

可见光—红外光 GaAlAs 激光器的研究

郑广富 廖先炳 郑显明 胡恩智

(四川永川半导体光电研究所)

1982年4月8日收到

提 要

已获得室温连续工作的可见光 GaAlAs 激光器, 激光波长 $\sim 7600 \text{ \AA}$. 其电光参数与红外光 GaAlAs 激光器相似, 红外光 GaAlAs 激光器激光波长 $\sim 8800 \text{ \AA}$, 室温连续工作寿命为 10^4 小时量级, 其最高连续工作的环境温度可达 150°C .

一、材料考虑与器件制作

对于 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料, 室温下 Γ 直接带隙 E_g^{Γ} 与组分 x 有关系式^[1]:

$$E_g^{\Gamma}(\text{eV}) = 1.424 + 1.247x, \quad 0 \leq x < 0.45,$$

制作波长 $\sim 7600 \text{ \AA}$ 的可见光 GaAlAs 激光器有源材料组分为 $\text{Ga}_{0.83}\text{Al}_{0.17}\text{As}$. 考虑到红外光激光器有源材料是 P 型掺杂补偿的 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$, 发射光子能量(光学带隙) E 比电学带隙约低 40meV , 即 $E = E_g^{\Gamma} - 0.04$, 波长 $\sim 8800 \text{ \AA}$ 的红外光激光器有源材料组分为 $\text{Ga}_{0.98}\text{Al}_{0.02}\text{As}$.

当 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料组分 $x > 0.45$ 时, 由图 1 可知, 此时的带隙不取 Γ 带, 而取较窄的 X 带, 室温下这种材料的带隙 E_g^X 可表示为:

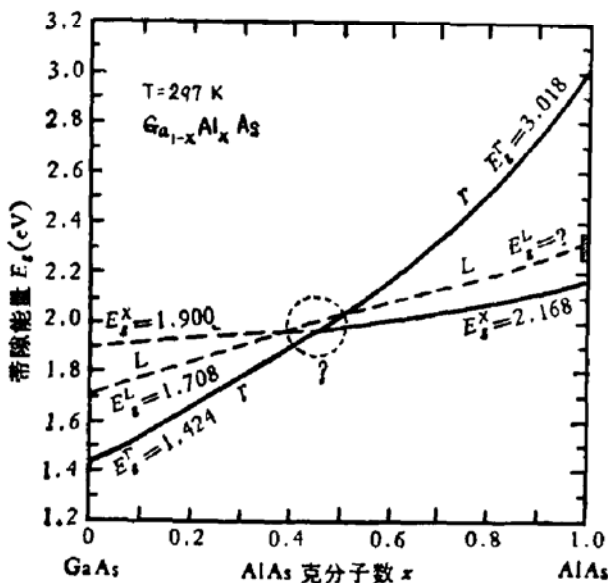


图1 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 材料直接带隙 E_g^{Γ} 和间接带隙 E_g^L 、 E_g^X 与组分 x 的关系

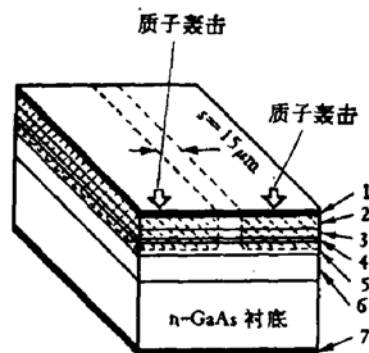


图2 可见光和红外光 GaAlAs DH 激光器的内部结构

1. p 面 Cr-Au 金属欧姆接触层. 2. V, p-GaAs 表面接触层. 3. IV, $\text{p-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 限制层, E_{g1}, \bar{n}_1 . 4. III, $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 有源层, E_g, \bar{n} . 5. II, $\text{n-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 限制层, E_{g1}, \bar{n}_1 . 6. I, $\text{n-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 缓冲层. 7. n 面 AuGeNi 金属欧姆接触层.

