

文章编号: 1001-3806(2005)03-0281-03

两段式 DFB 半导体激光器模式特性研究

李宜峰, 罗斌*, 潘伟, 熊杰

(西南交通大学 计算机与通信工程学院, 成都 610031)

摘要: 利用耦合波方程, 在引入平均场的方法后, 得到了一种新的关于两段式 DFB 激光器的模式区分方法。并利用此法, 分析了激光器的模式特性和波长调谐特性。计算结果与实验较好地吻合, 说明了该方法可以有效地分析两段式 DFB 激光器的不同模式。

关键词: 两段式 DFB 激光器; 模式特性; 载流子浓度; 激射波长

中图分类号: TN 248.4 文献标识码: A

Investigation on mode characteristics of two-segment DFB lasers

LI Yifeng, LUO Bin, PAN Wei, XIONG Jie

(School of Computer & Communications Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract Based on coupling-wave equations, a new formula about the mode discrimination of two-segment DFB lasers was obtained after applying the mean-field method. The mode characteristics and the wavelength tuning characteristics were analyzed with the formula. The calculating results accord with the experimental data, which shows the effectivity of this formula to study the different modes of DFB lasers.

Key words two-segment DFB lasers; mode characteristics; carrier density; lasing wavelength

引 言

随着光通信技术的发展, 具有分布反馈 (distributed feedback, DFB) 结构的激光器成为高速大容量光通信系统中必不可少的器件。多电极 DFB 激光器作为一种可调谐半导体激光器, 引起了人们的极大重视, 并进行了很多的理论和实验研究。其中 K KUCHI 等人提出的传输矩阵 (TMM) 模型^[1], 可以有效地分析两段或多段式 DFB 激光器的不同激射模式。国内沈丹勋等人就是在传输矩阵模型的基础上, 对两段式 DFB 激光器不同模式条件下的阈值激射作了详细的研究^[2]。

通过比较理论和实验结果^[3], 发现在两段式 DFB 激光器中, 每段的载流子分布随腔长的变化并不大。故可设载流子浓度在腔内是均匀分布的。基于这一考虑, 笔者对光子数分布采用耦合波方程, 载流子浓度用平均场处理, 在已得激光器阈值激射条件下两段载流子浓度和激射波长所满足的隐含表达式的基础上^[4], 分析了该类激光器在两段等长情况下的模式特性。

1 理论分析

两段式 DFB 激光器的结构图如图 1 所示, 其中折线为布喇格反射光栅。两段的注入电流分别为 I_1 , I_2 , 长度为 L_1 , L_2 并设沿腔长方向为 z 轴。

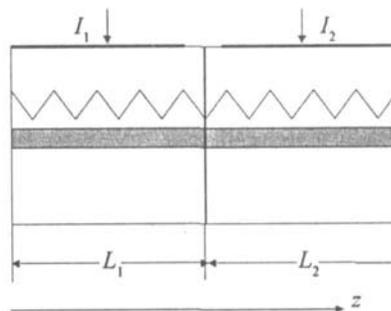


Fig 1 Schematic structure of two-segment DFB laser

在前期工作中, 曾对 KOEHLN K 和 SHANK 提出的有关单段式 DFB 激光器的耦合波理论作了深入研究^[5], 并将该耦合波理论推广适用于两段式 DFB 激光器。在引入平均场的方法和应用具体的边界条件后^[6], 得到了 DFB 激光器激射工作时两段载流子浓度 (N_1, N_2) 和激射波长 λ 所满足的隐含表达式^[4]:

$$\frac{[r_1 - r(q_1)][r_2 - r(q_2)]}{[1 - r_1 r(q_1)][1 - r_2 r(q_2)]} \exp[2i(q_1 L_1 + q_2 L_2)] - \frac{[r_1 - r(q_1)][r(q_1) - r(q_2)]}{[1 - r_1 r(q_1)][1 - r(q_1) r(q_2)]} \exp(2iq_1 L_1) -$$

基金项目: 教育部高等学校博士生科研基金资助项目 (20030613007)

作者简介: 李宜峰 (1980-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤通信及光器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hck@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2004-04-21; 收到修改稿日期: 2004-05-28

$$\frac{[r_2 - r(q_2)][r(q_2) - r(q_1)]}{[1 - r_2 r(q_2)][1 - r(q_1) r(q_2)]} \exp(2iq_2 L_2) = 1 \quad (1)$$

