

文章编号: 0258-7025(2001)04-0325-05

基于三层模型的多量子阱激光器调制特性的 SPICE 模拟

赵 旭 康晓黎 宋南辛 王明华

(浙江大学信息与电子工程学系 杭州 310027)

提要 从三层速率方程推导出多量子阱激光器的等效电路模型,并用数量而不是密度来描述载流子及光子行为,避开了传统方法中处处都要涉及到的体积参量,解释了传统的二层模型所不能解释的多量子阱(MQW)激光器中多量子阱内载流子不均匀分布问题,用 SPICE 进行了调制特性的模拟及讨论。激光器件的模拟以层次性的方式实现,对使用 EDA 工具进行集成光学器件和系统仿真进行了探索。

关键词 调制特性,多量子阱激光器,三层模型,SPICE

中图分类号 TN 248.4 文献标识码 A

Modulation Properties of Multi Quantum Wells Laser Analyzed by A Three-level Model in SPICE

ZHAO Xu KANG Xiao-li SONG Nan-xin WANG Ming-hua

(Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract A study of equivalent circuit model of MQW lasers derived from three-level rate equations is carried out. It can explain the carrier distribution, which can not be explained by traditional two-level model. The simulation of modulation behavior is implemented in SPICE. Results of various modulation properties from the simulator are discussed. Especially, the scheme was implemented in a hierarchic way, which provides a much easier management and a help to realize photonic design automation (PDA).

Key words modulation property, multi-quantum wells laser, three-level model, SPICE

1 引 言

从光纤通信、激光打印机到激光定位、激光显示等等,一个关键的问题是:器件设计者必须提供准确的激光器模型给系统设计者。在以前的工作中,对双异质结(DH)激光器和单量子阱(SQW)激光器都已用不同的方式建立过模型并用它们进行器件模拟,如:使用解析计算或在 SPICE 中用等效电路进行模拟分析。从模型上就可以看到 SQW 激光器和 DH 激光器在调制特性上是完全不同的。现在,由于多量子阱(MQW)激光器具有大的调制带宽、低的阈值电流、高的内部效率^[1]等优点,而越来越受到重视。但是,由于工作机理与 SQW 完全不同,因此 MQW 激光器模型不能简单地从 SQW 激光器模型中衍生出

来。

在传统的体材料半导体激光器模型中,载流子和光子的工作机理是通过两个速率方程来描述的,这两个方程通过自发发射和受激发射耦合在一起。这种方法对高速调制时的许多特性能作很好的描述,但是,对量子阱激光器而言,由于工作机理根本性不同,这种方法在不引入有效增益抑制系数的时候基本上是没有用的。在这种情况下,有人提出了一种基于两层速率方程的二层模型及其相应的等效电路,并在 SPICE 中进行了模拟分析^[2~4],国内亦有人据此对单量子阱激光器进行了这方面的工作^[5]。这个模型采用了有效俘获速率及阱间有效输运时间这两个概念,这就意味着引入了几个假设。例如:假设俘获时间远远小于分离限制异质结(SCH)区域扩散时间,假设 MQW 激光器的载流子输运机制与 SQW 激光器一样,这实际上忽略了势垒区

3-D 态与 2-D 束缚态之间的量子耦合机制。

本文采用考虑了虚拟束缚态的三层模型对 MQW 激光器进行分析模拟^[6],其中准 2-D 态与 2-D 态在量子阱中占据同样的物理位置,但前者比后者具有更高的能量——这有助于载流子从 3 维态到束缚态的转换。显式地将虚拟束缚态引入到模型中就是二层模型与三层模型的根本区别所在^[7]。

2 三层模型简介

图 1(a)是 MQW 激光器的结构图。载流子处于以下三种状态之一:1)处于扩散运输机制的 SCH 区域及阱间势垒区域的载流子;2)与 2-D 态在量子阱中占据同样的物理位置,但具有更高能量的准 2-D 态;3)量子阱中的 2-D 束缚态。

