

文章编号: 0253-2239(2004)10-1344-5

# 量子级联激光器调制特性的电路模拟\*

陈贵楚 范广涵 陈练辉

(华南师范大学光电子材料与技术研究所, 广州 510631)

**摘要:** 量子级联激光器(QCL)是波长范围在中远红外的一类新型激光器,到目前为止,对于它的脉冲响应及调制响应等动态特性了解并不是很深入,为此以贝尔实验室在 1994 年发明的量子级联激光器器件模型为基础,通过分析量子级联激光器中的电子在多量子阱间输运及跃迁的单极行为,得到它的速率方程。以此为基础,通过用电路元素对方程进行改造,建立起其相应的等效电路模型,利用 PSPICE 电路模拟软件进行模拟仿真,得到了它的调制响应特性,对可能影响其调制特性的一些因素如各阱之间的弛豫时间进行了讨论,并与其它类型激光器作了比较,发现量子级联激光器的动态性能并不优良,而这一点应缘于其独特的激射能级结构。

**关键词:** 半导体激光器; 调制响应; 电路模拟; 量子级联激光器

中图分类号: TN209 文献标识码: A

## Circuit Simulation for Modulation Characteristics of Quantum Cascade Semiconductor Laser

Chen Guichu Fan Guanghan Chen Lianhui

(*Institute of Optoelectronic Material and Technology, South China Normal University, Guangzhou 510631*)

(Received 18 July 2003; revised 30 April 2004)

**Abstract:** Quantum cascade laser (QCL) is a new-style laser whose wavelength remains in middle and far infrared. Hitherto its dynamic characters like pulse and modulation responses haven't been well acquainted. To ascertain this, an equivalent circuit model was derived on the base of rate equation of QCL that is invented by Bell Lab in 1994 by analyzing the unipolar transportation and transition behaviour of electrons in multiply quantum well, and the modulation response of QCL is gotten in the circuit simulation program PSPICE. Consequently some factors such as transition time between wells have been analyzed which could affect the modulation character of QCL. At last its dynamic character is found to be unexcellent compared with other lasers because of its peculiar energy band structure.

**Key words:** semiconductor laser; modulation response; circuit simulation; quantum cascade laser

## 1 引 言

在 Esaki 和 Tsu 首次提出超晶格的概念并在实验室得到了实现之后,1971 年 Katarinov 和 Suris<sup>[1]</sup>也提出了用量子阱或超晶格来实现单极性激光器的设想。但由于对这种激光器的基础理论研究的不足及当时器件工艺水平的落后,过了 20 多年后单极性

激光器家族中的重要代表——量子级联激光器(QCL)才首次出现<sup>[2]</sup>。量子级联激光器在器件上的实现及应用有着重要的意义,它的出现可以说是自从注入式半导体激光器发明以来在激光器发展方面的又一个里程碑。量子级联激光器综合了量子物理、光学及晶体生长技术的最前沿的成就,它利用电子在量子阱子能带间的跃迁来产生激光,不用涉及到另一种载流子(空穴)的输运情况,这就是它所谓的单极性。量子级联激光器虽然取得了突破性的进展,但在基础理论方面如如何使电子的注入更加有

\* 国家科技攻关计划(00-068)资助课题。

E-mail: gchenbox@163.com

收稿日期:2003-07-18;收到修改稿日期:2004-04-30

效、怎样来控制子能带之间跃迁速率等方面还有较多的工作要做。另外它的器件结构相当繁杂,即使现在最好的晶体生长方法(如 MBE)也要小心控制才能实现材料生长。目前激光波长在红外区的半导体激光器是较少的, HgCdTe 合金激光器的激光波长虽然能达到  $8 \mu\text{m}$ ,但它的光输出功率很低,有的功率较大的量子阱激光器激光波长可以接近近红外,但由于受半导体材料禁带宽度的限制,要达到中远红外已经很难了。而量子级联激光器能综合这两种优点,大功率远红外区的量子级联激光器已经出现,并在一些需要此类光源的检测设备上得到应用,如环境监控系统、化学气体谱仪以及空间光谱仪等。

