

微腔激光器数码调制及其 光纤传输的研究*

赵红东^{1,2} 林世鸣³ 张存善² 王守武³ 沈光地¹

¹ 北京工业大学电子工程学系 北京 100022; ² 河北工业大学应用数理系 天津 300130;
³ 中国科学院半导体所集成光电子学国家重点实验室 北京 100083

提要 从微腔半导体激光器速率方程出发,分析讨论了微腔激光器的脉码调制特性,发现微腔具有较规则的脉冲响应,可以减少误码率;自发发射因子为 0.1 的微腔,具有脉码率高达 50 Gbit/s 良好的调制眼图,微腔激光器在光互联中将有着广泛的应用前景。模拟了以微腔激光器为光源的光纤通信系统,给出脉码率为 10 Gbit/s 传输不同距离的接收眼图,证明能够实现 60 km 的传输。

关键词 半导体微腔, 光纤传输, 眼图

人们对垂直腔面发射半导体激光器进行降低阈值及实现集成化研究的同时,对其频谱特性和瞬态特性进行了探讨^[1~4];1991 年 G. Björk 等分析了小信号微腔激光器的带宽^[2,3],1994 年 J. W. Scott 等给出了垂直腔面发射激光器在室温下具有 8.5 GHz 调制带宽^[1]的实验结果。我们也讨论了微腔瞬态特性,证明增大自发发射因子,可以缩短弛豫时间和减小张弛振荡,并且输出光功率有所增加^[4]。本文继文献[4]之后,应用数值计算,结合眼图,讨论了微腔大信号脉码调制特性,并模拟了面发射微腔激光器光纤通信系统。

1 理论机制

1.1 微腔激光器模型

参考[2~4]并考虑到有源区内的限制作用,给出载流子密度 n , 有源区内光子数 p 的速率方程

$$\frac{dn}{dt} = \frac{I}{qV} - \left[\frac{1-\gamma}{\tau_{sp}} + \frac{\gamma}{\tau_{sp}} \right] n - \frac{n}{\tau_{nr}} - \frac{gp}{V} \quad (1)$$

$$\frac{dp}{dt} = - \left[\frac{1}{\tau_{ph}} - \Gamma g \right] p + \frac{\gamma n V \Gamma}{\tau_{sp}} \quad (2)$$

其中 γ 为自发发射因子, τ_{sp} 为载流子自发辐射复合寿命, τ_{nr} 为载流子非辐射复合寿命, Γ 为限制因子, g 为腔内单位时间增益。由[2,3,5]得

$$g = g'(n - n_e) \quad (3)$$

* 国家自然科学基金和中国科学院半导体所集成光电子学国家重点实验室开放课题资助项目。

其中 n_e 为透明载流子密度, 考虑到当微腔激光模式的平均光子数为 1 时, 自发发射率等于受激发射率, 可以得到增益斜率 $g' = \gamma V / \tau_{sp}$ 。

首先模拟偏置电流注入激光器, 再模拟随机脉码注入电流, 使用龙克-库塔(Runge-Kutta)方法可以从方程(1), (2)解出微腔激光器的瞬态响应, 响应曲线叠加在一起就可以得到眼图, 近邻对脉码影响最为重要, 本文只考虑近邻影响。为便于与实际对比, 参考[7]给出输出光功率与光子数的关系

$$P_{out} = \hbar\omega_0 v_g \frac{1}{2L} p \ln \left[\frac{1}{R} \right] \quad (4)$$

其中 ω_0 为光中心频率, v_g 为群速, 微腔面发射激光器出射光端面反射率为 R , 衬底对应镜面近似认为全反射。

1.2 数值模拟微腔作为光源的光纤通信系统

我们模拟微腔作为光源的光纤通信系统, 由信号源调制微腔激光器输出光脉冲经聚焦耦合进入光纤, 通过光纤传输再耦合到探测器, 滤波后变成电信号。光纤通信中单模光纤的色散是决定脉码率的主要因素, 耦合器件及光纤的损耗只是将信号变弱, 不会引起脉冲变宽, 为了使问题简化, 只考虑光纤的色散。设光源在 $Z = 0$ 处, 经单模光纤传输, 距光源 Z 点的光场可由傅里叶积分给出^[6,7]

$$\Psi(z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(\omega) \exp[i(\omega t - \beta z)] d\omega \quad (5)$$

