

半导体激光器的微腔结构调制及其 脉码在光纤中的传输^{*}

王英龙¹ 丁文革¹ 郑云龙¹ 孙 江¹ 李双九¹ 尚 勇²

(1 河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2 河北省自然科学基金办公室, 石家庄 050000)

摘要: 采用腔量子电动力学(QED)方法, 定量讨论了平面结构微腔半导体激光器的自发发射特征物理量随腔结构的变化规律. 在微腔半导体激光器自发发射因子调制、自发发射寿命调制以及一些实验依据的基础上, 提出了微腔结构调制方法. 数值模拟了其脉码在光纤中的传输图形. 结果表明, 微腔结构调制方法在提高脉码比特率方面优于同参数下的电流调制方法.

关键词: 半导体激光器; 微腔结构调制; 腔量子电动力学

PACC: 4255P; 1220; 0365

中图分类号: O433.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)01-0178-05

1 引言

Purcell 曾预言微腔结构可以改变处于其中的激发原子的自发发射寿命和自发发射因子^[1]. 这一断言被相应的实验研究所证实^[2]. Björk 等人^[3]视自发发射为真空场涨落扰动下的受激发射, 考虑具有 Bragg 反射镜的平面微腔结构, 以量子阱的偶极子作为自发发射源, 给出了几个典型结构参数下自发发射的辐射强度角向分布、自发发射因子和相对寿命的值.

微腔半导体激光器的许多优良特性使之得到广泛关注^[4,5]. 1992 年, Yamamoto 等人^[6]提出了微腔半导体激光器的 β (自发发射因子)调制的设想, 1998 年, 我们曾提出并分析了 τ_p (自发发射寿命)调制和 τ_p (光子寿命)调制方法^[7]. 而且研究表明, 这三种调制方法的调制带宽要比同参数的电流调制带宽大. 但同时我们也考虑到, 自发发射因子、自发发射寿命和光子寿命的变化是相互影响的, 因而把信息加于某一量的单独调制是很难实现的.

1997, Sugihwo 等人^[8]的低阈值连续可调腔结构的垂直腔面发射激光器的研制成功, 使我们考虑是否能将信息加在腔结构上, 自发发射因子、自发发射寿命都发生变化, 即所谓微腔结构调制.

我们首先在文献[3]的基础上, 定量讨论了各腔结构参数对微腔半导体激光器的自发发射特征物理量的影响, 得出其变化规律; 然后研究了微腔结构调制的脉码输出以及脉码在光纤中的传输特性. 为微腔半导体激光器的设计及光纤通信系统的建立提供了理论依据.

2 平面微腔半导体激光器的腔结构与自发发射的关系

平面微腔半导体激光器的截面结构如图 1 所示. 位于腔中心位置的薄量子阱的激发跃迁作为自发发射源, 微腔镶于两 Bragg 反射镜之间, 整个结构被两个很大的平面介质所包围. 图中 n_l, n_r, L_l, L_r 分别为左右介质的折射率和长度, n_1, n_2, L_1, L_2 分别为 Bragg 反射镜两层介质的折射率和长度, 而 n_c, L_c 为腔介质的折射率和长度.

^{*} 河北省自然科学基金资助项目(No. 601084)

王英龙 男, 1965 年出生, 副教授, 主要从事微腔半导体激光器及其量子理论研究.

2001-03-26 收到, 2001-07-13 定稿

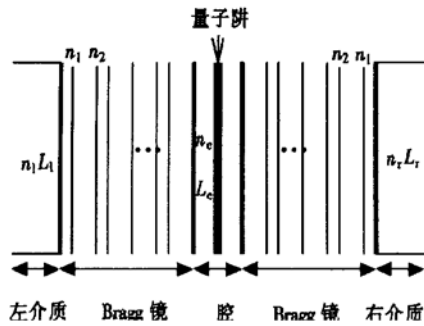


图1 平面微腔半导体激光器截面图

Fig. 1 Schematic 2D structure of planar microcavity semiconductor laser

为讨论方便, 取腔面法向为极轴建立球坐标系 (r, θ, ϕ) . 按照文献[1]的思想, 先计算每一层介质的传播矩阵以及每一分界面上的电场传递矩阵, 数值模拟得到不同参数下辐射强度随方向角 θ 变化曲线; 再做积分运算便可计算出对应不同结构的自发发射因子和自发发射寿命.

