

半导体激光器非线性失真的理论和实验研究

詹玉书 王 鹤 高致慧

(西安电子科技大学技术物理系, 西安 710071)

詹道庸 张 未 沈丹勋

(西安电子科技大学信息工程系, 西安 710071)

摘 要 对半导体激光器的非线性失真进行了理论分析, 得出了计算二阶失真和三阶失真的理论公式. 实验验证了理论结果, 并发现国产 DH-GaAlAs 半导体激光器的二阶失真严重, 而三阶以上的失真却可以忽略.

关键词 半导体激光器, 非线性失真.

1 引 言

半导体激光器的非线性失真是指其调制响应的非线性, 在 80 年代中期即开始研究^[1,2]. 非线性失真产生互调干扰, 影响宽带光纤传输系统的正常工作. 因此, 有关半导体激光器的非线性研究一直受到各国学者的重视^[3~5]. 早期的理论研究^[1,2]是从半导体激光器的速率方程出发, 利用微扰法进行的. 后来则着重在改善分析方法, 建立非线性失真与半导体激光器各参量之间的关系上, 并对二阶失真获得了有意义的结果^[4]. 与理论成果相比, 实验研究稍有逊色. 已发表的实验结果还不足以描述各种半导体激光器的非线性.

针对上述情况, 本文在理论研究方面对已有的二阶谐波失真理论公式进行了简化, 并进一步导出了计算其它二阶及三阶非线性失真的公式, 得出了若干组有用的曲线. 这些公式和曲线可以用来分析国产半导体激光器的非线性特性. 在实验研究方面, 用上述理论对国产 DH-GaAlAs 半导体激光器进行了研究, 所得的实验结果和理论计算基本相符. 理论和实验结果为利用国产半导体激光器设计宽带光纤传输系统提供了必要的依据, 并对国产半导体激光器的改进也提供了重要线索.

2 理论分析

半导体激光器的非线性是由两种因素引起的. 一是由于跳模、载流子的损耗等使激光器的输出特性偏离直线分布. 这种非线性可通过改进工艺来降低, 而且容易由激光器的直流输出曲线加以鉴别和进行筛选. 另一种因素是半导体激光器的激射过程本身. 即使是直流输出

特性曲线线性非常好的器件, 在高频调制时, 也会产生非线性失真, 这种失真就是由第二种因素造成的. 这种非线性又称作动态非线性. 本文只分析动态非线性. 描写激射过程可用速率方程组, 即

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qv} - \frac{g_0(N - N_0)S}{1 + \varepsilon S} - \frac{N}{\tau_n}, \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\Gamma g_0(N - N_0)S}{1 + \varepsilon S} - \frac{S}{\tau_p} + \beta \frac{\Gamma N}{\tau_n}, \quad (2)$$

其中, N 表示半导体激光器有源层内的载流子密度; S 表示半导体激光器腔内光子密度. 由于 S 和输出激光强度成正比, 所以 S 还表示相对输出功率. ε 为增益饱和参数. 方程组(1), (2)实质上是非线性的. 通过方程(1)、(2)可分析半导体激光器的整个调制过程, 包括线性和非线性过程.

设 $I = \bar{I} + i(t)$, $N = \bar{N} + n(t)$, $S = \bar{S} + S(t)$, 并将因子 $1/(1 + \varepsilon S)$ 展开为 $[1/(1 + \varepsilon \bar{S}) - \varepsilon S/(1 + \varepsilon \bar{S})^2]$. 代入方程(1)、(2), 以下 $S(t)$, $n(t)$ 简化为 S 、 n , 并略去 nS^2 三阶小量项得

$$\frac{dn}{dt} = \frac{i}{qv} - An - BS - EnS + FS^2, \quad (3)$$

$$\frac{dS}{dt} = Cn + DS + \Gamma EnS - \Gamma FS^2, \quad (4)$$

其中

$$A = \frac{g_0 \bar{S}}{1 + \varepsilon \bar{S}} + \frac{1}{\tau_n}, \quad B = \frac{g_0(\bar{N} - N_0)}{1 + \varepsilon \bar{S}} - \frac{g_0(\bar{N} - N_0)\varepsilon \bar{S}}{(1 + \varepsilon \bar{S})^2},$$

