

文章编号: 0258-7025(2009)05-1057-05

内腔接触氧化限制型垂直腔面发射 激光器小信号调制特性研究

王同喜 郭霞 关宝璐 沈光地

(北京工业大学北京市光电子技术实验室, 北京 100124)

摘要 建立了一种适用于多量子阱垂直腔面发射激光器(VCSEL)的多层速率方程模型。在理论与实验基础上,对器件进行小信号分析,得到了光子密度、载流子俘获、逃逸和隧穿时间等关键参数对 VCSEL 频率响应特性的影响。结果表明 VCSEL 调制带宽会随着输出功率增大而变宽。并进一步研究了内腔接触氧化限制型 VCSEL 的寄生电参数及其寄生电路,对其小信号频率响应进行了模拟分析。

关键词 垂直腔面发射激光器; 调制特性; 速率方程; 寄生参数

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093605.1057

Study on the Small Signal Modulation Characteristic of Internal-Contact Oxide-Confined Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Wang Tongxi Guo Xia Guan Baolu Shen Guangdi

(Beijing Photoelectronics Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract A rate equation model of multi-quantum wells vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) is presented after theoretical analysis. The effects of photon density and the carrier capture-escape-tunnel time on the frequency response of VCSEL are simulated by the small signal analysis. The results both of simulation and experiment show that the modulation bandwidth of VCSEL is broadened with the power increasing. In addition, we simulate the small signal frequency response of the parasitic circuit of internal-contact oxide-confined VCSEL after analyzing its parasitic parameters.

Key words vertical-cavity surface-emitting laser; modulation characteristic; rate equations; parasitic parameters

1 引 言

与边发射激光器相比,垂直腔面发射激光器(VCSEL)具有许多先天优势,如:单纵模、可密集集成、易于和光纤耦合以及光束质量较好^[1]等,但 VCSEL 也有增益小、热阻大、调制速度低等不足之处。虽然其面发射和圆形出光孔使其易于和光纤耦合,但是调制速度和带宽限制了其在高速光通信领域中的应用。目前实际制造的 VCSEL 最高调制带

宽为 20 GHz,无误码传输速率最高为 25 Gbit/s^[2],但是这与量子阱激光器理论估算预测的 60~90 GHz 还相去甚远^[3,4]。尽管通过光注入锁定或外部调制可获得显著的带宽扩展^[5,6],但为了保持整个系统接口的简易,VCSEL 的直接调制能力还是更具吸引力。

对于直接调制的量子阱激光器,主要涉及到载流子的电注入,及其在有源区内部的输运,以及其受

收稿日期: 2008-08-04; 收到修改稿日期: 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(60506012), 国家 973 计划(2006CB604902), 霍英东基金(101062), 国家 863 计划(2006AA03A121), 教育部新世纪优秀人才计划项目(39002013200801), 北京市青年骨干教师培养计划项目(J2002013200801), 北京工业大学研究生科技基金(ykj20071594)资助课题。

作者简介: 王同喜(1984—),男,甘肃人,硕士研究生,主要从事半导体垂直腔面发射激光器研究。

E-mail: wangtongxi@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 郭霞(1974—),女,山东人,副教授,主要从事半导体光电子器件研究。E-mail: guo@bjut.edu.cn

激复合产生光子等过程,光子经过特定的时间周期离开光腔激射,这一过程中的任何物理延迟都会影响到激光器的高速特性。目前,对量子阱激光器动态及调制特性多采用速率方程的方法进行研究,但通常都是单量子阱并且是只包括载流子和光子的二阶或包层、有源区及光子的三阶方程组^[7],不能明显地描述量子阱内部和量子阱之间载流子输运对激光器高速特性的影响。为此,我们采用多层速率方程对有源区每层材料进行建模,能够比较详细地描述载流子在量子阱区的扩散、俘获、逃逸和隧穿等过程与调制特性的关系。另外,对于氧化物限制结构 VCSEL,虽然薄层氧化层的引入对电流和光波很好地进行了限制^[8],但同时也增大了器件自身的寄生电容。因此,氧化限制型 VCSEL 高速特性的影响因素主要有内外两个方面,内部即为载流子、光子动态过程和空间烧孔、温度等其他因素,外部主要是器件结构和接触电极所引起的寄生电参数的影响^[9]。

