

# 一种长波长 MOEMS 可调谐滤波器的 结构设计和分析

吴旭明<sup>1,†</sup> 王小东<sup>1</sup> 何国荣<sup>2</sup> 王青<sup>2</sup> 曹玉莲<sup>2</sup> 谭满清<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所 光电子研究发展中心, 北京 100083)

(2 中国科学院半导体研究所 纳米光电子实验室, 北京 100083)

**摘要:** 提出了一种微光机电系统(MOEMS)可调谐滤波器结构,该结构采用 GaAs/AlGaAs 作为下分布布拉格反射镜(DBR),GaAs 和 SiO<sub>2</sub>/Si 介质膜作为上 DBR,空气作为腔.按照波分复用系统的性能要求对 MOEMS 可调谐滤波器各项参数,如带宽、峰值透射率、挠度和调谐速度等进行了分析和设计.研究了挠度和调谐速度与梁厚度、宽度、长度等参数的关系.结果表明挠度与长度成正方向变化,同梁厚度、宽度成反方向变化,而调谐速度与各参数的关系恰好相反.

**关键词:** 微光机电系统; 调谐; 滤波器

**PACC:** 0710C

**中图分类号:** TN713

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2007)01-0117-05

## 1 引言

波分复用(WDM)技术使单根光纤的传输容量迅速扩大几十甚至上百倍,是目前突破 Tb/s 信息传输的唯一技术.可调谐滤波器,由于其对一定范围内的特定波长有实时选择通过的作用,可以独立对信息流进行控制和处理,被广泛地应用于 WDM 系统.微光机电系统(MOEMS)可调谐滤波器因其突出的宽调谐、可集成、低成本等特点,是众多滤波器中很有前景的一类器件,已成为国际上研究的热点<sup>[1~8]</sup>.考虑到与其他半导体光电子器件的集成,目前研究人员主要在 InP 和 GaAs 等光电子材料上研制 MOEMS 可调谐滤波器. MOEMS 可调谐滤波器的结构主要由上下两个分布布拉格反射镜(DBR)和腔构成. MOEMS 可调谐滤波器的 DBR 主要采用 InP /Air<sup>[1]</sup>, InGaAsP/InP<sup>[2]</sup>, GaAs/AlGaAs<sup>[3]</sup>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaAs<sup>[4]</sup>, Si/SiO<sub>2</sub><sup>[5]</sup> 和 SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub><sup>[6]</sup> 等材料,腔一般采用空气腔,由选择腐蚀工艺制出.

目前国际上设计的滤波器各具特色,但也各存在一些局限,比如材料生长困难、工艺难度大、调谐电压较高等.文献[1]采用 InP/Air 作为上下 DBR,只需 5 对 InP/Air 即可达到 99.9% 的反射率,但是这种结构需要腐蚀出 5 层空气层,对材料间的应力控制、选择腐蚀工艺提出了很高的要求,易出现粘连现象.文献[2]采用 InGaAsP/InP 作为下 DBR,这

种类型的 DBR 需要 40 对左右才能达到 99.9% 的反射率,这对外延生长提出了较高的要求.文献[3]采用 GaAs/AlGaAs 作为上 DBR,其厚度难以做薄,导致调谐电压较高.针对这些问题,本文提出了一种具有材料生长简单、工艺较易、调谐电压低等优点的 MOEMS 可调谐滤波器,并按照 32 波 WDM 系统的性能要求对器件各项参数,如带宽、峰值透射率、挠度和调谐速度等进行了分析和设计.

## 2 器件结构

本文的 MOEMS 可调谐滤波器以 1550nm 为中心波长,具体结构如图 1 所示.该器件采用 GaAs 衬

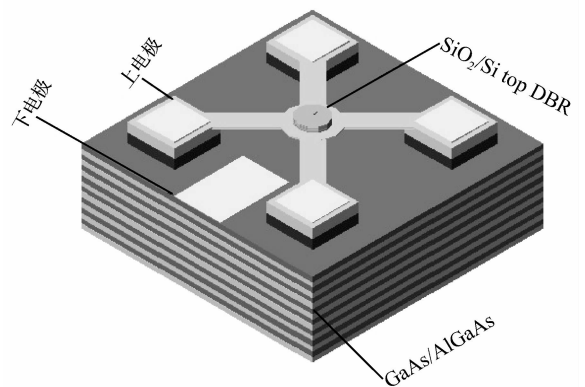


图 1 MOEMS 可调谐滤波器的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of MOEMS tunable filter