量子级联激光器以量子阱作为器件结构的基础,通过分析电子在量子阱运输的单极行为,得到它的速率方程,以此为基础来分析量子级联激光器的瞬态特性,如调制响应等。利用数值分析可以得到量子级联激光器的各种特性,但其缺点是在包含寄生元件和驱动电路时无法分析,而建立它的等效电路模型能有效地解决这一问题。本文中所建立的电路模型采用四个速率方程的数学模型建模,模型包括了量子阱中各子能带的电子密度与输运时间,并对量子级联激光器的频率响应进行了模拟,与其它半导体激光器的频响特性作了比较。

## 2 器件结构与电子输运

Faist 在文献[2]所提出来的量子级联激光器的器件结构如图 1 所示,其中图 1(a)是有源区的导带

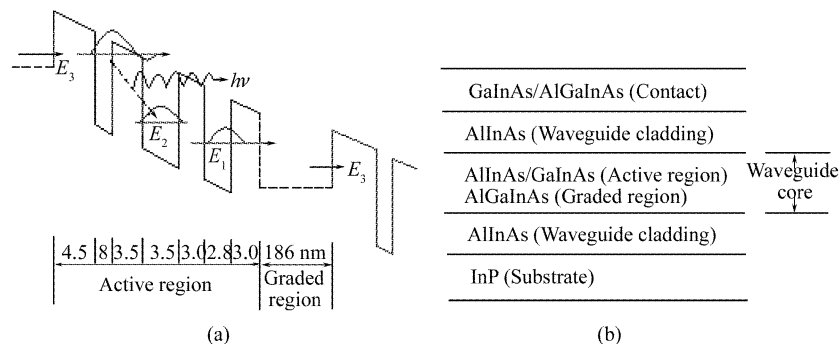


Fig. 1 (a) Conduction band of QCL's active layer, (b) Device structure of QCL

## 3 电路模型建模

建立电路模型来分析量子级联激光器的特性的好处前面已经提到,可以用一些功能较强的电路模拟软件来进行仿真,如 PSPICE。当然必须先建立相应的用电路基本元件组成的等效电路,也就是

能带的示意图,图 1(b)是整个器件结构核心的示意图,包括接触层、有源区以及渐变层。而在其中有激光产生的有源区是电路模型建立的基础,有源区由三个未掺杂的量子阱组成,在其中  $\text{Al}_{0.48}\text{In}_{0.52}\text{As}$  构成垒层,  $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.53}\text{As}$  是阱,它们都与 InP 衬底晶格匹配,由于量子限制引起的束缚态在量子阱中各子能带形成了一个四能级系统(图 1 中仅显示了三个能级),类似于有些固体与气体激光器的能级结构。为了提高光输出功率的强度,需要把 25 个如图 1(a)所示的激光单元串接起来,在各单元之间用 AlGaInAs 渐变层来连接,从图 1(b)可见,组分渐变层的导带边形状是平的,这有利于电子从一个单元转移到下一个。在激光条件下,注入的电子从接触层通过隧道效应穿过第一个势垒在第一个阱中的子能带  $E_3$  积累,通过控制子带间跃迁或弛豫速率,在  $E_3$  能级上的电子与第二个阱中子能带  $E_2$  上的电子能形成粒子数反转,电子从能级  $E_3$  向  $E_2$  跃迁产生激光,激光光子能量对应于这两能级之差  $E_{32} = E_3 - E_2$ ,能级  $E_2$  上的电子以较快的弛豫速率向第三个阱中的子能级  $E_1$  转移,再由  $E_1$  能级经过平带的渐变层注入下一个单元再一次产生激光。当然,由于动量守恒的原则,从  $E_3$  向  $E_2$  跃迁的电子还需要声子协助。量子级联激光器加上偏置电压后,电子将流过各个阱组成的势能阶梯并在每一个单元发射光子,从而能提高光输出功率。在有源区的两侧各有一层 AlInAs 包层构成波导,加强光限制。

