

窄线宽单纵模沟槽衬底平面条形(AIGa)As 激光器的研制及其线宽分析

胡衍芝 顾德英

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了我们所研制的沟槽衬底平面条形(CSP)铝镓砷((AlGa)As)单模激光器,能以单纵模稳定工作, $\Delta\nu < 5$ MHz,并从理论上定性分析了半导体激光器线宽变宽的机理,提出了进一步压窄线宽的方法。

关键词: 沟槽衬底平面条形(AIGa)As 单模激光器; 线宽变宽机理。

一、引 言

具有折射率导引结构沟槽衬底平面条形、掩埋式异质结构(BH)、横向结条形(TJS)单频激光器,作为光纤通信的相干光源受到普遍的重视。

在相干光通信、光纤传感器、高分辨光谱源等应用中,要求激光器单频工作,能单纵模稳定工作,并具有窄谱线宽度、频率和偏振稳定性好的特性。谱线宽度是很重要的参数。例如,相干光通信要求谱线宽度 $\Delta\nu < 500$ kHz^[1],光纤遥感陀螺,则要求线宽窄到几十 kHz^[2]。CSP(AIGa)As 单模激光器的最窄谱线宽度,国外已做到 10 MHz,理论计算极限值可达 $\Delta\nu \sim 2.3$ MHz。而且,已获得 F-P 外腔型 GaAlAs 单频激光器,其 $\Delta\nu < 15$ kHz^[3]。通过研究半导体单模激光器的噪声机理,来提高激光器发射谱线的纯度,进一步消除测量技术噪声,以及采取稳频措施,可使(AIGa)As CSP 单频激光器的谱线变窄。因此,CSP(AIGa)As 单频激光器在相干技术、频谱应用方面的前景乐观。

二、实 验 研 制

在分析研究了 BH、TJS、CDH(压缩双异质结)、CSP 等折射率导引结构的单模激光器的波导和单模特性后,发现 CSP 结构具有稳定而对称的光场特性,并且较容易获得单横模和单纵模的模式良好选择。因此,本文采用 CSP 结构来研制窄线宽单频激光器(如图 1 所示)。在 n -GaAs(Si)沟槽衬底上,液相外延生长 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ 双异质结(DH)平面条形结构。根据理论计算和实验研究的结果,为能稳定基横模和单纵模进行工作,典型 CSP 单模激光器的结构参数设计成:沟槽宽度 $w \leq 5 \mu\text{m}$,有源层厚度 $d \leq 0.1 \mu\text{m}$, n - $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 包

层平处厚度 $t \leq 0.3 \mu\text{m}$, 沟深 $\sim 1 \mu\text{m}$, 有效折射率差 $\Delta n \approx (1 \sim 3) \times 10^{-3}$, 有效损耗差 $\Delta \alpha \sim 10^2 \text{ cm}^{-1}$ 。

控制液相外延法(LPE)生长的条件, 以保证上述结构参数的实现。有较窄的沟槽宽度, 则有较好的模式选择性。沟槽外 $n\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ 包层的厚度足够薄, 并选取最佳过冷度, 以期获得沟槽两肩角有最佳的回熔生长形状, 从而获得沟槽内、外侧有理想的有效折射率差和有效损耗差。这种理想化的结构为消除旁瓣模, 纯化横模, 和稳定基横模, 提供必要的条件, 同时显著降低了耦合到受激模的自发辐射分量。