式中,各参量所表示的物理意义如下:第 1 段中的复数波数为 q_1 , 长度为 L_1 , 反射振幅比为 $r(q_1)$; 第 2 段中的复数波数为 q_2 , 长度为 L_2 , 反射振幅比为 $r(q_2)$; 左右两端面的反射系数分别为 r_1, r_2 。其中复数波数 q 是由边界条件决定的,且满足如下色散关系:

$$q = \pm [(\Delta\beta)^2 - k^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中,“+”,“−”号分别对应于前向、后向波。反射振幅比 $r(q)$ 的定义为:

$$r(q) = \frac{q - \Delta\beta}{k} = -\frac{k}{q + \Delta\beta} \quad (3)$$

式中, $\Delta\beta$ 是相位失配因子:

$$\Delta\beta = \beta - m\pi/\Lambda = \beta - \beta_0 = \delta - \bar{\alpha}/2 \quad (4)$$

而 δ 表示激射波长 λ 对于布喇格波长 λ_0 的偏离 $\delta = 2\pi \left[\frac{\mu}{\lambda} - \frac{\mu_0}{\lambda_0} \right]$ 。 μ 是等效折射率,它与载流子浓度 N 存在如下关系: $\mu = \mu_0 + \Gamma \frac{d\mu}{dN} (N - N_0)$ 。在 (4) 式中, $\bar{\alpha}$

表示功率增益系数 ($\bar{\alpha}/2$ 表示振幅增益系数), 它和载流子浓度 N 之间的关系如下: $\bar{\alpha} = (N - N_0) \Gamma A_0 - \alpha_{int}$ 。其中, N_0 为透明载流子浓度, Γ 为光场限制因子, A_0 是微分增益系数, α_{int} 为有源区内部损耗。将以上所用到的物理量代入 (1) 式, 从而可使 (1) 式仅表示 N_1, N_2, λ 三参量之间的隐含关系。

在进一步研究两段式 DFB 激光器的模式特性时, 为了简化分析, 仅考虑无端面反射的情况。令 $r_1 = r_2 = 0$, (1) 式可简化为:

$$r(q_1) \cdot r(q_2) \cdot [1 - \exp(2iq_1 L_1)] \times [1 - \exp(2iq_2 L_2)] = [1 - r^2(q_1) \cdot \exp(2iq_1 L_1)] \times [1 - r^2(q_2) \cdot \exp(2iq_2 L_2)] \quad (5)$$

显然, 上式是一个对称等式, 所以可以任选一段作为基础, 研究另外一段。此处选取第 1 段为参照, 即在固定第 1 段的载流子浓度 N_1 的前提下, 研究第 2 段的载流子浓度 N_2 和激射波长 λ 的对应关系。在 (5) 式中, 设与第 1 段有关的参量为 X :

$$X = \frac{1 - r^2(q_1) \cdot \exp(2iq_1 L_1)}{r(q_1) \cdot [1 - \exp(2iq_1 L_1)]} = X(N_1, \lambda) = X(\lambda) \quad (6)$$

由于 N_1 取特定值, X 仅与激射波长 λ 有关。结合 (3) 式、(6) 式, (5) 式可进一步简化为:

$$\exp(2iq_2 L_2) = -\frac{(q_2 L_2 + \Delta\beta_2 L_2) + kL_2 \mathcal{K}}{(q_2 L_2 - \Delta\beta_2 L_2) - kL_2 \mathcal{K}} \quad (7)$$

上式为一复数等式, 基于模式研究的目的, 需要将其实部和虚部分开, 令: $kL_2 \mathcal{K} = C = C_r + i \cdot C_i$, $q_2 L_2 = q_r + i \cdot q_i$, $\Delta\beta_2 L_2 = \Delta\beta_r + i \Delta\beta_i$, 式中, 下标 r 表示实部, 下标

表示虚部。将以上 3 式代入 (7) 式, 得到如下结果:

$$e^{-2q_i} \cdot \exp(2iq_r) = \frac{[(q_r + \Delta\beta_r + C_r) + i \cdot (q_i + \Delta\beta_i + C_i)]}{[(q_r - \Delta\beta_r - C_r) + i \cdot (q_i - \Delta\beta_i - C_i)]} = r \exp(i\theta) \quad r > 0 \quad \theta \in [0, 2\pi) \quad (8)$$

