

文章编号: 1001-3806(2004)03-0248-03

## VCSELs 与 EELs 多模弛豫振荡的研究

李孝峰<sup>1,2</sup>, 潘炜<sup>1,2</sup>, 罗斌<sup>1</sup>, 赵峥<sup>3</sup>, 邓果<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 计算机与通信工程学院, 成都 610031; 2. 电子科技大学 宽带光纤传输与通信系统技术国家重点实验室, 成都 610054; 3. 西南交通大学 理学院, 成都 610031)

**摘要:** 根据多模速率方程, 利用 MATLAB 提供的 SIMULINK 软件包对垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 和边发射激光器 (EELs) 多模弛豫振荡进行了研究。结果表明, 与单模情况相比, 多模时 EELs 弛豫振荡频率增大、弛豫和延迟时间缩短, 而 VCSELs 动态特性变化不大。与此同时, 在得出 VCSELs 的单模工作、高速调制以及提高偏置电流或自发辐射因子可改善两类器件动态特性等结论外还看到, VCSELs 边模抑制比 (SMSR) 随偏置电流变化率高于 EELs; 自发辐射因子增大时, 边模强度同比例增大、主模强度减小, 利用微腔效应有效控制自发辐射因子可以优化 VCSELs 的单模特性。

**关键词:** 垂直腔面发射激光器; 边发射激光器; 弛豫振荡; 边模抑制比; 自发辐射因子

**中图分类号:** TN248.4 **文献标识码:** A

### Study on multimode relaxation oscillation of VCSELs and EELs

LI Xiaofeng<sup>1,2</sup>, PAN Wei<sup>1,2</sup>, LUO Bin<sup>1</sup>, ZHAO Zheng<sup>3</sup>, DENG Guo<sup>1</sup>

(1. Institute of Computer Communication Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. National Key Laboratory of Broad-band Fiber Transmission and Communication Network Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 610054, China; 3. Institute of Science, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on multimode rate equations, the relaxation oscillation of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) and edge-emitting lasers (EELs) has been studied through SIMULINK provided by MATLAB. The results show that EELs with multiple longitudinal modes have higher relaxation oscillation frequency and shorter turn-on delay time, which are relatively unchanged for VCSELs case. The simulation results also verify the following conclusions: firstly, VCSELs has the merits of single-mode working and high-speed modulation; secondly, the devices with higher bias current or larger spontaneous emission factor exhibit better temporary characteristics; thirdly, the variation rate of VCSELs' side-mode suppression ratio (SMSR) with bias current is higher than that of EELs. Furthermore, the side-mode intensities augment at the same rate with increasing the spontaneous emission factor, and the main mode intensity decreases accordingly. Controlling this factor effectively can optimize the single-mode characteristic of VCSELs.

**Key words:** vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs); edge-emitting lasers (EELs); relaxation oscillation; side-mode suppression ratio (SMSR); spontaneous emission factor

## 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSELs) 与传统的边发射激光器 (EELs) 相比, 具有阈值电流低、单纵模工作、调制频率高等优点<sup>[1~3]</sup>, 在光通信、光互连以及光集成元件等领域发挥了重要作用。由于弛豫振荡频率是进行高速调制的制约因素<sup>[4]</sup>, 故对器件动态

特性的研究尤为重要。早在 1982 年, NABL 便对弛豫振荡及其稳定性进行了讨论<sup>[5]</sup>, 近年来, 弛豫振荡的优化以及振荡频率提高等方面的问题也逐渐成为热点。但以往的分析, 无论对 VCSELs 还是 EELs, 多数使用的都是单模速率方程<sup>[4~7]</sup>, 且很少对两类器件动态特性进行较为详细的比较。基于前期工作<sup>[4,6]</sup>, 考虑纵模增益满足 Lorentz 线型, 利用多模速率方程, 对 VCSELs 和 EELs 的弛豫振荡进行了数值模拟, 并对二者异同展开了讨论。理论结果较好地拟合了文献和实验结果<sup>[3,6,7]</sup>。

