

InP 基 MOEMS 可调谐器件的梁变形模拟

吴旭明[†] 王小东 何国荣 王 青 曹玉莲 谭满清

(中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

摘要: InP 基微光机电系统(MOEMS)可调谐器件的梁在实验中常出现弯曲变形的现象,其原因是在生长的时候,As 原子进入 InP 梁,产生了内部梯度应力.使用有限元分析软件,建立了一种无须测量内部应力的模拟梁变形的方
法.模拟了单臂梁和双臂梁的弯曲变形情况,理论与实验吻合.研究了 As 原子浓度和梁厚度对梁变形情况的影响,结果表明降低 As 原子浓度和增大梁厚度都有助于抑制梁的变形.

关键词: 微光机电系统; 可调谐; 变形; 梯度应力

PACC: 4283; 4280S

中图分类号: TN713

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)02-0280-04

1 引言

微光机电系统(MOEMS)可调谐器件具有调谐范围宽、体积小、成本低、与半导体平面工艺兼容等优点,越来越引起研究人员的重视.因为 InP 是制作光通信器件最重要的材料,所以基于 InP 的 MOEMS 可调谐器件是研制的热点,相关的器件不断涌现,如 MOEMS 可调谐滤波器^[1~4]、可调谐垂直腔面发射激光器^[5]、谐振腔增强型探测器^[6].这些 MOEMS 可调谐器件都含有一空气层和梁,这两者与器件的调谐功能相关.通常 InP 基 MOEMS 可调谐器件的空气层由腐蚀 InGaAs 牺牲层得来,梁由 InP 构成,生长在牺牲层之上.在腐蚀牺牲层制出空气层的过程中,发现空气层上方的梁发生了弯曲^[2~4],严重劣化了器件的性能,甚至导致器件的失效,所以建立模拟梁变形的模型是很有必要的.目前国际上这方面开展的工作很少,提出的方法也有待改进.现有的模型^[2],必须事先测量梁内部的应力.为了得到梁的内部应力,研究人员采用了一些较复杂的测试手段^[2],增加了模拟的难度并耗时.本文从分析梁变形的物理原因着手,使用有限元分析软件,建立起一种无须测量梁内部应力的模拟方法,对缩短研制周期、优化参数都有着积极的意义.

2 梁的变形和原因

关于 InP 基 MOEMS 可调谐器件梁的变形和物理原因,文献^[1]做了详细的解释.文献^[1]的研究对象是 InP 基 MOEMS 可调谐滤波器,它的基本结

构是下分布布拉格反射镜(DBR)、空气腔、梁(InP)和上 DBR.在 InP 基 MOEMS 可调谐滤波器的制作过程中,当腐蚀完牺牲层后,器件的梁就发生了弯曲.为了更清晰地表明梁内部的应力问题,文献作者还制作了一系列不同长度的单臂梁,如图 1(a)所示.从图 1(a)可以看出,单臂梁发生了严重的弯曲变形,变形的程度足以使 MOEMS 器件失效.导致

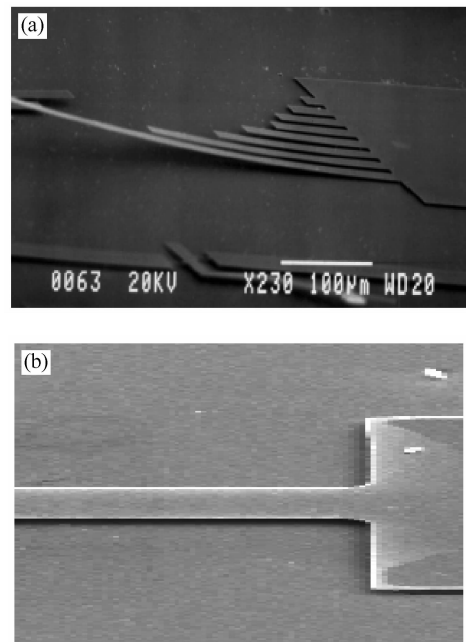


图 1 (a) 弯曲变形的 InP 基单臂梁^[1]; (b) 无弯曲变形的 GaAs 基单臂梁

Fig.1 (a) InP-based one-armed beam with deformation^[1]; (b) GaAs-based one-armed beam without deformation

[†] 通信作者. Email: zd_ming@semi.ac.cn

2006-07-27 收到, 2006-08-11 定稿

梁弯曲变形的原因是因为梁(InP)含有浓度渐变的As原子,这些As原子使梁内部出现梯度应力^[1]. InP基MOEMS可调谐滤波器中的空气腔是通过腐蚀牺牲层InGaAs得到的,所以该滤波器结构在外延的时候必须生长一层牺牲层InGaAs,然后再在InGaAs上生长一层InP(梁).目前,用于生长InP基MOEMS可调谐器件的设备大多是金属有机化学气相沉积设备(MOCVD).此设备在生长完含As材料后,存在一个“记忆效应”,即生长了含As材料后再在其上生长不含As的材料时,不含As的材料也会含有As.正是这个效应,导致InP基MOEMS可调谐滤波器的梁(InP)中,含有大量的As原子.文献[1]对InGaAs上的InP做了二次离子质谱分析,证明了InP层中的确含有大量的As原子,且浓度呈梯度分布,从InP与InGaAs的界面处开始向InP内部逐渐降低.这些As原子的存在使梁内部出现梯度应力,当梁下面的牺牲层被腐蚀后,内部梯度应力得以释放,导致梁弯曲变形.

