

文章编号: 0258-7025(2008)02-0245-04

# 可调谐微腔发光二极管微光机电系统悬臂梁的特性

关宝璐 郭霞 顾晓玲 杨浩 邓军 高国 沈光地

(北京工业大学电子信息与控制工程学院,北京市光电子实验室,北京 100022)

**摘要** 采用微机械表面加工技术,成功设计并研制出具有 GaAs 基微光机电系统(MOEMS)悬臂梁结构的可调谐微腔发光二极管。对其工作特性进行了分析,测量得到悬臂梁载荷-位移关系曲线,并对微光机电系统悬臂梁可调谐微腔发光二极管进行调谐光谱测量。实验结果表明,在直流电流 40 mA,调谐电压范围 4~22 V 时,波长从 974.5 nm 蓝移至 956.9 nm,室温下波长调谐最大达到 17.6 nm。在实验基础上,采用有限元方法对具有分布布拉格反射镜(DBR)结构的悬臂梁动力学特性进行了研究,模拟结果与实验结果吻合较好。当悬臂梁长度为 400  $\mu\text{m}$  时,最大位移达到 411 nm,最大调谐电压达到 24 V。

**关键词** 光学器件;可调谐微腔光子器件;微光机电系统;悬臂梁;有限元

**中图分类号** TN 312.8 **文献标识码** A

## Characteristic of Micro-Opto-Electro-Mechanical System-Cantilever of Tunable Micro-Cavity Light Emitting Diodes

Guan Baolu Guo Xia Gu Xiaoling Yang Hao

Deng Jun Gao Guo Shen Guangdi

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Institute of Electronic Information & Control Engineering,  
Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**Abstract** An GaAs-based micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS) cantilever tunable light emitting diode was presented. It is fabricated by standard surface micromachining technology. The relation of cantilever loading and displacement was measured, and the tunable spectrum of this cantilever tunable light emitting diode was also measured. When the current is 40 mA and applied voltage is from 4 V to 22 V, the wavelength is tuned from 974.5 nm to 956.9 nm and a wide tuning range of 17.6 nm was achieved under the room temperature. The optical and mechanical characters of the cantilever with distributed Bragg reflector (DBR) multiple layers in detail were studied by the finite element method. Further numerical simulations with MOEMS-cantilever show when the length of cantilever is 400  $\mu\text{m}$ , the max-displacement of center of cantilever is 411 nm, and max-voltage is 24 V.

**Key words** optical devices; tunable micro-cavity photon device; micro-opto-electro-mechanical system; cantilever; finite element approach

## 1 引 言

微光机电系统(MOEMS)悬臂梁<sup>[1~3]</sup>既具有微小运动的机械特性,又具有光电子器件所需的光学功能。当其与半导体等固体器件相结合时,不仅可

在多种情况下显著提高传统器件性能,且可实现具有新功能的光电子器件,已被广泛地应用在光开关、探测器、光谱分析、可调谐滤波器和可调谐激光器等方面<sup>[4~6]</sup>,将有力促进光通信技术领域的发展。波

收稿日期:2007-06-26;收到修改稿日期:2007-09-17

基金项目:国家自然科学基金(60506012),国家重点基础研究发展规划(2006CB604902),霍英东教育基金(101062),北京科技新星计划(2005A11),北京市优秀人才强教计划(20051D0501502),北京市自然科学基金(KZ200510005003),全国优秀博士学位论文专项资金(200542)和国家高技术研究发展计划(2006AA03A121)资助项目。

作者简介:关宝璐(1980—),男,辽宁人,博士研究生,主要从事半导体可调谐光电器件研究。

E-mail:guanbaolu@emails.bjut.edu.cn

导师简介:沈光地(1939—),男,湖南人,教授,主要从事半导体器件研究。E-mail:gdshen@bjut.edu.cn

长可调谐微腔发光二极管是利用微光机电系统悬臂梁作为可动分布布拉格反射镜(DBR)来实现波长调谐的新型光电子器件。当其悬臂梁受静电力机械调谐时,空气隙将逐渐减小,进而导致谐振腔有效腔长的减小。由发射波长与有效腔长关系可知,当有效腔长减小时,发射波长也会相应地变化,从而实现波长调谐功能。可调谐光子器件波长变化的实质是微机械系统的控制<sup>[7,8]</sup>,因此,微光机电系统悬臂梁系统的特性,如下拉电压、载荷-位移关系、响应速度等均与可调谐光子器件的调谐性能紧密相关。

