

## 可调谐 VCSEL 的低应力 MEMS 悬臂结构设计

裴丽娜, 邹永刚\*, 石琳琳, 王小龙, 范 杰, 王海珠

(长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 针对 GaAs 基和 InP 基材料的波长可调谐垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 中微机电系统 (MEMS) 应力集中引起结构损坏的问题开展研究。设计了蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构, 在保证最大位移不变的情况下, 降低了悬臂固定端所受的米塞斯应力, 提高了器件的可靠性。采用 COMSOL 软件对蝴蝶结状悬臂结构的各项参数对力学特性的影响进行了优化与分析。结果表明: 优化后的蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构固定端的最大米塞斯应力相比于等截面状悬臂结构最大降低了 64%, 对于 GaAs 基材料的蝴蝶结状 MEMS 波长可调谐 VCSEL 自由光谱范围可达 45 nm。

**关键词:** MEMS; 米塞斯应力; 蝴蝶结; 可调谐 VCSEL

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0420002

## Design of low stress MEMS cantilever structure with tunable VCSEL

Pei Lina, Zou Yonggang\*, Shi Linlin, Wang Xiaolong, Fan Jie, Wang Haizhu

(National Key Laboratory of High-power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The structural damage caused by micro-electro-mechanical system (MEMS) stress concentration in tunable vertical cavity surface emitting lasers (VCSEL) of GaAs-based and InP-based materials was studied. A bowknot MEMS cantilever structure was designed to reduce the von Mises stress at the fixed end of the cantilever and ensure the reliability of the device while ensuring the maximum displacement was invariable. The COMSOL software was used to optimize and analyze the influence of various parameters of the bowknot cantilever structure on the mechanical properties. The results show that the maximum von Mises stress at the fixed end of the optimized bowknot MEMS cantilever structure is reduced by 64% compared to the equal-section cantilever structure. The free spectral range of a bowknot MEMS wavelength-tunable VCSEL for GaAs-based materials is up to 45 nm.

**Key words:** MEMS; von Mises stress; bowknot; tunable VCSEL

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2018-12-31

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20180519018JH)

作者简介: 裴丽娜(1993-), 女, 硕士生, 主要从事光电子技术及其应用方面的研究。Email: 753316970@qq.com

导师简介: 邹永刚(1982-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电子技术及其应用等方面的研究。Email: zouyg@cust.edu.cn

## 0 引言

在光通信、光谱分析、密集波分复用(DWDM)中波长可调谐垂直腔面发射半导体激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)具有广泛应用前景<sup>[1-6]</sup>, VCSEL 与微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS) 技术相结合是实现波长调谐的主要方式。目前基于可调谐 VCSEL 的研究, 主要针对于增大波长调谐范围开展研究, 常采用静电、压电或热电等多种调谐方式相结合的方法。2007 年, 美国加州大学伯克利分校的 C.J.Chang-Hasnain 教授采用等截面 MEMS 单悬臂结构, 利用压电调谐的方式取得了 32 nm 的连续波长调谐<sup>[7]</sup>。2014 年, 日本东京大学 M.Nakahama 等采用等截面 MEMS 单悬臂结构在静电和热电调谐方式下实现 32 nm 调谐范围<sup>[8]</sup>。2012 年, 北京工业大学在基于 MEMS 结构的等截面单悬臂可调谐 VCSELs 实现了 18.9 nm 的调谐范围<sup>[9]</sup>。上述几种方法均采用了等截面的 MEMS 悬臂结构, 但是随着悬臂位移量的增加, 其所受的应力相应增大, 并且端部受力集中, 过大的应力集中所引起的结构损坏是导致器件失效的主要原因之一<sup>[10-11]</sup>, 其主要损伤机制为在交变载荷作用下由于应力集中而导致结构的疲劳断裂<sup>[11]</sup>, 以及在冲击载荷下应力集中导致的区域断裂<sup>[12]</sup>等。从结构上来看, MEMS 悬臂结构中悬臂固定端具有拐角、尺寸突变等特点, 导致悬臂的固定端容易产生应力集中, 因此也最容易发生结构的失效。

针对上述应力集中问题, 文中研究了一种低应力蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构, 在固定端采用了等腰梯形结构, 通过分析, 改善了结构固定端受力分布, 降低了端部米塞斯应力<sup>[13]</sup>, 实现了覆盖自由光谱范围的具有更低应力, 更高可靠性的 MEMS 悬臂结构。

