

# 注入电流对垂直腔面发射激光器横模特性的影响<sup>\*</sup>

杨 浩 郭 霞<sup>†</sup> 关宝璐 王同喜 沈光地

(北京工业大学北京市光电子技术实验室 北京 100022)

(2007 年 7 月 28 日收到 2007 年 9 月 18 日收到修改稿)

对 980 nm 氧化限制型垂直腔面发射激光器横模进行测试和研究,理论上从时间、空间变量的速率方程出发,利用空间积分法分析了典型电注入参数对弱折射率导引垂直腔面发射激光器(VCSELs)横模行为的影响,通过实验测试,得到 VCSELs 的横模光场分布情况,并与理论分析进行对比,得出相应的实验结果,在氧化孔径不变的情况下,随着注入电流的增加,载流子分布从有源区中心向边缘移动,模式从低阶基模向高阶模转变,并发生了较强的模式竞争以及载流子空间烧孔效应,最终导致基模强度的降低.另一方面,通过比较不同注入孔径下高阶模的发生时刻,得出越小的注入孔径,注入强度越低的时候,VCSELs 更易实现单横模工作的实验结果.

关键词:横模,垂直腔面发射激光器,空间烧孔现象,模式竞争

PACC: 4255P, 4280L

## 1. 引 言

垂直腔面发射激光器(VCSELs)凭借其单色性好、阈值电流低、集成度高、寿命长、高效率等多方面优势,自问世以来便跻身于光通讯、光互联、光交换、光存储以及光打印等诸多领域并在其中发挥着重要的作用.然而,由于自身结构的特殊性,对这种新兴的优良器件而言,许多问题仍然亟待解决.首先,VCSELs 谐振腔横向相对较宽,对光场限制能力较弱,致使其中常存在多个横模,不同横模的空间分布不同,彼此间存在交叠,从而导致模式间强烈的竞争,对器件的模分噪声、开关特性等产生较大不利影响.其次,随偏置电流的增大,更多高阶模式满足阈值条件而激射,由其引起的载流子分布变化、空间烧孔现象以及热透镜现象<sup>[1]</sup>,都将对激光器的横模特性产生影响.

在实际应用中,由于基模拥有发散角小、光场强度大等优势,大部分场合(光存储、光打印等)需要 VCSELs 稳定的工作在单模条件下,而注入电流则是影响其模式分布的主要因素.从半导体激光器的理论上分析,速率方程作为一种被广为采用的数学模

型,有效地描述出了器件动态的载流子、光子分布以及它们的相互作用,为我们研究激光器的横模特性提供了很好的理论依据.在 VCSELs 中,针对其弱折射率导引结构建立多横模速率方程,进而利用分离变量法使其在空间、时间上相互独立,在保证模型准确性的前提下使问题简化.

本文首先针对垂直腔面发射激光器弱折射率导引结构建立多横模速率方程,并根据速率方程所反映出的载流子、光子分布信息构建动态变化的横模分布情况.通过实验测试,得到 VCSELs 的横模光场分布情况,与理论分析结果一致,分别讨论了固定孔径下随着注入电流的增大 VCSELs 横模分布的变化问题、彼此的模式竞争、空间烧孔现象,以及不同的注入孔径下,基模的稳定性问题,理论与实验得到了很好的统一.

## 2. 模型和理论分析

通常采用圆柱形光波导模型来对 VCSELs 的横向光场进行分析.垂直腔面发射激光器的动态特性主要依赖于空间和时间有关的速率方程<sup>[2]</sup>.这里假定载流子分布轴对称,在柱坐标系下,多横模速率方

<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),北京科技新星(批准号 2005A11),北京市优秀人才强教计划(批准号 20051D0501502),北京市自然科学基金(批准号 :KZ200510005003),国家高技术研究发展计划(批准号 2006AA03A121)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: guo@bjut.edu.cn