本文研究了微光机电系统悬臂梁光学特性,制备出具有 GaAs 基微光机电系统悬臂梁结构的可调谐微腔发光二极管。进而给出其悬臂梁载荷-位移和波长调谐特性。基于 ANSYS 软件建立悬臂梁有限元模型,对具有分布布拉格反射镜结构的微光机电系统悬臂梁的动力学特性进行实验和模拟对比分析,为高性能可调谐微腔光子器件的设计和制备提供新的方法。

## 2 微光机电系统悬臂梁及器件制备

微光机电系统悬臂梁不同于普通悬臂梁,具有分布布拉格反射镜结构的光学特性。分布布拉格反射镜结构由不同材料的两层薄膜按一定周期重复排列构成。当增加薄膜对数和相邻薄膜层的折射率差时,可以大大提高分布布拉格反射镜的反射率和反射半宽。图 1 是在不考虑传播过程中光子吸收情况下,普通 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 分布布拉格反射镜结构、带有空气隙的 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 分布布拉格反射镜结构和带有空气隙的 SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 介质材料分布布拉格反射镜结构在不同对数下反射率的比较。可以看出,空气隙分布布拉格反射镜结构的空气层折射率( $n_{\text{air}} = 1$ )与相邻层折射率( $n_{\text{GaAs}} = 3.5$ )

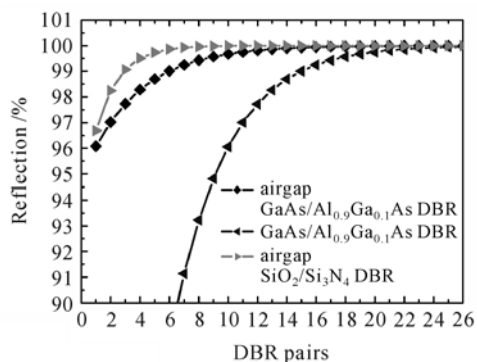


图 1 分布布拉格反射镜对数与反射率的变化曲线  
Fig. 1 Reflection plotted against DBR pairs

相差 2.5, 分布布拉格反射镜增至 12 对时将达到 99.8%。SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 介质材料自身折射率差比较大,增加空气隙后整体反射率进一步提高,在图 1 中 5 对 SiO<sub>2</sub>/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 结构的反射率就已达到 99.8%。而对于普通分布布拉格反射镜结构,当 GaAs/Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As 对数增加到 21 对时,其最大反射率才达到 99.8%。可以看出,分布布拉格反射镜在很少对数的情况下,采用带有空气隙的微光机电系统悬臂梁结构即已满足器件对反射率的要求。而悬臂梁厚度的减少,将大大降低微光机电系统悬臂梁的调谐电压。

可调谐微腔发光二极管的微光机电系统悬臂梁结构是利用 EMCORED125 型金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备外延生长得到的,如图 2 所示。首先,生长 23.5 对 Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As/GaAs 底分布布拉格反射镜,然后在一个  $\lambda$  厚度的有源区内,生长 3 个 8 nm 的井层,4 个 10 nm 的垒层和过渡层。同时,在氧化限制层 Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As 上生长 p 型层。它包括两对 Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As/GaAs 层。随后生长 P 型掺杂的 GaAs 欧姆接触层和本征的 Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As 牺牲层,顶部 n 型分布布拉格反射镜由 19.5 对 Al<sub>0.9</sub>Ga<sub>0.1</sub>As/GaAs 层组成,中心波长设计为 980 nm<sup>[9]</sup>。器件整体制备过程如下:1) 在原片上通过湿法腐蚀技术制备悬臂梁图形,悬臂梁长、宽、高分别为 400  $\mu\text{m}$ , 18  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ ; 2) 采用各向异性感应耦合等离子刻蚀(ICP)技术制备出外围氧化台面结构,以防止湿法腐蚀对牺牲层的钻蚀影响; 3) 在 450  $^{\circ}\text{C}$  高温环境下进行湿法氧化 Al<sub>0.98</sub>Ga<sub>0.02</sub>As 层,形成电流氧化限制孔径,氧化时间为 40 min,孔径大小为 10  $\mu\text{m}$ ; 4) 低压等离子体化学气相沉积(LPECVD)制备 600 nm 厚度的 SiO<sub>2</sub> 保护层,淀积温度控制在 300  $^{\circ}\text{C}$ 。同时湿法腐蚀欧姆接触层处 SiO<sub>2</sub>; 5) 高温溅射 360 nm Ti/Au 层,得到调谐电极和器件注入电极; 6) 衬底减薄至 150  $\mu\text{m}$ ,背面蒸 AuGeNiAu,形成