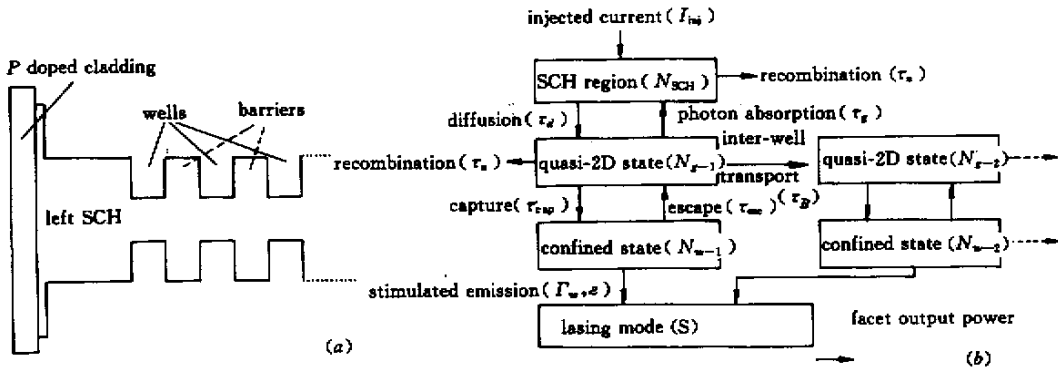


图 1 MQW 激光器结构图(a)和工作机理示意图(b)

Fig.1 Schematic diagram(a)and mechanisms(b)of a MQW laser

为了避免处处都要涉及到的体积参量,在这里我们采用数量而不是密度来描述所有的载流子及光子。以下对 MQW 中所涉及到的各种机制进行一简单的描述并解释相关的物理参数,见图 1(b)。

2.1 SCH 区域

(1)SCH 区域中的运输过程主要存在两种运输机制:一是载流子在 SCH 区域中的扩散运动;二是可能存在的附加电场使载流子产生漂移运动。在本文中不存在有意识加入的掺杂渐变,且忽略有源区中由低掺产生的 pn 结能带倾斜,因此可以不考虑漂移运动。由于实际上电子与空穴的扩散时间是不同的,为了简化问题,将电子及空穴作统一处理,我们采用双极扩散时间(τ_d)来获得一个平均值。

(2)SCH 区域中的载流子复合与区域中载流子的数目相关。为简单起见,只考虑非辐射复合过程,其非辐射寿命系数一项,可以表示为 τ_n 。

2.2 准 2-D 态

(1)准 2-D 态转化为 3-D 态。此机制可以用准 2-D 态的载流子寿命(τ_g)来表示。

(2)载流子复合与 SCH 区域类同。

(3)与二层模型相比,载流子被量子阱俘获的最大区别是在三层模型中,载流子只可以通过准 2-D 态来与 2-D 束缚态发生俘获及逃逸。同理,我们采用双极平均俘获时间来表示(τ_{cap})。

(4)载流子阱间运输可以通过热发射,然后扩散通过阱间势垒区或是以隧道效应穿越势垒。以上两种运输机制相互竞争,势垒宽度将决定它们之中谁是主导因素。同上,电子与空穴的阱间势垒运输时间是不同的,可以定义一个有效的双极运输时间(τ_B)。

2.3 量子阱中的束缚态

(1)载流子逃逸与前面有关准 2-D 态载流子俘获相类似,可用 τ_{esc} 来表示。

(2)载流子复合与 SCH 区域类同。

(3)光子发射存在以下两种机制:一是受激发射,此过程是光子数目的非线性函数,且与群速、光增益系数及增益抑制因子有关;二是自发发射,在本文的研究中,由于它比较小而作忽略处理。

2.4 激光模式(Lasing mode)

(1)量子阱限制因子 Γ_w 。

(2)光子复合时间常数为 τ_p 。

3 应用层次性方法对等效电路进行描述

根据上一节关于 MQW 激光三层模型描述,可以推导出相应的速率方程,其中 SCH 区、准 2-D 态和 2-D 束缚态的载流子数目分别用下标 sch, g, w 表示, S 代表光子数目。

$$\frac{dN_{sch}}{dt} = \frac{I_{inj}}{e} - \frac{N_{sch}}{\tau_d} + \frac{N_{g-1}}{\tau_g} - \frac{N_{sch}}{\tau_n}$$

$$\frac{dN_{g-1}}{dt} = \frac{N_{sch}}{\tau_d} - \frac{N_{g-1}}{\tau_g} - \frac{N_{g-1}}{\tau_{cap}} + \frac{N_{w-1}}{\tau_{esc}} - \frac{N_{g-1}}{\tau_B} + \frac{N_{g-2}}{\tau_B} - \frac{N_{g-1}}{\tau_n}$$

$$\frac{dN_{w-i}}{dt} = \frac{N_{g-i}}{\tau_{cap}} - \frac{N_{w-i}}{\tau_{esc}} - \frac{N_{w-i}}{\tau_n} - v_g \alpha(N_{w-i}, S) \frac{S}{1 + \epsilon \Gamma_w S}$$

