

直接调制 $1.3\mu\text{m}$ DC-PBH 琥珀半导体激光器的非线性动力学研究

张正线 林志援

(通信工程学院 南京 210016) (东南大学 南京 210018)

摘要 本文从理论上研究了半导体激光器的非线性动力学性质,并对国产 $1.3\mu\text{m}$ DC-PBH型琥珀半导体激光器的非线性特性进行了系统的测试,两者结果吻合.

EEACC: 4320J, 4340

1 引言

对宽带模拟光通信系统如副载波复用光波系统而言,系统的非线性失真是影响系统的重要因素.而系统的非线性主要来自于做为光源的半导体激光器.

半导体激光器(LD)的非线性有两个方面:一是光功率对偏置电流($L-I$)曲线的非线性,是由于LD的 $L-I$ 曲线在阈值以上的区域不是理想线性造成的;二是电子与光电子的相互作用产生的LD动态非线性,当射频调制频率接近激光器弛豫振荡区域时,线性变坏.

由于LD的非线性,当多路复用的信号调制激光器时,会产生谐波和互调项,这些产物如落入系统的使用频段,则造成非线性失真,产生干扰.因此,研究LD的非线性失真特性对系统应用有重大的意义.LD的 $L-I$ 曲线非线性可以通过提高制造技术和改进工艺以及限制LD的工作点的方法来消除.LD的动态非线性国外有许多学者做过研究^[1,2],但给出的结果都是经过相当大的简化处理后得出的,使用的参数较少,不够全面和精确.本文应用半导体激光器的动力学全面精确地从理论上分析了 $1.3\mu\text{m}$ 掩埋异质结构(DC-PBH)琥珀半导体激光器的动态非线性特性,并建立了相应的半导体激光器的非线性测试系统,进行了实验对比研究.

2 半导体激光器的动力学

激光器的动力学,一般是由支配激光介质内的光子和载流子浓度的速率方程来描述

张正线 男,1963年生,博士,目前从事光纤通信系统、高速光电组件等方面的研究
1995年6月26日收到初稿,1995年11月17日收到修改稿

的^[3,4]. 速率方程可以写成:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eV} - \frac{g_o(N - N_{om})S}{1 + \epsilon S} - \frac{N}{\tau_n} \quad (1a)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma g_o(N - N_{om})S}{1 + \epsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma \beta N}{\tau_n} \quad (1b)$$

式中 N 是载流子浓度; S 是光子浓度; N_{om} 是透明电子浓度; τ_n 是载流子的自发辐射寿命; τ_p 是腔内光子的寿命; Γ 是光限制因子; g_o 是光增益系数; ϵ 是描述非线性增益的一个参数; β 是进入激光模式的自发发射分量; e 是电子电量; I 是流过有源区的电流; V 是有源区体积.

描述增益压缩通常是用 $g = g_o(1 - \epsilon S)$ 的形式, 但对于大光子浓度, 有可能给出负值, 因此在(1)式中使用子 $g = g_o(1 + \epsilon S)$ 的形式.

2.1 激光器参数值的获取

在小信号调制下, 求解方程(1)时把变量分成稳态部分(直流项)和瞬态部分(交流项), 有

$$N = N_o + n_1 e^{j\omega t}, S = S_o + S_1 e^{j\omega t}, I = I_o + i e^{j\omega t}, \quad (2)$$

将(2)式代入(1), 并略去二阶小量, 将 $1/(1 + \epsilon S)$ 在 S_o 处做级数展开, 取一级近似, 可得到小信号响应的归一化传输函数为

$$S(\omega) = (BC - AD)/f(\omega) \quad (3)$$

这里

$$f(\omega) = (BC - AD) - \omega^2 + (A - D)j\omega \quad (4)$$

$$A = \frac{g_o S_o}{1 + \epsilon S_o} + \frac{1}{\tau_n} \quad (5a)$$

$$B = \frac{g_o(N_o - N_{om})}{(1 + \epsilon S_o)^2} \quad (5b)$$

$$C = \frac{\Gamma g_o S_o}{1 + \epsilon S_o} + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n} \quad (5c)$$

$$D = \frac{\Gamma g_o(N_o - N_{om})}{(1 + \epsilon S_o)^2} - \frac{1}{\tau_p} \quad (5d)$$

由(1)式的稳态解可得

$$N_o - N_{om} = \frac{\frac{S_o}{\tau_p} - \frac{\Gamma \beta N_{om}}{\tau_n}}{\frac{\Gamma g_o S_o}{1 + \epsilon S_o} + \frac{\Gamma \beta}{\tau_n}} \quad (6a)$$

$$S_o = \frac{\Gamma \tau_p}{1 + \epsilon / \tau_n g_o} (I_o - I_{th}) / eV \quad (6b)$$

其中

$$I_{th} = \frac{eV}{\tau_n} (N_{om} + \frac{1}{\Gamma g_o \tau_p}) \quad (6c)$$

定义为阈值电流.