其中 $\Phi(\omega)$ 为光场频谱, β 为光纤传播常数, 在单模光纤中可以写成^[6,7]

$$\beta = \beta_0 + \frac{1}{v_g}(\omega - \omega_0) - \frac{\lambda^2 D}{4\pi c}(\omega - \omega_0)^2 \quad (6)$$

其中 β_0 为中心频率 ω_0 的传播常数, 常数 D 定义为 $D \equiv (\partial/\partial\lambda)(1/v_g)$ 。将(6)式代入(5)式可以求得 Z 点的光场函数。

由文献[6]模拟了具有下面频率响应的滤波器(Low pass second-order Butterworth filter)

$$H(\omega - \omega_c) = \frac{\omega_c^2}{\omega_c^2 - (\omega - \omega_c)^2 + i\sqrt{2}(\omega - \omega_c)\omega_c} \quad (7)$$

其中 ω_c 为截止频率, 并选取 $\omega_c = 2\pi \times 0.75B_R$, B_R 为比特率。

模拟电信号调制激光器, 输出光经过公式(5)传输色散和公式(7)滤波后, 变换到时间空间便可以模拟得到接收信号。

2 数值计算与讨论

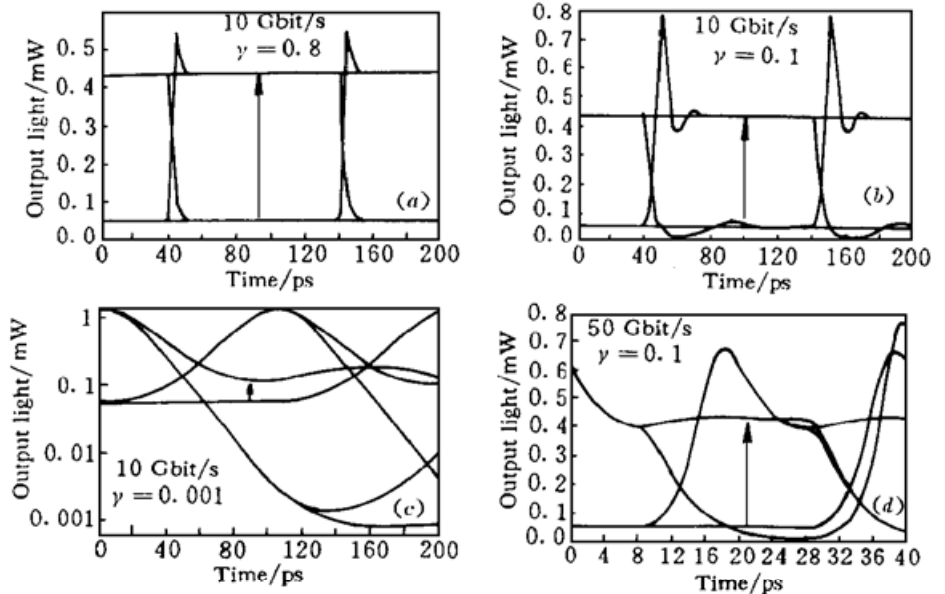
2.1 微腔激光器数码调制特性的讨论

严格地讲, 自发辐射复合载流子寿命 τ_{sp} 和自发发射因子 γ 有关, 随着自发发射因子 γ 增加 τ_{sp} 也会相应地变化, 但本文近似地认为 τ_{sp} 不变^[2,3]。考虑到实际 InP/InGaAsP 构成的微腔激光器, 选择如下参数: $n_e = 1.37 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $V = 10^{-12} \text{ cm}^3$, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$, $\tau_{sp} = 2 \text{ ns}$, 光子寿命 $\tau_{ph} = 2.5 \text{ ps}$, $\tau_{nr} \gg \tau_{sp}$, 材料吸收系数 $\alpha_{in} = 20 \text{ cm}^{-1}$, 限制因子 $\Gamma = 0.5$ 。