本文重点阐述载流子输运和器件寄生电路对内腔接触氧化限制型 VCSEL (Internal-Contact Oxide-Confined VCSEL) 调制特性的影响。通过理论分析建立多层速率方程,对速率方程进行小信号分析。对 IC-OC-VCSEL 调制带宽进行了测量,验证了理论计算结果。对器件结构进行了分析,得到其寄生电路并发现其中电容对调制带宽影响较大。

2 理论分析和模型

IC-OC-VCSEL 结构示意图如图 1 所示。沿生长方向依次为:GaAs 衬底,26 对 GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As N 型分布布拉格反射激光器 (DBR),3 个 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 量子阱以有源区及两边的 AlGaAs 层形成光学厚度为一个波长的谐振腔,Al_{0.98}Ga_{0.02}As 氧化限制层,P+GaAs 欧姆接触层和 22 对未掺杂的 Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs 上 DBR。图 2 为 IC-OC-VCSEL 多量子阱有源区载流子输运过程示意图,载流子从掺杂的包层到达量子阱的过程包括两个部分^[10]:第一是输运经过隔离层 (SCH: Separate Confinement Heterostructure),这个过程遵循包括载流子的扩散、复合和有电场情况下的漂移等经典的电流连续性方程;第二是载流子被量子阱俘获,这一过程属于量子机制问题,和声子散射的动态机制有关,是俘获的媒介,散射过程是初态和末态波函数、跃迁耦合强度和声子在材料中的散射等因素的函数。

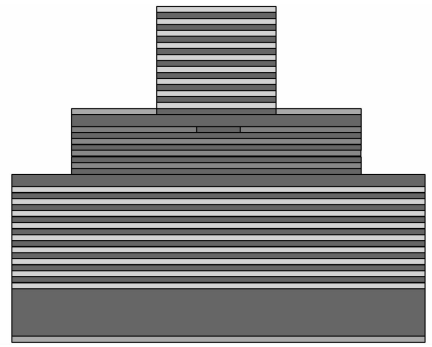


图 1 IC-OC-VCSEL 结构示意图

Fig. 1 Structure of IC-OC-VCSEL

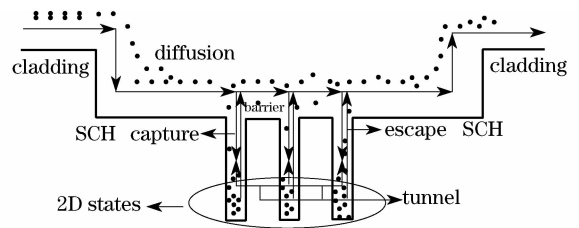


图 2 量子阱有源区中载流子输运示意图

Fig. 2 Carrier transportation in the quantum well active region

若器件在室温下工作,则接下来的运输机制主要是热激发载流子从量子阱中的逃逸或热电子发射。载流子逃逸过程与载流子俘获相反,对于单量子阱结构会减小总的俘获效率,但对于多量子阱结构,该过程是载流子在量子阱间输运的必要途径之一;在多量子阱系统中,另一种输运过程是量子阱间的隧穿。热电子发射主要取决于势垒高度,而隧穿与势垒的高度和宽度都有关系。因此多量子阱结构中的势垒必须经过优化设计,在不影响其他性能参数的同时,提高载流子俘获效率并将其保持在阱中二维能级上进行辐射复合。

基于以上分析,对有源区每层材料分别建立不同载流子浓度和光腔中光子浓度的速率方程^[11],除了量子阱内受限制的载流子通过复合、受激辐射等和光子相互作用以外,其他区域载流子都可以自由扩散、复合。受限制与非受限制载流子之间的转换通过俘获和逃逸实现,而载流子和光子的相互作用主要依赖于和载流子浓度有关的增益。

