

有线电视系统中行波式半导体激光放大器 功率特性研究*

陈建国 吴正茂** 夏光琼** 卢玉村

(四川大学光电系, 成都 610064)

摘 要 根据行波式半导体激光放大器的特点, 可用输入功率的台劳级数表示放大器的输出功率, 只要求出级数各阶导数就可以方便地计算在多路有线电视(CATV)系统中放大器引起的失真。文中给出放大器的速率方程组的解, 并在此基础上导出理想放大器的前三阶导数的解析表达式。

关键词 行波式半导体激光放大器, 输出特性, 互调失真。

光波技术的发展, 为半导体激光放大器提供了广阔的应用前景^[1~3]。在有线电视传输系统中, 不但对半导体激光器的线性特性提出了极高的要求^[4], 也对行波式半导体激光放大器提出了一定的要求。在半导体有源器件中, 由于光与载流子的相互作用, 使器件的输出具有非线性特征。在行波式半导体激光放大器中, 由于多路光信号的存在将使得载流子受到调制, 从而引起互调失真^[1]。在半导体激光器中, 多路电信号的调制也将引起二阶和三阶失真^[4]。

当调制频率比半导体激光器的共振频率 f (通常为若干京赫) 低得多的情况下, Lipson 等人^[4]曾用电流的台劳级数来表示激光器的输出功率, 从而把求复合二阶和复合三阶拍失真归结为求输出功率 P 对偏置电流 I 的二阶和三阶导数, 即 d^2P/dI^2 和 d^3P/dI^3 。通过求解半导体激光器的速率方程组, 可以求得这两个导数。

对于行波式半导体激光放大器, 由于调制往往不是来源于电流, 而是源于多路光信号的存在, 因而可以用输入功率 P_{in} 的台劳级数来表示输出功率 P_{out} , 即:

$$P_{out} = P_{out}(P_b) + \sum_{k=1}^{\infty} (d^k P_{out}/dP_{in}^k) (P_{in} - P_b)^k / k! \quad (1)$$

式中 P_b 为 P_{in} 的直流部分, 当行波式半导体激光放大器输入的直流光功率为 P_b 时, 其输出功率为 $P_{out}(P_b)$ 。只要用速率方程求得了 P_{out} 对 P_{in} 的一至三阶导数, 就可以求得行波式半导体激光放大器的输出信号功率以及二阶和三阶失真。在本文中, 按照这个思路, 求得了行波式半导体激光放大器速率方程组的隐式解析解, 并在此基础上导出了理想放大器的输出功率对输入功率的一阶至三阶导数。

* 国家教委留学回国人员基金资助项目。

** 现工作单位: 西南师范大学物理系, 重庆 630715。

收稿日期: 1994年6月25日

1 行波式半导体激光放大器的特性分析

一般而言,虽然输入放大器的多路视频信号所占的频带范围可达几百兆赫,然而仍远小于行波式半导体激光放大器的模式宽度。在这种情况下,可以用单模速率方程组来处理,于是对直流偏置的放大器有:

$$I/eV - N/\tau - au(N - N_0)[F^+(x) + F^-(x)] = 0 \quad (2)$$

$$\pm (dF^\pm/dx) = a\Gamma(N - N_0)F^\pm - \alpha F^\pm \quad (3)$$

式中, I 为偏置电流, e 为电子电荷(绝对值), V 为有源层体积, τ 为载流子寿命, a 为微分增益系数, u 为介质中光速, Γ 为限制因子, α 为吸收系数, N_0 为透明载流子密度, N 为腔内载流子密度, $F^+(x)$ 和 $F^-(x)$ 分别为沿 $+x$ 和 $-x$ 方向传播的光子数密度。设行波式半导体激光放大器的腔长为 L , $x = 0$ 为输入端, $x = L$ 为输出端,两端的反射率分别为 R_1 和 R_2 ,那么行波式半导体激光放大器输出的信号功率 P_{out} 应正比于 $F^+(L)$ 。

对于理想的行波式半导体激光放大器,并不需要考虑 $F^-(x)$ 。在实际的系统中,放大器两端不可避免地还存在着剩余反射,而且系统中其它地方还可能引入附加的反射^[1]。不过,只要输出端反射率 R_2 足够小以至于 $R_2 F^+(L)$ 降到与自发辐射差不多的水平,(1)和(2)式中的 $F^-(x)$ 还是可以忽略的。在这种情况下,令:

$$\varphi = au\tau F^+(L), \quad I\tau/(eV) = N_s, \quad a\Gamma(N_s - N_0)/\alpha = g. \quad (4)$$

