

InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器

徐遵图^{1,2} 徐俊英¹ 杨国文¹ 张敬明¹ 陈昌华¹ 陈良惠¹ 沈光地²

¹ 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
² 北京工业大学光电子技术实验室 北京 100022

提要 优化设计了既能实现较小垂直方向远场发散角,又能降低腔面光功率密度的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变层量子阱激光器,并计算了该结构激光器实现基横模工作的脊形波导结构参数。利用分子束外延生长了 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器材料并研制出基横模输出功率大于 140 mW,激射波长为 980 nm 的脊形波导应变量子阱激光器,其微分量子效率为 0.8 W/A,垂直和平行结平面方向远场发散角分别为 28°和 6.8°。

关键词 高质量光束,高功率,基横模,分子束外延

大功率基横模半导体激光器在数字光读写系统、光通讯和泵浦固体激光器等方面得到了广泛的应用。这些重要的应用要求半导体激光器具有上百毫瓦或几百毫瓦的基横模输出功率^[1],对某些应用还要求激光器具有高质量的光斑特性及单纵模工作。因此,研究高质量光束、高功率基横模工作半导体量子阱激光器有十分重要的意义。实现这些要求的关键是减小垂直结平面方向远场发散角、控制激光器在高功率下的稳定基横模工作、激光器腔面的光学保护及功率转换效率。近几年来随着光纤通信技术的发展,掺铒光纤放大器已在全光光通讯中发挥了重要的作用,而掺铒光纤放大器中关键器件掺铒光纤放大器泵浦源是具有高质量光束、大功率基横模工作的 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器^[2-4]。目前该器件的发展有几个方向:(1) 减小垂直方向发散角,从而减小常规半导体激光器的椭圆不对称性,提高光束的质量,大大提高光纤耦合效率;(2) 提高激光器的基横模输出功率,从而保证在大功率下光功率电流曲线的线性特性,抑制大电流下由于扭折造成的耦合效率突然下降问题;(3) 提高激光器的功率转换效率。因此,我们开展了实现 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变层量子阱激光器高效率、高光束质量、大功率基横模特性的研究,并取得了很大的进展。本文报道了垂直方向发散角为 28°,基横模输出功率大于 140 mW 的脊形波导条形 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器。

1 器件结构

1.1 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器结构的优化和分子束外延

目前较为典型的缓变折射率限制(GRIN-SCH)半导体量子阱激光器虽然在低阈值电

流、高量子效率等方面发挥了巨大的优势,但由于追求低的阈值电流密度,所用结构对光场具有强烈的限制作用,这就使得垂直结平面方向远场发散角很大,一般在 $45^\circ \sim 60^\circ$ 之间^[5,6],导致了非常不对称的椭圆远场光斑,这对泵浦固体激光器和与光纤耦合都是十分不利的。为了改善常规半导体激光器垂直结平面方向远场发散角大的缺点,提高半导体激光器的光束质量;同时为了减小腔面光功率密度,提高输出功率,我们优化设计了缓变折射率分别限制半导体量子阱激光器波导结构,目的是通过增大垂直光场的宽度,来同时减小腔面光功率密度和垂直结平面方向远场发散角。光场的扩展又使光学限制因子减小,从而也减小了载流子注入引起的折射率变化对基横模特性带来的不利影响^[7],这对提高脊形波导半导体量子阱激光器的基横模输出功率是十分有利的。

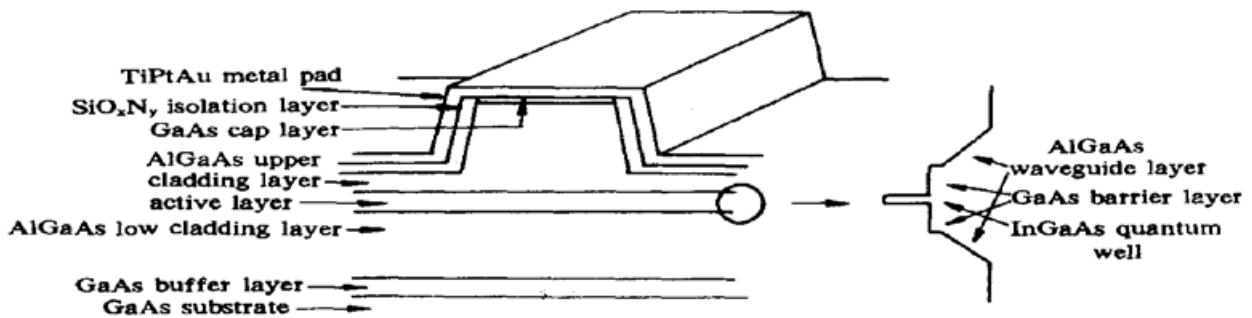


图 1 脊形波导 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器结构示意图

Fig. 1 Structure of the ridge waveguide InGaAs/GaAs/AlGaAs strained quantum well laser