程可表示为<sup>[3]</sup>

$$\frac{\partial N(r,t)}{\partial t} = \frac{\eta_i \mathcal{K}(r,t)}{qdn_w} - \frac{N(r,t)}{\tau_n} - \sum_m \sum_n G_0 \{ N(r,t) - N_t \} S_{mn}^{s,c}(r,\varphi,t) - D_n \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial N(r,t)}{\partial r} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial S_{mn}^{s,c}(r,\varphi,t)}{\partial t} = \Gamma G_0 \{ N(r,t) - N_t \} S_{mn}^{s,c}(r,\varphi,t) + \Gamma \beta \frac{N(r,t)}{\tau_n} - \frac{S_{mn}^{s,c}(r,\varphi,t)}{\tau_p}, \quad (2)$$

其中  $N(r,t)$  为载流子密度,  $S_{mn}^{s,c}(r,\varphi,t)$  为光子密度,  $s,c$  分别表示方向角的正弦和余弦,  $m,n$  分别表示光横模沿角方向和半径方向的阶数,  $j(r,t)$  是  $t$  时刻沿半径方向注入电流密度,  $\eta_i$  为注入效率,  $q$  为电荷,  $d$  和  $n_w$  量子阱有源区的阱宽和量子阱的个数,  $D_n$  为有源区载流子扩散系数,  $\tau_n$  和  $\tau_p$  为载流子和光子寿命,  $\Gamma$  为光学限制因子,  $\beta$  为自发发射因子,  $G_0$  和  $N_t$  分别为增益系数和透明载流子浓度. 由于方程包括空间、时间等多个变量, 通过分离变量的方法, 将问题转化为易于求解的仅基于时间变量的形式, 得到与空间无关的速率方程  $N(t), \mathcal{K}(t)$ :

$$\frac{dN_0(t)}{dt} = \frac{\eta_j j_0(t)}{qdn_w} \cdot \epsilon_0 - \frac{N_0(t)}{\tau_n} - \sum_m \sum_n G_0 \{ N_0(t) - \sum_i \gamma_{jmn}^{s,c} N_i(t) - N_t \} S_{mn}^{s,c}(t), \quad (3)$$

$$\frac{dN_j(t)}{dt} = - \frac{\eta_j j_0(t)}{qdn_w} \cdot \epsilon_j - N_j(t) \left( \frac{1}{\tau_n} + d_j \right) \times \sum_m \sum_n G_0 \{ \phi_{jmn0}^{s,c} N_0(t) - \sum_i \phi_{jmn}^{s,c} N_i(t) \}$$

$$- \phi_{jmn0}^{s,c} N_t \} S_{0mn}^{s,c}(t), \quad (4)$$

$$\frac{dS_{0mn}^{s,c}(t)}{dt} = \Gamma G_0 \{ N_0(t) - \sum_i \gamma_{jmn}^{s,c} N_i(t) - N_t \} S_{0mn}^{s,c}(t) + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n} \cdot N_0(t) - \frac{S_{0mn}^{s,c}(t)}{\tau_p}, \quad (5)$$

其中  $N_0(t), N_j(t)$  分别是平均载流子浓度和  $j$  阶载流子浓度. 通过这种方法, 我们可以很容易地得到不同工作电流下载流子的分布情况以及 VCSEL 横截面上不同模式与载流子分布的对应关系, 至此空间分布问题就简单的归结为上述参数的求解, 而空间烧孔等现象便可通过上述积分传递到速率方程中并从实验结果中体现出来<sup>[4,5]</sup>.

