

# 宽调谐范围垂直腔面发射激光器特性分析及设计<sup>\*</sup>

关宝璐 郭 霞<sup>†</sup> 杨 浩 梁 庭 顾晓玲 郭 晶 邓 军 高 国 沈光地

(北京工业大学电子信息与工程控制学院,北京市光电子技术实验室,北京 100022)

(2006 年 12 月 7 日收到,2007 年 3 月 29 日收到修改稿)

运用光学传输矩阵和有限元方法对波长可调谐垂直腔面发射激光器(VCSELs)的波长调谐范围进行了研究,对中心波长为 980 nm 的可调谐 VCSELs 的波长调谐特性和微电子机械系统(MEMS)悬臂梁结构进行了设计,并进行了实验研究.结果表明,MEMS 可调谐 VCSELs 调谐特性同时受到光波谐振腔结构和悬臂梁最大位移的共同影响.在悬臂梁几何尺寸和激光器有源区结构一定的条件下,通过优化可调谐 VCSELs 的牺牲层厚度可实现大范围波长调谐.同时,对可调谐 VCSELs 整体结构进行了设计,计算结果显示波长调谐范围达到 30 nm 以上,调谐效率达到 0.12,调谐过程中所有激射波长都处在 InGaAs/GaAs 量子阱高增益区.

关键词:悬臂梁,可调谐垂直腔面发射激光器

PACC:4255P,4280K,6480G

## 1. 引言

波长可调谐垂直腔面发射激光器(VCSELs)在密集波分复用(DWDM)光网络、电子通信、计算机光互连中具有广泛应用前景<sup>[1-4]</sup>.其不仅可以取代多个单频激光器,提供及时、有效的补偿和保护方案,有效降低网络成本,而且可与其他主动和被动器件组合,提供新颖的光切换和路由功能,从而增加网络的灵活性和有效性.另外,可调谐 VCSELs 在精准测量和光谱分析中也有广泛的应用,如原子钟、原子磁力计和原子分子光谱学分析等<sup>[5-7]</sup>.目前基于机械结构和光学设计的不同,可调谐 VCSELs 总体分为微电子机械系统(MEMS)悬臂梁式<sup>[8]</sup>、薄膜式<sup>[9]</sup>和半对称腔式<sup>[10]</sup>三种器件结构,其中通过静电力调谐的 MEMS 悬臂梁式 VCSELs,不仅具有调谐范围大、响应速度快、易于实现无跳模连续调谐的特点,而且操作简单、制作成本低,得到了广泛的重视和研究<sup>[4,11-13]</sup>.本文重点研究可调谐 VCSELs 的光学特性和 MEMS 悬臂梁力学特性对器件调谐范围的影响,并在此基础上对可调谐 VCSELs 器件结构进行了优

化设计.本文的研究对于 MEMS 可调谐滤波器、探测器等光电子器件的制备和分析同样具有应用和指导意义.

## 2. 可调谐 VCSELs 的调谐特性

VCSELs 波长的物理调谐范围和悬臂梁的力学特性直接影响其光输出特性和波长调谐范围,因此对于可调谐 VCSELs 而言,器件的波长调谐特性和 MEMS 悬臂梁的力学特性优化将成为关键技术.下面分别对波长可调谐 VCSELs 的波长调谐特性和 MEMS 悬臂梁力学特性进行分析.

### 2.1. 波长调谐特性分析

我们采用光学传输矩阵方法<sup>[14]</sup>对可调谐 VCSELs 的调谐过程中激射波长响应特性进行研究.光波在膜系内传输时,第  $j$  个界面处的电场  $E_j$  和磁场  $H_j$  可以通过第  $j$  层膜内的传输矩阵  $M_j$  与第  $j+1$  个界面处的电场  $E_{j+1}$  和磁场  $H_{j+1}$  共同计算得到,即

$$\begin{bmatrix} E_j \\ H_j \end{bmatrix} = M_j \begin{bmatrix} E_{j+1} \\ H_{j+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号:60506012)、国家重点基础研究发展规划(批准号:2006CB604902)、霍英东教育基金(批准号:101062)、北京市科技新星计划(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)、全国优秀博士学位论文作者专项基金(批准号:200542)和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

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos(k_j d) & \frac{1}{y_j} \sin(k_j d) \\ i y_j \sin(k_j d) & \cos(k_j d) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $k_j, d$  分别为第  $j$  层膜内光波矢量和厚度,  $y_j$  为第  $j$  层膜的有效光学导纳.