图 1 为 InGaAs/GaAs/AlGaAs 线性缓变折射率波导结构及脊形波导结构示意图;图 2 是采用等效折射率方法对线性缓变折射率波导所做的理论计算结果。图 2 中实线表示在限制层铝组份不同时垂直方向远场发散角与波导厚度的关系,可以看出在同一波导厚度值时,当限制层铝组份小时,垂直方向远场发散角小。所以从减小发散角的角度出发希望限制层铝组份越低越好,但是,因为太低的限制层铝组份对载流子具有低的势垒会引起严重的载流子泄漏,从而降低内量子效率和增大阈值电流密度。现有的实验结果表明限制层铝组份为 0.4 时不会影响内量子效率和阈值电流密度的值。从图 2 还可以看出当固定限制层铝组份为 0.4 时,其远场发散角随波导厚度的变化有一最大值,在其两侧垂直方向发散角都减小,在薄的波导方向减小更快,当波导厚度由 150 nm 减小到 70 nm 时,垂直方向发散角由 45° 减小到 30° 左右。图 2 中点线表示限制层铝组份为 0.4 时等效的光斑尺寸与波导厚度的关系,这里等效光斑尺寸的定义是量子阱的宽度与光学限制因子的商^[8]。从图中可以看出随波导厚度减小等效光斑尺寸增大。当波导厚度由 150 nm 减小到 70 nm 时,等效光斑尺寸由 330 nm 增加到 420 nm。因此,我们得出减小垂直方向远场发散角与减小光功率密度是一致的结

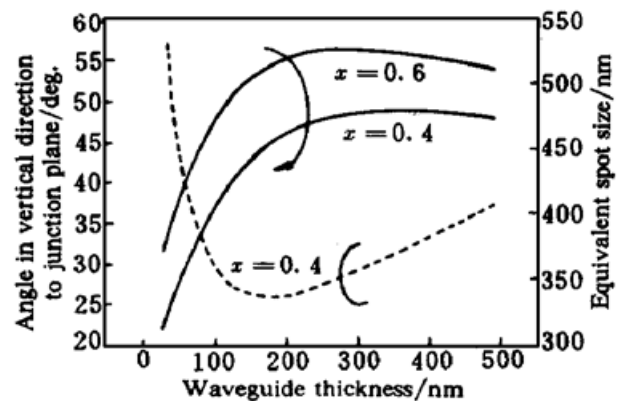


图 2 垂直方向远场发散角和等效光斑尺寸随波导厚度的变化

Fig. 2 Divergence angle and equivalent spot size in the direction vertical to the junction plane versus waveguide thickness

论。这一结论的物理原因是当波导厚度减小时近场光扩展增大。近场光扩展增大带来的缺点是光学限制因子减小, 阈值电流密度增大。但是, 如果进行合理的优化设计可以使阈值电流密度增加不多, 同时又能获得大的等效光斑尺寸和较小的垂直方向远场发散角。通过计算当波导厚度减小到 70 nm 时, 限制因子减小了 14%, 阈值电流提高了 15%, 但和常规波导 150 nm 结构的半导体激光器相比, 垂直方向发散角减小了三分之一, 等效光斑尺寸增加了三分之一。因此在保持激光器具有较低的阈值电流密度、高的内量子效率、高质量光束和低的腔面光功率密度的情况下, 优化的结构参数是限制层铝组份为 0.4, 线性缓变折射率波导层厚度为 70 nm。

InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱半导体激光器材料是用分子束外延(MBE)生长而成。其生长结构如下: 在 *n*-GaAs 衬底上生长 500 nm 的 GaAs 缓冲层(掺 Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 100 nm 的组份缓变过渡层(掺 Si: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 1500 nm 的 *n*-Al_xGa_{1-x}As 下限制层(掺 Si: $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$); 70 nm AlGaAs 下组份缓变波导层(Al 的 *x* 值从 0.4 下降到 0.1); InGaAs/GaAs 应变单量子阱, GaAs 层厚度为 15 nm, InGaAs 量子阱厚度为 7.5 nm, 铟组份为 0.2; 70 nm Al_xGa_{1-x}As 上组份缓变波导层(Al 的 *x* 值从 0.1 上升到 0.4); 1500 nm 的 *p*-Al_xGa_{1-x}As 上限制层(掺 Be: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 100 nm 的组份缓变过渡层(掺 Be: $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$); 200 nm 的 *p*⁺-GaAs (掺 Be: $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 和 10 nm 的 *p*⁺⁺-GaAs (掺 Be: $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 欧姆接触层。其中波导层和应变量子阱层不故意掺杂, GaAs 生长温度为 600°C, AlGaAs 生长温度为 700°C, InGaAs 量子阱层生长温度为 560°C. AlGaAs 层向 InGaAs 层的生长温度过渡是在生长 GaAs 的过程中进行的, 整个生长过程没有任何停顿。

1.2 脊形波导条形量子阱激光器的结构参数设计及构成

为了获得高功率基横模输出, 我们对脊形波导 InGaAs/GaAs/AlGaAs 折射率缓变分别限制单量子阱激光器进行了研究, 研究脊形波导结构是因为该结构具有模式可控的介质波导

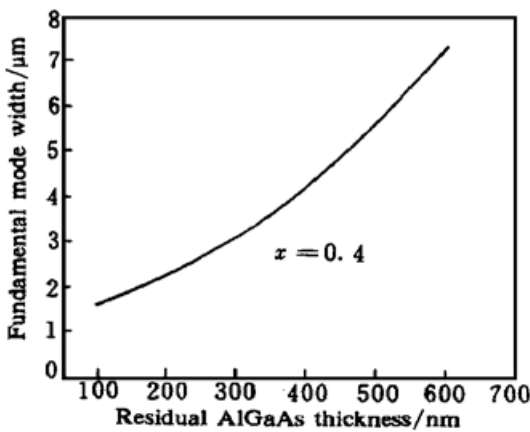


图3 基横模条宽与剩余的限制层 AlGaAs 厚度的关系

Fig. 3 Fundamental mode width versus residual cladding layer thickness

特性、低的阈值电流密度和高的微分量子效率。用等效折射率方法从理论上分析了脊形波导量子阱激光器实现基横模工作的结构参数, 图 3 表示限制层铝组份为 0.4, 波导厚度为 70 nm 时的基横模条宽与剩余的限制层 AlGaAs 厚度的关系。应综合考虑器件的特性来选取脊形波导的条宽和腐蚀深度, 主要考虑下列几个因素: (1) 电流的扩展, (2) 腔面的光功率密度, (3) 串联电阻。一般而言, 条宽越宽, 激光器的串联电阻越小; 腐蚀深度越大, 剩余的上限制层的厚度越小, 其扩展电流就越小。但由于受到基横模工作特性的限制, 腐蚀深度不能太深, 并且条宽也不能很宽。为了减小扩展电流, 一般剩余的 AlGaAs 厚度小于 0.4 μm 为宜, 从图 3 可以看出对应的限制层铝组份为 0.4 时的基横模条宽为 4.5 μm 左右。在综合考虑了上述三个因素之后, 取剩余的

AlGaAs 厚度等于 0.35 μm, 条宽为 3.5 μm 左右。

在结构设计的基础上我们使用上述分子束外延生长的材料制备了脊形波导条形量子阱激光器。首先用光刻方法沿片子的 (110) 方向刻出一定宽度的条形, 然后腐蚀出台面脊形波导, 腐蚀后的条宽为 3.5 μm, 脊形波导台面高度按上述设计控制在一定的高度, 使剩余的 AlGaAs 限制层厚度为 0.35 μm。脊形波导制备完以后, 采用 PECVD 的方法在片子的表面淀积一层

