

# Fabry-Perot 半导体激光器的 PSPICE 宏模型

杨静波 ,王鸣

( 南京师范大学物理科学与技术学院 210097 ,江苏 ,南京 )

[ 摘要 ] 建立了一个 FP 半导体激光器( LD )的电路模型 ,该模型使 FP-LD 的调制响应特性以及与其相关的电子电路特性可统一地通过通用电路分析软件( 如 PSPICE )来分析和计算. 该模型的建立以 LD 的速率方程为基础 ,将速率方程表征为由线性电路元件组成的等效电路模型 ,考虑到该模型的适用性 ,将其改进为以激光器的输出功率为参量的电路模型. 然后运用 PSPICE 软件对该模型进行构造 ,建立了 FP-LD 的 PSPICE 子电路 ,运行调制电路可以得到 LD 的脉冲调制响应特性与频率响应特性.

[ 关键词 ] FP 半导体激光器 ,电路模型 ,PSPICE

[ 中图分类号 ] TN248.4 , [ 文献标识码 ] A , [ 文章编号 ] 1001-4616( 2005 )01-0050-04

## The Macro-Model in PSPICE of a Fabry-Perot( F-P ) Laser Diode( LD )

Yang Jingbo , Wang Ming

( School of Physical Science and Technology , Nanjing Normal University , 210097 , Nanjing , China )

**Abstract** In order to analyze the modulation response performance of the laser diode( LD ) and other relevant circuit by a unified manner using any general circuit analytical software( such as PSPICE ) , the paper describes the model of a Fabry-Perot( F-P ) LD based on the rate equations , and improves the applicability of the model. By using the macro-model method in PSPICE , we can obtain the pulse modulation response and frequency response performance of the laser diode.

**Key words** Fabry-Perot laser diode , circuit model , PSPICE

## 0 引言

光电集成回路( OEIC )与微电子集成电路是不同的 ,因为在光电集成回路中 ,不仅有微电子器件 ,而且有光电子器件 ,不仅有电学信息 ,而且有光学信息. 如何用微电子电路的模拟方法模拟光电集成电路 ,关键就在于如何去构造光电子器件的电路模型. 作为 OEIC 核心器件的半导体激光器( LD ) ,就可以利用时域计算机模拟直接求解 LD 的速率方程 ,将速率方程表征为由线性电路元件组成的等效电路模型. 这种方法不需要编制复杂的数值求解程序 ,从模型的电路模拟结果就可以很方便地得到 LD 的调制响应.

本文所建立的 FP 半导体激光器的 PSPICE 宏模型就是利用上述思想进行分析求解得到的.

## 1 电路模型的建立

为研究 LD 的电路模型 ,需得到光增益与载流子密度的关系 ,这个关系与有源区的材料结构有关. 一般地讲 ,体材料的光增益与载流子密度的关系是线性的 ,而量子阱材料的光增益与载流子密度的关系是非线性的 ,呈对数关系. 本节主要讨论了体材料 LD 电路模型的构造方法.

通常 ,半导体激光器是一个多纵模工作器件 ,描述其性能的速率方程为多模速率方程. 在对 LD 的分析中 ,往往把多模速率方程简化为等效的单模速率方程而使问题得以简化. 本文以半导体激光器单模速率方程为基础 ,构造 LD 电路模型. 在不需要精确考虑与激光器模式相关的特性时 ,由单模速率方程得到的

收稿日期 :2004-09-20.

作者简介 :杨静波 ,女 ,1981— ,硕士研究生 ,主要从事光电子技术和激光应用的学习与研究. E-mail :jnuyjb@tom.com

通讯联系人 :王鸣 ,1950— ,教授 ,主要从事光电子技术和激光应用的教学与研究. E-mail :wangming@pine.njnu.edu.cn

电路模型已能胜任多种分析.

