

极低阈值脊形波导 GaAs/AlGaAs GRIN-SCH SQW 激光二极管*

张敬明 陈良惠 徐俊英 徐遵图 杨国文 吕 卉 郭文华

(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 本文报道,极低阈值电流脊形波导 $\sim 0.85\mu\text{m}$ GaAs/AsGaAs GRIN-SCH SQW 激光二极管优化设计、器件制备和特性,获得了 $2.2\sim 4\text{mA}$ 的极低阈值电流和 $\sim 0.6\text{mW}/\text{mA}$ 的微分子效率。 70°C , 3mW 恒功率寿命试验,推测器件平均工作寿命大于4万小时。

PACC: 4255P

1 引言

对于光计算、光信息处理、光互连的应用,低功耗和长寿命工作是列为首位的要求。我国已研制成功运算速度达15.8亿次/秒的并行多处理器计算机。随着巨型计算机的发展和运算速度的提高,解决互连的电干扰是十分重要而艰难的课题,而光互连却能克服这个难题。所以,光互连在下一代计算机的发展中有着极其重大的意义。

对于侧面发射的激光器,要获得极低阈值电流工作,有几种结构途径:利用掩埋异质结构(BH)可以使注入电流集中于条形有源区,条宽也可以做得相当窄^[1,2]。非平面衬底上的量子阱线激光器^[3,4],和杂质诱导无序条形激光器^[5]。除了器件结构外,应变量子阱由于应力引起半导体材料能带结构的变化,使价带空穴有效质量降低,因而降低了透明载流子浓度,提高微分增益,使激光器的阈电流密度进一步降低^[6]。采用应变量子阱除阈值降低外,还有利与器件稳定长寿命工作。

本文报道工艺简单容易投入生产的脊形波导结构 GaAs/AlGaAs 量子激光器,经过优化结构和工艺获得了极低阈值电流,工作寿命超过4万小时的推算平均工作寿命,满足光纤光互连和各种低功耗应用的要求。

2 器件设计考虑及对低阈值电流的估计

计算机光纤光互连应用的互连距离较短,光传输损耗不大。为利用廉价硅探测器,采用

* 国家“863”高技术计划资助项目

张敬明 男,1941年生,副研究员,主要从事光电子器件理论和技术研究
1996年9月12日收到初稿,1996年11月11日收到修改稿

~850nm 波长激光器作为发射光源. 通常从应用需要, 应对激光器激射波长进行设计. 激射波长主要由量子阱材料带隙, 加上量子阱限制载流子运动, 引起分裂能态的基态能量的波长蓝移. 另外还应该考虑由于载流子引起带隙收缩的波长红移, 以及载流子带内弛豫引起的线形展宽使增益峰的蓝移. 温度的影响包含在量子阱材料的温度系数中. 这样, 我们计算了激射波长与量子阱宽度的关系及其随阱材料铝组分 x 值的变化. 设阱垒铝组分关系为 $x_b = x_w + 0.22$, 阈值载流子浓度为 $\sim 4.5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$, 温度为 300K 时计算结果如图 1 所示.

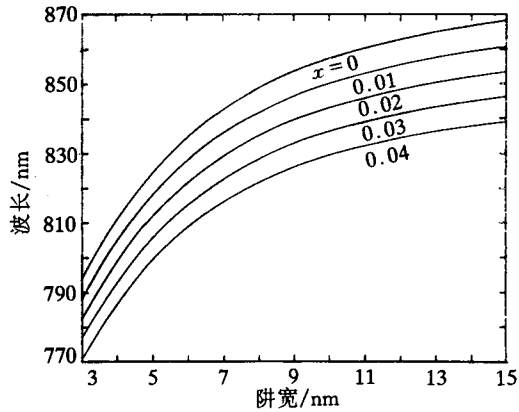


图 1 激射波长随量子阱宽及阱材料 x 值的变化

量子阱激光器的光增益是设计器件的重要而基本的参数, 因为只有满足激光腔的光增益阈值条件, 才能获得器件的受激发射. 我们已经进行了光增益理论和实验研究^[7].