## 1 结构设计

图 1(a)为可调谐 VCSELs 器件结构示意图, 从下往上分别为 n 型 DBR、多量子阱结构的有源区, 氧化限制层、空气隙和 p 型 DBR (即蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构)。通过在调谐电极上外加反向电压, 使 DBR 在静电力的作用下, 产生向下的位移, 减小了

空气隙的厚度<sup>[14]</sup>。根据公式(1)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, 从而实现波长的连续调谐。

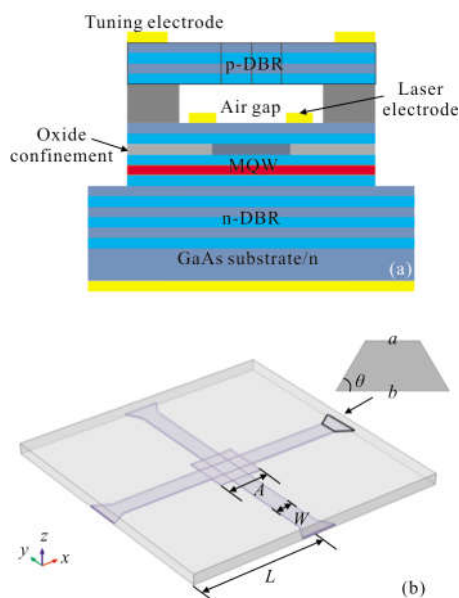


图 1 (a)可调谐 VCSEL 器件结构示意图, (b)蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构示意图

Fig.1 (a) Schematic diagram of the tunable VCSEL device, (b) schematic diagram of a bowknot MEMS cantilever

$$\frac{(L_{\text{top}} + L_{\text{cavity}} + L_{\text{gap}} + L_{\text{bot}})}{L_{\text{eff}}} = \frac{\lambda_q}{2} m \quad (1)$$

式中:  $L_{\text{top}}$ 、 $L_{\text{bot}}$  分别为上下 DBR 的有效腔长;  $L_{\text{cavity}}$  为谐振腔腔长;  $L_{\text{gap}}$  为空气隙厚度。关闭电压后, 在弹性恢复力的作用下, 悬臂回到其原来位置的状态。

利用 COMSOL Multiphysics 多物理场耦合分析软件对 MEMS 悬臂梁的力学特性进行了理论模拟与分析。通过结构设定、建模、边界确定、网格划分、求解、后处理几个过程, 分别选用了与 GaAs 基和 InP 基匹配的两种 p 型 DBR 结构, 材料分别为  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  和  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}_{0.4}\text{P}_{0.6}/\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ , 如图 1(b)所示。在该结构中, 悬臂长度为  $L$ , 宽度为  $W$ , 中间正方形边长为  $A$ ; 在悬臂末端采用等腰梯形形状, 上底边为  $a$ , 下底边为  $b$ , 等腰梯形下底角为  $\theta$ 。该结构为三维悬臂单层结构, 材料各项参数选取 MEMS 悬臂梁结构中两种材料的平均值。参数设定如表 1 所示。

表 1 模型参数设置

Tab.1 Model parameter settings

Material	GaAs-based materials	InP-based materials
Cantilever length $L$ / width $w$ /height $h/\mu\text{m}$	300/40/2.6	300/40/1.93
Air gap thickness/ $\mu\text{m}$	2	3
Isosceles trapezoidal bottom edge $a$ /bottom edge $b$ ( $\mu\text{m}$ )/bottom angle $\theta/(\text{^\circ})$	40/80/ $\theta$	40/80/ $\theta$
Young's modulus $E/\text{GPa}$	84.40	65.74
Poisson ratio	0.36	0.34
Density/ $\text{kg}\cdot\text{m}^3$	4 540	5 236
Dielectric constant	11.48	13.44

外加电压后,在悬臂位移量为 800 nm 时,选取不同下底角蝴蝶结状 MEMS 悬臂梁固定端最大米塞斯应力分布如图 2 所示,其中  $\theta$  为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  是悬臂宽度分别为 40、80  $\mu\text{m}$  的等截面结构。通过采用蝴蝶结状的悬臂结构与等截面的悬臂结构相比,固定端所受的米塞斯应力有所减小,且整体受力情况均匀,没有受力集中的现象,有效的提高了器件的可靠性。