为了与InP基单臂梁对比,本文制作了GaAs基的单臂梁,其外延片结构是GaAs(衬底)/AlGaAs(牺牲层)/GaAs(梁).图1(b)是GaAs基单臂梁的SEM照片,照片中的单臂梁平整、光滑,没有弯曲变形.因为梁本身就是GaAs材料,所以虽然“记忆效应”仍然存在,但是不会导致GaAs梁内部产生应力.此实验从另一角度证明了内部梯度应力是引起InP基微梁弯曲变形的原因.

3 建模

As进入到InP后,实际上InP与InGaAs界面处是一层渐变的 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$. x 的值通过下式得到:

$$x = \frac{N_{\text{As}}}{N_{\text{As}} + N_{\text{P}}} \quad (1)$$

式中 N_{As} 是As原子的浓度; N_{P} 是P原子的浓度.只要知道 N_{As} 和 $N_{\text{As}} + N_{\text{P}}$ 的值,就可以得到 x 值. N_{As} 的值可以从二次离子质谱分析图中得到^[1]. $N_{\text{As}} + N_{\text{P}}$ 的值可以用InP中P的浓度来近似代替,这是因为 x 的值比较小, $N_{\text{As}} + N_{\text{P}}$ 的值约等于InP中P的浓度.InP是闪锌矿结构,每一个晶胞内含有4个P原子,晶胞的晶格常数为0.5886nm.知道这些常数后,就可以计算出 1cm^3 内含有 1.96×10^{22} 个P原子,即P原子的浓度为 $1.96 \times 10^{22}\text{cm}^{-3}$.从二次离子质谱分析图可以看出,由InP与InGaAs的界面处开始到InP内部约100nm的范围内,As的浓度从 $3 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$ 线性降到 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$,在100nm之后As的浓度缓慢降低.根据(1)式,可以计算出 x 的值在界面处到InP内部100nm的范围内,从0.153线性减小到0.0051,在100nm之后 x 的值很

小,可不考虑. $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 的晶格常数为:

$$a = 0.6058x + 0.5886(1 - x) \quad (2)$$

通过(2)式可知,在自由状态下,当 x 的值从0.153线性减小到0.0051时, $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 的晶格常数从0.5912nm线性减小到0.5886nm,但是此时 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 是生长在InP衬底上的,水平面上受到束缚,它的晶格在水平面上必须与衬底匹配,这意味着梁内部存在压应力,而且此压应力从界面处开始向梁内部线性减少,是一个梯度压应力.当InP(梁)下面的牺牲层被腐蚀掉以后,梁失去束缚,梯度应力得以释放,产生了一个向上弯的力矩,导致梁弯曲变形.

为了定量地模拟梁变形的情况,本文借助有限元分析软件来进行模拟,主要步骤如下:(1)定义单元、材料参数;(2)绘制梁的三维几何图形;(3)对几何图形进行网格划分;(4)加载约束和内部梯度应力负载;(5)模拟计算;(6)结果分析.在步骤(4)中,需要加载一个内部梯度应力,作者并没有测量梁的内部应力,但是可以通过加载一个梯度温度分布来等效产生内部应力.具体的方法如下:As进入InP形成渐变的 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$,它与InP晶格不匹配,产生了内部梯度应力.如果在InP与InGaAs的界面处到InP内部100nm的范围内,加载一个梯度温度分布,并使其满足(3)式,那么就等效地引入了一个内部梯度应力.

$$(a_x - a_0)/a_0 = \alpha(T_x - T_0) \quad (3)$$

式中 a_x, a_0 分别为 $\text{InAs}_x\text{P}_{1-x}$ 和衬底InP的晶格常数; α 是热膨胀系数; T_x, T_0 分别为 x 处的加载温度和环境温度.

4 模拟结果和实验结果的比较

本文主要模拟了单臂梁和双臂梁的弯曲变形,模拟中使用的参数在表1中列出,图2是单臂梁和双臂梁的示意图.模拟所用的参数皆来自文献[1, 2],这样确保本文的模拟结果与文献中的实验数据有可比性.

