

矩磁铁,成 $90^\circ$ 角偏转到真空系统外面的荧光屏靶,用电视摄像机观察荧光屏靶上的电子束亮度和花样尺寸。距NaCl布鲁斯特窗约10cm的位置,正对输送系统的轴线放置装在屏蔽盒内的热释电探测器和信号放大器。用屏蔽电缆线将探测器信号输入到实验大厅外面的示波器中观测。当电子束能量和输送系统调整到合适数值时,在示波器上观测到周期为20ms的自发辐射信号,这时电子束的重复率为50Hz。电子束重复率在25~60Hz范围内变动时,光信号的周期也随之发生相应的变化。用示波照相机摄到的一组图形如图3所示。根据RD-L型热释电探测器的响应率和放大器增益,计算得在 $1\mu\text{s}$ 的宏观电子束脉冲内的 $10\mu\text{m}$ 辐射的平均功率为1.4W。正当有辐射输出时,从电子束路径上移开磁摆动器,其他条件均保持不变,则观察不到任何信号,这进一步证明了所观察到的辐射是电子摆动器磁场和相对论电子束相互作用所产生的康普顿相干散射辐射。这种辐射要比普通的同步辐射强度提高几百倍,亮度提高几万倍<sup>[1]</sup>。1975年首次报道的康普顿

型自由电子激光器的自发辐射峰值功率为 $15\times 10^{-6}$ W,自发辐射的平均功率为 $15\times 10^{-9}$ W,受激辐射峰值功率为15W,即比自发辐射峰值功率提高了 $10^5$ 倍<sup>[2]</sup>。

在实验中发现韧致X射线对辐射探测有相当大的影响,示波器指示值可达100mV左右。我们用4cm厚的铅板做X射线屏蔽,消除了X射线的干扰,使噪声水平下降到10mV以下,探测到自由电子辐射输出。

在本实验的筹备阶段,上海光机所的王明常、黄序人、凌根深同志曾参加过部分工作;在本实验进行期间,中国科技大学加速器实验室和光电子实验室的同志们都给予了很多帮助,在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Kincaid B M. *J. Appl. Phys.*, 1977; **48** (7): 2684
- 2 Elias L *et al. Phys. Rev. Lett.*, 1976; **36**: 717

(收稿日期:1987年2月2日)

## 半导体激光器阈值电流的精确测量

赵一广

(北京大学物理系)

### Accurate measurement of threshold current for semiconductor lasers

Zhao Yiguang

(Department of Physics, Peking University, Beijing)

**Abstract:** Analysis in this paper shows that a harmonic measurement method can be used to determine accurately the threshold current of semiconductor lasers. The experimental method and results are given and compared with those of other methods.

### 一、引 言

阈值电流是半导体激光器的重要参数之一。通常用测量半导体激光器的输出光功率——电流( $P-I$ )特性曲线、观察远场或近场图样的变化以及光谱随电流的变化等来确定阈值,但误差较大。本文用测量半导体激光器调制光信号的二次谐波来确定阈值电流<sup>[1]</sup>。理论和实验都表明用谐波测量法测定半

导体激光器的阈值电流比其它方法有较高的精度。

### 二、理论分析

由半导体激光器的总模速率方程<sup>[2]</sup>:

$$\tau_s \frac{dN}{dt} = J - N - GS \quad (1)$$

$$\tau_p \frac{dS}{dt} = (G-1)S + CN \quad (2)$$

其中 $\tau_s$ 和 $\tau_p$ 分别为载流子寿命和光子寿命;

$J$ 、 $N$  和  $S$  分别为归一化注入电流密度、载流子密度和光子密度;  $C$  为总模自发发射因子; 归一化总模增益  $G$  与载流子密度  $N$  的关系是非线性的<sup>[2]</sup>, 但是在小信号调制下, 载流子密度变化的范围很小, 在小的区域内可以看作是线性的, 取:

$$G = \alpha(N - N_0) \quad (3)$$

这里  $\alpha$  为比例系数;  $N_0$  为归一化透明载流子密度。

在稳态条件下, 由(1)、(2)、(3)式可得:

$$S = \frac{\sqrt{(m - aJ)^2 + 4aJC} + aJ - m}{2a} \quad (4)$$

其中  $m = 1 + aN_0(1 - C)$ 。令  $x = aJ$  代入(4)式得:

$$S(x) = \frac{\sqrt{(m - x)^2 + 4Cx} + x - m}{2a} \quad (5)$$

若将半导体激光器偏置在  $x_0$  并加小信号调制, 即:

$$x = x_0 + \gamma \sin(\omega t) \quad (6)$$

其中  $\gamma$  是调制系数。为了描述  $S(x)$  的非线性, 将其在偏置点  $x_0$  作泰勒展开:

$$S(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} S^{(n)}(x_0)(x - x_0)^n \quad (7)$$

