

半导体微腔激光器瞬态响应及调制特性分析*

张晓霞 潘 炜 罗 斌 吕鸿昌

陈建国

(西南交通大学计算机与通信工程学院, 成都, 610031) (四川大学光电系, 成都, 610064)

摘要: 针对半导体微腔激光器的结构特点, 考虑到腔量子电动力学中自发辐射增强效应, 采用传统速率方程的表示形式, 建立了微腔激光器的速率方程, 着重讨论了微腔激光器的瞬态响应及调制特性, 给出了其动态特性的仿真结果, 分析了自发辐射因子、注入电流和腔长对微腔激光器的激射阈值、延迟时间、弛豫振荡频率和光输出等参量的影响, 从而为改善微腔激光器的高频调制特性和优化器件结构提供了理论依据。

关键词: 半导体微腔激光器 瞬态响应 调制特性 自发辐射因子

Analysis of modulation characteristics and transient response of semiconductor micro-cavity lasers

Zhang Xiaoxia, Pan Wei, Luo Bin, L Hongchang, Chen Jianguo^a

(Department of Computer and Communication Engineering Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

(^a Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu, 610064)

Abstract: Based on the structural property of semiconductor and the enhanced effect of spontaneous emission in cavity quantum electron dynamics, a simple rate equation is derived for micro-cavity lasers. Transient response and dynamic modulation characteristics of micro-cavity lasers are discussed. The dependence of threshold, turn-on delay and relaxation oscillation frequency on spontaneous emission factor, inject current and the length of the cavity is analyzed. The results construct the theoretical basis to improve the high frequency modulation characteristics of micro-cavity lasers and to optimize their structures.

Key words: semiconductor micro-cavity lasers transient response modulation characteristics spontaneous emission factor

引 言

近期, 有关光学微腔中自发辐射效应的研究引起了相当的注意。它不仅阐述了原子与光子在狭窄的腔内所表现出来的与在自由空间中完全不同的基本行为, 提出了一系列光的量子本性, 光与物质相互作用的复杂性问题, 而且还提供了许多应用的可能性^[1, 2]。由于自发辐射因子的提高和自发辐射率的增大是腔量子电动力学 (CQED) 两个最重要的效应, 所以, 在微腔激光器中, 自发辐射增强效应将充当重要的角色。目前, 已出现的半导体微腔大体可归结为 F-P 微腔、“回音壁模式” (WG) 和光子晶体缺陷模微腔 3 种典型的腔结构^[3]。其中, F-P 微腔是目前理论上和实验上研究的最广泛的半导体微腔, 它的 CQED 效应已从实验上证实。速率方程作为描述半导体激光器中光子和载流子之间相互作用的基本动力学方程, 被广泛地应用于激光器的稳态和动态特性研究中。如何将微腔效应的影响纳入一般速率方程, 这对于微腔激

* 铁道部科技发展计划和四川省青年科技基金会资助。

光器特性的研究应该说是十分有意义的。Yokoyama 等人曾从耦合到腔模上的自发辐射率在整个立体角中所占的比例入手,给出了四能级激光器稳态数值解^[4]。文献[5],[6]中得到了微腔激光器稳态解析解。

我们从不同出发点,采用传统的速率方程,针对微腔结构的特点,考虑到自发辐射效应(自发辐射因子)和非辐射衰减速率的影响,建立了微腔激光器的速率方程。在动态特性的研究中,对于未做任何小信号近似处理的情形,通过 Matlab 软件对微腔激光器的动态特性直接仿真,着重分析和讨论了微腔激光器的瞬态响应及调制特性,给出了注入电流、自发辐射因子和腔长对激射阈值、延迟时间、弛豫振荡频率和光输出等参量的影响。得到了一些有益的结果,为改善微腔激光器的高频调制特性和优化器件结构提供了理论依据。

