

文章编号: 1001-3806(2005)04-0407-03

垂直腔面发射激光器驻波图样与特性分析

刘生贵, 陈建国*

(四川大学 光电系, 成都 610064)

摘要: 根据电场在激光器腔镜反射的相位特性, 研究了在不同腔镜组合情况下垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 几种可能的驻波图样。结果表明, 驻波图样与两端反射镜顶层折射率的选择密切相关, 有源层中心与驻波波腹的相对位置对 VCSEL 的限制因子以及阈值特性等有很大的影响。

关键词: 垂直腔面发射激光器; 驻波图样; 限制因子; 阈值电流

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Analysis of standing-wave patterns and characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers

LIU Sheng-gui, CHEN Jian-guo

(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: Based on analyzing the phase and electric field characteristics of different combination of reflective mirrors in semiconductor lasers, the corresponding standing-wave patterns were studied carefully. The results show that the standing-wave pattern is closely related with the choice of the index of the top reflective mirror, and the overlapping position of the center of the active layer and the standing-wave greatly effects the confinement factor and the threshold characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSEL).

Key words: vertical-cavity-surface-emitting lasers (VCSEL); standing-wave patterns; confinement factor; threshold value

引 言

由于构成半导体激光器的材料的折射率很高, 因而腔内的光线入射到两端的反射镜上时, 可能会出现光线由光密媒质入射到光疏媒质的情况, 也可能出现光线由光疏媒质入射到光密媒质的情况 (这要视反射镜顶层介质的折射率大小而定)。不同的激光器腔镜组合将直接影响腔内形成的驻波场波腹和波节的位置, 而波腹的位置与有源层的重叠情况又是决定垂直腔面发射半导体激光器 (VCSEL) 限制因子十分重要的因素^[1]。在许多文献里, VCSEL 的限制因子 (横向的或纵向的) 或者取某一特定值^[2,3], 或者沿用文献 [4] 中的式子来分析计算^[5~8], 常忽略了有源层中心同驻波波腹偏离时对激光器特性的影响。在本文中, 作者结合 VCSEL 的驻波图样, 计算分析了有源层中心与驻波波腹不重合对 VCSEL 的限制因子及其对阈值特性影响。

作者简介: 刘生贵 (1980-), 男, 硕士研究生, 从事垂直腔面半导体激光器的特性研究。

* 通讯联系人。E-optics_lab@163.com

收稿日期: 2004-05-12; 收到修改稿日期: 2004-07-15

1 VCSEL 腔内驻波图样分析

1.1 光线在腔内的往返相移

为简化分析, 将实际的谐振腔等效为如图 1 所示

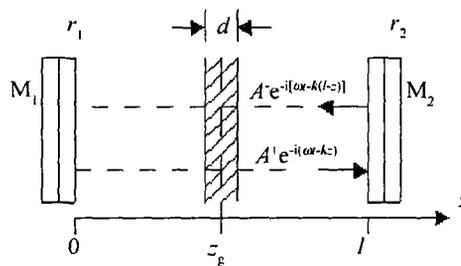


Fig 1 Schematic diagram of a simplified VCSEL structure

的理想结构。由于腔介质折射率的微小变化对分析并无实质性的影响, 故用一个平均折射率 \bar{n} 来表示腔内介质对光程长度的影响。从该图可见, 激光腔的几何长度为 l , 光学长度为 $l_{\text{eff}} = \bar{n}l$, 在 $z=0$ 和 $z=l$ 处分别是两个反射系数为 r_1 和 r_2 的反射镜, 厚度为 d 的有源层中心的位置为 z_e 。由多层介质高反镜的公式^[9]知道, 镜子的反射系数的符号是由顶层的性质决定的。由光波在介质表面上的反射规律^[10]可知: 光波从低折射率介质入射到高折射率介质时, 反射的光波附加一个 π 相移; 反之, 在界面上反射时不产生附加相移。由腔内模场的自再现条件可知: 光线在腔内往返 1 周的相移

应该等于 2π 的整数倍。如果把端面反射相移记为 ϕ_r , 光线在腔内介质中的往返相移记为 ϕ_t , 由激光腔内模场的位相条件可知 $(\phi_r + \phi_t)$ 为 2π 的整数倍。于是, 当两端反射镜顶层介质均为光密媒质时, l_{eff} 应为 $\lambda/2$ 的整数倍; 当一端反射镜顶层为光密媒质, 另一端为光疏媒质时, l_{eff} 应为 $\lambda/4$ 的奇数倍; 当两反射镜顶层介质均为光疏媒质时, l_{eff} 应为 $\lambda/2$ 的整数倍。

