

InGaAsP-InP 大光腔结构激光器

钟景昌 朱宝仁 黎荣晖
(长春光学精密机械学院)

提 要

本文针对影响 InGaAsP-InP 激光器温度特性的各种因素, 设计并制备了大光腔(LOC)结构激光器。实验表明, 这种结构改善了激光器的温度稳定性, 获得了低阈值(宽接触型器件 $J_{th} \approx 2.5 \text{ kA/cm}^2$), 高功率(脉冲输出 3W)和高特征温度($T_0 = 150 \text{ K}$)器件。

关键词: 半导体激光器。

一、引 言

1.3 μm InGaAsP-InP 半导体激光器, 由于器件的阈值电流对温度的敏感性, 给应用带来一定的麻烦。特别是对大功率的这类器件, 热特性问题就更加突出。因此, 如何解释温敏性产生的机制并加以解决, 引起许多研究者的关注^[1~3]。

一般说来, 半导体激光器的阈值温度关系可表示为 $J_{th}(T) = J_{th_0} \exp(T/T_0)$, 其中 T_0 为特征温度, 标志激光器对温度的敏感性。为了提高 T_0 , 我们在理论分析的基础上设计并生长出五层大光腔(LOC)结构激光器。经过改进的外延、制管工艺, 最后实测的器件性能证实了这种结构的优越性。

二、器件分析和结构设计

1. 载流子泄漏

载流子泄漏是影响 InGaAsP-InP 激光器温度特性的重要因素。就这一问题, Yano 等人曾对 InGaAsP-InP 双异质结激光器的阈值温度关系进行过较深入的理论研究^[4, 5]。对 1.3 μm InGaAsP-InP 激光器来说, 由于 InP 价带态密度大于导带态密度, P 型 InP 中受主能级比 N 型 InP 中施主能级深, 电子泄漏电流密度大于空穴泄漏电流密度。特别是在室温以上时, 电子泄漏成为决定器件温度特性的主要因素。因此, 在我们的器件中, 采用 LOC 结构。在确保载流子被可靠地限制在有源层的同时, 将光的限制扩展到有源层和波导层内, 降低了腔内的功率密度, 改善了输出饱和特性并使器件在室温以上能稳定的工作。和普通的双异质结构相比较, LOC 结构利用扩大光限制范围来改善器件的温度特性并用本征波导层来冷却部分载流子, 从而减轻了器件的热退化, 使特征温度有所提高。

2. 俄歇复合

俄歇复合是影响 InGaAsP-InP 激光器阈值温度特性的重要因素。在双异质结构器件中,用非辐射复合过程可以解释阈值-温度关系的实验结果,其中复合速率正比于注入载流子密度的平方^[6]。所以一般认为,载流子密度在 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 量级时,光输出饱和现象主要是俄歇复合造成的内量子效率下降所致。

在 III~V 族化合物半导体中,可能产生的俄歇过程主要是两个空穴和一个导带电子相互作用,在自旋劈裂价带中产生一个空穴的所谓 CHHS 过程,另外两种过程的跃迁几率在非简并半导体中比 CHHS 过程低约一个数量级或者更多^[7]。因此,一般只考虑这一带-带俄歇复合过程。然而这里的所有俄歇复合都是超过两个载流子参加的过程,考虑到载流子的散射作用,CHHS 带-带俄歇复合率为:

$$R = 2 \left(\frac{V}{8\pi^3} \right)^4 \iiint T_{ij} P(1, 1', 2, 2') dK_1 dK_2 dK'_1 dK'_2.$$

其中 T_{ij} 是两个载流子散射过程的跃迁几率, V 是体积, P 是统计权重函数。

在设计合理的大光腔结构中,有源层和波导层内的光流密度比普通双异质结构有源层内的低;理想的大光腔激光器的有源层厚度比普通双异质结器件的厚,载流子散射几率变小,载流子发生俄歇过程的几率相对变小,因而对其阈值温度特性有所改善。