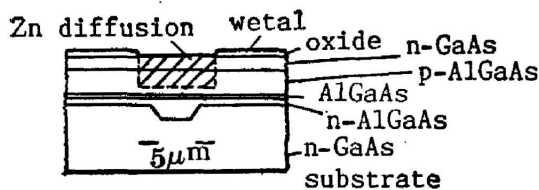


Fig. 1 Schematic diagram of channelled-substrate-planar stripe single mode LD

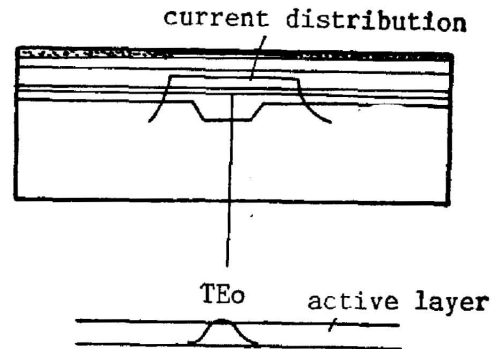


Fig. 2 The relation of metal-contact-strip and channel width

选择和控制由欧姆接触的条宽, 及其对称性所限制的最佳注入电流分布, 来有效地提高单模的稳定度。限制电流的条宽应该比沟槽宽度大, 使电流剖面在沟槽上方有平坦对称的结构(见图 2), 使沟槽宽度内的作用区均匀受激, 从而使电流分布对折射率的影响减到最小, 最终只由沟槽结构因素及层厚来决定横模, 并获得极稳定的单模特性。

一般地说, 单横模很纯而又很稳定, 功率-电流($P-I$)关系的线性度很高, 而在受激阈值点荧光分量极低($\leq 0.05 \text{ mW}$)的单横模激光器, 都能单纵模工作, 再加上主边纵模抑制比 > 100 , 及边模损耗大的单模激光器, 其单纵模谱线宽度都很窄。

三、结 果

1. 采用 Fabry-Perot 干涉仪测量谱线宽度

表 1 列出腔长 $250 \mu\text{m}$ 、腔面未镀膜、作用区未掺杂的单模激光器的谱线宽度的部分结果。F-P 干涉仪分辨率为 100 MHz 和 80 MHz 。结果表明: 1) 本文的 CSP 单模激光器的谱线宽度落在 $10 \sim 100 \text{ MHz}$ 范围内; 2) 一些激光器表现出单一、大范围($1.1 \sim 1.8$) I_{th} 单纵模工作区, 其线宽随输出功率的增大而变窄; 另一些激光器表现为随注入电流升高而出现二个或三个单纵模工作区, 每个区域的电流范围约为 $\Delta I \sim 10 \text{ mA}$ 。从一个单纵模区过渡到下一个单纵模区, 其间出现纵模的跳动(Hopping)。

2. 采用延时自差拍法测谱线宽度

延时自差拍法测量谱宽装置的方框图如图 3 所示。它由待测激光器、光束分合机构、单模光纤耦合机构、单模光纤延时线、声光移频器、波前匹配机构、PIN 光探测器、频谱分析仪

Table 1 Data of the spectra linewidth measured in F-P interferometer

LD, NO.	I_{th} (mA)	λ (Å)	region of single-longitudinal mode (mA)	linewidth·power (MHz·mW)
4	47	8640	48-58; 59-64; 77-86	143.3*
1	50	8661	68-	130.3*
2	55	8584	64-89	100.3
12	40	8484	51-90	80.3

等部件构成。所使用的光纤延时线长度 1 km, 按分辨率计算公式 $\Delta = 0.5/\tau_d^{[4]}$ 计算, 该装置分辨率为 $\Delta = 0.1$ MHz; 声光移频器的工作频率为 60MHz (> 激光器的谱宽); 中频频谱的显示, 采用日本 TR4110/4111 频谱分析仪。整个系统的准直, 由一台 He-Ne 激光器来完成。

根据延时自差拍法原理, 待测激光器输出光束被分成两束, 一束通过光纤延时线, 延时 τ_d ; 另一束通过声光移频器移频 f_s 。然后将两束光合并投射到 PIN 光电探测器上混频。混频产生的中频信号由频谱分析仪测量。

激光器振荡的频谱分布为^[5]