很容易得到(3)式响应曲线的峰值处频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{BC - AD - (A - D)^2/2} \quad (7)$$

将上式做近似处理($\tau_p/\tau_n \ll 1, \beta \ll 1$), 则弛豫振荡频率可表示为

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{g_o S_o}{\tau_p (1 + \epsilon S_o)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

当 $\epsilon = 0$, 该表达式就是通常的激光器弛豫振荡频率表达式.

(7)式有一最大值, 由(7)式和(5)式令 $df_r/dS_o = 0$ 可得,

$$f_r^{\max} = \frac{1}{2\pi \sqrt{2}} \frac{\epsilon_o}{\epsilon + g_o \tau_p} \quad (9)$$

表1给出了激光器的各参数值, I_{th} 和 f_r 是测得的, 激光器有源区体积近似为 $V = 300\mu\text{m} \times 1.5\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$, 而光子寿命^[5]

$$\tau_p = \left[\frac{c}{n_g} (\bar{\alpha} - \frac{\ln R}{L}) \right]^{-1} \quad (10)$$

其中 c 是真空光速, n_g 是介质波导的群折射率, $\bar{\alpha}$ 是光路中的材料的吸收系数, L 是腔长, R 是镜面反射率. 对于 InGaAsP 材料, $R = 0.32$, $\bar{\alpha} = 10\text{cm}^{-1}$, n_g 可由 $\Delta\lambda = \lambda^2/2Ln_g$ 得出, 本文激光器纵模间隔 $\Delta\lambda$ 为 0.833nm , 由(10)式可得出激光器的光子寿命约为 2.5ps . 在 300K 时, 为了得到光增益大于零, 标称电流密度需要有 $4000\text{A}/\text{cm}^2$ ^[8], 由此可近似估计出

$$N_{om} = \frac{I\tau_n}{eV} = 1.25 \times 10^{33} \tau_n (\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}) \quad (11)$$

激光器的阈值电流 $I_{th} = 25\text{mA}$, 当 $I/I_{th} = 1.3$ 时, $f_r = 1.5\text{GHz}$. τ_n, N_{om}, g_o 和 ϵ 可由(6)、(8)、(9)和(11)式计算出.

表1 组件参数

参数	说明	值	单位
I_{th}	室温阈值电流	25	mA
f_r	小信号弛豫振荡频率($I = 1.3I_{th}$)	1.3	GHz
λ	激光波长	1.319	μm
V	有源区体积	9×10^{-17}	m^3
τ_p	光子寿命	2.5	ps
τ_n	电子自发辐射寿命	6.06	ns
N_{om}	透明载流子浓度	7.58×10^{24}	m^{-3}
g_o	光增益系数	1×10^{-13}	s^{-1}m^3
Γ	光限制因子	0.126	
β	进入激光模式的自发发射分量	10^{-3}	
ϵ	增益压缩参数	8.19×10^{23}	m^3

图1是测量和模拟的小信号调制响应. 实验中使用了 HP8702B 光波网络分析仪(300kHz~6GHz 含 HP83411C 光接收机)测量组件的小信号频率响应, 测量范围从 300kHz 到 3GHz.

2.2 激光器的非线性失真

激光器的动态非线性可通过解(1)式的高阶次微扰方程组来分析,可以得到二次谐波,三次谐波与基波之比分别为

$$2HD = \frac{mS_o}{f(2\omega)} [(C - \Gamma A) - \Gamma j2\omega] \left[\left(\frac{ED}{C} + F \right) - \frac{E}{C} j\omega \right] \quad (12)$$

$$\begin{aligned} 3HD = & \frac{(mS_o)^2}{f(2\omega)f(3\omega)} [(C - \Gamma A) - \Gamma j3\omega] \left\{ \left[\left(\frac{ED}{C} + F \right) - \frac{E}{C} j\omega \right] \left[\frac{ED}{C} + 2F \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{E}{C} j\omega \right] (C - \Gamma A - \Gamma j2\omega) + E(\Gamma B - D + j2\omega) \right\} + \frac{\epsilon E}{C} (j\omega - D) f(2\omega) \} \end{aligned} \quad (13)$$