3. 光学吸收损耗

半导体激光器的阈值条件是最大模式增益等于光学腔中的总损耗。LOC 器件中的总损耗为:

$$A = (1/L_c) \ln(1/R) + \Gamma \alpha_{oc} + (1 - \Gamma) \cdot \alpha_{ew}.$$

式中 L_c 为腔长, R 为镜面反射率, Γ 为有源层光限制因子, α_{oc} 为有源层中的损耗, α_{ew} 为有源层外,包括限制层和波导层中的损耗。这里的 α_{oc} 损耗又包括电子从自旋劈裂带跃迁到重空穴带的吸收损耗 α_1 和由劈裂带到局域的空受主能级跃迁的吸收损耗 α_2 , 其过程如图 1 所示。

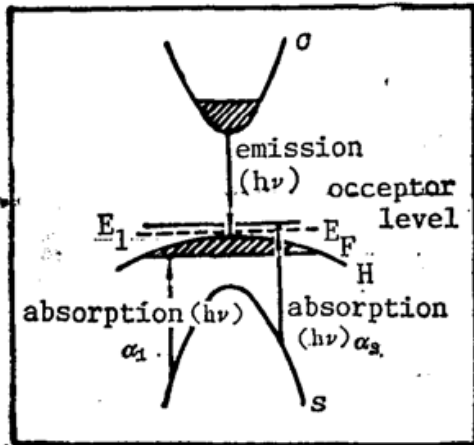


Fig. 1 Electronic transition model for the inter-valence-band absorption

$$\alpha_1 = B_1 / \{1 + \exp[(E_1 - E_{FV})/kT]\} \approx B_1 \exp[(E_{FV} - E_1)/kT],$$

$$\alpha_2 = B_2 / \left\{ 1 + \frac{1}{2} \exp[(E_A - E_{FV})/kT] \right\}.$$

一般说来, $E_A - E_{FV}$ 较小, 而 $E_1 - E_{FV}$ 是 kT 的很多倍, 因此 α_1 比 α_2 随温度变化更明显。在 LOC 结构中的 α_{ew} 值和普通双异质结构的不同, 后者只包括限制层中的损耗; 而对前者来说, 考虑波导层中的损耗比限制层中的损耗更为重要。因此, 在以本征 InGaAsP 为波导层、结构参数设计合理的 LOC 激光器中, 实现低 α_{ew} , 从而改善器件的温度特性是可能的。

针对影响 InGaAsP-InP 激光器温度特性的上述主要因素, 设计出如图 2 所示的 LOC 激光器。采用本征的有源层和波导层以期减小光学吸收损耗; 经过理论计算和外延生长实验, 确定了如图所示的各外延层最佳厚度和掺杂水平, 从而达到有效限制载流子, 降低散射损耗和减小俄歇复合几率的目的。