单模或近似单模工作的 LD 速率方程为<sup>[12]</sup>:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I_A}{\alpha} - \frac{N}{\tau_n} - GS \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma GS + \beta \frac{N}{\tau_n} - \frac{S}{\tau_p} \quad (2)$$

式中  $N$  为有源区内载流子密度;  $S$  为有源区内平均光子密度;  $I_A$  为注入到有源区的电流;  $\alpha = qV_{\text{act}}/q$  为电子电荷,  $V_{\text{act}}$  是有源区体积;  $\beta$  为自发辐射系数;  $\tau_n$  为光子寿命, 考虑了有源区内部吸收损耗和发光面的出光损耗;  $\tau_p = \left[ \Gamma c' \alpha_{\text{int}} - \frac{c'}{2L} \ln(R_L R_R) \right]^{-1}$  其中  $\alpha_{\text{int}}$  为腔内部光子吸收系数,  $R_L$ 、 $R_R$  分别为左右端面反射率,  $L$  为腔长;  $\tau_n$  为载流子自发复合寿命;  $\Gamma$  为光限制因子;  $G$  为光增益

$$G = \frac{g_0(N - N_{0m})}{(1 + \varepsilon S)^b}$$

其中  $g_0$  为光增益常数;  $N_{0m}$  为透明载流子密度;  $\varepsilon$  为光增益压缩因子;  $b$  为一常数,  $b = 1$  对应 Two-Level 模型,  $b = 0.5$  对应无微扰模型. 当  $\varepsilon S \ll 1$  时,  $G = g_0(N - N_{0m})(1 - \varepsilon S)$ .

这样, 式(1)右边三项分别表示由注入电流产生的载流子浓度增加、由载流子寿命决定的载流子减小和增益引起的载流子的减少; 式(2)右边三项则分别表示增益引起的光子数的增加、自发辐射引起的光子数增加和光子寿命引起的光子数的减少.

根据以上的速率方程, 就可以进行下一步的 LD 电路模型的推导.

对于(1)式, 首先定义:

$$I_{\text{spon}} = \frac{\alpha N}{\tau_n}, I_{\text{stim}} = \alpha GS \quad (3)$$

$I_{\text{spon}}$ 、 $I_{\text{stim}}$  分别为自发复合电流和激励发射电流. 引入经典的 Shockley 关系<sup>[3]</sup>:

$$N = N_e \left[ \exp\left(\frac{V_j}{\eta V_T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$N_e$  为平衡态少数载流子密度;  $\eta$  为一经验常数, 其值在 1 ~ 2 之间;  $V_j$  为结电压;  $V_T = KT/q = 25.86 \times 10^3$  V 为热电压,  $T = 300$  K.

然后将式(3)、(4)代入(1)式经过简单运算, 可以得到如下方程:

$$I_A = C_d \frac{dV_j}{dt} + I_{\text{spon}} + I_{\text{stim}} \quad (5)$$

式中, 结扩散电容  $C_d = \frac{qV_{\text{act}}N_e e^{\frac{V_j}{\eta V_T}}}{\eta V_T}$ .

对于(2)式, 假设

$$R_{\text{ph}} = V_T \frac{\tau_p}{q}, C_{\text{ph}} = \frac{q}{V_T}, S' = SV_{\text{act}}V_T \quad (6)$$

其中  $R_{\text{ph}}$  为光路损耗,  $C_{\text{ph}}$  为光路存储. 将以上所假设(6)代入(2)式, 并根据(1)式运算中的关系式, 经过简单运算, 就可得到

$$C_{\text{ph}} \frac{dS'}{dt} + \frac{S'}{R_{\text{ph}}} = I_{\text{stim}} + \beta I_{\text{spon}} \quad (7)$$

方程(5)和(7)为两个标准的电路方程, 通过这两个方程完全可以构造出激光器的等效电路模型, 但由这两个方程得到的  $S'$  不是一个实际可观测的量, 是个微观量, 这样的模型是不适用的. 对于激光器来说, 最好用激光器输出功率作为模型的光学参量来构造等效电路模型. 为此, 我们需要知道激光器输出功率与  $S'$  的关系.

那么, 可以首先从 Fabry-Perot(F-P) 谐振腔的结构开始.

图1所示的是 Fabry-Perot(F-P) 谐振腔结构示意图.  $R_L$ 、 $R_R$  分别为左右端面的反射率,  $P_L$ 、 $P_R$  分别为左右端面的出射功率.

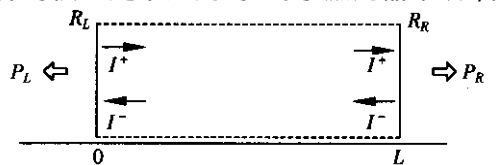


图1 Fabry-Perot 谐振腔示意图

光功率公式 功率 = 光强  $\times$  面积 ( $P = SI$ ) 并根据图 1 所示, 可知

$$P_R = (1 - R_R) \times S_R \times I^+ \tag{8}$$

$$P_L = (1 - R_L) \times S_L \times I^- \tag{9}$$

$S_R, S_L$  分别为右端面 and 左端面的出光面积.