$$y_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0} \left( n_j + i \frac{2\pi c}{\omega} \alpha_j \right)}, \quad (3)$$

式中  $n_j$  和  $\alpha_j$  分别为在角频率为  $\omega$  时第  $j$  层膜的折射率系数和吸收系数,  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为自由空间的介电常数和磁导率. 整体结构的总传输矩阵  $M$  可以通过每层的传输矩阵乘积得到, 即

$$M = M_1 M_2 \dots M_N. \quad (4)$$

表面界面 ( $j = 1$ ) 处, 电场和磁场通过下式计算得到:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ H_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_N \\ H_N \end{bmatrix}, \quad (5)$$

在膜系最后一层 ( $N + 1$ ) 处,  $E_{N+1} = 1, H_{N+1} = y_{N+1}$ . 从以上分析可得膜系在表面界面处的反射率

$$R = \left| \frac{y_0 E_1 - H_1}{y_0 E_1 + H_1} \right|^2. \quad (6)$$

图 1 为利用 (1)–(6) 式得到的调谐波长随空气隙厚度的变化关系曲线. 由图 1 可以看出, 调谐波长相应从 980 nm 减小到 944 nm 时, 空气隙从 2205 nm 减小到 1860 nm, 如图 1 中  $B$  区所示. 作为谐振腔有效腔长的一部分, 空气隙在外加偏压作用下将减小, 进而导致谐振腔有效腔长  $L_{\text{eff}}$  的减小. 由激光波长与有效腔长关系可知, 当有效腔长  $L_{\text{eff}}$  减小时, 激光器波长也会相应地变化, 即

$$L_{\text{eff}} = \frac{d\Phi_m}{2d\beta} = \frac{n_H n_L \lambda}{4n_c(n_H - n_L)},$$

其中  $\Phi_m$  为激光波长循环一周的相位;  $\beta$  为波矢量;  $n_H, n_L$  分别为分布布拉格反射镜 (DBR) 中相邻层的高低折射率;  $n_c$  为有源区折射率. 当进一步减小空气隙厚度, 使光在腔中传输相位变化为  $2\pi$  的整数倍时, 激光波长又将重新回到起始波长 980 nm, 如图 1 中  $A$  区所示. 当空气隙厚度处在适当位置时 (图 1 中  $C$  区), 将分别在调谐范围的边缘处出现两个激光波长, 从而对波长调谐范围产生不利影响.

图 2 为测量得到的可调谐 VCSELs 的光谱曲线, 可以看出空气隙厚度对激光器腔长有明显的调制作用, 在 970 和 980 nm 处分别出现两个激光波长. 由于 VCSELs 的高增益区与波长具有相关性, 因此, 在调谐过程中最终激光波长还会受到增益峰值和低损

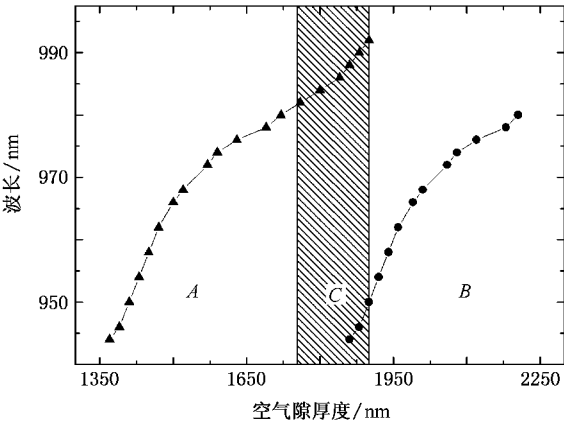


图 1 调谐波长随空气隙厚度变化关系

耗区位置等因素的影响<sup>[15]</sup>.