本文计算的光增益值, 考虑了量子阱结构对带边有效质量的影响和载流子两个自旋方向的作用, 其增益值应以 0.635 因子进行修正^[8]. 为了获得 ~850nm 激射波长采用 GaAs 量子阱, 阱宽 8nm, 垒 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的 x 值取 0.22. 计算量子阱增益随注入载流子浓度的关系表示在图 2 中.

为了进一步估算器件的阈值电流密度, 假定电流均匀注入产生的载流子全部被量子阱俘获. 由双分子复合过程对于单量子阱的载流子浓度与注入电流密度关系为

$$J = qL_w n^2 B_c \tag{1}$$

其中 q 为电子电荷; n 为载流子浓度; $B_c = 9 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$, 为复合常数. 这样, 我们可以把增益的注入载流子浓度关系转变成量子阱光增益的注入电流密度关系, 一起表示在图 2 中, 电流密度坐标表示在上方. 从图中可以看出该量子阱结构的透明电流密度 ~50A/cm², 大于该电流密度后, 增益值迅速增长. 随着注入电流密度的进一步增加, 增益增加速度减小. 由此说明要使激光器在低阈电流密度下工作, 应该使增益条件满足图 2 曲线的低增益区工作.

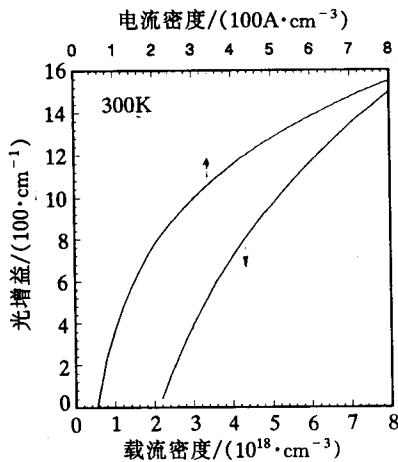


图 2 300K, 增益与载流子浓度及电流密度的关系

激光器激射的增益条件由下式描述

$$g_{\text{mod}} = \alpha_{\text{total}} \tag{2a}$$

$$g_{\text{mod}} = M\Gamma_0 G \tag{2b}$$

$$\alpha_{\text{total}} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \tag{2c}$$

其中 g_{mod} 为模增益; α_{total} 为激光腔光子总损耗; M 为阱数; Γ_0 为一个量子阱激光器限制因

子; G 为量子阱光增益; α_i 为腔内部光损耗(主要为自由载流子吸收损耗, 与阱数和阈值载流子浓度有关), R_1 、 R_2 为腔两端面反射率和 L 为腔长.

式(2a)表示量子阱激光腔内由载流子注入引起的模增益(即腔内的光放大作用)在等于激光腔损耗(包括内部损耗和端面损耗)时, 腔内建立受激振荡.

激光器的阈值电流可以表示为

$$I_{th} = MJWL \exp\left(\frac{\alpha_{total}}{g_{mod}} - 1\right) \quad (3)$$

满足激光增益条件式(2a)时, 我们可以简化上式为

$$I_{th} = MJWL \quad (4)$$

显然, 上式中 J 为满足增益条件式(2a)对应的电流密度. 在(2)式中, 在由波导结构决定的光限制因子 Γ_0 , 阱数 M , 腔端面反射率 R_1 、 R_2 , 腔内部损耗 α_i 和腔长 L 确定后, 激光器有源层量子阱增益 G 即确定, 对照图 2 相应的注入电流密度也可以得到. 正如图 2 中看到的, 如果满足(2a)式的 G 大, 相应的 J 即大. 从(4)式可以知道, 要想获得极低阈值电流的激光器, 应该取单量子阱结构, 窄条形宽度和短腔长, 并且满足增益条件的电流密度 J 值应当尽量小. (4)式中 M 、 J 和 L 三个参数与增益条件有关. 采用光限制因子为 $\sim 1.85\%$ 的单量子阱激光波导, 总损耗为 $14/\text{cm}$ 的激光腔, 要求量子阱光增益为 $\sim 770/\text{cm}$, 可以实现 $J_{th} = 200\text{A}/\text{cm}^2$. 在腔长为 $200\mu\text{m}$, 条宽为 $5\mu\text{m}$ 时, 可以获得 $I_{th} = 2\text{mA}$ 的低阈值电流激光器. 为满足(2c), 假定 $\alpha_i = 4/\text{cm}$, 腔端面反射率为 $R_1 = 0.95$, $R_2 = 0.7$.

