

980nm InGaAs 应变量子阱激光器及组合件

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

(¹中国科学院半导体所国家光电子工程研究中心 北京 100083

²北京工业大学光电子技术实验室 北京 100022)

摘要 利用分子束外延技术研制出了高质量 InGaAs/GaAs 应变量子阱材料及量子阱激光器。脊形波导窄条形量子阱激光器的阈值电流和微分量子效率分别为 15 mA 和 0.8 W/A。线性输出功率大于 150 mW,基横模输出功率可达 100 mW。InGaAs 应变量子阱激光器和单模光纤进行了耦合,其组合件出纤光功率典型值为 40 mW,最大值可达 60 mW,显示出了高的基横模输出功率和高的耦合效率。其组合件在 40~60 mW 下,中心发射波长在 977 nm,满足了对掺铒光纤高效率泵浦的波长要求,成功地研制出适于掺铒光纤放大器用的应变量子阱激光器。

关键词 应变层,量子阱,半导体激光器,耦合

1 引言

掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier 简称 EDFA)是新一代超高速、超大容量、超强功能全光通信网络和光缆电视中的关键部件,在信息高速公路和光通信领域中起着非常重要的作用,它是由光泵浦源、掺铒光纤和辅助的光学及电驱动部分组成,其中掺铒光纤芯中掺了不到 0.1-at. % 的光学稀土元素铒(Er),Er 离子可以从波长在 980 nm 或 1480 nm 的泵浦源中吸收能量被激发到上能级,当从高能态跃迁到基态时,发射波长在 1.52~1.57 μm 的光子,该波长是光纤通信的低吸收损耗区。掺铒光纤放大器的使用,减少了接收器、再生器或信号发射器的使用,这样一旦通信中的距离拉长时,可很方便地增加一套 EDFA 网络系统来实现信号的放大。作为掺铒光纤放大器泵浦源,1480 nm 和 980 nm 半导体激光器都可用来泵浦掺铒光纤,产生 1.52~1.57 μm 的光发射,但 980 nm 半导体激光器具有如下优势:(1) 具有更低的阈值电流密度^[1]和高的微分量子效率,因此功耗小;(2) 弱的温度依赖关系^[2];(3) 对掺铒光纤具有高的泵浦效率^[3];(4) 低的噪声系数^[4]。因此它是掺铒光纤放大器的最理想泵浦源,是关系到掺铒光纤放大器能否实用化的关键性部件。目前,980 nm 应变量子阱激光器所采用的材料主要有 InGaAs/GaAs/AlGaAs, InGaAs/InGaAsP/InGaP^[5], InGaAs/GaAs/InGaP 等,但以 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱材料研究得最多。材料的生长方法有分子束外延(MBE)、金属有机化合物气相淀积(MOCVD)、化学束外延(CBE)等。本文报道分子束外延生长的 980 nm InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器的最新研究成果。

2 量子阱结构设计、材料生长和器件构成

我们知道 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱结构的跃迁能量是量子阱厚度和 x 值的函数, 包括三部分: (1) 相应于组分 x 的无应变体材料的带隙 E_g ; (2) 应变导致的重空穴价带边向高能方向的移动; (3) 与量子效应相关联的量子化能级向高能方向的移动, 可用下式表示

$$E(x, L_z) = E_g(x) + \Delta E_{\text{sh}}(x)|_{\text{strain}} + \Delta E_c(x)|_{L_z} + \Delta E_{\text{sh}}(x)|_{L_z}$$

与跃迁能量相对应的波长为 $\lambda(x, L_z) = hc/E(x, L_z)$

其中 h 为普朗克常数, c 为光速, x 为 InGaAs 量子阱的 In 组份, L_z 为阱宽。掺铒光纤放大器对半导体激光器的最基本要求是波长控制在 $980 \pm 5 \text{ nm}$ 范围, 为了实现 980 nm 波长, 应用 Robert 的结果^[6] 计算了 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 应变量子阱不同 In 组份 x 与阱宽的关系, 如图 1 所示。

