

# 载流子输运和寄生参数对隧道再生双有源区 垂直腔面发射激光器调制特性的影响<sup>\*</sup>

王同喜 关宝璐 郭 霞<sup>†</sup> 沈光地

(北京工业大学,北京市光电子技术实验室,北京 100124)

(2008 年 7 月 26 日收到 2008 年 9 月 16 日收到修改稿)

建立了一种适用于多量子阱和有多有源区的多层速率方程模型. 通过小信号分析,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单有源区和隧道再生双有源区垂直腔面发射激光器频率响应特性的影响,并分析了在相同驱动电流下隧道再生双有源区器件调制带宽大于单有源区器件的原因. 进一步研究了隧道再生双有源区内腔接触氧化限制型垂直腔面发射激光器的寄生电参数及其寄生电路,对其频率响应进行了模拟分析.

关键词:垂直腔面发射激光器,速率方程,调制特性,隧道再生

PACC:4255P,4260D,4260F

## 1. 引 言

与边发射激光器相比垂直腔面发射激光器 (vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL) 具有许多优势,如单纵模、可密集集成、阈值电流低等,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<sup>[1]</sup>,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<sup>[2,3]</sup>. 尽管通过光注入锁定或外部调制可获得显著的带宽扩展<sup>[4,5]</sup>,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. 因此,研究新型隧道再生双有源区 VCSEL 的调制特性是很有价值的.

针对 VCSEL 有源区薄,单程光增益低,很难在小电流下得到较大输出功率的问题,我们提出了新型隧道再生双有源区 VCSEL 结构<sup>[6,7]</sup>:两个有源区通过隧道结相连接,实现工作电流以串联方式流经

各有源区,使在前一有源区中辐射复合的载流子通过反向隧道结获得再生,并在下一有源区继续辐射复合发光<sup>[8]</sup>,这样从激光器两电极注入的每一对电子空穴可以在两个有源区中经两次复合产生两个光子,使得微分量子效率大于 1,单程光增益大大提高,输出光功率成倍增加.

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<sup>[9]</sup>,不能明显的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,更无法对单有源区和有多有源区结构进行区分. 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多量子阱区的扩散、俘获、逃逸和隧穿等过程对调制特性的影响,而且通过隧道结方程能将两个有源区连接并可推广到有多有源区结构. 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的进行了限制,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,内部即为上述的载流子、光子

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:60506012),国家重点基础研究发展计划(973)项目(批准号:2006CB604902),霍英东基金(批准号:101062),国家高技术研究发展计划(批准号:2006AA03A121),教育部新世纪优秀人才计划项目(批准号:39002013200801)北京市青年骨干教师培养计划项目(批准号:J2002013200801)和北京工业大学研究生科技基金(批准号:ykj20071594)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: guo@bjut.edu.cn.

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<sup>[10]</sup>.

本文重点阐述载流子输运和器件寄生电路对隧道再生双有源区内腔接触氧化限制型 VCSEL (internal-contact oxide-confined VCSEL, IC-OC-VCSEL) 调制特性的影响. 首先通过有源区的隧道结连接将多层速率方程推广到双有源区结构,对速率方程进行小信号分析,得到器件调制频率响应和光子密度、载流子俘获时间等因素的关系,并分析了在相同电流下双有源区器件调制带宽大于单有源区器件的原因. 然后对器件结构进行分析,得到其寄生电路并发现其中电容对调制带宽影响较大.

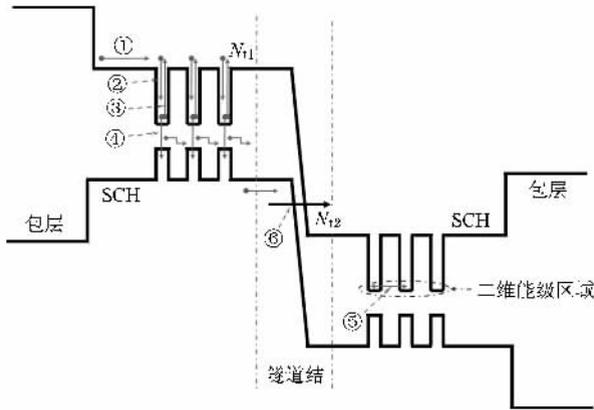


图1 隧道再生双有源区能带结构及其中载流子输运示意图

## 2. 速率方程和寄生电路模型

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,以及其受激复合产生光子,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. 图1是隧道再生双有源区能带结构和其中载流子输运过程示意图. 首先载流子从掺杂的包层到达量子阱,其中包括在隔离层(separate confinement heterostructure, SCH)中的扩散、复合等过程. 之后在多量子阱结构中的主要输运过程如下<sup>[11]</sup>载流子被量子阱俘获,从三维能级束缚限制到阱底部的二维能级,量子阱中载流子的逃逸,此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,但在多量子阱结构中,是载流子在量子阱间输运的必要途径之一,阱间隧穿,这一过程只存

在于多量子阱结构. 载流子逃逸与势垒高度有关,阱间隧穿与势垒高度和宽度都有关系,所以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.

