

掺铒光纤放大器泵浦源用 980nm 量子阱激光器

杨国文 徐俊英 徐遵图 张敬明 肖建伟 何晓曦 陈良惠 王启明

(中国科学院半导体研究所 北京 100083)

摘要 我们利用分子束外延(MBE)方法研制出了高质量的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器外延材料, 其最低的阈值电流密度可达到 $140\text{A}/\text{cm}^2$, 激发波长在 980nm 左右。通过脊型波导结构的制备, 获得了高性能的适合于掺铒光纤放大器用的 980nm 量子阱激光器泵浦源, 其典型的阈值电流和外微分量子效率分别为 15mA 和 $0.8\text{mW}/\text{mA}$, 基横模的输出功率大于 80mW, 器件在 $50^\circ\text{C}, 80\text{mW}$ 的恒功率老化实验表明, 器件具有较好的可靠性。通过与掺铒光纤的耦合, 其组合件出纤功率可达 60mW 以上。

PACC: 4255P, 4280S, 7360F, 7865

1 引言

掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier 简称 EDFA)将在实现新一代超高速、超大容量、超强功能全光光通信网络中起非常重要的作用。它可用作功率放大器来增强传输功率, 也可以作为光继器来放大微弱信号或作为前置放大器来提高接收器的灵敏度。一个 EDFA 主要由一小段光纤组成, 它的芯中掺了不到 0.1% 的光学稀土元素 Er, Er 离子可以从波长在 980nm 或 1480nm 左右的泵浦光源中吸收能量被激发到上能级, 当它从高能态跃迁到下能级基态时, 发射波长在 $1.52 \sim 1.57\mu\text{m}$ 的光子, 该波长正好是光纤通信的低吸收损耗区。

波长在 980nm 的量子阱激光器由于具有低的阈值电流密度、高的微分量子效率和高的功率输出, 因而使泵浦效率更高。它的温度敏感性也比较小, 泵浦的放大器还具有接近量子极限那样低的噪声^[1,2], 因此 980nm 半导体激光器是掺铒光纤放大器的最理想泵浦源。EDFA 能否实用化, 泵浦源是十分关键的部件, 对用于泵浦的激光二极管器件来讲则提出了非常高的要求, 如波长应准确控制在 $980 \pm 5\text{nm}$ 范围内, 激光器应有足够高的输出功率, 并且在高的功率输出时应保证稳定的基横模工作以提高光纤耦合效率, 以及在高功率密度的工作条件下还应具有较长工作寿命等等。

我们通过对 980nm 应变量子阱激光器的全面而细致的研究, 无论在超薄层的量子阱

杨国文 男, 博士, 现主要从事于量子阱激光器的结构设计、分子束外延材料生长以及器件的研究工作
1996 年 4 月 5 日收到初稿, 1996 年 5 月 15 日收到修改稿

激光器外延材料生长方面，还是在器件工艺制备和器件性能方面均取得了突破性的进展，本文报道了我们所取得的最新研究成果。

2 980nm 量子阱激光器结构及其优化设计

980nm 波长，相应跃迁能量在 1.27eV 左右，比 GaAs 的带隙小许多，因此利用通常的匹配 III-V 族材料 GaAs/AlGaAs ($\lambda = 0.7 \sim 0.9\mu\text{m}$) 和 InP/InGaAsP ($\lambda = 1.1 \sim 1.65\mu\text{m}$) 是难以实现的。要实现这个波长的最好材料就是 InGaAs，但其晶格常数比 GaAs 大，作为有源层时会出现大的晶格不匹配，产生应变。当其厚度小于某一临界厚度时，应变是弹性的，失配应力的存在不会导致失配位错的产生；当其厚度大于临界厚度时，应变则会释放，晶格松弛，并产生失配位错^[3]。

应变的引入使原来晶格的对称性发生变化，直接导致了能带结构的改变。如重、轻空穴简并消失，价带变得同导带更为对称等。这些能带结构的改变正是人们所期望的十分重要的能带工程^[4]，它改变了传统无应变量子阱结构激光器中轻的导带有效质量与非常重的价带有效质量之间较大的不对称性，更有利提高激光器的性能。

典型的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱结构如图 1 所示，波导层采用缓变折射率分别限制(GRIN-SCH)波导结构，限制层中的 AlAs 组分 x 可以选择从 0.35 到 0.6，光学限制因子会随 x 的增大而增大。量子阱可以是单阱，也可以是多阱，但一般少于三个，因为阱太多会由于 InGaAs 总厚度的增加而产生失配位错。