我们知道除注入电流以外, 垂直腔面发射激光器的模式还受到注入孔径、芯层、包层有效折射率差等很多因素的影响<sup>[6]</sup>, 相比注入电流来说, 注入孔径、折射率差等因素将随着器件的制备而被限定, 即在结构稳定的情况下, VCSEL 内可能存在的若干横模分布将随着动态因素的变化, 在不同时刻、条件下显现出来. 图 1 模拟了 980 nm 氧化限制型 VCSEL 芯层有效折射率 3.3、包层有效折射率 3.296、注入孔径为 3  $\mu\text{m}$  时  $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}$  模式沿半径方向的分布情况以及其对应的 3-D 分布图, 从图中我们可以很清楚地注意到, 各模式在某一确定的半径位置上存在着交叠的情况, 但各模式交叠的程度各不相同. 通过求解模式的本征方程, 可以得到各阶模式的截止电压及分类, 在这里引用表 1 所得结果<sup>[7]</sup>, 其中  $J_N$  表示第  $N$  阶贝塞尔函数,  $V_c$  表示各模式对应的截止频率. 从表中可以看出, 随着截止频率  $V_c$  的不断增加, 高阶模将满足激射条件而激射, 横模的分布情况会更加复杂. 现在我们从各模式的截止条件出发, 分

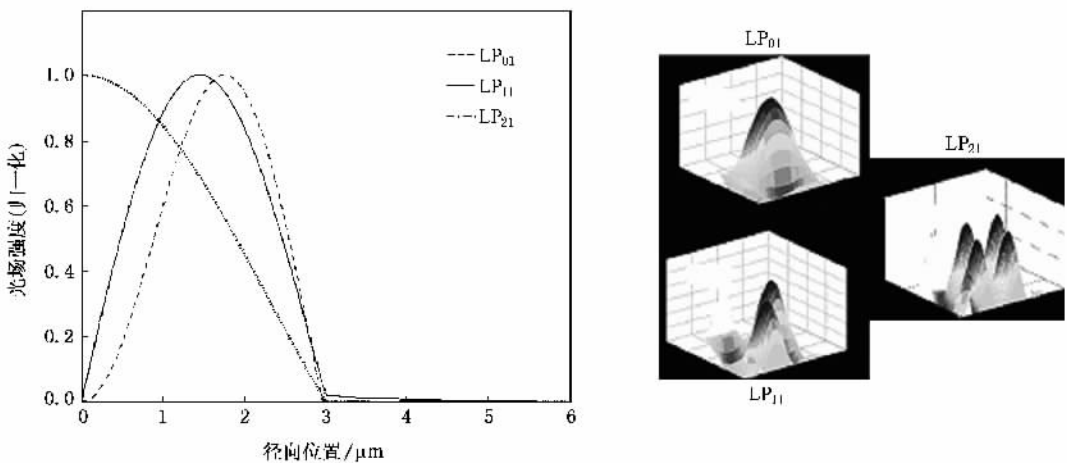


图 1  $LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}$  模式沿半径方向的分布情况及 3-D 分布图

析三个最低阶模式的分布,即  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ , 以便于讨论各模式间的竞争关系. 从图 1 可以看出,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  交叠程度更为严重, 二者共享相同区域而出现强烈的竞争, 它们主要分布在有源区的边缘附近. 而  $LP_{01}$  模则主要分布在有源区中心附近, 与其他两个模式重叠较小, 彼此间的竞争相对较弱.

表 1  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  模的截止条件和截止频率

截止条件	$V_c$	线性偏振模
$J_1 = 0$	0	$LP_{01}$
$J_0 = 0$	2.405	$LP_{11}$
$J_1 = 0$	3.882	$LP_{21}$

从速率方程 (3) (4) 可以得到随注入电流变化载流子的分布变化情况, 由此来判断 VCSELs 相应位置的模式分布. 图 2 展示了有源区孔径为  $3 \mu\text{m}$  时, 随着注入电流增大载流子分布的模拟计算结果, 当注入电流较低时, 载流子变化幅度很小, 小注入孔径下其主要分布在有源区的中央, 如图 2(a) 所示,