将描述器件的物理方程转化为用电路基本元件来表征的子电路模块,如电阻、电容或者受控源等。下面的分析主要是利用量子级联激光器的速率方程建立起等效的电路模型。

### 3.1 速率方程分析

能在发生激射的两能级之间维持粒子数反转需

要考虑很多的情况,如电子抽运水平、子能带之间电子的跃迁速率以及电子与光子的相互作用等。尽管这是一个较复杂的多体作用问题,但我们还是可以用一个不太复杂的半经典的速率方程来描述它的一些特性。如图 1 所示,三个量子阱中的子能带  $E_1$ 、 $E_2$  与  $E_3$  组成了一个三能级系统,采用一个单模速率方程能考虑到电子在各子能带的输运及光子发射的情况。速率方程如下<sup>[3]</sup>:

$$\frac{dn_3}{dt} = P - \frac{n_3}{\tau_{31}} - \frac{n_3}{\tau_{32}} - vgs, \quad (1)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = \frac{n_3}{\tau_{32}} - \frac{n_2}{\tau_{21}} + vgs, \quad (2)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{n_3}{\tau_{31}} + \frac{n_2}{\tau_{21}} - \frac{n_1}{\tau_{out}}, \quad (3)$$

$$\frac{ds}{dt} = vgs, \quad (4)$$

其中  $n$  是各子带中的电子密度,  $\tau$  是电子在各子带间传输的弛豫时间,  $\tau_{out}$  是电子从最低能级  $E_1$  转移到下一个单元的时间,  $v$  是有源区介质的光速,  $g$  是光学增益,  $s$  是光子密度,  $P$  是电子抽运率,  $P = I_i/eV$ ,  $I_i$  是注入电流,  $e$  是基本电荷,  $V$  是有源区的体积。

### 3.2 等效电路模型

为了能用电路模拟系统进行仿真,必须对上述

方程变换,变换的形式如下:

$$\frac{dQ_3}{dt} = I_i - \frac{Q_3}{\tau_{31}} - \frac{Q_3}{\tau_{32}} - evgS, \quad (5)$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{Q_3}{\tau_{32}} - \frac{Q_2}{\tau_{21}} + evgS, \quad (6)$$

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{Q_3}{\tau_{31}} + \frac{Q_2}{\tau_{21}} - \frac{Q_1}{\tau_{out}}, \quad (7)$$

$$e \frac{dS}{dt} = evgS, \quad (8)$$

上列各式中,  $Q$  为各阱中电荷总数,  $Q = neV$ ,  $S$  为有源区中的总光子数,  $S = sV$ ,  $e$  为电子电量。上面(5)式~(7)式都有电路的基本元素,但(8)式没有相应的电路元素,不能进行电路模拟,必须对它变换,令

$$V_{out}(V) = P_{out}(W) = \beta \hbar \omega v S / L = \rho S^{[4]},$$

其中  $P_{out}(W)$  是光输出功率,  $V_{out}(V)$  是用来表示光输出的节点电压,  $\beta$  是表示光子从有源区逸出的比例,  $L$  是整个有源区的宽度,  $\hbar \omega$  是光子的能量,则(8)式可表示为:

$$\frac{e}{p} \frac{dV_{out}}{dt} = evgS = \frac{evgV_{out}}{p} = G_{stim}, \quad (9)$$

$G_{stim}$  是表征光输出的受控电流源,至此已经完成了由数学模型到电路模型的转换,相应的电路模型如图 2 所示,“ $G$ ”代表可控电流源,“ $E$ ”代表可控电压源。

