

MBE 生长高光功率转换效率 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器

徐遵图^{1,2} 杨国文² 徐俊英² 张敬明² 沈光地¹ 高 国¹ 廉 鹏¹ 陈良惠²

(1 北京工业大学电子工程系 北京市光电子技术实验室 北京 100022)
(2 中国科学院半导体研究所 国家光电子器件工程研究中心 北京 100083)

摘要 本文从理论上分析了实现 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器高光功率转换效率、高输出功率的有效途径,并优化了器件结构,可以同时获得低的腔面光功率密度和小的垂直于结平面远场发散角。利用分子束外延生长构成了高质量 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器,其最高光功率转换效率为 53%、最大输出功率为 3.7W,垂直于结平面方向远场发散角为 30°。

PACC: 4255P, 4280R, 7260F

1 引言

应变量子阱激光器在最近几年已引起人们的广泛兴趣,因为 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器具有低的阈值电流密度^[1-3],高输出功率^[4,5],高调制带宽^[6]和低的退化速率^[7]等特点,使其在光通信、军事、医疗等领域得到了广泛应用。而在许多实际应用中,象泵浦固体激光器,泵浦掺稀土的光纤放大器,激光手术刀,激光导航等领域都需要大功率半导体激光器。因此,大功率半导体激光器特别是 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器一直是人们研究的焦点。文献[8,9]中报道了大功率工作的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器,其最大输出功率分别为 2.26W 和 3.0W,最高光功率转换效率分别为 57% 和 47%。本文报道了最高光功率转换效率为 53%,最高输出功率为 3.7W 的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器。

2 高光功率转换效率 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的设计

2.1 实现高光功率转换效率量子阱激光器的途径

光功率转换效率 η 与驱动电流 I 的关系表示如下:

徐遵图 男,1964 年出生,副研究员,在职博士,现在主要从事半导体量子阱激光器结构设计,分子束外延和器件制备的研究与开发工作
1998-04-26 收到,1998-07-22 定稿

$$\eta_t = \eta_b \left(\frac{h\nu}{q} \right) \left(\frac{I - I_{th}}{IV_0 + I^2 R_s} \right)$$

利用这一关系我们可以推出光功率转换效率 η 的最大值, 称为峰值转换效率 η_t , 表示为:

$$\eta_t = \eta_b \left(\frac{h\nu}{qV_0} \right) \left[\frac{x}{(1 + \sqrt{1+x})^2} \right]$$

其中 $x = V_0 / (I_{th} R_s)$; I_{th} , η_b 都是腔长 L 的函数, 并且表达如下:

$$I_{th} = WLJ_{th} = \frac{WLJ_{tr}}{\eta_b} \exp \left\{ \frac{\alpha_i + \alpha_m}{\Gamma \beta J_{tr}} \right\}$$

$$\eta_b = \eta \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m}, \quad \alpha_m = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_f R_r} \right)$$

其中 h 为普朗克常数; $h\nu$ 为光子能量; I_{th} 为激光器阈值电流; V_0 为开启电压; R_s 为串联电阻; η_b 为微分量子效率; W 、 L 分别为激光器条宽和腔长; α_i 和 α_m 分别为内损耗和内量子效率; R_f 和 R_r 分别为前后腔面的反射率; J_{tr} 为透明阈值电流密度; β 为微分增益 计算时取值如下: $V_0 = 1.28V$, $\eta = 1$, $\alpha_i = 2\text{cm}^{-1}$, $J_{tr} = 50\text{A}/\text{cm}^2$, $\beta = 24$, $\Gamma = 0.0158$, $W = 100\mu\text{m}$, $L = 800\mu\text{m}$, $R_f = 1$, $R_r = 5\%$, $R_{sq} = 1.2 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$. 其中, R_{sq} 为薄层电阻率, $R_s = R_{sq}/A$, A 为注入电流截面积 图 1 是理论计算的结果 图 1(a) 是不同内损耗下的峰值光功率转换效率与腔长的关系, 可以看出, 内损耗越小光功率转换效率越高, 所以材料生长质量越高光功率转换效率越高 图 1(b) 表示不同薄层电阻率 R_{sq} 时峰值转换效率与腔长的关系, R_{sq} 越小峰值转换效率越高 从而为了获得高的光功率转换效率要求激光器的串联电阻越小越好, 从物理上讲是因为热功耗小的缘故 图 1(c) 表示峰值转换效率与阈值电流的关系, 从图中可以看出阈值电流越小光功率转换效率越高 因此, 我们得出提高光功率转换效率的有效途径: 提高材料质量, 降低激光器内损耗; 降低激光器的阈值电流; 降低激光器串联电阻

