

# 具有宽调谐范围的微纳光机电系统可调谐垂直腔面发射激光器研究\*

关宝璐 张敬兰 任秀娟 郭帅 李硕 揣东旭 郭霞† 沈光地

(北京工业大学, 光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124)

(2010年4月12日收到; 2010年5月5日收到修改稿)

基于微纳机械技术设计得到了可调谐垂直腔面发射激光器结构, 将具有  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层结构的 DBR 反射镜制备成微纳光机电系统, 并与多量子阱有源区光纵向耦合结构相结合. 其中, 微纳光机电 DBR 结构不再是简单的分布布拉格反射镜, 而是对光波具有高调制作用的微纳机械反射镜系统, 并在静电力作用下可以动态调谐 VCSEL 谐振腔的激射波长. 实验结果显示, 当激光器调谐电压从 0 V 增加到 7 V 时, 对应激射波长将从 968.8 nm 蓝移到 950 nm, 整个调谐范围达到了 18.8 nm, 可调谐 VCSEL 器件表现出了优异的激光特性, 并实现了波长连续可调.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器, 微纳光机械, 波长可调谐

**PACS:** 42.55.Px, 42.60.Fc, 47.61.Fg

## 1. 引言

随着光网络处理信息量的不断增加和高密度光通信技术的不断提高, 可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 已成为未来光通信中的重要光源, 并广泛应用在局域互联网光通信的多模光纤传输中和城域互联网的单模光纤通信中<sup>[1-3]</sup>. 可调谐 VCSEL 的优点包括易于光纤耦合、封装测试简单及易于大规模集成阵列制备等, 并且 VCSEL 本质的单纵模激射特性非常适合激光波长调谐控制<sup>[4,5]</sup>. 因此, 频率可调、高功率、单纵模和单横模控制可调谐 VCSEL 光源将在高密度信息光通信、原子钟、传感、气体探测、光谱分析和生物医学等高科技领域有着重要的应用<sup>[6]</sup>.

本文采用新型悬臂梁式可调谐垂直腔面发射激光器结构. 将具有  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层结构的 DBR 反射镜制备成微纳光机电系统 (micro-nano-optical machine system, MEMS), 并与多量子阱有源区光纵向耦合结构相结合<sup>[7,8]</sup>, 有效提高 VCSEL 耦合效率、实现单模输出、光波可调控. 其中, MEMS

结构不再是简单的分布布拉格反射镜, 而是对光波具有高调制作用的微纳反射镜系统, 并在静电力作用下可以动态调谐 VCSEL 纵向光腔长度, 进而改变谐振腔的共振波长, 使单个 VCSEL 芯片实现多个波长输出, 大大扩展了 VCSEL 的物理功能和应用领域. 实验结果显示, MEMS 结构调谐电压从 0 V 增加到 7 V 时, 对应激射波长从 968.8 nm 蓝移到 950 nm, 波长调谐范围达到了 18.8 nm. 整个调谐过程中, 可调谐 VCSEL 器件表现出了优异的激光特性. 所设计的基于 MEMS 结构的可调谐 VCSEL 具有结构简单、集成度高、波长调谐范围大等特点. 为实现高功率、宽波长调谐范围, 稳定控制激光模式的下一代高效率 VCSEL 半导体发光光源提供了很好的实验和理论基础.

## 2. MEMS 可调谐 VCSEL 器件结构

图 1(a), (b) 为可调谐 VCSEL 剖面 SEM 图. 整个结构是利用金属有机化学气相沉积系统 (MOCVD) 生长得到. 以 980 nm 为中心波长, 在 n 型 GaAs 衬底上生长薄膜结构, 从下往上依次为 400

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2006CB604902), 国家自然科学基金 (批准号: 60908012) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: guo@bjut.edu.cn

nm GaAs 缓冲层;26 对 n 型 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 下 DBR;光学长度为 λ 的半导体腔,具体为 Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 上、下限制层中间生长三个 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As/GaAs 应变量子阱,阱层 In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As 和垒层 GaAs 的厚度分别为 8 nm 和 10 nm、厚度为 60 nm 的 Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As 氧化限制层,1 对 p 型 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As DBR,P<sup>++</sup>GaAs 欧姆接触层;Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 作为外延结构的牺牲层;19.5 对 n 型 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 上 DBR. 利用感应耦合等离子 (ICP) 干法刻蚀技术制作桥型悬臂,悬臂总长 240 μm,宽 26 μm,厚度 3 μm;悬臂出

光孔处为边长 40 μm 的正方形. 利用 HCl 对牺牲层 Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 和 GaAs 的选择性腐蚀,将 Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 除去,分别经过去离子水和无水乙醇浸泡后,使用干冰清洗设备对器件做干燥处理,实现悬臂释放<sup>[9]</sup>. 上 DBR 反射镜的调谐电极和 p 型注入电极都为 Ti/Au,厚度为 350 nm,器件制备过程中,两个电极经过一次光刻、同时完成,调谐电压加在两者之间,改变电压大小,调节空气层厚度,实现波长调谐;n 型电极为 AuGeNi/Au,厚度为 300 nm.