1.2 VCSEL 腔内的驻波图样

由于 VCSEL 的有源层很薄, 光场的单程增益很小, 为了使器件振荡, 两端反射率一般都接近于 1^[11]。为了简化讨论, 不妨用端面反射系数等于 1 的理想情况来分析 VCSEL 内的驻波图样。参考图 1, 用 $E_+(z) = \frac{1}{2}A^+ e^{-i(\omega t - kz)} + c.c.$ 代表腔内向右传播的行波, $E_-(z) = \frac{1}{2}A^- e^{-i(\omega t - k(l-z))} + c.c.$ 代表腔内向左传播的行波, 其中 A^+ 和 A^- 分别为两列波的振幅, 其绝对值平方等于光强的 2 倍, ω 和 k 分别为光波角频率和波矢, $c.c.$ 表示复共轭, t 表示时间。由反射条件可导出在端面处 A^+ 等于 $(\pm A^-)$ 。具体的说就是在端面反射有半波相移时, 入射与反射电场反号; 无半波相移时, 入射与反射电场同号。

在了解光线在腔内往返相移特点以及在端面反射与入射电场强度的关系后, 可以分析腔内的驻波图样。对于两端面反射镜顶层介质均为光密媒质的情况见图 2, 由于光线在两个腔镜上反射时场有半波相移, 因而

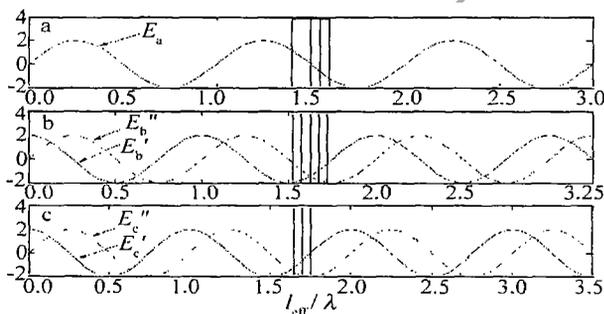


Fig 2 Possible distributions of electric field in the cavity of VCSEL at $t=0$ 端面必然是驻波的波节, 于是 $t=0$ 时刻驻波场的电场强度为 $E_a = A \sin(kz)$ (见图 2a), A 可以是 z 的缓变量; 对于一端反射镜顶层为光密媒质, 另一端为光疏媒质的情况, 按照同样的推理, 可以求得 $t=0$ 时刻腔内驻波场的电场强度有两种情况, 即: $E_b' = A \sin(kz)$ 以及 $E_b'' = A \cos(kz)$, 其中 E_b' 对应左边 (即 $z=0$ 处) 腔镜顶层为光密媒质的情况 (见图 2b 实线), E_b'' 对应左边腔镜顶层为光疏媒质的情况 (见图 2b 虚线); 对于两反射镜顶层均为光疏媒质的情况, 可以说明 $t=0$ 时刻腔内也可能形成两种图样, 即: $E_c' = A \sin(kz)$ 以及 $E_c'' = A \cos(kz)$, 前一种情况意味着腔镜处为驻波波节 (见图

2c 实线), 后一种情况则意味着腔镜处为驻波波腹 (见图 2c 虚线)。

在图 2 中, 还示意性地给出了置于 VCSEL 中的有源层 (图中的条形区)。从该图可以看到, 在有源层位置确定的情况下, 腔内驻波场图样不同, 电场和增益介质的重叠积分就不同, 电场的增益也会不同。这意味着一旦有源层在腔内的几何位置确定后, 两端反射镜顶层的介质折射率的选择就受到了限制。

2 VCSEL 特性分析

2.1 纵向限制因子

经典理论和量子理论均表明激光器的增益与电场强度平方成正比, 也与上下能级粒子数差成正比。具体到半导体激光器, 如果光线在腔内往返一周的过程中, 介质提供的放大为 $\exp(gl)$, 那么等效增益系数 g 应该满足:

$$gl = a \int_{z_1}^{z_2} [n(z) - n_0] F(z) dz \quad (1)$$

式中, a 是微分增益系数, Γ_l 为横向限制因子, n 为载流子密度, n_0 为透明载流子密度, $F(z)$ 则代表 $\sin^2(kz)$ 和 $\cos^2(kz)$ 中的一个, 究竟取其中的哪一个则取决于腔内驻波图样。由于 n 只有在有源层才有非零值, 因而 (1) 式的积分也就被限在了有源层内。