$$C = \frac{\Gamma g_0 \bar{S}}{1 + \varepsilon \bar{S}} + \frac{\beta \Gamma}{\tau_n}, \quad D = \frac{\Gamma g_0(\bar{N} - N_0)}{1 + \varepsilon \bar{S}} - \frac{\Gamma g_0(\bar{N} - N_0)\varepsilon \bar{S}}{(1 + \varepsilon \bar{S})^2} - \frac{1}{\tau_p},$$

$$E = \frac{g_0}{1 + \varepsilon \bar{S}} - \frac{g_0 \varepsilon \bar{S}}{(1 + \varepsilon \bar{S})^2}, \quad F = \frac{\varepsilon g_0(\bar{N} - N_0)}{(1 + \varepsilon \bar{S})^2}.$$

公式(3)、(4)中忽略了 $\varepsilon g_0 nS^2/(1 + \varepsilon \bar{S})^2$ 的三阶项, 因为速率方程是耦合非线性方程组, 即使不考虑饱和(即令 $\varepsilon = 0$), 也包含各阶(二阶、三阶及以上各阶)非线性效应, 而 nS^2 项与各阶非线性效应相比, 数值很小, 可以忽略.

设输入信号电流 i 、载流子 n 和光子密度 S 分别为

$$i(t) = i_1 \exp(j\omega t) \quad (5)$$

$$n(t) = n_1 \exp(j\omega t) + n_2 \exp(j2\omega t) + n_3 \exp(j3\omega t) + \dots \quad (6)$$

$$S(t) = S_1 \exp(j\omega t) + S_2 \exp(j2\omega t) + S_3 \exp(j3\omega t) + \dots \quad (7)$$

在一般情况下, $n_1 \gg n_2 \gg n_3$. 令 $n_2 = n_3 = S_2 = S_3 = 0$, 则求解(3)、(4)式可得

$$S_1 = \frac{i_1 c / q \Gamma}{(BC - AD) + (A - D)j\omega + (j\omega)^2} = \frac{i_1 / q \Gamma}{g(\omega)}. \quad (8)$$

其中 $g^{-1}(\omega)$ 表示半导体激光器的线性调制响应. (8)式为弛豫振荡方程, 其中 $BC - AD = \omega_c^2$, ω_c 即为半导体激光器的弛豫振荡角频率. 令 $n_3 = 0$, 并将(8)式代入(3)、(4)式, 可解出二阶谐波失真 $2HD$, 即二阶谐波与基波功率比

$$2HD = \frac{S_2}{S_1} = \frac{-a + jb\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) - c\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}{g(2\omega)} M. \quad (9)$$

其中

$$M = \frac{S_1}{\bar{S}} = \frac{i_1}{qI_g(\omega)\bar{S}}$$

M 称为调制指数. 常数 a 、 b 、 c 分别为

$$\left. \begin{aligned} a &= \left(\frac{ED}{c} + F \right) (\Gamma A - c) \frac{\bar{S}}{c} \\ b &= \left[\frac{E(\Gamma A - c)}{c^2} - \frac{2\Gamma}{c} \left(\frac{ED}{c} + F \right) \right] \bar{S} \omega_r \\ c &= \frac{2\Gamma E}{c^2} \bar{S} \omega_r^2 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

对文献[4]中有关公式进行简化亦可得到(9)式. 令 $a = b = 0$, 则(9)式与早期工作^[1, 2]的结果相同.

采用类似的方法也可求出三阶谐波失真 $3HD$, 即三阶谐波与基波功率比

$$3HD = \frac{S_3}{S_1} = \frac{[-a' + jb'(\omega/\omega_r) - c'(\omega/\omega_r)^2][-a + jb(\omega/\omega_r) - c(\omega/\omega_r)^2]}{g(2\omega) \cdot g(3\omega)} M^2. \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} a' &= \left(\frac{ED}{c^2} + \frac{2F}{c} \right) (\Gamma A - c) \bar{S} + \frac{3E(\Gamma B - D)}{c} \bar{S}, \\ b' &= \left[\frac{E(\Gamma A - c)}{c} - 3\Gamma \left(\frac{ED}{c} + 2F \right) \right] \frac{\bar{S}}{c} \omega_r - \frac{2E\bar{S}}{c} \omega_r, \\ c' &= \frac{3\Gamma E}{c^2} \bar{S} \omega_r^2. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