当满足激射条件时, 相应位置的基模  $LP_{01}$  拥有更高的增益和更低的阈值而最先激射. 注入电流的不断增大, 载流子随注入电流变化而增加, 但中心位置的载流子由于  $LP_{01}$  模的激射而消耗较大, 导致其分布峰值向有源区的边缘移动, 中心出现低载流子密度的烧孔区域<sup>[8,9]</sup>, 如图 2(b) 所示, 这种情况下分布在边缘的高阶模式一旦满足阈值条件, 即会获得较高增益而激射, 虽然注入电流的增大有益于载流子数目的增多, 但相比基模  $LP_{01}$  的增益变化, 次高阶模  $LP_{11}$  对应于载流子的分布峰值位置而导致其增益变化幅度更为明显, 模式竞争的结果即为  $LP_{11}$  显现出来. 随着注入电流的继续增大, 中心位置的载流子消耗会越来越严重, 低载流子烧孔区域会逐渐增大, 如图 2(c) 所示, 分布在  $LP_{11}$  模边缘的  $LP_{21}$  模所在位置的载流子密度最高, 使得  $LP_{21}$  模享有更高的增益而得到加强.

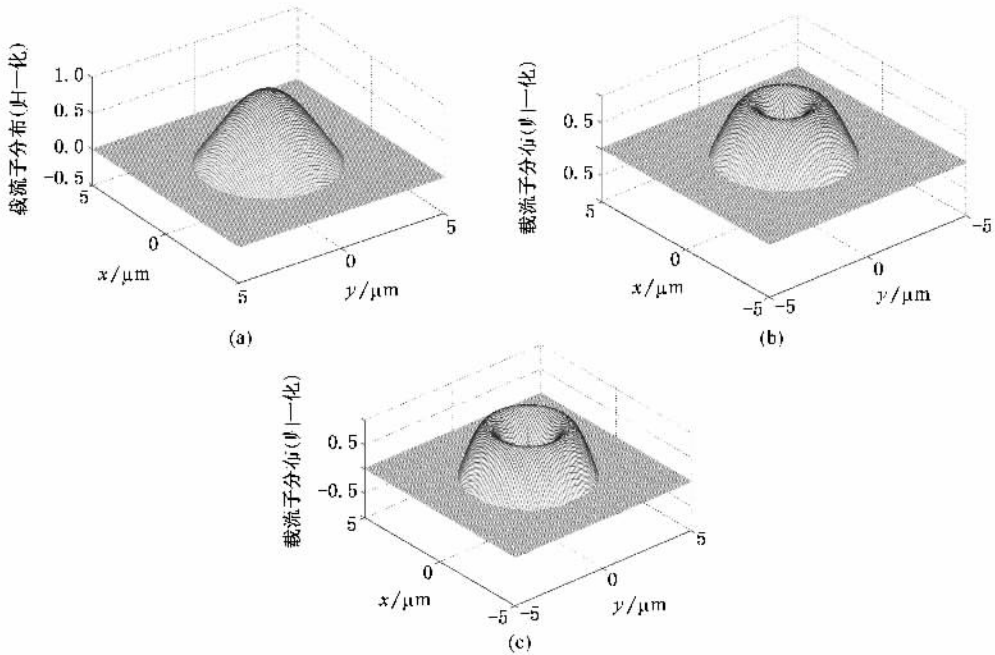


图 2 随注入电流增大载流子分布示意图 (a) 1 mA; (b) 2 mA; (c) 15 mA

另一方面, 注入孔径的大小对模式的变化也存在着一定的控制作用, 不同的注入孔径下, 随注入电流增大, 高阶横模产生的时刻不同. 仍以低阶模  $LP_{01}$ ,  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  为例, 在注入孔径  $R_d$  较小时, 载流子由于横向限制主要集中在有源区中心区域, 那么强度同样分布在该区域的  $LP_{01}$  模则拥有更高的增益而优先激射; 对于  $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$  模而言, 从图 1 我们可以看