$$E_g^s(\text{eV}) = 1.900 + 0.125x + 0.143x^2, \quad 0.45 < x \leq 1.0,$$

DH 激光器要有良好的光和载流子限制作用, 经验证明, 异质结构材料必须满足 $\Delta E_g = 0.25-0.45\text{eV}$, $\Delta\bar{n}/\bar{n}_2 = 3-7\%$ 前面已确定有源材料, 选取可见光激光器限制层材料为 $\text{Ga}_{0.47}\text{Al}_{0.53}\text{As}$, 红外光激光器限制层材料为 $\text{Ga}_{0.64}\text{Al}_{0.36}\text{As}$, 均能满足限制作用的要求。

这两种激光器我们用同一生长系统以相似的工艺条件制作晶片。如图 2 所示, 在 (100) 面 $n\text{-GaAs}$ 衬底上依次液相处延: 第 I 层, $n\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 缓冲层(可见光激光器 $x = 0.1$, 红外光激光器 $x = 0.08$), 掺 Te, $n \sim 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, $d_1 \sim 10\mu\text{m}$; 第 II 层, $N\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 限制层, 掺 Te, $N \sim 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, $d_2 \sim 1.5\mu\text{m}$; 第 III 层, $\text{Ga}_{1-y}\text{Al}_y\text{As}$ 有源层, 可见光激光器是不掺杂的 $n \sim 1 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$, 红外光激光器是掺 Si 的 P 型补偿的 $p \sim 5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, $d_3 = 0.15-0.30\mu\text{m}$; 第 IV 层, $P\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 限制层, 可见光激光器是掺 Zn 的 $P \sim 2 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, 红外光激光器是掺 Ge 的 $P \sim 1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$, $d_4 = 0.8-1.0\mu\text{m}$; 第 V 层, $p\text{-GaAs}$ 表面欧姆接触层, 掺 Ge, $p \sim 3 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$, $d_5 = 1.0-2.0\mu\text{m}$ 。外延温度范围 $844-826^\circ\text{C}$, 溶液过饱和度 $5-10^\circ\text{C}$, 生长降温速率 $0.2^\circ\text{C}/\text{min}$ 。外延片制成后, 经闭管浅 Zn 扩散, p^+ 面 CrAu, n 面 Au GeNi 的蒸发和合金, 用高能质子轰击制成 $15\mu\text{m}$ 条宽的质子轰击条型, 最后解理、键合, 可见光激光器用带透明的玻璃窗管帽封装, 红外光激光器用光纤耦合并监控功率输出的封装。

二、结果比较

1. 电学特性 在 $I_F = 1\text{mA}$ 下测正向导通电压 V_F , 红外光激光器 $V_F = 1.1-1.3\text{V}$, 可见光激光器 $V_F = 1.2-1.6\text{V}$; 在 $I_r = 100\mu\text{A}$ 下测反向击穿电压 V_B , 红外光激光器