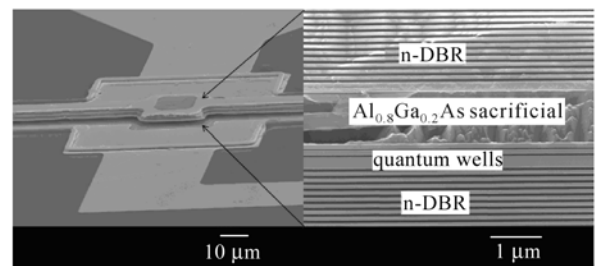


图 2 微光机电系统悬臂梁整体结构及其材料生长侧面扫描电镜图

Fig. 2 Scanning electron micrographs of the finished MOEMS cantilever

n 型电极层,并在 450 °C,氮气环境里快速退火 45 s,进行合金处理。7) 在室温下利用体积分数为 30% 的 HCl 溶液各向异性选择腐蚀  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  牺牲层,样品腐蚀后放入去离子水中清洗,最后通过甲醇溶液浸泡、氮气吹干得到释放微光机电系统悬臂梁结构后的完整器件<sup>[10]</sup>。

### 3 实验结果与讨论

微光机电系统悬臂梁动态特性是以平均相等时间间隔的干涉技术来定量测量的,即通过电路驱动显微镜上的参考镜产生次波长量级的光程变化,得到相同时间序列上五幅悬臂梁的干涉图像,然后由干涉图像的光强信息解算出悬臂梁表面的相位值,最后通过计算得到悬臂梁表面真实的相位信息和相应高度,得到悬臂梁的位移信息<sup>[11]</sup>。图 3 为采用上述五步相移干涉法测量得到的零偏电压下微光机电系统悬臂梁三维图像。悬臂梁基座的基本平面高度为 300 nm,末端平面高度为 525 nm,悬臂梁中心弯曲的相对高度为 225 nm。考虑悬臂梁的对称性,仅取其一半进行测量分析。在零偏压下,可以从悬臂梁的静态三维图像中看出,悬臂梁已经向上弯曲。这是由于悬臂梁本身是多层结构,且薄膜生长和淀积过程中由于晶格匹配等原因会产生残余应力。当悬臂梁释放时,不均匀的残余应力会导致悬臂梁发生弯曲,并改变梁的调谐特性。

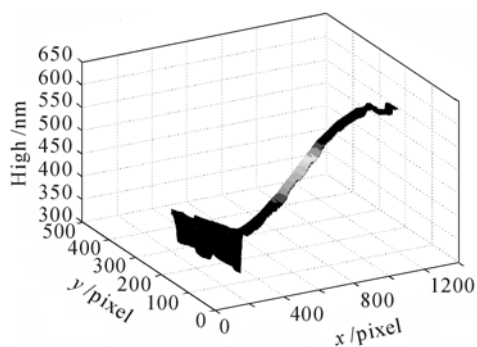


图 3 微光机电系统悬臂梁三维图像

Fig. 3 MOEMS cantilever three-dimensional micrograph

从图 3 中还可看出,零偏压下悬臂梁中心部分已翘起 200 nm。采用光学传输矩阵方法对调谐过程中波长响应特性进行了计算<sup>[12]</sup>,结果显示空气隙厚度增加 200 nm 时,谐振腔中心波长将会红移 14 nm。而对于微腔光子器件有源区增益曲线,其红移方向光增益成直线下降,因此这个厚度偏差已经使器件无法正常出光。即使在静电力的驱动下悬臂梁渐渐靠近或达到设计高度,使器件正常发光及波长调谐,