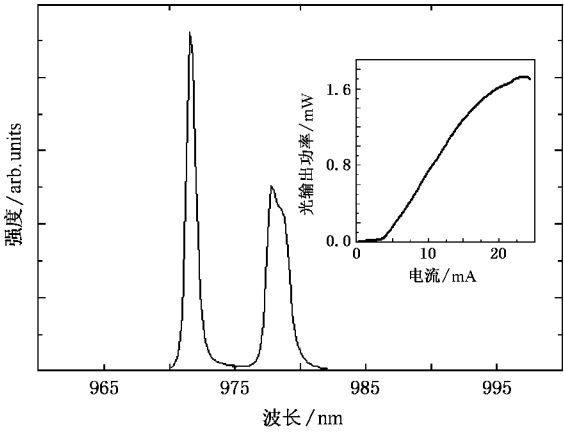


图 2 可调谐 VCSELs 的光谱 内插图为输出功率曲线

2.2.MEMS 悬臂梁调谐特性分析

可调谐 VCSELs 由 VCSELs 结构<sup>[16]</sup>和 MEMS 悬臂梁结构共同组成. 当电压加于上电极时, 将会可在可动顶 DBR 与下电极之间产生电势差, 从而在上电极与下电极之间形成平板电容, 产生静电力. MEMS 悬臂梁所受静电力  $F_{\text{electrostatic}}$  和自身弹性恢复力  $F_{\text{elasticity}}$  的动态平衡可写为<sup>[17]</sup>

$$F_{\text{electrostatic}} = F_{\text{elasticity}}, \quad (7)$$

式中弹性回复力可表示为

$$F_{\text{elasticity}} = b h \sigma \frac{\delta}{\sqrt{l^2 + \delta^2}} \approx \frac{b h \sigma}{l} \delta. \quad (8)$$

由 (2) 式得弹性回复力系数为

$$k_{\text{eff}} = \frac{b h \sigma}{l} \quad (9)$$

式中  $b, h$  和  $l$  分别为悬臂梁的宽度、高度和长度;  $\sigma$

为张力系数; $\delta$  为顶 DBR 垂直位移. 平板电容产生的静电力与偏置电压之间的关系为

$$F_{\text{electrostatic}} = \frac{A_m \epsilon_0 V^2}{2 (g_0 - u)^2} + 4b \int_0^L \frac{\epsilon_0 V^2}{2 (g_0 - ux/l)^2} dx ,$$

(10)

式中  $\epsilon_0$  为空间介电常数,  $A_m$  为可动顶镜面积,  $g_0$  为空气隙的厚度,  $l$  为悬臂梁长度,  $V$  为偏置电压.

图 3 为利用 (7)–(10) 式和有限元方法<sup>[18]</sup> 建立悬臂梁的机电耦合模型后, 计算得到的不同偏置电压和牺牲层厚度下 MEMS 悬臂梁调谐位移特性曲线, 其结构参数如表 1 所列. 从图 3 可以看出, 可调谐 VCSELs 的工作特性与 MEMS 悬臂梁的力学特性密切相关. 下拉 (pull-in) 电压的大小限制了悬臂梁的最大可调位移, 进而制约可调谐激光器波长的调谐范围, 而载荷-位移关系则反应了悬臂梁调谐过程中的变化趋势和稳定性. 从图 3(a) 中我们可以看出, 牺牲层厚度为  $5\lambda/4$ 、下拉电压在 18 V 左右, 即电压增至 18 V 时, 悬臂梁达到的最大位移为 374 nm. 如果电压继续增加, 悬臂梁的弹性恢复力就会小于电压产生的静电力, 从而使悬臂梁失去平衡而陡然下降, 最终使悬臂梁丧失调谐能力. 图 3(b) 为相同条件下, 牺牲层厚度为  $3\lambda/4$  时的悬臂梁随偏置电压的变化关系曲线. 从图 3(b) 可以看出, 悬臂梁的最大位移只有 314 nm, 下拉电压减小到 2.5 V. 比较图 1、图 3 可知, 悬臂梁的位移范围不仅受牺牲层厚度的影响很大, 同时也影响波长调谐范围, 激光器调谐电压的大小也会同样受到影响. 因此, 实现 VCSELs 的大范围调谐及合理地调谐电压, 还需对牺牲层厚度和悬臂梁结构进行优化.

