

GaAlAs/GaAs 多量子阱激光器结构设计*

张敬明 徐俊英 肖建伟 徐遵图

李立康 杨国文 曾安 钱毅 陈良惠

(国家集成光电子学联合实验室,中国科学院半导体研究所,北京, 100083)

1991年4月16日收到,同年6月15日修改定稿

本文详细地讨论了多量子阱激光器材料的结构设计、量子阱结构对激射波长的影响以及波导限制层铝含量 x 值对光限制因子的影响。用由密度矩阵理论推导的线性光增益公式,计算了光增益。从受激阈值条件得到最佳阱数和最佳腔长。为多量子阱激光器材料结构设计提供了有效的方法。

PACC: 4255P, 6865, 7320

一、引言

量子阱激光器具有许多比 DH 激光器优越的特性。由于量子阱激光器结构复杂,而且结构参数例如量子阱数、阱宽、垒高和宽,以及波导结构参数和激光器腔长等,直接影响激光器激射波长,阈值电流等激光器的重要参数,因此进行器件结构的合理设计,对避免耗费更多的时间和经费、获得合乎需要的激光波长及其它优越的器件性能是十分有益的。

此外,器件的性能与材料生长质量,器件制作工艺有密切联系。因此,除了对量子阱材料进行最佳结构设计外,还需提高材料生长质量和采用好的条形结构工艺。条形结构种类繁多、工艺性较强,本文着重讨论 AlGaAs/GaAs 材料垂直结方向上的结构设计。

二、增益的计算

增益是半导体激光器最重要而基本的物理性质,由密度矩阵理论推导的线性增益为^[1]

$$g^{(1)}(\omega) = \frac{\omega \mu c}{n_r} \rho_{vv} \sum_{n,n'}^N \int_{E_g+E_{cn}+E_{vn'}}^{\infty} \langle R_{c,v}^2 \rangle (f_o - f_v) \frac{\Delta E}{(E_{cv} - \hbar\omega)^2 + \Delta E^2} dE_{vv}, \quad (1)$$

其中 ω 为光子角频率, μ 为导磁率, c 为光速, n_r 为有源区有效折射率, $\rho_{vv} = m^*/\pi\hbar^2 L_z$ 为折合态密度, m^* 为折合质量, $\Delta E = \hbar/\tau_{in}$ 为载流子弛豫能量展宽, $R_{c,v}$ 为偶极矩矩阵

* 中国科学院重点资助项目。

元, E_{ee} 为跃迁能量. 其余符号为常规意义. 取电子带内弛豫时间 $\tau_{in} = 0.1\text{ps}$, 异质结势垒导带偏离值 $0.67^{[3]}$. 考虑载流子感应带隙收缩和带填充效应. 计算 TE 偏振峰值增益与载流子浓度的关系如图 1 所示.

图 1 中, 从坐标原点向曲线作切线, 切点为 (n_0, G_0) . 在该点以上增益斜率明显下降, 认为切点为最佳工作点.

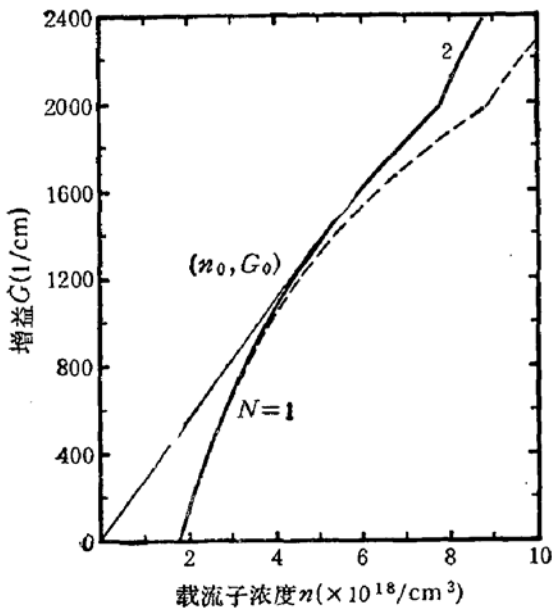


图 1 单量子阱 TE 偏振峰值增益与载流子浓度的关系...表示考虑带填充效应的结果
 $L_s = 100 \text{ \AA}$, $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 垒 $x = 0.2$