SiO_xN_y 作为电隔离绝缘层。然后再用光刻的方法刻出电极窗口, P 型面溅射 Ti/Pt/Au, N 型面蒸发 AuGeNi/Au 作为欧姆接触电极。最后解理成 800 μm 腔长的激光器, 激光器的两个腔面分别镀高反膜和增透膜, 反射率分别为 95% 和 10%。长腔为 800 μm 是为了减小热效应; 降低注入载流子密度, 抑制空间烧孔效应。

2 器件特性

我们测量了 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的伏安特性、微分串联电阻、光功率电流曲线、微分量子效率、远场发散角以及发射光谱等, 其结果如图 4~ 6 所示。激光器的阈值电流典型值为 20 mA, 外微分量子效率为 0.8 W/A, 线性输出功率大于 140 mW, 垂直于结平面方向远场发散角为 28°, 平行于结平面方向远场发散角为 6.8°, 发射波长为 980

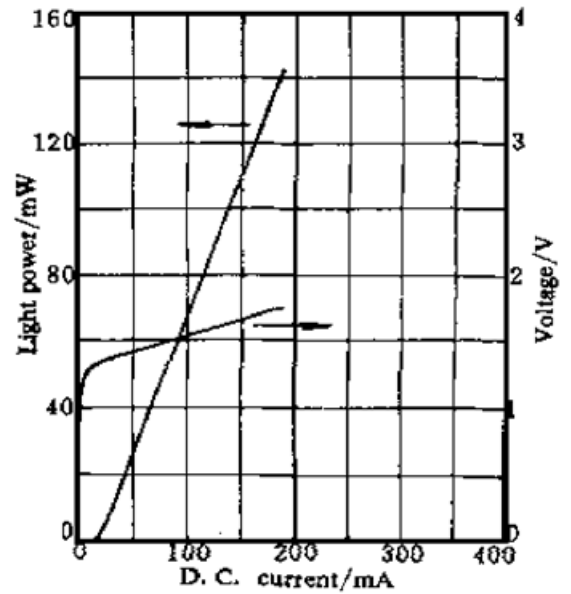


图 4 光功率和电压与电流的关系曲线
Fig. 4 Light power and voltage versus the driven current

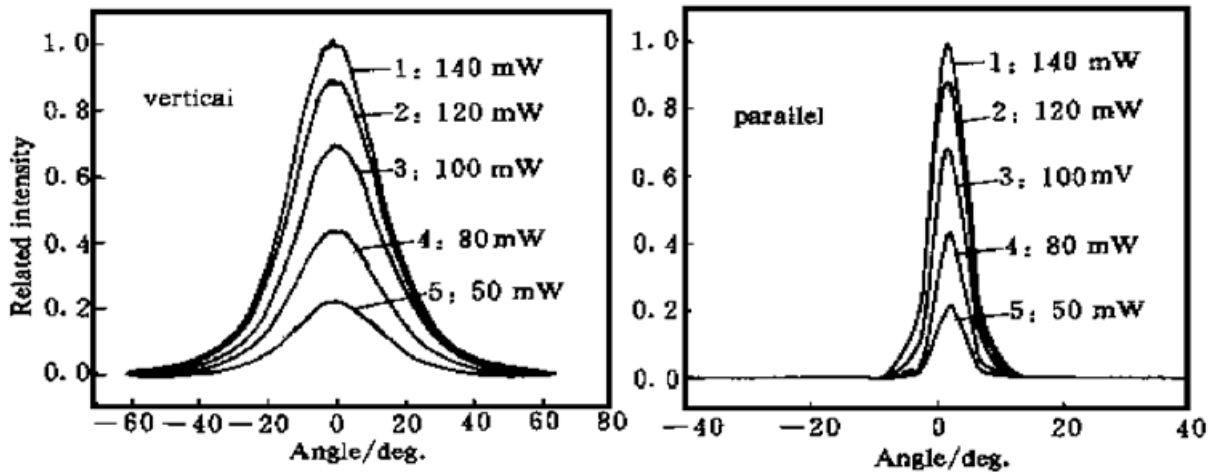


图 5 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器远场分布
Fig. 5 Far field distribution of the InGaAs/GaAs/AlGaAs strained quantum well laser