我们数值模拟了腔结构的变化对微腔半导体激光器的自发发射特征物理量的影响.

固定 $n_c = n_1 = 2.96, n_2 = n_r = n_t = 3.6, L_1 = L_2 = \lambda/4$, Bragg 镜的周期数为 10, 自发发射因子和自发发射寿命随腔长 L_c 的变化曲线示于图 2(a) 和(b). 图中横轴表示腔长, 其步长取为 $\lambda/4$, 纵轴分别表示自发发射因子 β 和相对自发发射寿命 τ_{sp}/τ_{sp0} , τ_{sp0} 为均匀介质情况下的自发发射寿命. 可见, 在其它参数固定的情况下, 腔长的改变对自发发射因子和自发发射寿命影响很大, 随着腔长的增加, 自发发射特征物理量呈周期性变化. 当腔长为 $\lambda/2$ 的奇数倍时, 自发发射因子达到峰值; 大腔长时, 腔长对自发发射特征物理量的影响减弱, 并趋于常规半导体激光器的结果, 自发发射因子很小.

图 2 参数下, 取 $L_c = \lambda/2$, 改变腔折射率 n_c 由 1.3 至 3.0, 步长为 0.1. 我们发现随腔折射率 n_c 增大, 相对自发发射寿命单调减小, 但自发发射因子在 $n_c = 1.7$ 附近出现一峰值. 这种结构下, 宜选取 $n_c = n_1$ 的值为 1.7 左右, 可以增大自发发射因子至 0.8 以上.

我们还模拟了 $L_c = \lambda/2$ 时图 2 参数下自发发射特征物理量随 Bragg 镜周期数 (由 1 到 70) 的变化情况, 结果表明, 在周期数为 45 时 β 出现最大值约 0.85, 对应 τ_{sp}/τ_{sp0} 有最小值约 0.2; 当周期数较大时, 均趋于平稳, β 趋于很小. 对 $L_c \neq \lambda/2$ 情况, 自发

发射因子随 Bragg 镜周期数迅速单调递减.

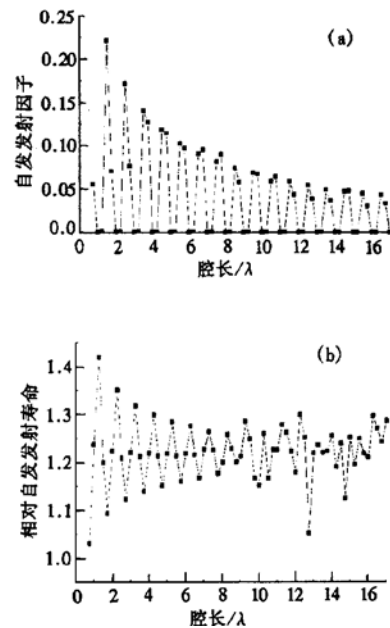


图2 (a) 自发发射因子与腔长的关系曲线; (b) 相对自发发射寿命与腔长关系曲线

Fig. 2 (a) Spontaneous emission factor versus cavity length; (b) Relative spontaneous emission lifetime versus cavity length

从固定腔长 $L_c = \lambda/2$, 变化 Bragg 镜层长的结果可以看出, Bragg 镜层长取 $\lambda/4$ 的奇数倍为自发发射因子 β 的极大值, 但随着 Bragg 镜层长的增大, 此极大值逐渐减小.

当然, 自发发射还有赖于折射率搭配的情况, 但在实际微腔结构调制中难于做到, 不做专门讨论.

与文献[6]的实验结果对比, 发现理论得到的不同参数下辐射强度随方向角 θ 的变化曲线与该文献给出的相应实验结果定量相符, 进而表明在此基础上计算得到的自发发射特征物理量的变化规律的正确性.

3 微腔结构调制的脉码输出

因携带信息的物理量的不同, 微腔半导体激光器的调制方法分为电流 I 调制、 β 调制、 τ_{sp} 调制和 τ_p 调制. 我们已经对它们的调制特性进行了分析^[6,7], 结果表明, 后三种方法的调制带宽比同参数下的电流调制带宽要大. 另外, 调制信号有模拟和数字之

分, 数字信号输出有利于系统抗干扰性能的提高.