表1 模拟中使用的参数

Table 1 Parameters in the simulation

材料	InGaAs	InP
杨氏模量/GPa	67.38	61.06
泊松比	0.33	0.357
梁宽/ μm		20
梁厚/ μm		0.593

图3是单臂梁的变形模拟结果.从模拟结果中得知,当梁的长度从0变化到 $300\mu\text{m}$ 时,梁向上弯曲的值从0增加到 $55.2\mu\text{m}$.此模拟结果与图1(a)

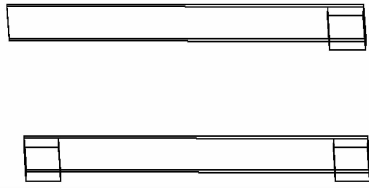


图 2 单臂梁和双臂梁的示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of the one-armed beam and the two-armed beam

定性比较(缺单臂梁的定量数据,故定性比较),在弯曲的形状和量级等方面都基本一致.

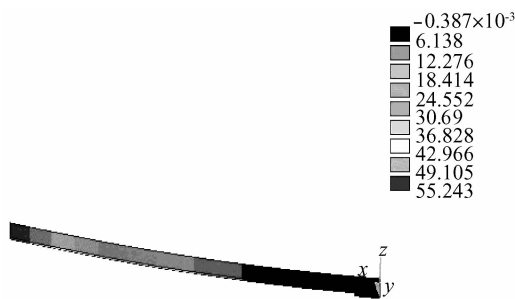


图 3 单臂梁的变形模拟

Fig. 3 Simulated deformation of the one-armed beam

图 4 是双臂梁的变形模拟结果.对于双臂梁而言,梁的中间处弯曲最大.图 5 给出了模拟值与测量值的比较,图中的测量值来自文献[2].从图中可知,模拟值与测量值吻合得较好,表明此模拟方法正确可行.

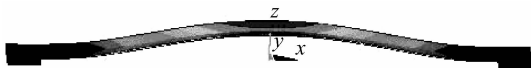


图 4 单臂梁的变形模拟结果

Fig. 4 Simulated deformation of the two-armed beam

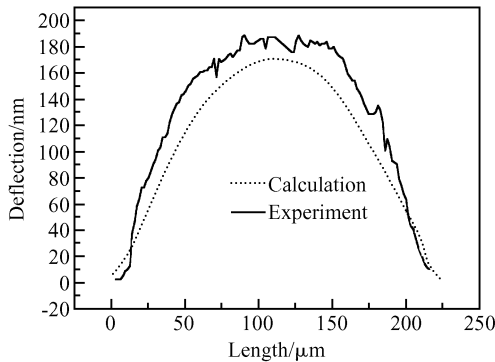


图 5 双臂梁的弯曲模拟值与实验值的比较

Fig. 5 Calculated values compared to measured values

5 模拟方法的应用

InP 基 MOEMS 可调谐器件梁变形的原因是大量的 As 原子进入了梁的内部,如果降低梁内部 As 原子的浓度,那么必然有利于减小梁的变形.图 6 绘出了双臂梁中间处的弯曲值随 As 原子浓度变化的关系.因为在梁内部 As 原子的浓度呈梯度分布,不同位置有不同的浓度,所以这里 As 原子浓度的变化是指梁各处的 As 原子浓度按一定的比例同步变化.为简单起见,本文仅用 InGaAs 和 InP 界面处 As 原子浓度的变化来代表梁各处 As 原子浓度的变化,所以虽然图 6 中 x 轴标注的只是 InGaAs 和 InP 界面处 As 原子的浓度,但它代表整个 As 原子浓度分布.从图 6 可知,随着 As 原子浓度的降低,梁中间处的弯曲值线性减小.当 As 原子浓度降到 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,梁中间处的弯曲值已经减小到 5.4nm.可见,降低 As 原子的浓度是一种有效减小梁变形的有效方法.

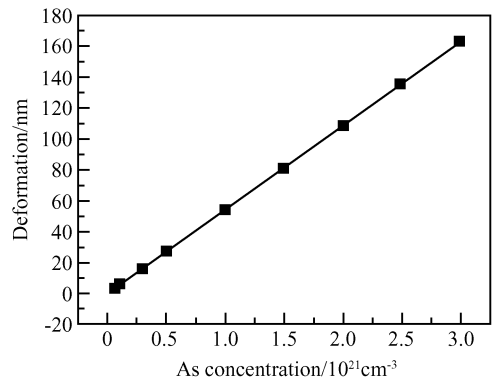


图 6 双臂梁中间处的弯曲值与 As 原子浓度的关系

Fig. 6 Deformation at the center of the two-armed beam versus As concentration

本文还使用该方法研究了梁厚度对梁变形情况的影响,图 7 绘出了双臂梁中间处的弯曲值随梁厚度变化的关系图.从图中可以看出,随着梁厚度的增大,梁中间处的弯曲值逐渐减小.当梁的厚度为 $1.8 \mu\text{m}$ 时,梁中间处的弯曲值已经减小到 9.9nm.可见,增大梁的厚度有利于抑制梁的变形.虽然增加梁的厚度可抑制梁的变形,但是它同时会引起调谐电压的增大,所以在设计器件的时候应综合考虑.