表 1 可调谐 VCSELs 的 MEMS 悬臂梁参数设置		
参 数	取 值	
悬臂梁长度/ $\mu\text{m}$	420	
悬臂梁宽度/ $\mu\text{m}$	22	
悬臂梁厚度/ $\mu\text{m}$	3	
下电极宽度/ $\mu\text{m}$	100	
下电极厚度/ $\mu\text{m}$	1.5	
材料密度/ $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.232	
泊松比	0.34	
弹性模量/ $\text{N}\cdot\mu\text{m}^{-1}$	95.4	
顶 DBR 边长/ $\mu\text{m}$	40	
牺牲层厚度/ $\lambda$	3/4, 5/4	

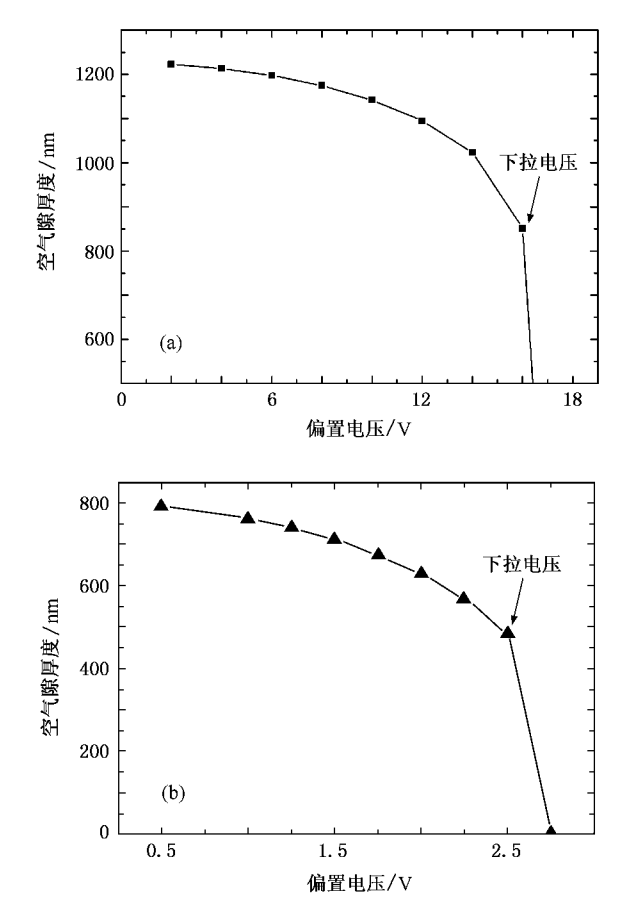


图 3 悬臂梁位移随偏置电压的变化关系 (a) 初始空气隙厚度为  $5\lambda/4$  时, 悬臂梁最大位移 374 nm (b) 初始空气隙厚度为  $3\lambda/4$  时, 悬臂梁最大位移 314 nm

### 3. 可调谐 VCSELs 整体设计

依据以上分析结果, 我们对器件整体结构进行了优化设计, 如图 4 所示. 可调谐 VCSELs 的晶向结构是利用 EMCORED125 型金属有机化学气相淀积 (MOCVD) 设备在 n 型 GaAs 衬底上外延生长得到的. 首先, 生长 23.5 对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ -GaAs 底 DBR, 然后在一个厚度为  $\lambda$  的有源区内, 生长 3 个厚度为 8 nm 的阱层、4 个厚度为 10 nm 的垒层和过渡层. 同时, 在氧化限制层  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  上生长 p 型层, 它包括两对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ -GaAs 层, 随后生长 p 型掺杂的 GaAs 欧姆接触层和本征的  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层. 顶部 n 型 DBR 由 19.5 对  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ -GaAs 层组成, 中心波长设计为 980 nm. 器件制备整体过程如下: 首先通过湿法腐蚀技术和各向异性感应耦合等离子刻蚀技术制备出悬臂梁图形, 其中臂长为 200  $\mu\text{m}$ 、宽为 18  $\mu\text{m}$ 、厚为 3  $\mu\text{m}$ , 随后溅射 360 nm 的 Ti/Au 层, 形成电

极接触层,利用 HCl 各向异性选择腐蚀  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层,从而形成三个电极接触结构<sup>[19]</sup>,最后,将腐蚀后的样品放入去离子水中清洗,再通过甲醇溶液浸泡、氮气吹干得到释放 MEMS 悬臂梁结构后的完整器件。