出其主要分布在有源区边缘附近, 此时与载流子的耦合相对较弱, 得到的增益较低, 因而未能激射. 但是随着  $R_d$  增加, 载流子分布逐渐向外延伸,  $LP_{11}$  和  $LP_{21}$  与载流子的耦合能力逐渐提高, 它们有可能获得更高的增益而达到阈值, 由于二者出射消耗了一部分有源区的载流子, 故基模  $LP_{01}$  强度将下降, 继续增加电流注入孔径,  $LP_{11}$  阶横模越来越强, 而主模

$LP_{01}$  强度则受到抑制直到被掩盖. 依此类推,  $R_d$  继续增大时,  $LP_{21}$  将会出射, 且各模式间彼此的竞争相当激烈. 由此可见, VCSEL 注入孔径越大越易激发高阶模式, 要使 VCSELs 稳定的单基模工作,  $R_d$  必须控制在较小的范围内.

### 3. 实验结果与分析

本实验采用 22 对顶 DBR, 26 对底 DBR, GaAs 欧姆接触层  $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$  氧化限制层和  $1\lambda$  量子阱有源区的 980 nm VCSEL 器件, 其具体参数及材料结构如表 2 所示.

表 2 980 nm 氧化限制型 VCSEL 结构示意图

22 对 DBR	GaAs	70 nm
	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$	80 nm
氧化限制层	$Al_{0.98}Ga_{0.02}As$	60 nm
有源区 $\times 3$	QW	8 nm
		10 nm
26 对 DBR	$Al_{0.9}Ga_{0.1}As$	70 nm
	GaAs	80 nm
$n^+$	Sub	GaAs (100) (2 degree off)

图 3 显示了注入孔径为  $3\ \mu m$  时 980 nm 氧化限制型 VCSEL 随注入电流增加其光场分布的显微镜照片. 本实验所用器件的阈值电流  $I_{th} = 0.67\ mA$ , 最大工作电流  $I_f = 15\ mA$ , 最大输出功率  $P_{max} = 3.3\ mW$ . 当注入电流为  $1\ mA$  时, 横模光场分布如图 3 (a) 所示, 此时为  $LP_{01}$  基模出射, 光斑没有分裂. 随着注入电流增大到  $2\ mA$  时, 载流子的分布由于空间烧孔效应从有源区中心向边缘移动, 横模光场分布如图 3 (b) 所示, 光斑分裂成两个区域, 即此时对应于载流子位置的  $LP_{11}$  模享有更高的增益而得到加强, 我们从图 3 (b) 中看到是  $LP_{11}$  模的分布情况, 主模  $LP_{01}$  几乎被掩盖. 随着注入电流的继续增大, 载流子更加向有源区的边缘移动, 光斑的分裂情况会进一步加剧, 如图 3 (c) 所示, 光斑逐渐分裂成四个区域, 即  $LP_{21}$  模显现出来, 此刻由于  $LP_{11}$  模与  $LP_{21}$  模的交叠程度相比  $LP_{01}$  和  $LP_{11}$  的交叠程度强很多, 二者共享相同区域的载流子而出现强烈的竞争, 所以从图 3 (c) 看, 我们并不能看到非常明显的分裂成四个区域的  $LP_{21}$  模图形, 其中必定存在受到抑制的  $LP_{11}$  模的分布. 依此类推, 随着电流的不断增大, 更高阶模式将会产生. 横模的光场分布将变得十分复杂<sup>[10]</sup>.