$$\frac{dN_{g-(i+1)}}{dt} = \frac{N_{g-i}}{\tau_B} - \frac{N_{g-(i+1)}}{\tau_B} - \frac{N_{g-(i+1)}}{\tau_{cap}} + \frac{N_{w-(i+1)}}{\tau_{esc}} - \frac{N_{g-(i+1)}}{\tau_n}$$

$$\frac{dN_{g-last}}{dt} = \frac{N_{g-last}}{\tau_B} - \frac{N_{g-last}}{\tau_{cap}} + \frac{N_{w-last}}{\tau_{esc}} - \frac{N_{g-last}}{\tau_n}$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma_w v_g \alpha(N_{w-i}, S) \frac{S}{1 + \epsilon \Gamma_w S} - \frac{S}{\tau_p}$$

首先把模型分成 5 个部分分别处理 :SCH 区 ,准 2-D 态 ,量子阱中的 2-D 束缚态 ,激光模式区和附加的专用计算模块。MQW 准 2-D 态有三种位置(从左边 SCH 区起):第一个,中间位置,最后一个。这三种情况下的速率方程是不完全相同的,要分别作子模块。图 2 是一个四量子阱激光器,根据层次性的设计方法,可以很容易地拓展至 n 个量子阱的情形。因为在这样的一个层次结构中,可以方便地加减量子阱,并且可以方便地修改模块而不需重复修改每一个引用实例。图 3 是图 2 中部分模块的具体实现电路。