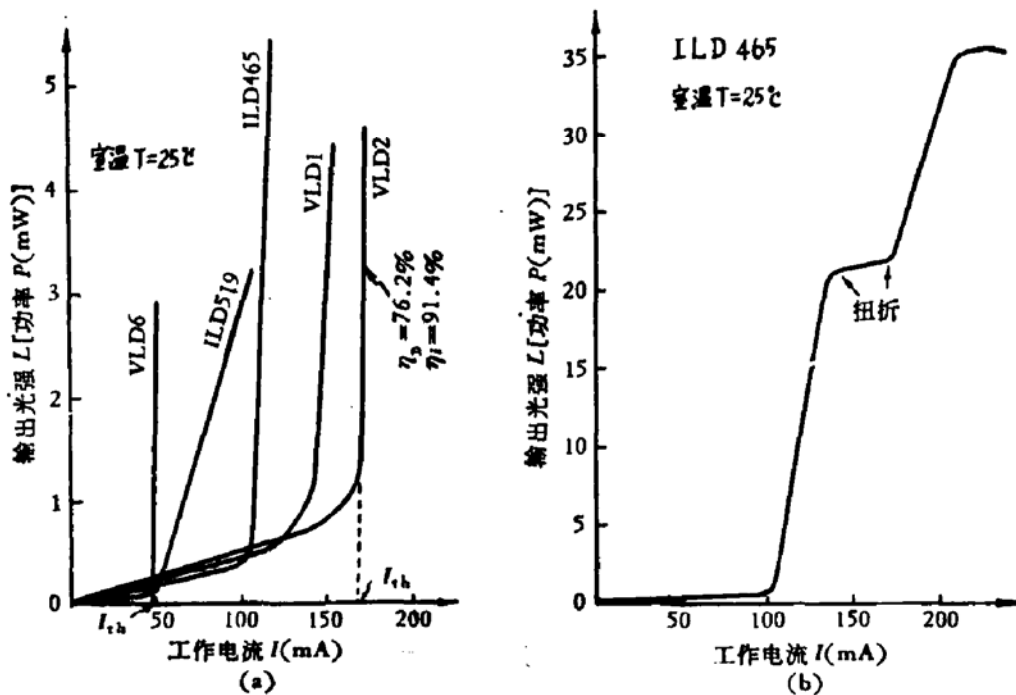
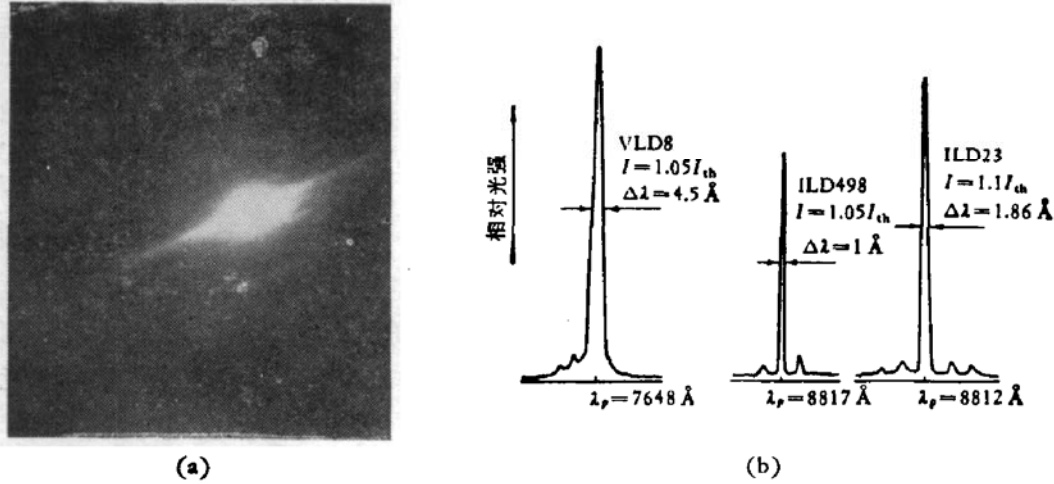


图 3 激光器 $L-I$ 特性

VLD: 可见光激光器 ILD: 红外光激光器

$V_B = 4-10V$, 可见光激光器 $V_B = 5-15V$; 阈值之上测 $V-I$ 特性算出串联电阻 R_s , 红外光激光器 $R_s = 1-3\Omega$, 可见光激光器 $R_s = 3-8\Omega$; 室温下直流工作时, 红外光激光器阈值电流 $I_{th} = 46-160mA$, 其密度 $J_{th} = 1200-4200A/cm^2$, 可见光激光器 $I_{th} = 46-180mA$, $J_{th} = 1200-4800A/cm^2$. 图 3 给出了其中几个样品的 $L-I$ 特性曲线.