由于不同的微腔中自发发射进入模式的光子数差异很大, 致使在相同的注入电流下, 输出激光功率不同, 在注入电流很小输出光功率小于 1 mW 时表现尤为明显^[2~4]。图 1 给出不同自

发射因子的激光器脉码响应眼图, 图 1 (a), (b), (c) 脉冲的调制脉码率为 10 Gbit/s, 图中箭头表示眼图张开角的大小, 眼图的张开区域越大表明系统产生误码率越小。图中可以看出自发发射因子较大的微腔响应速度增加, 张弛振荡减小^[5]; 自发发射因子为 0.001 的微腔在 10 Gbit/s 调制时, 眼图张开角很小, 而自发发射因子为 0.1, 0.8 的微腔有良好的脉码响应。对其它的调制脉码率也进行了模拟, 发现自发发射因子为 0.1 微腔的调制速率高达 50 Gbit/s (图 1 (d))。

图 1 微腔激光器响应眼图
(a) $\gamma = 0.8$; (b) $\gamma = 0.1$; (c) $\gamma = 0.001$; (d) $\gamma = 0.1$ 。眼图中曲线为数码 100, 101, 001, 110, 010, 011
Fig. 1 Response eye diagrams of microcavity lasers when (a) $\gamma = 0.8$; (b) $\gamma = 0.1$; (c) $\gamma = 0.001$ and (d) $\gamma = 0.1$. The curves in the eye diagram are codes: 100, 010, 001, 110, 010 and 011



自发发射因子很小的普通半导体激光器的调制机制与自发发射因子较大的微腔激光器有所不同, 使调制速率差别较大。普通激光器在大信号调制时, 注入的载流子经过自发发射的弛豫过程, 再经过激光腔多次振荡放大, 输出激光才能跟随电流的变化, 因而响应速度相对较慢。微腔激光器激光模式内直接来源于自发发射的光子较多, 这些较多自发发射光子被放大及再放大产生的激光光子数远远多于普通激光器, 因而有助于提高响应速度。另外, 普通激光器进入激光模式内的自发发射光子数很少, 其他的自发发射可视为一种损耗, 使有源区内载流子随电流增加的速率减慢, 从而降低了响应速度; 而在微腔激光器中, 微腔效应一方面对进入激光模式的自发发射有增强作用, 同时又对其他模式的发射有抑制作用, 减少了无谓的损耗, 因而有源区内载流子随电流增加得较快, 这无疑进一步提高了响应速度。还有, 微腔激光器的激射阈值电流较低, 这意味着在较低的注入电流水平下, 激光器便可以激射, 这有利于减少所需的注入时间并提高响应速度。总之, 微腔激光器在电流调制下, 载流子积累速度和输出光响应速率都得到提高, 微腔激光器实现了较高速率的调制, 这为解决高速光互联提供了可能。

2.2 微腔激光器在光纤通信中的应用

10 Gbit/s 为现阶段研究光纤通信系统调制脉码率的指标, 因此我们讨论以微腔激光器作为光源, 以 10 Gbit/s 为调制脉码率的光纤通讯系统。光纤通讯中激光器在大信号内调制时, 激光器不规范的脉冲输出及光纤的色散使远距离接收的眼图发生变化, 这样有必要全计算机模拟光纤通信系统, 它更能准确地反映微腔数码调制特性。光纤色散中常数 $D = 17 \text{ ps/nm/km}$ ^[6,7], 且只模拟突变数码。自发发射因子为 0.1 的微腔激光器在速率为 10 Gbit/s 的电流调制下, 产生的脉码形状已经具有良好形状 (图 1 (b)), 微腔的调制频谱自然优于普通激光器, 这是它能实现高数码调制及光脉冲传输的主要原因。由图 2 可以看出: 速率为 10 Gbit/s 的电流调制自发发射因子为 0.1 微腔激光器产生的光脉码, 完全能实现 60 km 的传输, 因此微腔激光器适应于高速光纤通信。