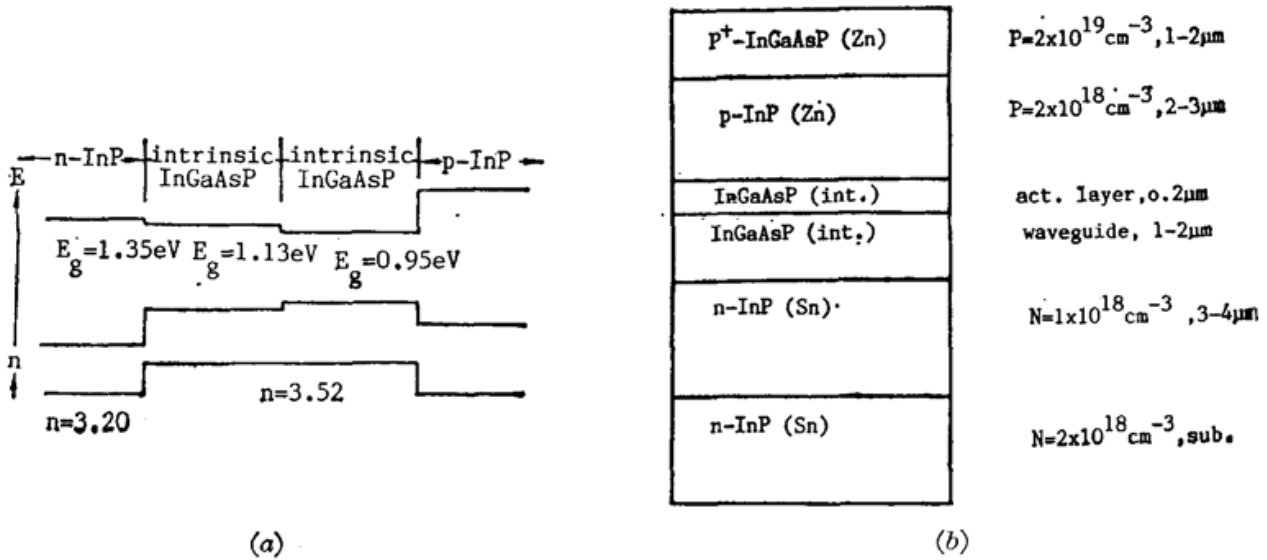


Fig. 2

(a) Schematic diagram of energy band and refractive index in the laser;
 (b) Schematic diagram of the laser structure.

· 三、LOC 结构的外延生长

为了实现所设计的结构,并尽可能减小杂质、缺陷、晶格失配等不良因素的影响,采用了均匀冷却(UC)和突然冷却(SC₂)相结合的液相外延生长方法。由于这种方法具有较大的生长驱动力,外延层生长光滑,各层之间的晶格失配较小(经 X 射线双晶衍射测量, Δa/a < 10⁻⁴)。表面和介面的光滑对克服介面粗糙引起的散射、实现有源层和各外延层实际上的无缺陷具有重要意义,有利于改善激光器的温度特性。

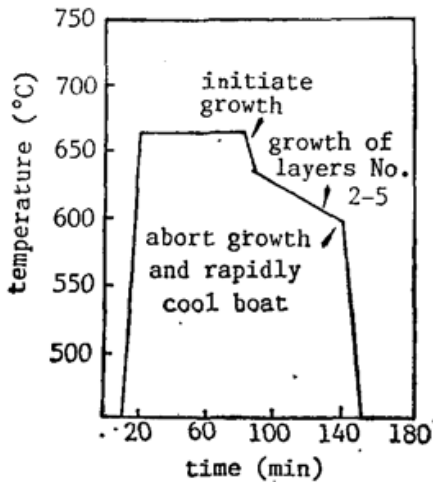


Fig. 3 A typical cooling schedule to grow the LOC laser structure

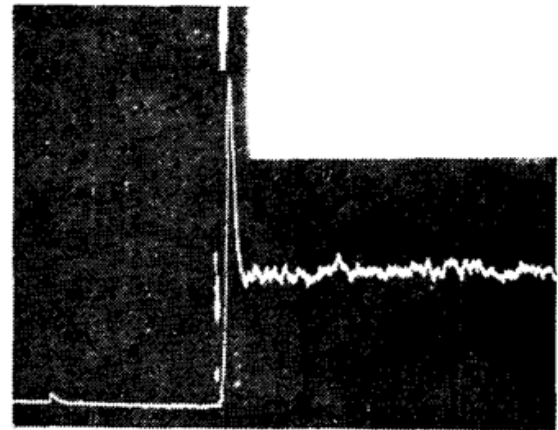


Fig. 4 SEM-EBIC photograph of the epilayers in the laser

生长过程中,用程序控温的外延炉提供所需要的不同的降温速率。使用滑动式高纯石墨舟和超高纯氢气保护生长。这种氢气由发生器产生后直接使用,其纯度可达 99.9999%。实验证明,反应管内连续供氢,昼夜不停达数月之久,有效地防止了系统的污染和氧化问题。生长熔液由超纯铟及 InP, GaAs, InAs, Zn 和 Te 等,精确称量后进行严格的超声清洗和腐蚀后配成,用前先以 700°C 高温在氢气保护下脱氧处理 2 小时。采用 InP 盖片维持饱和