其中

$$m = \frac{S_1}{S_o}, \text{ 表示调制指数}$$

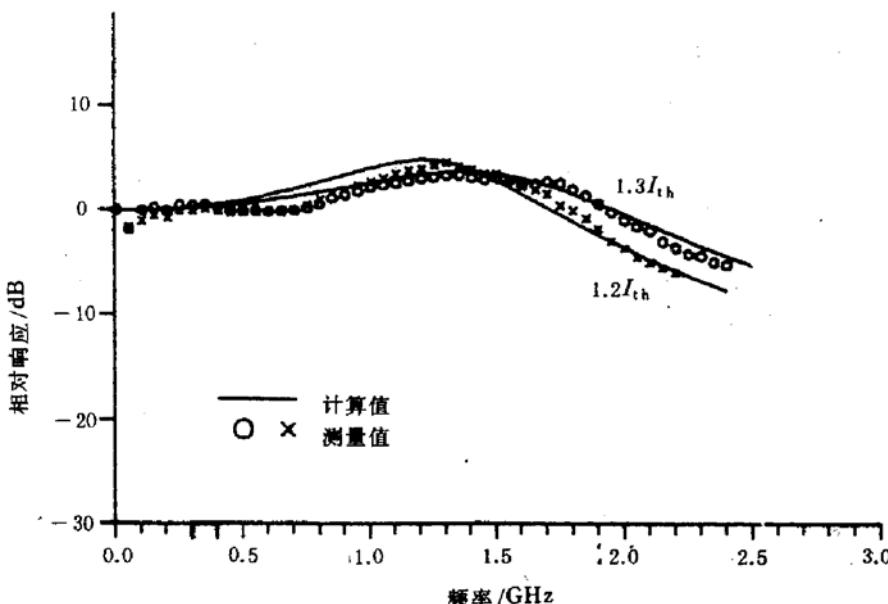


图1 测量和模拟的小信号强度调制频率响应

假设两个载波 ω_1, ω_2 相距不远, 即

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 \ll \omega \text{ (中心频率)}$$

可以近似得到互调产物与基波之比为

$$\begin{aligned} IMD = & \frac{(mS_o)^2}{f(2\omega)f(3\omega)} [(C - \Gamma A) - \Gamma j\omega] \left\{ \left[\left(\frac{ED}{C} + F \right) + \frac{E}{C} j\omega \right] \left[\left(\frac{ED}{C} + 2F \right. \right. \right. \\ & \left. \left. \left. + \frac{E}{C} j\omega \right] (C - \Gamma A - \Gamma j2\omega) + E(D - \Gamma B - j2\omega) \right] - \frac{\epsilon E}{C} (j\omega + D) f(2\omega) \} \end{aligned} \quad (16)$$

3 实验测量与模拟计算结果

LD 非线性失真测量系统的建立如图2所示。测试中使用了美国惠普公司的 HP8350B 微波信号发生器(10MHz ~ 8.4GHz)、HP8590B 频谱分析仪(200MHz ~ 1.8GHz)、HP83411C 光接收机(300kHz ~ 10GHz)和 HP8702B 光波网络分析仪(300kHz ~ 6GHz)。测

试电路(不包括光系统时)的频率响应在100MHz~3GHz带宽内是平坦的,其中在600~700MHz之间和2GHz处在2dB左右的波动。为了测试的准确性,检查了微波信号发生器本身的谐波失真,当输出射频功率小于+5dBm(毫瓦分贝)时,产生的谐波失真很小,二次和三次谐波失真与基波之比均小于-50dB,因此,在实验测试中忽略了