GaAs 基材料不同蝴蝶结下底角的固定端米塞斯应力的分布情况如图 3(c)所示,蝴蝶结 MEMS 悬臂所受的米塞斯应力值小于等截面状,下底角为  $60^\circ$  时米塞斯应力分布更均匀;而蝴蝶结下底角的变化对悬臂中间和边缘的米塞斯应力分布没有影响,如图 3(a)、(b)所示。

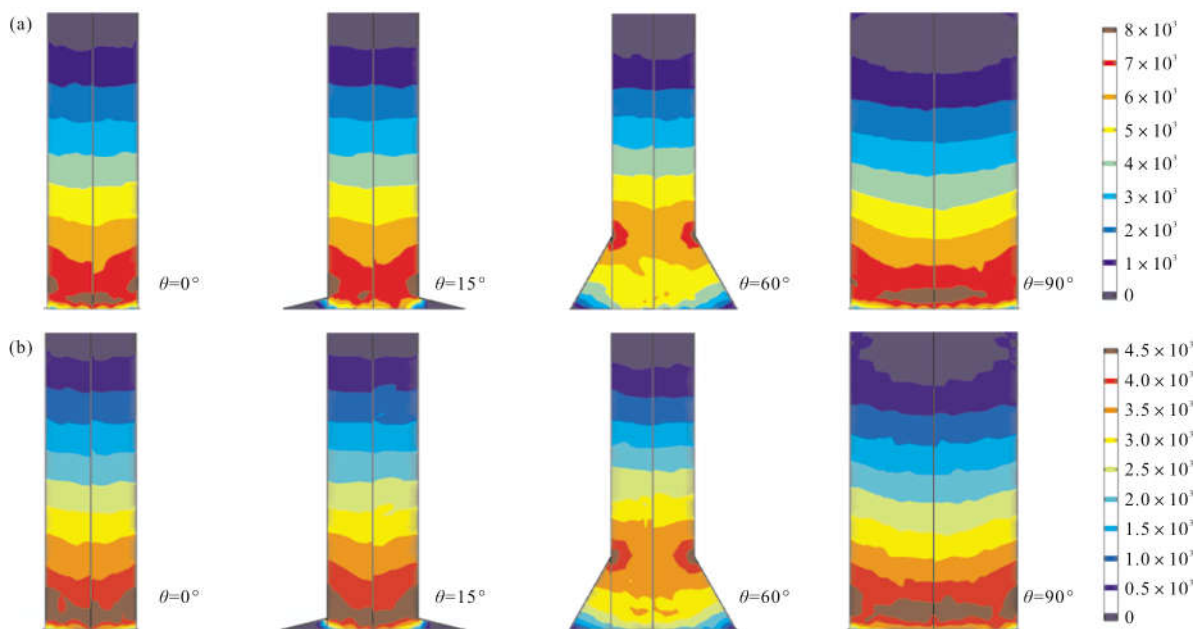


图 2 (a)GaAs 基材料,(b)InP 基材料不同  $\theta$  的固定端最大米塞斯应力分布图

Fig.2 (a) GaAs-based materials, (b) InP-based materials maximum von Mises stress distribution at fixed end of different  $\theta$

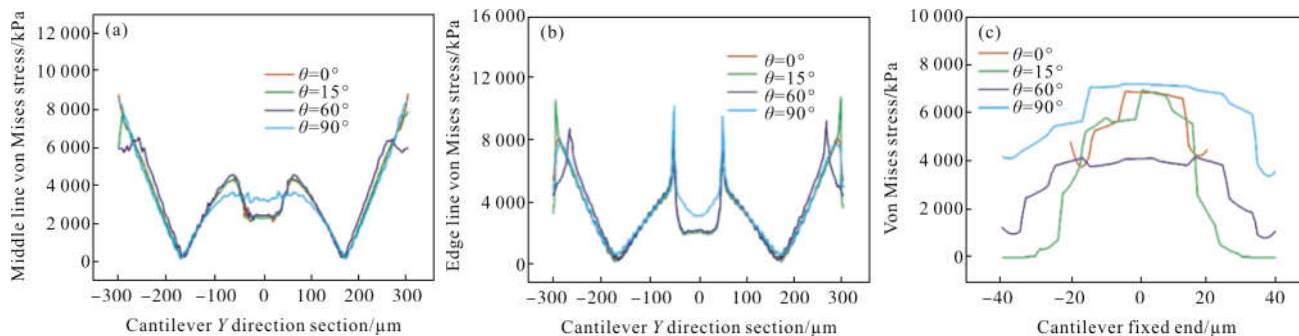


图 3 GaAs 基材料不同  $\theta$  的(a)中间,(b)边缘,(c)固定端最大米塞斯应力值分布图

Fig.3 (a) Middle, (b) edge, (c) fixed end of different  $\theta$  of GaAs-based material maximum von Mises stress distribution

