

透射窗口型 GaAs/GaAlAs 掩埋 异质结构激光器*

高伟

庄婉如

(北京大学物理系, 100871)

(中国科学院半导体研究所)

谭叔明

(北方交通大学物理系, 100044)

提要: 本文通过耦合速率方程组, 从原理上分析了扩展半导体激光器调制带宽的三个根本途径, 在理论计算的基础上给出本结构激光器的具体设计方案。最后介绍了器件的制作工艺和工作特性。

关键词: 半导体激光器, 异质结构, 光电子器件

GaAs/GaAlAs window buried heterostructure laser

Gao Wei

(Physics Department of Peking University, Beijing)

Zhuang Wanru

(Institute of Semiconductor, Academia Sinica, Beijing)

Tan Shuming

(Physics Department of Northern Jiao Tong University, Beijing)

Abstract: Based on the analysis of the coupled laser rate equations, three essential ways for extending the bandwidth of a semiconductor laser are presented, also reported are the design, the fabrication and the characteristics of a GaAs/GaAlAs window buried heterostructure laser.

Key words: semiconductor laser, heterostructure, optoelectron device

一、引言

半导体激光器的高速直接调制对于超大容量光纤通信、高码率信息处理、超短脉冲信号的捕获与传输和光电子集成(OEIC)都有着非常重要的意义。按照理论分析,有三种根本的途径来扩展半导体激光器的本征调制带宽:(1)降低光子寿命;(2)提高光腔模式的微分光增益系数;(3)增大有源区的稳态光子密度。透射窗口型掩埋异质结构激光器是满足这些要求的一

种较理想结构。进一步的理论分析表明它还有利于纵模的模式选择。这种透射窗口还有很重要的意义是：由于较大地提高了破坏阈值功率，因而可以允许在高得多的光输出功率下使用，这对承受某些捕获到的大信号电流冲击是很有用的^[1, 2]。

测试结果表明，经优化设计的本结构激光器最低阈值电流做到 28 mA (室温)，线性输出光功率大于 15 mW，连续工作温度可达 90°C。

二、理论分析

随着半导体激光器的发展和技术的不断成熟，同时，由于工程应用对它不断提出更高调制速率的要求，于是有关的研究工作也由激光器的稳态特性深入到激光器的动态特性领域。分析激光器的动力学出发点是 H. Statz 和 G. Demars 所给出的耦合速率方程组^[3, 4]。考虑理想情况：(1) 激光器在阈值以上单模工作；(2) 粒子数反转均匀；(3) 增益系数是注入载流子浓度 N_e 与其极小值 N_{0m} 之差的线性函数；(4) 不含噪声源。在这种情况下，描述注入载流子浓度 N_e 和光子密度 N_{ph} 的耦合速率方程组可表示为

$$\frac{dN_e}{dt} = \frac{J}{ed} - A(N_e - N_{0m})N_{ph} - \frac{N_e}{\tau_s} \quad (1)$$

$$\frac{dN_{ph}}{dt} = A(N_e - N_{0m})N_{ph} - \frac{N_{ph}}{\tau_{ph}} + \gamma \frac{N_e}{\tau_s} \quad (2)$$

式中 $A(\text{cm}^3\text{s}^{-1})$ 是与受激辐射过程有关的比例常数； d 是有源层厚度； γ 是自发地发射进该模式的几率； J 是激光器的泵浦电流密度； τ_s 是载流子的自发复合寿命； τ_{ph} 是光腔光子寿命； e 是电子电荷。

通过求解(1)，(2)的瞬态解可得

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{1}{\tau_s \tau_{ph}} \left(\frac{J}{J_{th}} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

激光器的调制带宽，可以认为接近弛豫振荡频率 f_c 。但是(3)式给出的调制带宽与实验数据并不相符^[5, 6]。Pool^[7]曾指出激光器的调制带宽实际上要比(3)式预言的宽。这是因为在(3)式的推导中用到了假设 $\bar{N}_e \gg N_{0m}$ ，这个假设在激发程度较低的情况下是不成立的。

下面我们在一级近似下来进一步分析这个问题。

注意到对于实际半导体激光器常有

$$4A\bar{N}_{ph}/\tau_{ph} \left(A\bar{N}_{ph} + \frac{1}{\tau_s} \right)^2 \approx 10^3 \gg 1。$$

则

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1 + A\bar{N}_{0m}\tau_{ph}}{\tau_{ph}\tau_s} \left(\frac{J}{J_{th}} - 1 \right)} \quad (4)$$