但是, 通过改变腔结构以实现单纯的 β 调制、 τ_{sp} 调制和 τ_p 调制是不可能的. 前面给出了激光器的自发发射因子和寿命与腔结构的关系. 基于此, 我们讨论微腔结构调制的脉码输出特性.

可以通过变化腔长、腔折射率、Bragg 反射镜的层长以及反射镜周期数来调整微腔半导体激光器的微腔结构. 由于腔折射率、Bragg 反射镜的层长以及反射镜周期数的变化难以在调制过程中实现, 故我们以将信息加在腔长的变化上为例, 讨论微腔结构调制的脉码输出.

假定腔长取两种状态, λ 和 $\lambda/2$. 调制信号加于腔长上, 使腔长变化如图 3 所示. 其中, 时间以 τ_p 归一.

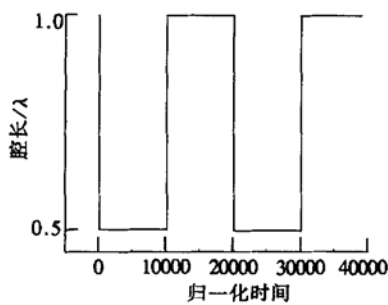


图 3 腔长 L_c 随时间的变化

Fig. 3 Cavity length versus time

对应上节参数, 两种状态相应的自发发射因子和寿命分别为 $\beta_1 = 2.5 \times 10^{-5}$, $\tau_{sp1} = 1.24\tau_{sp0}$; $\beta_2 = 0.299$, $\tau_{sp2} = 1.14\tau_{sp0}$. 以 $\frac{qN_0V}{\tau_{sp0}}$ 为单位取注入电流偏置 $I = 1$, 其它参数取为自发发射寿命 $\tau_{sp0} = 10^{-9}$ s、透明载流子浓度 $N_0 = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、有源区体积 $V = 10^{-12} \text{ cm}^3$ 、光子寿命 $\tau_p = 10^{-12}$ s. 计算中忽略结构变化引起的光子寿命的变化.

将图 3 腔长对应的自发发射因子和寿命随时间的变化情况作为注入, 代入速率方程中, 得到其瞬态光输出响应, 如图 4 所示. 可见, 在腔长突变点处, 相应光输出出现储存和释放光子的暂态过程, 但没有张弛振荡发生. 暂态过程的前沿与后沿分别大约持续 $2500\tau_p = 2.5 \times 10^{-9}$ s 及 $1150\tau_p = 1.15 \times 10^{-9}$ s, 要求腔长的变化频率小于 $2.74 \times 10^8 \text{ Hz}$ (以便光子能得到充分的积累和释放). 注意光输出与注入反相, 且图中光子数以 $\frac{\tau_p N_0 V}{\tau_{sp0}}$ 归一.

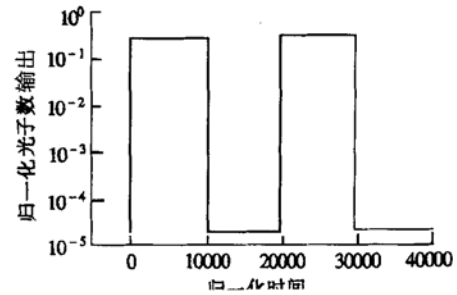


图 4 当 $I = 1$ 时激光器光脉码输出

Fig. 4 Pulses output of laser when $I = 1$

上述参数下, 改变两种状态的腔长, 进而对应的自发发射因子和寿命发生变化. 取 $L_c = \lambda/2$ 及 100λ , 两种状态相应的自发发射因子和寿命分别为 $\beta_1 = 9.4 \times 10^{-7}$, $\tau_{sp1} = 1.29\tau_{sp0}$; $\beta_2 = 0.299$, $\tau_{sp2} = 1.14\tau_{sp0}$. 其相应光输出与图 4 比较可知, 暂态过程持续时间变长. 也就是说, 两状态自发发射特征物理量差变大, 对激光器脉码的输出不利, 进而不利于提高调制频率.

取注入电流偏置 $I = 1.5$, 其它参数同图 4, 光子数输出与归一化时间的关系曲线如图 5 所示. 可以表明, 注入电流偏置增大, 在上升沿将出现更大的过冲现象, 但调制频率增大.