半导体激光器的非线性失真还可用复合二阶拍频失真 CSO (Composite Second Order Distortion) 和复合三阶拍频 CTB (Composite Triple Beat) 来描述. 令输入电流信号为

$$i = i_1 \exp(j\omega_1 t) + i_2 \exp(j\omega_2 t) \quad (13)$$

则输出激光信号(以 S 表示)中 $(\omega_1 \pm \omega_2)$ 频率成分和基波 $(\omega_1$ 或 $\omega_2)$ 成分之比, 用 $CSO|_{\omega_1 \pm \omega_2}$ 表示, 即

$$CSO|_{\omega_1 \pm \omega_2} = \frac{-2a + jb \frac{\omega_1 \pm \omega_2}{\omega_r} - \frac{c}{2} \left(\frac{\omega_1 \pm \omega_2}{\omega_r} \right)^2}{g(\omega_1 \pm \omega_2)} M \quad (14)$$

其中已假设 $i_1 = i_2$. 因为 $\omega_1 \approx \omega_2$, 所以输出信号中两基波成分完全相等.

三阶拍频 $(2\omega_1 \pm \omega_2)$ 成分和基波成分之比为

$$CTB|_{2\omega_1 \pm \omega_2} = \frac{[-a'' + jb'' \left(\frac{2\omega_1 \pm \omega_2}{\omega_r} \right) - c'' \left(\frac{2\omega_1 \pm \omega_2}{\omega_r} \right)^2][-a + jb \frac{\omega_1}{\omega_r} - c \left(\frac{\omega_1}{\omega_r} \right)^2]}{2g(2\omega_1 \pm \omega_2)g(2\omega_1)} M^2 \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} a'' &= 6 \left[\left(\frac{ED}{c} + 2F \right) (\Gamma A - c) - E(\Gamma B - D) \right] \frac{\bar{S}}{c}, \\ b'' &= \left[-6\Gamma \left(\frac{ED}{c} + 2F \right) + 2 \frac{E(\Gamma A - c)}{c} - 4E \right] \frac{\bar{S}}{c} \omega_r, \\ c'' &= c. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

比较(9)、(14)式可得出二阶谐波失真和复合二阶差拍失真之间的关系

$$CSO|_{\omega_1 \pm \omega_2} = 2 : 2HD|_{\frac{\omega_1 \pm \omega_2}{2}}, \quad (17)$$

$$\text{或} \quad |CSO|^2 = |2HD|^2 + 6 \text{ dB}. \quad (18)$$

三阶谐波失真与复合三阶差拍失真之间不存在(18)式那样的简单关系. 应当指出, (17)、

(18)式是在忽略四阶以上非线性效应时才严格成立。

将二阶失真和三阶失真的理论计算公式加以比较,可以发现三阶失真比二阶失真小得多.实验也证明了这一点.

3 数值计算结果

为了更好地理解上述理论计算公式,对国产异质结半导体激光器进行了数值计算,作出了几组曲线.国产半导体激光器弛豫振荡频率较低,输出功率一般为1~5 mW,因而 \bar{S} 的数值也较低.在进行数值计算时,取 $f_s = 2.25$ GHz ($\omega_s^2 = 2 \times 10^{20}/s^2$), $\bar{S} = 2 \times 10^{20}/m^3$, $\tau_s = 2 \times 10^{-12}$ s, $\tau_n = 3 \times 10^{-9}$ s, $M = 0.04$.这些参数与文献[4]设定的参数有一些差别.当然,针对具体的半导体激光器这些参数还可以改变.

图1是二阶谐波失真 $|2HD|^2$ 与频率的关系曲线.纵坐标之所以取 $|2HD|^2$ 是因为输出光强的平方正比于光电检测后所得信号的功率.从图1可见,饱和参量增大,非线性增强.不过即使 $\epsilon = 0$,非线性失真仍然很大.因此不能说非线性仅仅是由增益饱和产生的.由图1还可看出,随调制信号频率的改变,非线性也将产生很大的变化,而且在 $f = f_s/2$ 时非线性失真出现峰值.这表明,非线性和激射过程本身有关.