这里  $S^{(n)}(x_0)$  表示对  $x$  的  $n$  阶微商。将(6)式代入(7)式, 并考虑到小信号调制  $\gamma$  很小, 则有:

$$S(t) = S(x_0) + \gamma S'(x_0) \sin(\omega t) - \frac{1}{4} \gamma^2 S''(x_0) \cos(2\omega t) + \dots \quad (8)$$

$S(x)$  的二阶和三阶微商分别为:

$$S''(x) = \frac{1}{2a} \left[ \frac{1}{\sqrt{(m-x)^2 + 4Cx}} - \frac{(2C+x-m)^2}{[(m-x)^2 + 4Cx]^{3/2}} \right] \quad (9)$$

$$S'''(x) = \frac{-3(x-m+2C)}{2a[(m-x)^2 + 4Cx]^{3/2}} \times \left[ 1 + \frac{(2C+x-m)^2}{(m-x)^2 + 4Cx} \right] \quad (10)$$

当  $x_p = m - 2C$  时,  $S'''(x_p) = 0$ , 即:

$$aJ = m - 2C = 1 + aN_0(1 - C) - 2C \quad (11)$$

时,  $S''(x_p)$  为极大值, 也即  $S(t)$  的二次谐波为极大值。由(2)式半导体激光器在阈值时满足:

$$G = 1 \quad (12)$$

又因在阈值处光强很弱, 由(2)式得

$$N = J \quad (13)$$

由(3)、(12)、(13)式, 阈值条件可表示为

$$aJ = 1 + aN_0 \quad (14)$$

半导体激光器的总模自发发射因子  $C$  为  $10^{-3} \sim 10^{-5}$  量级<sup>[3]</sup>。比较(11)、(14)两式可见  $S(t)$  的二次谐波峰值处的偏置电流与阈值电流相差很小。故可以认为  $S(t)$  的二次谐波峰值处的偏置电流即为阈值电流。

### 三、实验方法

图1所示为实验装置示意图。信号发生器尽量选用失真度较小的。为了保证加在半导体激光器上的调制信号足够小(本实验中  $\gamma$  小于百分之一)而又保证加在锁相放大器上的参考信号足够大, 要适当地选取电阻  $R_1$  和  $R_2$ 。  $C$  为隔直电容,  $L$  为扼流圈。用毫伏表监视  $1\Omega$  取样电阻上的信号以便确定  $\gamma$ 。

将锁相放大器置  $2f$  参考通道, 在半导体激光器上加频率为  $500\text{Hz}$  的小调制信号, 并仔细调整偏置电流, 观察锁相放大器所指示的调制光信号的二次谐波的变化, 当二次谐波达到极大值时所对应的偏置电流即为阈值电流。为了使锁相放大器能及时反映二次谐波的变化, 其时间常数尽量选小一点, 本实验选  $300\text{ms}$ 。

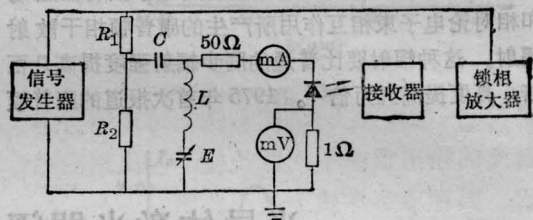


图1 实验装置示意图

本实验中选用 XD-1 型信号发生器; DA-16 型晶体管毫伏表; ORTHOLOG-SC 9505 型锁相放大器; 接收器为硅光电池。

### 四、实验结果和讨论

图2为实验结果, 图中(a)、(b)组曲线分别为样品  $CP_1$ 、 $CP_2$ (条形激光器)输出光功率随电流变化 ( $P-I$ )以及调制光信号的二次谐波随电流变化

$$\left( \frac{d^2P}{dI^2} - I \right)$$

的曲线。实验过程中, 在二次谐波峰值处, 偏置电流变化  $\pm 0.1\text{mA}$ , 二次谐波就有明显的变化, 可见此种方法测定的阈值电流有较高的精度, 可以精确到小于  $1\text{mA}$ , 这是用其他方法难以实现的。