InP 基材料不同蝴蝶结下底角的固定端米塞斯应力的分布情况如图 4(c)所示,蝴蝶结 MEMS 悬臂所受的米塞斯应力值小于等截面状,下底角为 60° 时米塞斯应力分布更均匀;而蝴蝶结下底角的变化对悬臂中间和边缘的米塞斯应力分布没有影响,如图 4(a)、(b)所示。GaAs 基与 InP 基材料的蝴蝶结状结构都只降低了悬臂固定端的米塞斯应力,且分布均匀,并且不影响其他部位米塞斯应力的分布情况。

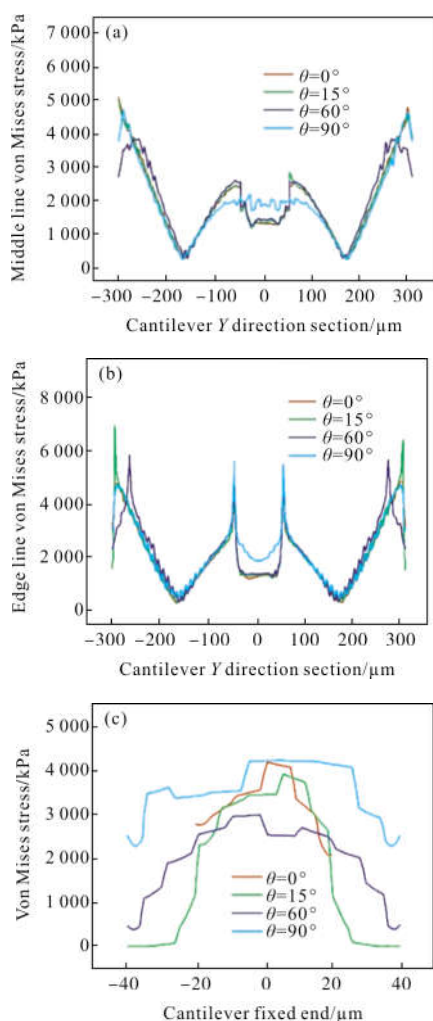


图 4 InP 基材料不同  $\theta$  的(a)中间,(b)边缘,(c)固定端最大米塞斯应力值分布图

Fig.4 (a) Middle, (b) edge, (c) fixed end of different  $\theta$  of InP-based material maximum von Mises stress distribution

## 2 结构分析

蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构是中间由一正方形相连接的固定端部为等腰梯形四悬臂构成,如图 1(b)所示。蝴蝶结部分为等腰梯形,主要几何参量包括等

腰梯形上底边  $a$ ,等腰梯形下底边  $b$ ,等腰梯形下底角  $\theta$  和等腰梯形高  $h$ 。采用 COMSOL 软件对不同材料的蝴蝶结状 MEMS 悬臂各几何参量对结构力学特性的影响进行了分析。

MEMS 悬臂的位移量与受到的静电力大小相关,调谐过程中将空气腔上下两反射镜看作是电容器的上下极板,则外加偏压所产生的静电力可以从电容器的存储能量推导出来,忽略边缘场分布,得出静电力为:

$$F_{\downarrow} = \frac{\epsilon_0 AV^2}{2(d_0 - \Delta d)^2} \quad (2)$$

式中: $F_{\downarrow}$  为静电吸引力; $V$  表示外加偏压; $d_0$  为初始距离,即空气隙厚度; $\Delta d$  为悬臂梁位移。

在静电力作用下结构偏离平衡状态,恢复力将其回到平衡位置。

$$F_{\uparrow} = k\Delta d \quad (3)$$

式中: $F_{\uparrow}$  为弹性恢复力; $k$  为悬臂梁的弹性常数。

当  $F_{\downarrow} = F_{\uparrow}$ , 悬臂梁会处于临界状态, $\Delta d$  取值最大。即:

$$|F_{\downarrow}(\Delta d_{\max})| = |F_{\uparrow}(\Delta d_{\max})| \quad (4)$$