图2是三阶谐波失真 $|3HD|^2$ 与频率的关系曲线.从该图可见,当调制频率 $f = f_s/3$ 和 $f_s/2$ 时,三阶谐波失真都会出现峰值.

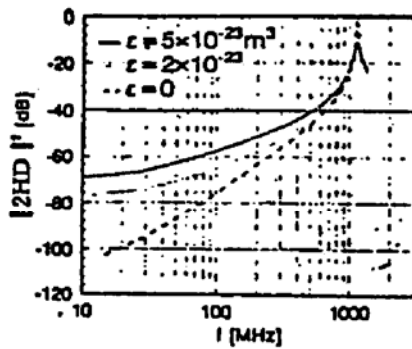


Fig. 1 Second order harmonic distortion versus frequency

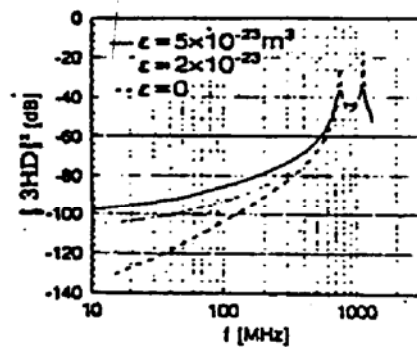


Fig. 2 Third order harmonic distortion versus frequency

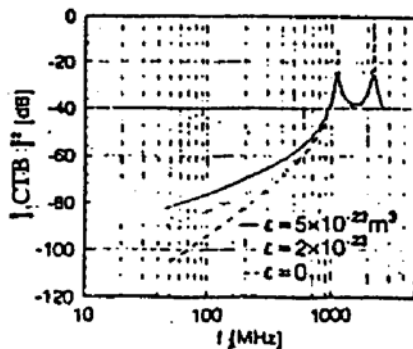


Fig. 3 Composite triple beat distortion versus frequency

图3是复合三阶差拍失真与频率的关系曲线,当调制频率 $f = 2f_1 \pm f_2$ 时分别出现一个峰值.

由于复合二阶差拍失真和二阶谐波失真的固定的关系[(17)和(18)式],故没有再给出有关 $CSO \sim f$ 的曲线.

4 实验结果

实验发现,同一种类型激光器的非线性特性差别很大.用复合差拍测量法对三只上海光

机所研制的 DH-GaAlAs(电极条形结构)半导体激光器的非线性进行了测量, 其中两只激光器的阈值电流较低(70 mA), 输出功率较大(出纤功率大于 1 mW), 它们的线性较好, 仅当输入信号很大(100 mV 左右)时才能观察到差拍信号. 另一只激光器的阈值电流 100 mA 左右, 出纤功率小于 1 mW, 其非线性较大. 图 4 是由该器件测量得到的 $|CSO|^2$ 和输入电压峰峰值 V_m 的关系. 从线性驱动电路估计, 当 $V_m = 80$ mV 时, $M \approx 0.4$. 测量时, 输入两个频率为 202 MHz 和 210 MHz 的等幅信号, 分别测量基波信号和 8 MHz 的差拍信号, 最后确定出 $|CSO|^2$. 激光器与光电探测器之间用 1 km 长光纤相联结, 因此测量到的 CSO 是整个系统的非线性失真, 以激光器为主, 但还包括光纤、PIN 光电二极管和前置放大器等的影 响. 由于该激光器阈值高、功率小, 因而 \bar{S} 和 f_c 较小. 取 $\bar{S} = 0.5 \times 10^{20} / \text{m}^3$, $f_c = 1.25$ GHz, 则可计算出 $|CSO|^2 \sim M$ 的关系曲线, 如图 5 所示. 比较图 4 与图 5 可见, 两者的变化规律是一致的. 不过由于图 4 的曲线还包括光纤、PIN 光电二极管和前置放大器的影响, 故图 4 中 $|CSO|^2$ 的数值较图 5 中对应的数值略大一些. 由于光纤较短(1 km), 影响不大, PIN 光电二极管的输入光功率小于 0.1 mW, 工作在线性区, 故三者中影响较大的是前置放大器. 当输入信号较大时, 前置放大器的非线性较严重. 图 4 中, $V_m > 60$ mV 时, 与理论值差别较大(约 10 dB). 另外, 图 4、图 5 验证了本文所导出的理论公式的正确性和用来解释具体器件非线性的实用价值.

