

## 完全锁模半导体激光器

余 尽 高以智

(清华大学电子工程系, 100084)

**提要:** 本文对含 F-P 标准具的外腔半导体激光器进行了主动锁模研究。适当选择 F-P 标准具参数可形成单一的纵模群振荡, 并可因此得到完全锁模光脉冲。实验中得到了脉宽为 13.5 ps、重复频率为 925 MHz 的光脉冲输出。

**关键词:** 锁模, 半导体激光器

### Complete mode-locked semiconductor lasers

Yu Jin, Gao Yizhi

(Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing)

**Abstract:** Complete active mode-locking have been achieved with a F-P etalon in a GaAs/GaAlAs semiconductor laser with external cavity and 13.5 ps pulses without substructures at 925 MHz repetition frequency have been obtained.

**Key words:** mode locking, semiconductor laser

### 一、引 言

随着半导体激光器及超快光电子学的发展, 人们对由半导体激光器产生超短脉冲发生了浓厚的兴趣。现在人们已能通过主动锁模<sup>[1]</sup>、被动锁模<sup>[2]</sup>、直接调制<sup>[3]</sup>的方法获得超短光脉冲输出。采取锁模的方法获得超短脉冲一般要使用外腔激光器。激光二极管与平面反射镜组成外腔激光器。激光二极管中注入直流偏置电流及交流调制电流。当调制频率近似于光在外腔中往返频率时, 可实现主动锁模。由于外腔中激光二极管两个解理面的反射造成的组合腔效应, 外腔纵模被调制成一系列的纵模群。当调制电流频率等于光在外腔中的往返频率  $f_0$  时, 同一纵模群内的纵模间相位锁定, 但是不同纵模群间的纵模相位并无确定关系, 所以只能形成部分锁模。假设共有  $k$  个模群振荡,  $a_n v(t)$  为一个模群内模式锁定而产生的光场脉冲包络,  $a_n$  为各模群产生的光脉冲的相对幅度, 相邻模群间的频率差为  $\Delta\omega$ , 则探测系统可察觉的光脉冲强度可表示为<sup>[4, 5]</sup>

$$I(t) \propto \langle E(t)^2 \rangle \propto \left\langle \left| v(t) \sum_{n=0}^{k-1} a_n e^{i\phi_n} e^{in\Delta\omega t} \right|^2 \right\rangle \quad (1)$$

其中  $E(t)$  表示光场强度,  $\phi_n$  为第  $n$  个模群的相位, 它是独立随机变化的。为分析简单起见, 设所有振荡模式振幅相等, 即  $a_n \equiv a_0$ , 则可得

$$I(t) \propto ka_0^2 v^2(t) \quad (2)$$

由此可见光脉冲包络的形状与每个模群(模群内纵模锁定)产生的光脉冲形状相同。但如果探测器的响应足够快,则会发现光脉冲包络呈现无规噪声起伏,如图 1(a)所示。脉冲非完全相干,其亮度取决于单个模群的谱宽。若用有背景的二次谐波自相关方法测量脉宽<sup>[4]</sup>,假设相关器中两光臂的分光比是 1:1,则得到的自相关倍频光强度为

$$S(\tau) \propto \int_{-\infty}^{\infty} [E(t) + E(t+\tau)]^2 [E^*(t) + E^*(t+\tau)]^2 dt \\ \propto \int_{-\infty}^{\infty} I^2(t) dt + \int_{-\infty}^{\infty} I(t) I(t+\tau) \left(1 + \frac{\sin^2 k \Delta \omega \tau / 2}{k \sin^2 \Delta \omega \tau / 2}\right) dt \quad (3)$$

式中  $\tau$  为相关器两光臂的相对延时。相应的二次谐波自相关曲线(SHG 曲线)如图 1(b)所示。图中次峰间隔等于  $2\pi/\Delta\omega$ , 即等于光在激光二极管中的往返时间。自相关曲线的次峰顶、包络顶与背景强度之比为 3:2:1。

若能消除上述组合腔效应,则当注入适当频率的调制电流时,所有模式的相位均能锁定,这时相关器自相关倍频光强度为

$$S(\tau) \propto \int_{-\infty}^{\infty} I^2(t) dt + 2 \int_{-\infty}^{\infty} I(t) I(t+\tau) dt \quad (4)$$

自相关曲线无亚结构,峰值与背景强度之比为 3:1、光脉冲是相干的,线宽与脉宽的乘积  $\Delta\nu\Delta t = K$ ,  $K$  为与光脉冲形状有关的常数。

由于激光二极管两端面反射形成的不可避免的组合腔效应,一般外腔半导体激光器只能获得部分锁模,它所产生的光脉冲部分相干,  $\Delta\nu\Delta t > K$ 。获得完全锁模的方法之一是消除激光二极管面向外反射镜端面的反射,即镀增透膜或使激光二极管端面成布儒斯特角。但前者难以做到完全增透,后者工艺十分困难。实现完全锁模的另一种方法是在外腔中设置一个 F-P 标准具,适当选择标准具参数可以获得单纵模群振荡。本文采取这一方法实现完全锁模。