这样得到的是较为精确的弛豫谐振频率的公式。用(4)式的计算结果与实验数据符合较好。它在讨论激光器的高频调制特性及 chirp 噪声时都是十分重要的。

从(4)式可以看出，弛豫谐振频率 f_c 随着自发载流子寿命和光子寿命的降低而提高，并随比值 J/J_{th} 增大而增大。这个谐振频率的存在意味着：如果我们试图将 $J = J_0 e^{i\omega t}$ 的调制电流加到激光器上，则当 ω 接近 ω_c 时，将会出现畸变效应，将观察到在 $\omega = \omega_c$ 时调制效率最高。然而，如果试图用谐振频率 ω_c 以上的频率来调制激光器，则发现调制效率随着调制频率的升

高而陡峻地下降。

要拓宽激光器的调制带宽,就要想办法提高激光器的弛豫谐振频率。由(4)式可见,有三个最直接的途径来提高弛豫谐振频率:

(1) 提高常数 A 。 A 由材料本身的性质决定, 可以靠降低温度来得到明显的改善。比如从 20°C 降到 -50°C , A 可提高 1.8 倍, 用液氮冷却可提高 5 倍^[8]。另外, A 也可以靠采用调制掺杂的量子阱结构来提高^[9]。

(2) 提高光子密度 \bar{N}_{ph} 。光子密度是最重要的参量, 它还与激光器的许多其它参量有关系, 如单模线宽、相对密度、噪声和腔面灾变损伤等等。为达到这个目的, 一般提高偏置。由于 $I_{out} = \frac{1}{2} \bar{N}_{ph} \hbar \omega \nu \ln\left(\frac{1}{R}\right)$, $\hbar \omega$ 为光子能量, ν 是光子群速度, R 是端面反射率。对于反射镜 $R = 0.3$, 发生灾变的阈光功率密度约为 1 MW/cm^2 , 这就强烈地限制了光子密度。为了改善这个限制, 采用透射窗口结构来降低 R 值。比如在高斯光束假设下, 对 $V = 5 \mu\text{m}$ 的 GaAlAs 透射窗口结构可以使 GaAs, GaAlAs 交界面反射率降为 $R' = 0.05$, 这就大大提高了灾变的阈光功率密度, 但同时对激光器的输出腔面反射率降低较小。这样既获得了较高的阈光功率密度, 又不使激光器的阈值有明显提高。

(3) 降低光子寿命。因为 $\tau_{ph} = 1 / \left[\nu \left(\alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \right]$, 这里 α 是分布损耗。所以缩短光腔长度和减少腔面反射率可以有效地降低光子寿命。只是 L 的减小会使 J_{th} 增大。

当激光器的驱动电流较大时, 将会因为过热效应限制最大调制频率, 在这种结构中, 因为光输出腔面是非泵浦的, 所以热效应有明显改善。当采用短腔和透射窗口结构时, 达到 20 GHz 以上的调制带宽是完全可能的^[10]。