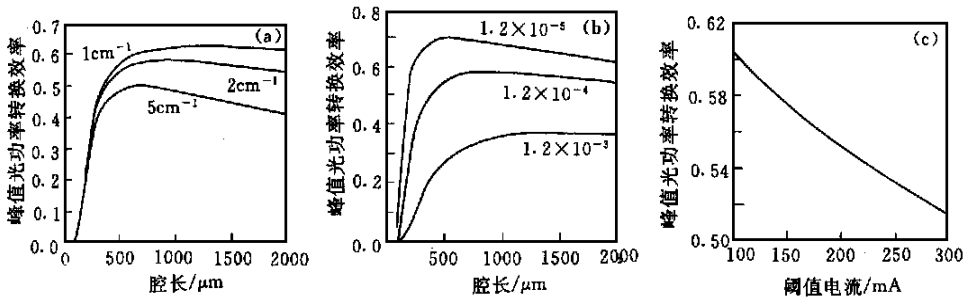


图 1 (a) 不同的内损耗下峰值光功率转换效率与腔长的关系;

(b) 不同的薄层电阻率下峰值光功率转换效率与腔长的关系;

(c) 峰值光功率转换效率与阈值电流的关系

2.2 大功率量子阱激光器结构设计

在许多实际应用中, 要求激光器具有高光功率转换效率、高输出功率和高质量光斑 为了实现这一目的, 要求激光器具有高的微分量子效率和低的阈值电流密度、较好的温度特性和低的腔面光功率密度 因此我们有必要优化 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器结构以满足应用要求 图 2 是采用等效折射率方法对线性缓变折射率分别限制 (GRN-

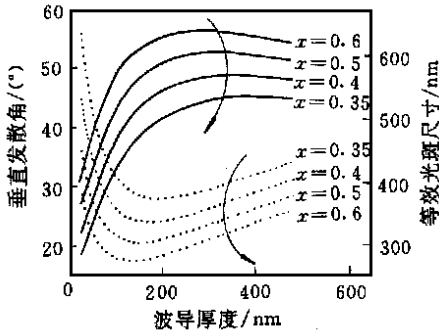


图 2 垂直于结平面方向发散角和等效光斑尺寸与波导厚度的关系

SCH) InGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱激光器结构的理论计算结果 图 2 表示不同的限制层铝组分时垂直于结平面方向基横模等效光斑尺寸和远场发散角与波导厚度的关系,基横模等效光斑尺寸定义为量子阱宽度与光学限制因子之商^[10].从图 2 中可以看出,在相同波导厚度时等效光斑尺寸随限制层铝组分的增加而减小.因此,从增大光斑尺寸减小腔面光功率密度角度出发,需要减小限制层铝组分.在限制层铝组分固定时对波导厚度的优化有两个途径:一条途径是从极值点处开始增加波导厚度;另一条途径是从极值点处开始减小波导厚度.从图 2 中还看出,从极值点开始减小波导厚度和增大波导厚度相比,垂直于结平面方向的远场发散角减小的更快,所以为了在增大光斑尺寸的同时改善半导体激光器的椭圆不对称性,我们选取了减小波导厚度的途径来增大光斑尺寸.但是,降低限制层铝组分和波导厚度又使得阈值电流密度升高,这对实现高功率转换效率是不利的,所以我们有必要进一步优化限制层组分和波导厚度

在线性 GRN-SCH 结构量子阱激光器中,阈值电流密度随波导厚度的变化存在一个极小值.我们称其为最小的阈值电流密度 J_{min} .图 3 表示 J_{min} 随限制层铝组分的变化,可以看出 J_{min} 随限制层铝组分的减小而增大.当限制层铝组分为 0.35 时, J_{min} 为 $137A/cm^2$,当限制层铝组分小于 0.3 时, J_{min} 增大的比较快.所以选取限制层铝组分为 0.35.当限制层铝组分选定以后,为了在阈值电流密度增加不大的情况下获得较大的光斑尺寸和较小的垂直于结平面方向发散角,对限制层铝组分为 0.35 时的波导厚度进行了优化.图 4 表示计算的限制层铝组分为 0.35 时的阈值电流密度增加的百分比随波导厚度的变化,可以看出在波导厚度为

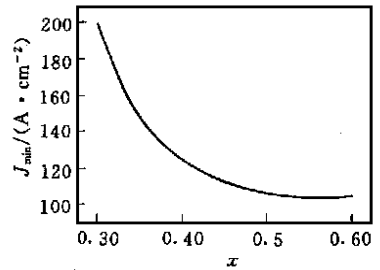


图 3 优化的最小阈值电流密度与限制层铝组分的关系

70nm 时,阈值电流密度增加 20% 左右,由原来的 $137A/cm^2$ 变为 $167A/cm^2$,这对光功率转换效率的影响是很小的,因此优化的波导厚度为 70nm.