除上述方法外,还可以通过在 InGaAs 和 InP 之间外延一补偿层的方法来减小变形.比如取 InGaP 为补偿层,选择组分使其晶格常数略小于 InP,这样 As 原子进入后,补偿层的晶格常数得以调整到 InP 附近,从而使内部应力减小,变形也随之减小.

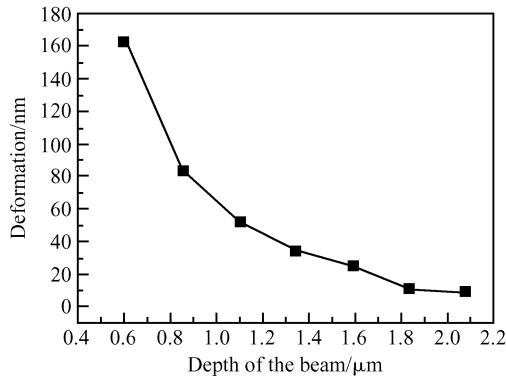


图7 双臂梁中间处的弯曲值与梁厚度的关系

Fig.7 Deformation at the center of the two-armed beam versus the depth of the beam

6 结论

InP基MOEMS可调谐器件的梁在实验中常出现弯曲变形的现象,引起弯曲的原因主要是梁内部存在一梯度应力.制作了GaAs基微梁,发现其无弯曲现象,从另一方面证明了内部梯度应力是InP基微梁变形的原因.从分析引起梁弯曲的物理机制入手,直接建立起一种模拟梁变形的的方法.使用这种方法,模拟了单臂梁和双臂梁的弯曲变形情况.对于单臂梁的情况,当梁的长度从0变化到 $300\mu\text{m}$ 时,梁向上弯曲的值从0增加到 $55.2\mu\text{m}$.此模拟结果与实验定性比较可知,弯曲的形状和量级等方面都基

本一致.对双臂梁的情况,梁的中间处弯曲变形最大.通过模拟值与测量值的比较发现,两者相吻合,表明此模拟方法可行.使用该模拟方法还研究了As原子浓度和梁厚度对梁变形情况的影响,结果表明降低As原子浓度和增大梁厚度都有助于抑制梁的变形.

参考文献

- [1] Strassner M, Dalerden J, Chitica N, et al. III-V semiconductor material for tunable Fabry-Pérot filters for coarse and dense WDM systems. *Sensors and Actuators A*, 2000, 85(1): 249
- [2] Greek S, Chitica N. Deflection of surface-micromachined devices due to internal, homogeneous or gradient stresses. *Sensors and Actuators A*, 1999, 78(1): 1
- [3] Irmer S, Dalerden J, Rangelov V, et al. Ultralow biased widely continuously tunable Fabry-Pérot filter. *IEEE Photon. Technol Lett*, 2003, 15(3): 434
- [4] Strassner M, Esnault J C, Leroy L, et al. Fabrication of ultrathin and highly flexible InP-based membranes for microoptoelectromechanical systems at $1.55\mu\text{m}$. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2005, 17(4): 804
- [5] Vakhshoori D, Tayebati P, Lu C C, et al. 2mW CW singlemode operation of a tunable 1550nm vertical cavity surface emitting laser with 50nm tuning range. *Electron Lett*, 1999, 35(11): 900
- [6] Seassal C, Leclercq J L, Letartre X, et al. InP-based micro-mechanical tunable and selective photodetector for WDM systems. *SPIE*, 1997, 3008: 62

Deformation Simulation on the Beam of InP-Based MOEMS Tunable Devices

Wu Xuming[†], Wang Xiaodong, He Guorong, Wang Qing, Cao Yulian, and Tan Manqing

(Center of Optoelectronics Research and Development, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Deformation of the beam in InP-based MOEMS tunable devices is frequently observed in experiments. This is because As atoms enter the beam during the growth. A method is developed to simulate the deformation, with no need to measure the gradient stress. The deformations of a one-armed beam and a two-armed beam are simulated, and the calculated values agree with the measured ones. The influences of As concentration and beam depth on the deformation are investigated, and the results show that it is useful to reduce the deformation by reducing the As concentration and increasing the beam depth.

Key words: MOEMS; tunable; deformation; gradient stress

PACC: 4283; 4280S

Article ID: 0253-4177(2007)02-0280-04

[†] Corresponding author. Email: zd_ming@semi.ac.cn

Received 27 July 2006, revised manuscript received 11 August 2006