$$G(\omega_0) = \lambda/2\pi [(f - f_0)^2 + (\lambda/2)^2] \quad (1)$$

其谱形呈洛伦兹分布。

当延时 $\tau_d \gg 1/\lambda$, 即 τ_d 远大于激光器相干时间时, f_s 所赋予测试系统的 IF 功率谱为

$$S(f) \approx \lambda/\pi [(f - f_0)^2 + \lambda^2] \quad (2)$$

可见, 这一光谱曲线的半极大全宽就是待测激光器谱宽的两倍。

图 4 和图 5 分别是 2# 和 12# 激光器的频谱分析仪显示结果。根据上面的

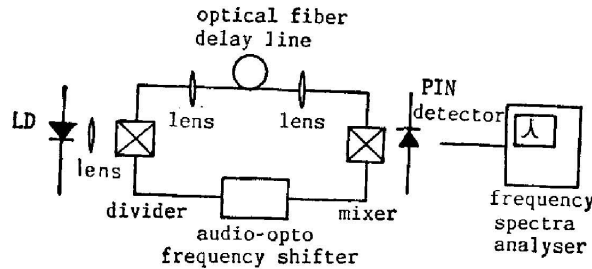


Fig. 3 Diagram of spectral linewidth measurement setup

原理, 实际谱宽为图 4 和图 5 波形半极大全宽读数的 1/2。因此得出 2# 和 12# 激光器的谱宽分别为 $\Delta\nu \leq 10$ MHz 和 $\Delta\nu \leq 5$ MHz。谱宽的这一测量是在单模激光二极管输出 3 mW 光功率下进行, 测量时, 采用控制温度精度为 0.01°C 的控制器, 使激光器恒温, 以维持单纵模稳定。测量过程中环境温度为 30°C。

四、分析讨论

半导体激光器的光谱线理论上应呈 Lorentz 形^[1], 其线宽公式为修正的 Schawlow-Townes 公式^[6,9]

$$\begin{aligned} \Delta\nu &= v_g^2 h\nu g n_{sp} \alpha_m (1 + \alpha^2) / 8\pi P_0 \\ &= (h\nu / 8\pi P_0) (C/nL)^2 (\ln R - \alpha L) (\ln R) (1 + \alpha^2) n_{sp} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 g 为增益, $h\nu$ 为受激线的能量, n_{sp} 为自发发射因子, $v_g = R/gn_{sp}$ 为群速度, 它可用相速度 $v_p = (c/n')$ 代替, n' 为折射率, R 为腔面反射率, $\alpha_m = g - \alpha_L = -L^{-1} \ln R$, L 为腔长, P_0 为单面光输出功率, $\alpha = \Delta n' / \Delta n''$ 为折射率的实数部分和虚数部分变化之比。对 GaAlAs/GaAs 单模激光器, $h\nu = 1.5$ meV, 若取 $n_{sp} = 1$, $P_0 = 1$ mW, $\alpha = 0$, 则得到线宽理论值 $\Delta\nu \sim$

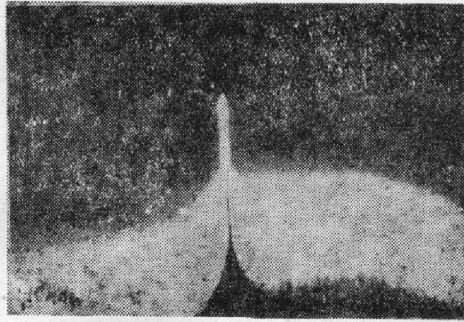


Fig. 4 Spectral line of 2# LD displayed on frequency spectra analyser.
The spike is electric radiation.
(abscissa: 10 MHz/div. ordinate: 5 dB/div)

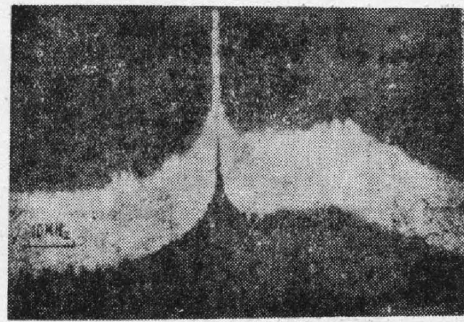


Fig. 5 Spectral line of 12# LD displayed on frequency spectra analyser.
The spike is the electric radiation.
(abscissa: 10 MHz/div. ordinate: 5 dB/div)

2.3 MHz。

(3)式表示线宽和腔长、自发辐射因子、腔面反射率、光输出功率有关。特别有 $\Delta\nu \propto P_0^{-1}$ 。加长激光器的腔长^[7]和减小腔面反射率都是变窄线宽的方法之一。自发辐射因子 n_{sp} 和线宽变宽因子 $(1+\alpha^2)$ 分别表示激光器中自发辐射本身对线宽的贡献, 以及与自发辐射相关的因素对线宽的贡献。