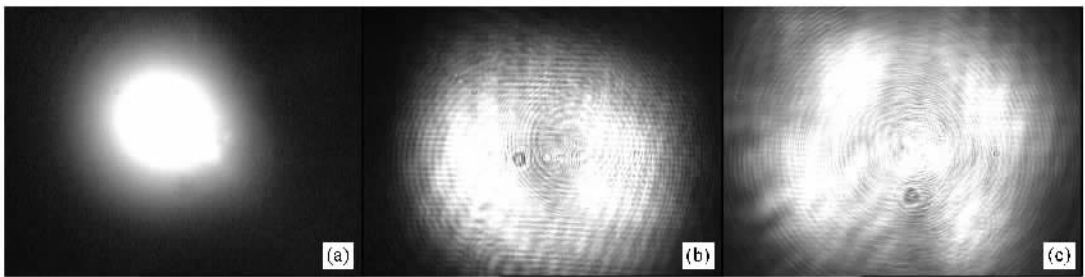


图 3 横模光场随注入电流变化的分布图 (a) 1 mA ; (b) 2 mA ; (c) 15 mA

图 4 显示了该器件的远场测试结果, 测试电流分别为  $1\ mA$ ,  $2\ mA$ ,  $15\ mA$ , 其中圆点标记曲线表示出射面水平方向上的场分布, 而方块标记曲线则表示出射面垂直方向上的场分布. 从中我们可以看出, 图 4 (a) 到图 4 (b) 的过程是一个从自发辐射向受激辐射过渡的过程, 当注入电流为  $0.5\ mA$  时, 此器件没有达到阈值条件而荧光发射, 其半高全宽 (FWHM) 为  $38.8\ nm$ , 且输出功率很低. 随着注入电流逐渐增大到  $1\ mA$  后, 此器件满足阈值条件而受激辐射, 其 FWHM 为  $0.6\ nm$ , 可见辐射出的光束为激光, 且由于此时注入电流较低, 只有基模满足激射条件, 光场分布呈现出单一的峰值分布. 当注入电流增大到  $2$

$mA$  后, 其光场分布如图 4 (c) 所示, 出射面垂直和水平方向上的光场均出现了明显的分裂现象, 此时激光器已经不是单基模工作了, 对照图 3 的相应位置, 我们可以看出此时  $LP_{11}$  模已经激射, 此时的 FWHM 为  $1.2\ nm$ . 我们知道, 模式间彼此存在竞争, 并不是一种模式满足条件激射另一种模式就马上截止, 即存在模式并存的情况, 只不过随着注入电流的增大, 趋势向着分裂更加剧烈的方向移动. 当注入电流进一步增大到  $15\ mA$  以后, 其光场分布如图 4 (d) 所示, 此时出射面水平以及垂直方向上的分裂现象更加剧烈, 说明更高阶次的模式  $LP_{21}$  满足阈值条件而激射出来.