在经过第一个有源区之后,导带电子经过辐射复合到达价带并通过逃逸、扩散等过程到达隧道结边界,此时反偏隧道结使其隧穿到第二个有源区导带获得再生. 除了量子阱内受限制的载流子通过自发、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来实现,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. 因此,载流子在隧道再生双有源区中的输运主要包括扩散、俘获、逃逸、辐射复合、阱间隧穿和从第一个有源区到第二个有源区隧道结处的隧穿,分别如图1中①—⑥所示.

基于以上分析,对有源区每层材料分别建立载流子浓度和光腔中光子浓度速率方程<sup>[12]</sup>,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,并且通过隧道结连接方程可推广至任意多个有源区. 对于非限制状态载流子,速率方程为

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

$$\begin{aligned} \frac{dN_{w1}^{3D}}{dt} &= \frac{N_{SCH1}}{\tau_d} - \frac{2N_{w1}^{3D}}{\tau_d} + \frac{N_{bl}}{\tau_d} \\ &\quad - \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_c} + \frac{N_{w1}^{2D}}{\tau_c} - \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_n}, \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{dN_{w2}^{3D}}{dt} &= \frac{N_{bl}}{\tau_d} - \frac{2N_{w2}^{3D}}{\tau_d} + \frac{N_{l2}}{\tau_d} \\ &\quad - \frac{N_{w2}^{3D}}{\tau_c} + \frac{N_{w2}^{2D}}{\tau_c} - \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_n}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dN_{l2}}{dt} = \frac{N_{w2}^{3D}}{\tau_d} - \frac{2N_{l2}}{\tau_d} + \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_d} - \frac{N_{l2}}{\tau_n}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{w3}^{3D}}{dt} &= \frac{N_{l2}}{\tau_d} - \frac{2N_{w3}^{3D}}{\tau_d} + \frac{N_{SCH2}}{\tau_d} \\ &\quad - \frac{N_{w3}^{3D}}{\tau_c} + \frac{N_{w3}^{2D}}{\tau_c} - \frac{N_{w1}^{3D}}{\tau_n}, \end{aligned} \quad (6)$$

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

对于受限制载流子,速率方程为

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

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

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

光子速率方程为

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

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

隧道结两边载流子速率方程为

$$\frac{dN_{i2}}{dt} = \frac{N_{i1}}{\tau_{ij}} + \frac{N_{2w1}^{3D}}{\tau_d} - \frac{N_{i2}}{\tau_n} - \frac{N_{i2}}{\tau_d}. \quad (13)$$

上式右边各项分别表示：从隧道结左边隧穿过来的载流子、第二个有源区第一个量子阱三维能级处的扩散、隧道结右边隔离层处的复合和扩散。如图 1 所示。其中隧穿时间与载流子有效质量、禁带宽度和隧道长度有关。

以上各式中参数  $I$  为注入电流； $q$  为电子电量； $V_{SCH}(i=1,2)$  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； $N_{ti}(i=1,2)$  为隧道结两边载流子浓度； $\tau_d, \tau_n, \tau_c, \tau_e, \tau_i, \tau_p, \tau_{sp}, \tau_{ij}$  分别是有效扩散时间、复合时间、俘获时间、逃逸时间、隧穿时间、光子寿命、自发辐射寿命和隧道结处隧穿时间； $v_g$  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； $N_{tr}, N_s$  分别是透明载流子浓度和补偿浓度<sup>[13]</sup>； $\Gamma$  为限制因子； $\beta$  为自发辐射因子； $\epsilon$  为非线性增益压缩因子。(1)–(11) 式为单个有源区三量子阱结构各层的载流子速率方程和光子速率方程，利用隧道结处的关系式(13)将两个有源区相连接，则构成隧道再生双有源区结构的多层速率方程。