† 通信作者. Email: zd\_ming@red.semi.ac.cn

2006-06-04 收到, 2006-09-24 定稿

底,下 DBR 采用 GaAs/AlGaAs 结构.腔是空气腔,通过选择腐蚀牺牲层的方法制作出来,牺牲层采用 AlGaAs.四臂固支架的材料是 GaAs,它和  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  DBR 构成上 DBR.上电极和下电极都作在同一个表面上,图 1 中标出上下电极的具体位置.四臂固支架 GaAs 层为 p 型,牺牲层 AlGaAs 不掺杂为本征层,牺牲层下的 GaAs 层为 n 型,这样上下两个电极之间就构成了一个 PIN 结.如果在器件上加反偏电压,那么由于静电吸引,四臂固支架的中心就会向下弯曲,从而缩短腔长,达到波长调谐的目的.此 MOEMS 可调谐滤波器,采用 GaAs/AlGaAs 作为下 DBR,是因为其与 GaAs 衬底晶格匹配,并且 GaAs 和 AlGaAs 之间折射率差比较大,较小的层数即可达到 99.9% 的反射率;上 DBR 弃用 GaAs/AlGaAs,而是选择悬臂梁 GaAs +  $\text{SiO}_2/\text{Si}$ ,是因为这么做可以降低调谐电压.另外,此结构只需要选择腐蚀出一个空气腔,与 InP/Air 型可调谐滤波器需要腐蚀出多层空气层相比,工艺简单得多.

### 3 参数分析和设计

MOEMS 可调谐滤波器的参数主要有带宽、峰值透射率、调谐性能和调谐速度等.下文将按照 WDM 系统的性能要求对 MOEMS 可调谐滤波器各项参数进行分析和设计,为器件的研制提供参考.

#### 3.1 带宽

按照 ITU-T 标准,32 波 DWDM 系统各信道的间隔为 100GHz(0.8nm),也就是说 MOEMS 可调谐滤波器的带宽必须小于 0.8nm 才能满足 32 波 DWDM 系统的要求.MOEMS 可调谐滤波器基本原理是 Fabry-Pérot 腔,透射峰的带宽由下式决定:

$$\text{FWHM} = \frac{\lambda_0^2(1 - \sqrt{R_1 R_2})}{2\pi n d_0 (R_1 R_2)^{\frac{1}{4}}} \quad (1)$$

其中  $\lambda_0$  为透射波长; $R_1, R_2$  分别为上下反射镜的反射率; $d_0$  为腔长; $n$  为腔材料的折射率.图 2 给出了带宽在不同的腔长下与反射率的变化关系,计算中取  $R_1 = R_2$ .从图中可以看出,在同一腔长下,随着反射率的增加,带宽逐渐减小;在同一反射率下,带宽随腔长的增加而减小.因此,增大反射率和腔长都有助于提高带宽.通过计算可知,对于  $d_0 = \lambda_0$  的情况,要使 MOEMS 可调谐滤波器的带宽小于 0.8nm,那么上下 DBR 的反射率必须大于 99.88%.

图 3、图 4 分别给出了不同吸收系数下 GaAs/AlGaAs DBR 和 GaAs +  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  DBR 在峰值波长处反射率与对数的关系,计算中所用的折射率参数来自于镀膜软件 TFCALC,下同.从图 3 和 4 可以