假定器件工作在基模状态即只有一个光子态,则以下三个量子阱结构速率方程可推广到任意多个量子阱。对于非限制状态载流子,速率方程为

$$\frac{dN_{SCH1}}{dt} = \frac{I}{qV_{SCH1}} - \frac{N_{SCH1}}{\tau_d} + \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_d} - \frac{N_{SCH1}}{\tau_n}, \quad (1)$$

$$\frac{dN_{w1}^{3D}}{dt} = \frac{N_{SCH1}}{\tau_d} - \frac{2N_{w1}^{3D}}{\tau_d} + \frac{N_{b1}}{\tau_d} -$$

$$\frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_c} + \frac{N_{w1}^{2D}}{\tau_e} - \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_n}, \quad (2)$$

$$\frac{dN_{b1}}{dt} = \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_d} - \frac{2N_{b1}}{\tau_d} + \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_d} - \frac{N_{b1}}{\tau_n}, \quad (3)$$

$$\frac{dN_{w2}^{3D}}{dt} = \frac{N_{b1}}{\tau_d} - \frac{2N_{w2}^{3D}}{\tau_d} + \frac{N_{b2}}{\tau_d} - \frac{N_{w2}^{3D}}{\tau_c} + \frac{N_{w2}^{2D}}{\tau_e} - \frac{N_{w2}^{3D}}{\tau_n}, \quad (4)$$

$$\frac{dN_{b2}}{dt} = \frac{N_{w2}^{3D}}{\tau_d} - \frac{2N_{b2}}{\tau_d} + \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_d} - \frac{N_{b2}}{\tau_n}, \quad (5)$$

$$\frac{dN_{w3}^{3D}}{dt} = \frac{N_{b2}}{\tau_d} - \frac{2N_{w3}^{3D}}{\tau_d} + \frac{N_{SCH2}}{\tau_d} - \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_c} + \frac{N_{w3}^{2D}}{\tau_e} - \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_n}, \quad (6)$$

$$\frac{dN_{SCH2}}{dt} = \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_d} - \frac{2N_{SCH2}}{\tau_d} - \frac{N_{SCH2}}{\tau_n}. \quad (7)$$

对于受限制载流子, 速率方程为

$$\frac{dN_{w1}^{2D}}{dt} = \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_c} - \frac{N_{w1}^{2D}}{\tau_e} - \frac{N_{w1}^{2D}}{\tau_t} + \frac{N_{w2}^{2D}}{\tau_t} - \frac{N_{w1}^{2D}}{\tau_n} - v_g G S, \quad (8)$$

$$\frac{dN_{w2}^{2D}}{dt} = \frac{N_{w2}^{3D}}{\tau_c} - \frac{N_{w2}^{2D}}{\tau_e} - \frac{2N_{w1}^{2D}}{\tau_t} + \frac{N_{w1}^{2D}}{\tau_t} + \frac{N_{w3}^{2D}}{\tau_t} - \frac{N_{w2}^{2D}}{\tau_n} - v_g G S, \quad (9)$$

$$\frac{dN_{w3}^{2D}}{dt} = \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_c} - \frac{N_{w3}^{2D}}{\tau_e} - \frac{N_{w3}^{2D}}{\tau_t} + \frac{N_{w2}^{2D}}{\tau_t} - \frac{N_{w3}^{2D}}{\tau_n} - v_g G S. \quad (10)$$

光子速率方程为

$$\frac{dS}{dt} = \left(3\Gamma v_g G - \frac{1}{\tau_p} \right) S + (N_{w1}^{2D} + N_{w2}^{2D} + N_{w3}^{2D}) \frac{\beta \Gamma}{\tau_{sp}}, \quad (11)$$

$$G = \frac{g_0}{1 + \epsilon S} \ln \left(\frac{N_w^{2D} + N_s}{N_{tr} + N_s} \right), \quad (12)$$

式中 I 为注入电流; q 为电子电量; V_{SCHi} ($i=1, 2$) 为 SCH 区体积; N_{wi}^{3D} ($i=1, 2, 3$) 为量子阱区非限制载流子浓度; N_{wi}^{2D} ($i=1, 2, 3$) 为量子阱区受限制载流子浓度; N_{bi} ($i=1, 2$) 为阱间垒区载流子浓度; $\tau_d, \tau_n, \tau_c, \tau_e, \tau_t, \tau_p, \tau_{sp}$ 分别为有效扩散时间、复合时间、俘获时间、逃逸时间、隧穿时间、光子寿命、自发辐射寿命; v_g 为群速度; G 为光增益; g_0 为材料线性增益系数; S 为光子浓度; N_{tr}, N_s 分别为透明载流子浓度

