

# 数值分析渐变 DBR 对垂直腔面发射激光器 谐振腔模的影响\*

王小东<sup>†</sup> 吴旭明 王 青 曹玉莲 何国荣 谭满清

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 通过数值分析研究了含线性渐变层的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  DBR 的光学特性及其对 VCSEL 谐振腔光学特性的影响,建立了渐变型 DBR 渐变层厚度与折射率的关系,通过特征矩阵法计算了突变  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  DBR 和渐变型 DBR 的反射谱和反射相移,分析了渐变层对 DBR 反射率和反射相移的影响.对渐变型 DBR,要使 VCSEL 谐振腔满足中心波长相位匹配条件,还需要在 DBR 靠近谐振腔一侧的最前面增加一定厚度的渐变层,称为相位匹配层.通过计算,我们得到了使 VCSEL 谐振腔满足相位匹配条件时均匀层和相位匹配层的厚度.

**关键词:** 垂直腔面发射激光器; DBR; 反射谱; 反射相移; 特征矩阵法

**PACC:** 0260; 7280E; 8160C **EEACC:** 4320J

**中图分类号:** TN248 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)11-2011-04

## 1 引言

长波长 ( $1.3 \sim 1.5 \mu\text{m}$ ) 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 因其优良的特性有望成为光纤通信、光互连和并行光信息处理系统中很有吸引力的光源<sup>[1]</sup>. 采用 InAs 量子点或者 InGaAs 量子阱作为 VCSEL 有源区, 可以将 GaAs 基 VCSEL 波长扩展到  $1.3 \mu\text{m}$ . 目前已有报导采用 InAs 量子点有源区和双内腔接触电极的长波长 GaAs 基 VCSEL 实现了室温直流激励<sup>[2]</sup>, 而高反射率、低串联电阻的 GaAs 基 DBR 对于改善 VCSEL 的阈值特性以及热特性都具有很重要的意义<sup>[3,4]</sup>. 在 DBR 中异质界面处采用渐变层可以减小同型异质结的电阻和电压降<sup>[5~7]</sup>, 但是在 VCSEL 设计中使用渐变 DBR, 还必须考虑渐变 DBR 对 VCSEL 谐振腔光学特性的影响. 本文对突变型  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$  DBR 和具有线性渐变层的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  DBR 的光学特性进行了分析, 通过特征矩阵法计算了上面两种 DBR 的反射谱和反射相移, 两种结构的峰值反射率相差很小, 其中采用渐变型 DBR 的 VCSEL 谐振腔在中心波长处不满足相位匹配条件, 反射相移不为零, 当  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  DBR 中渐变层厚度一定时, 需要在 DBR 靠近谐振腔一侧的最前面

再增加一定厚度的渐变层才能使整个 DBR 在中心波长处满足 VCSEL 谐振腔相位匹配条件, 称为相位匹配层, 通过计算, 我们得到了 VCSEL 谐振腔满足中心波长相位匹配条件时, 渐变 DBR 均匀层和相位匹配层的厚度.

## 2 计算方法

利用特征矩阵方法, 可以得出膜系的如下关系<sup>[8]</sup>:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k \begin{bmatrix} \cos\delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin\delta_j \\ i\eta_j \sin\delta_j & \cos\delta_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 等式右边第一个矩阵为第  $j$  层膜的特征矩阵;  $\delta_j$  为第  $j$  层膜的光学相位差,

$$\delta_j = \frac{2\pi}{\lambda} \left( n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi} \right) d_j \quad (2)$$

$\eta_j, n_j, \alpha_j$  和  $d_j$  分别表示第  $j$  层膜的光学导纳、折射率、吸收系数和物理厚度. 对于 DBR, 在正入射情况下,  $\eta_j = n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi}$ . 那么, 膜系的反射率  $R$  及反射相移  $\phi$  可由下式得到:

$$R = \frac{(\eta_0 B - C)(\eta_0 B - C)^*}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (3)$$

$$\phi = \arctan \left[ \frac{i\eta_0 (CB^* - BC^*)}{\eta_0^2 BB^* - CC^*} \right] \quad (4)$$

\* 国家高技术研究发展计划资助项目(批准号:2001AA312180)

<sup>†</sup> 通信作者. Email: wxd@semi.ac.cn

2006-04-05 收到, 2006-04-19 定稿

其中  $\eta_0$  和  $\eta_{k+1}$  分别为入射媒质和出射媒质的光学导纳,为了简化计算,在后面的分析中,对 DBR 采取无吸收的理想情况.