2. 光谱 可见光激光器加上 20-30mA 直流偏置时, 人眼便直接见其腔面上发射很亮的红光斑, 当电流达到阈值时, 就射出特亮的红色激光束, 图 4(a) 是摄得的近场图. 好的可见光和红外光激光器可得到单横模光斑. 测量红外光激光器的远场, 得知光束发散



(a) 可见光激光器激光的近场图(样品 VLD8) (b) 激光谱线特性

图 4

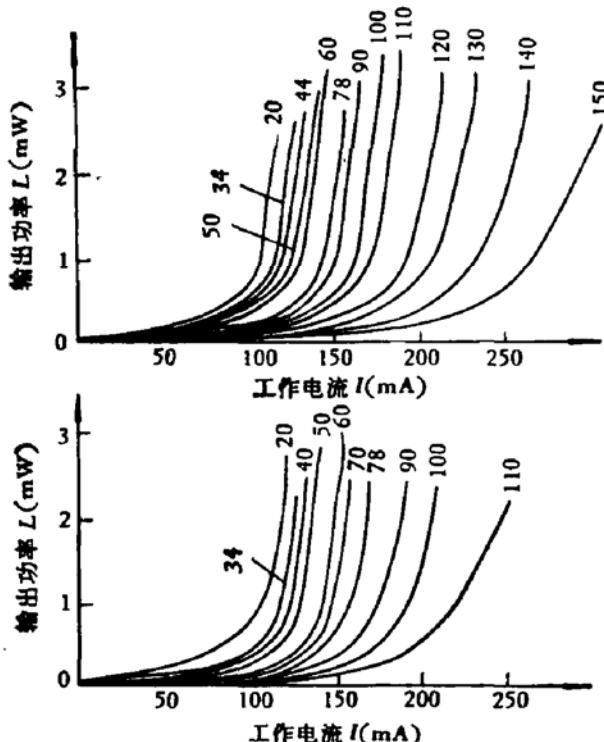


图 5 红外光 GaAlAs 激光器不同环境温度下测得连续工作的 $L-I$ 特性
 上图样管 ILD385, 下图样管 ILD493.
 曲线上的数字为温度($^{\circ}C$)

角 $\theta_{\parallel} = 5-10^{\circ}$, $\theta_{\perp} = 30-60^{\circ}$. 图 4(b) 是用 GDM 1000 型双光栅单色仪测得的光谱线, 红外光激光器峰值波长 $\lambda_p = 8800 \text{ \AA}$, 可见光激光器 $\lambda_p = 7600 \text{ \AA}$, 最好的光谱线宽 $\Delta\lambda$ 分别为 1 \AA 和 4.5 \AA .

3. 功率和频率 两种激光器单面连续输出激光功率 $P_0 = 1-35 \text{ mW}$, 多数激光器 10mW 范围内 $L-I$ 特性的线性较好, 最好的超过 20mW 才出现 $L-I$ 特性的扭折现象, 如图 3 中所示. 在未加预直流偏置情况下, 测得红外光激光器激光脉冲上升时间为 $1-3ns$.

4. 温度特性 以 4 只红外光激光器及相应的探测器为一组置于烘箱内, 通氮气作环境气氛, 每升高一定温度, 恒温后加直流工作, 测出每一环境温度下的 $L-I$ 特性曲线, 如图 5 所示. 表 1 列出了任取其中一组的温度特性, 最高连续工作的环境温度可达 $150^{\circ}C$, 一般都在

110°C以上。在 20—50°C 常温下, I_{th} 增长率平均为 0.36 mA/°C, 平均特征温度 T_0 —167K。

表 1 GaAlAs 红外光激光器温度特征

样 品	20°C下连续激射阈值电流 $I_{th}(20)$ (mA)	50°C下连续激射阈值电流 $I_{th}(50)$ (mA)	20~50°C 阈值电流增长率 r (mA/°C)	连续工作最高环境温度 (°C)	激光器特征温度 T_0 (K)
ILD 385	104.0	116.5	0.417	150	176
ILD 478	73.0	83.0	0.333	120	170
ILD 479	105.0	119.0	0.467	110	159
ILD 493	96.0	103.0	0.233	110	164