和补偿浓度^[12]; Γ 为限制因子; β 为自发辐射因子; ϵ 为非线性增益压缩因子。

对于 IC-OC-VCSEL, 由于氧化限制层的引入, 上下两个电极之间产生一个很大的寄生电容 C_1 , 有源区存在另外两个电容: 结电容 C_2 和扩散电容 C_3 。IC-OC-VCSEL 串联电阻按照注入载流子在器件内部的流过程主要分为以下几个部分: 注入载流子从电极到半导体的欧姆接触电阻 R_1 , 从电极到氧化孔边缘的横向薄层电阻 R_2 , 流经氧化限制孔和有源区的纵向电阻 R_3 , 以及 N 型 DBR 电阻 R_4 和下电极接触电阻 R_5 。其中, C_1 和氧化层厚度及电极面积有密切关系, R_2 和 R_3 与氧化孔径大小有关^[13]。

VCSEL 在直接调制时, 高频调制信号必须要经过图 3 所示的 RC 电路才能到达有源区 (R_3 两端) 实现电光调制。而在高频段, RC 电路对信号衰减很大, 直接影响 VCSEL 的调制带宽, 因此, 其寄生电路的研究对于提高其调制性能有重要意义。

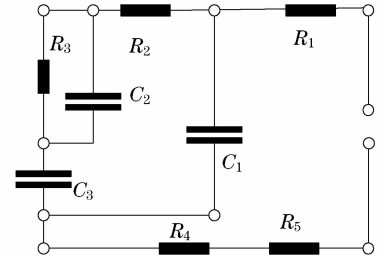


图 3 IC-OC-VCSEL 寄生电路示意图
Fig. 3 Parasitic circuit of IC-OC-VCSEL

3 模拟、实验结果与分析

当半导体激光器进行直接调制时, 注入电流包括直流电流 I_0 和交流调制信号 $\Delta I = I e^{j\omega t}$, 其中 $\omega/2\pi$ 是调制频率。因此, 载流子密度、光子密度可以描述为

$$x = x_0 + \Delta x = x_0 + x' e^{j\omega t}, \quad (13)$$

式中, $a=1, 2, 3; b=1, 2, 3; c=1, 2; d=1, 2$ 。若调制幅度足够小 ($I'/I_0 \ll 1$), 则物理量可以分为直流和交流响应, 如

$$G' = G_0 + g_0 S_0 e^{j\omega t}. \quad (14)$$

将 (13), (14) 两式代入方程组 (1)~(11) 则得到小信号方程组, 解该方程组得到频率响应

$$R_{\text{mod}}(\omega) = |S'(\omega)| / |I'(\omega)|. \quad (15)$$

图 4 为 VCSEL 调制特性计算结果, 图 4(a) 为其他参数不变, 增大偏置电流时, 调制带宽是随着

光子密度(输出光功率)的增大而增大;图 4(b)为载流子俘获时间对频率响应的影响,计算结果显示增大载流子俘获时间时,器件的调制带宽会减小,俘获时间较大时,器件调制带宽明显减小,并且衰减得更快;图 4(c)为不同载流子逃逸时间下

的频率响应,随着载流子逃逸时间增大,有源区调制带宽增大;图 4(d)为改变量子阱间隧穿时间时,不同的频率响应结果,器件调制带宽随隧穿时间减小而减小,而且会使低频调制特性出现畸变,使其衰减更迅速。