如图 1 (b) 所示,Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 牺牲层厚度设计

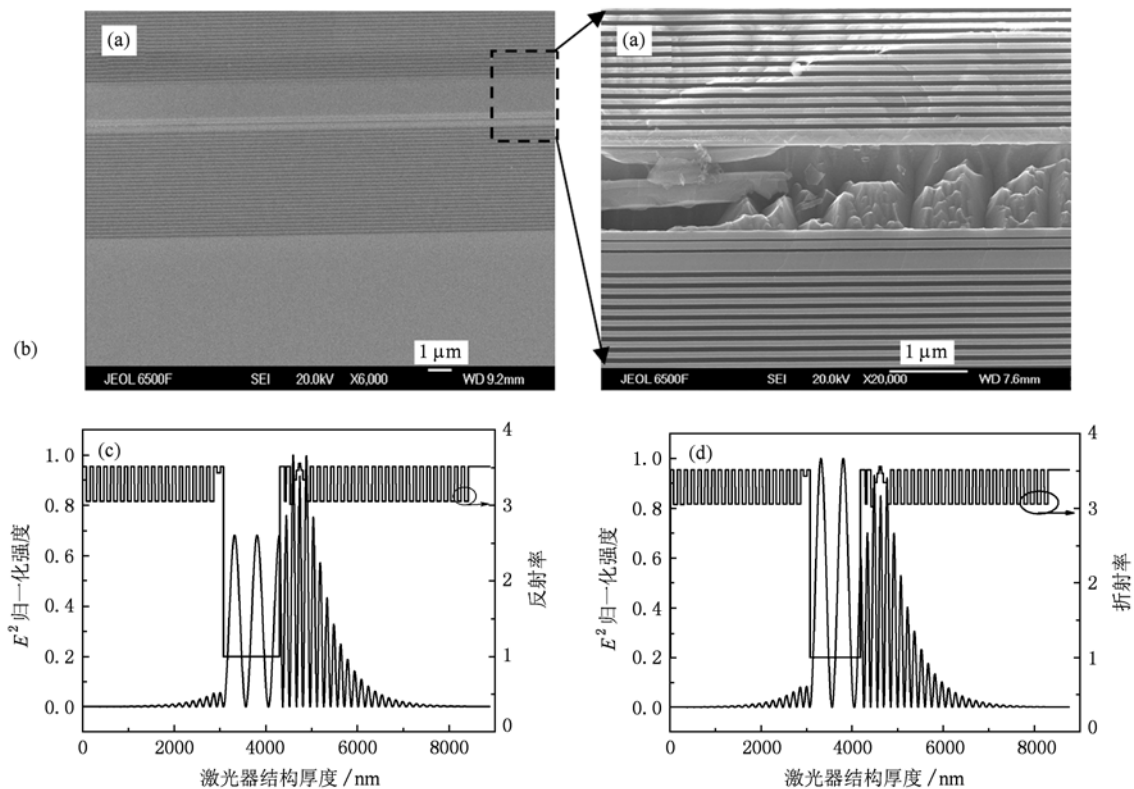


图 1 (a)为可调谐 VCSEL 剖面 SEM 图;(b)为 Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 牺牲层局部放大 SEM 图;(c)为 Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 牺牲层腐蚀后,空气隙初始厚度为 1225 nm 时,激光器内部光场能量分布情况;(d)为在静电力作用下,空气隙减小为 1084 nm 时,光场能量分布情况

为 1225 nm,为了进一步掌握牺牲层腐蚀后, MEMS 结构对 VCSEL 内部光子传输的调制作用,本文对可调谐 VCSEL 内部电磁波  $E(z)$  的分布进行研究,并利用传输矩阵方法模拟计算光波形成的驻波电磁场能量  $|E(z)|^2$  在具有空气隙的 MEMS 结构和 VCSEL 中的分布,如图 1 (c), (d) 所示,其中图 1 (c) 为空气隙厚度 1225 nm 时的驻波场分布情况,图 1 (d) 为施加调谐电压后,空气隙厚度 1084 nm 时的驻波场分布情况. 虽然 MEMS 结构对 VCSEL 整体

反射率影响很小,同样可以形成高反射带宽,但是,从图 1 (c), (d) 中可以看出, MEMS 结构对特定波长所形成的驻波电磁场能量分布具有很大调制作用. 由于激光器谐振腔内稳定的驻波电磁场与谐振腔共振波长具有对应关系<sup>[10]</sup>,因此,谐振腔内部电磁场能量的分布变化,可以有效反映腔内共振波长变化. 也就是说,相比于 VCSEL 结构所设计的中心波长,由于 MEMS 结构的变化在谐振腔中引入了新的稳定驻波场分布,并在谐振腔中实现新的共振波

长.此外,由于 MEMS 结构对 VCSEL 内部光场能量的调制,使得不同共振波长在有源区的限制因子也发生相应的变化,并随 MEMS 空气隙厚度的不同而成周期性变化.