根据以上思想, 逐步推导, 如下:

光以平面波形式在腔内传播, 有

$$\frac{dI^+(z)}{dz} = gI^+(z) + \frac{\gamma_{sp}}{2} E_{ph} \tag{10}$$

$$\frac{dI^-(z)}{dz} = -gI^-(z) - \frac{\gamma_{sp}}{2} E_{ph} \tag{11}$$

式中  $g = I(g_m - \alpha_{int})$  为净增益  $\gamma_{sp} = \beta B N^2$  为自发辐射对腔内传播模式的贡献  $E_{ph}$  为光子能量. 应用阈值条件,

$$I^+(0) = R_L I^-(0), \quad I^-(0) = R_R I^+(L) \tag{12}$$

求解方程得到

$$I^+(z) = \frac{\gamma_{sp} E_{ph}}{2g} \left[ \frac{(1 + R_L e^{gL}) - R_L (1 + R_R e^{gL})}{1 - R_L R_R e^{2gL}} e^{gz} - 1 \right] \tag{13}$$

$$I^-(z) = \frac{\gamma_{sp} E_{ph}}{2g} \left[ \frac{(1 + R_R e^{gL}) - R_R (1 + R_L e^{gL})}{1 - R_L R_R e^{2gL}} e^{g(L-z)} - 1 \right] \tag{14}$$

所以可以求出左右两端面的输出光功率为

$$P_L = \frac{\gamma_{sp} E_{ph} S_L}{2g} \cdot \frac{(1 - R_L) [ \exp(gL) - 1 ] [ R_R \exp(gL) + 1 ]}{1 - R_L R_R \exp(2gL)} \tag{15}$$

$$P_R = \frac{\gamma_{sp} E_{ph} S_R}{2g} \cdot \frac{(1 - R_R) [ \exp(gL) - 1 ] [ R_L \exp(gL) + 1 ]}{1 - R_L R_R \exp(2gL)} \tag{16}$$

腔内平均光子密度为

$$s^* = \frac{1}{E_{ph} c} (I_{avg}^+ + I_{avg}^-) \tag{17}$$

式中  $I_{avg}^+ = \frac{1}{L} \int_0^L I^+(z) dz$ ,  $I_{avg}^- = \frac{1}{L} \int_0^L I^-(z) dz$ ,  $c'$  为腔内光速. 把 (13) 式和 (14) 式代入 (17) 式得到

$$s^* = \left\{ \frac{[ (e^{gL} - 1) [ (1 - R_R) (1 + R_L e^{gL}) + (1 - R_L) (1 + R_R e^{gL}) ] ]}{g L (1 - R_L R_R e^{2gL})} - 2 \right\} \frac{\gamma_{sp}}{2gc'} \tag{18}$$

并应用激射条件

$$gL = -0.5 \ln(R_L R_R) \tag{19}$$

以及  $s^* = S V_{act} / (S_R L)$ , ( $S_R, S_L$  为左右端面面积) 可得到

$$P_L = \theta_L S' \tag{20}$$

$$P_R = \theta_R S' \tag{21}$$

其中,

$$\theta_L = \frac{c' E_{ph}}{2 L V_T} \cdot \frac{\sqrt{R_R} (1 - R_L)}{\sqrt{R_R} (1 - R_L) + \sqrt{R_L} (1 - R_R)} \ln \left( \frac{1}{R_L R_R} \right)$$

$$\theta_R = \frac{c' E_{ph}}{2 L V_T} \cdot \frac{\sqrt{R_L} (1 - R_R)}{\sqrt{R_L} (1 - R_R) + \sqrt{R_R} (1 - R_L)} \ln \left( \frac{1}{R_L R_R} \right)$$

由 (5) (7) (20) (21) 式, 并考虑 LD 寄生参量的影响, 就可以构造出 FP-LD 的电路模型. 如图 2 所示. 图中虚线部分就为 LD 寄生参量.