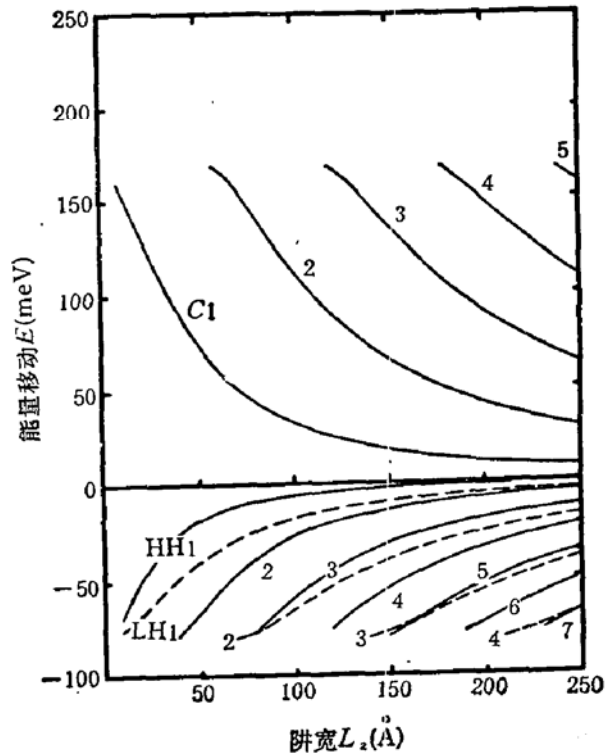


图 2 导带电子和价带重、轻空穴能量偏离带边随阱宽 L_s 的变化 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 垒 $x = 0.2$

三、量子阱结构对激光波长的影响

量子阱激光器的一个优点是激光波长可以在设计时进行适当地调谐. 这就可以由应用需要在适当范围内调谐激光波长. 量子阱中载流子能量遵守薛定谔方程, 在有限势阱中, 确定载流子能级的本征方程为

$$\sqrt{\frac{m_b^*(V_0 - E_i)}{m_w^*E_i}} = \tan\left(\sqrt{\frac{m_w^*E_iL_s^2}{2\hbar^2}}\right), \quad \text{偶对称} \quad (2)$$

$$\sqrt{\frac{m_b^*(V_0 - E_i)}{m_w^*E_i}} = -\cot\left(\sqrt{\frac{m_w^*E_iL_s^2}{2\hbar^2}}\right), \quad \text{奇对称} \quad (3)$$

其中 m_b^* 和 m_w^* 分别为垒和阱材料载流子有效质量、 E_i 和 V_0 为载流子能量本征值和势阱

深度, L_z 为阱宽. 采用文献[2]给出的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料载流子有效质量, 对 0.85 和 0.67 导带势垒偏离值计算, 结果表明二种导带势垒偏离值对第一子带电子到重、轻空穴之间的能量差值影响不大, 对子带数大的能级间跃迁的能量值影响大. 这里取导带势垒偏离值为 0.67^[3]. 从双异质结构及量子阱深综合考虑, 通常取 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料 x 值为 0.2, 由式(2,3)计算不同阱宽 L_z 引起导带电子和价带重、轻空穴能级相对带边的能量移动表示在图 2 中.

考虑增益曲线(图 1)最佳工作点 (n_0, G_0) , 载流子浓度引起带隙收缩为 $\Delta E_g = 1.6 \times 10^{-8} n_0^{1/3}$, 和载流子弛豫展宽使光谱峰值位置向高能移动. 由第一子带电子到重空穴跃迁产生激光, 激光光子能量为

$$h\nu = E_g - \Delta E_g + E_{cl} + E_{hh1} + 2\hbar/\tau_{in}. \quad (4)$$

从图 2 和式(4), 对需要的激光波长可求得量子阱宽 L_z 值. 应该指出当 L_z 不同时, 最佳工作点 (n_0, G_0) 值不同, 因而又影响 ΔE_g 和激光波长, 但其值较小, 可在材料生长中调整或者进行自洽计算. 另外, 我们计算了双量子阱结构的载流子能量与阱垒宽度的关系, 当 $L_z = L_b$ 大于 70 Å 时可以近似认为阱间电子无耦合, 多量子阱按单阱计算, 否则应按 Kronig-Penney 模型计算.

