

具有非均匀渐变界面 DBR 的光学特性分析*

王小东† 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)

(2006 年 2 月 22 日收到, 2006 年 3 月 13 日收到修改稿)

应用特征矩阵法研究了非均匀渐变界面 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_yGa_{1-y}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ DBR 的光学特性. 建立了非均匀渐变界面 $Al_yGa_{1-y}As$ 的折射率模型, 并得到了渐变界面特征矩阵的解析解, 通过特征矩阵法分别计算了突变 $GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ DBR 和渐变 DBR 的反射谱和反射相移, 分析了非均匀渐变层对 DBR 光学特性的影响, 对渐变 DBR, 需要在 DBR 前面再增加一定厚度的非均匀渐变相位匹配层才能使整个 DBR 满足中心波长相位匹配条件, 并通过光学厚度近似方法求出相位匹配层厚度.

关键词: DBR, 反射谱, 反射相移, 特征矩阵法

PACC: 0260, 7280E, 8160C

1. 引 言

长波长(1.3—1.5 μm)垂直腔面发射激光器(VCSEL)因其优良的特性有望成为光纤通讯、光互连和并行光信息处理系统中很有吸引力的光源^[1]. 目前已有报导长波长 GaAs 基 InAs 量子点有源区 VCSEL 实现了室温直流激射^[2,3], 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^[4,5]. 采用渐变 DBR 既可以达到高反射率, 同时相比突变 DBR 可以大大降低异质结的串联电阻. 本文对 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/GaAs$ DBR 和具有不同厚度非均匀渐变界面的 $Al_{0.9}Ga_{0.1}As/Al_yGa_{1-y}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ DBR 的光学特性进行了分析, 通过特征矩阵法计算了 DBR 的反射谱和反射相移, 几种 DBR 峰值反射率和高反射区带宽有一定变化, 而渐变型 DBR 在中心波长处不再满足相位匹配条件, 需要在 DBR 前面再增加一定厚度的非均匀渐变相位匹配层才能使整个 DBR 满足相位匹配条件, 并通过光学厚度近似方法求出不同厚度渐变层时的相位匹配层厚度.

2. 计算方法

利用光学特征矩阵方法, 可以推导出膜系的如

下关系^[6]:

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

其中 B 、 C 为后面矩阵运算结果的两个矩阵元, 可以通过它们求出膜系的组合导纳, M_j 为第 j 层膜的特征矩阵, δ_j 为第 j 层膜的光学相位差, 只考虑正入射时

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

η_j 、 n_j 、 α_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, λ 为光波长. 对于 DBR 正入射时, $\eta_j = n_j + i \frac{\alpha_j \lambda}{4\pi}$, 后面的分析我们采用无吸收的理想情况. 那么, 膜系的反射率 R 、透射率 T 及反射相移 ϕ 可由下式得到:

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

$$T = \frac{4\eta_0 \eta_{k+1}}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*}, \quad (4)$$

$$\phi = \arctan \left[\frac{i\eta_0(CB^* - BC^*)}{\eta_0^2 BB^* - CC^*} \right], \quad (5)$$

其中, η_0 和 η_{k+1} 为入射媒质和出射媒质的光学

* 国家 863 计划项目(批准号 2001AA312180)资助的课题.

† E-mail: wxd@semi.ac.cn

导纳.

3. 计算结果分析及讨论

3.1. $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ DBR 渐变层折射率模型和特征矩阵

$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ DBR 中渐变层组分 x, y 分别由 0—0.9 和 0.9—0 随厚度线性改变, 当渐变层厚度 D 较小时, 计算出的不同 Al 组分 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料的折射率^[7]与下式给出的指数分布符合的很好, 如图 1 所示, D 为 30nm 时, 两条曲线符合得很好, 因此对于线性组分渐变层的折射率可以采用指数分布模型.