## 1 基本理论

半导体激光器属于均匀加宽器件, 其纵模增益

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10174057)

作者简介: 李孝峰 (1979-), 男, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器与光通信的研究。

E-mail: boy-lixiaofeng@sina.com.cn

收稿日期: 2003-06-09; 收到修改稿日期: 2003-08-11

满足 Lorentz 线型,对应的多模速率方程如下<sup>[3]</sup>:

$$\frac{dP_m}{dt} = \{ \Gamma v_g g_0 (N - N_0) [1 + (\lambda_m - \lambda_0)^2 / Q^2 J^{-1} - v_g \alpha] P_m + \beta_{sp} B N^2 \} \quad (1)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - \gamma_e N - \sum_m \Gamma v_g g_0 (N - N_0) \times [1 + (\lambda_m - \lambda_0)^2 / Q^2 J^{-1}] P_m \quad (2)$$

式中,  $m$  为纵模阶数,  $P_m$  为  $m$  阶纵模光子密度,  $N$  为载流子密度,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_m$  和  $Q$  分别为增益谱中心波长、 $m$  阶纵模波长和增益谱半宽,其它符号意义与常规定义相同,详见文献[3]。 $m$  的取值范围由纵模间距和增益谱宽决定,应包括所有增益  $G$  为正的 mode。

弛豫振荡通常采用小信号法<sup>[3]</sup>来分析。对稳态光子和载流子密度 ( $P_m$  和  $N$ ) 引入微小扰动量  $\delta P_m$  和  $\delta N$ ,然后将  $P_m = \bar{P}_m + \delta P_m$  和  $N = \bar{N} + \delta N$  代入 (1) 式和 (2) 式并忽略高阶微扰项,可得如下关于  $\delta P_m$  和  $\delta N$  的方程:

$$\delta P_m = -\Gamma_{P_m} \delta P_m + \left\{ \frac{\partial G_m}{\partial N} \bar{P}_m + \frac{\partial R_{sp}}{\partial N} \right\} \delta N \quad (3)$$

$$\delta N_m = -\Gamma_N \delta N - \sum_m \left[ \frac{\partial G_m}{\partial N} \bar{P}_m + \bar{G}_m \right] \delta P_m \quad (4)$$

对应的光子和载流子衰减速率分别为:

$$\Gamma_{P_m} = \frac{R_{sp}}{P_m} - \frac{\partial G_m}{\partial P_m} \bar{P}_m \quad (5)$$

$$\Gamma_N = \bar{\gamma}_e + \bar{N} \frac{\partial \gamma_e}{\partial N} + \sum_m \left[ \frac{\partial G_m}{\partial P_m} \bar{P}_m \right] \quad (6)$$

式中,  $\bar{G}_m$  为  $m$  阶纵模增益,  $\bar{\gamma}_e$  为稳态光子衰减速率。由于多模弛豫振荡频率解析式很复杂,直接通过表达式分析较为困难。使用 SIMULINK 来解决上述问题时,不仅可回避小信号近似条件带来的限制,精确度更高,而且易获得各种实时动态结果。

## 2 结果及讨论

考虑到边模抑制比 (SMSR) 差异,本文中对应 VCSELs 和 EELs 弛豫振荡进行模拟时分别考虑了 3 个和 5 个纵模,参数取值见表 1。

Table 1 Typical parameters of VCSELs and EELs<sup>[3]</sup>

parameter	symbol	value	
		VCSELs	EELs
laser wavelength	$\lambda_0$	1.31 $\mu\text{m}$	1.31 $\mu\text{m}$
thickness of active region	$d$	0.1 $\mu\text{m}$	0.2 $\mu\text{m}$
radius/ width of device	$W$	4 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$