## 二、实验装置

实验装置如图 2 所示,质子轰击 GaAs/GaAlAs 半导体激光二极管与平面全反射镜构成

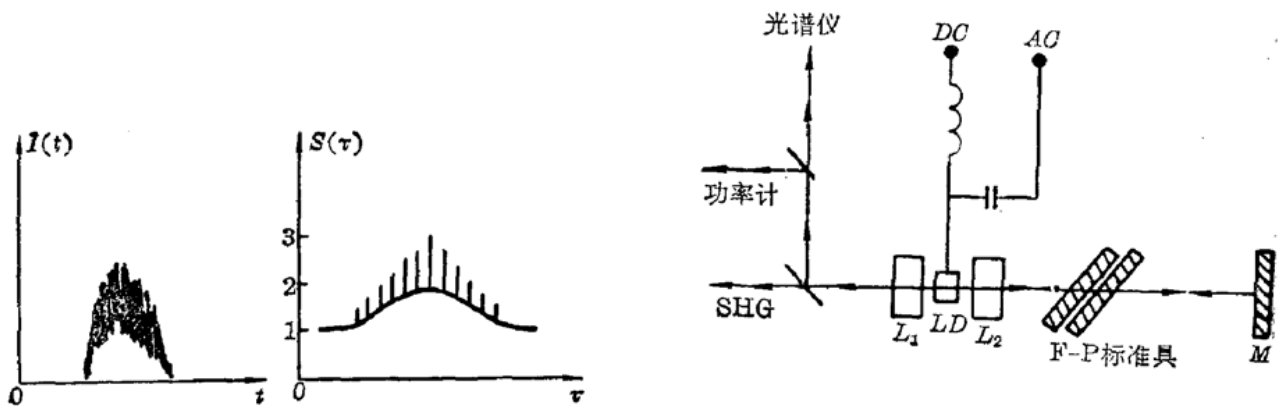


图 2 实验装置

$L_1$ —输出透镜;  $LD$ —激光二极管;  $L_2$ —自聚焦透镜;  $M$ —全反射平面镜;  $SHG$ —二次谐波强度相关器

图 1 部分锁模时光脉冲示意图(a)及二次谐波强度自相关曲线(b)

外腔, 激光二极管面向外反射镜的一侧镀增透膜, 0.23 节距的自聚焦透镜用以使激光二极管与平面反射镜准直。外腔中放置一空气隙 F-P 标准具。微带馈电线与阻抗匹配器提供交直流馈电通路并保证激光二极管与微波信号源间的阻抗匹配。由 AQ1417B 型光谱仪观察激光光谱。由二次谐波强度相关器测量输出脉宽。由功率计测量平均光功率及监测外腔准直状况。

未置 F-P 标准具时, 虽然激光二极管一端镀了增透膜, 由于未达完全增透, 依然存在着组合腔效应, 外腔纵模被分割成若干模群, 其光谱图如图 3(a) 所示。图中每一尖峰对应一个纵模群。由于光谱仪分辨率的限制, 模群中的纵模无法分辨。由图可知振荡带宽  $\Delta\lambda_t = 7.0 \text{ nm}$ , 相邻模群间隔  $\Delta\lambda_{LD}$  约为  $0.7 \text{ nm}$ 。欲使置入 F-P 标准具后仅存在一个纵模群, 必须合理选择标准具二反射面的反射率  $R$  及间距  $h$ , 使 F-P 标准具的相邻透射峰间隔满足

$$\Delta\lambda_{FP} = \frac{\lambda_0^2}{2h} \geq \frac{1}{2} \Delta\lambda_t \quad (5)$$

透过峰的宽度为

$$\delta\lambda_{FP} = \frac{\lambda_0^2}{2\pi h} \frac{1-R}{\sqrt{R}} \leq \Delta\lambda_{LD} \quad (6)$$

式中  $\lambda_0 = 0.83 \mu\text{m}$ 。经计算, 选取  $h = 50 \mu\text{m}$ ,  $R = 0.75$ 。

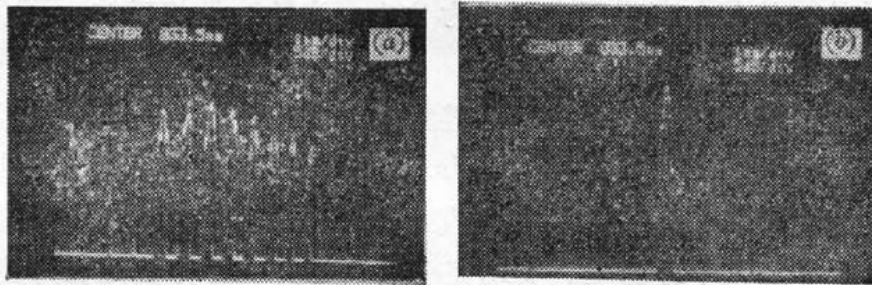


图 3 锁模外腔激光器光谱图  
(a) 无 F-P 标准具; (b) 置入 F-P 标准具

### 三、实验结果

镀增透膜的激光二极管及组成外腔激光器后的特性曲线如图 4 所示。镀增透膜的激光二极管自身的阈值电流大于  $124 \text{ mA}$ , 外腔激光器的阈值电流为  $58 \text{ mA}$ 。