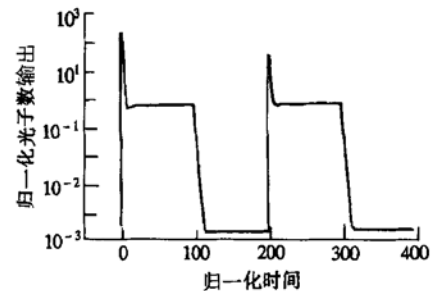


图 5 当 $I = 1.5$ 时激光器光脉码输出

Fig. 5 Pulses output of laser when $I = 1.5$

为了和相应电流调制的结果比较, 我们取 $\beta = 0.299$, $\tau_{sp} = 1.14\tau_{sp0}$, 但两状态的归一化电流分别为 10^{-4} 和 1, 其它参数与图 4 相同, 以便两种调制方法的光输出二进制状态相同, 得到电流调制光输出的结果如图 6 所示. 与图 4 比较表明, 在调制脉码频率方面, 微腔结构调制要优于电流调制.

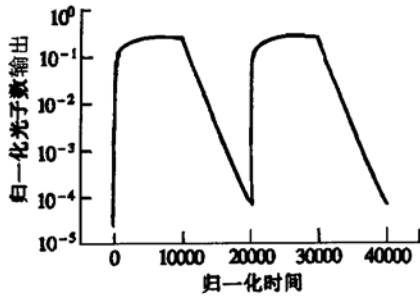


图6 电流调制时激光器光脉码输出

Fig. 6 Pulses output of laser for current modulation

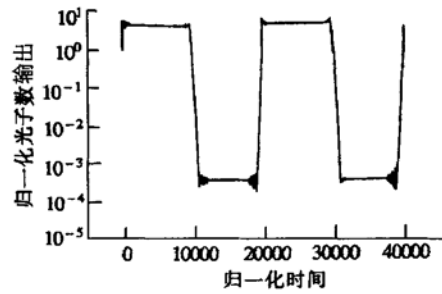


图7 传输 338km 情况

Fig. 7 The results after 338km

4 微腔半导体激光器的脉码在光纤中的传输特性

假定光源位于 $z = 0$ 处, 线性正常色散光纤单模光纤任一点 z 处的光场可由傅里叶积分给出.

$$E(z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(0, \omega) e^{i[\omega t - k(\omega)z]} d\omega \quad (1)$$

z 是沿光纤轴向的坐标, 传播常数 $k(\omega) = k_0 + k_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}k_2(\omega - \omega_0)^2$, 其中: $k_0 = k(\omega_0)$, $k_1 = \frac{\partial k}{\partial \omega} = v_g^{-1}$, $k_2 = \frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2} = -\frac{\lambda_0}{\omega} \times \frac{dV_g^{-1}}{d\lambda} = -\frac{\lambda_0}{\omega} D$. 这里, v_g 为群速, D 为群速色散. 引入归一化变量 $\hat{z} = \frac{|k_2|}{T^2} z$, $\hat{t} = \frac{t - z/v_g}{T}$, 其中 T 为时间归一化参数. 注入脉冲来自于光源的脉冲输出:

$$E(0, \hat{t}) = \sqrt{2\gamma p \hbar \omega_0 / \epsilon} \quad (2)$$

式中 ϵ 为光纤介质介电常数; γ 为耦合系数.

将微腔半导体激光器的脉码输出做快速傅里叶变换, 求出其频谱函数 $\tilde{E}(0, \omega)$, 再由 (1) 式做快速傅里叶反变换, 可以得到 z 处的场分布.

将图 4 光脉冲输入色散光纤, 它对应约 0.1 Gbit/s 的数码调制情况, 假定光纤色散为 $D = 16 \text{ ps/nm/km}$, 取时间归一化参数为 $T = \tau_p = 10^{-12} \text{ s}$, 图 7 为传输 338km 后的光场情况.

我们也模拟了相应电流调制情况下的脉码传输, 其脉码传输比特率不及微腔结构调制结果.

大量数值模拟表明, 同样光纤参数和注入脉码比特率下, 注入光纤的脉码二进制光强差越大, 脉冲前后沿的过渡期越短, 无失真传输的距离就越长.