对于 (8) 式, 其两边复数的模和相位在数值算法上是很容易实现的。由模相等的条件:

$$e^{-2q_i} = \frac{|(q_r + \Delta\beta_r + C_r) + i \cdot (q_i + \Delta\beta_i + C_i)|}{|(q_r - \Delta\beta_r - C_r) + i \cdot (q_i - \Delta\beta_i - C_i)|} = r \quad (9)$$

由相位相等的条件:

$$2q_r = \theta + 2m\pi \quad (10)$$

上式揭示了两段式 DFB 激光器的模式特性, 其中 m 为任一整数, 代表不同的激射模式。由 (5) 式的对称性可知, 如果 (N_1, N_2, λ) 为方程 (5) 的一组 m 阶解, 则 (N_2, N_1, λ) 为其对称 m 阶解。 (9) 式、(10) 式适用于两段式 DFB 激光器无端面反射, 两段腔长为任意比条件下的模式分析。

2 结果与讨论

本文中模拟计算所需要的参数如下: $k = 50 \text{ cm}^{-1}$, $\Gamma = 0.3$, $A_0 = 2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$, $\alpha_{int} = 25 \text{ cm}^{-1}$, $N_0 = 1.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_0 = 3.35$, $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$, $d\mu/dN = 1.2 \times 10^{-20}$, $L = 400 \mu\text{m}$, $L_1 = L_2 = 200 \mu\text{m}$, $r_1 = r_2 = 0$ 。

(5) 式是一个关于载流子浓度和激射波长的隐含表达式, 通过对它的求解, 可以分析两段式 DFB 激光器各段的载流子浓度变化与波长调谐之间的关系。作为特例, 本文中分析的是两段等长的 DFB 激光器的模式工作特性。通过对载流子浓度适当取值, 使第 1 段作为吸收区工作, 第 2 段作为增益区。首先固定第 1 段的载流子浓度 N_1 (以 $N_1 = 0.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 为例), 将激射波长 λ 限定在区间 $1530 \text{ nm} \sim 1550 \text{ nm}$, 然后根据模相等条件 (9) 式, 得到第 2 段的载流子浓度 N_2 与激射波长 λ 之间的关系曲线如图 2 所示。根据载流子浓度 N 与增益系数 $\bar{\alpha}$ 的线性关系, 图 2 中的曲线亦表明了在不同的激射波长时, 各点所满足的增益条件。

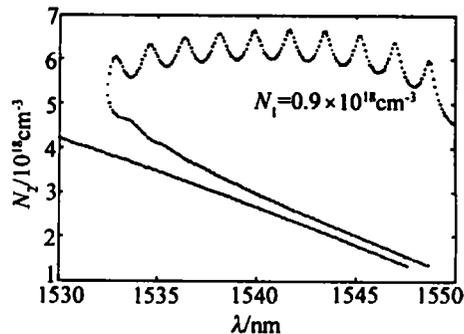


Fig 2 Condition of the modulus

因为模相等条件 (9) 式只是 (8) 式的一个必要条件, 所以, 必须在图 2 中所求得的点的基础上, 找出其中符合相位条件 (10) 式的解。图 3 表示在不同的激励波长时, 各点所满足的相位条件。只有当这些点的相位为 2π 的整数倍时, 才是满足 (8) 式的解 (如图 3 所示, 曲线与相位为 -2π 所对应直线的交点, 即表示模数 $m = -1$ 阶的解)。