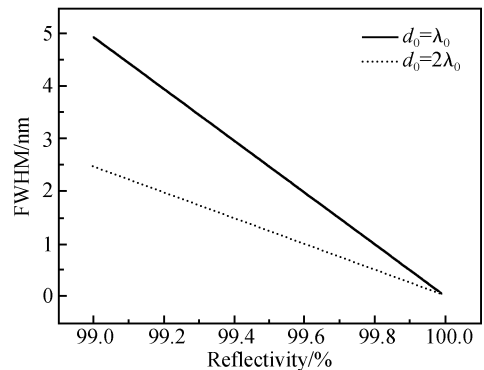


图 2 带宽与反射率的关系

Fig.2 FWHM versus reflectivity of the DBR

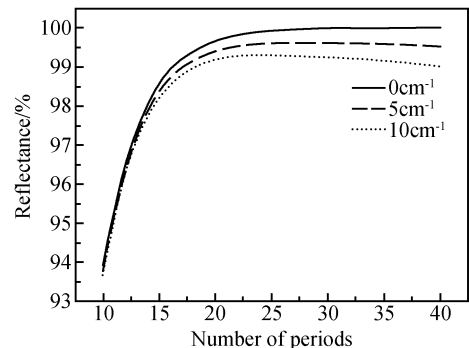


图 3 GaAs/AlGaAs 的反射率与对数的关系

Fig.3 Reflectivity of the GaAs/AlGaAs DBR versus number of periods

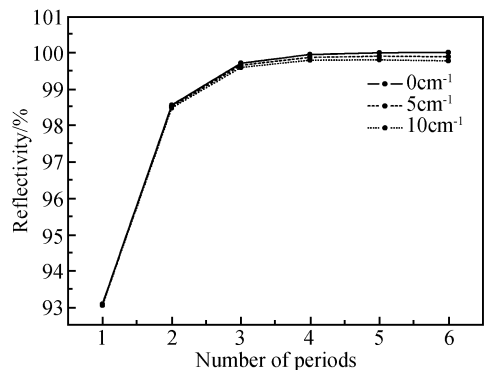


图 4 GaAs +  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  DBR 的反射率与对数的关系

Fig.4 Reflectivity of the GaAs +  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  DBR versus number of periods

看出,随着 DBR 对数的增加,反射率先是快速上升,到了一定对数后慢慢逼近 1.另外,吸收损耗对 DBR 的反射率有很大的影响,较小的吸收损耗就会使反射率明显降低.因此,在制作 DBR 的工艺过程中,必须尽量降低损耗.通过计算可知,对于吸收系数为  $0\text{cm}^{-1}$  的情况,要使上下 DBR 的反射率大于

99.88%，那么 GaAs/AlGaAs DBR 的对数至少大于 24(这里 AlGaAs 取  $Al_{0.98}Ga_{0.02}As$ , 下同), GaAs + SiO<sub>2</sub>/Si DBR 中的 SiO<sub>2</sub>/Si 的对数至少大于 4 对 (GaAs 取  $3/4\lambda_0$ , 下同)。

### 3.2 峰值透射率

峰值透射率的表达式如下：

$$T_{\max} = \frac{T_1 T_2}{(T_1 + A_1)(T_2 + A_2)} = \frac{1}{(1 + \frac{A_1}{T_1})(1 + \frac{A_2}{T_2})} \quad (2)$$

其中  $T_1, T_2$  分别为上 DBR 和下 DBR 的透射率； $A_1, A_2$  分别为上 DBR 和下 DBR 的吸收、散射等引起的损失率。由公式(2)可以看出，峰值透射率取决于损失率和透射率的比值。本文中上下 DBR 的透射率是很低的，如果吸收、散射引起的损失率稍大一些，那么峰值透射率就快速下降。这说明滤波器对 DBR 的吸收、散射损失是极其敏感的。因此在器件的制作过程中，必须降低半导体杂质浓度，提高外延层平整度，尽量减少各种损耗。

### 3.3 挠度

MOEMS 可调谐滤波器的基本结构是四臂固支梁，如图 5 所示。当四臂固支梁加反偏电压时，那么由于静电吸引，四臂梁就会向下弯曲，腔长随之缩短。这时，梁受到的力可分为两个：一个是梁中心圆受到的集中力；还有一个是四臂受到的分布力，这个力作用在四臂的各处。几项负载(如集中力、分布力)同时作用于梁某一处的挠度(向下弯曲的量)，就分别等于每项负载单独作用下该处的挠度的叠加，这就是材料力学中的叠加原理。根据叠加原理，梁中心处的挠度等于集中力负载下的挠度加上分布力负载下的挠度，整理后的公式<sup>[9]</sup>如下：

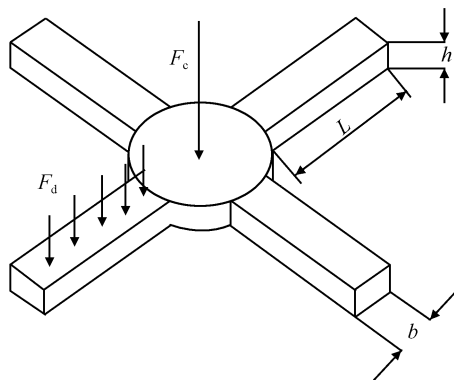


图 5 MOEMS 可调谐滤波器的力学模型

Fig.5 Mechanical model of the MOEMS tunable filter

$$w = \frac{1}{8} \times \frac{\epsilon U^2}{E' b h^3 d_0^2} (2bL^4 + A_p L^3) \quad (3)$$