5 讨论

提高脉码的传输比特率, 减小误码率是光纤通信的努力方向. 这无疑对微腔半导体激光器的张弛振荡、与腔结构变化对应的激射延迟等瞬态输出特性提出了要求, 瞬态响应的惰性越小, 输出脉码二进制光强差越大, 越有利于提高光纤通信的质量. 根据微腔半导体激光器的速率方程, 自发发射因子 β 、自发发射寿命 τ_p 影响着激光器的瞬态输出^[9], 由文献 [9] 的图 2 可以看出, 其它参数不变时, β 越大、 τ_p 越小则激光器光输出越大. 高态的 β 尽量大、 τ_p 尽量小, 而低态的 β 尽量小、 τ_p 尽量大, 可以实现输出脉码二进制光强差大的要求, 但过大的 β 、 τ_p 的状态差又加大了光响应的惰性. 为提高无畸变传输的距离, 要兼顾到这两方面的要求. 选择微腔结构中的什么参量(腔长、腔折射率、Bragg 反射镜的层长以及反射镜周期数)携带信息, 选择什么状态作为二进制的数值尤为重要. 根据我们的结果, 若技术上能够实现的话, 调制腔介质的折射率有一定的优越性, 不仅自发发射因子可以由 10^{-7} 到 0.85 大范围变化, 另外, 一定范围内, 还有望实现模拟调制.

6 结论

通过以上理论分析和讨论, 我们得到下述结论:

(1) 将信息加于腔长、腔折射率、Bragg 反射镜的层长以及反射镜周期数等腔结构参数上, 可实现半导体激光器的微腔结构调制.

(2) 在调制脉码比特率方面, 微腔结构调制要优于同参数的电流调制.

(3) 选择微腔结构中的什么具体参量携带信息,

选择什么状态作为二进制的数值尤为重要. 总的原则是, 要兼顾输出脉码二进制光强差和光响应的惰性这两方面的要求, 以提高在光纤中无畸变传输的距离.

参考文献

- [1] Purcell E M. Phys Rev, 1946, 69: 681
- [2] Iga K, et al. Electron Lett, 1987, 23: 134
- [3] Björk G, Machida S, Yamamoto Y, et al. Phys Rev A, 1991, 44(1): 669
- [4] Zheng Houzhi. Chinese Journal of Semiconductors, 1997, 18(7): 481(in Chinese)[郑厚植. 半导体学报, 1997, 18(7): 481]
- [5] Kang Xuejun, Lin Shiming, et al. Chinese Journal of Semiconductors, 1996, 17(11): 873(in Chinese)[康学军, 林世鸣, 等. 半导体学报, 1996, 17(11): 873]
- [6] Yamamoto Y, Machida S. Opt Quantum Electron, 1992, 24: S215
- [7] Zheng Yunlong, Wang Yinglong, Ding Wenge. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(11): 987(in Chinese)[郑云龙, 王英龙, 丁文革. 光子学报, 1998, 27(11): 987]
- [8] Sugihwo F, Larson M C, Harris J S Jr. Appl Phys Lett, 1997, 70: 547
- [9] Zheng Yunlong, Wang Yinglong, Ding Wenge. Chinese Journal of Quantum Electronics, 1991, 16(3): 224[郑云龙, 王英龙, 丁文革. 量子电子学报, 1996, 16(3): 224]

Microcavity Structure Modulation of Semiconductor Lasers and Its Pulses Transmisson in Fibre^{*}

Wang Yinglong¹, Ding Wenge¹, Zheng Yunlong¹, Sun Jiang¹, Li Shuangjiu¹ and Shang Yong²

(1 College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

(2 The Office of Hebei Natural Science Foundation, Shijiazhuang 05000, China)

Abstract: The cavity quantum electrodynamics (QED) method is adopted to discuss quantitatively the variation of spontaneous emission characteristic quantities versus the cavity structures in planar microcavity semiconductor lasers. Basing on the spontaneous emission factor modulation and spontaneous emission lifetime modulation and some experiments on microcavity semiconductor laser, a method on microcavity structure modulation is proposed. Its pulses transmission in fibres are simulated numerically. The results show that this modulation has an advantage over the current modulation in pulse bit rate.

Key words: semiconductor laser; microcavity structure modulation; cavity quantum electrodynamics

PACC: 4255P; 1220; 0365

Article ID: 0253-4177(2002)02-0178-05

^{*} Project supported by Hebei Natural Science Foundation(No. 601084)

Wang Yinglong male, associated professor, was born in 1965. His research interest is in micro-cavity semiconductor lasers and its quantum theory.

Received 26 March 2001, revised manuscript received 13 July 2001

©2002 The Chinese Institute of Electronics