5. 连续工作寿命 红外光激光器实际室温连续工作已达 10^4 小时以上。用 55°C, 70°C, 80°C 的高温环境作加速退化试验, 使激光器连续输出功率保持 1mW 以上, 用 $E_s = 0.7\text{eV}$ 外推, 证明这些激光器室温连续工作寿命达 10^4 小时数量级。

6. 成品率 表 2 给出了我们在不同时期抽测几个外延片制得的激光器的参数, 最好的一个外延片 $6 \times 10 \text{ mm}^2$ 面积可制得室温连续工作的激光器达 105 只。

表 2 GaAlAs 红外光激光器外延片制作器件统计表

外延片号	室温连续工作的激光器数 (只)	正向导通电压 V_F (V) (1mA下)	反向击穿电压 V_B (V) (100 μ A下)	阈值电流 I_{th} (mA)	阈值电流密度 J_{th} (A/cm 2)
80-4-17	60	1.0—1.1	4.0—6.0	54—160	1400—4200
80-10-18	105	1.0—1.1	4.0—6.0	56—150	1490—4000
81-3-31	93	1.0—1.1	4.0—6.0	46—130	1220—3460

三、讨论分析

1. 重复性和均匀性 为提高激光器的可靠性、重复性和均匀性, 在晶片制作方面, 我们曾采取了一系列改进措施: 探索晶格完全匹配的异质结材料组分^[2]; 插入恰当厚度低 Al 量 GaAlAs 缓冲层; 设计挤压式石墨舟; 采用易控制薄层的慢降温速率生长; 各外延层厚度恰当控制; 一个周期接一个周期连续地生长晶片。结果表明: 器件参数均匀, 重复性和可靠性好, 成品率也高。

2. 器件温度特性 表 1 给出的 T_0 是由图 5 所示测出一系列 $I_{th}(T) \sim T$ 曲线, 由阈值电流 I_{th} 随工作温度(结温)变化的公式得出 $T_0 = (T - T_1) / \ln [I_{th}(T) / I_{th}(T_1)]$ 而计算出来(平均值)的。阈值随温度变化的大小, 跟制作激光器所用的材料、条型结构、工艺水平和工作环境温度有关。GaAlAs 激光器中, 因内部温度升高, 一部分注入到导带和价带的电子与空穴的能量变大, 它们的辐射或非辐射复合对激光光谱增益毫无贡献, 使阈值增大。在 0—70°C 范围, GaAlAs 激光器的 $T_0 = 100—180\text{K}$, 相应的 I_{th} 增量 0.6—1.0%/°C, 连续工作的最高环境温度 100—160°C。我们实验表明: GaAlAs 可见光激光器的温度特性比 GaAlAs 红外光激光器差得多。

3. 波长与Al组分的关系 我们曾系统地摸索了适合我们的生长装置和工艺条件, 波长从可见光 $\sim 7000 \text{ \AA}$ 至红外光 $\sim 9000 \text{ \AA}$ 的有源材料 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 溶液中 Al 称量与所得