三、结构与工艺

透射窗口型掩埋异质结构激光器的示意图和中心部位的断面图如图 1(a) 和 (b) 所示。为

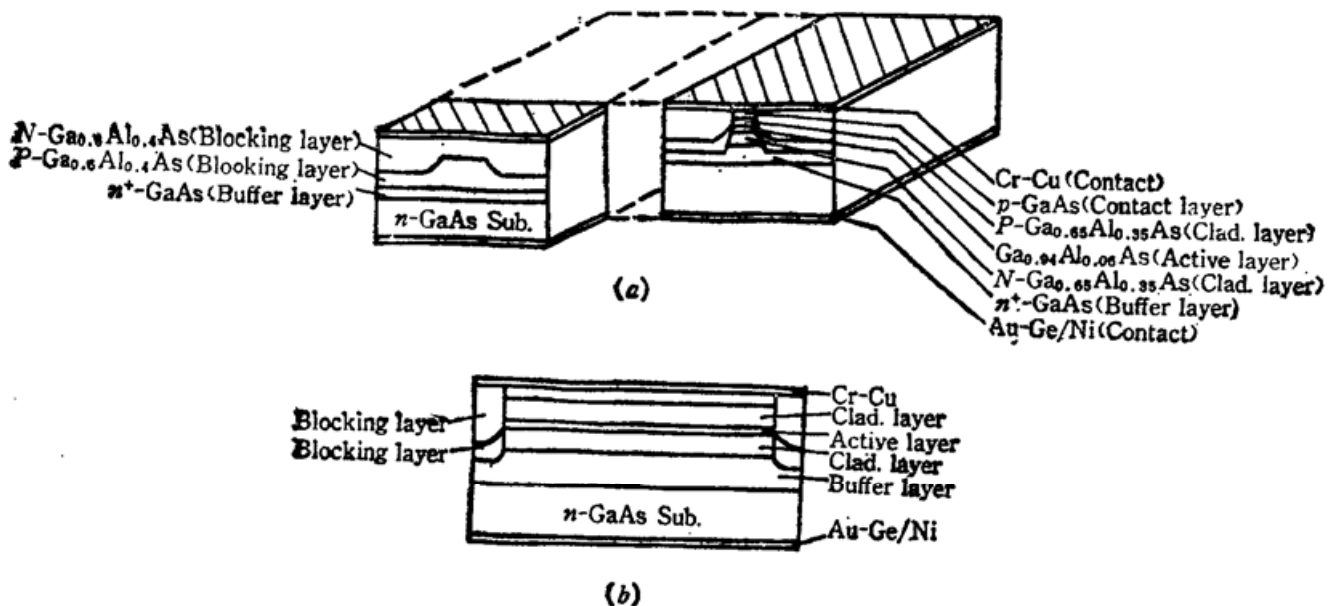


Fig. 1 (a) Schematic representation of a window BH laser; (b) Cross-sectional view at the centre of the mesa of a window BH laser

了看清内部结构, 图 1(a) 中将同一整体结构中的主部向右平移后画出。

这种激光器在结构上与普通掩埋型异质结构(BH)激光器相似, 不同的是在腔面处由非泵浦的 GaAlAs 层形成透射窗口。BH 结构的激光器具有低阈值、大功率、可保证基横模工作、对称的光束剖面、模式稳定、线性度好等优点, 这里最关键的参量为有源层厚度 d 和有源区宽度 W 。

在文献[11]中我们曾用计算机分析得到 $d \approx 0.15 \mu\text{m}$ 时阈值最低。

进一步用有效折射率方法将有源区等效为矩形波导, 通过本征值方程:

$$\tan(k_x W) = \frac{n_1 k_x (r_2 n^2 + r_3 n_2^2)}{(n_2^2 n_3^2 k_x^2 - n_1^4 r_2 r_3)}$$

$$n_{eff}^2 = n_1^2 - \left(\frac{k_x}{k}\right)^2$$

$$\tan(k_y d) = \frac{k_y (r_{4e} + r_{5e})}{(k_y^2 - r_{4e} r_{5e})}$$

用计算机做数值计算得出条宽 W 小于 $2 \mu\text{m}$ 时可保证基横模工作(具体分析详见文献[11])。

在制作中用液相外延(LPE)设备, 采用二次外延技术。第一次外延时在(100) n -GaAs 衬底上生长五层结构: n^+ -GaAs 缓冲层、GaAlAs 双异质结构、 p -GaAs 电极层。然后将一次外延片光刻出 $2 \mu\text{m}$ 条, 用化学方法沿 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向腐蚀到 n^+ -GaAs 层, 另外为了生长 GaAlAs 透射窗口, 在条上相应于窗口部位也要腐蚀掉。二次外延时, 生长两层结构的 GaAlAs 层。为了得到好的欧姆接触, 在顶层 p -GaAs 进行 Zn 扩散, 正面蒸 Cr-Au 形成 p 电极, 再将片子减薄到 $100 \mu\text{m}$, 在 n -GaAs 衬底上蒸 Au-Ge/Ni 形成 n 电极。利用 SUSS RA 120 型解理机在窗口部位精确解理, 制成单个的芯片, 总腔长 l 为 $200 \mu\text{m}$, 两个透射窗口的厚度 V 均为 $5 \mu\text{m}$ 。最后将芯片 p 面朝下反扣在热沉上, 用超声压焊金丝引线。

四、工作特性

本结构采用在光输出腔面处生长相对激光透明的 GaAlAs 材料作为透射型窗口, 这一点

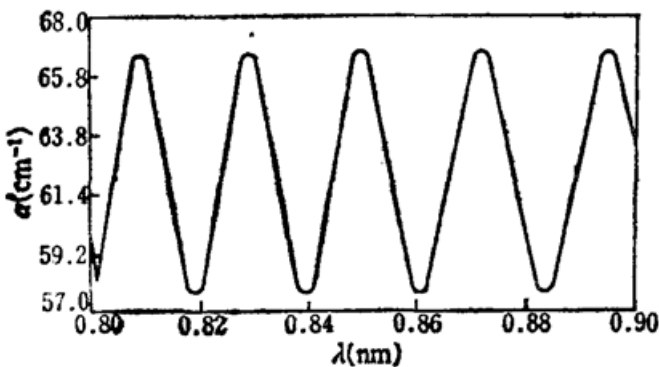


Fig. 2 The curve of optical cavity loss

可对器件的许多特性加以改进。由于腔面处的 GaAlAs 窗口是非泵浦的区域, 这样在 GaAlAs 与空气的腔面处就极大地降低了热的产生, 使腔面的灾变损伤限制得到极大改善, 允许激光器加更大的注入电流, 得到较大的光功率输出。