一般情况下, 可以认为有源层的载流子密度是均匀的, 即:

$$n(z) = \begin{cases} n & (z_g - d/2 \leq z \leq z_g + d/2) \\ 0 & (\text{其它地方}) \end{cases} \quad (2)$$

于是, VCSEL 的等效增益系数 g 可写作 $a\Gamma_l\Gamma_l(n - n_0)$ 。其中, 纵向限制因子 Γ_l 的定义式为:

$$\Gamma_l = 2 \int_{z_g - d/2}^{z_g + d/2} F(z) dz / l \quad (3)$$

许多情况下, 器件中的有源层是由多个量子阱构成的。此时, (3) 式可以写成对每个阱的积分之和。为获得最大增益, 总期望有源层中心能与驻波波腹重叠以得到最大的重叠积分^[11], 但由于不确定因素的存在, 理想情况并非总能实现。

在理想情况下, 即厚度为 d 的 VCSEL 的有源层中心 ($z = z_g$) 正好与驻波波腹重叠, 此时限制因子 Γ_l 取最大值, 记为 Γ_{max} ; 记 VCSEL 的有源层中心与驻波波谷重叠时的纵向限制因子为 Γ_{min} 。由 (3) 式可以算得:

$$\Gamma_{\text{max}} = \frac{D}{L} \left[1 + \frac{\sin(2\pi D)}{2\pi D} \right] \quad (4)$$

$$\Gamma_{\text{min}} = \frac{D}{L} \left[1 - \frac{\sin(2\pi D)}{2\pi D} \right] \quad (5)$$

式中, $D = \bar{u}d/\lambda$, $L = \bar{u}l/\lambda$, 即归一到波长的有源层厚度和腔长。

如果 z_g 与驻波场的波腹相距 δ ($0 \leq \delta \leq \lambda/4\bar{u}$), 那

么 $\Gamma_1(\delta)$ 将小于 Γ_{\max} , 由 (3) 式可以求得 Γ_1 的表达式为:

$$\Gamma_1(\Delta) = \frac{D}{L} \left[1 + \frac{\sin(2\pi D) \cos(4\pi \Delta)}{2\pi D} \right] \quad (6)$$

式中, 归一化距离 $\Delta = \bar{u}\delta/\lambda$ 。

在图 3 中, 画出了归一化腔长 $L = 9$ 时, Γ_{\max} 和 Γ_{\min} 随归一化有源层厚度 D 变化的曲线, 见图 3a, 以及具有不同归一化有源层厚度 D 的单量子阱 VCSEL 的 $\Gamma_1(\Delta) / \Gamma_{\max}$ 随归一化偏离量 Δ 变化的曲线, 见图 3b。图 3a 中, 取单层有源层厚度 d 的范围为 $[0, \lambda/2\bar{u}]$, 即 D 的范围为 $[0, 0.5]$, 由图可见, 归一化有源层厚度越小, Γ_{\min} 的值越小, 在 $D \leq 0.1$ 时, $\Gamma_{\min} \approx 0$ 。同样, 由图 3b 可以看出, 归一化有源层厚度越小, $\Gamma_1(\Delta) / \Gamma_{\max}$ 随归一化偏离量的增加而减小得越快。因此, 在归一化有源层厚度比较小的情况下, 需要认真考虑有源层与驻波的重叠位置对 VCSEL 的限制因子的影响。

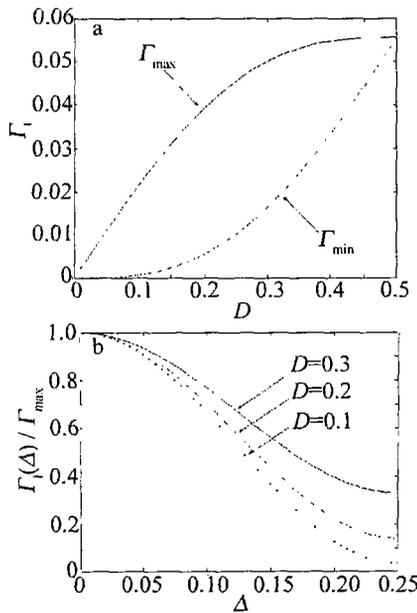


Fig 3 a—relationship of longitudinal confinement factor and normalized active layer thickness when the center of the active layer overlaps with the abdomen of standing wave and the value of it respectively b—relationship of $\Gamma_1(\Delta) / \Gamma_{\max}$ and Δ at different value of active layer thickness