$$n = n_1 e^{a z/2}, \quad (6)$$

其中 $a = 2\ln(n_2/n_1)/D$, z 为渐变层内位置, 当 $z = 0$ 和 D 时, 折射率 n 对应渐变层两边的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 对于折射率满足指数分布的渐变层, 垂直入射时, 特征矩阵 M_G 如下式所示^[8]:

$$M_G = \frac{\pi}{2} \zeta_1 \begin{bmatrix} n_2 I/n_1 & -iB/n_1 \\ in_2 Q & -H \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中

$$I = J_1(\zeta_2) Y_0(\zeta_1) - J_0(\zeta_1) Y_1(\zeta_2),$$

$$Q = J_1(\zeta_1) Y_1(\zeta_2) - J_1(\zeta_2) Y_1(\zeta_1),$$

$$B = J_0(\zeta_2) Y_0(\zeta_1) - J_0(\zeta_1) Y_0(\zeta_2),$$

$$H = J_0(\zeta_2) Y_1(\zeta_1) - J_1(\zeta_1) Y_0(\zeta_2),$$

$$\zeta_1 = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{n_1}{a}, \quad \zeta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{n_2}{a},$$

J, Y 为第一类和第二类贝赛尔函数, 那么渐变 DBR 每个周期的特征矩阵可以表示为

$$M_p = M_1 M_G^1 M_2 M_G^2 \quad (8)$$

其中, M_1, M_2, M_G^1, M_G^2 分别表示两个均匀层和两个渐变层的特征矩阵, 最后得到 DBR 的特征矩阵, 利用(1)—(5)式, 可以得出 DBR 的反射谱、透射谱及反射相移.

3.2. 计算结果和讨论

图 2 是利用特征矩阵法计算得到的 30.5 对突变 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ DBR 和具有不同厚度非均匀渐变层的 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ DBR 的反射谱和反射相移, 入射媒质和出射媒质均为 GaAs, 中心波长 1310nm, 突变 DBR 中 GaAs 层和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 层光学厚度均为 $\lambda_0/4$, 渐变 DBR 每个周期中

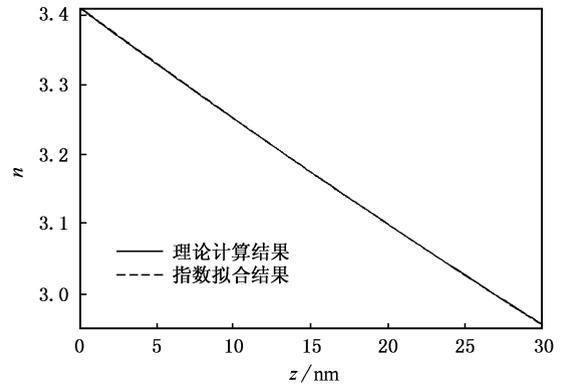


图 1 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料折射率与指数折射率分布比较

GaAs 与渐变层 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 光学厚度之和同 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 与渐变层 $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 光学厚度之和均为 $\lambda_0/4$. 随着渐变层厚度改变, 相应的均匀层 GaAs 和 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 厚度也应该改变. 由图中可以发现, 渐变 DBR 随着渐变层厚度增大, 反射带宽在长波方向减小, 峰值反射率减小, 这与文献[9]的实验结果一致, 但是当渐变 DBR 周期较多时, 其峰值反射率相对于突变 DBR 降低得很小. 并且渐变 DBR 随着渐变层厚度增大, 中心波长处反射相移也逐渐变大, 偏离相移零点越来越大, 中心波长处反射相移不为零, 这会对 VCSEL 的光学特性产生重要影响, 由 F-P 腔共振条件 $2\pi nL/\lambda_{\text{res}} + \phi_1 + \phi_2 = 2m\pi$, 其中 n 为腔折射率, L 为腔长, λ_{res} 为共振激射波长, ϕ_1 和 ϕ_2 为上、下 DBR 的反射相移, m 为整数, 当 ϕ_1 和 ϕ_2 不为零时, 会导致共振激射波长发生改变, 偏离设计的腔模波长, 严重时可能导致 VCSEL 不激射^[10].