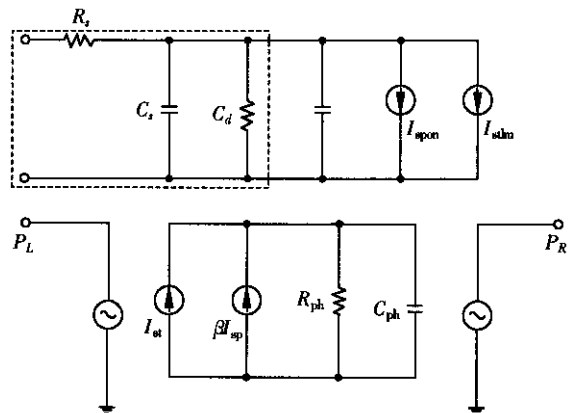


图 2 FP-LD 电路模型

2 PSPICE 模拟分析

PSPICE 是一种通用电路分析程序,能够分析和模拟一般条件下的各种电路特性. 我们可以根据以上建立的 FP-LD 模型,利用 PSPICE 进行一般的模拟. 根据实验室电路设计,一般要给 LD 提供一个直流驱动电源以及一个交流调制电源,那么假设给 LD 提供了一个 20 mA 的用于给激光器施加直流偏置的直流源以及一个调制用的脉冲电流源. 对该电路设计进行电路描述再进行分析,可以得到 LD 的频率响应和脉冲调制响应特性曲线. 图 3、4 分别给出了脉冲调制响应特性和频率响应特性.

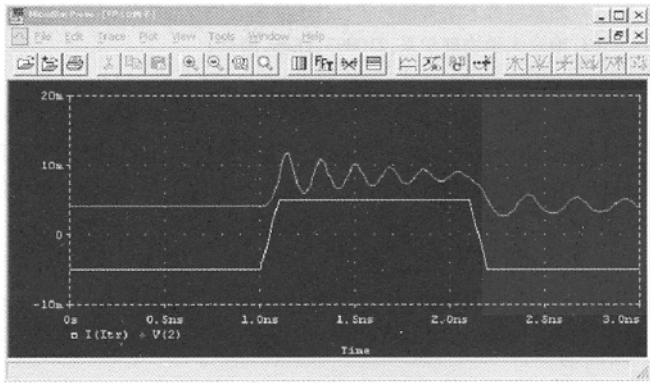


图 3 脉冲调制响应特性

图中下曲线为脉冲调制电流  $I_{tr}$ , 上曲线为端尖输出功率响应,  $\mu\text{V}$  对应  $\text{mW}$ .

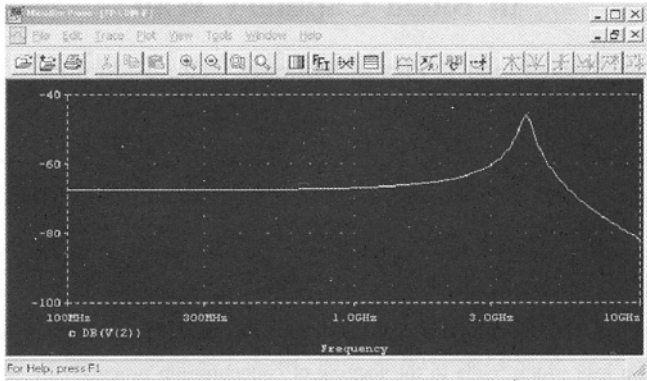


图 4 频率响应特性

3 结论

本文介绍了利用速率方程对 FP-LD 的 SPICE 电路模型的推导过程,并利用该软件以电路宏模型的方式给出了 LD 的电路模型,及 FP-LD 的一些特性曲线.

[ 参考文献 ]

[ 1 ] 高建军,梁成. 单模半导体激光器等效电路模型[ J ]. 半导体情报,1996,33( 2 ) 22—26.  
[ 2 ] 任新根,徐国萍,董天临. 半导体激光器大信号等效电路模型的参数提取[ J ]. 电子学报,1994,22( 2 ) 27—33.  
[ 3 ] Rodney S Tucker. Circuit model of the effect of diffusion on damping in a narrow-stripe semiconductor laser[ J ]. IEEE J. Quantum Electronics, 1983, 19( 7 ) 1179—1183.  
[ 4 ] 黄德修,刘雪峰. 半导体激光器及其应用[ M ]. 北京:国防工业出版社,1999.  
[ 5 ] 高燕梅,房蔓楠. Spice/Pspice 编程技术[ M ]. 北京:电子工业出版社,2002.

[ 责任编辑:丁蓉 ]