度并在反应管内形成适当的磷蒸气压。尽量缩短生长开始之前衬底暴露于高温下的时间,以防止衬底的热分解。

外延生长程序如图 3 所示。生长第一外延层之前先将衬底接触纯铟溶液 15 秒钟,以回熔掉表面的热和机械损伤。紧接着开始生长缓冲层即第一层 n -InP (掺 Te, $N \approx 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $3 \sim 4 \mu\text{m}$), 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, 厚度 $1 \sim 2 \mu\text{m}$, 相应于辐射波长为 $1.1 \mu\text{m}$), 第三层即 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 有源层 (非掺杂, 厚度 $0.2 \mu\text{m}$ 左右) 是在 630°C 时生长的, 然后继续生长 p -InP 限制层 (掺 Zn, $P \approx 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $2 \sim 3 \mu\text{m}$) 和重掺杂顶层 p^+ -InGaAsP (掺 Zn, $P \approx 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 $1 \sim 2 \mu\text{m}$)。

所制得的外延片在金相显微镜下观察, 各外延层介面平直, 表面光滑; 用扫描电子显微镜摄得外延层的电子束感生电流 (EBIC) 照片 (图 4) 表明, p - n 结刚好落在非故意掺杂的 InGaAsP 区内。 p - n 结的正确位置也被实验结果-单峰发射所证实, 否则将由于结偏位引起发射光谱中的双峰结构。

四、器件特性

1. 电学性能

LOC 结构激光器在电学上和普通的双异质结激光器相似, 电流-电压关系由 p - n 异质结来测定。由于 P 面触点的接触电阻率低 (约为 $5 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$), 因此从 LOC 激光器的典型电流-电压曲线测出, 一般器件的正向微分电阻只有 3Ω 或更小。

2. 阈电流和阈电流温度特性

LOC 激光器的光功率输出作为注入电流的函数进行测量, 以确定器件的阈值水平。用一只锗探测器和一具低噪声放大器探测光功率。典型的光输出功率和注入电流关系的测量结果示于图 5。采用脉冲宽度为 200 ns , 重复频率为 5 KC , 前后沿均小于 20 ns 的脉冲电源, 对 62 只 LOC 激光器进行了阈值测量, 结果如表 1 所示。可见绝大部分激光器的阈值电流分布在 $1.5 \sim 2.5 \text{ A}$ 之间, 峰值分布在 $2.3 \sim 2.5 \text{ A}$, 对应的阈值电流密度为 $1.6 \sim 2.6 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 。

在第二节器件分析基础上设计和制备的 LOC 激光器, 在改善阈值温度特性方面收到了预期效果。测量结果表明, 上述 62 只激光器中的第 50[#] 器件, 温度稳定性最佳, 其 T_0 值在 $295 \sim 330 \text{ K}$ 的工作温度范围内为 150 K (见图 6)。然而第 6[#] 器件, 测量到的 T_0 值却约为 100 K 。这个数值虽仍然比普通双异质结激光器的 T_0 值高得多, 但显著地低于 50[#] 器件, 这一事实表明, 第 6[#] 激光器可能具有相当可观的漏电流。

3. 输出功率

用 InGaAs 探测器作为 $1.3 \mu\text{m}$ 激光的接收元件, 配以相应的放大器和指示器, 经标准

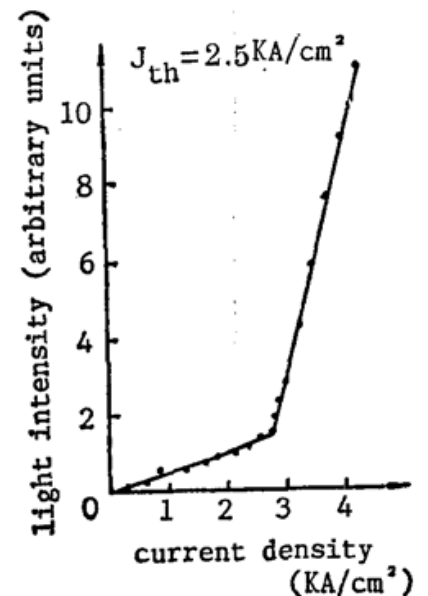


Fig. 5 Plot of the light intensity versus injection current density for a LOC laser