parameter	symbol	value	
		VCSELs	EELs
cavity length	$L$	6 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$
group velocity	$v_g$	8.8 $\times 10^9 \text{cm/s}$	7.5 $\times 10^9 \text{cm/s}$
equivalent cavity loss	$\alpha$	40 $\text{cm}^{-1}$	86 $\text{cm}^{-1}$
confinement factor	$\Gamma$	0.07	0.3
gain constant	$g_0$	2.5 $\times 10^{-16} \text{cm}^2$	2.5 $\times 10^{-16} \text{cm}^2$
carrier lifetime at threshold	$\tau_e$	2.7ns	2.7ns
carrier density at transparency	$N_0$	2.2 $\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$	1 $\times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
radiative recombination rate	$B$	1 $\times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$	1 $\times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$
FWHM of gain spectrum	$Q$	30nm	30nm

### 2.1 单模与多模比较

多纵模 (实线) 时 EELs 和 VCSELs 的主模弛豫振荡曲线分别见图 1a 和图 1b,为了便于比较,图中也给出了单模时对应的曲线 (虚线)。可见,与单模情况相比, VCSELs 动态曲线几乎不变,而对于 EELs,弛豫振荡频率约增大了 0.2GHz,延迟和弛豫时间亦有所缩短,且由于边模分担了大量载流子使主模振荡幅度减小。

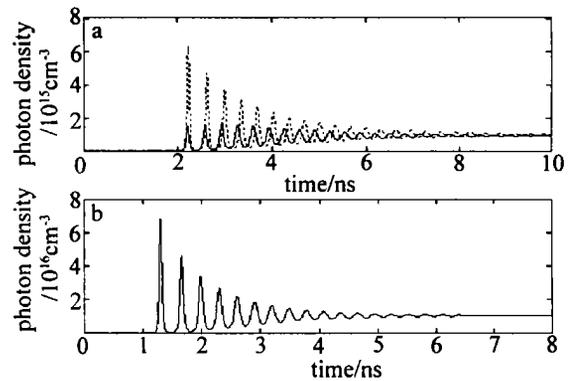


Fig. 1 Relaxation oscillation curve

solid and dashed-line represent the single-mode and multimode cases, respectively  
a—EELs b—VCSELs

### 2.2 VCSELs 与 EELs 比较

VCSELs 在偏置电流为 4mA 以及 EELs 在 30mA 时对应的弛豫振荡曲线分别由图 2a 和图 2b 示出,图 2a 中一阶光子密度扩大了 4 个量级。可以看到,两者都经历了弛豫振荡过程才达到稳态,但它们在振荡频率、SMSR 和弛豫时间等方面存在明显差异。首先,在所选电流下 VCSELs 弛豫振荡频率约为 4GHz,而 EELs 只有 2.5GHz,故前者更易实现低偏置下的高速调制;其次,图 2a 中  $P_{\pm 1}$  和主模光子密度  $P_0$  相差为 4 个数量级,而图 2b 中还不不足 1 个量级,也即二者的 SMSR 差距较大 (可达 50dB);最后,VCSELs 达到稳态用了 6ns,而 EELs

在 15ns 时仍未完全稳定,说明前者衰减较后者快。

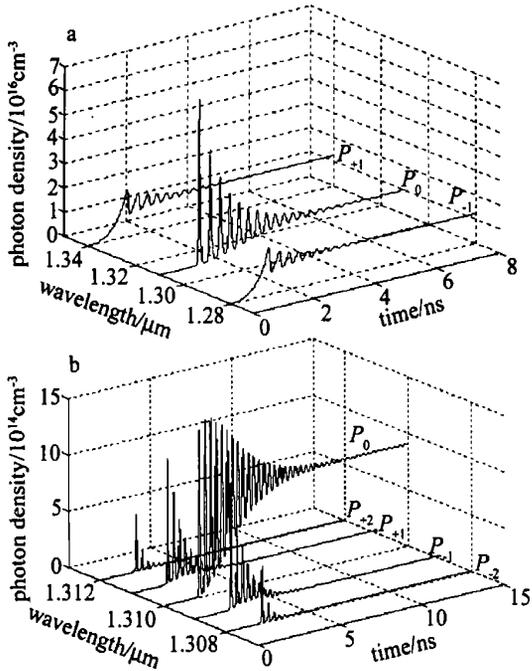


Fig.2 Relaxation oscillation curve

the densities of the side-longitudinal modes in figure 2a have been enlarged four number levels a-VCSELs b-EELs