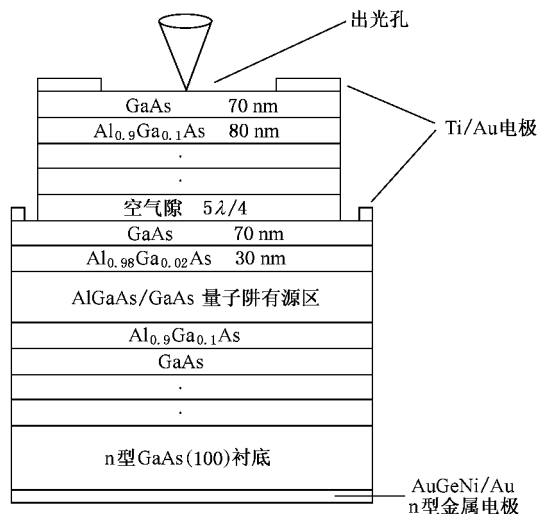


图 4 可调谐 VCSELs 的整体结构图

对于具有相同有源区设计结构的器件,不同的顶镜反射率会影响到有源区内电场能量分布,从而改变激光器的激射效率。与此同时,如果有源区内电场能量增加,在顶镜内分布的电场能量就会减少,从而降低顶镜对波长变化的调谐效率。因此,针对有源区和顶镜结构的优化还有待进一步的设计和研究,以实现高的激射效率和调谐效率及功率边模抑制比。图 5 为可调谐 VCSELs 的调谐反射谱,通过改变空气隙厚度(即从  $1.25\lambda$  到  $0.95\lambda$ ),我们发现对应于反射谱带宽内窄的谱线凹陷处的激射波长峰值位置发生了很大变化,波长变化范围  $\Delta\lambda = 32 \text{ nm}$ ,空气隙变化范围  $\Delta L_{\text{gap}} = 0.3\lambda$ ,调谐效率  $\Delta\lambda/\Delta L_{\text{gap}} = 0.12$ 。同时从图

5 相应的增益曲线可以看出,整个调谐过程中的峰值波长都处在增益较高的区域内,这保证了器件在调谐过程中具有良好的激光输出特性。

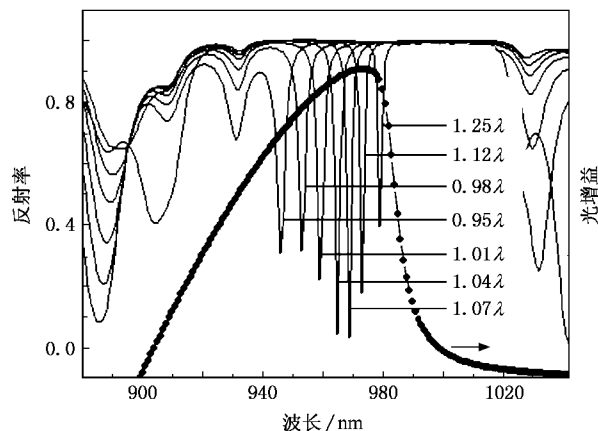


图 5 可调谐 VCSELs 的调谐反射谱及光增益曲线

## 4. 结 论

波长可调谐 VCSELs 的设计和制备,应综合考虑影响波长调谐范围的光学、力学及制备工艺等方面因素。根据本文的分析和实验结果对比,我们认为:首先,应当确定激光器本身波长调谐的范围,并依此得到相应空气隙的变化范围。其次,建立有限元力电耦合模型,设计与波长调谐范围相匹配的牺牲层厚度和 MEMS 悬臂梁尺寸,确定下拉电压和最大位移。同时还应考虑制备加工工艺等因素的影响,从而整体设计 VCSELs 的器件结构。以  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  材料作为牺牲层,厚度为  $5\lambda/4$ ,利用 HCl 腐蚀溶液、室温各向异性选择腐蚀  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层得到可调谐 VCSELs 器件。采用静电力方式进行激励调谐,改变空气隙厚度(从  $1.25\lambda$  到  $0.95\lambda$ ),计算结果表明调谐范围达到  $32 \text{ nm}$ ,调谐效率达到  $0.12$ 。

- [1] Maute M, Kögel B, Böhm G, Meissner P, Amann M C 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 688
- [2] Levallois C, Verbrugge V, Dupont L, Tocnaye J L, Caillaud B, Corre A L, Dehaese O, Folliot H, Loualiche S 2006 *Proc. SPIE* **6185** 61850
- [3] Suzuki H, Fujiwara M, Iwatsuki K 2006 *J. Lightw. Technol.* **24** 1998
- [4] Sun D C, Fan W J, Kner P, et al, Kageyama T, Zhang D X, Pathak R, Nabiev R F, Yuen J W 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 714

