

1.55 μm 大光腔激光器

钟景昌 朱宝仁 黎荣晖 赵英杰

(长春光学精密机械学院近代光学所, 长春 130022)

提 要

高功率 1.55 μm 激光器长期以来一直为人们所重视和追求。本文通过合理设计, 采用适宜的生长技术, 首次成功地制备了大光腔结构, 从而实现了脉冲输出功率高达 2 W 以上的激光器。器件还具有阈值电流低(宽接触型结构的 $J_{\text{th}} \leq 2.7 \text{ kA/cm}^2$), 温度稳定性高($T_0 \approx 130 \text{ K}$)的特点, 同时具有良好的光谱模式, 是这一波段的理想光源。

关键词: 半导体激光器。

一、引 言

高功率半导体激光器一向是激光器件研究中的一个重要的理论和实际问题。近年来, 1.3~1.55 μm 波段的长波长高功率器件也开始引起人们的重视。这不仅是为了实现超长距离的光纤传输, 而且更是为了扩展这一波段的其他应用, 如军事上的制导、测距; 以及作为光学时畴反射计的光源和作为光纤喇曼放大器的泵浦源等等^[1]。

为了研制此波段高功率激光器, 本文首次把大光腔结构形式引入 1.55 μm InGaAsP-InP 激光器, 并成功地用液相外延技术实现了这一目的。

长波长激光器的特征温度一般比较低, 激光器的性能对温度敏感, 特别是高功率器件, 工作的稳定性直接受温度的制约。本文是在 1.3 μm InGaAsP-InP 大光腔结构激光器^[2]的基础上, 考虑了有源区温升, 阈值电流密度和外微分子效率等参数的影响, 设计出六层结构的大光腔芯片, 经过生长和实验检测证明, 实现了设想的结果。

二、参数分析和结构设计

通常情况下, 短波长 AlGaAs-GaAs 激光器的输出功率受输出端面材料破坏阈值(灾变损伤)的限制, 而长波长 InGaAsP-InP 激光器则主要受有源区温度的限制^[3]。因此, 研究影响有源区温度的因素并控制有源区的温升是提高长波长激光器输出功率的有效措施。一般说来, 有源区的温升引起阈值电流的增大和外微分子效率的降低。在大光腔结构中, 可以合理地假设单位腔长的热阻和串联电阻是恒定不变的^[4]。当外加电流密度为 J_a 时, 有源区的温升 T_j 可以写成:

$$T_j = R_{\text{tho}} \{ V_j \cdot D \cdot [J_a - J_{\text{th}}(T_j)] \cdot [1 - \eta_a(T_j)] + R_{\text{so}} \cdot D \cdot J_a \}, \quad (1)$$

式中 V_j 为结电压, D 为有源区的宽度, 单位腔长的热阻 R_{tho} 和串联电阻 R_{so} 都是常数, 可

由实验测出。 $\eta_a(T_j)$ 和 $J_{th}(T_j)$ 分别为温度为 T_j 时的外微分量子效率和阈值电流密度，两者都是温度的函数。

1. $J_a = J_{th}(T_j)$

有源区温升 $T_j = R_{th0} R_{so} D J_{th}(T_j)$ ，即温升和阈值电流密度成正比。此时，由于大光腔结构的低阈值和高特征温度^[2]，致使温升 T_j 低而稳定。

2. $J_a > J_{th}(T_j)$

有源区温升 T_j 将随之提高。但大光腔结构保证了较小的有源区宽度 D (代之以较大的波导层厚度)和较高的外微分量子效率 η_a ，因而有效地限制了有源区的温升。

在室温条件下，外微分量子效率 η_a 和阈值电流密度 J_{th} 又都是激光器腔长 L 和前后镜面反射率 R_f 和 R_b 的函数，其关系是

$$\eta_a = \eta_i \frac{\ln(1/R_f \cdot R_b)}{2\alpha L + \ln(1/R_f \cdot R_b)}, \tag{2}$$

$$J_{th} = \frac{d}{\beta \Gamma_v} \left[\alpha + \frac{\ln(1/R_f \cdot R_b)}{2L} \right] + dJ_0, \tag{3}$$