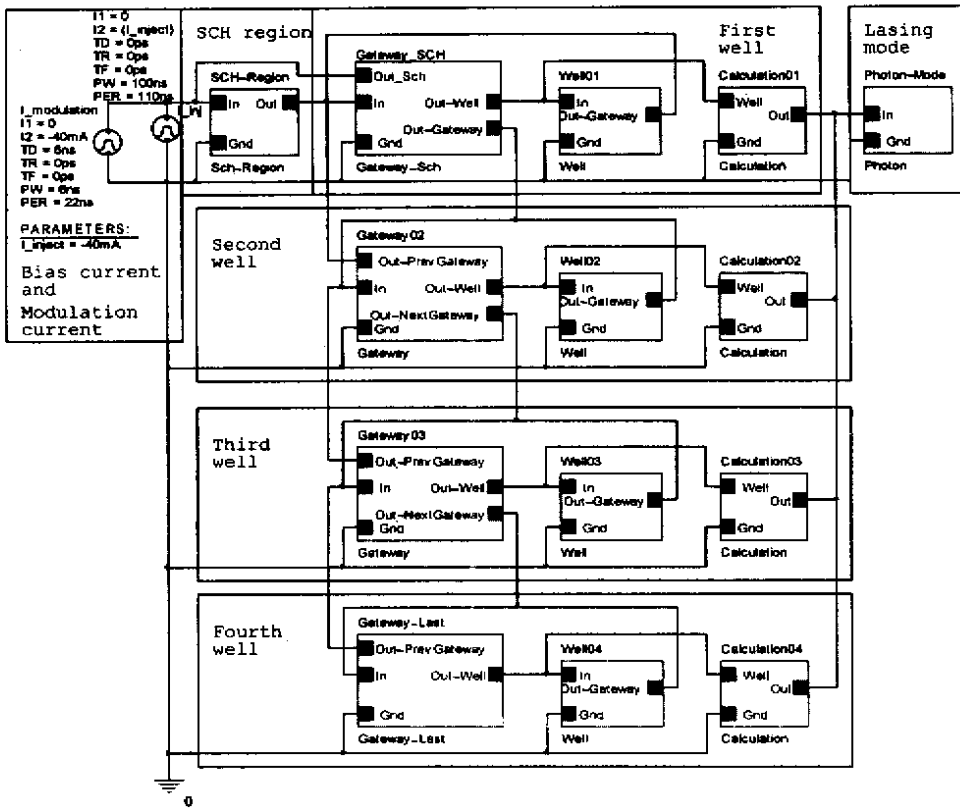


图 2 控制模块间复杂关系的层次性设计方法 :三层 MQW 激光器原理框图

Fig.2 A hierarchic way of managing the complicated relations of different blocks

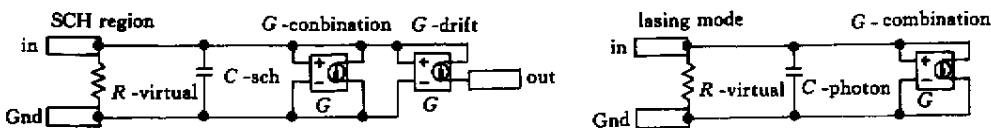


图 3 部分模块的具体实现电路

Fig.3 Detailed scheme of some blocks in three-level model

4 模拟结果与讨论

根据 8 的参数,我们用上述模型对原文中的实验结果进行了模拟验证,结果较为一致。表 1 为本文所采用的参数及其简要描述。

4.1 载流子分布特性

作为三层模型模拟能力的一个体现,我们来看

一下传统的二层模型所不能解释的 MQW 激光器中多阱载流子不均匀分布问题。图 4 以四量子阱为例,清楚地说明了载流子分布的不均匀性。从中还可以看到,越是靠近 p 覆盖层的量子阱,其载流子浓度越高。由于对每一个阱是独立建模并引入了准-2-D 态,这使得导致非均匀分布的起因——光助吸收现象能被考虑到模型中去。

表 1 MQW 激光器模拟所使用的参数含义及数值^[4,8]

Table 1 Values and descriptions of all parameters used in MQW laser simulation^[4,8]

Parameter	Value	Units	Description
e	$1.602e-19$	C	Charge of the electron
τ_d	50	ps	Ambipolar diffusion time across SCH region
τ_n	10	ns	Non-radiative carrier lifetime
τ_g	1	ps	Carrier lifetime in gateway state
τ_{cap}	1	ps	Ambipolar capture time
τ_{esc}	100	ps	Ambipolar escape time
τ_B	0.46	ps	Ambipolar transport time across barriers
V_g	$7.5e7$	m/s	Group velocity
G_0	950	/cm	Gain parameter
ϵ	$5e-17$		Gain suppression factor
Γ_w	0.0235		Optical confinement factor
τ_p	2.47	ps	Photon lifetime

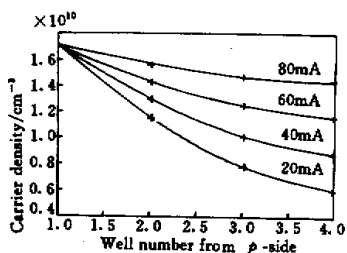


图 4 载流子浓度分布

Fig.4 Carrier distribution

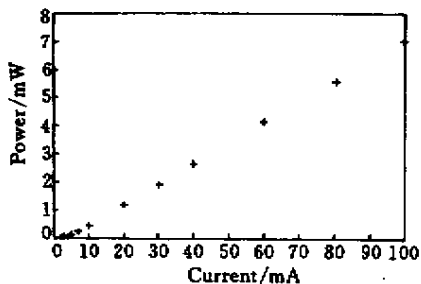


图 5 光输出功率与激励电流(L-I)关系

Fig.5 Relationship between output power and current

4.2 调制特性

1) 图 5 为光输出功率与激励电流(L-I)关系。从中可以看出此 MQW 激光器的阈值电流大约是 5 mA。

2) 图 6 为开关延时与偏置电流间的关系。从中可以看出,增大偏置电流可以减少开关延迟时间,尤其是当偏置电流低于阈值电流时,开关延时对偏置电流是很敏感的。关于 MQW 激光器开关延时的解析解是很难得到的,因此,图中揭示的数值规律对我们设计器件是很有用的。

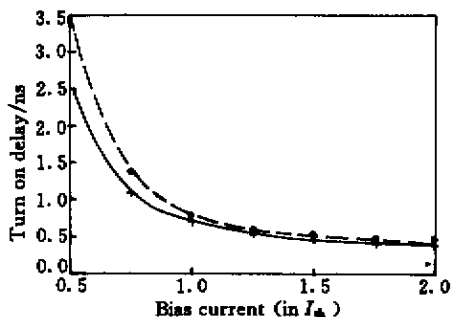


图 6 开关延时与偏置电流间的关系

(实线: $I_p = 1.5$, 虚线: $1.2I_{th}$)