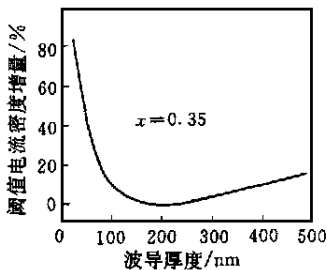


图 4 阈值电流密度的提高与波导厚度的关系

3 材料生长和器件构成

在第 2 部分从理论上分析了实现高功率转换效率的途径,并优化了具有低光功率密度和小垂直发散角的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器结构,使这种结构可同时实现高的光功率转换效率和小的垂直于结平面的远场发散角. InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器材料是采用分子束外延生长而成,结构如下:在(100)面偏 111 A 方向 4 的掺硅 GaAs 衬底上依次外延生长下列各层, $0.5\mu m$ 的 n-GaAs

缓冲层(掺 Si: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$); $0.15 \mu\text{m}$ 的 n-AlGa_{1-x}As (掺 Si: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 组分缓变层, x 值从 0.1 升高到 0.35; $1.6 \mu\text{m}$ 的 n-Al_{0.35}Ga_{0.65}As 限制层, 其中 95% 的 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 掺 Si: $8 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 波导附近 5% 的 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 采用缓变掺杂; 70nm 非掺的线性缓变折射率 AlGa_{1-x}As 下波导层, x 值从 0.35 下降到 0.1; 10nm 的 GaAs, 7nm 的 In_{0.2}Ga_{0.8}As 和 10nm 的 GaAs 组成的单量子阱区; 70nm 的非掺的线性缓变折射率 AlGa_{1-x}As 上波导层, Al 组分 x 从 0.1 上升到 0.35; $1.5 \mu\text{m}$ 的 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 上限制层, 其中 90% 的 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 掺 Be: $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 波导附近 10% 的 Al_{0.35}Ga_{0.65}As 采用缓变掺杂; 100nm 的 AlGaAs 组分缓变层; 最后生长 200nm 的 P⁺-GaAs (掺 Be: $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 和 20nm 的 P⁺⁺-GaAs (掺 Be: $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) 欧姆接触层 在整个生长过程中, 衬底不断旋转, 且外延生长过程连续进行 n-AlGaAs 和 p-AlGaAs 在接近波导处采用缓变降低的掺杂形式是为了减小内损耗, 提高量子效率, 以获得高的光功率转换效率 我们用 MBE 生长的激光器材料, 制备出 $100 \mu\text{m}$ 氧化物条形激光器, 具体制备过程如下: 用等离子体增强化学气相淀积 (PECVD) 方法淀积 120nm SiO₂, 然后套刻电极窗口, 用氢氟酸缓冲腐蚀液腐蚀掉台上的 SiO₂, 最后将片子减薄至 $100 \mu\text{m}$, TiPtAu 和 AuGeNi 分别做为 P 型和 N 型的欧姆接触电极

4 实验结果和分析

4.1 激光器的内损耗和内量子效率

图 5 表示激光器的微量量子效率的倒数随激光器腔长的变化, 从这一关系推出了激光器的内损耗 α 和内量子效率 η , 其值分别为 2cm^{-1} 和 92%. 低的内损耗和高的内量子效率的获得归结于高质量的材料生长及优化的掺杂分布, 从而为获得高光功率转换效率提供了保证

4.2 腔长、增透膜反射率对光功率转换效率的影响

为了从实验上验证腔长和腔面反射率对光功率转换效率的影响, 我们将所制备的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器样片解理成五种不同腔长, 分别为 400 、 600 、 800 、 1000 、 $1200 \mu\text{m}$. 并将五种不同腔长的器件分成三组进行镀膜实验, 首先将三组器件同时镀高反射膜, 然后