- [5] Serkland D K, Peake G M, Geib K M, Lutwak R, Garvey R M, Varghese M, Mecher M 2006 *Proc. SPIE* **6132** 613208
- [6] Fitzgerald R 2003 *Phys. Today* **56** 21
- [7] Cassettari D, Arimondo E, Verkerk P 1998 *Opt. Lett.* **23** 1135
- [8] Chang-Hasnain C J 2000 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **6** 978
- [9] Yokouchi N, Koren U, Uchida T, Inaba Y, Koyama F, Iga K 1992 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **4** 701

[ 10 ] Vakhshoori D , Tayebati P , Lu C C , Azimi M , Wang P , Zhou J H , Canoglu E 1999 *Electron . Lett .* **35** 900

[ 11 ] Kner P , Kageyama T , Boucart J , Stone R , Sun D , Nabiev R F , Pathak R , Yuen W 2003 *IEEE Photon . Technol . Lett .* **15** 1183

[ 12 ] Li M Y , Yuen W , Li G S , Chang-Hasnain C J 1998 *IEEE Photon . Technol . Lett .* **10** 18

[ 13 ] Vail E C , Li G S , Yuen W , Chang-Hasnain C J 1997 *IEEE J . Select . Topics Quantum Electron .* **3** 691

[ 14 ] Macleod H A 1986 *Thin Film Optical Filters* ( Bristol , Philadelphia : Institute of Physics ) p179

[ 15 ] Liu C , Ge J H , Chen J 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 5211 ( in Chinese )[ 刘 崇、葛剑虹、陈 军 2006 物理学报 **55** 5211 ]

[ 16 ] Chen M , Guo X , Guan B L , Deng J , Dong L M , Shen G D 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 5842 ( in Chinese )[ 陈 敏、郭 霞、关宝璐、邓 军、董立闽、沈光地 2006 物理学报 **55** 5842 ]

[ 17 ] Lin C C , Martin W A , Harris J S 2002 *IEEE J . Select . Topics Quantum Electron .* **8** 80

[ 18 ] Chuang W H , Lugar T , Fetting R K , Ghodssi R 2004 *J . Microelectromech . Sys .* **13** 870

[ 19 ] Guan B L , Guo X , Deng J , Qu H W , Lian P , Dong L M , Chen M , Shen G D 2006 *Chin . Phys .* **15** 2959

# Investigation and design of widely tunable vertical-cavity surface emitting lasers<sup>\*</sup>

Guan Bao-Lu   Guo Xia<sup>†</sup>   Yang Hao   Liang Ting   Gu Xiao-Ling   Guo Jing   Deng Jun   Gao Guo   Shen Guang-Di  
( Beijing Optoelectronic Technology Laboratory , Institute of Electronic Information and Control Engineering ,  
Beijing University of Technology , Beijing 100022 , China )  
( Received 7 December 2006 ; revised manuscript received 29 March 2007 )

## Abstract

The tuning characteristics of widely tunable wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers ( VCSELs ) have been investigated based on transfer matrix model and finite-element structure-electric coupled-field analysis model and experiment , in which the electrostatic tuning of wavelength and microelectronic mechanical system ( MEMS ) cantilever of the tunable VCSELs with central wavelength 980 nm were designed . The analysis shows that the characteristics of wavelength tuning of VCSELs will be affected by the maximal displacement of cantilever and the structure of wavelength resonator . The tuning range can be improved based on the optimization of sacrificial layer for a given geometry of cantilever and active region of the device . In this paper , the structure of tunable VCSEL is designed . Further numerical simulations show that a continuous tuning range up to 32 nm is obtainable , tuning efficiency is 0.12 , and the whole tuning range of wavelength lies within the high gain region of the InGaAs quantum wells with GaAs barrier .

**Keywords :** cantilever , tunable vertical cavity surface emitting lasers

**PACC :** 4255P , 4280K , 6480G

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 60506012 ) , the State Key Development Program for Basic Research of China ( Grant No. 2006CB604902 ) , the Fok Ying-Tong Education Foundation , China ( Grant No. 101062 ) , the Science and Technology Nova Program of Beijing , China ( Grant No. 2005A11 ) , the Program for Academic Human Resources Development in Institutions of Higher Learning Under the Jurisdiction of Beijing , China ( Grant No. 20051D0501502 ) , the Natural Science Foundation of Beijing , China ( Grant No. KZ200510005003 ) , the Foundation for Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China ( Grant No. 200542 ) and the National High Technology Development Program of China ( Grant No. 2006AA03A121 ) .

<sup>†</sup> E-mail : guo@bjut.edu.cn