所用衬底为(100)面或(100)面向<111>方向偏2°的n⁺-GaAs衬底(Si: $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)，然后依次生长0.3~1.0μm的n⁺-GaAs(Si: $2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)缓冲层，0.2μm的n-AlGaAs(Si: $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)缓变过渡层，1.0~1.5μm的n-Al_xGa_{1-x}As(Si: $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)下限制层，0.15μm左右的故意掺杂i-Al_xGa_{1-x}As波导层；然后生长量子阱有源层，即12nm的GaAs势垒层和7nm的In_{0.2}Ga_{0.8}As阱层(此时失配度为1.5%)；再对称的生长0.15μm i-Al_xGa_{1-x}As波导层，1.0~1.5μm p-Al_xGa_{1-x}As(Be: $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)上限制层，0.15μm的p-AlGaAs缓变过渡层及0.1μm的p-GaAs(Be: $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)和20nm的p⁺-GaAs(Be: $5 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$)欧姆接触盖层。

3 材料生长及其检测与分析

1) 高质量 MBE 生长研究 高质量外延材料对于获得高质量的器件至关重要，是器件性能提高的基础与关键。我们曾在文献[5]中对 GaAs、AlGaAs 单晶材料及其超晶格量子阱材料的生长作过较为详细的研究，这里不再赘述。

2) 波长的控制 由于掺铒光纤放大器要求激光器泵浦源的波长控制在±5nm 左右，偏离这个范围则会使泵浦效率大大降低，因此如何精确控制外延材料的波长范围及其重复

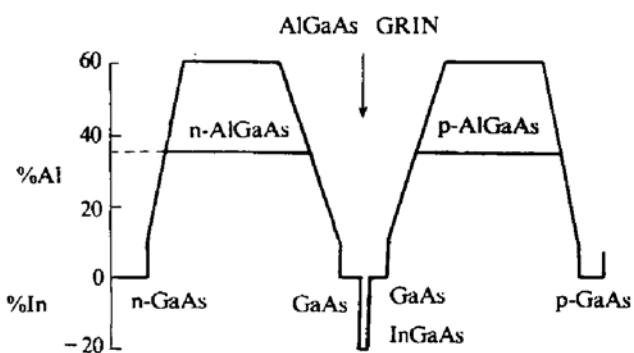


图 1 典型的缓变折射率分别限制

InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器结构示意图

性则显得非常重要。由于所用势垒为二元系 GaAs 材料，相对不变，因此只须通过调节阱宽和铟组分来调整波长。为了更好的控制，我们在首先确定 In 组分后，通过增加和减短阱层生长时间来精确控制波长。并通过在每次生长前，对 In 束流按完全相同条件进行校准，提高了重复性，获得了非常满意的结果，连续生长外延片的波长偏差小于 3nm。

3) 工艺与结构的优化 我们对不同的限制层组分、不同的波导结构以及不同的量子阱数等进行了生长研究与优化，获得了结构与工艺的最佳结合。由于 AlGaAs 和 InGaAs 的生长质量随温度的敏感性较强，而 GaAs 相对较弱一些，因此变温过程放在 GaAs 生长过程中，整个激光器结构基本达到各层的最佳生长条件，从而获得了高质量的外延生长。

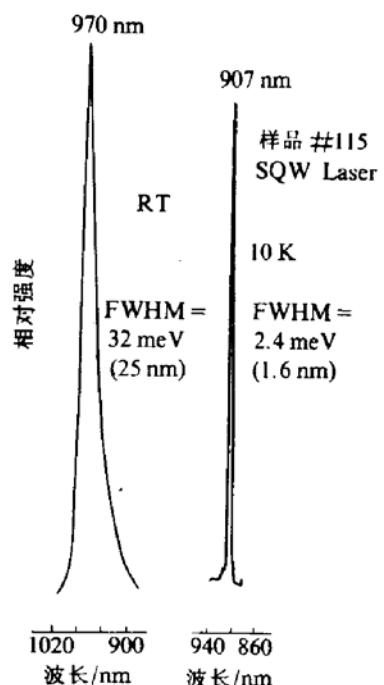


图 2 典型的 InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器外延材料的室温和 10K 光致发光谱