2.2 对阈值的影响

从上面的分析可以看到, 有源层与腔内驻波波腹位置重叠的程度直接影响激光器的增益, 因而也影响到器件的阈值。根据振幅自再现条件, 可以求得 VCSEL 的阈值载流子密度为:

$$n_{th} = (\alpha l - \ln / r_1 r_2) / (a \Gamma_1) + n_0 \quad (7)$$

图 4 中给出了不同归一化有源层厚度对应的单量子阱 VCSEL 的阈值载流子密度随归一化偏离量 Δ 变化的曲线, 计算中使用的其它参数为: $l = 3000 \text{ nm}$, $a = 3.0 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$, $\alpha = 30 \text{ cm}^{-1}$, $\Gamma_1 = 1$, $n_0 = 1 \times 10^{18}$, $|r_1 r_2| = 0.99$ 。从该图可以看出, 归一化偏离量 $\Delta \leq 0.1$ 时, 阈值载流子密度变化不大, $\Delta \geq 0.2$ 时, 变化则明

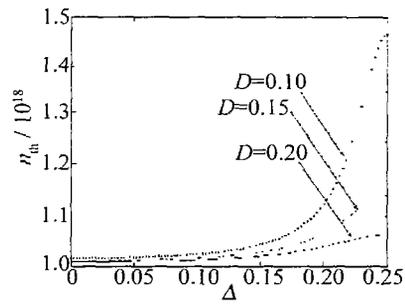


Fig 4 Relationship of threshold value of carrier-density and Δ at different value of active layer thickness

显, 且归一化有源层越薄, 归一化偏离量对阈值载流子密度的影响越大。因此, VCSEL 的阈值载流子密度不仅与有源层厚度有关, 也与有源层同驻波的重叠位置有很大联系。

还有一点要说明的是, (6) 式是在认定腔内行波的波长与介质增益峰值波长 λ_g 相同情况下得到的 VCSEL 的阈值。事实上, 由于 VCSEL 的腔长很短, 满足往返相移为 2π 整数倍的那些纵模波长不见得正好等于介质峰值波长, 这种情况会使得器件的阈值有所提高。加之, 驻波波腹与有源层位置的重合情况也不一定能够总在理想状态。这些因素都有可能使器件的阈值发生较大的改变。从 VCSEL 设计的角度看, 对应增益峰值波长为 λ_g 的介质来说, 不但腔的光程长度应为 $\lambda_g/4$ 的偶数倍 (见图 2a 与图 2c) 或奇数倍 (见图 2b), z_g 的位置要设置在驻波波腹处, 而且端面反射镜顶层介质的折射率也应该预先确定, 否则, z_g 有可能落在驻波的波谷处, 这将使得激光器的阈值大大的增高。

3 结论

基于激光器不同腔镜组合的相位特性和端面电场强度特性的分析, 仔细研究了不同腔镜组合的驻波图样。结合 VCSEL 的驻波图样, 分析计算了 VCSEL 中有源层中心与驻波波腹不重合对 VCSEL 的限制因子和阈值特性的影响。从上面的分析可知: 在制作 VCSEL 时, 要正确选择激光器反射镜顶层介质的折射率大小, 这样才能保证腔内的驻波图样符合要求, 使得有源层正好落在波腹处, 其次, 激光器腔长要选择合适的, 这样才能使模式波长与增益介质的峰值波长相同, 否则器件的阈值会增大。

参考文献

- [1] CORZNE S W, GELLS R S, SCOTT J W *et al* Design of Fabry-Pérot Surface-emitting lasers with a period gain structure [J]. IEEE J Q E, 1989, 25(6): 1513~1524.
- [2] SCIAMANNA M, PANAJOTOV K, THIENPONT H *et al* Optical feedback induces polarization mode hopping in vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. Opt Lett, 2003, 28(17): 1543~1545.

纤的传播。从图 3 和图 5 中可以看到:不同抽运之间除了光纤损耗引起的功率衰减外,抽运之间由受激喇曼散射 (SRS) 引起的能量传递也是很明显的,长波长抽运光从短波长抽运光处获得能量;信号光传输过程中, $z < 15\text{km}$ 时,光纤损耗大于喇曼增益,信号光功率下降,当 $z > 15\text{km}$ 后,喇曼增益起主要作用,信号光被放大,并且由于信号光之间的 SRS 作用,长波长信号的喇曼增益较大,因此需要在短波长区设置更大的抽运光功率来实现增益的平坦性。图 4 和图 6 中,由于瑞利后向散射和受激喇曼散射的作用,抽运光和信号光均产生了后向散射波。在仿真中,将两者的初值都设为 -70dBm 。从图中可以看出,反向散射的抽运波和信号波功率分别比抽运光和信号光低大约 20dB 和 30dB 。