外腔内放置 F-P 标准具并调节标准具相对光轴的夹角  $\theta$  可得到单一纵模群。监测激光模谱及输出功率并调节  $\theta$  角可选出最接近中心频率的最强的单一纵模群, 如图 3(b) 所示。激光二极管温度漂移会导致单一纵模群强度波动, 甚至引起模群跳变。实验中将激光二极管致冷控温使其温度稳定度达  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ , 使模式稳定。

实验中外腔长  $L = 162 \text{ mm}$ , 相应的往返频率  $f_0 = 925 \text{ MHz}$ 。当直流电流  $I_D = I_{th}$  ( $I_{th}$  为阈值电流), 交流调制电流频率  $f_m \approx 915 \text{ MHz}$ , 幅度  $I_m = 0.156 I_{th}$  时, 测出二次谐波强度自相关曲线如图 5 所示, 曲线无亚结构, 峰值与基底之比为 3:1。由此可见实现了完全锁模。由 SHG 曲线读出其宽度  $\Delta\tau = 27 \text{ ps}$ 。经曲线拟合可以认为光脉冲非常接近单边指数分布, 故脉冲宽度  $\Delta t = 0.5 \Delta\tau = 13.5 \text{ ps}$ 。由功率计测量得知峰值功率为  $100 \text{ mW}$ 。

脉冲宽度是调制频率的敏感函数。最窄脉冲所对应的最佳频率  $f_m$  较外腔往返频率  $f_0$  小

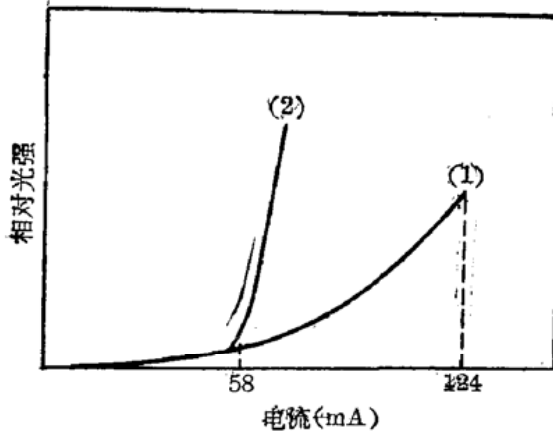


图 4 激光器的输出特性  
(1) 镀增透膜激光二极管; (2) 外腔激光器

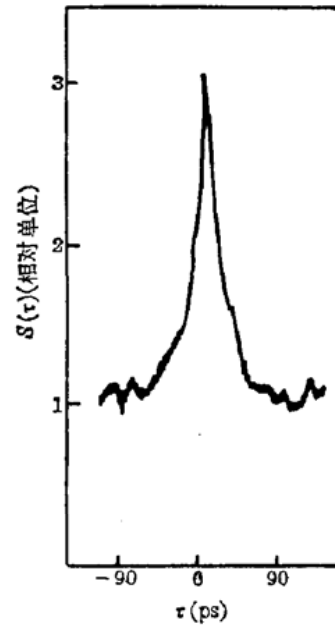


图 5 完全锁模脉冲 SHG 曲线  
 $L=162\text{ mm}; f_0=925\text{ MHz}; I_D=I_{th};$   
 $I_m=0.156 I_{th}; f_m=915\text{ MHz}$

10 MHz。调制频率偏离最佳频率  $\pm 5\text{ MHz}$  时,  $\Delta t$  约增加一倍<sup>[4]</sup>。

陈肇武、姚宝伦等同志对设计制作微带阻抗匹配器给予指导及帮助, 杨培生、郭良等同志提供激光二极管, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- 1 P. T. Ho *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **33**(3), 241(1978)
- 2 E. P. Ippen *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **37**(3), 267(1980)
- 3 H. Ito *et al.*, *IEEE J. Quant. Electr.*, **QE-17**(5), 663(1981)
- 4 石晓宏, 高以智 *et al.*, 清华大学学报, 增 3, 1988. (待发表)
- 5 吴松, 高以智, 中国激光(待发表)

(上接第 671 页)

表 2 熔化层厚度对开裂倾向性的影响

基体材料	添加元素	熔区深度 H	熔区宽度 W	$\frac{W}{H}$	开裂倾向
QT60-2	无	0.2 mm	4.1 mm	20.5	---
QT60-2	无	1.0 mm	4.4 mm	4.4	+++
CrWMn	无	0.5 mm	4.0 mm	8.0	---
CrWMn	无	1.2 mm	5.0 mm	4.2	++

性越小。所以, 可以利用固溶强化、晶粒细化等方法来消除激光熔化表面的开裂现象。

参 考 文 献

- 1 A. Solina, *J. Heat Treating*, **3**, 272 (1986)
- 2 李龙城, 球铁, **4**, 34 (1988)