4) 材料检测与分析 经外延生长后的材料在 $1000 \times$ Normaski 相衬光学显微镜或扫描电镜下观察，平整光亮，除有较少量的本征椭圆缺陷分布外($10^2 \sim 10^3 \text{ cm}^{-2}$)，观察不到其它任何特征表面。

光致发光谱是检测材料光学性能的重要检测手段，一方面可以判断出外延材料质量的相对好坏，另一方面可检测出该外延材料的发光波长是否满足要求，为后工艺的制备提供指导性借鉴作用。图 2 是一典型的 980nm 应变量子阱激光器结构的室温 300K 和 10K 光致发光谱图，可以看出，量子阱的发光峰强而锐，半峰宽很窄，在室温和 10K 时分别为 32meV 和 2.4meV，在较厚的 AlGaAs 限制层上生长的量子阱能具有如此锐的荧光峰，表明了材料极好的光学质量。另外峰值波长在室温和 10K 时分别为 970nm 和 907nm，在激光器高注入载流子的情况下一般比发光波长大 10nm 左右，可见该外延片发光波长正好满足要求。

宽条型激光器的阈值电流密度是检测材料质量的重要参数。表 1 中给出了不同样品的检测结果，其中条宽为 $100\mu\text{m}$ ，腔长为 $800\mu\text{m}$ 。可以看出，其典型阈值电流密度在 $200\text{A}/\text{cm}^2$ 左右，最低可达 $140\text{A}/\text{cm}^2$ 。

表 1 InGaAs/GaAs/AlGaAs 量子阱激光器宽接触阈值电流密度

样品号	A081	A086	A101	#093	#095	#106	#108	#115
$J_{th}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	300	170	250	260	200	190	250	140

激光器的内损耗 α_i 和内量子效率 η_i 也是表征材料质量优劣的重要参数。通过测量得到的内损耗 α_i 和内量子效率 η_i 的典型值分别为 3cm^{-1} 和 90%，也表明了材料有极好的光学参数。

4 器件制备及器件的主要特性

脊形波导条形结构由于具有以下一系列特点，如制备工艺简单，重复性好，弱的折射率差可使基横模宽度较大等，从而成为我们选择的最佳条形结构，如图 3 所示。腐蚀深度与条宽是决定稳定基横模宽度的重要参数，我们对其进行了优化设计。通过采用干法刻蚀加湿法

化学腐蚀的方法保证了脊形波导台面既比较陡直又没有损伤层,解决了制备优质脊形台面条形的工艺技术问题。在台面条型图形制备以后,利用 PECVD 方法淀积一层 200nm 的 SiO_2 作为电隔离层,然后光刻出电极窗口,经 p 面电极 (TiPtAu/Au)、减薄、n 面电极 (AuGeNi/Au)、解理激光条镀以高反膜 (HR) 与增透膜 (AR)、检测、管芯解理、键合、装管等工艺制得激光二极管器件。

1) 激光器的伏安特性 测量表明器件具有较好的伏安特性,其正向导通电压为 1.25V 左右,反向击穿电压大于 6V,微分串联电阻 R_s 的典型值为 3Ω 左右 ($3 \times 800\mu\text{m}^2$)。

2) 光功率电流($P-I$)特性 用直流驱动电源及光电二极管探测器测量了激光器的功率电流 $P-I$ 曲线,典型的激射阈值电流为 15mA,外微分量子效率典型值为 $0.8\text{mW}/\text{mA}$ (64%)。线性输出功率大于 80mW ,最大输出功率为 380mW , 80mW 下典型的工作电流值为 $110\sim 130\text{mA}$ 。图 4 给出了一典型的特性曲线。

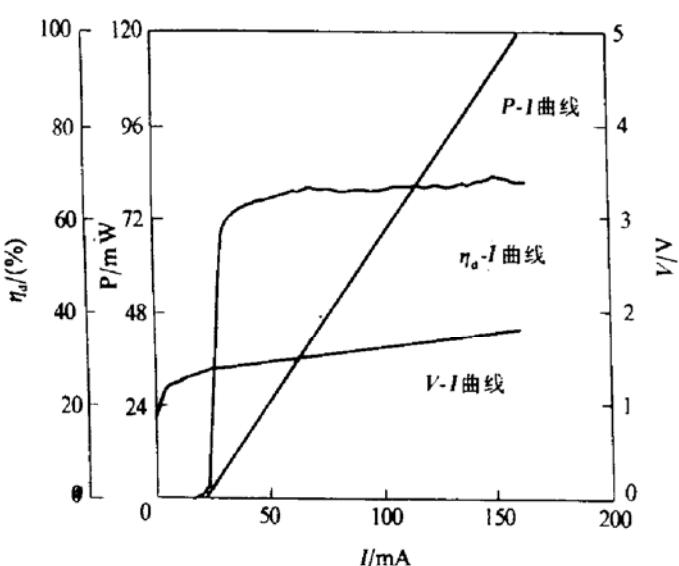


图 4 典型的 980nm 应变量子阱激光器的光功率电流($P-I$)特性曲线

$\times 10^\circ$.