得到:

$$\Delta d_{\max} = \frac{d_0}{3} \quad (5)$$

当 MEMS 可调谐 VCSEL 空气隙厚度为  $\lambda_q/2$  整数倍时,公式(1)有效,对于 GaAs 基材料的 850 nm 可调谐 VCSEL 选取空气隙厚度为 2  $\mu\text{m}$ ,当达到动态平衡时悬臂的位移量为 800 nm。对于 InP 基材料的 1310 nm 可调谐 VCSEL 选取空气隙厚度为 3  $\mu\text{m}$ ,当达到动态平衡时悬臂的位移量为 1  $\mu\text{m}$ 。

### 2.1 GaAs 基材料

对于 GaAs 基材料结构,当固定等腰梯形下底边  $b$  和下底角  $\theta$  时,改变上底边  $a$ ,在悬臂位移量为 800 nm 的情况下,随着上底边  $a$  的增大,固定端所受的米塞斯应力变化如图 5(a)所示。当上底边  $a$  为 80  $\mu\text{m}$  时,即悬臂宽度  $W$  为 80  $\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构,固定端所受的米塞斯应力值最大,为 7 322 kPa,最易受损,而其他蝴蝶结状悬臂固定端所受的米塞斯应力都比等截面状有大幅度的减小。当上底边为 20  $\mu\text{m}$  时蝴蝶结状悬臂结构固定端的最大米塞斯应力 2 660 kPa 相比于等截面状结构降低了 64%。

当固定等腰梯形上底边  $a$  和下底角  $\theta$  时, 改变下底边  $b$ , 在悬臂位移量为  $800\text{ nm}$  的情况下, 随着下底边  $b$  的增大, 固定端所受的米塞斯应力变化如图 5(b) 所示。当下底边  $b$  为  $40\text{ }\mu\text{m}$  时, 即悬臂宽度  $W$  为  $40\text{ }\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构, 固定端所受的米塞斯应力值最大,  $6\text{ }180\text{ kPa}$ , 最易受损。当下底边为  $140\text{ }\mu\text{m}$  时蝴蝶结状悬臂结构固定端的最大米塞斯应力  $3\text{ }901\text{ kPa}$  相比于等截面状结构降低了  $37\%$ 。

当固定等腰梯形上底边  $a$  和下底边  $b$  时, 改变下底角  $\theta$ , 即高度  $h$ , 在悬臂位移量为  $800\text{ nm}$  的情况下, 随着下底角  $\theta$  的增加, 固定的等腰梯形下底边所

受的米塞斯应力变化如图 5(c) 所示。当下底角  $\theta$  为  $0^\circ$  时, 即悬臂宽度  $W$  为  $40\text{ }\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构, 固定端所受的米塞斯应力值为  $6\text{ }802\text{ kPa}$ ; 当下底角  $\theta$  为  $90^\circ$  时, 即悬臂宽度  $W$  为  $80\text{ }\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构, 固定端达到了最大值  $7\text{ }099\text{ kPa}$ , 而其他角度, 即蝴蝶结状悬臂, 固定端所需米塞斯应力都有所减小。当下底角  $\theta$  为  $60^\circ$  时, 蝴蝶结状悬臂结构固定端的最大米塞斯应力  $4\text{ }463\text{ kPa}$  相比于等截面状结构降低了  $37\%$ 。

### 2.2 InP 基材料

对于 InP 基材料结构, 当固定等腰梯形下底边  $b$  和下底角  $\theta$  时, 改变上底边  $a$ , 在悬臂位移量为  $1\text{ }\mu\text{m}$  的情况下, 随着上底边  $a$  的增大, 固定端所受的米塞斯应力变化如图 6(a) 所示。当上底边  $a$  为  $80\text{ }\mu\text{m}$  时, 即悬臂宽度  $W$  为  $80\text{ }\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构, 固定端所受的米塞斯应力值最大, 为  $4\text{ }061\text{ kPa}$ , 最易受损, 而其他蝴蝶结状悬臂固定端所受的米塞斯应力都比等截面状有大幅度的减小。当上底边为  $20\text{ }\mu\text{m}$  时蝴蝶结状悬臂结构固定端的最大米塞斯应力  $2\text{ }015\text{ kPa}$  相比于等截面状结构降低了  $50\%$ 。

当固定等腰梯形上底边  $a$  和下底角  $\theta$  时, 改变下底边  $b$ , 在悬臂位移量为  $1\text{ }\mu\text{m}$  的情况下, 随着下底边  $b$  的增大, 固定端所受的米塞斯应力变化如图 6(b) 所示。当下底边  $b$  为  $40\text{ }\mu\text{m}$  时, 固定端所受的米塞斯应力值最大,  $4\text{ }058\text{ kPa}$ , 最易受损。当下底边为  $140\text{ }\mu\text{m}$  时蝴蝶结状悬臂结构固定端的最大米塞斯应力  $2\text{ }041\text{ kPa}$  相比于等截面状结构降低了  $50\%$ 。

