

文章编号: 0258-7025(2004)11-1301-04

半导体激光器调制特性的 神经网络仿真

李九生, 鲍振武

(天津大学电信学院, 天津 300072)

摘要 对半导体激光器调制特性进行了理论分析,通过研究半导体激光器调制特性的速率方程,推导了调制特性的解析表达式。用广义回归神经网络建立了激光器调制特性的神经网络模型,通过训练好的神经网络模型对激光器调制特性进行了深入分析,并对激光器结构进行了仿真设计。模型输出结果与理论分析的结果相吻合,且该方法具有速度快、精度高、重复性好等优点。研究表明,利用神经网络模型可以对半导体激光器性能进行分析,并确定半导体激光器的一些结构尺寸。

关键词 激光技术;半导体激光器;调制特性;神经网络

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Artificial Neural Network Modeling of the Modulation Characteristics of Semiconductor Laser

LI Jiu-sheng, BAO Zhen-wu

(School of Electronic & Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Elaborate theory analysis has been done for the modulation characteristics of semiconductor laser and analytical expression has been deduced through the research of rate equation of semiconductor laser. By using the general regression neural network, a neural network model of the modulation characteristics of semiconductor laser is developed. Then, the modulation characteristics of semiconductor laser are analyzed and a semiconductor laser is designed through the trained neural network model. The simulation results are well agreed with the theoretical analysis results. Furthermore, this method has the advantages of high speed, high accuracy, good repeatability, etc. The results of research show that the characteristics of semiconductor laser can be analyzed and the some dimensions of semiconductor laser structure can be obtained using the neural network model.

Key words laser technique; semiconductor laser; modulation characteristics; artificial neural network

1 引言

半导体激光器是光纤通信中重要的光源,其性能的优劣将直接影响到光通信系统性能的好坏。而且在高速光纤传输系统中,激光器调制特性极大地影响着系统性能。随着光网络规模日益扩大和复杂性的加剧,对光网络的自动模拟设计与分析愈显重要,而建立各种光电子器件模型是对光网络计算机

辅助设计的关键技术之一。因此,对光源调制特性的模拟倍受重视。在研究半导体激光器的众多理论模型中,速率方程是应用最广泛的。由于速率方程组是一组非线性方程,所以不存在普遍适用形式的解析解。然而,在某些情况下,采用合理的近似,还是可以找出速率方程的隐式或显式解析解,并用它对半导体激光器的调制特性进行建模仿真^[1~4]。

本文在 CAD 设计基础上提出利用人工神经网络

收稿日期:2003-06-16;收到修改稿日期:2003-11-25

基金项目:天津大学 2002 优博基金(JJ0225)资助项目。

作者简介:李九生(1976—),男,桂林市人,天津大学电信学院博士研究生,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail: shengjiuli@163.com

络(ANN)技术对激光器进行指导设计和优化的新方法。其主要思路是利用人工神经网络技术建立网络模型,通过网络模型的学习、训练和仿真,实现对激光器的快速辅助设计。由速率方程推导出调制特性的理论表达式,并将神经网络仿真模拟结果与理论结果进行了比对,二者吻合很好。

2 理论分析

用小振幅信号调制半导体激光器的驱动电流时,不仅振幅而且谐振光频率也被调制。这是由于随着注入有源层的电流变化,有源层折射率发生微小变化的缘故,驱动电流变化量对应的频率调制漂移量是根据半导体激光器和材料而变化的。因此半导体激光器的直接调制特性在振幅调制的基础上还要叠加由寄生阻抗产生的频率响应,才是真正的直接调制。描述半导体激光器特性的简化速率方程如下^[1,5~7]

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - G\Gamma S - \frac{N}{\tau_S} \\ \frac{dS}{dt} = G\Gamma S - \frac{S}{\tau_P} + \frac{\beta_{SP}}{\tau_S} \end{cases} \quad (1)$$