其中  $w$  是梁中心的挠度； $\epsilon$  是介电常数； $U$  是反偏电压； $b$  是梁的宽度； $h$  是梁的厚度； $d_0$  是原始腔长； $L$  是梁的长度； $A_p$  为梁中心圆盘面积； $E'$  为有效杨氏模量， $E' = \frac{E}{1-\nu^2}$ ， $E$  为杨氏模量； $\nu$  为泊松比。

影响挠度  $w$  的主要有  $U, h, A_p, b, L$  等参数。从公式(3)可以看出，挠度  $w$  与  $U^2$  成正比，与  $h^3$  成反比。梁中心圆盘面积  $A_p$  也就是滤波器的通光孔，它要与光纤进行对准，因此取值不能太小，但是取得太大又会增加腐蚀圆盘底下牺牲层的时间，所以应根据实际情况来取舍。 $b$  和  $L$  对挠度  $w$  的影响在图 6 中给出，计算中采用的参数如下：调谐电压  $U$  为 2V，GaAs 的杨氏模量为  $1.19 \times 10^{11}$  Pa，泊松比  $\nu$  为 0.32， $h$  为  $0.345\mu\text{m}$  ( $3/4\lambda_0$ )， $d_0$  为 1550nm，中心圆半径为  $40\mu\text{m}$ 。从图 6 中可以看出，在同一宽度  $b$  下，随着长度  $L$  的增加，挠度  $w$  快速增加；在同一长度  $L$  下，随着宽度  $b$  的增加，挠度  $w$  逐渐减小。本文用 GaAs + SiO<sub>2</sub>/Si DBR 取代 GaAs/AlGaAs DBR 后，梁的厚度减少一个量级，所以在达到一定的挠度下，对调谐电压的要求大为降低。在图 6 中可以看出在  $b$  为  $10\mu\text{m}$ ， $L$  为  $120\mu\text{m}$  的情况下，梁中心的挠度就达到了 400nm 以上，而此时所用的调谐电压仅为 2V。

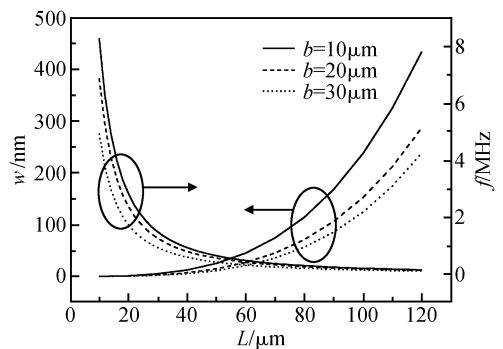


图 6 梁长与挠度、基频的关系

Fig.6 Deflection versus beam length

滤波器的调谐范围由上下 DBR 的反射带宽和透射波长变化率与腔长变化率的比例系数所决定。滤波器的调谐范围被上下 DBR 中较小带宽的那个 DBR 所限定，本文中较小带宽的 DBR 是 GaAs/AlGaAs DBR。透射波长变化率与腔长变化率的比例系数由滤波器的结构决定。如果取  $d_0$  为 1550nm，GaAs/AlGaAs DBR 为 24 对，GaAs +

SiO<sub>2</sub>/Si DBR 中的 SiO<sub>2</sub>/Si 为 4 对,那么经计算,比例系数约为 0.5. 滤波器的调谐范围可用较小带宽 DBR 的反射带宽和比例系数的乘积来估计,如果取上文计算比例系数时用的参数,那么可得此时滤波器调谐范围约为 77nm,足以覆盖 32 波 WDM 系统的波段范围.