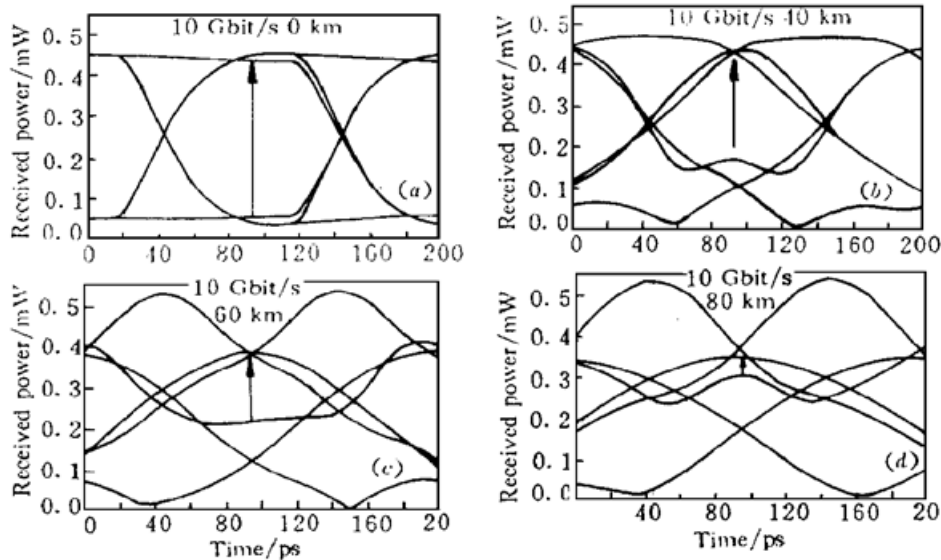


图2 10 Gbit/s 调制微腔激光器输出光传输 (a) 0 km; (b) 40 km; (c) 60 km 和 (d) 80km 的接收眼图

Fig. 2 Received eye diagrams with microcavity lasers 10 Gbit/s numerical codes modulated after transmission of (a) 0 km; (b) 40 km; (c) 60 km and (d) 80 km

参 考 文 献

- 1 J. W. Scott, B. J. Thibeault, C. J. Mahon *et al.*. High modulation efficiency of intracavity contacted vertical cavity lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1994, **65**(12): 1483~ 1485
- 2 G. Bjørk, Y. Yamamoto. Analysis of semiconductor microcavity lasers using rate equations. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1991, **27**(11): 2386~ 2396
- 3 Y. Yamamoto, S. Machida, G. Bjørk. Micro-cavity semiconductor lasers with controlled spontaneous emission. *Optical and Quantum Electronics.*, 1992, **24**(2): S215~ S243
- 4 Zhao Hongdong, Lin Shiming, Wang Shouwu *et al.*. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1996, **25**(Z1): 359 (in Chinese)
- 5 K. Petermann. Laser diode modulation and noise. Tokyo, Kluwer Academic Publishers, 1988. 58
- 6 P. J. Corvini, T. L. Kock. Computer simulation of high-bit-rate optical fiber transmission using single-frequency lasers. *J. Lightwave Technol.*, 1987, **5**(11): 1591~ 1595
- 7 G. P. Agrawal, C. H. Henry. Modulation performance of a semiconductor laser coupled to an external high-Q resonator. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2): 134~ 142

Numerical Code Modulation of Semiconductor Microcavity Lasers and Fiber Transmission

Zhao Hongdong^{1,2} Lin Shiming³ Zhang Cunshan² Wang Shouwu³ Shen Guangdi¹

¹Department of Electronics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022

²Department of Applied Mathematics and Physics, Hebei University of Technology, Tianjin 300130

³National Integrated Optoelectronics Laboratory, Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

Abstract We have analyzed numerical code modulation of semiconductor microcavity lasers by using rate equations. It is found that microcavity lasers have high-speed pulse-code response and minimum error probability. An excellent eye diagram can be obtained with the microcavity lasers modulated by a 50 Gbit/s current if their spontaneous emission factors equal 0.1. The lasers will open vast vistas in future optical connection. Furthermore, we have simulated fiber communication systems with microcavity lasers as the light sources 10 Gbit/s numerical codes modulated and have given the received eye diagrams after transmission of different distances. It is proved that the system can stand for 60 kilometers' transmission.

Key words semiconductor microcavity, fiber transmission, eye diagram