### 3. 实验结果与分析

图 2 为可调谐 VCSEL 的调谐光谱图.纵坐标相对光强已经归一化,当调谐电压从 0 V 变化到 7 V 时,对应激射波长从 968.8 nm 蓝移到了 950 nm,整个调谐范围达到 18.8 nm,实现了波长连续可调.波长调谐过程中,光谱半高宽(FMHW)从 0.8 nm 到 4 nm,在调谐电压为 4 V 时,958 nm 波长的 FMHW 值是 4 nm,为整个波长调谐过程中的最大值;调谐电压为 3 V 时,对应 961.7 nm 波长的 FMHW 值是 1.2 nm.由实验结果可得所设计的可调谐 VCSEL 最高  $Q$  值达到了 1211,对应激射波长 968.8 nm.调谐过程中最低  $Q$  值为 239.5,对应激射波长为 958 nm.从图 2 中可以看出,在调谐过程中激光器的 FWHM 是波动变化,这是由于光谱半宽反映了激光器品质因子  $Q$ ,而激光器  $Q$  值与谐振器反射率直接相关<sup>[11]</sup>.对于可调谐 VCSEL,在调谐过程中,激射波长逐渐偏离中心波长,光子在激光器内的吸收损耗会逐渐增加,且随空气隙厚度的减少, MEMS 系统反射率也会降低.模拟计算显示反射率变化范围高达 2%,而对于普通 VCSEL 中 DBR 结构在整个调谐过程的反射率变化范围小于 2‰.此外,在激光器阈值以上,自发辐射光子数基本保持不变<sup>[11]</sup>,但空气隙的厚度对激光器的微腔效应的影响,使进入受激辐射的光子数减小,由于受激光子数与光输出功率成正比,因此光输出功率的波动变化也是促使激光器 FWHM 变化的一个原因.因此,为了使激光器  $Q$  值稳定,并得到更小的光谱半宽,必须优化结构生长和制备,减小吸收损耗和端面散射损耗,以增加激光的输出耦合效率;其次改善增益半宽和谐振波长的匹配、优化设计谐振腔结构,最终实现更高稳定  $Q$  值的调谐光谱输出.

图 3 是室温测量得到的可调谐 VCSEL 输出功率和电压随电流变化关系曲线,注入电流为 25 mA,氧化孔径为 32  $\mu\text{m}$ .从图 3 中可以看出,25 mA 下可调谐 VCSEL 最高输出光功率为 281  $\mu\text{W}$ ,阈值电流为 15 mA,对应激射波长为 968.8 nm.与常规 VCSEL 器件阈值电流相比,可调谐 VCSEL 的阈值

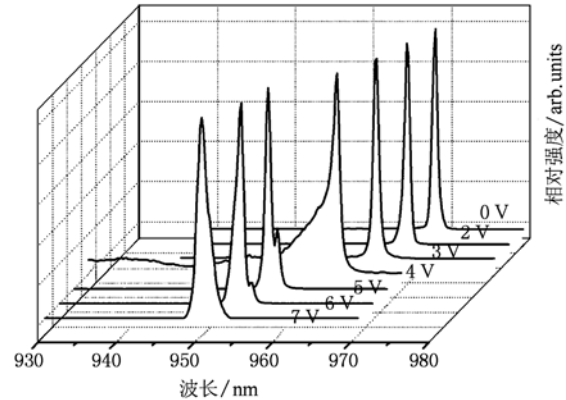


图 2 可调谐 VCSEL 的调谐光谱图(当调谐电压增加到 7 V 时,对应激射波长从 968.8 nm 蓝移到了 950 nm,整个调谐范围达到 18.8 nm.整个调谐范围内波长连续可调)

电流有所增加,这是由于 MEMS 系统空气隙对器件内部光场能量光场能量的调制作用,减少了光场能量在有源区内的限制作用,并使光增益减小,如图 1 所示.其次,相比于小氧化孔径 VCSEL 器件,大氧化孔径对注入载流子的限制能力减弱.并增加了有源区体积,从而增加了激光器的阈值增益<sup>[13]</sup>.此外,在  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层腐蚀后,在器件中形成的半导体-空气界面会使经过的光波据有一定的散射损耗,从而也会促使激光器阈值增益增加.在  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层未腐蚀前,散射损耗会减小,相应的阈值增益也会减小,如图 3 中虚线所示,在 25 mA 电流下,阈值电流减小为 6.7 mA,激光器光功率增加为 718  $\mu\text{W}$ .