### 3 计算结果分析与讨论

#### 3.1 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_yGa_{1-y}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ DBR 渐变层折射率的数值计算

根据 Oldham 等人<sup>[9]</sup>和 Cheung 等人<sup>[10]</sup>的研究,渐变层厚度取 20~30nm 左右对消除异质结势垒和降低 DBR 串联电阻效果最好,并且文献[5~7]都进行了详细的研究,因此,我们设计的渐变层厚度  $D$  为 20nm,渐变层组分  $x, y$  分别由 0~0.9 和 0.9~0 线性改变,对于组分为抛物线型渐变材料,可以采用同样的方法来计算.组分随厚度线性改变的关系可以用下面的线性函数表示:

$$x = 0.9d/D \quad (5)$$

因为折射率是组分的函数,为了将折射率离散,将渐变层按厚度均分为  $M$  层,  $M$  越大,数值计算的结果精度就越高,先通过该层在渐变层中的位置  $d(j)$  得到该层组分  $x(j)$ ,计算出每层的折射率  $n(j)$ <sup>[11]</sup>,然后就可以求出渐变层的光学厚度以及每一薄层的特征矩阵<sup>[8]</sup>,计算中,为了保证计算精度,取  $M = 1000$ .最后可以得到整个 DBR 的特征矩阵,为后面的数值分析奠定了基础.

#### 3.2 计算结果和讨论

对于图 1 的 VCSEL 结构,入射媒质和出射媒质均为 GaAs,中心波长为 1310nm,那么突变 DBR 中 GaAs 层厚度为 96nm,  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  层厚度为 110.8nm,渐变型 DBR 线性渐变层厚度为 20nm, GaAs 层厚度为 77.39nm,  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  层厚度为 89.31nm,每个 DBR 周期中 GaAs 与线性渐变层  $Al_xGa_{1-x}As$  光学厚度之和同  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  与线性渐变层  $Al_yGa_{1-y}As$  光学厚度之和均等于  $\lambda_0/4$ .

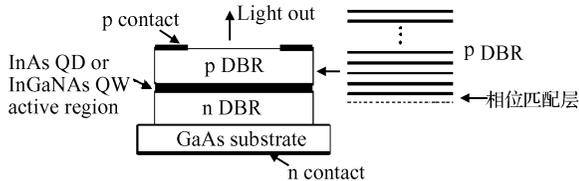


图 1 VCSEL 结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of VCSEL

图 2 是利用特征矩阵法计算得到的 30.5 对突变型  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs$  DBR 和具有线性渐变层的  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_yGa_{1-y}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$  DBR 的反射谱和反射相移.由图中可以发现,这两

种 DBR 的峰值反射率相差很小,但是渐变型 DBR 反射带宽在长波方向要比突变型 DBR 略小几个纳米,而且反射相移也产生较大蓝移,中心波长处的反射相移不等于零,这是因为由于渐变层的存在,渐变型 DBR 不满足相位匹配条件,对 VCSEL 的谐振腔模产生重要影响,导致腔模发生改变,偏离设计的腔模波长,对于长波长 VCSEL,腔模波长会偏离的更多,可能导致 VCSEL 不激励.

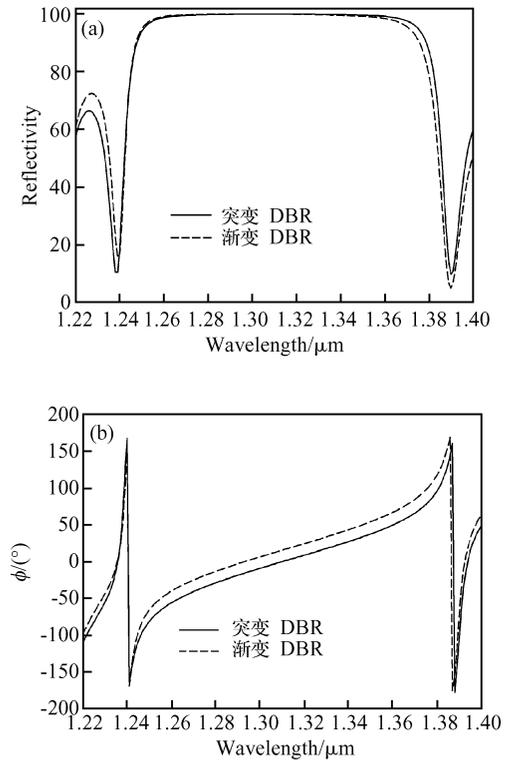


图 2 突变型 DBR 与渐变型 DBR 的反射谱(a)和反射相移(b)  
Fig.2 Reflectance spectra (a) and reflective phase shift (b) of abrupt DBR and graded DBR

表 1 是对上图数据的总结,给出了突变型 DBR 和渐变型 DBR 的带宽、峰值反射率、中心波长处的相移和相移零点的位置.可以发现,渐变型 DBR 相对于突变型 DBR,在长波方向,带宽减小几个纳米,峰值反射率变化不大,中心波长处反射相移不为零,相移零点位于 1293nm 处,使得 VCSEL 谐振腔不满足相位匹配条件,对于一个  $\lambda$  和三个  $\lambda$  的谐振腔, F-P 腔模将会分别偏离设计的中心波长(1310nm) 124nm 和 38.9nm,导致 VCSEL 不能激励.