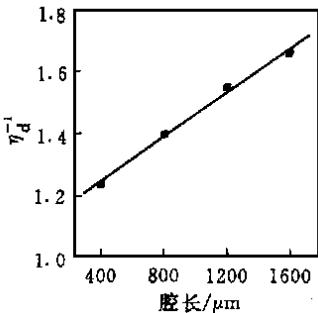


图 6 微量量子效率的倒数与腔长的关系

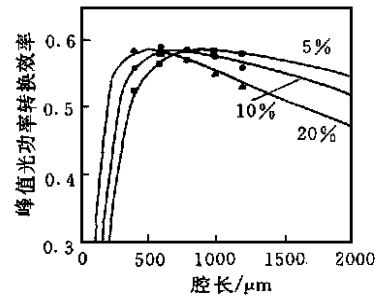


图 5 峰值光功率转换效率与腔长的关系

分别镀反射率为 5%、10%、20% 的增透膜 对上述几种激光器的特性进行了测量, 获得了在不同腔长和不同增透膜反射率情况下的峰值转换效率, 如图 6 所示 图中实线为理论计算结果, 不同形状的点为实验结果 可以看出理论和实验符合得很好 当 R_f 改变时, 理论和实验都表明峰值光功率转换效率的最大值基本保持不变, 但对应的腔长不同 一般情况下针对不同的要求, 所设计的激光器腔长是不同的, 这时为了获得高的光功率转换效率要优化激光器所镀增透膜的反射率 对输出功率较大的激光器, 一般采用的腔长为 $800 \sim 1000 \mu\text{m}$ 左右, 这时优化的增透膜反射率为 5~7% 左右

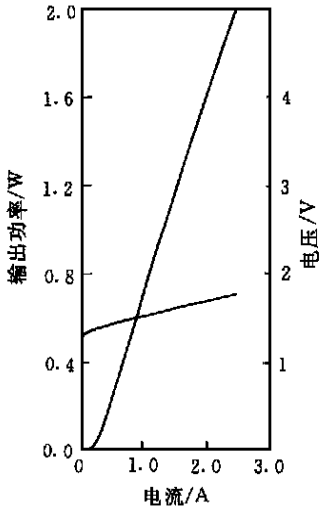


图7 典型的激光器光电特性

这一特性用热阻来表征。热阻大，结温升高，对半导体激光器特性影响大，表现为波长变长，阈值电流增大，微分量子效率下降等。所以减小热阻是半导体激光器大功率工作的前提。我们对 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的热特性进行了测量和分析。测量的波长随温度的变化关系为 0.3nm/K。利用这一关系进一步测量了激光器的热阻和结温升。热阻值为 8K/W，结温升和工作电流的关系示于图 9。图 9 中的点为测量结果，实线为理论计算结果，结果表明，在 6A 工作范围内结温升小于 65K，显示了良好的散热特性。半导体激光器的热特性还表现在激光器的光功率电流特性的非线性方面。图 8 中的实线和虚线分别为测量和计算的光功率电流特性，可以看出当输出功率大于 2W 时，曲线明显发生弯曲，这是由于激光器发热导致的阈值电流增大、微分量子效率下降所造成的。在计算时考虑了下列主要热源并采用了常用经验公式，电阻损耗发热： I^2R_s ，阈值损耗发热： $I_{th}(T)E_g$ ，载流子热损耗发热： $I\Delta E_g$ ，量子效率下降引起的发热： $[1 - \eta_l(T)]E_g[I - I_{th}(T)]$

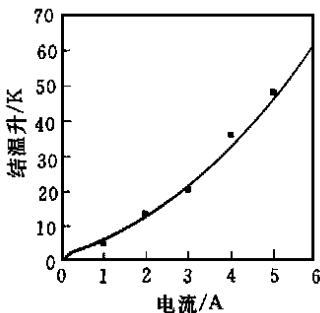


图9 结温升与电流的关系

4.3 激光器的电光特性

我们对所研制的 800μm 腔长激光器电光特性，如光功率电流特性、伏安特性、光功率转换效率等进行了测量，典型的测量结果如图 7、8 所示。由图 7 可以看出，激光器的阈值电流为 250mA，串联电阻为 0.15 欧姆，微分量子效率为 0.9W/A。从图 8 可以看出，在输出功率为 2W 时其光功率转换效率为 48%，在输出功率为 0.9W（工作电流为 1.25A）时光功率转换效率最高，其值为 53%。激光器的最大输出功率为 3.7W。我们还测量了激光器的远场发散角和发射波长，发散角为： $8 \times 30^\circ$ ；在 1W 时的发射波长为 980.5nm。