上面, 我们对激光器获得极低阈值电流进行了较理想模型分析和估计, 为改进器件特性指明方向. 实际上, 还受材料质量、器件结构和工艺条件的影响.

3 器件制备

激光器材料生长在 RIBER 32p MBE 系统上进行, 使用掺 Si ($n^+ 1 \sim 3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$) (100) 面朝 $\langle 111 \rangle$ 偏 4° 的 GaAs 衬底. 外延准备好的衬底, 在预处理室经 400°C 除气一小时. 然后送入生长室, 在 580°C 温度进行常规的脱氧工艺. 为了生长厚度的均匀, 在生长时衬底以每分钟 20 转的速度旋转. MBE 材料具有梯度折射率分别限制单量子阱结构, 包括: 不掺杂 8nm 的 GaAs 量子阱, 两边的垒由 10nm 的 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}$ 构成, 上下梯度折射率导引层不掺杂, 铝 x 值由 0.5 到 0.22 变化, 厚度 150nm. 上下限制层铝 x 值为 0.5, 厚度为 $1.2\mu\text{m}$, 掺杂浓度 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$. 衬底上首先生长 $\sim 500\text{nm}$ 的缓冲层, 减小衬底材料缺陷对生长材料的影响, 掺杂浓度 $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$. $\sim 250\text{nm}$ 的 GaAs 顶盖层掺杂浓度 $2 \times 10^{19}/\text{cm}^3$. 分别用 Si 和 Be 作为 n 和 p 型材料掺杂剂.

外延生长后的材料, 沿 $\langle 01\bar{1} \rangle$ 方向光刻双沟正台面条形, 条形台面宽度为 $3\mu\text{m}$, 双沟的腐蚀深度十分重要. 适当的腐蚀深度使器件侧向引入合适的折射率导引机构, 并对限制电流侧向扩展有益. 精确控制上限制层腐蚀深度, 使得剩余在有源层以上 $0.2 \sim 0.25\mu\text{m}$. 脊形台面制备完成后, 用 PECVD 方法在片子表面淀积 SiO_2 做为电绝缘隔离层, SiO_2 厚度为 200nm, 然后在台面上光刻出 $3\mu\text{m}$ 的电极窗口. P 型电极材料为 Ti/Pt/Au, 在 400°C 合金. 片子减薄到 $\sim 100\mu\text{m}$, 在 n 面蒸发 AuGeNi/Au 后进行合金. 做完电极的片子解理成 $200\mu\text{m}$ 的长条, 背面蒸高反射率介质膜, 反射率大于 95%. 另一面为 70% 的介质膜, 作为出光面. 激

光器谐振腔的端面损耗为 $10/\text{cm}$. 最后将解理和初测合格的管芯, P 面朝上, 在真空中烧结到镀 In 无氧铜热沉上. 上电极压焊金丝, 通过微晶玻璃引线.

4 器件特性

制备的一批 146 只器件. 在室温 20°C , 13mA 工作电流 (光功率输出 $\sim 6\text{mW}$) 下连续老化 200 小时后, 测试 $L-I$ 特性到输出功率大于 10mW , 删除阈值电流增加及停止激射的器件, 剩下 133 只器件阈值电流在 $2\sim 4\text{mA}$ 之间. 微分量子效率在 $0.45\sim 0.9\text{mW}/\text{mA}$ 之间. 作器件数量与阈值电流和微分量子效率分布图表示在图 3a、b 中. 其中有 45 只器件阈值电流分布在 $2.4\sim 2.6\text{mA}$ 之间. 有 52 只器件微分量子效率为 $0.6\sim 0.65\text{mW}/\text{mA}$ 之间.