过去所用的几种方法测量半导体激光器的阈值电流, 由于方法所限, 很难精确到毫安以下的量级。这是因为观察远场图样的变化决定阈值电流是用红外变像管观察半导体激光器的发光。低于阈值时, 变像管观察到一片均匀的荧光, 亮度低; 达到阈值时, 可以观察到垂直于  $PN$  结方向有若干长条亮斑, 当长条亮斑出现时的正向电流即为阈值电流。用此种方法观察时, 亮斑的出现可能是缓变的, 将引起高

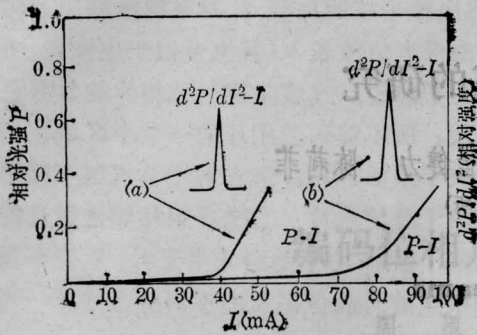


图2  $P-I$  和  $\frac{d^2P}{dI^2}-I$  特性曲线

达几个毫安的测量误差。即使亮斑的出现迅速,也很难分辨 1mA 以内的变化。而且此种测量方法的精确度常因人而异。更为严重的,如激光器安装的不合适,时常会出现一些假象,在达到阈值以前,变像管就出现若干亮斑,造成较大的误差。因而它只适用较粗略地测定阈值电流。观察近场图样的变化测量半导体激光器的阈值电流,是用变像管观察半导体激光器的近场图样随电流的变化。其方法及其误差与观察远场法基本一样。

由半导体激光器的光谱变窄决定阈值电流是基于半导体激光器的光谱随电流而变化,低于阈值时荧光光谱带很宽,达到阈值时谱线变锐。用此方法,当在阈值附近画一系列光谱时,很难由这些光谱图严格地确定哪一个是转变点电流,从而造成较大的误差。无法达到小于 1mA 的精度。

目前常用的是测量半导体激光器的输出光功率随注入电流的变化决定阈值电流。这种方法是根据低于阈值时输出功率很小,阈值以上输出功率迅速增大,由输出功率的转折点决定阈值电流。此种方法虽比前三种方法优越些,但测量精度直接受  $P-I$  曲线形状的影响,如图 2 中(b)组曲线,因其转变点

难以确定,可引起几个毫安的测量误差。

用谐波法测量多只半导体激光器的阈值电流发现,在调制光信号的二次谐波峰值处,偏置电流改变很小,二次谐波就有明显的变化。即使对于样品  $CP_2$ ,也只有  $\pm 0.2$  mA。用谐波测量法测得样品  $CP_2$  的阈值电流为 83.5 mA,比  $P-I$  曲线决定的阈值电流要精确得多。且多次测量重复性很好。

半导体激光器调制光信号的二次谐波在阈值附近随偏置电流变化很锐,这很容易从前边的理论给以解释。若取  $\alpha=5.0$ ,  $N_s=0.80$ ,  $C=1.0 \times 10^{-3}$ ,由(9)、(13)两式可计算出在阈值附近偏置电流变化千分之三时,二次谐波的变化约为百分之三;而当  $C=1.0 \times 10^{-4}$ ,  $\alpha, N_s$  不变,则在阈值附近偏置电流变化千分之三时,二次谐波的变化为百分之十六。这么大的变化,由接收器转变为电信号后,锁相放大器是很容易分辨出来的。

由前知,当总模自发辐射因子较大时,如  $C=1.0 \times 10^{-3}$ ,理论误差大约为千分之一。即测得的调制光信号的二次谐波峰值处偏置电流比实际半导体激光器的阈值电流小千分之一。但是在二次谐波峰值处,二次谐波随偏置电流的变化很锐,全部测量误差在百分之一以下是很容易实现的。这是其他方法难以做到的。当自发辐射因子较小时,如  $C=1.0 \times 10^{-4}$  甚至更小,整个测量误差将更小。

### 参 考 文 献

- 1 Barnes P A, Paoli T L. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1976; **QE-12**(12): 633
- 2 郭长志, 钮金真. 半导体学报, 1983; **4**(3): 247
- 3 Yasuharu Suematsu *et al.* *IEEE J. Quant. Electr.*, 1977; **QE-13**(8): 596

(收稿日期: 1987年3月25日)