式中 J 为驱动电流密度, d 为有源层厚度, τ_P 和 τ_S 分别为谐振腔中光子寿命和载流子寿命, G 为光子密度的增益系数, N 为载流子密度, S 为光子密度, Γ 为光限制因子, β_{SP} 表示在半导体激光器内辐射的所有自发辐射光中,有多少光与谐振腔耦合的参数,称作自发辐射光系数。(1) 式为非线性微分方程,无法直接通过解析方法求解 N 和 S 。由于是小信号直接调制,为此 S 和 N 可以分别作为直流分量和微小调制分量之和, $S = S_0 + S_m \exp(j\omega t)$, $N = N_0 + N_m \exp(j\omega t)$ 。对微小信号直接调制的调制振幅定义为 $M(f) = |S_m(f)/S_m(f=0)|$, 经过推导得到

$$M(f) = \frac{f_r^2}{[(f_r^2 - f^2)^2 + f^2 (\alpha/2\pi)^2]^{1/2}} \quad (2)$$

式中 f 为调制频率, $\alpha = \Gamma\eta S_0 + 1/\tau_S$, f_r 为张弛振荡频率, $f_r = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{2n}{c} \times \frac{\Gamma\eta}{h\gamma \ln(1/r) W d \tau_P} P_{out} \right]^{1/2}$, 其中 $\tau_P^{-1} = (c/n) \times [\alpha_i + (1/L) \times \ln(1/r)]$, n 为半导体晶体的折射率, r 为端面的反射系数, α_i 为吸收系数, L, W 分别为激光器腔长、有源层的宽度, η 为微分增益。经推导得到半导体激光器调制的频率响应

$$A(f) = \left\{ \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{f}{f_0} Q \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (3)$$

式中 $f_0 = \omega_0/2\pi$, $\omega_0 = [(50 + r)/L_0 RC]^{1/2}$, $Q =$

$[L_0 RC(50 + R)]^{1/2}/(L_0 + 50RC)$ 。其中 L_0, R, C 分别为半导体激光器的等效电感、电阻和电容值,依赖于半导体激光器的类型、封装和布线,在理论上难以求出这些数值,通常需要实测。半导体激光器的实际直接调制特性 $B(f)$ 为 $M(f)$ 和 $A(f)$ 之积,则有

$$B(f) = M(f) \times A(f) = f_r^2 / \left\{ \left[(f_r^2 - f^2)^2 + f^2 \left(\frac{\alpha}{2\pi} \right)^2 \right] \times \left[1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{f}{f_0} Q \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad (4)$$

经过理论分析,通过(4)式得到半导体激光器的结构参数对其调制特性起到决定作用。为了方便理论分析和仿真,半导体激光器各参数的取值如表 1 所示。半导体激光器的调制特性理论分析的计算结果如图 1~3 所示。

表 1 半导体激光器各参数的取值

Table 1 Values of semiconductor laser parameters

Parameter	Value	Parameter	Value
$L/\mu\text{m}$	300	n	3.3
$W/\mu\text{m}$	5	R_0	0.3
$d/\mu\text{m}$	0.05	Γ	0.5
λ/nm	1550	$h/(\text{J} \cdot \text{s})$	6.626×10^{-27}
P_{out}/mW	5	α_i/cm^{-1}	10
α/s^{-1}	10^{10}	$c/(\text{m/s})$	3×10^8
η/cm^3	3×10^{-6}	Q	0.5
L_0/nH	1	R/Ω	3
C/pF	4	f_0/GHz	10.6