四、量子阱数 M 和激光器腔长 L

多量子阱激光器最重要的设计参数是阱数, 最佳阱数与阈值电流需要的增益有关. 假定 SCH 结构多量子阱, 总有源区厚度 < 1000 Å 时, 光限制因子 $\Gamma \approx M\Gamma_0$, 其中 Γ_0 为单阱限制因子. 在预定腔长下, 增益满足阈值条件

$$\Gamma G = M\Gamma_0 G = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2},$$

因此最佳阱数表示为

$$M_{opt} = \frac{1}{\Gamma_0 G} \left(\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right). \quad (5)$$

同样, 当阱数确定后, 可以获得最佳腔长值

$$L_{opt} = \frac{1}{2(M\Gamma_0 G - \alpha_i)} \ln \frac{1}{R_1 R_2}, \quad (6)$$

其中 α_i 为 3—50 cm⁻¹, 通常由材料和条形结构决定, 可由实验测量. 例如: 量子阱宽 100 Å, $G_0 = 1100$ cm⁻¹, $\Gamma_0 = 0.024$ (波导限制层 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x = 0.4$), $\alpha_i = 40$ cm⁻¹, $L = 100$ μm, $R_1 = 0.32$, $R_2 = 0.9$, 由式(5)得到 $M = 3.9$, 实际上取 $M = 4$. 如果我们使 α_i 降低到 10 cm⁻¹ 以下, $L = 400$ μm, 其它不变, 可以得到 $M = 1$, 即获得单量子阱结构.

假定注入载流子均匀分布在所有的阱中, 多量子阱激光器阈电流密度为

$$J_{th} = MJ = \frac{J}{\Gamma_0 G} \left(\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right), \quad (7)$$

其中 J 为单量子阱电流密度, 对双分子复合过程并且 $n = p$ 时, $J = qL_s n^2 B_{sp}$. $B_{sp} = 9 \times 10^{-11} \text{cm}^3 \text{s}^{-1}$, 为复合常数. 当条形激光器宽为 w 时, 器件阈电流为

$$I_{th} = \frac{WJ}{\Gamma_0 G} \left(\alpha_i L + \frac{1}{2} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right). \quad (8)$$

当 w 较小时, 考虑条宽对侧向限制因子及电流扩展效应等因素的影响时, I_{th} 实际不正比于 w .

对于小的量子阱宽 L_s , 即第二个子带以上的导带电子填充可以忽略时, 由第二节的增益计算可以知道, 增益近似为电流的对数关系. 因此在 (n_0, G_0) [即 (J_0, G_0)] 点附近可近似表示为:

$$\frac{G}{G_0} \simeq \ln \frac{J}{J_0} + 1. \quad (9)$$

当增益曲线的工作点由 G_0 移至 $G_0 + \frac{\alpha_i}{M\Gamma_0}$ 时, 由式(6)和式(9)得到

$$L_{opt} = \frac{1}{2M\Gamma_0 G_0} \ln \frac{1}{R_1 R_2}, \quad (10)$$

和

$$J = J_0 \exp \left(\frac{\alpha_i}{M\Gamma_0 G_0} \right). \quad (11)$$

所以一个近似的阈电流表达式为

$$I_{th} \simeq M J_0 w L \exp \left\{ \frac{\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}}{M\Gamma_0 G_0} - 1 \right\}. \quad (12)$$