### 3.4 调谐速度

MOEMS 可调谐滤波器的调谐速度是一个很重要的指标,它决定着器件对外界信号的响应快慢,它主要由器件的基模共振频率决定. 根据振动力学中的邓克利法和瑞利与里茨法,可以定量估计出本结构基频的下限和上限<sup>[9]</sup>:

$$\sqrt{\frac{Ebh^3}{L^3} \times \frac{1}{\left(\frac{14}{35}m + \frac{1}{4}M\right)}} \leq w_0 \leq \sqrt{\frac{Ebh^3}{L^3} \times \frac{1}{\left(\frac{13}{35}m + \frac{1}{4}M\right)}} \quad (4)$$

其中  $m$  为梁的质量; $M$  为梁中心圆的质量. 影响基频的主要有  $h, b, L$  等参数. 从公式(4)可以看出,基频与  $h^{3/2}$  成正比.  $b$  和  $L$  对基频的影响已在图 6 中给出,计算中基频取上限和下限的平均值,其他参数如下:GaAs 的杨氏模量为  $1.19 \times 10^{11}$  Pa,泊松比  $\nu$  为 0.32,  $h$  为  $0.345 \mu\text{m}$ ,密度为  $5.03 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,中心圆半径为  $40 \mu\text{m}$ . 从图 6 中可以看出,在同一宽度  $b$  下,随着长度  $L$  的增加,基频快速减小;在同一长度  $L$  下,随着宽度  $b$  的增加,基频缓慢增大. 参数  $h, b, L$  对基频的影响与它们对挠度的影响相反,因此基频与挠度是一对相互制约的参数,在设计器件中应根据实际情况来取舍.

## 4 结论

本文提出了一种新型的 MOEMS 可调谐滤波

器,并对该滤波器的带宽、峰值透射率、挠度和调谐速度等指标进行了分析. 带宽取决于 DBR 的反射率,反射率越大,带宽越小. 峰值透射率取决于损失率和透射率的比值,比值越大,透射率越低. 带宽和峰值透射率都对吸收、散射损耗敏感,要求尽量降低损耗. 挠度和调谐速度等指标与  $h, b, L$  等参数密切相关,挠度与  $L$  成正方向变化,同  $h, b$  成反方向变化,而调谐速度与各参数的关系恰好相反,它与挠度是一对相互制约的参数.

### 参考文献

- [1] Irmer S, Dalerden J, Rangelov V, et al. Ultralow biased widely continuously tunable Fabry-Pérot filter. *IEEE Photonics Technol Lett*, 2003, 15(3): 434
- [2] 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*, 2000, 85(1): 249
- [3] Vail E C, Wu M S, Li G S, et al. GaAs micromachined widely tunable Fabry-Pérot filter. *Electron Lett*, 1995, 31(3): 228
- [4] Tayebati P, Wang P, Vakhshoori D, et al. Microelectromechanical tunable filters with 0.47nm linewidth and 70nm tuning range. *Electron Lett*, 1998, 34(1): 76
- [5] Tran A, Lo Y, Zhu Z, et al. Surface micromachined tunable Fabry-Pérot filters. *IEEE Photonics Technol Lett*, 1996, 8(3): 393
- [6] Tayebati P, Wang P, Azimi M, et al. Microelectromechanical tunable filter with stable half symmetric cavity. *Electron Lett*, 1998, 34(20): 1967
- [7] Lin C, Fu J, Harris J. Widely tunable Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GaAs DBR filters with variable tuning characteristics. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2004, 10(3): 2004
- [8] 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
- [9] Greek S, Gupta R, Hjort K, et al. Mechanical considerations in the design of a micromechanical tunable InP-based WDM filter. *J Microelectromech Syst*, 1999, 8(3): 328

## Design and Analysis of a Long Wavelength MOEMS Tunable Filter

Wu Xuming<sup>1,†</sup>, Wang Xiaodong<sup>1</sup>, He Guorong<sup>2</sup>, Wang Qing<sup>2</sup>, Cao Yulian<sup>2</sup>, and Tan Manqing<sup>1</sup>

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

(2 *Laboratory of Nano-Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

**Abstract:** A novel MOEMS tunable filter is proposed. We choose GaAs/AlGaAs as the bottom distributed Bragg reflector (DBR), GaAs and SiO<sub>2</sub>/Si as the top DBR, and air as the cavity. Parameters of the device, such as the FWHM, transmittance, tuning deflection, and tuning velocity, are analyzed theoretically according to the demand of the WDM system. The influences of the depth  $h$ , width  $b$ , and length  $L$  on tuning deflection and tuning velocity are investigated in detail. The tuning deflection increases with the increase of  $L$  and decreases with the increase of  $h$  and  $b$ , while the tuning velocity behaves in the opposite way.

**Key words:** MOEMS; tunable; filter

**PACC:** 0710C

**Article ID:** 0253-4177(2007)01-0117-05

---

† Corresponding author. Email: zd\_ming@red.semi.ac.cn

Received 4 June 2006, revised manuscript received 24 September 2006