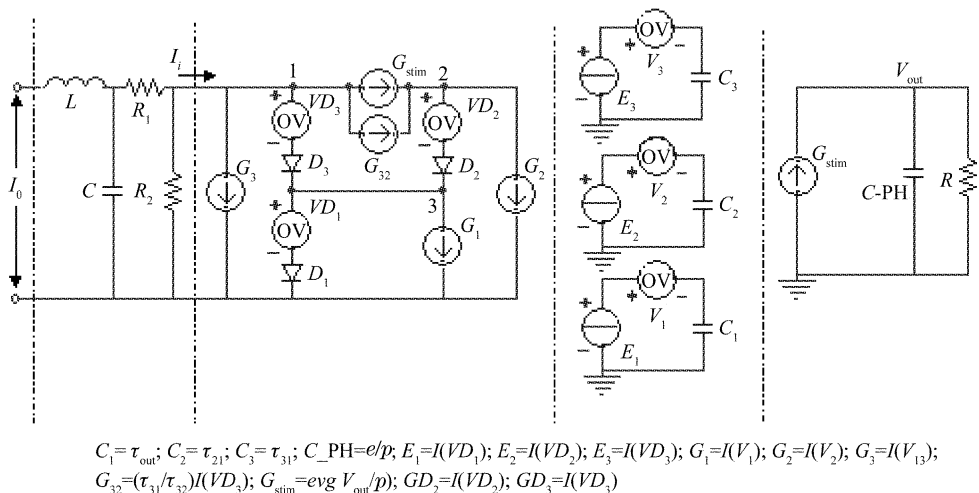


Fig. 2 Circuit model of QCL

本电路模型有如下一些特点:

1)  $VD$  与  $V$  是 0 V 的电压源,相当于一个电流表的作用,能显示出它所在支路的电流。

2)  $Q_3/\tau_{31}$ 、 $Q_2/\tau_{21}$  及  $Q_1/\tau_{out}$  分别用三个二极管  $D_3$ 、 $D_2$  及  $D_1$  来模拟,用二极管而不用电流源是为了节省程序模拟时间,另一方面,如果用电流源的话,那么每个电流源还需要并联一个高值电阻,以便克服在电路模型作 DC 扫描时出现的浮动节点问

题,而用二极管可省去这一麻烦,至于为什么能这样做,在下面参量推导里有详细的说明。

3)  $dQ/dt$  项用三个受控电流源  $G_1$ 、 $G_2$  与  $G_3$  来表示,它们的大小由三个微分电路来描述。另外,  $Q/\tau_{32}$  和  $evgS$  项分别用受控源  $G_{32}$  以及  $G_{stim}$  来表示。

4) 电学回路把方程(5)、(6)及(7)三式综合在一起,使电路显得非常紧凑。按照基尔霍夫第一定理,任一节点流入与流出的电流之和为零,则在图 2

中,节点 1 处的电流关系是描述方程(5)的,节点 2 对应于方程(6),节点 3 对应方程(7)。另外在光学回路中额外加上一个高值电阻,是为了不出现浮动节点问题。

#### 4 参量推导

假设导带边的形状是抛物形的,则量子阱中的电子密度  $n_i$  与电子的准费米能级  $E_{Fni}$  有如下关系<sup>[5]</sup>:

$$n_i = \frac{m^* k_B T}{\pi \eta^2 L_i} \ln \left[ 1 + \exp \left( \frac{E_{Fni} - E_{1i}}{k_B T} \right) \right], \quad (10)$$