显然如果阈值增益满足在最佳工作点 (n_0, G_0) 时, 指数因子为 1, 多量子阱激光器阈电流为单量子阱的 M 倍. 对于固定的阱数, 由式(10)和(12)得到阈电流与腔长的关系为

$$I_{th} = A L \exp \left(\frac{L_{opt}}{L} \right), \quad (13)$$

其中

$$A = M J_0 w \exp \left(\frac{\alpha_i}{M\Gamma_0 G_0} - 1 \right).$$

同样, 对固定的腔长, 由式(5)和(12)得到阱数与阈电流的关系为

$$I_{th} = B M \exp \left(\frac{M_{opt}}{M} \right), \quad (14)$$

其中 $B = J_0 w L / e$. 式(13)和(14)可以统一地表达为 $y = x \exp(x_0/x)$ 函数, 表示在图 3 中, 说明腔长和阱数为最佳值时可获得最低的阈值电流.

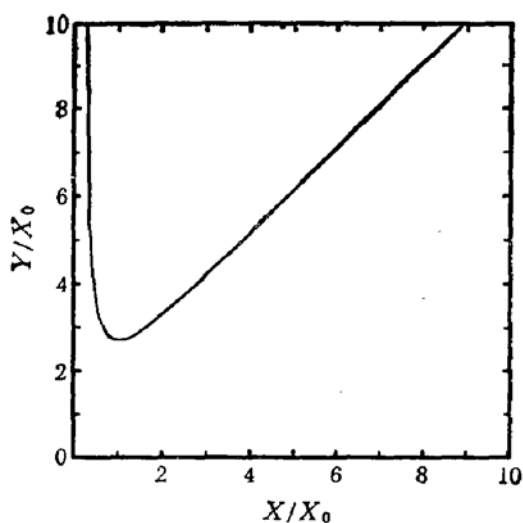


图 3 $Y = X \exp(X_0/X)$ 的函数关系
 $X = M$ 或 L

五、限制因子及波导结构参数

从第四节分析知道限制因子是激光器的一个重要参数,通过结构设计获得大的限制因子,可以充分利用量子阱材料的增益,达到阈值条件,降低阈值电流。通常激光器波导为二维波导,总限制因子为 $\Gamma = \Gamma_t \cdot \Gamma_l$ 。 Γ_l 为侧向限制因子,由条宽和条形结构确定。这里着重讨论横向波导限制因子 Γ_t 。量子阱激光器通常采用三种波导结构:突变 SCH,二次 GRIN-SCH 和线性 GRIN 结构。对于这三种结构,获得最大限制因子的总导引层厚度分别为 2000 Å, 3000 Å 和 4000 Å^[1]。较小的导引层厚度致使 Γ_t 急剧下降,较大时 Γ_t 也缓慢减小,对获得大的 Γ_t 值不利。

由五层对称平板波导的理论计算突变 SCH 结构的限制因子^[9]随波导限制层铝含量 x 值的变化。当 $c \leq \frac{u}{v} \leq 1$ 时,

$$\Gamma = \frac{u + \sin u \cos u}{u + \sin u \cos u \left(1 - \frac{u^2}{t^2}\right) + u \left(\cos^2 u + \frac{u^2}{t^2} \sin^2 u\right) \left(\frac{b}{a} - 1 + \frac{1}{w}\right)}, \quad (15a)$$

当 $0 \leq \frac{u}{v} \leq c$ 时,

$$\Gamma = \frac{u + \sin u \cos u}{u + \sin u \cos u \left(1 + \frac{u^2}{t'^2}\right) + u \left(\cos^2 u - \frac{u^2}{t'^2} \sin^2 u\right) \left(\frac{b}{a} - 1 + \frac{1}{w}\right)}, \quad (15b)$$

其中 u, v, w, t, t' 为归一化波导参数。

$$c^2 = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_3^2} \simeq \frac{n_1 - n_2}{n_1 - n_3}, \quad n_1 > n_2 > n_3,$$

$$u^2 = a^2(n_1^2 K^2 - \beta^2); \quad v^2 = a^2 K^2(n_1^2 - n_3^2);$$

$$w^2 = a^2(\beta^2 - n_3^2 K^2); \quad t^2 = a^2(n_2^2 K^2 - \beta^2);$$

$$t'^2 = a^2(\beta^2 - n_2^2 K^2).$$

对多量子阱突变 SCH 结构,有源层平均折射率为

$$n_r = \frac{ML_s \bar{n}_s + (M+1)L_b \bar{n}_b}{ML_s + (M+1)L_b}. \quad (16)$$