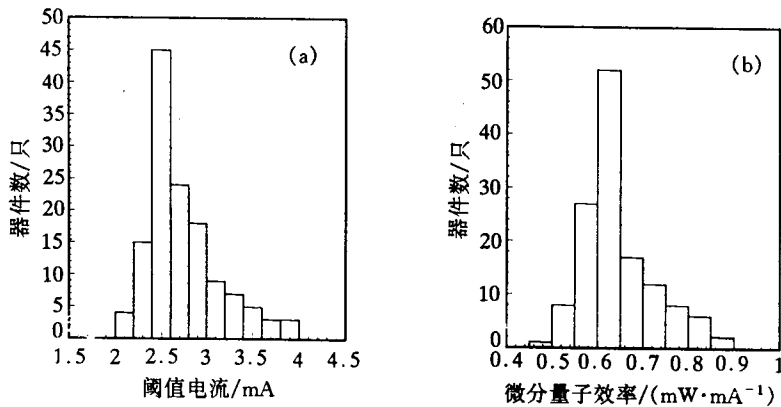


图 3 器件数与阈值电流(a)和微分量子效率(b)分布

阈值电流最低为 2.2mA , 器件 A97# 的 $L-I$ 和 $V-I$ 特性表示在图 4 中. 该器件的微分量子效率为 $0.66\text{mW}/\text{mA}$. 在 17mA 工作电流下, 输出 10mW 光功率. 器件的正向转折电压为 1.43V , 反向击穿电压 $>10\text{V}$, 由正向伏安特性得到激光器的微分串联电阻为 26Ω . 在 17mA 电流下, 器件管压降为 2.1V .

激光器的腔内光损耗和内量子效率是表征材料优劣的重要器件参数. 一部分未镀膜器件通过测量不同腔长下器件的微分量子效率, 得到腔内光损耗 α_i 和内量子效率 η_i , 典型值 $\alpha_i = 5/\text{cm}$, $\eta_i = 82\%$. 远场特性是激光器的重要应用参数, 我们制备的激光器远场发散角典型值, 平行结平面为 13° , 垂直结平面为 37° . 激光器激射在 TE 模式, 基横模工作, 激射波长 $\sim 845\text{nm}$, 有较好的单纵模特性.

在 $7\sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围, 测量了 $L-I$ 特性的温度关系, 得到的阈值电流温度关系表示在图 5 中. 由 $T_0 = (T_H - T_L) / \ln(I_{\text{thH}} / I_{\text{thL}})$ 的关系, 得到

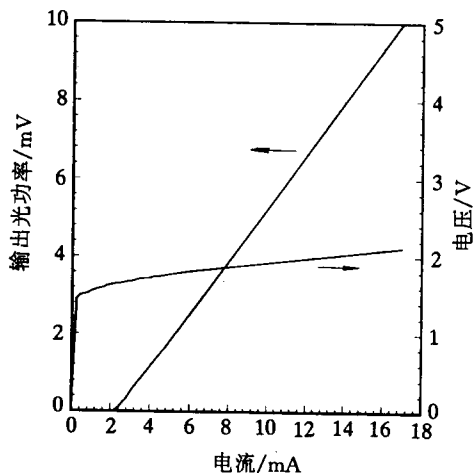


图 4 $L-I$ 和 $V-I$ 特性

特征温度 $T_0=144\text{K}$.

用 AVTECH AVP-AV-1S-C 型脉冲发生器, 上升时间 $\leq 60\text{ps}$, 下降时间 $\leq 135\text{ps}$ 的方脉冲驱动激光器, 不加直流偏置. Otl PD050-OM 型硅探测器, 上升时间 $\leq 50\text{ps}$, 和带 S-4 取样头的 TEKTRONIX7104 取样示波器(上升时间 $\leq 25\text{ps}$) 测量器件的瞬态特性. 表明激光器脉冲响应上升时间 $\leq 50\text{ps}$, 下降时间 $\leq 250\text{ps}$.