当固定等腰梯形上底边  $a$  和下底边  $b$  时, 改变下底角  $\theta$ , 即高度  $h$ , 在悬臂位移量为  $1\text{ }\mu\text{m}$  的情况下, 随着下底角  $\theta$  的增加, 固定的等腰梯形下底边所受的米塞斯应力变化图 6(c) 所示。当下底角  $\theta$  为  $0^\circ$  时, 即悬臂宽度  $W$  为  $40\text{ }\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构, 固定端所受的米塞斯应力最大值为  $4\text{ }231\text{ kPa}$ ; 当下底角  $\theta$  为  $90^\circ$  时, 即悬臂宽度  $W$  为  $80\text{ }\mu\text{m}$  的等截面状悬臂结构, 固定端达到了最大值  $4\text{ }268\text{ kPa}$ , 而其他角度, 即蝴蝶结状悬臂固定端所需米塞斯应力都有所减小。当下底角  $\theta$  为  $75^\circ$  时, 蝴蝶结状悬臂结构固定端的最大米塞斯应力  $2\text{ }845\text{ kPa}$  相比于等截面状结构降低了  $33\%$ 。

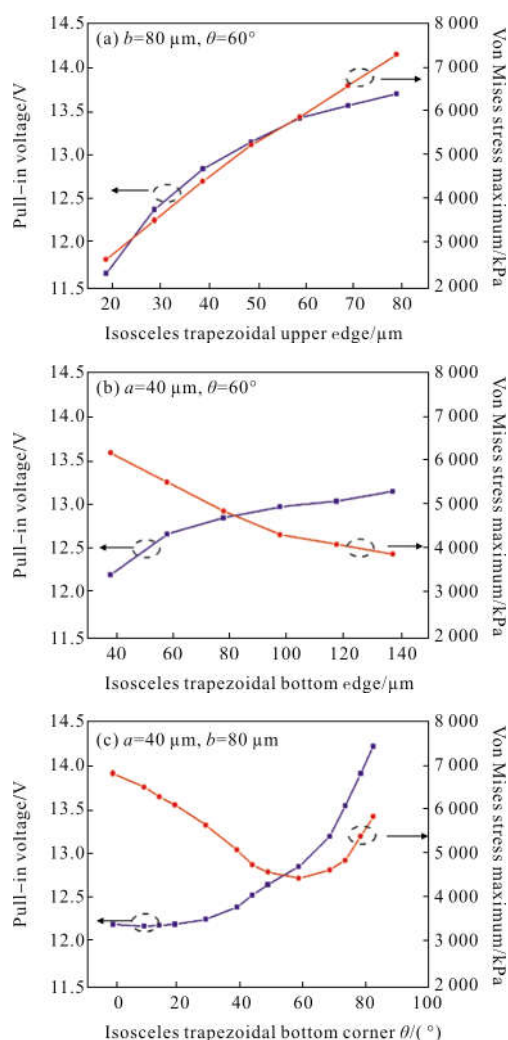


图 5 GaAs 基材料等腰梯形(a)上底边, (b)下底边, (c)下底角与拉入电压和固定端米塞斯应力最大值关系

Fig.5 Relationship between the (a) isosceles trapezoid upper edge, (b)isosceles trapezoid bottom edge, (c)isosceles trapezoid bottom angle and the pull-in voltage and the fixed-end maximum von Mises stress of the GaAs-based materials