为了简化工艺，首先制备了前后镜面都是天然解理面的激光器，即 $R_f = R_b = R$ ，此时

$$\left. \begin{aligned} \eta_a &= \frac{\eta_i \ln(1/R)}{\alpha L + \ln(1/R)}, \\ J_{th} &= \frac{d}{\beta \Gamma_v} \left(\alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) + dJ_0, \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

其中 η_i 是内量子效率， Γ_v 是限制因子， α 为内部损耗，数值约为 13 cm^{-1} ； J_0 和 β 估计分别为 $7.4 \text{ kA/cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ 和 $2.0 \times 10^{-2} \text{ cm} \cdot \mu\text{m}/\text{A}$ 。

P ₊ -InGaAsP (Zn)	$d_6 = 2-3 \mu\text{m}$
P-InP (Zn)	$d_5 = 1-2 \mu\text{m}$
InGaAsP (int)	$d_4 = 0.1-0.2 \mu\text{m}$
InGaAsP (int.)	$d_3 = 0.2-0.5 \mu\text{m}$
InGaAsP (int)	$d_2 = 0.5-1.5 \mu\text{m}$
n-InP (Te)	$d_1 = 3-4 \mu\text{m}$
n-InP(Sn) sub.	

根据上述分析，作者设计了如图1所示的六层大光腔结构。由于InGaAsP有源层和P型InP限制层在成分上相差过大而在生长时有源层有被回熔掉的可能，这是 $1.55 \mu\text{m}$ 激光器和 $1.3 \mu\text{m}$ 激光器在设计 and 生长上的一个重要区别。且经验表明，随着激光器输出波长的增大，这种回熔的趋势越加强；当波长大于 $1.5 \mu\text{m}$ 后，回熔严重到以致不能保持完整的有源区。因此我们在有源层和P型InP限制层之间设计生长一层本征的InGaAsP层，使其带宽对应的波长大约在 $1.25 \mu\text{m}$ 左右，以便在成分上起过渡的作用，进而达到抗回熔的目的。与此同时，抗回熔层改善了晶格匹配，对降低阈值电流有重要贡献。

有源层和波导层也都采用本征材料，以期减小光学吸收损耗。由理论计算和生长实验确定的各外延层厚度和掺杂水平，改善了激光器的温度特性，提高了工作稳定性，进而实现了高功率输出的目的。

三、大光腔结构的外延生长和器件制备

InGaAsP-InP大光腔结构是用液相外延技术，采取两相溶液法由水平滑动舟外延生长的。为了实现所设计的六层结构，保证有源层和抗回熔层的完好生长，采用了适中的过冷

Fig. 1 Schematic diagram of the $1.55 \mu\text{m}$ LOC laser structure

度。实际生长过程表明,有源层的厚度 d 和生长时间 t 的关系如图 2 所示,即 d 正比于 \sqrt{t} ,说明生长过程是在过冷熔液中进行的,而过冷的程度可以粗略地估计为 5°C 左右^[5]。实验证明,这样适中的过冷度对降低缺陷和改善晶格匹配具有重要作用。