激光器的工作寿命和可靠性与材料生长、器件制备工艺和使用有密切的关系, 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. 目前工艺条件下制备的器件, 从老化筛选下来的 133 只器件中任意抽取 7 只, 在自动控制计算机检测数据输出老化台系统上进行寿命试验. 曲线开始的 47 小时在 60°C 下进行, 以后温度升高到 70°C . 所有寿命试验在 3mW 恒定光输出功率下进行. 定时记录工作电流的变化. 寿命试验总计进行了 815 小时. 以初始工作电流归一, 假定当工作电流升高 50% 时, 认为器件寿命终止. 工作电流随时间的变化曲线如图 6.

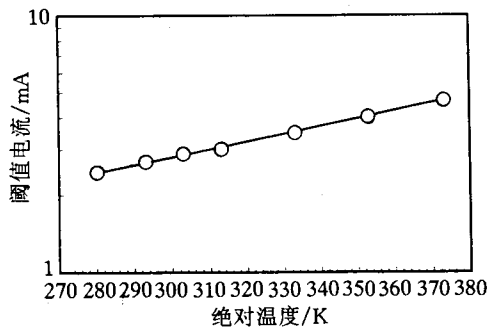


图 5 阈值电流温度关系

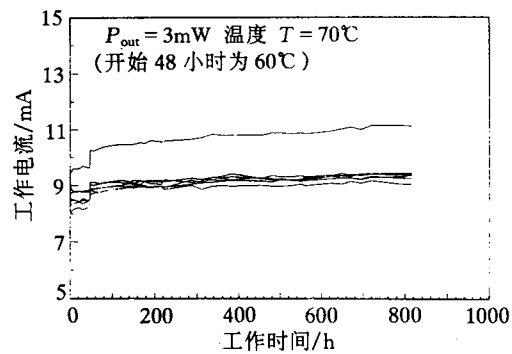


图 6 寿命试验曲线

工作寿命与温度的关系 Arrhenis 方程为: $\tau = \tau_0 \exp(E_a/K_b T)$, 其中 τ_0 为常数; E_a 为激活能; $K_b = 0.086178\text{meV/K}$, 即玻耳兹曼常数, T 为绝对温度. 假定 $E_a = 0.3\text{eV}$, 可以获得 $\tau_{25} = \tau_{70} \times 4.62 \times$ 终止倍率. 对寿命试验开始 60°C 47 小时试验可以推算到 25°C 的工作时间为 175 小时, 以后的寿命试验结果如表 1 所示.

表 1 寿命试验结果一览

样品号	起始工作电流/mA	停止试验时工作电流/mA	电流增加/%	到终止倍率	推算终止寿命/h
A21	8.69	9.38	7.94	6.30	22353
A31	8.88	9.36	5.41	9.24	32785
A41	10.29	11.13	8.16	6.13	21750
A51	8.88	9.26	4.29	11.68	41443
A61	9.12	9.42	3.29	15.20	53932
A71	8.84	9.05	2.38	20.01	74547
A81	9.04	9.37	3.65	13.70	48610

如果按 $E_a = 0.5\text{eV}$ 计算, 表 1 中推算终止寿命应乘以 2.78 倍.

上述器件与芯径 $\Phi 50\mu\text{m}$ 标准多模光纤耦合, 14 脚双列直插管壳封装, 出纤功率为 1mW 时的工作电流 $< 9\text{mA}$ 典型值为 7mA , 二极管电压为 1.85V , 器件串联电阻 $\sim 32\Omega$.

同样结构的器件为了获得较大的输出功率,取腔长为 $800\mu\text{m}$,激光腔背面 R 为 0.95 的高反射膜,前面 R 为 0.1 的增透膜. 获得的中功率激光器发射波长为 $\sim 840\text{nm}$, 阈值电流为 $15\sim 35\text{mA}$, 线性输出功率 $\geq 100\text{mW}$, 微分子量子效率 $\sim 0.96\text{mW/mA}$.