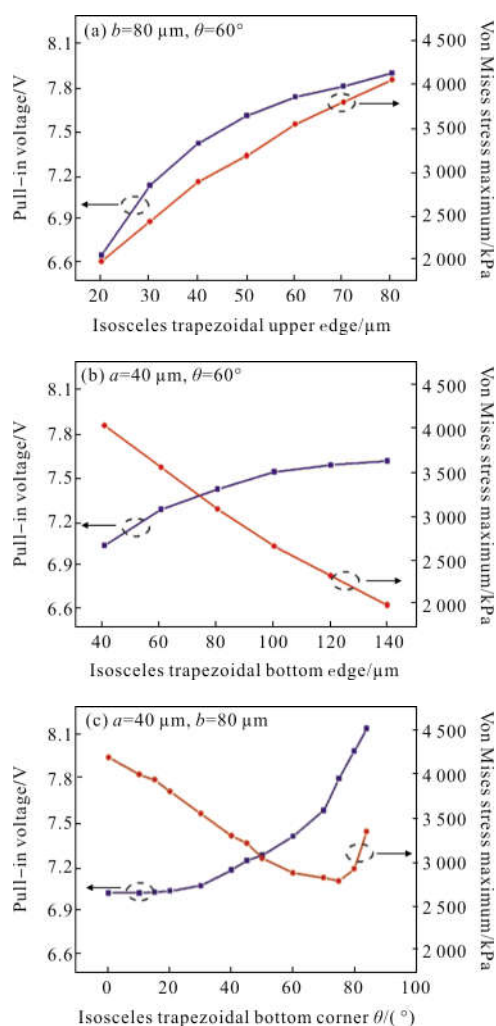


图 6 InP 基材料等腰梯形(a)上底边, (b)下底边, (c)下底角与拉入电压和固定端米塞斯应力最大值关系

Fig.6 Relationship between the (a) isosceles trapezoid upper edge, (b)isosceles trapezoid bottom edge, (c)isosceles trapezoid bottom angle and the pull-in voltage and the fixed-end maximum von Mises stress of the InP-based materials

### 2.3 拉入电压

对比图 5、6 发现,当不同参量改变时结构所需的拉入电压<sup>[15]</sup>都小幅增加。这是由于蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构的求解过程为:采用任意拉格朗日-欧拉法来求解外加电压与 MEMS 悬臂位移量之间的关系。在 MEMS 悬臂上电极与空气隙下电极加调谐电压后,两电极之间的电势差产生静电力,驱动悬臂向下弯曲,空气隙的几何结构发生变化,使用拉格朗日-欧拉法将 MEMS 悬臂的位移与静电场计算联系起来,当空气隙厚度发生变化时,两个电极间的静电场也发生变化<sup>[16]</sup>。

空气中的静电场与 MEMS 悬臂决定的静电方程可以表示为<sup>[17]</sup>:

$$-\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = 0 \quad (6)$$

式中: $V$  为外加电压; $\varepsilon$  为极板间材料介电常数。作用在悬臂电极上的力场密度可以从 Maxwell 应力张量中得到,静电力反向总是沿着平板的法线方向。

$$F_{es} = -\frac{1}{2} (E \cdot D)n + (n \cdot E)D^T \quad (7)$$

式中: $E$  为电场强度; $D$  为电矢量位移; $n$  为边界表面法向矢量。

如果忽略悬臂自身的重力作用,悬臂的形变受两个力的作用:静电力和弹性恢复力。其弹性恢复力是由悬臂在生长过程中的本征应力引起的。悬臂为弹性处于张应力状态,在小位移情况下,可以将悬臂的张应力近似看作弹性恢复力,其弹性系数为  $k = Wt\sigma/L$ ,其中, $L$ 、 $W$ 、 $t$  和  $\sigma$  分别为悬臂的长度、宽度、厚度和悬臂的应力,弹性恢复力  $F_{\uparrow}$  由公式(3)表示。

当  $F_{\uparrow} = F_{es}$  时,悬臂处于临界状态。而当等腰梯形的各项参数增大时,悬臂宽度  $W$  增大,  $F_{es}$  增大,所以为了保证  $F_{es} = F_{\uparrow}$ , 外加电压  $V$  会有小幅增加,使悬臂达到临界状态。

### 2.4 自由光谱范围

可调谐 VCSEL 的波长调谐范围取决于自由光谱范围(FSR)的大小,自由光谱范围等效于输出波长与相邻纵模的间隔,代表可调谐 VCSEL 理论上所能实现的最大波长连续调谐的范围,FSR 的范围与可调谐 VCSEL 的整体有效腔长  $L_{eff}$  有关,FSR 的计算公式如下:

$$FSR = \lambda_q - \lambda_{q-1} = \frac{\lambda_q^2}{2L_{eff} + \lambda_q} \quad (8)$$

其中, $L_{eff}$  由公式(1)表示。由于受材料增益谱、VCSEL 损耗等限制,因此可调谐 VCSEL 的实际调谐范围一般要小于 FSR 所计算的波长调谐范围。通过对可调谐 VCSEL 器件的材料体系、器件结构等参数的优化,可以使波长调谐范围接近于 FSR 的范围。对于 GaAs 基材料的 850 nm 可调谐 VCSEL,自由光谱范围可达为 45 nm。对于 InP 基材料的 1 310 nm 可调谐 VCSEL,自由光谱范围为 48 nm。GaAs 基和 InP 基材料所实现的悬臂最大位移量已经覆盖了可调谐 VCSEL 的自由光谱范围。