图3(见图版I)给出了对于不同LD偏置电流测量的LD二次和三次谐波产物,偏置电

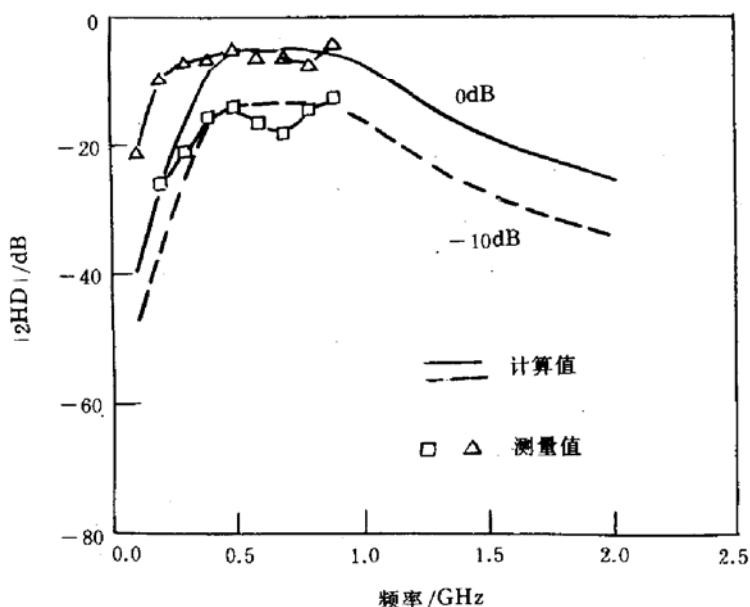


图5 测量和模拟的二次谐波失真与调制频率的关系

量曲线有凹陷,推测是测试电路影响的结果.另外发现0dBm 测量曲线在低频时和理论分析有差别.误差可认为是由于输入信号功率较大而理论分析中未包括激光器的模式分配^[6]和 LD 组件的近端和远端反射光^[7]的影响造成的.

图6是测试和计算模拟的三次谐波失真与调制频率的关系。测试条件同图5。可以看出，两者完全相符。受测试仪器噪声底的限制，-10dBm 测试结果数据较少。

二、三次谐波和三次互调非线性失真与 LD 偏置电流的关系如图 7 所示。二、三次谐波的测试条件为调制频率是两路载波信号频率分别为 0.97GHz，认分析曲线，两者是一致的。

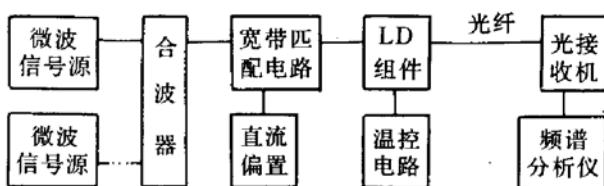


图2 LD 非线性失真测试系统

量的 LD 二次和三次谐波产物, 偏置电流分别为 1.11、1.25 和 1.45 倍阈值电流, 输入射频信号: 频率 0.6GHz, 功率 -5dBm. 图中 10dB/格. 图 4(见图版 I) 是在不同 LD 偏置电流下测量的 LD 的三次互调产物, 偏置电流分别为 1.17、1.23 和 1.37 倍阈值电流, 射频信号的频率分别为 0.97 和 1GHz, 频差 30MHz, 总输出功率 -10dBm, 图中 10dB/格.

图5是测试和计算模拟的二次谐波失真与调制频率的关系。测试中 LD 偏置在 $1.2I_{th}$, 输入射频信号功率分别为 0dBm 和 -10dBm。测量结果和模拟曲线基本上吻合, 在 700MHz 左右测

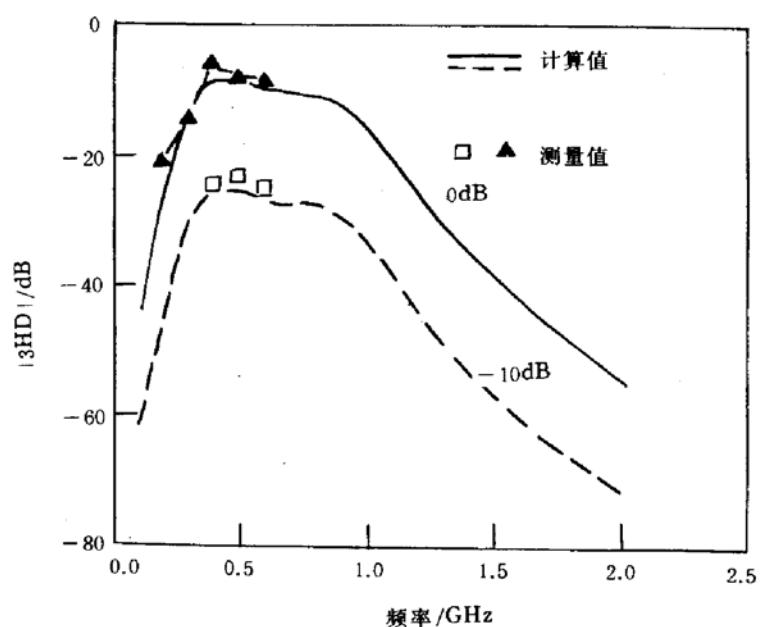


图6 测量和模拟的三次谐波失真与调制频率的关系
 6GHz, 输入射频信号功率-5dBm. 互调测试条件
 GHz, 输入总功率-10dBm. 同时图中也给出了理

图8给出了二次谐波失真随输入射频信号功率变化的情况. 测试中调制频率为0.9GHz, 偏置电流 $1.25I_{th}$. 实验数据同计算分析结果完全吻合. 当射频输入功率过大时, 出现饱和现象.