Al_xGa_{1-x}As 材料折射率为

$$n(x) = 3.59 - 0.710x + 0.091x^2. \quad (17)$$

计算结果,考虑量子阱在有源区的占有因子 $ML_s / [ML_s + (M+1)L_b]$,最后结果表示在图 4 中。由图 4 中看出,提高波导限制层 x 值和采取多量子阱将增加 Γ_t 。为避免消失场进入衬底材料,引起波导中光损耗增加,由计算表明限制层厚度应该大

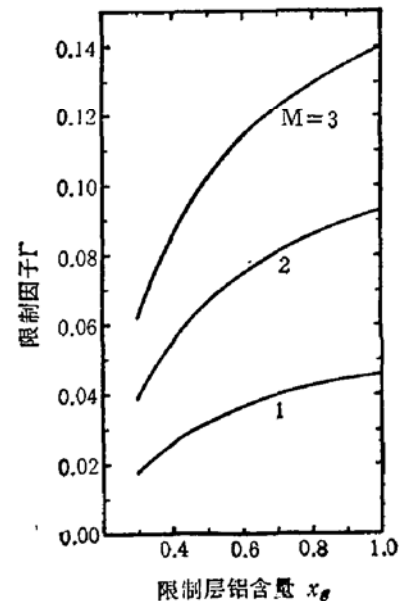


图 4 突变 SCH 结构多量子阱激光器横向光限制因子随波导限制层铝 x 值的变化
 $2L_s = 2000 \text{ Å}$, $x_b = 0.2$, $L_s = L_b = 100 \text{ Å}$

于 $1\mu\text{m}$, 通常取 $1.2\text{--}1.5\mu\text{m}$.

六、结 语

在现有 MBE 生长条件下, 从上述设计原理确定的多量子阱激光器结构, 已获得腔长为 $300\mu\text{m}$ 的宽接触 $J_{\text{th}} = 1000\text{A}/\text{cm}^2$ 的 AlGaAs/GaAs 多量子阱材料. 对于阱宽 $L_z = 100\text{\AA}$, 4 个阱的材料用改进的质子轰击条形器件工艺, 已制备出激射波长 854nm , 典型阈值电流值为 25mA (20°C), 最低值达 18mA , 线性输出功率典型值大于 10mW . $T_0 = 430\text{K}$. 温度升高到 152°C 下 $L-I$ 特性的微分量子效率无明显下降, 激光器基横模工作, 3mw 恒功率老化寿命大于 16000 小时.

参 考 文 献

- [1] 张敬明等, 半导体学报, **13**, 67 (1992).
- [2] R. Nagarajan, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-25**(6), 1161(1989).
- [3] H. Okumura, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **46**(4), 377(1985).
- [4] W. A. Paul, *et al.*, *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21**(12), 1958(1985).
- [5] M. J. Adams, *An Introduction to Optical Waveguides*, John Wiley and Sons., P. 85(1981).
- [6] H. C. Casey and M. B. Panish, *Heterostructure Laser, Part A: Fundamental Principles*, New York, Academic, 1978.

Structure Design for GaAlAs/GaAs Multiquantum Well Lasers

Zhang Jingming, Xu Junying, Xiao Jianwei, Xu Zuntu,
Li Likang, Yang Guowen, Zeng An,
Qian Yi and Chen Lianghui

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

This paper detailed the structure design for multiquantum-well lasers, the influence of quantum-well structure on excited wavelength and the dependence of optical limited factor on aluminium mole fraction x in waveguide cladding layer. The optical gain was calculated by linear optical gain expression developed with density-matrix theory. According to the threshold condition, the optimal cavity length and the optimal well number were obtained. The optimal structure design for the multiquantum-well laser was provided by this method.

PACC: 4255P, 6865, 7320