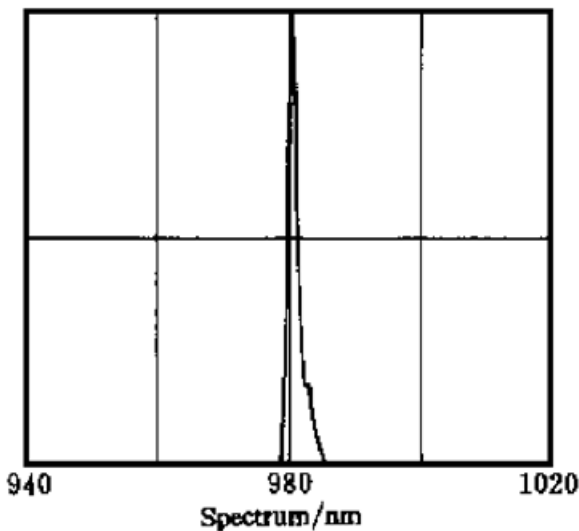


图 6 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器光谱图
Fig. 6 Spectrum of the InGaAs/GaAs/AlGaAs strained quantum well laser

nm。

图 5 表示激光器在不同输出功率时的远场特性,可以看出当激光器工作在不同输出功率时,其光束的远场发散角在垂直与平行两个方向都保持不变,证明激光器的基横模输出功率已超过 140 mW。

参 考 文 献

- 1 Heinz Jaeckel, Gian-Luca Bona, Peter Buchmann *et al.*. Very high-power (425 mW) AlGaAs SQW-GRIN SCH ridge laser with frequency-doubled output 41 mW at 428 nm. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1991, **27**(6): 1560~ 1567
- 2 Ming C. Wu, N. A. Olsson, D. Sivco *et al.*. A 970 nm strained-layer InGaAs/GaAlAs quantum well laser for pumping an erbium-doped optical fiber amplifier. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(3): 221~ 223
- 3 Akihiko, Kasukawa, Michio Ohkubo *et al.*. 980 nm and 1480 nm high power laser modules for Er-doped fiber amplifiers. *Optoelectronics Devices and Technologies*, 1994, **9**(2): 219~ 230
- 4 L. S. Heath, K. Meehan, A. K. Chin *et al.*. 980 nm ridge waveguide laser reliability at 100 mW. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(16): 1869~ 1871
- 5 S. Uehara, M. Okayasu, T. Takeshita *et al.*. An 0.98 nm InGaAs strained layer quantum well, an efficient pumping source for Er³⁺-doped fiber amplifiers. *Optoelectronics Devices and Technology*, 1990, **5**(1): 71~ 80
- 6 Xu Zuntu, Yang Guowen, Xiao Jianwei *et al.*. Low threshold single transverse mode ridge waveguide GaAs/AlGaAs quantum well lasers. *Chinese Journal of Semiconductors* (半导体学报), 1995, **16**(8): 598 ~ 602 (in Chinese)
- 7 B. Garrett, J. E. Whiteaway. Self stabilisation of the fundamental lateral mode in index-guide semiconductor lasers. *IEE Proceedings-J*, 1987, **134**(1): 11~ 16
- 8 L. J. Mawst, A. Bhattacharya, J. Lopez *et al.*. 8 W continuous wave front-facet power from broad-waveguide Al-free 980 nm diode lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(11): 1532~ 1534

InGaAs/AlGaAs Strained Layer Quantum Well Lasers

Xu Zuntu^{1,2} Xu Junying¹ Yang Guowen¹

Zhang Jingming¹ Chen changhua¹ Chen Lianghui¹ Shen Guangdi²

¹*Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences and National Engineering Research Center for Optoelectronics Devices, Beijing 100083*

²*Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University and Beijing Optoelectronics Technology Laboratory, Beijing 100022*

Abstract InGaAs/GaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers with a small vertical divergence angle and low light power density are designed; and ridge waveguide parameters resulting in fundamental transverse mode operation are calculated. The InGaAs/GaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers were grown by molecular beam epitaxy. Ridge waveguide InGaAs/GaAs/AlGaAs strained layer quantum well lasers operating in the fundamental transverse mode up to 140 mW at a wavelength of 980 nm were fabricated. The lasers exhibit a differential quantum efficiency of 0.8W/A, a vertical divergence angle of 28° and a parallel divergence angle of 6.8°.

Key words high quality beam, high power, fundamental transverse mode, molecular beam epitaxy