Fig.6 Turn on delay as a function of bias current

Solid and dotted lines represent $I_p = 1.5$ and $1.2I_{th}$, respectively

3) 图 7(a)~(c)为各种偏置电流下的开关响应。当偏置电流低于阈值时,由于载流子的浓度较小,因此需要更多的时间才能到达阈值浓度,其相应

的开关延迟也就大一些。

4) 图 8 为开关比与偏置电流的关系。当偏置电流明显高于阈值电流时, 开关比很小, 同时开关延

时也小, 而当偏置电流处于阈值电流附近时, 开关比变大, 同时开关延时也增大。

5) 图 9 为强度调制响应。3 dB 带宽约为 11 GHz。

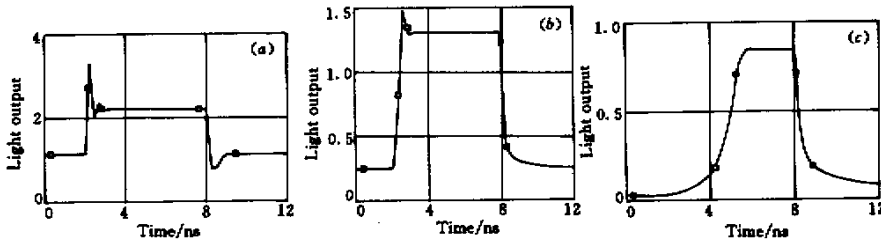


图 7 各种偏置电流下的开关响应

Fig. 7 Pulse response under bias conditions

$I_p = 1.2I_{th}$, (a) $I_b = 2.0I_{th}$; (b) $I_b = 1.25I_{th}$; (c) $I_b = 0.5I_{th}$

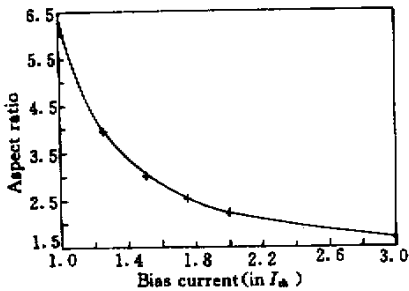


图 8 开关比与偏置电流的关系

Fig. 8 On/off aspect ratio as a function of bias current

($I_p = 1.5I_{th}$)

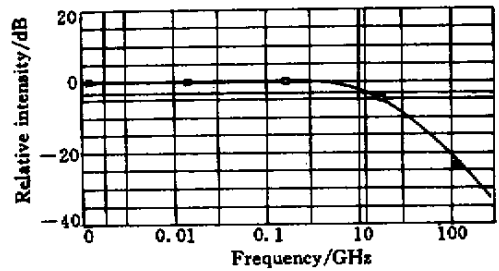


图 9 强度调制响应

Fig. 9 Small signal intensity modulation response

($I_p = 1.5I_{th}$)

5 总 结

虽然准 2-D 态的准确本质及其是否存在尚未得到完全证实, 但它显然可以帮助我们理解量子阱激光器的工作机理。想要准确描述与模拟的话, 三层模型要比二层模型优越。

由于速率方程与电路中对电容充放电描述是本质相似的过程, 因此可以将层次性的设计方法应用在对三层速率方程的建模及其模拟, 本例在 ORCAD Release 9.0 PSPICE A/D 上得到实现。另外, PSPICE 可以方便地将寄生效应考虑到模型中去并让系统设计人员将此模型连同电路中的其他元件一起作模拟分析。本文中, 激光器件的模拟以层次性的方式实现, 对使用 EDA 工具进行集成光学器件和系统仿真进行了有益的探索。这一模型的模拟结果说明很多 MQW 激光器的调制特性, 如: 开关延时、开关脉冲响应、开关比等都与偏置电流有关。该模型既可应用于系统模拟, 也可以帮助我们设计出低阈值电流、高量子效率、宽频带的新器件。

参 考 文 献

- 1 Y. Suematsu, A. R. Adams. Handbook of Semiconductor Laser and Photonic Integrated Circuits. London, U. K.: Chapman & Hall, 1994. 1~22
- 2 M. F. Lu, J. S. Deng, C. Juang *et al.*. Equivalent circuit model of quantum well lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(8):1418~1422
- 3 M. F. Lu, C. Juang, M. J. Jou *et al.*. Study of carrier transport effects on quantum well lasers using a SPICE simulator. *Inst. Elect. Eng. Proc.-Optoelectron.*, 1995, **142**(5):237~240
- 4 David McDonald, Ronan F. O'Dowd. Comparison of two- and three-level rate equations in the modeling of quantum-well lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(11):1927~1934
- 5 Gao Jianjun, Gao Baoxin, Liang Chunguang. A simple equivalent circuit model of quantum-well lasers. *Research & Progress of SSE*, 1999, **19**(3):314~320 (in Chinese)
- 6 R. Nagarajan, M. Ishikawa, T. Fukushima *et al.*. High speed quantum-well lasers and carrier transport effects. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(10):1990~2008
- 7 Benjamin P. C. Tsou, David L. Pulfrey. A versatile SPICE model for quantum-well lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(2):246~254
- 8 Giammarco Rossi, Roberto Paoletti, Marina Meliga. SPICE simulation for analysis and design of fast 1.55 μm MQW laser diodes. *J. Lightwave Technol.*, 1998, **16**(8):1509~1516