### 2.3 参数对弛豫振荡的影响

图3中分别给出了  $\beta_{sp} = 1 \times 10^{-4}$ 、不同偏置电流  $I$  下 VCSELs 和 EELs 弛豫振荡曲线,图3a~图3d 分别对应  $I$  为 2mA, 4mA, 20mA 和 40mA 的情况。结果表明,提高偏置电流,除了能得到弛豫振荡频率增大、延迟和弛豫时间缩短等明显结论之外,还可以看到两类

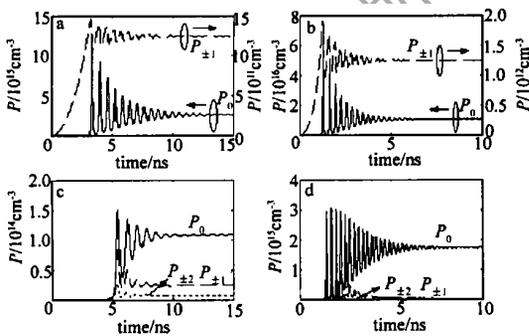


Fig.3 Relaxation oscillation curve with different bias current

a-VCSELs, 2mA b-VCSELs, 4mA c-EELs, 20mA d-EELs, 40mA  
器件 SMSR 的变化差异。  $I$  在上述变化下,  $P_0$  分别从  $0.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  和  $1.1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$  增大到  $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  和  $1.8 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , 而边模光子密度几乎不变, 结果使 SMSR 增大(各为原来的 4 倍和 15 倍)。由于二者的 SMSR 在  $I$  变化之前有近 4 个量级的差距, 且这里 EELs 电流增大幅度为 VCSELs 的 10 倍, 故后者的 SMSR 变化率高于前者。对应的光子密度和  $I$  关系曲线见图 4, 当  $I$  高于阈值电流  $I_{th}$  时, 边模达到饱和, 主模线性增加, SMSR 逐

渐增大,验证了前述结论。

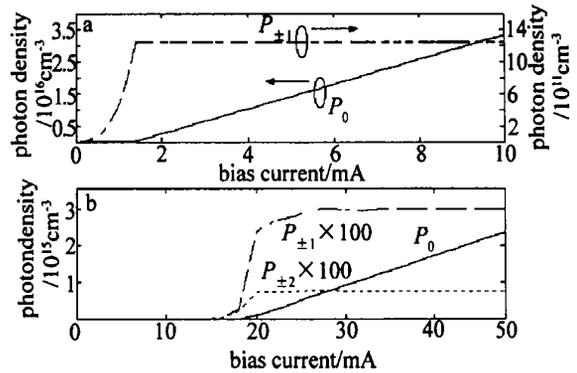


Fig.4 Variation of photon density with bias current a-VCSELs b-EELs

图5为偏置电流不变(分别为 4mA 和 40mA)、不同  $\beta_{sp}$  ( $1 \times 10^{-4}$ ;  $1 \times 10^{-3}$ ) 时的情况。可见,与提高偏置电流类似,增大  $\beta_{sp}$  也能改善弛豫特性。另外,  $\beta_{sp}$  增大 1 个量级时, EELs 的  $P_{\pm 1}$  和  $P_{\pm 2}$  也相应提高了 1 个量级, 且由于边模消耗载流子使  $P_0$  减小(从  $1.7 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  到  $1.2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ), 对于 VCSELs, 亦有类似结论。从该结论进一步得出, 利用微腔效应<sup>[8]</sup>有效控制自发辐射因子使 VCSELs 工作在尽可能少甚至单一模式下, 可大为提高器件单模特性, 前面对其多模特性的分析也证明了这一点, 故实际使用中都将它作为单模器件。