5) 可靠性 激光器的寿命与材料的生长和器件的制备过程密切相关,高质量的材料生长和优化的工艺是提高激光器寿命的关键。 $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 应变量子阱的可靠性还涉及到由于应变以及很高的端面光功率密度带来的可靠性问题,即端面发生灾变损伤导致器件突然失效^[6]。目前我们制备的激光器在 50°C 、 80mW 恒定功率条件下的老化实验数据如图 6 所示。七只器件中除二只突然失效外,其余器件的平均退化速率小于 $10\%/\text{kh}$ (每千小时电流增加百分数),若以退化 30% 为失效的话,其外推寿命可达 2 万小时以上。

6) 耦合封装组合件 作为掺铒光纤放大器泵浦源,需要使 980nm 量子阱激光器单

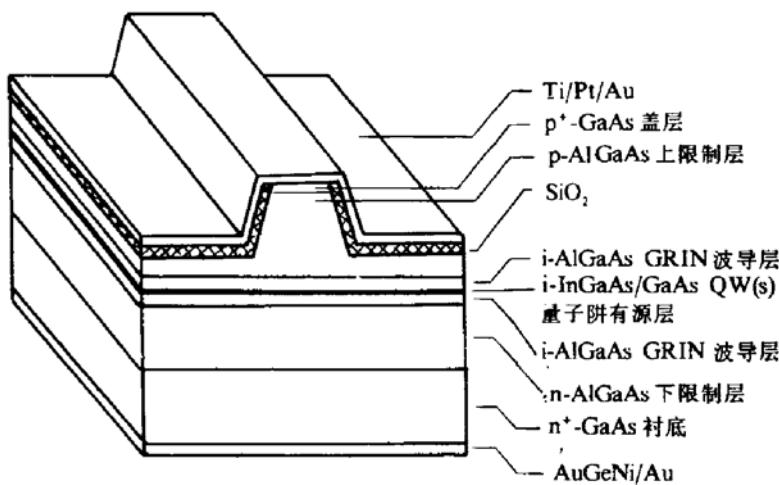


图 3 脊形波导量子阱激光器结构示意图

3) 激射光谱 激射波长及其光谱半宽是掺铒光纤放大器泵浦源的重要参数。我们所制备的器件在 80mW 光功率输出时的激射波长为 $980 \pm 4\text{nm}$,且光谱宽度小于 10nm 。图 5 给出了一典型的激射光谱图,其中心波长为 980nm 。

4) 远场特性 对于光纤耦合来讲激光器的远场特性显得十分重要,如垂直结平面方向发散角尽可能小以利于耦合,平行结平面方向则应在一定功率范围内保持不变。我们测量得到的远场发散角的典型值为 40°