但必须增加偏置电压。从图 4 可以看到,当偏置电压为 13.3 V 时悬臂梁仅位移 100 nm。而在如此高的初始电压下进行波长调谐,更易损坏器件;另外,悬臂梁内已经包含了一定的轴向应力,悬臂梁位移与静电力的关系已经不再是简单的线性关系,需要更大的静电力。所以轴向应力是一个非常不利的因素,应力控制是达到器件预期性能的一个关键技术。

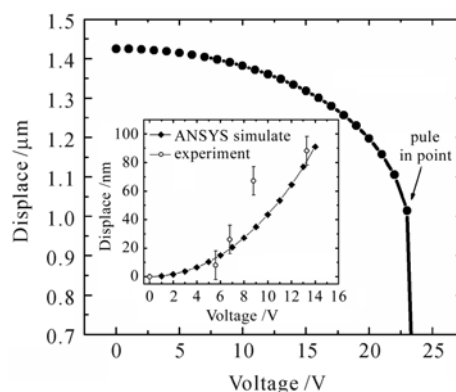


图 4 不同偏置电压下微光机电系统悬臂梁载荷-位移关系曲线

Fig. 4 Displace of cantilever plotted against force voltage

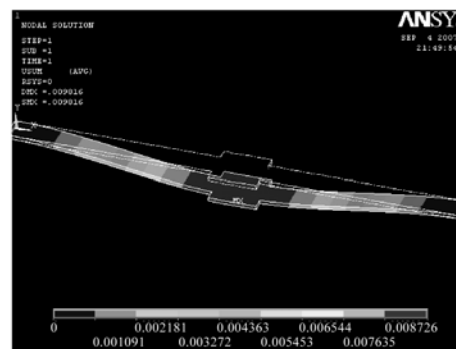


图 5 悬臂梁力电耦合有限元模型

Fig. 5 Force and electricity coupled finite element model

利用有限元方法建立了悬臂梁力电耦合模型,如图 5 所示。图 4 载荷-位移关系曲线反映出悬臂梁调谐过程中的变化趋势和机械特性。同时,从该曲线中得到的悬臂梁最大可调位移又决定了谐振腔波长的调谐范围。当悬臂梁长度为 400  $\mu\text{m}$ ,空气隙厚度为 1.425  $\mu\text{m}$  时,悬臂梁的下拉电压为 24 V,最大位移达到 411 nm。若电压进一步增加,悬臂梁的弹性恢复力将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,最终丧失调谐能力。对比图 4 中插图的测量结果可知,采用干涉法测量的实验结果与计算结果吻合很好,说明悬臂梁模型可以对悬臂梁的动力学特性进行准确的模拟分析。调谐电压在 13 V 以内时悬臂梁的位移变化比较稳定。

而当调谐电压逐步增加时,悬臂梁位移明显呈非线性变化。这是因为当电压较小时,悬臂梁的弹性恢复系数起主要作用,因而悬臂梁的位移呈线性变化;当电压比较大时,悬臂梁的弹性模量将起主要作用,而悬臂梁的位移与弹性模量呈立方关系,因此,末调谐阶段悬臂梁呈非线性变化。

图 6 为微光机电系统悬臂梁调谐光谱测试结果,其中器件直流工作电流 40 mA,调谐电压范围 4~22 V。可以看出,随着调谐电压的逐渐增加,调谐波长从 974.5 nm 蓝移至 956.9 nm,室温下波长调谐最大达到 17.6 nm。波长调谐过程中输出光功率逐渐增加,光谱半宽逐渐减小(波长在 974 nm 时光谱半宽为 10 nm,而在 956 nm 时光谱半宽仅为 3 nm)。这是因为悬臂梁释放后偏离初始位置(如图 3 所示),随着调谐电压的增加,悬臂梁受静电力作用逐渐向下位移,空气隙厚度随之减小,使光子器件微腔效应越来越强,光子模式密度增大。因此在悬臂梁调谐作用下,波长逐渐蓝移的同时,光输出功率和光谱半宽也逐渐改善。在 950 nm 以后又出现了一个光谱峰值,这是由于从有源区中发出的一部分光未经过空气系和悬臂梁,而直接被光探测器探测吸收,并且波长在调谐过程中保持不变。因此,优化器件结构设计,进一步改善微光机电系统悬臂梁的机械特性,减小悬臂梁残余应力的影响,将会降低调谐电压,实现更大范围的波长调谐。