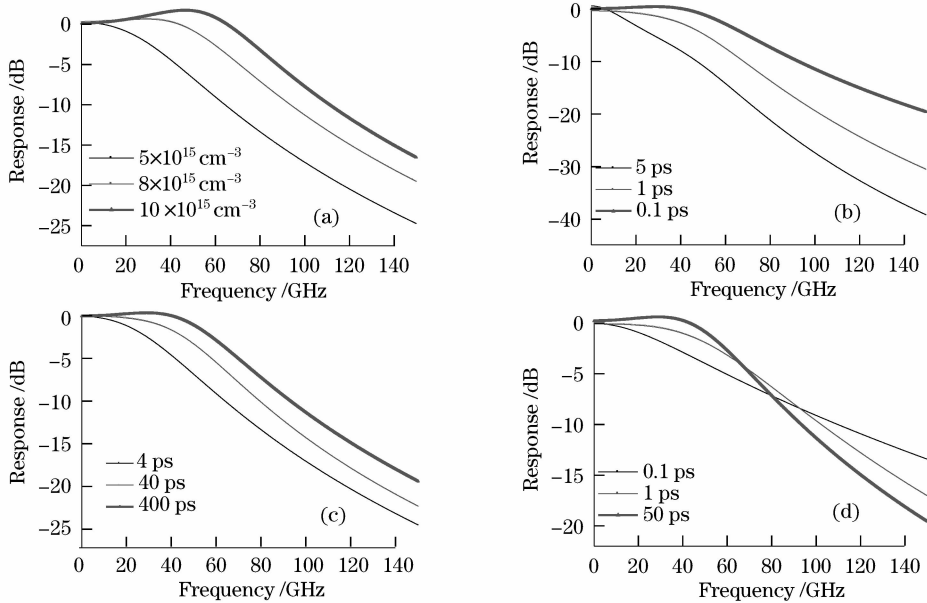


图 4 量子阱 VCSEL 有源区小信号调制带宽随(a)光子密度、(b)载流子俘获时间、(c)逃逸时间、(d)隧穿时间的变化

Fig. 4 Small signal modulation bandwidth of quantum-well VCSEL against (a) photon density, (b) carrier capture time, (c) escape time, and (d) tunnel time

通过测量 IC-OC-VCSEL 在不同偏置电流下的调制带宽,验证了调制带宽随输出光功率增大而增大的结论。对最大功率为 0.8 mW (I) 和 1.2 mW (II) 的两个样品分别进行调制带宽测量,结果如图 5 所示。其中曲线分别为偏置电流从 10 mA, 13 mA 到 16 mA (达到最大功率) 增大时的频率响应,调制带宽都相应增大,而在相同电流下输出功率较大器件调制带宽明显比输出功率较小器件要大。实际测量器件调制带宽较小主要是由于两方面原因:首先,由于 VCSEL 有源区与热沉之间隔了较厚的 DBR 反射层,散热会受到影响,而温度上升会直接影响到量子阱有源区的频率响应^[14];其次,样品 VCSEL 工作在多横模状态,而模式耦合也会对 VCSEL 调制特性产生较大影响^[15],另外光反馈对低频段也有影响^[16]。这些影响因素也是本模型中需要完善的方面。

图 3 中各参数取值为 $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 80 \Omega$, $R_3 = 35 \Omega$, $R_4 = 5 \Omega$, $R_5 = 1.5 \Omega$, $C_1 = 0.8 \text{ pF}$, $C_2 = 0.001 \text{ pF}$, $C_3 = 0.002 \text{ pF}$ 。利用 Matlab 对电路进行近似计算,改变电路中最大的电容 C_1 时,其频率

响应有较大变化,如图 6 所示,电路幅频响应的 3 dB 带宽随着 C_1 的减小而增大。

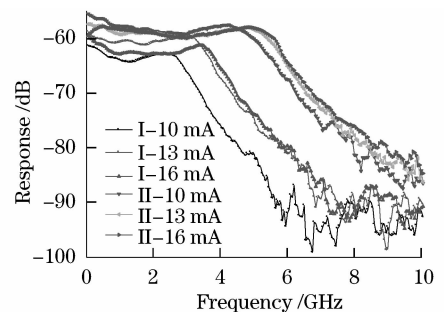


图 5 IC-OC-VCSEL 调制带宽测量结果
Fig. 5 Measured bandwidth of IC-OC-VCSEL

4 结 论

通过理论分析,建立了一种适用于多量子阱 VCSEL 的多层速率方程模型,较全面地描述了载流子在多量子阱中的输运。对方程组进行小信号分析,得到了光子密度、载流子俘获、逃逸和隧穿时间等关键参数对 VCSEL 频率响应的影响。对 IC-OC-VCSEL 调制带宽进行了测量,其带宽随着输出功率