图 2 是隧道再生双有源区 IC-OC-VCSEL 的结构

示意图。沿生长方向依次为 GaAs 衬底，26 对 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As n 型 DBR，反向 GaAs 隧道结级联的两个 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 量子阱有源区形成光学厚度为 2.5λ 的谐振腔，每个有源区包括三个量子阱，Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As 氧化限制层，p+ GaAs 欧姆接触层和 22 对未掺杂的 Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As/GaAs 上 DBR。器件的具体制造工艺和特性详见文献 [14, 15]。

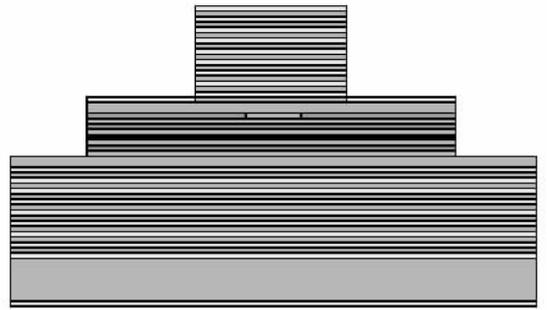


图 2 IC-OC-VCSEL 结构示意图

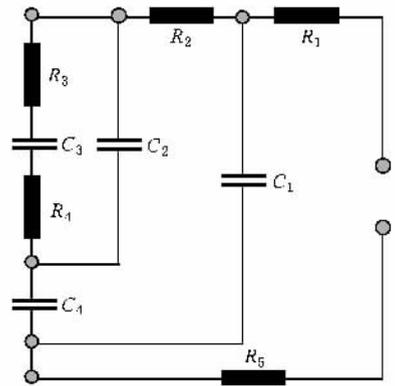


图 3 隧道再生双有源区 IC-OC-VCSEL 寄生电路示意图

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  $C_4$ ；反向隧道结会在动态调制下产生微分电容  $C_3$ 。IC-OC-VCSEL 串联电阻按照注入载流子在器件内部的流经过程，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  $R_1$ ，从欧姆接触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，包括隧道结上部有源区电阻  $R_3$ ，下部有源区及隧道结电阻之和  $R_4$ ，以及 n 型 DBR 电阻和下电极接触电阻之和  $R_5$ 。其中， $C_1$  和氧化层厚度及电极面积有密切关系，而  $R_2$  和纵向电阻与氧化孔径大小密切相关<sup>[16]</sup>。

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( $R_3$ 、 $R_4$  两端)实现电光调制.而在高频段, $RC$  电路对信号衰减很大,将直接影响到 VCSEL 的调制带宽,因此,器件寄生电路的研究对于提高其调制性能有重要意义.

### 3. 模拟结果与分析

图 4 为通过小信号分析单有源区(第 I 组曲线)和隧道再生双有源区(第 II 组曲线)VCSEL 调制特性计算结果,首先如图 4(a)所示,其他参数不变,增大偏置电流时,两种结构的调制带宽都是随着光子密度(输出光功率)的增大而增大,在相同的偏置电流

下,双有源区器件具有更宽的调制带宽;图 4(b)是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,两种结构器件的调制带宽都会减小.但是对于单有源区器件俘获时间较大时,器件调制带宽明显减小,并且衰减的更快,而双有源区器件没有这种影响;图 4(c)是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,而逃逸时间过小会影响到较低频段的调制特性,使其出现畸变,这种影响在双有源区结构中更为明显;图 4(d)是改变量子阱间隧穿时间时,不同的频率响应结果,两种结构器件调制带宽都随隧穿时间减小而减小,都会使低频调制特性出现畸变,这种因素对双有源区器件影响更大.