另外这种带窗口的激光器具有了一种三段腔结构, 使得本结构的激光器在纵模选择及压窄线宽方面都比均匀腔激光器具有优越性。运用有效反射率

$$|r_e| = \sqrt{\frac{r_1^2 + r_{20}^2 e^{-2\alpha_1 L_1} + 2r_{12} r_{20} e^{-\alpha_1 L_1} \cos 2\beta_2 L_2}{1 + r_{12}^2 e^{-2\alpha_1 L_1} + 2r_{12} r_{20} e^{-\alpha_1 L_1} \cos 2\beta_2 L_2}}$$

$$\delta_e = \arctg \left[\frac{r_{20} e^{-\alpha_1 L_1} (1 - r_{12}^2) \sin 2\beta_2 L_2}{r_{12} (1 + r_{20}^2 e^{-2\alpha_1 L_1}) + r_{20} e^{-\alpha_1 L_1} (1 + r_{12}^2) \cos 2\beta_2 L_2} \right]$$

可以将三腔结构简化为单腔结构, 借助计算机做数值计算和绘图可得光腔损耗 α 随波长的变化曲线, 例如: 当取 $n_0=1$, $n_1=3.353$, $n_2=3.59$, $\alpha=10\text{ cm}^{-1}$, $L_1=200\text{ }\mu\text{m}$, $L_2=5\text{ }\mu\text{m}$ 时可得图 2 所示的光腔损耗曲线。对于适当的参数可以得到较大的边模抑制比, 为单纵模工作提供了可能(详见文献[12])。

在室温下对 G-108 器件做了连续工作测量, 器件光-电特性随热沉温度变化曲线如图 3 所示。由图 3 的光-电流特性曲线可知阈值电流为 29 mA, 最高激射温度为 90°C , 最大线性输出功率可达 15 mW。图 4 是该器件的静态光谱, 工作波长为 827.5 nm, 半宽为 0.03 nm, 边模抑制比为 14 dB。

限于目前测试条件, 无法进行高频调制测量。这方面的参数待以后有条件时补测。

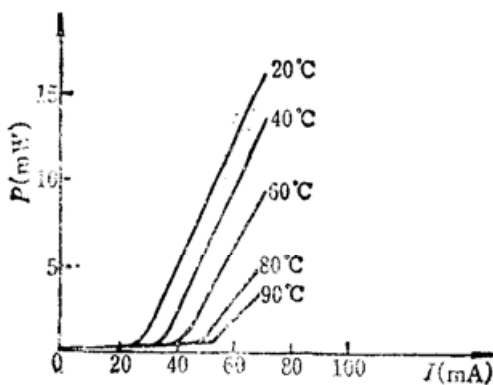


Fig. 3 Light vs current characteristics of the LD-G108 at various temperatures

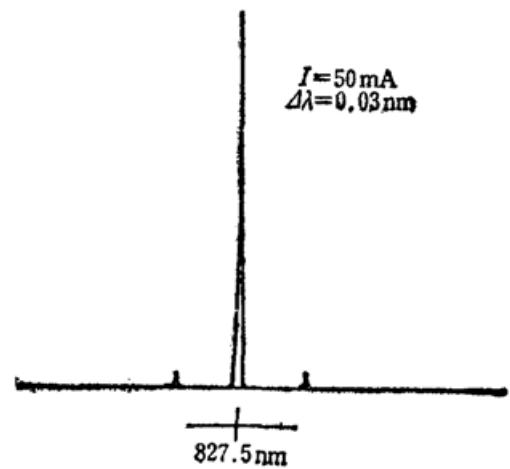


Fig. 4 Spectra of the LD-G108

参 考 文 献

- 1 C. L. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1452(1989)
- 2 C. L. Wang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1498(1989)
- 3 H. Statz *et al.*, *Quantum Electronics*, Columbia Univ. Press, New York, 1960
- 4 D. A. Kleinman, *Bell Syst. Tech. J.*, **43**, 1505(1964)
- 5 S. I. Gonda *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-11**, 545(1975)
- 6 J. Angerstein *et al.*, *Arch. Elek. Ubertragung*, **30**, 477(1976)
- 7 T. P. Paol, *Appl. Phys. Lett.*, **47**, 522(1981)
- 8 F. Stern, *J. Appl. Phys.*, **47**, 5382(1976)
- 9 K. Uomi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 78(1987)
- 10 K. Y. Lau *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-21**, 121(1985)
- 11 高 伟, 张石桥 *et al.*, 第三届全国纤维光学与集成光学学术交流会论文集, 1988 年 10 月, 湖南大庸, 203
- 12 高 伟, 庄婉如 *et al.*, *半导体光电*, **10**(2), 15(1989)