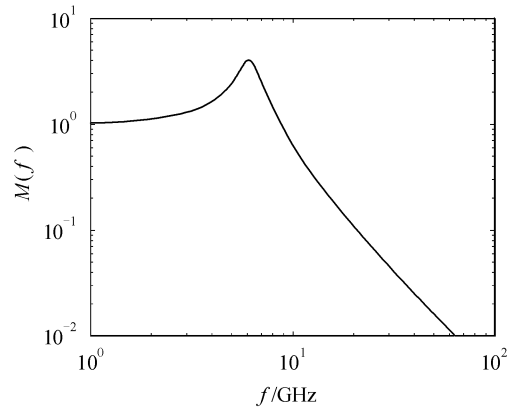


图 1 调制光振幅响应特性 $M(f)$

Fig. 1 Light amplitude response characteristics $M(f)$

3 激光器调制特性神经网络模型

采用广义回归神经网络模型对半导体激光器的调制特性进行仿真。该模型是一种规则化的径向基函数网络,其结构如图 4 所示。神经网络由三层组

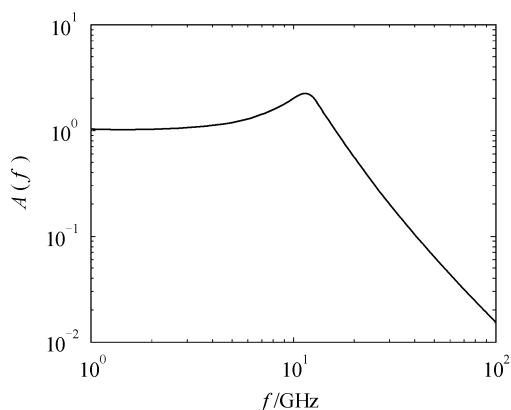
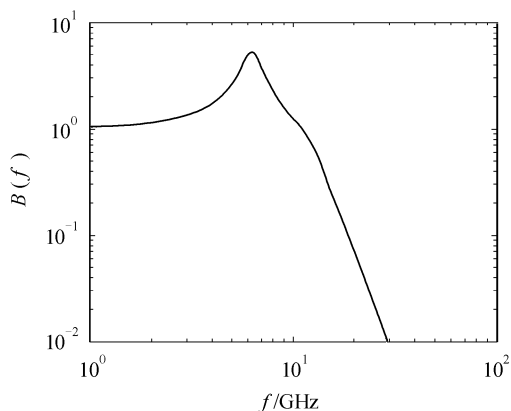
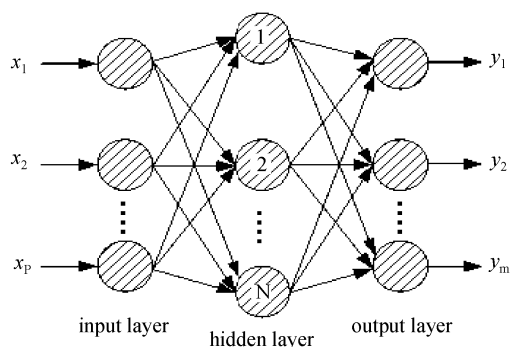
图 2 调制电频率响应特性 $A(f)$ Fig. 2 Electrical frequency response characteristics $A(f)$ 图 3 直接调制特性 $B(f)$ Fig. 3 Modulation characteristics $B(f)$ 

图 4 广义回归神经网络结构

Fig. 4 Structure of generalized regression neural network

成,第一层为输入层,中间层是隐层,第三层为输出层。广义回归神经网络的隐层和输出层的神经元个数均与输入样本矢量的个数相同,其输出层是特殊线性层。它常用于解决函数逼近问题,当隐层神经元足够多时,该网络能够以任意精度逼近一个平滑函数^[8]。

隐层节点中的作用函数(基函数)对输入信号将

在局部产生响应,也就是说,当输入信号靠近基函数的中央范围时,隐层节点将产生较大的输出,由此看出这种网络具有局部逼近能力。作为基函数的形式,隐层最常用的是高斯函数

$$\varphi_i(x) = \exp\left[-\frac{\|x - c_i\|^2}{2\sigma_i^2}\right], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