在半导体激光器中, n_{sp} 可写成^[8]:

$$n_{sp} = \{1 - \exp[(h\nu + E_{FV} - E_{FC})/kT]\}^{-1}. \quad (4)$$

E_{FV} 和 E_{FC} 分别是价带和导带的准费米能级, k 为玻尔茨曼常数, T 为温度。对半导体激光器, 若具有非简并载流子分布函数, 如作用区不掺杂的情形, n_{sp} 可以变得 $\gg 1$ 。 n_{sp} 是 $(E_{FC} - E_{FV}) - h\nu$ 的快发散函数。只有 $h\nu + E_{FV} - E_{FC}$ 很小, 或 $\rightarrow 0$ 时, $n_{sp} \rightarrow 1$ 。这就要求作用层中导带和价带中的电子和空穴都是高度简并分布的。因此, 对于相干通信等应用, 必须研制出自发辐射因子 n_{sp} 小的激光器结构, 使作用区有较高掺杂浓度。

通常, 激光器的线宽可以认为是光场的相位涨落^[9], 由相位涨落 $\langle \Delta\phi^2 \rangle$ 的计算可以推导出谱宽表达式。相位涨落起源于自发辐射。每个自发辐射事件不仅带来光强度和相位的瞬时变化, 也带来由折射率与载流子相关引起的附加相移。所以说自发辐射是激光的噪声源。

自发辐射引起强度涨落即振荡模式中光子数涨落。而强度决定于增益, 在高于阈值时, 增益饱和效应使强度涨落围绕稳态值阻尼振荡。所以可认为, 对线宽的影响, 强度涨落比相位涨落要小得多, 可以忽略。

激光器的介质参数——折射率是个复数 $\chi(n)$, 其实数部分为折射率, 虚部为光吸收系数即负光增益系数。当强度涨落时, 对应的增益涨落会导致(由于载流子密度变化)折射率的涨落, 也就会引起相位涨落。描述载流子感应的折射率与增益变化之间的耦合效应的 α 定义为^[11]:

$$\alpha = -\{d[\text{Re}\{\chi(n)\}]/dn\} / \{d[\text{Im}\{\chi(n)\}]/dn\}. \quad (5)$$

n 为电子浓度。通常注入载流子密度的变化相当小, 这一变化假设为线性的, 或简化写成:

$$\alpha = -\Delta n' / \Delta n''. \quad (6)$$

由于激光场中强度与相位的这种耦合效应, 自发辐射所产生的非相干光子在谐振腔中受到受激辐射振荡放大的耦合被继续增益, 因而有限的强度起伏会引起折射率 $\Delta n'$ 的变化, 导致

激光器相位场有大的附加相移,从而有大的附加谱线变宽($1+\alpha^2$),成为使线宽变宽的主要因素。基于这一分析,也解释了线宽随激光输出功率的增大而变窄。因为激光器达到阈值后自发辐射将达到饱和,并成为常数,但受激辐射随注入增大而不断增强,随着受激辐射的增强,非相干辐射量会相对减弱,使线宽变窄。同理,显然有自脉动激光器的线宽严重变宽。

理论分析指出^[11,12],激光器的线宽增大因子 α ,当固定载流子密度时,随着光子能量增大而减小;当光子能量固定时,随载流子浓度的增大而增大。

测量指出^[10],随着温度降低, α 将减小。(AlGa)As 激光器室温时 α 值是 77 K 时的 2 倍,都与载流子密度变化相关。

激光器谐振腔的本征共振模的半宽度也会影响线宽,实质上是腔损耗产生的。激光场在谐振腔中以特定的谐振频率振荡,同时进行空间和频率的选择。谐振腔的特征参数 Q 值——反映腔的损耗也反映腔的本征共振模的半宽度的大小。由不同结构的介质波导构成的谐振腔,具有不同的 Q 值、不同的本征共振模半宽度,它决定能达到激光振荡阈值的频率范围,决定增益和光场频谱耦合的大小,和自发辐射对激光场贡献的大小。所以激光器的结构因子是影响线宽的因素。