$$(i = 1, 2, 3)$$

式中  $m^*$  为电子的有效质量,  $L_i$  是三个量子阱各自的宽度,  $E_{Fni}$  是各量子阱中电子的准费米能级,  $E_{1i}$  是各阱中电子的基态子能带。从(10)式可知,  $Q_3/\tau_{31}$ 、 $Q_2/\tau_{21}$  以及  $Q_1/\tau_{out}$  与  $E_{Fni} - E_{1i}$  的关系是半对数性质的,可以用一个二极管的电流方程来较好地拟合。在 PSPICE 电路模拟系统中,二极管的模型参量主要的有三项,即:饱和电流  $I_s$ 、寄生电阻  $R_s$  以及发射系数  $N$ ,其中  $I_s = Q_0/\tau$ ,  $Q_0$  是各量子阱中的电荷总数  $Q$  的平衡值,  $R_s$  表征二极管的实际  $I-V$  特性与标准指数关系的偏差。经拟合计算得到三个二极管的这些参量如表 1 所示。

Table 1 Model parameters of diode

Type	$I_s/A$	$R_s/\Omega$	$N$
$D_1$	$1.85 \times 10^{-13}$	14	2
$D_2$	$3.24 \times 10^{-14}$	2.3	2
$D_3$	$5.82 \times 10^{-14}$	3.6	2

对于量子级联激光器的光学增益的计算,这是一个较复杂的问题,已经知道量子阱激光器的光学增益与量子阱中的电子密度不是线性关系而是对数关系<sup>[6,7]</sup>,文献[3]已经有了关于量子级联激光器光学增益的计算结果,但只是一幅增益的曲线图,我们可以利用对数关系采用下面光学增益的表达式对曲线进行拟合:

$$g(n) = a_0 + a_1 \ln \left( \frac{n_3 \times n_1}{n_2} \right), \quad (11)$$

至于各量子阱的电子密度在对数符号内的位置关系是不难理解的,因为电子密度  $n_3$  与  $n_1$  越大而  $n_2$  越小,对于维持粒子数反转越有利,相应地光学增益也就越大。经拟合计算得到  $a_0 = 8.53$ 、 $a_1 = 112.45$ 。在 PSPICE 程序中,方程(11)可以用一个用户自定义函数来描述,另外光学回路中的节点电压  $V_{out}$  也必须用一个“LIMIT”函数来限制,以保证在激光条件

下  $V_{out}$  始终是一个正数。不难发现当光学增益  $g(n)$  与节点电压  $V_{out}$  在 PSPICE 程序中规范好了,从方程(9)可以看出图 2 的电路模型中的电流源  $G_{stim}$  能得到较好的描述。电路模拟还需要的一些参量如表 2 所示。

Table 2 Model parameters

Parameters	Amount	Parameters	Amount
$\tau_{31}/ps$	14	$I_0/mA$	350
$\tau_{32}/ps$	7.5	$L/nH$	0.18
$\tau_{21}/ps$	2.4	$C/pF$	0.15
$\tau_{out}/ps$	2.5	$R_1/\Omega$	5.0
$v/ms^{-1}$	$7.5 \times 10^7$	$R_2/\Omega$	350
$\rho/W$	$2.35 \times 10^{-8}$	$R/\Omega$	$1 \times 10^{12}$

至此电路模拟所需要的参量都已得到,在此基础上对量子级联激光器进行模拟分析可得到一些特性。

#### 5 模拟结果

其实在上面得到的量子级联激光器的电路模型是它的大信号模型,如果给它提供一个开关电平的激励信号,可以得到它的瞬态特性如开关延迟。在这里我们更感兴趣的是它的频率响应特性,如果对前面的非线性速率方程作小信号的线性化处理,通过数值分析也能得到它的调制特性,但计算过程繁琐。利用量子级联激光器的等效电路模型进行模拟的优势是相当明显的,不需要另外提出它的小信号模型,只要在图 2 电路模型中的直流电流源  $I_0$  处再并联一个小信号交流电流源,利用 PSPICE 程序中的 AC 分析命令就能得到结果。模拟结果如图 3 所示。