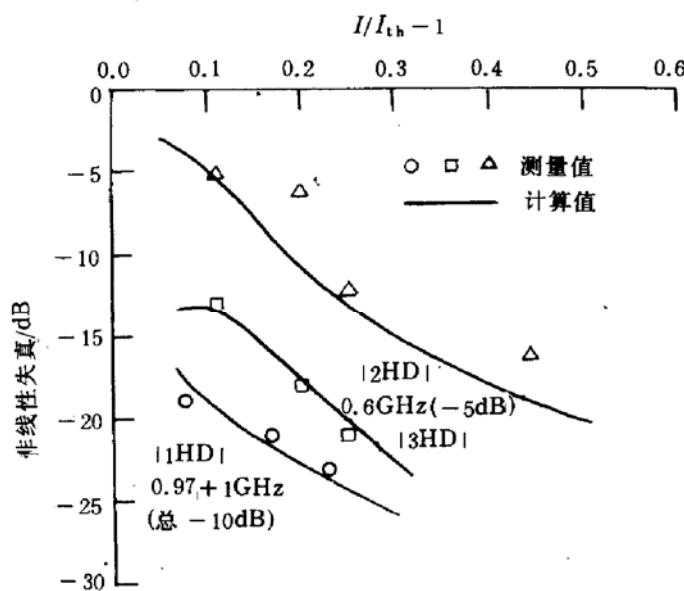


图7 LD 非线性失真与偏置电流的关系

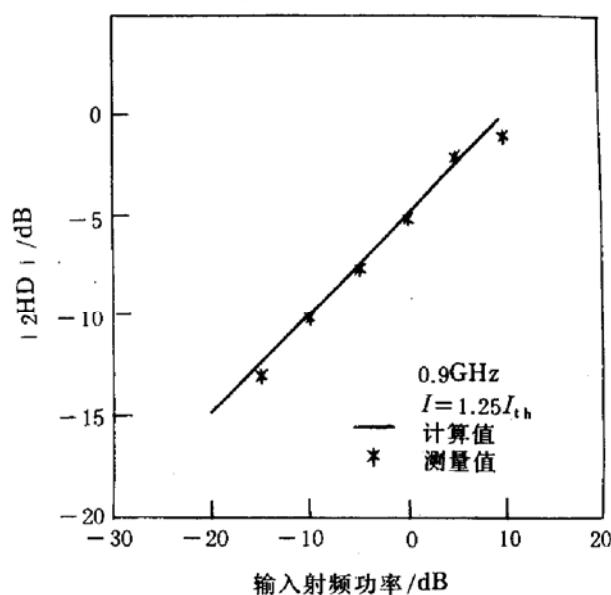


图8 二次谐波失真随输入射频信号功率的变化

4 结语

首次应用半导体激光器的动力学方程, 分析了国产 $1.3\mu\text{m}$ DC-PBH 琥珀半导体激光器的非线性失真特性. 实验测量了激光器谐波和互调失真. 理论分析和实验结果相吻合. 使用这一结果分析了我们研制的微波副载波复用多路卫星调频电视光纤传输系统的载噪比特性^[8], 与测试数据相吻合, 取得了令人满意的结果.

参 考 文 献

- [1] P. Iannone and T. E. Darcie, Electron. Lett., 1987, **23**(25):1361~1362.
- [2] T. E. Darcie et al., Electron. Lett., 1985, **21**:665~666.
- [3] K. Y. Lau, et al., IEEE J. Quantum Electron., 1985, **21**(2):121~147.
- [4] R. S. Tucker, J. Lightwave Technol., 1985, **3**(6):1180~1192
- [5] 亨利·克雷歇尔等著, 黄史坚译, 半导体激光器和异质结发光二极管, 北京: 国防工业出版社, 1983, 108~204
- [6] W. T. Tsang 主编, 江剑平等译, 半导体注入型激光器, 北京: 清华大学出版社, 电子工业出版社, 1990, 155~204
- [7] A. J. Lucero, R. W. Tkach and R. M. Derosier, Electron. Lett., 1988, **24**(6):337~339.
- [8] 张正线, 等, 微波学报, 1995, **11**(2):143~148.

Study on Nonlinear Dynamics of Direct Modulated 1. 3 μm DC-PBH-Fabry-Perot Laser Diode

Zhang Zhengxian

(Communication Engineering Institute, Nanjing 210016)

Lin Zhiyuan

(Southeast University, Nanjing 210018)

Received 26 June 1995, revised manuscript received 17 November 1995

Abstract The nonlinear dynamical properties of the laser diode are studied in terms of theory, and the nonlinear characteristics of the domestic 1. 3 μm DC-PBH Fabry-Perot laser diode are measured in system. They are accordant.

EEACC: 4320J, 4340