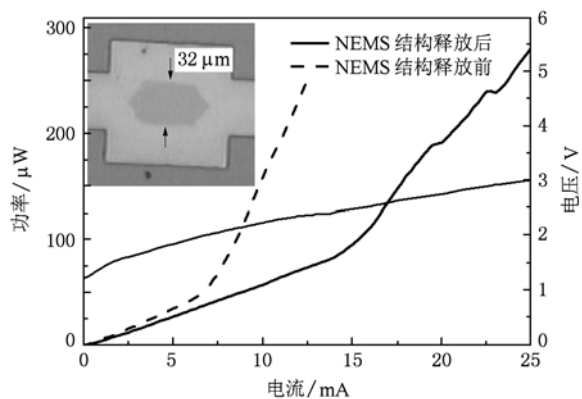


图 3 可调谐 VCSEL 输出功率和电压随电流变化关系曲线(实线为牺牲层腐蚀后,室温下,光输出功率变化曲线,注入电流为 25 mA 时,最大输出为 281  $\mu\text{W}$ ,阈值电流为 15 mA.虚线为未腐蚀牺牲层时,测量得到的光输出功率变化曲线,最大输出功率 718  $\mu\text{W}$ .氧化孔径为 32  $\mu\text{m}$ )

## 4. 结 论

本文将 MEMS 技术和 VCSEL 激光器技术相结合,利用半导体微细加工工艺制备了 MEMS 桥式可调谐 VCSEL 器件.在 25 mA 注入电流下,当调谐电压增加为 7 V 时,对应激射波长从 968.8 nm 蓝移到了 950 nm,整个调谐范围达到 18.8 nm,实现了波长

连续可调.波长调谐过程中,光谱 FMHW 变化范围为 0.8 nm 至 4 nm,最大光输出功率为 281  $\mu$ W.所设计的基于 MEMS 结构的可调谐 VCSEL 具有结构简单、集成度高、波长调谐范围大等特点.为实现高功率、宽波长调谐范围,稳定控制激光模式的下一代高效率 VCSEL 半导体发光光源提供了很好的实验和理论基础.

- [1] Chang-Hasnain C J 2000 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **6** 978
- [2] Michael C, Zhou Y, Chang-Hasnain C J 2007 *Nature Photonics* **1** 119
- [3] Andrew A, Mario P 2007 *Nature Photonics* **1** 153
- [4] Iga K 2000 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **6** 1201
- [5] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1821
- [6] Maute G M, Lambkin V, Slattery J D, Justice S A, Hegarty J P, Huyet S P, Corbett G 2008 *IEEE Lasers and Electro-Optics Society (LEOS) Annual Meeting* **9** 498
- [7] 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
- [8] Guo X, Shen G D 2008 *Chin. Phys. B* **17** 307
- [9] Guan B L, Guo X, Liang T, Gu X L, Deng J, Guo J, Yang H, Lin Q M, Shen G D 2006 *Journal of Applied Physics* **100** 113508
- [10] Kyungwon A, Michael S F 1995 *Phys. Rev. A* **52** 1691
- [11] Hunt N E J, Schubert E F, Logan R A, Zyzdik G J 1992 *Appl. Phys. Lett.* **61** 2287
- [12] Kressel H, Lockwood H F, Nicoll F H, Ettenberg M 1973 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **9** 383
- [13] Hayashi Y, Mukaiharu T, Hatori N, Ohnoki N, Matsutani A, Koyama F, Iga K 1995 *IEEE Photonics Technology Letters* **7** 1234

## Micro-nano-optical machine system tunable wavelength vertical cavity surface emitting lasers with wide tunable range\*

Guan Bao-Lu Zhang Jing-Lan Ren Xiu-Juan Guo Shuai Li Shuo Chuai Dong-Xu Guo Xia<sup>†</sup> Shen Guang-Di  
(Key Laboratory of Opto-electronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(Received 12 April 2010; revised manuscript received 5 May 2010)

### Abstract

The structure of tunable vertical cavity surface emitting laser is obtained based on the micro-nano-mechanical technology. The DBR reflector with  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  sacrificial layer consisted the micro-nano reflector system, which combines with the multi-well active region coupled structure. In addition, the structure of micro-nano-optical machine system is not only the DBR reflector, but also serves to tune the wavelength of lasing by the electrostatic force. Good laser characteristics are obtained with continuous tuning ranges over 18.8 nm near 968.8 to 950 nm for 0—7 V tuning bias.

**Keywords:** vertical cavity surface emitting lasers, micro-nano-optical machine system, tunable wavelength

**PACS:** 42.55.Px, 42.60.Fc, 47.61.Fg

\* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2006CB604902), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60908012).

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