其中 x 为 n 维输入向量; c_i 为第 i 个基函数的中心,与 x 具有相同的维数的向量; σ_i 为第 i 个感知的变量(可以自由选择参数),它决定了基函数围绕中心点的宽度; N 为感知单元的个数。

利用上述神经网络对表 1 所示的半导体激光器的调制特性进行建模模拟,对直接调制特性 $B(f)$ 的广义回归神经网络仿真结果如图 5 所示,图中 * 为理论值,实线为神经网络仿真值。从图可以看出神经网络仿真的结果与理论分析的结果吻合得很好,与文献[5]一致,误差小于 1%。

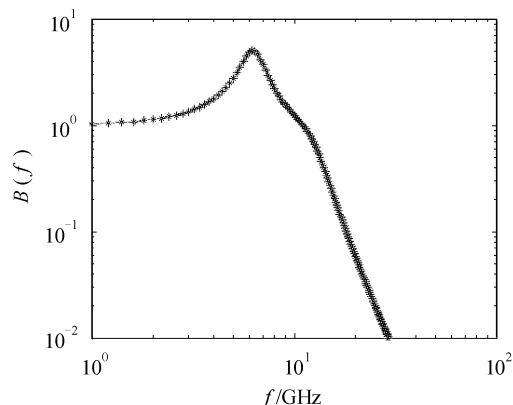


图 5 利用直接调制特性神经网络模型的仿真结果

Fig. 5 Result of modulation characteristics ANN simulation

4 有源层厚度 d 的设计实例

研究半导体激光器的调制特性神经网络模拟仿真的目的不仅是对调制特性进行仿真描述,掌握其特点,更重要的是为半导体激光器的结构参数设计提供一种简单而快捷的设计方法。这里给出一个设计实例。由于半导体激光器调制特性与其结构参数有密切的关系,利用神经网络对其进行仿真,结果如图 6,7 所示。图 6 表示半导体激光器的调制特性 $B(f)$ 与调制频率 f 和有源层厚度 d 关系的三维仿真描述。图 7(a)表示调制频率从低到高,即 $f = 6, 9, 13, 13.7$ GHz 等较低频率下调制特性 $B(f)$ 与 d 的关系。图 7(b)为 $f = 14, 15, 20$ GHz 等较高频率

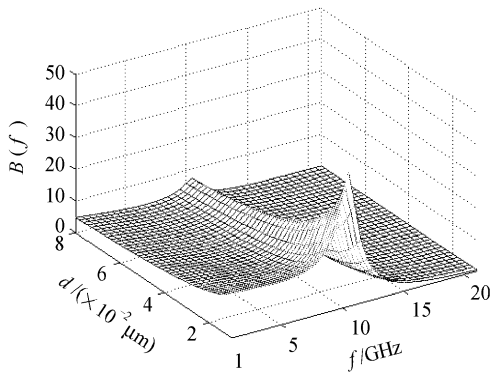


图 6 半导体激光器的 $B(f)$ 与 f 及 d 关系的人工神经网络仿真

Fig. 6 ANN simulation of relations among $B(f)$, f and d

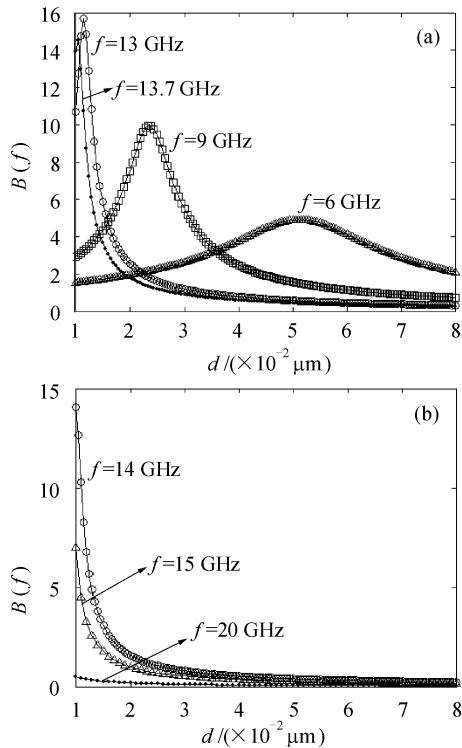


图 7 低调制频率(a)和高调制频率(b)下 d 与 $B(f)$ 的仿真

Fig. 7 Simulation of relations between d and $B(f)$ in low frequency (a) and high frequency (b)