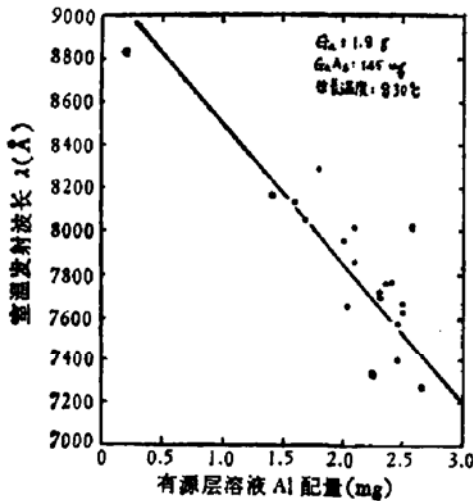


图6 激光波长 λ 与有源层溶液中 Al 称量的关系曲线

波长的对应关系。实验结果如图6, 有源层 Al 量越大, 波长越短, 服从线性规律。我们根据图中曲线, 较准确地制出其中任一波长的激光器。

4. P型限制层掺杂剂与掺杂浓度 P型 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 限制层, 对于红外光激光器($x \sim 0.36$) 来说, 用 Ge 作掺杂剂, 可得到 $\sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的浓度, 还能做出低热阻长工作寿命的激光器; 但对可见光激光器($x \sim 0.53$) 来说, 材料的热阻率处于最高峰^[1], 此时用 Ge 作掺杂剂, 我们反复试验表明: 只得到约 $6 \times 10^{15} - 9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的浓度, 使器件的串联电阻和热阻都很大, 难于室温连续工作。如果希望激光器获得较短波长和较大功率而置于 77K 工作时, 掺 Ge 材料的载流子被冻析^[2], 大大

增加了激光器的串联电阻和热阻, 达不到预期效果。我们在高 Al 量限制层用掺 Zn 代替掺 Ge 后, 浓度达 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 提高了 2 个数量级, 使可见光激光器较容易地获得室温连续工作, 也消除了低温载流子冻析现象。

5. 可靠性问题 我们可重复制出室温连续工作 10^4 小时量级的红外光激光器。用同样方法制造可见光激光器, 试验表明: 我们初期的可见光激光器室温连续工作寿命只有几小时—几十小时。可见光激光器的 I_{th} 一般比红外光激光器的高, 原因是随着有源层 Al 量的增大, 内部量子效率 η_i 下降, 阈值电流密度 J_{th} 上升, 激光器工作寿命变短, 特别是当波长短于 7500 \AA 时, 所有的电光参数、热特性及器件工作寿命急剧变差。由图 1 也可知, 随着 Al 组分增大, Γ 、L、X 导带的能量都在升高, 但 Γ 带上升迅速, 很快接近 L、X 带, 导致有源层 Al 量较高的激光器工作时, 外加电流一部分注入到 Γ 直接导带用于辐射复合, 也有一部分注入到 L 或 X 间接导带变成非辐射复合而产生大量热, 使 η_i 下降, J_{th} 上升, 工作寿命短。当然这些性能还与制作水平有关。而波长短于 7500 \AA 的有源层中掺 Te, 对缺陷有钉锁效应, 大大延长器件工作寿命。

研究工作中得到本室和四室同志对参数测试的协助, 谨致感谢。

参 考 文 献

- [1] H. C. Casey, Jr. and M. B. Panish, Heterostructure Lasers, Part A, p193, Part B, pp79-104. Academic Press, New York (1978).
- [2] 郑广富, 激光, 8, 9, 14(1981).
- [3] H. Kressel and J. K. Butler, Semiconductor Lasers And Heterojunction LEDs, p. 504, Academic Press, New York (1977).

An Investigation on Visible-Infrared GaAlAs Lasers

Zheng Guangfu, Liao Xianbing, Zheng Xianming and Hu Enzhi

(Institute of Semiconductor Optoelectronics, Yongchuan Sichuan)

Abstract

Visible GaAlAs lasers with CW operation at room temperature and lasing wavelength of $\sim 7600 \text{ \AA}$, have been achieved. Their electrical and optical parameters are similar to those of infrared GaAlAs lasers. The lasing wavelength of infrared GaAlAs lasers is $\sim 8800 \text{ \AA}$, at room temperature the CW life is of the order of magnitude of 10^4 hours, and the highest CW operating ambient temperature can be as high as 150°C .