Table 1 Threshold current and peak power of the LOC lasers

No.	thr. c. power(W)			No.	thr. c. power(W)		
	(A)	$I=2.0I_t$	$I=2.5I_t$		(A)	$I=2.0I_t$	$I=2.5I_t$
1	2.29	3.18	3.92	32	2.5	3.54	4.22
2	2.5	3.48	4.34	33	2.5	3.12	3.64
3	2.08	4.08	4.96	34	2.5	3.72	4.34
4	2.5	3.78	4.46	35	2.29	3.06	3.84
5	2.08	3.64	4.34	36	2.08	2.12	3.06
6	2.08	3.18	3.78	37	2.5	3.72	4.78
7	2.29	3.84	4.64	38	2.5	3.72	4.34
8	1.88	2.56	3.06	39	2.5	2.62	3.12
9	2.5	3.48	4.08	40	1.88	3.18	4.08
10	2.5	3.48	4.16	41	2.29	3.60	4.34
11	2.29	3.06	3.72	42	2.29	3.48	4.34
12	2.5	3.54	4.40	43	2.5	3.60	4.16
13	2.08	3.0	3.6	44	2.5	3.12	4.08
14	2.5	3.06	3.64	45	2.08	3.98	4.70
15	2.5	3.98	4.64	46	2.5	2.06	3.12
16	2.5	3.00	3.78	47	2.5	2.24	3.00
17	2.5	2.56	3.12	48	2.5	3.18	3.60
18	2.5	3.60	4.40	49	2.5	3.18	3.92
19	1.67	3.18	3.92	50	1.88	3.72	4.52
20	2.5	3.06	3.60	51	1.2	3.0	3.48
21	2.5	3.36	3.98	52	2.5	2.56	3.06
22	2.08	2.62	3.30	53	1.88	3.0	3.24
23	2.5	3.0	3.48	54	2.08	3.54	4.22
24	2.5	3.60	2.28	55	2.08	3.84	4.46
25	2.29	2.74	3.36	56	2.08	3.18	3.78
26	2.08	3.54	3.92	57	1.88	4.02	4.46
27	2.08	3.60	4.16	58	2.08	3.36	3.98
28	1.67	2.56	3.18	59	2.29	4.08	4.52
29	2.5	3.06	3.60	60	2.08	3.60	4.16
30	2.5	2.68	3.18	61	2.29	3.92	4.84
31	2.5	3.64	4.40	62	2.29	3.30	3.98

功率装置标定后对前述 62 只激光器进行功率测量。所用电源参数同前,考虑到激光脉冲的占空比和波形系数,器件峰值功率的测量结果如表 1 所示。

4. LOC 激光器的光谱特性

用 44 W 型单色仪, 锗光敏探测器和锁相放大器等组成的装置测量了激光器的光谱。大部分器件以三、四个纵模受激发射, 测量自动记录结果如图 7, 其光谱相似于普通条型双异质结激光器。随着注入电流的增大, 光谱的峰值波长向短波移动。对前述 62 只器件中的第 19[#] 激光器, 在工作电流为 1.1 倍阈值电流时曾观