通常以 InP 的(111) B 面做衬底时,生长的质量比用(100)面更好。但为了使有源层和抗回熔层的固相组分不对溶液的过冷度太敏感,以利于实现对外延生长过程的精确控制,同时能够获得最佳的晶格匹配。采用(100)定向的 n 型 InP 做衬底,这种取向还有利于谐振腔的解理和其他的制管工艺过程。采用低位错 (EPD $\sim 10^4/\text{cm}^2$) 的 n 型 InP ($n \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 单晶片,经过机械化学抛光,在装入滑动舟之前用 $\text{Br}-\text{CH}_3\text{OH}$ 腐蚀。生长 InGaAsP 有源层的熔液,由超纯 In(99.9999%) 和非掺杂的 InAs, GaAs 以及过量的 InP 盖片组成,后者是提供 P 源并维持一定的蒸气压而采用的一个简单方法。先对 In 熔液用 700°C 高温在高纯 H_2 的保护下维持 2 小时进行脱氧处理。所用 H_2 由高纯 H_2 发生器产生后直接使用,其纯度可达 99.9999%。无论是在配制溶液、生长过程还是处于休闲待用状态,反应管内一直连续供氢,昼夜不停长达数月之久,这对防止系统污染和氧化起了重要作用。用脱氧处理后的 In 配制生长各层的熔液并以 650°C 的温度熔源半小时,然后以 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率降温生长。外延生长程序如图 3 所示。连续生长六层,即: n-InP (掺 Te, $N \approx 1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), 温度降到 637°C 时生长波导层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (非掺杂), 有源层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (非掺杂), 抗回熔层 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ (非掺杂), P-InP 限制层 (掺 Zn, $P \approx 2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$), 和重掺杂顶层 $\text{P}^+-\text{InGaAsP}$ (掺 Zn, $P \approx 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)。各层的厚度如图 1 所示, $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 有源层的生长温度为 630°C 。

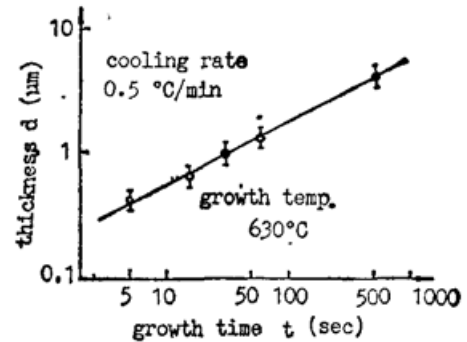


Fig. 2 Active layer thickness d as a function of growth time t grown by the two-phase solution technique.

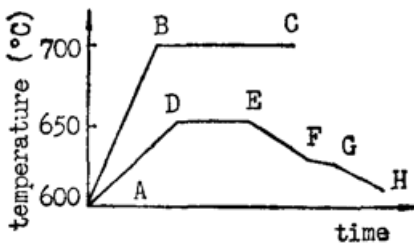


Fig.3 Typical epitaxial growth schedule to grow the LOC laser structure

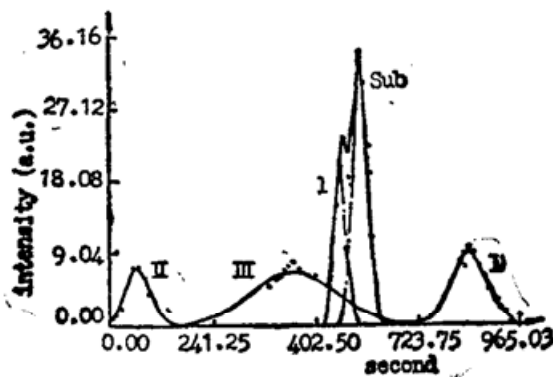


Fig. 4 Rocking curve of the double-crystal X-ray diffractometer.

采用双晶 X 射线衍射方法对生长后的晶格失配量

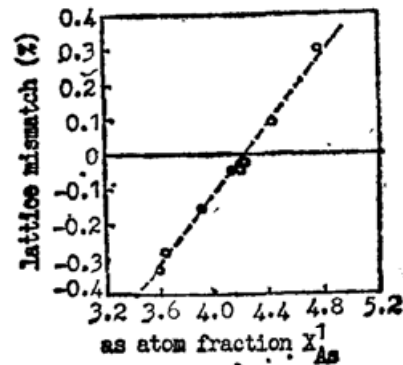


Fig. 5 Lattice mismatch $\Delta a/a$ of $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ from InP as a function of As composition in the melt. Exact lattice matching can be obtained with $X_{As}^I = 4.3 \text{ a/o}$