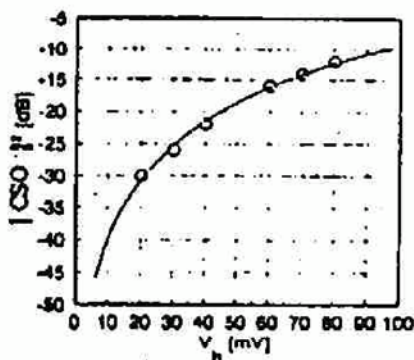


Fig. 4 Measured composite second order distortion

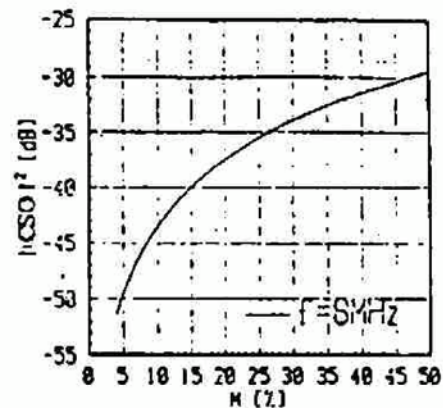


Fig. 5 Composite second order distortion versus modulation index

从图 1、图 2 和图 3 可见, 三阶非线性比二阶非线性小很多, 实验也验证了这一点. 用高灵敏度频谱仪(TEK2710; 10 kHz~1.8 GHz; -119 dBm~127 dBm₀)进行测量, 没有观察到三阶差拍 ($2\omega_1 \pm \omega_2$) 信号. 图 6 是用非线性很强的那只器件拍摄到的输出信号频谱. 这时输入信号很大. 二阶非线性拍频很强. 但是, 即使是在这种工作条件下, 也未观察到三阶拍频信号. 说明三阶拍频信号电平在 -119 dBm 以下. 这一点同前面的理论计算公式及曲线是一致的. 图 6 中 b、c 分别为 208 MHz 和 216 MHz 基波信号, a 为 8 MHz 差拍信号.

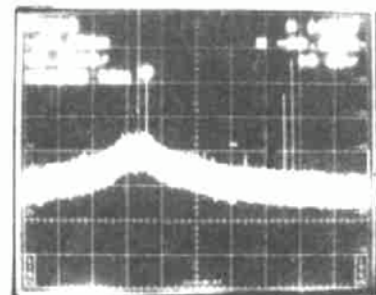


Fig. 6 Spectrum of signal and second order distortion

结 论 直接求解半导体激光器的速率方程, 得出了计算二阶和三阶失真的理论公式. 实验

研究结果验证了这些理论公式. 理论和实验结果可为光纤系统设计提供必要的依据, 也可供改进国产半导体激光器时参考.

参 考 文 献

- [1] K. Y. Lau, A. Yariv, Intermodulation distortion in a directly modulated semiconductor injection lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(10) : 1034~1036
- [2] T. E. Darcie *et al.*, Intermodulation and harmonic distortion in InGaAsP lasers. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(16) : 665~666
- [3] S. J. Wang *et al.*, Intermodulation and harmonic distortion in GaInAsP DFB lasers. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(13) : 850~852
- [4] L. Y. Kao, Fundamental second-order nonlinear distortions in analog AM CATV transport system based on single frequency semiconductor lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(2) : 235~243
- [5] T. E. Darcie, Lightwave subcarrier transmission system. *IEEE Trans. Microwave Theory & Technology*, 1990, **MTT-38**(5) : 524~533

Theoretical and Experimental Study of Nonlinear Distortion in Semiconductor Lasers

Zhan Yushu Wang He Gao Zhihui

(Department of Applied Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

Zhan Daoyong Zhang Wei Shen Danxun

(Department of Information Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

(Received 14 July 1993; revised 21 November 1993)

Abstract Nonlinear distortion in semiconductor lasers has been analysed theoretically and the Formulas and characteristics of second order and third order distortion are obtained. The theoretical results are proven by experiments. It is also shown that the second order distortion in home-made DH-GaAlAs semiconductor lasers is serious, but the distortion over third order is negligible.

Key words semiconductor lasers, nonlinear distortion.