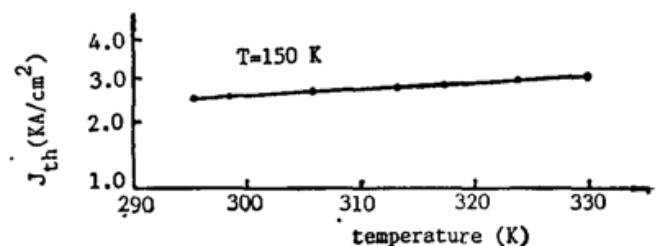


Fig. 6 Threshold current density as a function of temperature for a LOC laser

测到。对前述 62 只器件中的第 19[#] 激光器, 在工作电流为 1.1 倍阈值电流时曾观

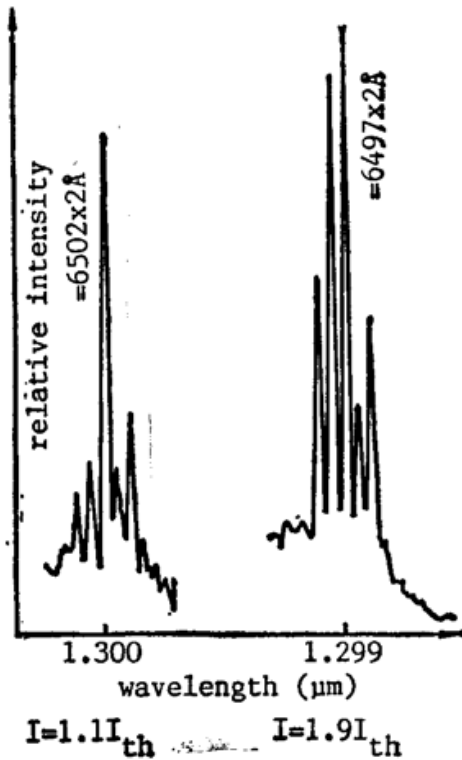


Fig. 7 Emission spectra for a LOC laser at different injection currents

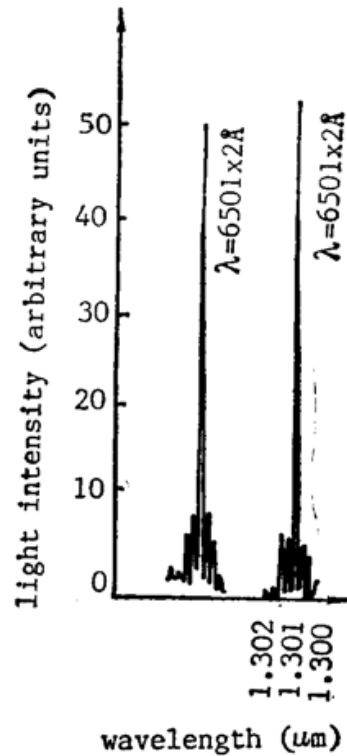


Fig. 8 Example of a LOC device lasing in a single longitudinal mode at room temperature

测到如图 8, 所示的单模发射。但在较高的工作电流时却有几个模式同时存在。

五、结 束 语

本文已经证明, 针对影响四元系半导体激光器温度特性的主要因素, 经过合理设计并采用相应的液相外延技术, 可以制得温度稳定性较高的大光腔结构激光器。实验证明, 这种器件不但具有较高的特征温度 T_0 , 而且还有低阈值, 高功率和良好的光谱模式等特点。为 InGaAsP-InP $1.3 \mu\text{m}$ 激光器阵列或在高温条件下工作提供了可能性。

参 考 文 献

- [1] O. Wada, S. Yamakoshi *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**, No. 10 (Nov), 981.
- [2] Y. Horikoshi, Y. Furukawa; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1979, **19**, No. 4 (Apr), 809.
- [3] D. Patel, A. R. Adams *et al.*; *Electron. Lett.*, 1982, **18**, 527.
- [4] M. Yano, M. Morimoto *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**, No. 5 (Sep), 390.
- [5] M. Yano, Y. Nishitani *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1983, **QE-19**, No. 8 (Aug), 1319.
- [6] T. P. Pearsall; *«Gain AsP Alloy Semiconductors»*, (John Wiley & Sons, New York, 1982), 393.
- [7] A. Sugimura; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 5 (May), 627.

High- T_0 InGaAsP semiconductor laser with large optical cavity

ZHONG JINGCHANG, ZHU BAOREN, AND LI RONGHUI

(Changchun College of Optics and Fine Mechanics)

(Received 4 July 1989; revised 25 August 1989)

Abstract

A laser with the large optical cavity (LOC) configuration has been designed and fabricated taking account of the various factors which have an effect on temperature characteristics of the InGaAsP-InP lasers. The experiments show that such a configuration improves temperature stability of the laser. The devices with lower threshold current ($J_{th} = 2.5 \text{ KA/cm}^2$ for the broad-area contacts), high power (3W in pulsed operation), and high T_0 (150K) have been obtained.

Key words: semiconductor laser.