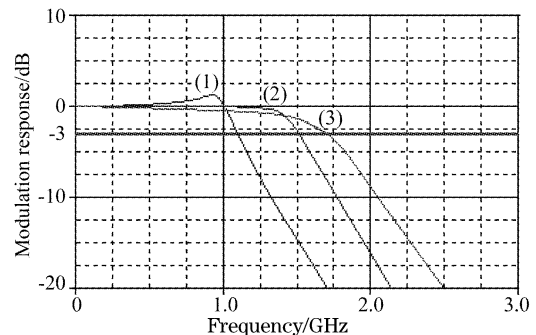


Fig. 3 Modulation characteristic of QCL. (1)  $\tau_{21} = 2.4$  ps, (2)  $\tau_{21} = 1.5$  ps, (3)  $\tau_{21} = 1.0$  ps

以  $-3$  dB 为增益的下限,从模拟结果可以看出在取不同的值时,量子级联激光器调制带宽是不同的,随着  $\tau_{21}$  的减小(即电子由子能级  $E_2$  向  $E_1$  的弛豫速率加快),频率响应的带宽是增大的。这一点是容易理解的,在注入电子恒定的情况下,  $\tau_{21}$  减小,电

子由能级  $E_2$  向  $E_1$  的转移加快,对于维持子能带  $E_3$  与  $E_2$  之间的粒子数反转非常有利,能提高激光器的微分增益,使调制带宽增大。从激光器激射的物理图景来看,前面速率方程中的四个传输弛豫时间对调制带宽都有影响,因为它们都能改变激光器的粒子数反转的状况。但毫无疑问  $\tau_{32}$  与  $\tau_{21}$  是最主要的因素,这两者对粒子数反转的影响是直接的。实际上要精确控制  $\tau_{21}$  的变化在器件生长技术上是很难实现的,因为要考虑很多复杂因素,如掺杂浓度、阱的长度以及子能级的复杂计算等。但从模拟结果还是可以得到一些有用的信息,量子级联激光器的频率响应特性与其它的半导体激光器相比并不突出,并不比量子阱激光器逊色不少,与早期的双异质结激光器相当,这应缘于它激射的能级状况类似于某些固体激光器的多能级系统,而我们已经知道固体激光器的直接调制性能并不优良<sup>[8]</sup>。当然改善量子级联激光器的频响特性不是我们的主要目的,这类激光器能得到广泛应用是由于它的激射波长在中远红外区。

**结论** 本文通过分析量子级联激光器的速率方程,建立它的电路模型,由 PSPICE 电路模拟系统模拟后,发现它的频响特性并不突出,尽管目前量子级联激光器的主要应用与它的调制特性无较多的关系,

但前面的分析为以后在改进它的频响性能方面的研究能提供较好的基础。

### 参 考 文 献

- 1 Kuzarinov R F, Suris R A. Possibility of amplification of electromagnetic waves in a semiconductor with a superlattice. *Sov. Phys. Semicond.*, 1971, **5**(8): 707~709
- 2 Faist J, Capasso F, Sivco D L *et al.*. Quantum cascade laser. *Science*, 1994, **264**(4): 553~556
- 3 Sun J P, Haddad G I. Quantum well intersubband laser. *International J. High Speed Electronics and Systems*, 1998, **9**(4): 867~899
- 4 Agrawal G P, Dutta N K. *Semiconductor Lasers*. New Van Nostrawd Reinhold, 1993. 238
- 5 Corzine S W, Yan R H, Coldren L A. *Optical Gain of Bulk and Quantum Well Semi-Conductors*. San. Diego, CA: Academic, 1993. 44
- 6 Liu Bin, Fang Zujie. Modified rate equations for quantum well lasers. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1996, **16**(3): 274~277 (in Chinese)
- 7 Detemple T A, Herzinger C M. On the semiconductor laser logarithmic gain-current density relation. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(5): 1246~1252
- 8 Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping *et al.*. LD-pumped acousto-optic Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> laser with high repetition rates and short pulse width. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(6): 489~491 (in Chinese)