1 微腔激光器速率方程的理论分析

微腔对自发辐射控制作用中最引人注目的结果是大大提高了自发辐射的耦合系数,这种自发辐射的控制不仅在封闭的三维结构中存在,对于两维限制的圆柱和圆盘微腔以及一维限制的平面微腔中也存在。在普通激光器中,自发辐射因子可近似表示 $\beta = \lambda^4 / 4\pi^2 V_0 \Delta \lambda n^3$, 式中, V_0 是光模的体积, $\Delta \lambda$ 是光谱发射线宽, n 是折射率。腔内模式总数大致相当于 $V_0 / (\lambda 2n)^3$, 而 $\Delta \lambda$ 与发射线宽内的模式数成正比。由此可见,减少模式体积或者减少光谱发射线宽,可得到较大的 β 值。在普通半导体激光器中, β 值仅为 10^{-5} 。对于微腔激光器,由于模式体积 V_0 的急剧减少,仅有几个光学模式处于有源介质增益谱中,腔内光模式间隔加大,并具有较小的光谱发射线宽 $\Delta \lambda$,因而具有高自发辐射因子^[2]。考虑到微腔激光器非辐射复合的影响(如缺陷,表面和俄歇复合),则微腔激光器的单模含时速率方程可写为^[7]:

$$dN/dt = \eta I / eV - v_g g(N) S - R_{sp} - \Lambda N \quad (1)$$

$$dS/dt = \Gamma v_g g(N) S + \Gamma \beta R_{sp} - S / \tau_{ph} \quad (2)$$

式中, N 是有源区的载流子浓度, S 是光腔中的光子数密度, e 是电子电荷, v_g 是光的群速度, V 是有源区的体积, Γ 是光限制因子, I 是注入电流, η 是电流注入效率, τ_{ph} 是光子寿命, R_{sp} 是自发辐射速率 ($R_{sp} = N / \tau_{sp}$, τ_{sp} 是载流子自发辐射寿命), β 是自发辐射因子, Λ 是非辐射衰减速率。这里取光增益 $g(N) = a(N - N_{tr})$, a 是增益系数, N_{tr} 是透明载流子浓度。

稳态情形下,微腔激光器的速率方程可改写为:

$$\eta I / eV - v_g g(N) S - N / \tau_{sp} - \Lambda N = 0 \quad (3)$$

$$\Gamma v_g g(N) S + \Gamma \beta N / \tau_{sp} - S / \tau_{ph} = 0 \quad (4)$$

对于理想三维封闭微腔,微腔激光器输出特性,阈值的鲜明程度与自发辐射因子有关。当 $\beta = 1$ 且 $\Lambda = 0$ 时,根据方程(3)和(4)有:

$$S = (\eta \Gamma \tau_{ph} / eV) I \quad (5)$$

$$N = (1 + k N_{tr}) / (k + eV / \eta \tau_{sp} I) \quad (6)$$

式中, $k = \Gamma v_g a \tau_{ph}$, 可见,光子数密度 S 与注入电流 I 呈线性增加,即所谓的“无阈值”情形,但载流子数密度 N 与注入电流 I 却不呈线性关系。当泵浦电流很大时,载流子数密度将趋近于饱和值。而对于 $\beta \neq 1$; $\Lambda \neq 0$ 以及 $\beta = 1$; $\Lambda \neq 0$ 的情形,光输出并不随泵浦线性变化。值得注意的是,在普通的激光器中,阈值以下载流子数密度随泵浦的增加而线性增加,之后载流子数密度便达到饱和。而对于微腔激光器载流子数密度与泵浦的关系是非线性的,这正说明了自

发射效应对泵浦与光输出和转换效率的影响是不容忽视的。

2 微腔激光器动态特性模拟分析和讨论

我们运用变步长四阶龙格-库塔法,并采用表 1 中微腔激光器的典型参数进行直接模拟仿真。图 1、图 2 中纵坐标载流子数密度 N 的量纲为 10^{18}cm^{-3} , 光子数密度 S 的量纲为 10^{16}cm^{-3} , 横坐标时间的量纲为 ns。