5 讨论

$\sim 850\text{nm}$ 量子阱激光器要应用于计算机光纤互连,还需要进一步提高器件的工作寿命. 应变量子阱激光器具有阻止缺陷、暗线、暗斑向量子阱有源层延伸的特点,已由实验证明^[9]. 用四元系材料 InGaAsP 或 InGaAlAs 作为量子阱,可以获得 $\sim 850\text{nm}$ 的激射波长,应变量子阱器件具有更低的阈电流密度和阈值电流. 可以更适合于作为低功耗和长寿命的器件. 是今后努力的方向.

掩埋异质结构激光器具有电流限制好,条形窄等优点,但是工艺条件较复杂,需要二次外延生长和用 Zn 扩散降低接触电阻,在 P-AlGaAs 上做 P 电极,成品率低. 器件寿命也得不到保证. 1982 年 Tsang^[1]报道 $\sim 2.5\text{nm}$ 宽掩埋条形器件获得了 2.5mA 阈值电流. 在非平面衬底上的 V 形槽内制备的量子阱线激光器获得 1.8mA 的极低阈值工作^[3]. 但是生长前衬底的制备及清洁处理非平面衬底上量子阱线的生长,以及使注入电流限制在极窄的 V 形槽上的电极制备,技术要求相当高,器件寿命未见报道. 杂质诱导无序条形器件已获得 3.2mA 阈值电流的报道^[5],但需要热退火等多道工艺过程,还未见工作寿命的报道.

脊形波导器件电流的侧向扩展较严重. 然而,我们经工艺和器件结构优化,仍能获得上述各种极低阈值器件的相当水平. 工艺简单、成品率高、容易产品化. 应该指出,实际应用中往往不需要这样高的微分子量子效率. 可以增加腔长或调整激光腔端面反射膜参数来满足应用要求.

6 结语

脊形波导 GaAs/GaAlAs GRIN-SCH SQW 激光器,通过工艺器件结构优化,获得了 $2.2\sim 4\text{mA}$ 的极低阈值电流和 $\sim 0.6\text{mW/mA}$ 的微分子量子效率,任意抽取的七只寿命试验样管,经 70°C 3mW 恒功率寿命试验,按 0.3eV 激活能和工作电流增加 50% 为终止工作的推算,工作寿命平均大于 4 万小时,已达到实用化要求.

致谢 本工作获得国家光电子工艺中心的许多帮助在此表示衷心感谢.

参 考 文 献

- [1] W. T. Tsang *et al.*, *Electron. Lett.*, 1982, **18**(19): 845.
- [2] Pamela *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **50**(25): 1773.
- [3] E. Kapon *et al.*, *Electron. Lett.*, 1988, **24**(16): 985.
- [4] E. Kapon *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1825.
- [5] W. X. Zhou, K. K. Law and J. L. Merz, *J. Appl. Phys.*, 1991, **59**(26): 3375.
- [6] J. W. Xiao *et al.*, *Electron. Lett.*, 1992, **28**(2): 154.

- [7] 张敬明,等,半导体学报,1992,13(2):67.
[8] R. H. Yan *et al.*, IEEE J. Quantum Electron., 1990, 26(2): 213.
[9] R. G. Waters *et al.*, IEEE Photon. Technol. Lett., 1990, 2(8): 531.

Extremely Low Threshold Single Quantum Well Laser Diodes With Ridge Waveguide and GRIN-SCH Structures

Zhang Jingming, Chen Lianghui, Xu Junying, Xu Zuntu,
Yang Guowen, Lu Hui and Guo Wenhua

(*Institute of Semiconductors, The Chinese Academy of Sciences,
National Engineering Research Center for Optoelectronic Devices, Beijing 100083*)

Received 12 September 1996, revised manuscript received 11 November 1996

Abstract In this paper, we report the optimal design, device fabrication and characteristics for extremely low threshold current $\sim 0.85\mu\text{m}$ GaAs/AlGaAs single quantum well Laser diodes with ridge waveguide and graded refractive index separated confinement structures. The extremely low threshold current of $2.2\sim 4\text{mA}$ and the differential quantum efficiency of $\sim 0.6\text{mW/mA}$ are obtained. The speed ageing tests are performed under the 70°C and 3mW . The average lifetime at room temperature is evaluated over 40,000 h.

PACC: 4255P