下调制特性 $B(f)$ 与 d 的关系。由图 7(a)可见,当调制频率 $f < 14$ GHz 时,调制特性与有源层厚度的关系是 $B(f)$ 先随着 d 增加而增大,当达到最大值后, $B(f)$ 随着 d 增加反而减小。如图 7(b)所示,当 $f \geq 14$ GHz 时, $B(f)$ 随着 d 增加而减小。因此在设计激光器时,在低的调制频率下,有源层厚度 d 的取值有一最佳值点;在高的调制频率下,有源层厚度 d

取值由设计激光器所需的调制特性决定, d 值过大将得不到所需的调制特性。

可以利用神经网络仿真对半导体激光器结构参数进行指导性设计。例如当取调制频率 $f = 9$ GHz 时,激光器的仿真调制特性优化设计结果如图 7(a)所示, $B(f) = 9.96$, $d = 0.023 \mu\text{m}$,激光器将获得最佳的调制特性,但若这样的激光器工作在 $f = 15$ GHz 的调制频率下,其调制特性 $B(f) = 0.785$,如图 7(b)所示,处于非最优化工作状态,将使器件性能下降(如噪声增加,调制特性下降)。

同样,神经网络仿真方法还可以对激光器的腔长 L 和有源层的宽度 W 进行优化设计。通过调制特性可以从图中得到半导体激光器的一些结构参数,对半导体激光器的设计有指导意义。

5 结 论

对半导体激光器的调制特性进行了分析与研究,建立了神经网络模型,用此模型对调制特性进行了深入分析。通过对激光器调制特性的分析与仿真,模型的分析结果与已报道的理论和实验一致。利用神经网络可以对半导体激光器进行多种性能的分析,可以确定一些半导体激光器结构参数,对激光器的设计和应用具有指导意义。

参 考 文 献

- Zhu Depeng, Wang Zhuoran, Yu Jinlong *et al.*. Extraction of the parameters of 2.5 GHz DFB-LD based on the measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(6):485~488
朱德鹏,王卓然,余晋龙等. 2.5 GHz 分布反馈激光器内部参数的实验测量[J]. *中国激光*, 2003, **30**(6):485~488
- J. C. Cartledge, R. C. Srinivasan. Extraction of DFB laser rate equation parameters for system simulation purposes [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(5):852~860
- L. Ramunno, J. E. Sipe. Dynamical model of directly modulated semiconductor laser diodes [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 1999, **35**(4):624~634
- B. J. Theodrez, C. H. Lee. A reassessment of standard rate equations for low facet reflectivity semiconductor lasers using traveling wave rate equations [J]. *IEEE Quantum Electron.*, 1992, **28**(12):2706~2713
- Fujilou Sato. *Superspeed Optic Device* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 24~129
斋藤富士朗. 超高速光器件[M]. 北京:科学出版社, 2002. 24~129
- Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd^{3+} :YAG microchip laser and its stability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12):1465~1469
欧攀,闫平,巩马理等. 激光二极管抽运的被动调 Q Nd^{3+} :YAG 微晶片激光器及其稳定性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12):1465~1469
- Wang Chunlin, Wu Jian, Lin Jintong. Theoretical study of laser diodes with double optical feedbacks [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(4):228~230
- S. Chen, C. F. N. Cowen, P. M. Grrant. Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1991, **2**(2):302~309