2.1 瞬态响应模拟分析

对激光器动态特性直接进行数值模拟。在图 1a 中,取自发辐射因子 $\beta = 10^{-3}$,注入电流 $I = 60 \text{mA}$,可以看到,载流子数密度随时间的增加线性增加,这时光子数密度为 0,达到阈值载流子数密度后(对应于时间在 0.5ns 处),载流子数密度开始下降,光子数密度迅速增加,可以观察到弛豫振荡现象。在这个过程中,系统存储的能量在载流子和光子之间来回交换,最后,达到其稳态值。在阈值以上,对于确定的注入电流,载流子数密度达到最小值对应于光子数密度的最大值,该方法所得的结果与文献[7]中的数值解相吻合。

Table 1 Typical parameter values for microcavity lasers^[7]

parameter	symbol	value
lasing medium group velocity	v_g	$8.8 \times 10^9 \text{cm/s}$
gain constant	a	$3 \times 10^{-16} \text{cm}^2$
optical transparency density	N_{tr}	$1.2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
optical confinement factor	Γ	0.2
current injection efficiency	η	0.6
carrier lifetime	τ_{sp}	$2 \times 10^{-9} \text{s}$
photon lifetime	τ_{ph}	$1 \times 10^{-12} \text{s}$

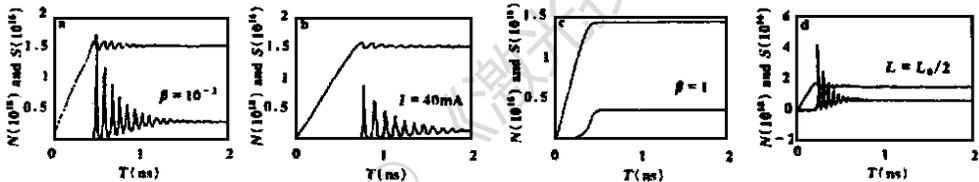


Fig. 1 Time evolution of the carrier and photon population exhibiting relaxation oscillation

我们进一步考虑了注入电流、自发辐射因子和激光器的腔长对于光子数密度和载流子数密度动态特性的影响。模拟仿真结果分别由图 1b~ 图 1d 给出,结果表明:(1)降低注入电流 $I = 40 \text{mA}$,导致激光器弛豫过程变长,弛豫振荡频率降低,同时延迟时间增加(从 0.5ns 增加到 0.75ns),光子数密度也随之而降低,尤其是在自发辐射因子较大时效果更为显著。(2)保持注入电流 $I = 60 \text{mA}$,改变自发辐射因子。对于理想的封闭腔而言, $\beta = 1$,延迟时间消失,无弛豫振荡,表现为光输出与注入电流呈线性增加关系^[5],即所谓的“无阈值”行为。相比之下,载流子数密度降低的同时光子数密度得到增加。由此可见,增加自发辐射因子和降低非辐射衰减率将有利于提高微腔激光器的光输出,这是由于自发辐射的寿命远比非辐射的寿命短,所以,增加自发辐射也可以进一步降低非辐射损耗的影响。(3)在微腔结构中,随着腔长的减少,延迟时间缩短(从 0.5ns 缩短到 0.25ns),弛豫振荡频率增大,弛豫过程缩短(从 1.7ns 缩短到 0.8ns)。所以,微腔结构更有利于高速调制,反映出短腔结构与长腔结构有着明显的区别。上述分析表明,提高注入电流、增加自发辐射因子、减小腔长,有利于提高弛豫振荡频率,拓宽调制带宽,从而改善了微腔激光器的高频调制特性。