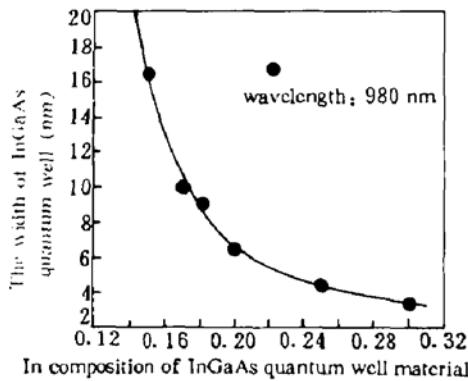


图 1 对应于发射波长 980 nm 的量子阱宽度与 In 组份的关系

Fig. 1 The quantum well width versus In composition for the emission wavelength of 980 nm

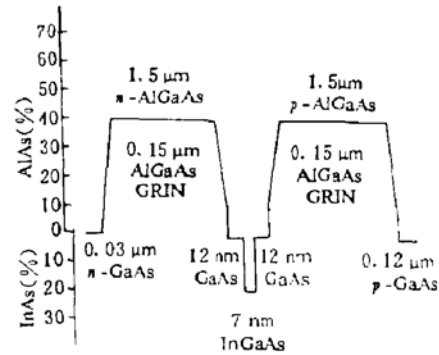


图 2 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ GRINSCH-SQW 激光器结构示意图

Fig. 2 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ GRINSCH-SQW laser structure

理论分析证明, (1) 单量子阱结构在材料生长质量比较高即损耗比较小的情况下, 具有最低的阈值电流密度, 并且这种结构的激光器特性对腔长具有弱的依赖关系; (2) 线性缓变折射率限制波导结构具有高的载流子收集效率, 从而提高了内量子效率, 所以为了降低阈值电流密度和提高量子效率, 我们采用了线性缓变折射率限制单量子阱结构, 如图 2 所示。具体结构的材料生长过程如下: 在 (100) 面偏 $\langle 111 \rangle A$ 方向 2° 的 $n^+-\text{GaAs}$ 衬底 (掺 $\text{Si}: 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上, 依次生长 $0.3 \mu\text{m}$ 的 $n^+-\text{GaAs}$ (掺 $\text{Si}: 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 缓冲层; $0.2 \mu\text{m}$ 的 $n-\text{AlGaAs}$ (掺 $\text{Si}: 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 缓变过渡层; x 值从 0.1 上升到 0.4; $1.5 \mu\text{m}$ 的 $n-\text{AlGaAs}$ (掺 $\text{Si}: 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 下限制层; $0.15 \mu\text{m}$ 的不故意掺杂 AlGaAs 下波导层, x 值从 0.4 下降到 0.1; 12 nm GaAs - 7 nm $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ - 12 nm GaAs 不故意掺杂的应变量子阱; $0.15 \mu\text{m}$ 不故意掺杂的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 上波导层, x 值从 0.1 上升到 0.4; $1.5 \mu\text{m}$ 的 $p-\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ (掺 $\text{Be}: 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 上限制层; $0.15 \mu\text{m}$ 的 $p-\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 缓变过渡层, x 值从 0.4 下降到 0.1; $0.1 \mu\text{m}$ 的 $p^+-\text{GaAs}$ (掺 $\text{Be}: 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 和 20 nm 的 $p^{++}-\text{GaAs}$ (掺 $\text{Be}: 5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) 欧姆接触层。在生长过程中, GaAs 材料的生长温度保持在 600°C , AlGaAs 材料的生长温度保持在 700°C , InGaAs 量子阱的生长温度为 560°C 。缓变过渡层组份的变化是通过改变炉温来实现的。为了保证 5 cm 片子的大面积均匀性, 降低 GaAs 生长速率至 $0.72 \mu\text{m}/\text{h}$, 且全部生长过程中衬底不断旋转。