并把(4)式代入(2)式中可以求得:

$$\ln(\varphi/\psi) - g \ln[(g-1-\varphi)/(g-1-\psi)] = (g-1)\alpha L.$$

式中 ψ 与输入信号光子数密度 S 的关系式为:

$$\psi = au\tau S. \quad (6)$$

对于准行波放大器,情况要复杂些,此时需考虑 $F^-(x)$ 。由(2)式可以证明, $F^+(x)$ 与 $F^-(x)$ 的乘积为常数,令

$$D^2 = (au\tau)^2 F^+(x)F^-(x) \quad (7)$$

按照 Chen 等人^[5]处理方法,并考虑此时输入端的边界条件为:

$$F^+(0) = S + R_1 F^-(0). \quad (8)$$

对于理想的行波式半导体激光放大器, $F^-(0)$ 等于 S 。考虑到(7)式可以求得:

$$au\tau F^+(0) = [\sqrt{\psi^2 + 4R_1 D^2} - \psi]/2 \equiv \psi_0. \quad (9)$$

$$\text{最后有: } \ln(\varphi/\psi_0) - \frac{g}{\sqrt{(g-1)^2 - 4D^2}} \ln \left[\frac{(\varphi - \theta_1)(\psi_0 - \theta_2)}{(\varphi - \theta_2)(\psi_0 - \theta_1)} \right] + \alpha L = 0. \quad (10)$$

式中, θ_1 和 θ_2 定义和常数 D 则由下式求得:

$$\theta_{1,2} = [(g-1) \pm \sqrt{(g-1)^2 - 4D^2}]/2, \quad (11)$$

$$\alpha L + \ln(r_1 r_2) + [g/\sqrt{(g-1)^2 - 4D^2}] \times \ln \left[\frac{2D(r_1 + r_2) - (1 - r_1 r_2) \sqrt{(g-1)^2 - 4D^2} + (1 + r_1 r_2)(g-1)}{2D(r_1 + r_2) + (1 - r_1 r_2) \sqrt{(g-1)^2 - 4D^2} + (1 + r_1 r_2)(g-1)} \right] = 0. \quad (12)$$

式中, $r_1^2 = R_1$, $r_2^2 = R_2$, 分别为放大器两端剩余反射率。对于给定运行参数的准行波放大器,可以由(12)求出 D (它与输入无关),然后根据已知的 ψ 通过(9)式确定 ψ_0 ,最后由(10)式可求出 φ 对 ψ 的依赖关系。

2 输出对输入的各阶导数

由(5)式,可以求出理想的行波式半导体激光放大器的输出功率 P_{out} 对输入功率 P_{in} 的各阶导数,其中前三阶导数为:

$$\left. \begin{aligned} dP_{out}/dP_{in} &= U_0/W_0, & d^2P_{out}/dP_{in}^2 &= q(U_1/W_0 - U_0^2W_1/W_0^2), \\ d^3P_{out}/dP_{in}^3 &= q^2(U_2/W_0 - 3U_0U_1W_1/W_0^2 - U_0^3W_2/W_0^3 + 3U_0^2W_1^2/W_0^2). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= 1/\psi_b + (g+1)/(g-\psi_b), & W_0 &= 1/\varphi_b + (g+1)/(g-\varphi_b), \\ U_1 &= -1/\psi_b^2 + (g+1)/(g-\psi_b)^2, & W_1 &= -1/\varphi_b^2 + (g+1)/(g-\varphi_b)^2, \\ U_2 &= 2/\psi_b^3 + 2(g+1)/(g-\psi_b)^3, & W_2 &= 2/\varphi_b^3 + 2(g+1)/(g-\varphi_b)^3 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 q 为比例常数,对于给定的行波式半导体激光放大器,只要知道了输入信号的直流部分,就可求得 ψ_b ,然后可由(5)式找到 φ_b ,于是结合(12)式和(13)式就可以求出放大器的输出功率的前三阶导数。

假设放大器的输入信号取如下形式:

$$P_{in} = P_b \left[1 + \sum_{j=1}^J m_j \cos(\omega_j t + \theta_j) \right]$$

其中 m_j 、 ω_j 和 θ_j 分别为第 j 个信道的调制度、角频率和位相,正整数 J 为信道的个数。把(15)式代入(1)式,可得到:

$$P_{out} = P_{out}(P_b) + \sum_{k=1}^{\infty} (d^k P_{out}/dP_{in}^k) [P_b \sum_{j=1}^J m_j \cos(\omega_j t + \theta_j)]^k / k! \quad (16)$$

利用上式,放大器引起的各阶失真就可以计算出来了。

输入放大器的多道信号通常比(15)式复杂,例如输入信号是由多路电信号调制的半导体激光器产生的, P_b 由激光器的直流偏置电流决定,由于激光器本身的非线性特征也会引起各种失真^[1]。此处,为了突出放大器的影响,因而把放大器的输入信号写成了(15)式的形式。