要使渐变 DBR 满足相位匹配条件, 即中心波长处 ϕ_1 和 ϕ_2 等于零, 通过光学厚度近似法 (OTA) 可以知道由于在入射媒质和渐变型 DBR 之间还缺少一层一定厚度的渐变层, 导致渐变 DBR 不满足中心波长相位匹配条件, 相位匹配渐变层的厚度 y_{ota} 由下式给出^[11]:

$$y_{\text{ota}} = \frac{n_H D - \int_0^D n(z) dz}{n_H - n_L}, \quad (9)$$

其中 n_H 和 n_L 为渐变层两边的折射率, D 为渐变层厚度. 上式的意义就是将渐变层在 y_{ota} 的位置近似等效为一个虚拟突变界面, 界面两边的折射率为渐变 DBR 中均匀层的折射率. 因此只要在渐变 DBR 的前面增加厚度为 y_{ota} 的渐变层就可以使整个 DBR

满足中心波长相位匹配条件,相应的渐变层的组分也需要改变,如果 DBR 中渐变层厚度为 20nm, γ_{ota} 值为 10.3nm,即需要在渐变 DBR 前面增加厚度为 10.3nm 的渐变层使其满足中心波长相位匹配条件,相应组分由 0.44—0.9 线性改变.图 3 是引入相位匹配层后我们计算得到的 30.5 对突变型

$\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{GaAs}$ DBR 和不同渐变层厚度 DBR 的反射谱和反射相移.由图中可以发现,在 DBR 的前面引入相应的相位匹配层后,反射谱与图 2 基本相同,但不同渐变层厚度 DBR 在中心波长处的反射相移均为零,满足相位匹配条件,共振激射波长可以和设计的腔模波长一致.

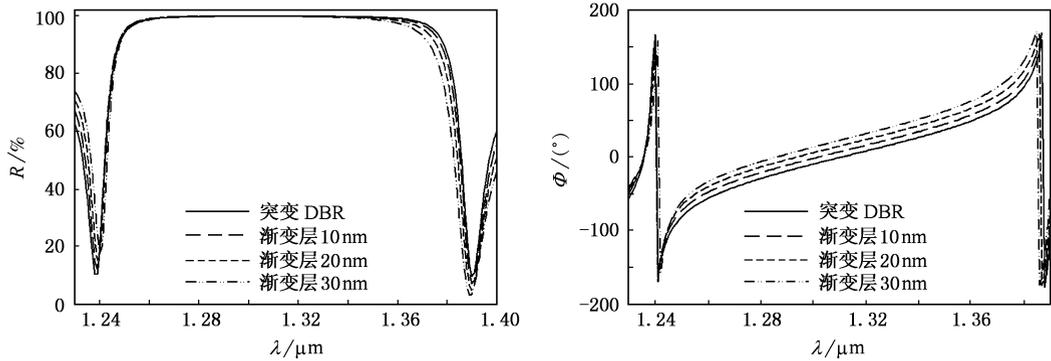


图 2 突变型 DBR 与不同厚度渐变层 DBR 的反射谱和反射相移

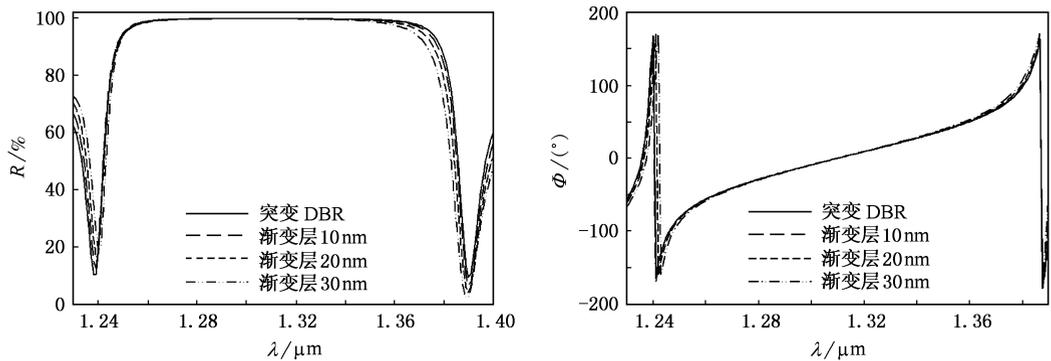


图 3 突变型 DBR 与不同厚度渐变层 DBR 引入相位匹配层后的反射谱和反射相移

通过上面的分析,在 VCSEL 结构设计中采用渐变 DBR,引入相位匹配层,可以满足高反射率和相位匹配条件,同时渐变 DBR 相对突变 DBR 可以显著降低异质结的串联电阻^[12],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^[13].