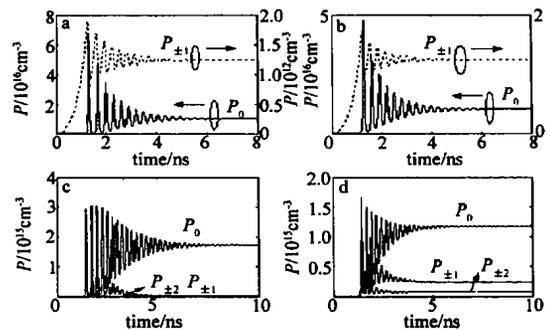


Fig.5 Relaxation oscillation curve with different  $\beta_{sp}$

a-VCSELs,  $1 \times 10^{-4}$  b-VCSELs,  $1 \times 10^{-3}$  c-EELs,  $1 \times 10^{-4}$  d-EELs,  $1 \times 10^{-3}$

### 3 结论

使用 SIMULINK 对 VCSELs 和 EELs 多模弛豫振荡进行了研究, 证明该方法对于处理需要考虑小信号近似的一类问题非常有效。研究结果表明: (1) 相比单模情况, 多模时 EELs 弛豫振荡频率增加、延迟和弛豫时间缩短、主模振荡幅度减小, 而 VCSELs 动态特性变化不大; (2) VCSELs 较 EELs 在高速调制和单模特性方面有明显优势, 且其 SMSR 随偏置电流变化率远大于后者; (3) 增大偏置电流  
(下转第 258 页)

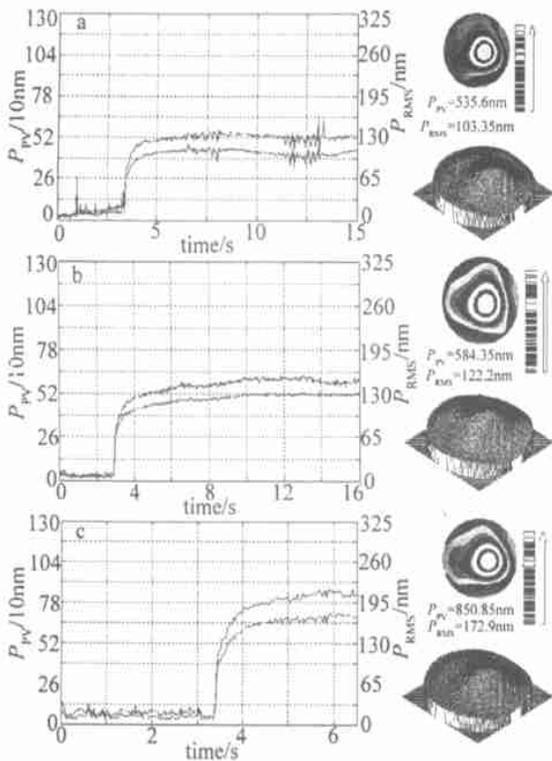


Fig. 6 Thermal distortion of single-layer thin film varies with time (left) and isothermal diagram at  $t = 8\text{s}$  (right)

料对  $10.6\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光的吸收很高,因此,可用 Ge 基底上镀制的  $\text{SiO}_2$  单层膜作为  $10.6\mu\text{m}$  辐照下光学薄膜弱吸收测量的定标样品。

进一步比较图 6a、图 6b 和图 6c 可以看出,在相同的实验条件下,膜层厚的样品较薄的样品的表面形变要大。对同一样品,激光功率越高,样品的形变量也越大。进一步将图 6a 和图 6c 与图 4 给出的计算模拟结果进行比较可知,样品的形变随着薄膜中的温升增大而加剧,但二者并不成比例关系。