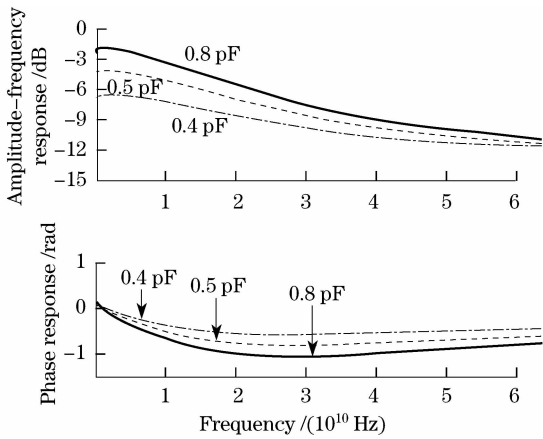


图 6 IC-OC-VCSEL 寄生电路频率响应随 C_1 的变化

Fig. 6 Frequency response of parasitic circuit of IC-OC-VCSEL against C_1

增大而变宽,验证了理论计算结果。另外,分析了 IC-OC-VCSEL 的寄生电参数及其寄生电路,对电路的频率响应进行了模拟,发现寄生电容对器件频率响应影响较大,为以后器件性能的改善提供了理论依据。

致谢:感谢中国科学院半导体所光电子研究发展中心在调制带宽测量方面的支持。

参 考 文 献

- 1 Li Te, Ning Yongqiang, Sun Yanfang *et al.*. Beam quality of 980 nm high power vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 641~645
李 特,宁永强,孙艳芳等. 980 nm 高功率 VCSEL 的光束质量[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5): 641~645
- 2 N. Suzuki, H. Hatakeyama, K. Fukatsu *et al.*. 25 Gbit/s operation of InGaAs-based VCSELs[J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(17): 975~976
- 3 I. Suemane, L. A. Coldren, M. Yamanishi *et al.*. Extremely wide modulation bandwidth in a low threshold current strained quantum well lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1988, **53**(15): 1378~1381

- 4 L. F. Lester, S. D. Offsey, B. K. Ridley *et al.*. Comparison of the theoretical and experimental differential gain in strained layer InGaAs/GaAs quantum well lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(10): 1162~1165
- 5 L. Chrostowski, X. Zhao, C. J. Chang-Hasnain *et al.*. 50-GHz optically injection-locked 1.55 μm VCSELs[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(2): 367~369
- 6 A. Paraskevopoulos. High bandwidth VCSEL devices[C]. *IEEE LEOS 19th Annual Meeting*, 2006, 400
- 7 David McDonald, Ronan F. O'Dowd. Comparison of two- and three-level rate equations in the modeling of quantum-well lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11): 1927~1934
- 8 Kevin L. Lear, Ahmad N. Al-Omari. Progress and issues for high speed vertical cavity surface emitting lasers[C]. *SPIE*, 2007, **6484**: 64840J
- 9 Ma Jianli, Hao Yongqin, Zhong Jingchang *et al.*. Study on stability of selective oxidation in vertical-cavity surface-emitting laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1055~1058
马建立,郝永芹,钟景昌等.垂直腔面发射激光器中选择性氧化工艺稳定性研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1055~1058
- 10 Radhakrishnan Nagarajan, Masayuki Ishikawa, Tom Fukushima *et al.*. High speed quantum-well lasers and carrier transport effects[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10): 1990~2008
- 11 Aaron D. Vandermeer, Daniel T. Cassidy. A rate equation model of asymmetric multiple quantum-well lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(7): 917~924
- 12 L. A. Coldren, S. W. Corzine. Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits [M]. A Wiley- Interscience Publication, 1995. 199~200
- 13 Tong Cunzhu, Han Qin, Peng Hongling *et al.*. Analysis of series resistance of oxide-aperture confined vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Chin. J. Semiconductors*, 2005, **26**(7): 1459~1463
佟存柱,韩 勤,彭红玲等.氧化限制型垂直腔面发射激光器串联电阻分析[J]. *半导体学报*, 2005, **26**(7): 1459~1463
- 14 Yongqiang Wei, Johan S. Gustavsson, Mahdad Sadeghi *et al.*. Dynamics and temperature-dependence of 1.3 μm GaInNAs double quantum-well lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2006, **42**(12): 1274~1280
- 15 Yinon Satuby, Meir Orenstein. Mode-coupling effects on the small-signal modulation of multitransverse-mode vertical-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, **35**(6): 944~954
- 16 Xu Zhang, Huiying Ye, Zhaoxin Song. Low-frequency fluctuation in multimode semiconductor laser subject to optical feedback[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 120~123