表 1 突变型 DBR 与渐变型 DBR 数据比较  
Table 1 Data of abrupt DBR and graded DBR

	带宽 /nm	峰值反射率 /%	中心波长处相移 /( $^{\circ}$ )	相移零点 /nm
突变 DBR	100	99.8	0	1310
渐变 DBR	94	99.8	15.6	1293

要使渐变型 DBR 能够满足相位匹配条件,需要在 DBR 的前面引入相位匹配层,如图 1 中 p 型 DBR 的详细结构所示,使得 DBR 反射相移零点移动到中心波长处,通过相位匹配层来使 VCSEL 腔内光经过 DBR 反射后仍然满足相位匹配条件<sup>[12]</sup>,通过计算,如果增加的相位匹配层仍为 20nm 的  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  渐变层,  $x$  由 0~0.9 线性改变,那么整个 DBR 的相移零点将位于 1329nm 处,相对中心波长红移 19nm,因此我们需要减小相位匹配层的厚度,相应的组分也应该改变,计算得到的组分由 0.44~0.9 线性改变,厚度为 10.3nm. 图 3 是引入相位匹配层后计算得到的 30.5 对突变型  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$  DBR 和渐变型 DBR 的反射谱和反射相移.

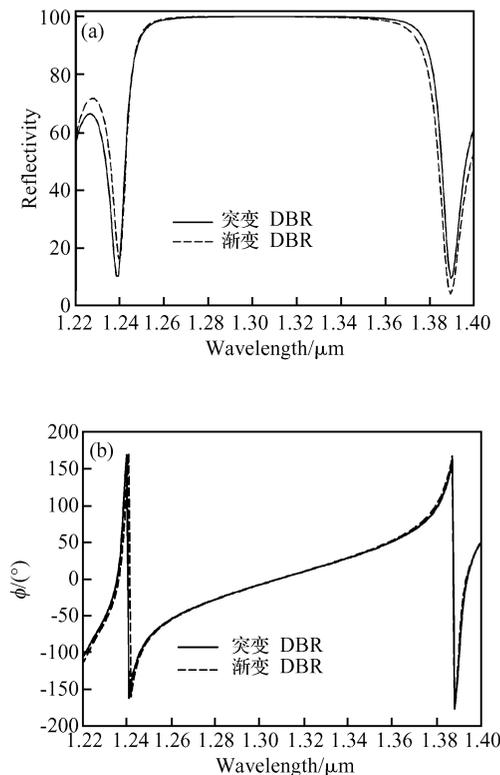


图 3 突变型 DBR 与渐变型 DBR 引入相位匹配层后的反射谱(a)和反射相移(b)

Fig.3 Reflectance spectra(a) and reflective phase shift(b) of abrupt DBR and graded DBR with phase matching layer

由图中可以发现,在 DBR 的前面引入相位匹配层后,突变型 DBR 与渐变型 DBR 的中心波长和峰值反射率基本相同,渐变型 DBR 的带宽比突变型 DBR 在长波方向略小一点,约为 5~6nm,这与没有引入相位匹配层时的情况基本相同,但引入一定厚度的渐变相位匹配层后,渐变 DBR 中心波长

处的反射相移等于零,使 VCSEL 谐振腔满足相位匹配条件.表 2 是引入相位匹配层后两种 DBR 的数据计算结果,因为数值计算的原因,中心波长处相移不严格为零,但是已经可以满足实验的要求,相移零点位于中心波长位置.

表 2 引入相位匹配层后突变型 DBR 与渐变型 DBR 数据比较

Table 2 Data of abrupt DBR and graded DBR with phase matching layer

	带宽 /nm	峰值反射率 /%	中心波长处相移 /( $^{\circ}$ )	相移零点 /nm
突变 DBR	100	99.8	0	1310
渐变 DBR	94	99.8	0.0089	1310

## 4 结论

研究了含渐变层的  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  DBR 的光学特性,建立了渐变层厚度与折射率的关系,并通过对渐变层的离散得到渐变层随厚度改变时不同位置的折射率.应用特征矩阵法计算了突变型 DBR 和渐变型 DBR 的反射谱和反射相移,对渐变型 DBR,通过引入相位匹配层来使渐变型 DBR 满足相位匹配条件,此时渐变型 DBR 在靠近谐振腔的一侧最前面需要增加一定厚度的渐变层,这样腔内光场经过渐变型 DBR 反射后才能满足相位匹配条件,即 DBR 中心波长和 VCSEL F-P 腔模一致,同时渐变 DBR 相对突变 DBR 可以显著降低异质结的串联电阻,改善 VCSEL 的阈值和热特性,从而使 VCSEL 的激射功率和线宽特性都得到提高,优化后的渐变型 DBR 对于 VCSEL 的设计具有重要意义.