(上接第 250 页)

或自发辐射因子可提高弛豫振荡频率、缩短弛豫时间;(4)自发辐射因子增大时,边模光子密度增加、主模光子密度减小,而 VCSELs 由于微腔效应单模特性得以提高。

### 参考文献

[1] BABIC D I, STREUBEL K, MIRIN R P *et al.* Room temperature continuous-wave operation of  $1.54\mu\text{m}$  vertical cavity lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1995, 7 (11): 1225~1227.  
[2] 邓果,潘炜,罗斌.深度调制下 VCSELs 典型结构参数的研究 [J]. *光电子·激光*, 2003, 14 (6): 562~565.

### 3 小结

给出了多层光学薄膜的温度场模型,采用交替隐型技术对光学薄膜的温度场进行了计算模拟和分析。在此基础上,采用夏克-哈特曼波前传感器对不同基底材料、不同厚度单层光学薄膜以及不同膜系的多层光学薄膜样品在  $10.6\mu\text{m}$  激光辐照下的热畸变进行了实验研究。研究表明,激光辐照下光学薄膜样品的温度场分布与辐照激光的光场分布、激光功率以及激光的辐照时间等因素有关。对于  $10.6\mu\text{m}$  激光而言,Ge 最适宜做基底材料。Ge 基底上镀制的  $\text{SiO}_2$  单层膜可作为  $10.6\mu\text{m}$  辐照下光学薄膜弱吸收测量的定标样品。在相同的实验条件下,膜层厚的样品较薄的样品的热畸变要大。泵浦激光功率越高,样品的热畸变也越大。样品的形变随着薄膜中的温升增大而加剧,但二者并不成比例关系。

### 参考文献

[1] ABRAHAM E, HALLEY J M. Some calculation of temperature profiles in thin films with laser heating [J]. *Appl Phys*, 1987, A42: 279~285.  
[2] LAX M. Temperature rise induced by a laser beam [J]. *J A P*, 1977, 48 (9): 3919~3924.  
[3] 徐阳,王新兵.高功率连续  $\text{CO}_2$  激光器 [M]. 北京:国防工业出版社,2000. 3~6.  
[4] 姜文汉.哈特曼波前传感器的应用 [J]. *量子电子学报*, 1998, 15 (2): 228~235.  
[5] MANSURIPUR M, CONNELL G A N, GOODMAN J W. Laser-induced local heating of multilayers [J]. *Appl Opt*, 1982, 21 (6): 1106~1114.  
[6] 胡海洋.光学薄膜强激光热力耦合损伤研究 [D]. 上海:中国科学院上海精密机械研究所,2001. 25~28.  
[7] KLOCEK P. *Handbook of infrared optical materials* [M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 1991. 155~191.

[3] AGRAWAL G P, DUTTA N K. *Semiconductor lasers* [M]. New York: van Nostran Reinhold, 1993. 231~311.  
[4] 潘炜,张晓霞,罗斌.垂直腔激光器中弛豫振荡频率的优化控制 [J]. *激光与红外*, 2002, 32 (1): 27~29.  
[5] NABL M L. Relaxation oscillations and stability [J]. *IEEE J Q E*, 1982, 18 (12): 1992~1994.  
[6] 张晓霞,潘炜,罗斌 *et al.* 半导体微腔激光器瞬态响应及调制特性分析 [J]. *激光技术*, 2001, 25 (3): 221~224.  
[7] CHOA F S, LEE Y H, KOCH T L *et al.* High-speed modulation of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 1991, 3 (8): 697~699.  
[8] 郭长志,陈水莲.分布反射面发射垂直微腔半导体激光器的微腔效应 [J]. *物理学报*, 1997, 46 (9): 1731~1743.