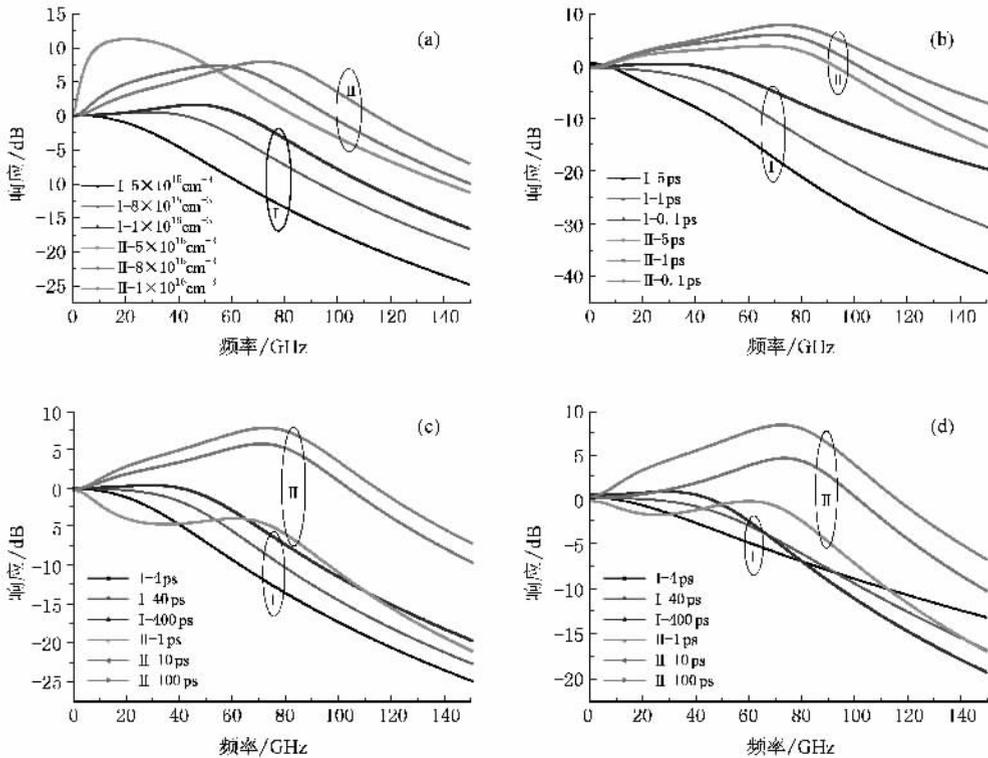


图 4 单有源区(I)和隧道再生双有源区(II)VCSEL 小信号调制带宽随(a)光子密度、(b)载流子俘获时间、(c)逃逸时间、(d)隧穿时间的变化

图 4 中结果也表明在相同的驱动电流等条件下,隧道再生双有源区 VCSEL 具有更宽的调制带宽,其主要原因有以下两个方面:首先,隧道再生双有源区 VCSEL 具有更大的光限制因子,可达到单有源区 VCSEL 的 1.52 倍<sup>[15]</sup>,光限制因子的增大会使微分增益随之增大<sup>[17]</sup>,而成倍增加的量子阱数目也会使微分增益变大<sup>[18]</sup>.因此隧道再生双有源区器件

具有更大的弛豫振荡频率<sup>[19]</sup>.所以在只考虑载流子输运的较理想情况下,隧道再生双有源区结构器件具有更大的调制带宽.

图 3 中各参数近似取值如下  $R_1 = 2\Omega$ ,  $R_2 = 100\Omega$ ,  $R_3 = 20\Omega$ ,  $R_4 = 35\Omega$ ,  $R_5 = 5\Omega$ ,  $C_1 = 0.8\text{pF}$ ,  $C_2 = 0.001\text{pF}$ ,  $C_4 = 0.002\text{pF}$ .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 5 所示,电路幅频响应的 3dB 带宽随着  $C_1$  的减小而增大.

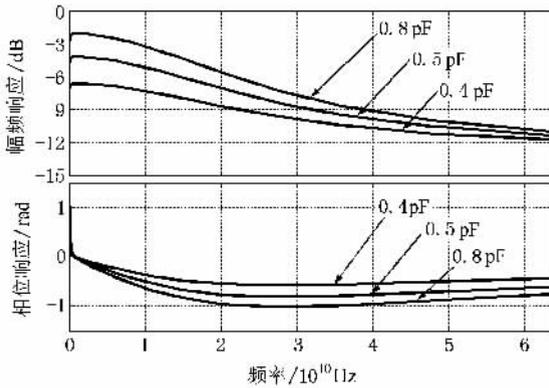


图 5 隧道再生 IC-OC-VCSEL 寄生电路频率响应随  $C_1$  的变化

## 4. 结 论

本文通过理论分析,建立了一种适用于多量子阱和有多有源区 VCSEL 的多层速率方程模型,较全面地描述了载流子在隧道再生双有源区中的运输.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单有源区和隧道再生双有源区 VCSEL 频率响应的影响.计算结果表明,在相同偏置电流下,双有源区器件调制带宽更大,并分析了其原因.进一步研究了隧道再生双有源区 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,为器件性能改善提供了理论依据.