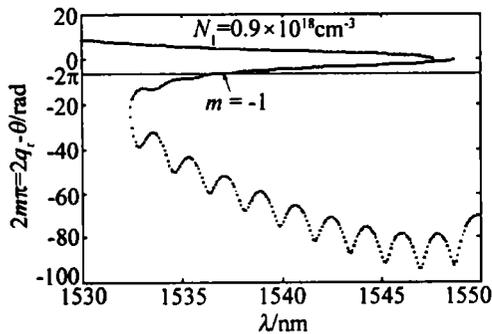


Fig 3 Condition of the phase

上述求解过程得到的是一组 $(N_{1m}, N_{2m}, \lambda_m)$ 解, 当 N_1 取值不同时, 重复上述求解过程, 最终可以得到不

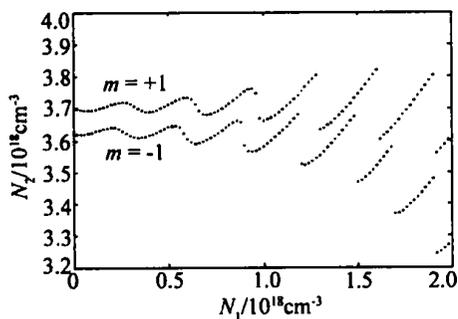


Fig 4 Relation of N_1 and N_2 in different modes

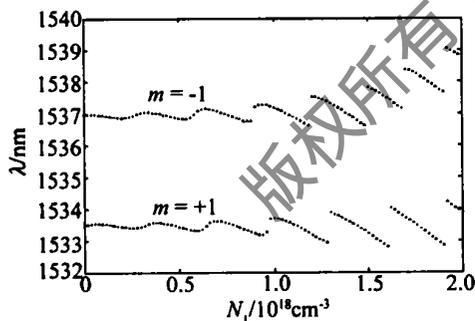


Fig 5 Relation of N_1 and λ in different modes

同模式下 N_1 和 N_2 及 N_1 和 λ 的对应关系曲线, 如图 4 图 5 所示。

图 4 图 5 中给出了 $m = \pm 1$ 两个模式。在数值求解过程中, 发现当 $N_1 < 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 没有零阶模。针对这一现象, 笔者认为可由单段式 DFB 的阻带理论来解释。在所给出的两个模式中, 根据优先激励原理, $m = -1$ 阶模优先激励。由图 4 可以看出, N_1, N_2 的连续变化, 导致波长在一定范围内调谐。并且随着 N_1 的不断增大, N_2 出现跳变现象, 调谐波长也随之出现区间性的振荡 (见图 5)。而最大的连续调谐发生在 N_1 从 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 到 $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 对应的调谐范围为 1536.5nm 到 1537.5nm, 大约有 1nm, 与实验观察到的相一致^[7]。

3 结 论

提出了一种新的两段式 DFB 激光器的模式区分方法, 它是在参考了单段式 DFB 激光器模式区分理论的基础上而得到的。与传统的传输矩阵法相比较, 它避免了建立传输矩阵模型这种复杂的非线性算法, 大大简化了运算步骤, 并且在理论上得到了 DFB 激光器的模式区分表达式, 该表达式对分析两段式 DFB 激光器的不同模式有着直观的物理意义。

参 考 文 献

- [1] KKUCHI K, TOMOFUJII H. Analysis of oscillation characteristics of separated-electrode DFB laser diodes [J]. IEEE J Q E, 1990 26 (10): 1717~1727
- [2] 沈丹勋, 顾晓仪, 徐大雄. 一种新的双电极 DFB 激光器阈值分析方法 [J]. 光通信研究, 1999 (3): 47~49
- [3] RIGOLE P, CHAWKIM J, AUFFRET R. Numerical analysis of the tuning characteristics of two-electrode DFB lasers [J]. J Opt Commun 1991, 12 (2): 69~71
- [4] 闫璐, 罗斌, 潘炜. 两段式 DFB 激光器波长调谐特性分析 [J]. 激光技术, 2003, 27 (3): 223~225
- [5] KOGELN K H, SHANK C V. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers [J]. JA P, 1972 43(5): 2327~2335.
- [6] AGRAWAL G P, DUTTA N K. Semiconductor lasers [M]. 2nd ed New York: van Nostrand Reinhold Company, 1993 323~333.
- [7] 罗斌, 吕鸿昌, 杨新民. 两段式 DFB 半导体激光器波长调谐实验研究 [J]. 高技术通讯, 1997, 7(8): 30~32

(上接第 280 页)

的实验中, 并取得了很好的效果。同时, 该方法可以用于其它种类的激光雷达弱回波信号的数字算法处理中。此外, 本文中所提出的方法对处理窄脉冲信号有一定的效果, 可用于其它领域的弱脉冲信号处理。

参 考 文 献

- [1] 章正宇, 晓林. 激光测距弱信号数字相关检测技术研究和仿真 [J]. 中国激光, 2002, 29(7): 661~665.

- [2] BOGGESS A, NARCOWICH F J. A first course in wavelets with Fourier analysis [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002 144~244.
- [3] 徐佩霞, 孙功究. 小波分析与应用实例 [M]. 2 版, 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001. 1~120
- [4] 熊玲玲, 刘会金, 傅志伟. 基于小波包变换的电压骤降信号分析 [J]. 继电器, 2004 632(11): 8~12
- [5] 徐晨, 赵瑞珍, 甘小冰. 小波分析——应用算法 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 86~87