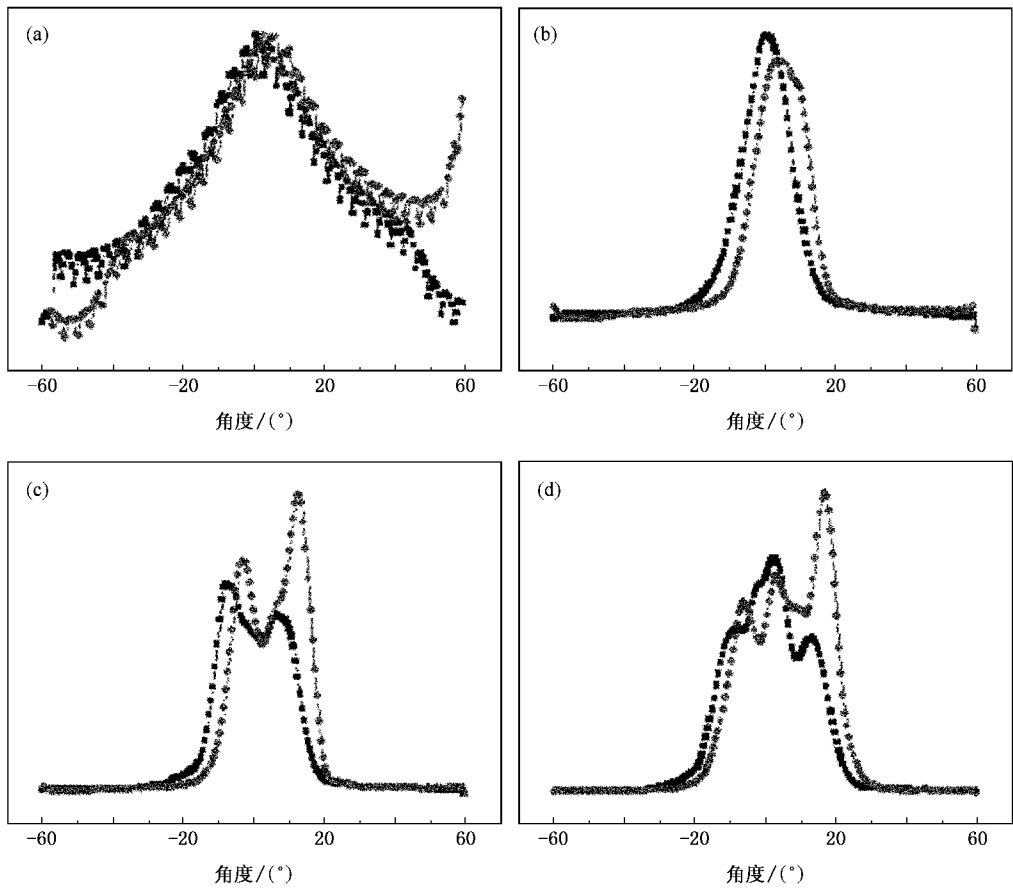


图4 横模光场分布随注入电流变化的远场图 (a)0.5 mA;(b)1 mA;(c)2 mA;(d)15 mA

相比图4所测试的VCSELs器件,选取注入孔径为 $16.8\ \mu\text{m}$ 的器件来观察注入孔径对模式分布的影响,其阈值电流为2.5 mA.在2 mA注入电流下此器件没有激射,图5(a)测试的远场分布为此时荧光出射的场分布情况,当注入电流增大到3 mA时,我们发现相比图4测试结果,此器件激射后没有单基模

工作的过程而直接出现光场分裂的现象,如图5(b)所示.这是由于注入孔径大所导致的,因为注入孔径的增大,阈值电流增大,载流子分布逐渐向外延伸,高的工作电流下高阶模满足阈值条件而出射,基模被抑制,可见注入孔径小的VCSELs器件基模的稳定性更高.

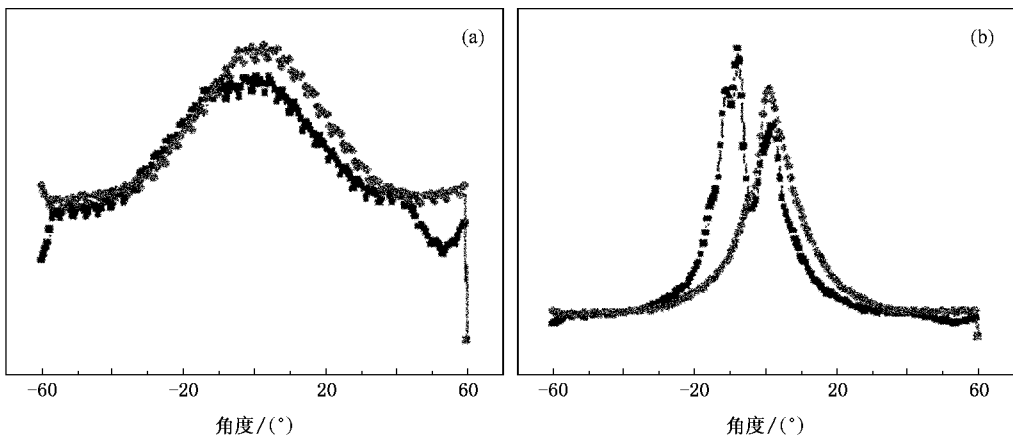


图5  $16.8\ \mu\text{m}$ 注入孔径下横模分布随注入电流变化的远场图 (a)2 mA;(b)3 mA

## 4. 结 论

通过对时间、空间变量的 VCSELs 多横模速率方程的简化,得到了与空间无关的简易速率方程形式,通过它模拟出载流子随偏置电流的空间分布,根据载流子的分布我们可以理论上分析 VCSELs 横模的动态分布变化,经过相应的模拟与实验操作,我们得到了注入电流对横模光场分布的影响情况,解释