4.4 激光器的热特性

由于半导体激光器的体积小，工作电流密度高，所以大功率工作需要很好的散热特性，

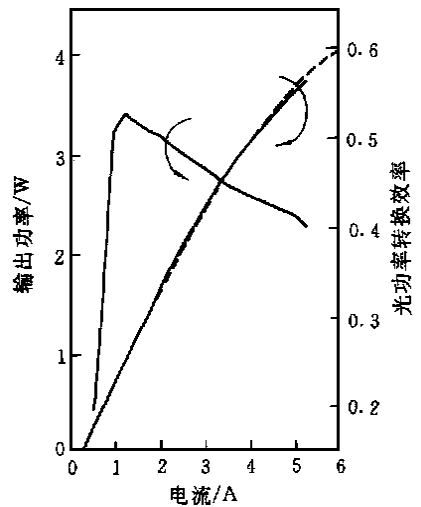


图8 光功率和光功率转换效率与电流的关系
虚线为计算结果，实线为测量结果

了常用经验公式，电阻损耗发热： I^2R_s ，阈值损耗发热： $I_{th}(T)E_g$ ，载流子热损耗发热： $I\Delta E_g$ ，量子效率下降引起的发热： $[1 - \eta_l(T)]E_g[I - I_{th}(T)]$

$$\eta_l(T) = \eta_l(T_1) \exp\left[\frac{T - T_1}{T_0}\right]$$

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_1) \exp\left[\frac{T - T_1}{T_0}\right]$$

$$P = \eta_l(T) \frac{h\nu}{q} [I - I_{th}(T)]$$

其中 P 为输出功率，量子阱禁带宽度 $E_g = 1.24/\lambda$ ， $\lambda =$

980nm, $\Delta E_g = 100\text{meV}$, $T_0 = 150\text{K}$, 其它参数取值为 4.3 节中的测量值

5 结论

利用分子束外延生长并制备了高功率转换效率、大功率工作的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器。最高光功率转换效率为 53%，在 2W 时获得了 48% 的光功率转换效率，最高输出功率为 3.7W。这一结果的获得归功于以下几点：优化的大光腔结构、器件腔长和增透膜反射率；高质量的材料生长；低的串联电阻；低的阈值电流。

参 考 文 献

- [1] H. K. Choi, C. A. Wang, Appl Phys Lett, 1990, 57(2): 321~ 323
- [2] N. Chand, E. E. Beeker *et al*, Appl Phys Lett, 1991, 58: 1704~ 1706
- [3] R. L. Williams, M. Dion *et al*, Appl Phys Lett, 1991, 58: 1816~ 1818
- [4] D. F. Welch, W. Striefer *et al*, Appl Phys Lett, 1990, 56(1): 10
- [5] C. A. Wang, H. K. Choi, IEEE J. Quantum Electron, 1991, QE27: 681~ 686
- [6] L. F. Lester, S. S. Q. Keefe *et al*, Electronics Lett, 1992, 28: 383~ 385
- [7] R. G. Waters, D. P. Boar *et al*, IEEE Photonics Technol Lett, 1990, 21: 531~ 533
- [8] C. A. Wang, H. K. Choi, J. N. Walpole *et al*, Electronics Lett, 1994, 30(8): 646~ 648
- [9] D. F. Welch and W. Streifer, Appl Phys Lett, 1990, 56(1): 10~ 12
- [10] L. J. Mawst, A. Bhattacharya, J. Lopez *et al*, Appl Phys Lett, 1996, 69(11): 1532~ 1534

High Power Conversion Efficiency InGaAs/GaAs/AlGaAs Strained Layer Quantum Well Lasers Grown by MBE

Xu Zuntu^{1,2}, Yang Guowen², Xu Junying², Zhang Jingming²,
Shen Guangdi¹, Gao Guo¹, Lian Peng¹, Chen Lianghui²

(1 Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University and
Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing 100022)

(2 Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences and National Engineering
Research Center for Optoelectronics Devices, Beijing 100083)

Received 26 April 1998, revised manuscript received 22 July 1998

Abstract We analyzed the effective method to realize high power conversion efficiency and high output power InGaAs/GaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers and optimized its structure. In this structure, we can achieve low light power density in mirror and small divergence angle in vertical direction to junction plane. High quality InGaAs/GaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers were grown by MBE, its maximum power conversion efficiency is 53%, the maximum output power is 3.7W, the divergence angle in vertical direction to junction plane is 30°.

PACC: 4225P, 4280R, 7360F