4. 结 论

研究了 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

DBR 的光学特性,当渐变层组分线性变化,且厚度较小时,渐变层折射率可以表示为指数分布,给出了渐变层特征矩阵的解析解,应用特征矩阵计算了突变 DBR 和不同渐变层厚度 DBR 的反射谱和反射相移,分析了渐变层对 DBR 光学特性的影响,对渐变 DBR 通过在其前面引入相位匹配层来使渐变 DBR 满足中心波长相位匹配条件,给出了计算相位匹配层厚度的方法,这样腔内光场经过渐变 DBR 反射后才能满足中心波长相位匹配条件,优化后的渐变 DBR 对于 VCSEL 的设计具有重要意义.

- [1] Karim A , Björln S , Piprek J *et al* 2000 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **6** 1244
- [2] Tong C Z , Niu Z C , Han Q , Wu R H 2005 *Acta. Phys. Sin.* **54** 3651 (in Chinese) [佟存柱、牛志川、韩 勤、吴荣汉 2005 物理学报 **54** 3651]
- [3] Lott J A , Ledentsov N N , Kovsh A R *et al* 2003 *16th Annual Meeting of the IEEE : Lasers and Electro - Optics Society* **2** 499
- [4] Zhao Y G , Zhang Y S , Huang X L 1999 *Chin. J. Semicond.* **20** 963 (in Chinese) [赵一广、张宇生、黄显玲 1999 半导体学报 **20** 963]
- [5] Zhao H D , Song D Y , Zhang Z F *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3744 (in Chinese) [赵红东、宋殿友、张智峰等 2004 物理学报 **53** 3744]
- [6] Lin Y C , Lu W Q 1990 *Principle of Optical Thin Films* (Beijing : National Defence Industry Press) p35 (in Chinese) [林永昌、卢维 强 1990 光学薄膜原理 (北京 : 国防工业出版社) p35]
- [7] Bhattacharya P 1996 *Properties of III - V Quantum Wells and Superlattices* (London : INSPEC , The Institution of Electrical Engineers) p283
- [8] Rakic A D , Majewski M L , Djuricic A B *et al* 2000 *IEEE Proc. 22nd International Conference on Microelectronics* **2** 607
- [9] Geels R S , Corzine S W , Scott J W *et al* 1990 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2** 234
- [10] Weber J P , Malloy K , Wang S 1990 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2** 162
- [11] Sherriff R E , Feld S A 1999 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.* **5** 582
- [12] Chalmers S A , Lear K L , Killeen K P 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1585
- [13] Geels R S , Coldren L A 1990 *Appl. Phys. Lett.* **57** 1605

Optical characteristics of DBR with inhomogeneous graded interfaces *

Wang Xiao-Dong[†] Wu Xu-Ming Wang Qing Cao Yu-Lian He Guo-Rong Tan Man-Qing

(*Institute of Semiconductors , Chinese Academy of Science , Beijing 100083 , China*)

(Received 22 February 2006 ; revised manuscript received 13 March 2006)

Abstract

Optical properties of $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ DBR with inhomogeneous graded interfaces has been investigated by using characteristic matrix method. The refractive index model and the analytic characteristic matrix of graded interfaces are obtained. The reflectance spectrum and the reflective phase shift are calculated for $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ DBR and graded interfaces DBR by using characteristic matrix method. The effect of graded interfaces on the optical properties of DBR is discussed. The result shows an extra graded phase matching layer must be added in front of the graded interfaces DBR to fulfil the conditions of phase matching at central wavelength. The accurate thickness of phase matching layer is calculated by optical thickness approximation method.

Keywords : DBR , reflectance spectrum , reflective phase shift , characteristic matrix method

PACC : 0260 , 7280E , 8160C

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

[†] E-mail : wxd@semi.ac.cn