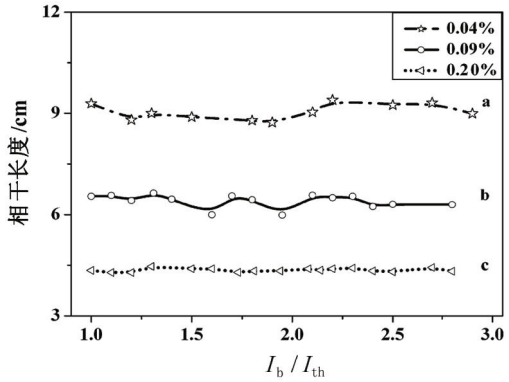


图6 不同反馈参数下相干长度随偏置电流的变化

Fig. 6 The current ratio I_b/I_{th} with different optical feedback parameters

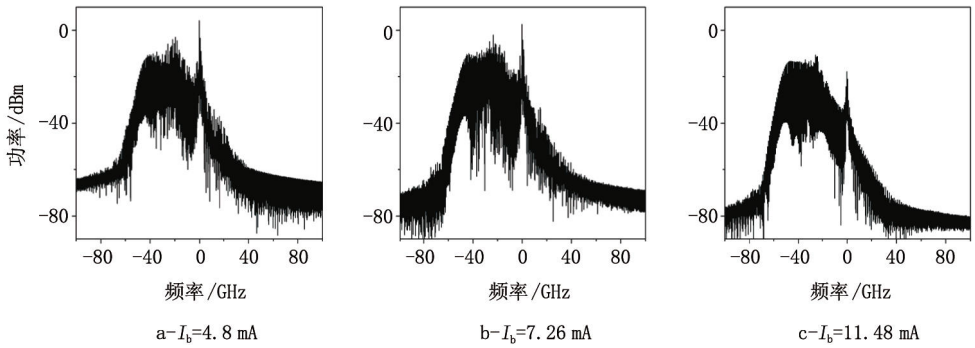


图7 VCSELs在不同偏置电流下的光谱

Fig. 7 The power spectrum of the laser's output with different bias current

3 结论

利用光反馈VCSELs的速率方程研究了长腔反馈下，反馈强度及偏置电流对VCSELs相干长度的影响。结果表明：随着反馈强度的增加，VCSELs的输出会经历单周期、倍周期，最后进入混沌状态，此时，反馈引起的非线性现象对系统性能影响较大，以致激光器的相干性严重恶化，相干长度大幅度减小，并且能够实现由无反馈的几十米量级到强反馈下毫米量级的连续调控。而偏置电流对VCSELs的相干长度没有明显的影响。这种特性为VCSELs在通讯及光学测量技术中作为相干或非相干光源的调控应用奠定了良好的基础。

[参考文献] (References)

[1] ZHANG Y, SATO M, TANNO N. Characters of the semiconductor laser with strong feedback[J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2001, 112(2): 91～96.

[2] KAKIUCHIDA H, OHTSUBO J. Characteristics of a semiconductor laser with external feedback[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1994, 30(9): 2087～2097.

[3] DENTE G C, DURKIN P S, WILSON K A, et al. Chaos in the coherence collapse of semiconductor lasers[J]. IEEE

J. Quantum Electron., 1988, 24(12): 2441～2447.

[4] PEIL M, FISCHER I, ELSÄßE W, et al. Rainbow refractometry with a tailored incoherent semiconductor laser source[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89(9): 1～3.

[5] TONY K, DESMOND A, JAMES F, et al. Ultrahigh resolution optical coherence tomography imaging with a broadband superluminescent diode light source[J]. Optics Express, 2004, 12(10): 2112～2119.

[6] PEIL M, FISCHER I, ELSÄßE W. Spectral broadband dynamics of semiconductor lasers with resonant short cavities[J]. Phys. Rev. A, 2006, 73: 1～11.

[7] LENSTRA D, VERBEEK B, den BOEF A. Coherence collapse in single-mode semiconductor lasers due to optical feedback[J]. IEEE J. Quantum Electron., 1985, 21(6): 674～679.

[8] CHUNG Y C, LEE Y H. Spectral characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers with external optical feedback[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 1991, 3(7): 597～599.

[9] LAW J Y, AGRAWAL G P. Effects of optical feedback on static and dynamic characteristics of vertical-cavity suface-emitting lasers[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 1997, 3(2): 353～358.

[10] TORRE M S, MASOLLER C, MANDEL P, et al. Transverse-mode dynamics in vertical-cavity surface-emitting lasers with optical feedback[J]. Phys. Rev. A, 2002, 66(5): 1～9.

[11] 李孝峰，潘炜，罗斌，等. 多次外光反馈下垂直腔面发射激光器非线性动态特性理论研究[J]. 中国激光，2004，31 (12)：1450～1454.
LI X F, PAN W, LUO B, et al. Theoretical study on nonlinear dynamics of vertical-cavity surface-emitting laser with multiple external optical feedbacks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(12): 1450～1454. (in Chinese)

[12] LUKAS C. Optical injection locking of vertical-cavity surface-emitting lasers[D]. California: University of California, 2004.