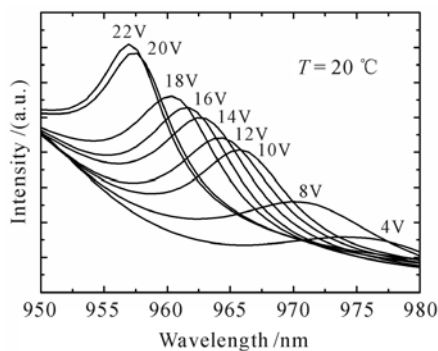


图 6 微共振腔式发光二极管波长调谐特性曲线

Fig. 6 Tuning spectral of micro-cavity light emitting diode is plotted

## 4 结 论

对具有 GaAs 基微光机电系统悬臂梁结构的可调谐微腔发光二极管进行了设计和研究。采用 Tanner L-edit 软件对悬臂梁制备进行版图设计,以标准微机械表面加工工艺制备得到完整悬臂梁结构,并成功研制出可调谐微腔发光二极管。实验结

果表明,在直流电流 40 mA,调谐电压范围 4~22 V 时,波长从 974.5 nm 蓝移至 956.9 nm,室温下波长调谐最大达到 17.6 nm。同时,利用有限元方法建立微光机电系统悬臂梁模型,并对其动力学特性进行研究,模拟结果与实验结果吻合较好。当悬臂梁长度为 400  $\mu\text{m}$  时,其最大位移达到 411 nm,最大调谐电压达到 24 V。

**致谢** 感谢天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室栗大超教授、黄玉波博士在器件测量方面给予的热情帮助和有益讨论。

## 参 考 文 献

- 1 Markus Maute, Benjamin Kögel, Gerhard Böhm *et al.*. MEMS tunable 1.55  $\mu\text{m}$  VCSEL with extended tuning range incorporating a buried tunnel junction [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(5):688~690
- 2 Connie J. Chang-Hasnain. Tunable VCSEL [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(6):978~987
- 3 C. Levallois, V. Verbrugge, L. Dupont *et al.*. 1.55  $\mu\text{m}$  optically pumped tunable VCSEL based on a nano polymer dispersive liquid crystal phase modulator [C]. *SPIE*, 2006, **6185**:61850W-1~61850W-9
- 4 Hiro Suzuki, Masamichi Fujiwara, Katsumi Iwatsuki. Application of super DWDM technologies to terrestrial terabit transmission systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(5):1998~2005
- 5 Decai Sun, Wenjun Fan, Peter Kner *et al.*. Long wavelength-tunable VCSELS with optimized MEMS bridge tuning structure [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(3):714~716
- 6 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1552~1556  
陈东,刘文清,张玉钧等. 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1552~1556
- 7 Yuhua Zuo Changjun Huang, Buwen Cheng *et al.*. 1.55- $\mu\text{m}$  Si-based MOEMS optical tunable filter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9):529~531
- 8 Shen Weidong, Zhu Yong, Huang Biqin *et al.*. Analysis of the micro-optical electromechanical system filter's tunable property [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8):1125~1129  
沈伟东,朱勇,黄弼勤等. 微光机电系统滤波器可调谐特性分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8):1125~1129
- 9 Guan Baolu, Guo Xia, Deng Jun *et al.*. Micromechanical tunable vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese Physics*, 2006, **15**(12):2959~2962
- 10 Baolu Guan, Xia Guo, Ting Liang *et al.*. Sacrificial AlGaAs etching for microstructures in integrated optoelectronic devices [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **100**(11):113508-1~113508-4
- 11 Huang Yubo, Li Dachao, Hu Xiaotang *et al.*. A phase unwrapping method based on template in MEMS/NEMS 3-D surface profile measurement [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, **19**(5):1488~1492  
黄玉波,栗大超,胡小唐等. MEMS/NEMS 表面 3D 轮廓测量中基于模板的相位解包裹方法[J]. *传感技术学报*, 2006, **19**(5):1488~1492
- 12 Guan Baolu, Guo Xia, Yang Hao *et al.*. Investigation and design of widely tunable vertical-cavity surface emitting lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8):4585~4589  
关宝路,郭霞,杨浩等. 宽调谐范围垂直腔面发射激光器特性分析与设计[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8):4585~4589