为了实现大功率基横模工作, 我们制备了脊形波导条形激光器, 制备过程如下: 光刻 $3 \mu\text{m}$

的胶条作为腐蚀掩膜,用反应离子刻蚀方法腐蚀出脊形台面,再用 PECVD 的方法在表面淀积一层 200 nm 的 SiO_2N_x , 作为电隔离层,然后用氢氟酸缓冲腐蚀液刻蚀掉台面上的 SiO_2N_x , P 型和 N 型材料分别采用 TiPtAu 和 AuGeNi 作为欧姆接触电极。按 800 μm 的腔长解理成激光器条(Laser bars),装入镀膜架进行镀膜,腔面的一面镀高反射膜(HR),另一面镀减反射膜(AR)。

3 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器和组合件特性

3.1 激光器的伏安特性

正向导通电压为 1.28 V,反向击穿电压大于 6 V,串联电阻为 3 Ω 左右。

3.2 激光器的功率输出特性和温度特性

我们测量了脊形波导 InGaAs 应变量子阱激光器的输出光功率与驱动电流的关系,典型的阈值电流在 15~20 mA,微分量子效率为 0.8 W/A,最高值达 1.0 W/A 以上,线性输出功率大于 150 mW,如图 3 所示。不同温度下的光功率电流特性表明在 20~50 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内,特征温度为 125 K。

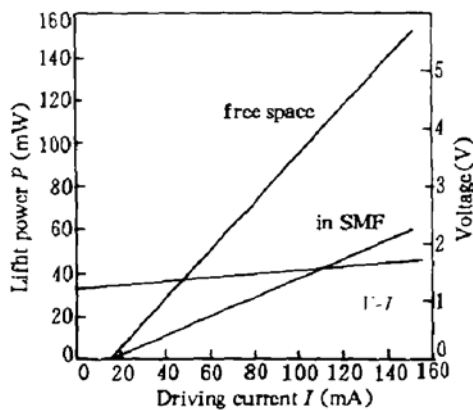


图 3 980 nm 应变量子阱激光器和组合件的光功率电流曲线

Fig. 3 The light output power versus driving current for 980 nm strained quantum well lasers and moduals

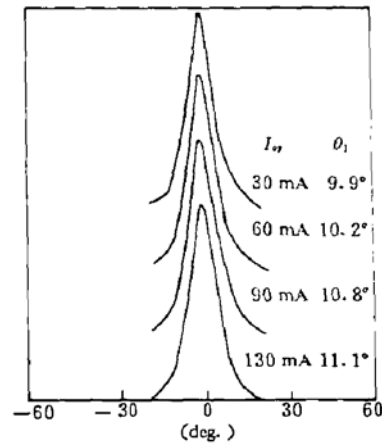


图 4 在不同的工作电流下激光器在平行于结平面方向的远场分布图

Fig. 4 The far-field profiles of laser in the direction parallel to the junction plane under different currents

3.3 激光器的远场特性

激光器光斑质量的优劣直接影响到与光纤耦合的效率,我们制备的激光器的远场特性其垂直和平行于结平面两方向的发散角分别为 38 $^{\circ}$ 和 10 $^{\circ}$ 。激光器的输出光束随驱动电流变化的稳定性是光纤耦合对激光器的基本要求。一般在垂直于结平面方向由于有源层很薄,所以这个方向的发散角是稳定的。但平行于结方向,必须使激光器在基横模工作才能保证该方向发散角的稳定性。我们通过控制条宽与腐蚀深度,获得了大于 100 mW 的基横模输出。图 4 是在不同的工作电流即不同的输出功率下测得的平行于结方向的发散角随驱动电流的变化情况,可以看出其水平方向发散角基本保持不变。