## 参考文献

- [1] Karim A, Björilin S, Piprek J, et al. Long-wavelength vertical-cavity lasers and amplifiers. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 2000, 6(6): 1244
- [2] Lott J A, Ledentsov N N, Kovsh A R, et al. Multiple stacks of InAs/InGaAs quantum dots for GaAs-based 1.3 μm vertical cavity surface emitting lasers. *The 16th Annual Meeting of the IEEE*, 2003, 2: 499
- [3] Zhao Yiguang, Zhang Yusheng, Huang Xianling. Electrical, thermal and optical-waveguiding characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(11): 963 (in Chinese) [赵一广, 张宇生, 黄显玲. 垂直腔面发射半导体激光器的电、热和光波导特性. *半导体学报*, 1999, 20(11): 963]
- [4] Liu Shi'an, Lin Shiming, Kang Xuejun, et al. Numerical analysis of steady current and temperature distributions and characteristics of transverse mode in VCSEL. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(11): 1034
- [5] Chalmers S A, Lear K L, Killeen K P. Low resistance wave-

- length-reproducible p-type (Al,Ga)As distributed Bragg reflectors grown by molecular beam epitaxy. *Appl Phys Lett*, 1993,62(14):1585
- [6] Kang Xiangning, Chen Lianghui. Current transport mechanisms and  $I$ - $V$  characteristics of Bragg reflectors in VCSEL. *Research & Progress of SSE*, 2004,24(1):50(in Chinese)[康香宁,陈良惠. VCSEL 中布拉格反射体的电流机制和伏安特性. *固体电子学研究进展*, 2004,24(1):50]
- [7] Ma Lina, Guo Xia, Gai Hongxing, et al. Analysis and measurement on distributed Bragg reflectors with grading interface. *Sensor World*, 2005,6:15(in Chinese)[马丽娜,郭霞,盖红星,等. 渐变分布布拉格反射镜特性分析与测试. *传感器世界*, 2005,6:15]
- [8] Lin Yongchang, Lu Weiqiang. *Principle of optical thin films*. Beijing: National Defence Industry Press, 1990; 35 (in Chinese)[林永昌,卢维强. *光学薄膜原理*. 北京:国防工业出版社, 1990;35]
- [9] Oldham W G, Milnes A G. n-n semiconductor heterojunctions. *Solid State Electron*, 1963,6(2):121
- [10] Cheung D T, Chiang S Y, Pearson G L. A simplified model for graded-gap heterojunctions. *Solid State Electron*, 1975,18(3):263
- [11] Bhattacharya P. *Properties of III-V quantum wells and superlattices*. London: INSPEC, 1996; 283
- [12] Sherriff R E, Feld S A, Loehr J P. Comparison of exact and approximate optical designs for graded-interface distributed Bragg reflectors. *IEEE J Sel Topics Quantum Electron*, 1999, 5(3):582

## Numerical Analysis of the Effect of a DBR with Graded Interfaces on the Resonant Cavity of a VCSEL\*

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

(Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The optical characteristics and the effect on a VCSEL resonant cavity of an  $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  DBR with linearly graded interfaces are analyzed numerically. The relations are established between the refractive index and the thickness of the graded interfaces. The reflectance spectrum and the reflective phase shift are calculated for an abrupt  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  DBR and a graded interface DBR using the characteristic matrix method. The influence of the graded layer on the reflectivity and reflective phase shift of the DBR is analyzed. The result shows that an extra graded layer as a phase matching layer must be added in front of the graded interface DBR near the VCSEL resonant cavity to obtain the condition of phase matching at the central wavelength. The accurate thickness of the phase matching layer and homogeneous layer are obtained by numerical analysis on the condition of phase matching.

**Key words:** VCSEL; DBR; reflectance spectrum; reflective phase shift; characteristic matrix method

**PACC:** 0260; 7280E; 8160C      **EEACC:** 4320J

**Article ID:** 0253-4177(2006)11-2011-04

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2001AA312180)

<sup>†</sup> Corresponding author. Email: wxd@semi.ac.cn

Received 5 April 2006, revised manuscript received 19 April 2006

©2006 Chinese Institute of Electronics