2.2 动态调制特性模拟分析

计算模拟中,我们采用 $I = I_0 [1 + \sin(2\pi f t)]$ 的正弦波调制, I_0 是调制信号的幅度,当调制

频率为 $f = 10\text{GHz}$, 动态调制结果反映在图 2 中, 从图 2a, 图 2b 可以看出, 当 $\beta \ll 1$ 时 ($\beta = 10^{-3}$), 存在阈值, 表明腔模光子数密度只有在阈值以上才随着泵浦的增加而迅速增加, 这正反应出随着泵浦的增加仍然有一个从自发辐射向受激辐射的转换过程。动态调制时, 激光器存在有明显的弛豫振荡、延迟时间。而当自发辐射增加时, 从非激射向激射态的转变过程变得平缓, 即使阈值点变得平滑, 表明阈值电流随着 β 的增加而降低。特别是 $\beta = 1$ 的情形, 则表现出完全不同的特性, 弛豫振荡、延迟时间消失, 动态调制深度远大于低 β 的调制深度, 激光器具有更高的响应速度, 光发射过程被“增强自发辐射”控制。从物理机制而言, 在 β 很大并具有高品质因数的微腔中, 自发辐射的光子被保留在腔内, 可使自发辐射成为可逆性过程, 即腔内的原子有更多的机会与它们自己发出的光子相耦合, 光子的再吸收、再发射形成光子循环, 从而有可能产生相干的光子而出现无粒子数反转的激射。同样, 在图 2c, 图 2d 中, 反映出阈值载流子数密度随 β 的增加而降低, 导致阈值电流降低, 当达到 $\beta = 1$ 时, 阈值载流子数密度达到最小, 不存在当泵浦光达到一定强度时输出光强突然迅速增加的现象。

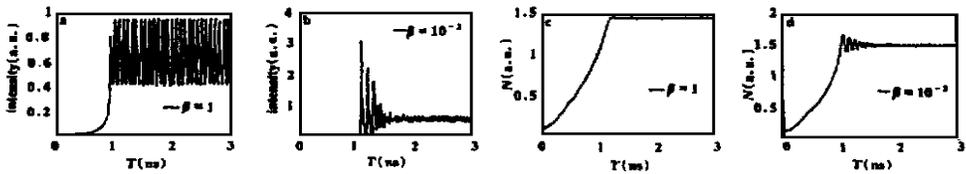


Fig. 2 Dynamic modulation response characteristics of microcavity lasers

3 结 论

从理论上的定量分析和仿真描述可见, 采用传统速率方程的表示形式, 对于一般性理论的分析带来便利, 进一步强化了对速率方程物理含义的理解。在动态特性中, 着重讨论了微腔激光器的瞬态响应及调制特性。直接仿真结果表明: 提高注入电流、增加自发辐射因子和减小腔长, 将有利于增加微腔激光器的弛豫振荡频率、缩短延迟时间、增加动态调制深度, 具有更高的响应速度。同时, 也提高了微腔激光器的光输出, 反映出短腔结构与长腔结构有着明显的区别。对理想的封闭腔而言, 延迟时间消失, 相应的弛豫振荡也随之消失, 光输出与注入电流呈线性增加关系, 即所谓的“无阈值”行为。为综合考虑降低微腔激光器的阈值电流、提高输出功率的要求、改善高频调制特性和优化器件结构参数、获得最佳的器件性能和应用条件提供了理论依据。

参 考 文 献

- 1 Deppe D G, Huffaker D L. *OPN Optics & Photonics News*, 1998; 9(1): 30
- 2 Yamamoto Y, Slusher R E. *Phys Today*, 1993; (6): 66~ 73
- 3 潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 *et al.* *物理*, 1999; 28(4): 210~ 216
- 4 Yokoyama H, Brorson S D. *J A P*, 1989; 66(10): 4801~ 4805
- 5 潘 炜, 张晓霞, 罗 斌 *et al.* *量子电子学报*, 1999; 16(4): 324~ 328, 337
- 6 张存州, 潘潇宁, 张光寅. *光学学报*, 1995; 15(10): 1297~ 1301
- 7 Agrawal G P, Dutta N K. *Semiconductor lasers. Second edition*, New York: VanNostrand Reinhold Company, 1993

作者简介: 张晓霞, 女, 1961年9月出生。副教授, 博士研究生。现从事半导体微腔激光器和量子阱激光器的研究。