综上所述,半导体激光器的线宽较其它激光器宽,是因为激光器的本征辐射线宽是由激光器的发射机理决定的:激光跃迁发生在能带之间,加上能带结构较复杂,能带中载流子态密度分布较复杂,微观粒子必然存在量子涨落噪声。实际上人们测量半导体激光器的线宽,是测量经过谐振腔振荡放大输出的激光线宽。这个表观的线宽大于上述激光器的本征辐射线宽。因为在谐振腔中光场放大过程中,由自发辐射引起的激光场强度涨落和相位涨落发生耦合效应,产生附加线宽($1+\alpha^2$)。还有谐振腔的结构因子,包括腔长、面反射率 R 、腔面损耗、腔内吸收损耗及激光器侧向光限制吸收(决定于激光器折射率导引结构)等损耗因素引起的附加线宽。它们总效应决定了半导体激光器的谱线宽。

实验发现,当纵模出现竞争或跳动,以及主模与边模的功率比较小时,激光器的线宽会明显变宽;振动、压力、温度及光反馈等外部因素都会使纵模不稳定和线宽变宽。

由上述分析,我们得出变窄 CSP 单频激光器的线宽的方法:

(1) 在激光器的制作技术上,进一步使 CSP DH 结构理想化,作用区适当地高掺杂,提高能带的简并度,减小自发辐射因子,使 $n_{sp} \rightarrow 1$,得到更纯的单纵模特性;增加腔长,减少纵模数和变窄每个纵模的线宽;腔后端面镀高反射率膜,而出光端镀 SiO 防反射膜,使线宽变窄。我们的器件,在这方面还有很大的潜力。

(2) 在测量技术上,努力消除技术噪声。采用高隔离度的光隔离器,防止光反馈入激光器;稳定电流源,降低驱动电流噪声;稳定激光器工作温度在 0.001°C 以内;防止机械和声振动。

(3) 采取稳频(锁模)技术,例如采用 F-P 外腔式激光器结构,解理耦合腔结构等,进一步变窄线宽并稳频。本文的 CSP 单模激光器,经外腔选模后线宽可压窄到 $\Delta\nu \lesssim 50 \text{ kHz}$ 。根据本文对线宽变宽机理的定性分析,可望进一步压窄线宽 $< 1 \text{ MHz}$ 。

参 考 文 献

- [1] S. Saito *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1982, **QE-18**, No. 6 (Jun), 961~970.
 [2] K. Iwatsuki *et al.*; *Appl. Optics*, 1984, **23**, No. 21 (Nov), 3916~3924.
 [3] M. W. Heming *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**, No. 7 (Apr), 511~513.
 [4] Y. Suematsu; "Optical Device and Fibers", (Ohmsa, LTO and North-Holland Publishing Company, Tokyo, 1982), 51.
 [5] 杜筱诚等;《中国激光》, 1987, **14**, No. 3 (Mar), 167~171.
 [6] G. H. Hery; *IEEE J. Q. E.*, 1982, **QE-18**, No. 2 (Feb), 259~264.
 [7] Y. Yamamoto *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1983, **QE-19**, No. 1 (Jan), 47~58.
 [8] H. Hery *et al.*; *Z. Phys.*, 1967, **204**, No. 7 (Jul), 262~275.
 [9] D. Welford *et al.*; *Appl. Phys., Lett.*, 1982, **40**, No. 10 (May), 865~867.
 [10] M. W. Fleming *et al.*; *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **42**, No. 8 (Oct), 631~633.
 [11] K. Vahala *et al.*; *IEEE J. Q. E.*, 1981, **QE-17**, No. 1 (Jan), 44~59.
 [12] N. Ogasawara *et al.*; *Japan J. Appl. Phys.*, 1984, **23** (Part 2), No. 7 (Jul), L518~L520.

Research of single longitudinal mode CSP (AlGa)As laser diodes with narrow linewidth and the analysis of linewidth

HU YANZHI AND GU DEYING

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 5 December 1988; revised 8 April 1989)

Abstract

In this paper we report on spectral linewidth of our CSP (AlGa)As single longitudinal mode LDs, $\Delta\nu \lesssim 5$ MHz, (The narrow-west spectra linewidth single mode, now is about $\Delta\nu \sim 10$ MHz abroad) The mechanism of linewidth broadening is analysed and the methods of narrowing linewidth are suggested.

Key words: CSP (AlGa)As single longitudinal mode LDs; mechanism of linewidth broadening.