用以下参数,计算了一个具体放大器的输出功率对输入功率的各阶导数。 $a = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $L = 0.04 \text{ cm}$, $V = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^3$, $\Gamma = 0.3$, $N_0 = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\tau = 2 \text{ ns}$, $u = 7.5 \times 10^9 \text{ cm/s}$, $\alpha = 25 \text{ cm}^{-1}$ 。在图1中,给出了当放大器注入载流子密度 N_i 分别为 2×10^{18} 和 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时 dP_{out}/dP_{in} 随输入功率变化的曲线。由该曲线可以判断 P_{out} 随 P_{in} 的增大而增大。随 P_{in} 的增大,放大器出现饱和,因而信号增益逐渐下降,从而引起一阶导数呈下降趋势,这与对放大器的研究结果是一致的。

图2为 $|d^2P_{out}/dP_{in}^2|$ 随 P_{in} 的变化曲线,所用参数与图1相同。注意二阶导数是负的,反映 P_{out} 随 P_{in} 变化曲线是一条上凸曲线。由于饱和效应,使得在输入功率较大时,二阶导数的绝对值较小。

图3为三阶导数的变化情况,参数与图1相同。三阶导数是正的。总的来说, P_{out} 对 P_{in} 的前三阶导数变化趋势相同,只不过阶数越高,绝对值越大。一般而言,量 $(P_b^k)(d^k P_{out}/dP_{in}^k)$ 随 k 的增大而下降,但收敛并不十分迅速。决定(16)式收敛的另一个重要因素是调制度 m_j ,因为有线电视系统中各信道的调制度 m_j 通常都远小于1。在信号个数 J 较大的情况下,虽然两个信号或三个信号组合的某一频率产物 $(\omega_i - \omega_j)$ 或 $(\omega_i + \omega_j - \omega_k)$ 本身也许并不太大,然而产物

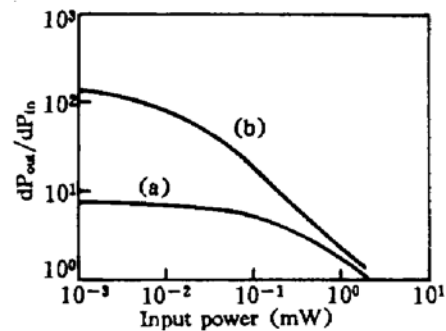


Fig. 1 Dependence of dP_{out}/dP_{in} on P_{in} for amplifier with (a) $N_i = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and (b) $N_i = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

的个数却与 J 的平方或立方成正比^[6], 这就有可能造成较为严重的失真, 这是一个在有线电视传输系统中使用行波式半导体激光放大器时应该注意的问题。

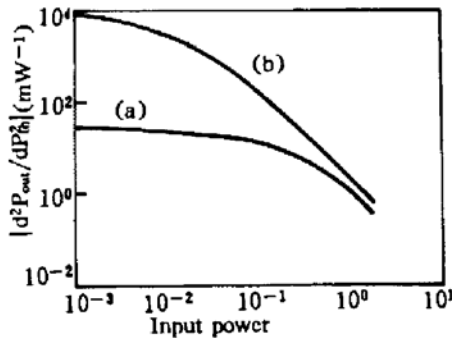


Fig. 2 Variation of $|d^2P_{out}/dP_{in}^2|$ with P_{in} for amplifier biased at (a) $N_d = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and (b) $N_d = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

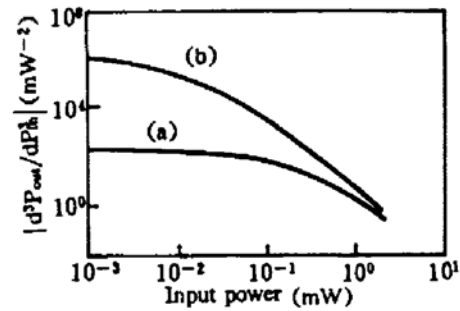


Fig. 3 Dependence of d^3P_{out}/dP_{in}^3 on P_{in} for amplifier with (a) $N_d = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, and (b) $N_d = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

结 论 根据半导体激光放大器的特点, 可以用输入功率的台劳级数来表示其输出功率。通过求解放大器的速率方程组, 可以求出台劳级数中所包含的各阶导数, 文中给出了理想行波式半导体激光放大器的前三阶导数的解析表达式。利用这些结果, 可以方便的求出在有线电视系统中行波式半导体激光放大器所引起的复合二阶和复合三阶拍失真。根据典型的放大器参数, 具体计算了前三阶导数。计算结果表明, 如果要在有线电视传输系统中使用行波式半导体激光放大器的话, 从失真的角度来看信道的个数是要受到一定限制的。