3.4 光纤耦合组合件特性

作为掺铒光纤放大器的泵浦源,要求 980 nm 半导体激光器单管与单模光纤进行耦合。由

于和长波长 $1.3 \mu\text{m}$, $1.5 \mu\text{m}$, $1.48 \mu\text{m}$ 半导体激光器耦合所用的单模光纤相比,其芯径小得多,仅 $4 \sim 5 \mu\text{m}$,因此提高耦合效率和容差将变得更加困难,也是我们所解决的关键技术之一。通过耦合,获得了较高的耦合效率,典型值在 $40 \sim 50\%$,典型的光纤输出功率大于 40 mW ,最大值可达 60 mW 以上,如图 3 所示。光纤耦合组合件在 50 mW 下的激光光谱如图 5 所示,可见波长在 $980 \pm 5 \text{ nm}$ 范围内,适合用于泵浦掺铒的光纤。

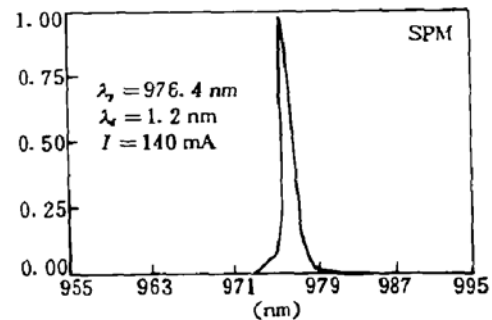


图 5 980 nm 激光器泵浦源光谱图

Fig. 5 The spectrum of the 980 nm pumping source

参 考 文 献

- 1 H. K. Choi, C. A. Wang. InGaAs/AlGaAs strained single quantum well diode lasers with extremely low threshold current density and high efficiency. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 57(4): 321~323
- 2 J. P. Van der Ziel, N. Chand. High-temperature operation 980 nm strained single quantum well $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(13): 1435~1439
- 3 M. Yamada, M. Shimizu, T. Takeshita *et al.*. Er^{3+} -doped fiber optical amplifier pumped by 980 nm laser diodes. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, 1(3): 422~424
- 4 Makoto Yamada, Makoto Shimizu, Masanobu Okayasu *et al.*. Noise characteristics of Er^{3+} -doped fiber amplifiers pumped by 980 nm and 1480 nm laser diodes. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1990, 2(2): 205~206
- 5 E. Desurvirs, M. Sagawa, K. Hiramoto *et al.*. High reliable operation of strained compensated 980 nm InGaAs/InGaP/GaAs lasers with InGaAsP strained barriers for EDFAs. *Electr. Lett.*, 1995, 31(3): 198~199
- 6 Robert M. Kolbas, Neal G. Anderson, W. D. Laidig *et al.*. Strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs photopumped and current injection lasers. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, QE-24(8): 1605~1613

980 nm InGaAs Strained Quantum Well Lasers and Modules

Xu Zuntu^{1,2} Xu Junying¹ Yang Guowen¹ Zhang Jingming¹

Xiao Jianwei¹ Chen Lianghui¹ Shen Guangdi²

(¹Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences and National Engineering Research Center for Optoelectronics Devices, Beijing 100083 ²Department of Electronic Engineering, Beijing Polytechnic University and Beijing Optoelectronics Technology Laboratory, Beijing 100022)

Abstract Using solid state molecular beam epitaxy technology we have grown the high quality InGaAs/GaAs strained quantum well materials and fabricated quantum well lasers. The threshold current and differential quantum efficiency of the ridge waveguide quantum well lasers with coated films are 15 mA and 0.8 W/A , respectively. The linear output power is more than 150 mW , and 100 mW and larger fundamental mode output power is achieved. Through the coupling with an Er-doped fiber, the output power of $40 \sim 60 \text{ mW}$ has been demonstrated, and the emitting wavelength is near 977 nm .

Key words strained layer, quantum well, semiconductor laser, coupling