### 3 结论

文中针对可调谐 VCSEL 在大范围波长调谐时应力集中,器件易损坏的问题,设计了一种具有低应力高可靠性的蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构,通过 COMSOL 软件分别对 GaAs 基和 InP 基材料体系的 MEMS 悬臂中蝴蝶结的各项参数对结构受力分布的影响进行了分析。结果表明对于 GaAs 基材料的 850 nm 可调谐 VCSEL,自由光谱范围可达为 45 nm; InP 基材料的 1 310 nm 可调谐 VCSEL,自由光谱范围为 48 nm。GaAs 基和 InP 基材料所实现的悬臂最大位移量已经覆盖了可调谐 VCSEL 的自由光谱范围。且蝴蝶结状 MEMS 悬臂结构有效的改善了端部受力情况,GaAs 基材料固定端的最大米塞斯应力相比于等截面状结构降低了 37%~64%,InP 基材料固定端的最大米塞斯应力相比于等截面状结构降低了 33%~50%,对提高可调谐 VCSEL 器件的可靠性,延长使用寿命等方面提供思路。

### 参考文献:

- [1] Maute M, Kögel B, Böhm G, et al. MEMS-tunable 1.55- $\mu\text{m}$  VCSEL with extended tuning range incorporating a buried tunnel junction [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, 18(5): 688-690.
- [2] Levallois C, Verbrugge V, Dupont L, et al. 1.55  $\mu\text{m}$  optically pumped tunable VCSEL based on a nano-polymer dispersive liquid crystal phase modulator [C]//Proceedings of SPIE -The International Society for Optical Engineering, 2006, 6185: 61850W.
- [3] Suzuki H, Fujiwara M, Iwatsuki K. Application of super-DWDM technologies to terrestrial terabit transmission systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(5): 1998-2005.
- [4] Sun D C, Fan W J, Kner P, et al. Long wavelength-tunable VCSELs with optimized MEMS bridge tuning structure [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(3): 714-716.
- [5] Chang-Hasnain C J. Tunable VCSEL [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2000, 6(6): 978-987.
- [6] Jiang Guoqing, Xu Chen, Xie Yiyang, et al. Fabrication of proton-implanted photonic crystal vertical cavity surface emitting laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1205001. (in Chinese)
- [7] Michael C Y Huang, Kan Bun Cheng, Ye Zhou, et al. Monolithic Integrated Piezoelectric MEMS-Tunable VCSEL [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(2): 374-380.
- [8] Jimyung Kim, Akihiko Shinya, Kengo Nozaki, et al. Narrow linewidth operation of buried-heterostructure photonic crystal nanolaser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 11643-11651.
- [9] Guan Baolu, Zhang Jinglan, Ren Xiuguan, et al. Micro-nano-optical machine system tunable wavelength vertical cavity surface emitting lasers with wide tunable range [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(3): 034206. (in Chinese)
- [10] ERIN E F, PAUL E L. MEMS fatigue testing to study nanoscale material response [C]// Proceedings of SEM Annual Conference & Exposition on Experimental and Applied Mechanics, 2002: 233-235.
- [11] Zhang Wenming, Meng Guang. Reliability of MEMS and its failure analysis [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2005, 27(6): 855-859. (in Chinese)
- [12] Pan J T. *MEMS and reliability* [D]. US: Carnegie Mellon University, 1999.
- [13] Chen Huifa. *Elasticity and Plasticity* [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [14] Tian Kun, Zou Yonggang, Jiang Xiaowei, et al. Wavelength tuning range of inter cavity subwavelength grating MEMS VCSELs [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0701009. (in Chinese)
- [15] Bu Chao, Nie Weirong, Xu Anda, et al. Shock reliability enhancement by flexible stop for MEMS inertial switch [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 123-121. (in Chinese)
- [16] Lin Xiezhao, Ying Ji, Chen Zichen. Macro modeling method for electrostatic drive silicon diaphragm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(5): 839-846. (in Chinese)
- [17] Gupta R K. Electrostatic pull-in structure design for in-situ mechanical property measurements of microelectromechanical systems (MEMS) [D]. US: MIT, 1997.