参 考 文 献

- [1] W. I. Way, C. Zah, T. Lee. Application of travelling-wave laser amplifiers in subcarrier multiplexed lightwave systems. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1990, **38**(5): 534~545
- [2] T. Durhuus, B. Mikkelsen, K. E. Stubkjaer. Detailed dynamic model for semiconductor optical amplifiers and intermodulation distortion. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(8): 1056~1065
- [3] M. A. Ali, A. F. Elrefaie, H. Issa *et al.*, High-speed optical time-division demultiplex using semiconductor optical amplifiers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(11): 1735~1742
- [4] J. Lipson, L. C. Upadhyayula, S. Huang *et al.*, High-fidelity lightwave transmission of multiple AM-VSB NTSC signals. *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, 1990, **38**(5): 483~492
- [5] Jianguo Chen, Dayi Li, Yucun Lu. Experiment and theoretical studies on monitored signals from semiconductor diodes undergoing antireflection coatings. *Appl. Opt.*, 1991, **30**(31): 4554~4559
- [6] T. E. Darcie, R. M. Jopson, R. W. Tkach. Intermodulation distortion in optical amplifiers from carrier-density modulation. *Electron. Lett.*, 1987, **23**(25): 1392~1394

Output Power Characteristics of Travelling-Wave Semiconductor Laser Amplifiers Adopted in CATV Transmission Systems

Chen Jianguo Wu Zhengmao Xia Guangqiong Lu Yucun

(*Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu, 610064*)

(Received 25 June 1994)

Abstract In order to calculate the distortions induced by the travelling-wave semiconductor laser amplifiers after the multi-channel CATV signals passing through them, the output power P_{out} of the amplifier can be represented with the Taylor series of the input power P_{in} . By finding out the solutions to the rate equations of the amplifiers, the analytical expressions of the derivatives, up to the third order, of P_{out} with respect to P_{in} have been deduced.

Key words travelling-wave semiconductor laser amplifier, output characteristics, intermodulation distortion

《中国光学学会科技奖》条例

第一条:为促进我国光学科技事业的发展,激励我国从事光学、应用光学、光学工程等科技工作的中、青年科技人员奋发向上,创新进取,中国科学院院士、中国工程院院士王大珩教授出资在中国科学技术发展基金会设立基金,以其一部分用于《中国光学学会科技奖》的颁发和评选。

第二条:中国光学学会负责《中国光学学会科技奖》的管理和颁发工作。

第三条:《中国光学学会科技奖》设奖范围有两种

1. 全国范围:每两年评选一次,每次 2 名,奖金 10000 元

2. 高校学生:在第七条所列 10 所高等院校(以后视具体情况可作调整)中,每年评选一次,原则上每校每年 1 名,奖金 1500 元

第四条:评选条件:

1. 全国范围奖金:年龄 50 岁以下的中国科技人员,热爱祖国,学风正派,在光学、应用光学有关学科的研究有创新与发展,在国外刊物发表过高水平学术论文或在光学工程技术上有突破性创造,取得明显的经济效益和社会效益。

2. 高校奖学金:热爱祖国,品德端正,身心健康,学习成绩优异,有创新、进取、合群精神,有志为中国光学事业做出贡献,年龄 35 岁以下。

第五条:申报办法

1. 全国范围:申报评选工作从 1996 年开始。由两位不同单位的教授级专家推荐,连同申请书及单位审查推荐材料一式七份于当年 10 月 1 日前寄交《中国光学学会科技奖》全国评选小组办事机构,由全国评选小组进行评选,于年底前公布评选结果并颁发证书和奖金。

2. 高校学生:申报评选工作从 1996 年开始,学校推荐,每年 10 月 1 日前由所在院校的评选小组进行评选申报,并将评选结果及评选材料一式七份报《中国光学学会科技奖》全国评选小组,汇总后由全国评选小组评定(如认为不合格,可不颁发),在年底前公布评选结果,并颁发证书和奖金。

第六条:全国评选小组的组成(包括其办事机构)及各院校的评选小组组长由中国光学学会常务理事会确定。

第一届全国评选小组由下列人员组成:

组长:母国光

成员:干福熹 王之江 邓锡铭 刘颂豪 陈星旦

全国评选小组受中国光学学会领导,并对中国光学学会常务理事会报告工作,其评选过程中所需的必要经费从基金中支付。

第七条:各校的评选小组分别由下列人员任组长,由他们确定各校的评选小组的组成。

北京 大学 王国文 清华 大学 金国藩 南开 大学 母国光

天津 大学 张以谟 浙江 大学 唐晋发 北京 理工 大学 王 越

长春 光机 学院 沈 柯 重庆 大学 黄尚廉 华中 理工 大学 李再光

南京 理工 大学 张保民

第八条:本条例根据具体情况可进行修订,解释及修改权属中国光学学会常务理事会。

第九条:第一届《中国光学学会科技奖》全国评选小组办事机构设在天津南开大学现代光学研究所

联系人:战元龄 邮 编:300071 电 话:(022)3502275 传 真:(022)3502974