了由于载流子分布所引起的空间烧孔等物理现象,通常,随着注入电流的增加,基模增益的变化幅度减弱,高阶模式激励且模式竞争强烈,注入孔径越小基模稳定性越强,最终,我们实现了理论和实验模拟结果的符合,为寻求稳定的单模工作提供了一定的理论基础.

感谢北京工业大学光电子实验室的韩金茹、刘莹等老师、MOCVD 组及实验技术人员在研究中的大力支持.

- 
- [ 1 ] Young G J 2004 *Optics Express* **12** 2542
- [ 2 ] Zhang H B , Mrozynski D 2004 *Journal of Quantum Electronics* **40** 18
- [ 3 ] Zheng S Q , Yu Z Y , Ren Y , Cheng J Q , Cheng J Q 2005 *Proc. of. SPIE* **6020** 602010
- [ 4 ] Valle A , Sarma J , Shore K A 1995 *Opt. Commun.* **115** 297
- [ 5 ] Li X F , Pan W , Luo B , Ma D 2006 *Optical Technique* **32** 1 ( in Chinese )[ 李孝峰、潘 炜、罗 斌、马 冬 2006 光学技术 **32** 1 ]
- [ 6 ] Zhou D L , Luke J 2002 *IEEE J. of Quantum Electronics* **38**( 12 ) 18
- [ 7 ] Wu Chong-Qing 2002 *Optical waveguide theory* ( Beijing :Tsinghua University Press ) p44 ,46 ( in Chinese ) [ 吴重庆 2000 光波导理论 ( 北京 :清华大学出版社 )第 44 ,46 页 ]
- [ 8 ] Valle A , Sarma J , Shore A 1995 *IEEE J. Quantum Electron* **31** 1423
- [ 9 ] Law J Y , Agrawal G P 1997 *IEEE J. Quantum Electron* **33** 462
- [ 10 ] Han L Y , Zhang C S , Cao B , Yao X Q , Hui W J , Zhu Q W , Jia C H , Liu L 2006 *Photon Technology* **1** 11 ( in Chinese )[ 韩丽英、张存善、曹 彬、姚晓琼、回文静、朱奇伟、贾春辉、刘 磊 2006 光子技术 **1** 11 ]

# The influence of injection current on transverse mode characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers \*

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

( *Beijing Photoelectronics Technology Laboratory, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China* )

( Received 28 July 2007 ; revised manuscript received 18 September 2007 )

## Abstract

The influence of transverse mode were researched with the injection current changing via experiments conducted with 980 nm oxide-confined vertical cavity surface emitting lasers ( VCSELs ). Based on the spatio-temporal rate equation , the injection parameter dependence of the transverse mode characteristics of weak-index guiding VCSELs were theoretically researched by integrating the spatially dependent part. The result of the experiment indicated that the higher-order modes begin to emerge and exhibit strong competition with the injection current increased when the oxidized aperture was kept unchanged , and the distribution of the carrier transfers from the center to the edge. Furthermore , the main order becomes weaker because of the spatial hole burning. Compared with the appearance of higher-order modes with different oxidized aperture , the small injection aperture exhibits better single mode behavior.

**Keywords** : transverse mode , VCSELs , spatial hole burning , spatio-temporal rate equation

**PACC** : 4255P , 4280L

---

\* 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 Science Star of Beijing( Grant No 2005A11 ), the Funding Project for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing( Grant No. 20051D0501502 ), the Natural Science Foundation of Beijing( Grant No. KZ200510005003 ) and The National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2006AA03A121 ).

<sup>†</sup> E-mail : guo@bjut.edu.cn