图 7 中给出了 5 个抽运作用下信号光沿光纤传输 25km 后的喇曼增益。图中 5 条实线代表 5 路抽运光分别作用下,100 路 WDM 信号光的增益曲线,图中虚线表示信号光的合成喇曼增益。

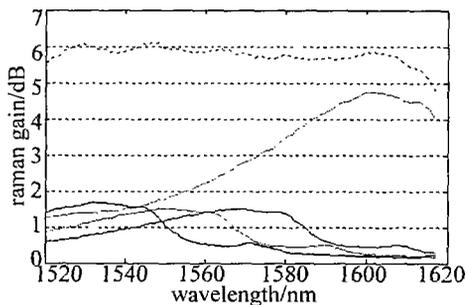


Fig 7 Raman gain pumped by 5 pumps

4 结 论

基于 RKF45 方法,提出了一种自适应步长算法求解多抽运喇曼放大器的耦合方程。自适应步长算法在

每步迭代中估计局部截断误差,并根据局部截断误差与精度要求有效的调整步长,在保证计算精度的前提下,减少迭代步数,从而提高计算效率。将自适应步长算法与已有的平均功率法、四步平均功率法及 PCM 法进行了比较,仿真结果表明自适应步长算法能够有效的减小误差,提高速度。应用自适应步长算法对喇曼放大器进行数值模拟,结果表明:抽运光之间、信号光之间存在的 SRS 散射作用是不可忽略的,需要在短波长区设置更大的抽运光功率来实现增益的平坦性;由于瑞利后向散射和受激喇曼散射,抽运光和信号光均产生了后向散射波,反向散射的抽运波和信号波功率分别比抽运光和信号光低大约 20dB 和 30dB 。

参 考 文 献

- [1] NAM IK I S, EMOR I Y. Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division-multiplexed high-power laser diodes [J]. IEEE J. Select Topics Quantum Electron, 2001, 7(1): 3~16
- [2] M N B, LEE W J, PARK N. Efficient formulation of Raman amplifier propagation equations with average power analysis [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2000, 12(11): 1486~1488.
- [3] LU X M, ZHANG H Y, GUO Y L. A novel method for Raman amplifier propagation equations [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2003, 15(3): 392~394.
- [4] LU X M, LEE B. A fast and stable method for Raman amplifier propagation equations [J]. Opt Express, 2003, 11(9): 2163~2176.
- [5] MATHEWS J H. Numerical methods for mathematics, science and engineering [M]. 2nd ed, New Jersey: Prentice Hall, 1992. 464~475.
- [6] KDORF H, ROTW IIT K, NISSOV M *et al* Pump interactions in a 100nm bandwidth Raman amplifier [J]. IEEE Photon Technol Lett, 1999, 11(5): 530~532.
- [7] BURDEN R L, FAIRES J D. Numerical analysis [M]. 7th ed, Boston: Prindle, Weber & Schmidt, Thomson Learning Inc, 2001. 272~287.
- [8] 凯泽 G 光纤通信 [M]. 3 版, 北京: 电子工业出版社, 2002. 71~72.
- [9] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. 3rd edition, New York: Academic Press, 2001. 299~300.

(上接第 409 页)

- [3] YU S F. Polarization selection in birefringent antiresonant reflecting optical waveguide-type vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(11): 1362~1371.
- [4] HUANG Y Z, PAN Z, WU R H. Analysis of the optical confinement factor in semi-conductor lasers [J]. J A P, 1996, 79(8): 3827~3830.
- [5] DEBERNARDI P, FRATTA L, BAVA G P. Spectral linewidth in oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Q E, 2001, 37(8): 1084~1094.
- [6] ZHOU D, MAWST L J, DAI Z. Modal properties of two-dimensional antiguided vertical-cavity surface-emitting laser arrays [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(6): 652~664.
- [7] LU Y, KLEN B, HESS K *et al* Effects of the spatial nonuniforming of optical transverse modes on the modulation response of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(1): 99~108.
- [8] 黄永箴. 垂直腔面发射激光器中顶层相位对模式特性的影响 [J]. 光学学报, 2000, 20(2): 181~185.
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. London: Cambridge University Press, 1999. 64.
- [10] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. London: Cambridge University Press, 1999. 39.
- [11] GUSTAVSSON J S, VUKUSIC J A, BENGTTSSON J *et al* A comprehensive model for the modal dynamics of vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Q E, 2002, 38(2): 203~212.