$(\Delta a/a) [= (a_{InGaAsP} - a_{InP})/a_{InP}]$ 进行了测量。其结果如图 4 所示。其值约在 10^{-8} 左右, 文献[6]表明, $(\Delta a/a)$ 随溶液中 As 的组分 X_{As}^L 变化, 当溶液中 Ga 组分 X_{Ga}^L 保持恒定的 0.9%, $X_{As}^L = 4.3\%$ 时达到最佳匹配, 见图 5 所示。在图中所示的范围内, 都可能获得平滑的表面, 与晶格失配无关。

外延生长好的片子用金相显微镜观察, 表面光滑, 不带 In 的痕迹, 各外延层之间介面清晰平直。用扫描电子显微镜摄得外延层的电子束感生电流(EBIC)照片表明, p-n 结正好落在非掺杂的 $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ 有源层内。

四、1.55 μm 大光腔激光器特性

制做了宽接触型激光器用以评价这种器件的脉冲工作性质。解理腔长为 $350 \sim 400 \mu m$, 条宽为 $100 \sim 150 \mu m$ 。所用电源的脉冲宽度为 $200 \sim 250 ns$, 重复频率 $5 \sim 10 kHz$, 具有良好的方波输出, 前后沿均小于 $20 ns$ 。

图 6 所示为 40 只激光器阈值电流的分布直方图。从中可见, 除个别器件的阈值电流超过 $2.1 A$ 外, 绝大部分激光器的阈电流都在 $1.6 \sim 2.1 A$ 之间。峰值分布在 $2.0 A$ 左右, 对应的电流密度为 $2.7 \sim 3.5 kA/cm^2$ 。

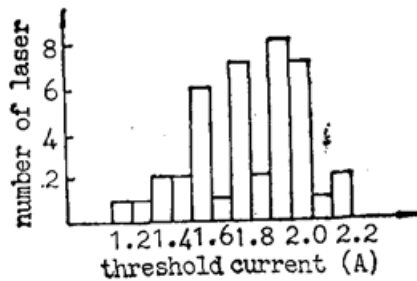


Fig. 6 Histogram of the threshold current distribution for the 40 LOC lasers

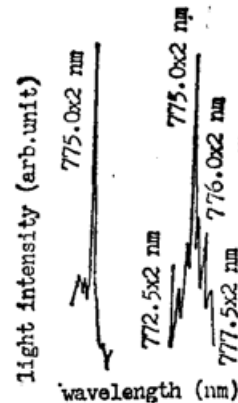


Fig. 7 Emission spectra of a LOC laser slightly above the threshold current

以 InGaAs 探测器做为 $1.55 \mu m$ 激光的接收元件, 测量了该 40 只激光器的输出峰值功率, 结果如表 1 所示。外微分子子效率比同样结构的 $1.3 \mu m$ 激光器大约低 10% 左右。

图 7 所示为 $1.55 \mu m$ 大光腔结构激光器的光谱特性。实验测量结果表明, 在阈值电流附近大部分器件都呈现单纵模式发射, 而当工作电流加大后, 光谱的峰值波长向短波移动,

并出现多模运转。实验结果同时表明, 同一外延片上的不同激光器, 波长起伏在 $20 nm$ 以内, 证明外延生长具有较好的均匀性。光谱测量还表明, 激光器的受激波长时生长有源层溶液中的 GaAs 含量非常敏感, 其敏感程度大约为 $20 nm/mg$, 并且在 $1.3 \sim 1.55 \mu m$ 范围内, 受激波长基本上和溶液中 GaAs 的含量成正比。