- [ 1 ] Suzuki N, Hatakeyama H, Fukatsu K, Anan T, Yashiki K, Tsuji M 2006 *Electronics Letters* **42** 975
- [ 2 ] Suemane I, Coldren L A, Yamanishi M, Kan Y 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 1378
- [ 3 ] Lester L F, Offsey S D, Ridley B K, Schaff W J, Forman B A, Eastman L F 1991 *Appl. Phys. Lett.* **59** 1162
- [ 4 ] Chrostowski L, Zhao X, Chang-Hasnain C J, Shau R, Ortsiefer A, Amann M C 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 367
- [ 5 ] Paraskevopoulos A 2006 *IEEE LEOS 19th Annual Meeting* 400
- [ 6 ] Zhu W J, Guo X, Lian P, Zou D S, Gao G, Shen G D 2003 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **20** 157 (in Chinese) [朱文军、郭霞、廉鹏、邹德恕、高国、沈光地 2003 量子电子学报 **20** 157]
- [ 7 ] Zhu W J, Guo X, Lian P, Zou D S, Gao G, Shen G D 2003 *Laser Technology* **27** 325 (in Chinese) [朱文军、郭霞、廉鹏、邹德恕、高国、沈光地 2003 激光技术 **27** 325]
- [ 8 ] Lian P, Yin T, Gao G, Zou D S, Chen C H, Li J J, Shen G D 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2374 (in Chinese) [廉鹏、殷涛、高国、邹德恕、陈昌华、李建军、沈光地 2000 物理学报 **49** 2374]
- [ 9 ] McDonald D, O'Dowd R F 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 1927
- [ 10 ] Lear K L, Al-Omari A N 2007 *Proc. SPIE* **6484** 64840J
- [ 11 ] Ngarajan R, Ishikawa M, Fukushima T, Geels R S, Bowers J E 1992 *IEEE J. Quantum Electron.* **28** 1990
- [ 12 ] Vandermeer A D, Cassidy D T 2005 *IEEE J. Quantum Electron.* **41** 917
- [ 13 ] Coldren L A, Corzine S W 1995 *A Wiley-Interscience Publication* p199
- [ 14 ] Qu H W, Guo X, Deng J, Dong L M, Lian P, Zou D S, Shen G D 2005 *Research & Progress of Sse.* **25** 499
- [ 15 ] Qu H W, Guo X, Deng J, Dong L M, Lian P, Zou D S, Shen G D 2005 *Laser & Infrared* **35** 246
- [ 16 ] Tong C Z, Han Q, Peng H L, Niu Z C, Wu R H 2005 *Chinese Journal of Semiconductors* **26** 1459 (in Chinese) [佟存柱、韩勤、彭红玲、牛智川、吴荣汉 2005 半导体学报 **26** 1459]
- [ 17 ] Nido M, Naniwae K, Shimizu J, Murata S, Suzuki A 1993 *IEEE J. Quantum Electron.* **29** 885
- [ 18 ] Matsui Y, Murai H, Arahira S, Ogawa Y, Suzuki A 1998 *IEEE J. Quantum Electron.* **34** 1970
- [ 19 ] Suemune I, Coldren L A, Yamanishi M, Kan Y 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 1378

# Study on the effects of carrier transport and parasitic parameters on the modulation response of tunnel regenerated vertical-cavity surface-emitting lasers with double active regions \*

Wang Tong-Xi Guan Bao-Lu Guo Xia<sup>†</sup> Shen Guang-Di

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

( Received 26 July 2008 ; revised manuscript received 16 September 2008 )

## Abstract

A rate equation model of multi-quantum wells and multi-active regions were presented. The effects of photon density and the carrier capture-escape-tunnel time on the frequency response of single active region vertical-cavity surface-emitting Laser ( VCSEL ) and tunnel-regenerated VCSEL with two active regions were simulated by the small signal analysis. The result of simulation shows that the modulate bandwidth of tunnel-regenerated VCSEL with two active regions is larger than that with single active region under the same drive current , then its causes are discussed. Moreover , we simulate the frequency response of the parasitic circuit of tunnel-regenerated internal-contact oxide-confined VCSEL with two active regions after analyzing its parasitic parameters .

**Keywords** : vertical-cavity surface-emitting laser , rate equations , modulation response , tunnel regenerated

**PACC** : 4255P , 4260D , 4260F

---

\* Projects supported by the National Natural Science Foundation of China( Grant No. 60506012 ) , the National Basic Research Program of China( 973 Grant No. 2006CB604902 ) , the Fok Ying Tong Education Foundation( Grant No. 101062 ) ,The National High Technology Research and Development Program of China( Grant No. 2006AA03A121 ) , the New Century Excellent Person Support Program( Grant No. 39002013200801 ) , Youthful teacher Development Program of Beijing( Grant No. J2002013200801 ) and The Science & Technology Foundation for Graduate of Beijing University of Technology( Grant No. ykj20071594 ).

<sup>†</sup> E-mail : guo@bjut.edu.cn.