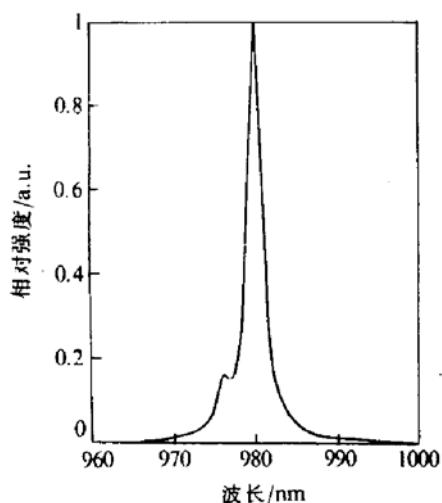


图 5 典型的 980nm 量子阱
激光器激射光谱

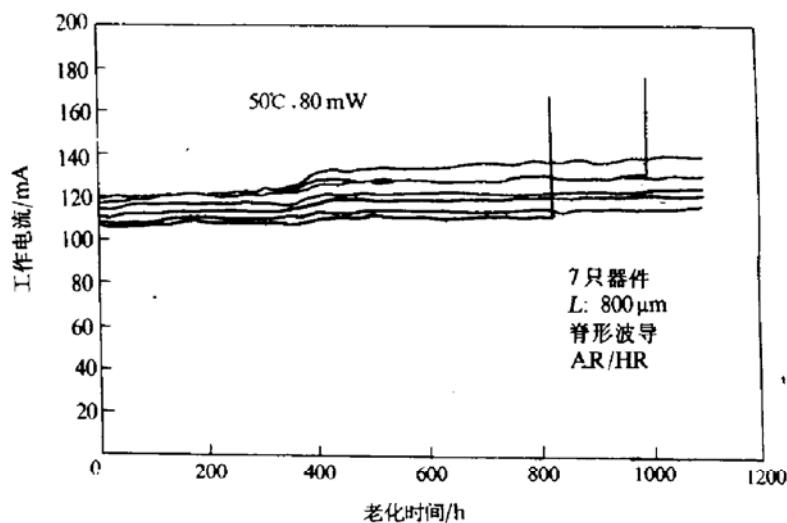


图 6 980nm 应变量子阱激光器的寿命试验曲线
50℃, 80mW 下恒功率老化

管器件与单模光纤进行耦合才可真正使用,尤其对于 980nm LD 的耦合所使用的单模光纤的模场直径仅 $4\mu\text{m}$ 多一点,较 $1.3\mu\text{m}$ 和 $1.5\mu\text{m}$ 单模光纤小一倍多,因此耦合效率和容差成为一个极其重要的技术问题。为了实现高的耦合功率输出,对掺铒光纤头的制作采用了拉锥腐蚀等工艺,并针对 980nm 量子阱激光器的特点进行了光纤头的优化设计,摸索并优化了其耦合对准与固化技术,获得了较好的稳定性和较高的耦合效率(40%~50%)。典型的光纤输出功率大于 40mW,最大出纤功率已可达到 60mW 以上。

5 结论

通过对量子阱激光器的外延材料生长以及器件工艺的深入研究,使掺铒光纤放大器用的 980nm InGaAs/GaAs/AlGaAs 应变量子阱激光器泵浦源的研制获得了进展。激光器的阈值电流密度一般在 $200\text{A}/\text{cm}^2$,最低可达 $140\text{A}/\text{cm}^2$,发射波长可控制在 $980 \pm 4\text{nm}$ 。脊形波导结构激光器件的基本横模输出功率大于 80mW。寿命实验表明器件有较好的可靠性。通过与掺铒光纤的耦合得到了 60mW 以上的出纤功率。预计通过进一步完善工艺,优化器件结构,可以实现更高的出纤功率和更稳定可靠的使用寿命。

参 考 文 献

- [1] B. Pedersen, B. A. Thompson, S. Zemon *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 1992, 4: 46.
- [2] E. Desurvire, IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2: 208.
- [3] J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, J. Crystal Growth, 1974, 27: 118.
- [4] E. P. O'reilly and A. R. Adams, IEEE J. of Quantum Electron, 1994, 30(2): 366.
- [5] 杨国文,肖建伟,徐遵图,等,半导体学报,1995,16(8): 627.
- [6] M. Fukuda, M. Okuyasu, J. Temmyo *et al.*, IEEE J. of Quantum Electron, 1994, 30(2): 471.

980nm Quantum Well Laser Pump Sources for Er-Doped Fiber Amplifier

Yang Guowen, Xu Junying, Xu Zuntu, Zhang Jingming, Xiao Jianwei,
He Xiaoxi, Chen Lianghui and Wang Qiming

(Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083)

Received 5 April 1996, revised manuscript received 15 May 1996

Abstract High quality InGaAs/GaAs/AlGaAs strained quantum well laser epimaterials are achieved by molecular beam epitaxy. The lowest threshold current density is 140A/cm² and the emitting wavelength is at 980nm. After the fabrication of ridgewaveguide structure, high performance 980nm pump sources for Er-doped fiber amplifier are obtained with typical threshold current and external quantum efficiency of 15mA and 0.8mW/mA, respectively. The output power with single lateral mode is more than 80mW, and the lifetests under constant output power at 50°C demonstrated good reliability. Through the coupling with Er-doped fiber, the output power of more than 60mW was also achieved.

PACC: 4255P, 4280S, 7360F, 7865