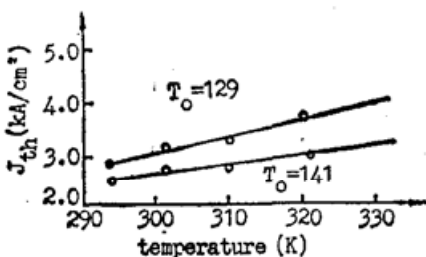


Fig. 8 Threshold current density as a function of temperature for LOC lasers

大光腔结构改善了激光器的温度稳定性, 提高了器件特征温度^[2]。实验测量结果表明, $1.55 \mu m$ 大光腔激

Table 1 Threshold current and peak output power of the 40 LOC lasers

No.	Threshold current (A)	Power at $I=2I_{th}$ (W)	No.	Threshold current (A)	Power at $I=2I_{th}$ (W)
1	2.3	3.36	21	2.3	2.64
2	1.6	3.68	22	1.3	2.74
3	2.0	3.12	23	2.1	2.96
4	2.1	2.88	24	1.7	3.32
5	2.1	3.06	25	1.8	3.54
6	1.6	3.06	26	1.8	3.68
7	1.6	2.82	27	2.2	2.18
8	1.8	3.06	28	1.6	3.36
9	2.1	2.28	29	1.8	2.64
10	1.8	2.74	30	2.0	2.96
11	2.0	2.44	31	1.5	2.68
12	1.6	3.06	32	2.0	2.44
13	2.0	3.24	33	1.2	2.64
14	1.5	2.74	34	2.0	2.44
15	2.0	2.64	35	1.4	2.44
16	1.9	2.88	36	2.0	3.06
17	1.8	3.06	37	2.1	2.10
18	2.1	2.68	38	2.1	2.82
19	1.9	2.74	39	1.8	3.24
20	1.4	3.24	40	1.6	3.24

光器的特征温度在 100~140 K 之间(见图 8 所示)。

同时对 1.55 μm 大光腔结构激光器的寿命进行了实际观测。由于这种结构的特征温度较高,相应地改善了器件的寿命。使激光器的室温下昼夜不停地连续工作于两倍阈值电流,即保持恒定的工作电流,长时间观测它们输出功率的衰减变化。表 2 为三只典型的激光器实际观测结果。

Table 2 Aging test of three typical LOC lasers

No.	Peak power before testing (W)	Dates of testing day/month/year	Operation hour (h)	Peak power after testing (W)
90-03-27A	2.44	28 Mar.-9 Jul'90	2400	2.20
90-04-14	2.56	16 Apr.-7 Jun'90	1200	2.38
90-05-03B	2.94	3 May-9 Jun.'90	1500	2.68

参 考 文 献

- [1] S. Oshiba *et al.*; *IEEE J. Quantum Electron.*, 187, **QE-23**, No. 6 (Jun), 738.
- [2] 钟景昌等;《光学学报》,1990, **10**, No. 3(Mar), 206.
- [3] H. Yonezu *et al.*; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1976, **15**, No.2, 2393.
- [4] W. B. Joyce *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**, No.2, 855.
- [5] N. Toyoda *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**, No. 2, 443.
- [6] T. Yamamoto *et al.*; *IEEE J. Quantum Electron.*, 1978, **QE-14**, No.2(Feb), 95.

1.55 μm large optical cavity laser

ZHONG JINGCHANG, ZHU BAOREN, LI RONGHUI AND ZHAO YINGJIE

(Changchun College of Optics and Fine Mechanics Changchun 130023)

(Received 28 February 1991)

Abstract

High-power 1.55 μm lasers have been sought and highly considered for a long time. A large optical cavity (LOC) structure was successfully prepared for the first time in this work by reasonably designing its configuration and by using the proper growth technique so as to realize lasers with output power higher than 2W in pulsed operation. The devices are also characterized by their low threshold current ($J_{\text{th}} \leq 2.7 \text{ kA/cm}^2$ for broad area contact structure) and high temperature stability ($T_0 \approx 130 \text{ kK}$). At the same time they have good operation modes and are an ideal source of light in this spectrum region.

Key words: semiconductor laser.