

文章编号: 1001-3806(2007)06-0616-04

垂直耦合腔面发射激光器阈值特性研究

罗广军, 罗斌*, 潘炜, 卢静, 李建平

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘要: 为了研究垂直耦合腔面发射激光器 (CC-VCSELs) 阈值特性, 利用传输矩阵法计算了其阈值载流子浓度, 在此基础上结合载流子速率方程讨论了阈值电流, 得到了 CC-VCSELs 的双阈值点 (1mA, 0.75mA) 与阈值电流关系曲线。数值计算结果比较表明, 利用传输矩阵与载流子速率方程相结合的方法研究 CC-VCSELs 的阈值特性优于速率方程法, 且数值计算结果与实验结果相吻合。

关键词: 激光器; 阈值电流; 传输矩阵; 反射增益

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Research of threshold characteristics of coupled-cavity vertical-cavity surface emitting lasers

LUO Guang-jun, LUO Bin, PAN Wei, LU Jing, LI Jian-ping

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract In order to study the threshold characteristics of coupled-cavity vertical-cavity surface emitting lasers (CC-VCSELs), the threshold carrier density of CC-VCSELs was calculated based on transfer matrix method. Then the threshold current was discussed with the carrier rate equation based on threshold carrier density. The curve of "Double Threshold" point (1mA, 0.75mA) and threshold currents curve was obtained. Numerical calculation shows that the results obtained by transfer matrix and carrier rate equation are better than those obtained by rate equation, and the calculation result agreed with the experiment.

Key words lasers; threshold currents; transfer matrix; reflection gain

引 言

垂直腔表面发射激光器 (vertical-cavity surface emitting lasers, VCSELs) 与传统的端面发射激光器相比, 具有阈值电流低、输出光束方向性和对称性好、易形成高密度二维阵列等优点, 在光互联、光交换、光电集成等方面有着广阔的应用前景^[1,2], 近年来受到广泛的关注。垂直耦合腔面发射激光器 (coupled-cavity vertical-cavity surface emitting lasers, CC-VCSELs) 继承了 VCSELs 的诸多优点, 同时能够很好的满足光波分复用、太赫兹频率发生器^[3]、双波长干涉测量^[4]等技术对双波长发光器件的特殊要求, 因此也越来越受重视。

PELLANDINI 等人于 1997 年率先研制出光抽运模式的 CC-VCSELs^[5], 接着脉冲电抽运和连续电抽运模式的 CC-VCSELs 也分别由 CARLIN 和 BRUNNER 等人在实验室实现^[6,7]。由于 CC-VCSELs 有两个独立

的抽运电流, 可工作在 4 种激射状态, 而各种实际应用都要求它工作在特定的激射状态或者在各个激射状态之间进行转换, 因此, 研究其抽运电流与激射状态之间的关系就显得尤为重要。2003 年, DANIEL 等人实验证明通过改变抽运电流可以控制激射状态^[8]。2004 年, BADILIA 等人建立了载流子与光子速率方程模型^[9], 并根据此模型分析讨论了 CC-VCSELs 的阈值电流。但该模型利用光子速率方程求解阈值载流子浓度, 用限制因子建立双腔光子之间的联系, 当器件结构发生改变时, 就需要重新确定限制因子和有效腔长等参数, 十分不方便。

作者直接从 CC-VCSELs 的基本结构出发, 采用传输矩阵法来分析 CC-VCSELs 的阈值载流子浓度特性, 然后结合关于载流子浓度的速率方程, 得出了与文献 [9] 中相一致的阈值电流曲线, 证明了该方法的可行性。采用传输矩阵法的优点在于, 将 CC-VCSELs 整体作为研究对象, 在分析阈值载流子浓度特性时不需引入限制因子, 有效腔长及增益增强因子 ζ 等参数, 当 CC-VCSELs 材料或结构参数值改变时, 直接将变化后的参数代入特征矩阵计算, 就可得到与 CC-VCSELs 实际结构的阈值载流子浓度特性相一致的结果, 十分方

作者简介: 罗广军 (1981-), 男, 硕士研究生, 从事半导体激光器与半导体光放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: bhr@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2006-09-19; 收到修改稿日期: 2006-12-18

便可行。

1 理论模型

1.1 垂直耦合腔面发射激光器的基本结构

图 1 为基本的 CC-VCSELs 的结构示意图^[9], 其腔

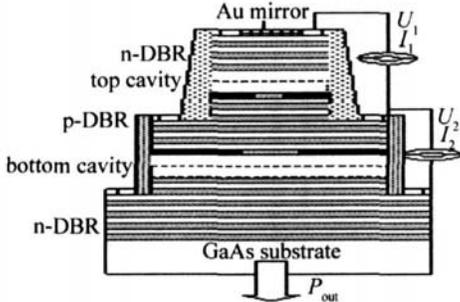


Fig 1 Schematic of CC-VCSELs

体由 3 个 DBR (distributed Bragg reflector) 和夹在 DBR 之间的两个有源区及 GaAs 基底组成。DBR (谐振波长 $\lambda = 940\text{nm}$) 由 $\lambda_0/4$ 光学厚度的高低折射率材料交替生成, 其顶部和底部分别为 14 个和 26.5 个膜层周期数。该器件从底部发光, 因此为增强顶部 DBR 反射率, 在顶部镀金使反射率达到 0.998 而底部 DBR 的反射率为 0.996。中间 DBR 层由 8.5 个膜层周期数组成, 反射率为 0.67。两个有源区都由压应变 InGaAs 量子阱和 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ 势垒层构成, 其中顶腔为 4 个量子阱, 光学厚度为 $0.96\lambda_0$, 底腔为 2 个量子阱, 光学厚度为 $1.04\lambda_0$ 。该器件支持两个激射波长模式: 短波长模式对应于顶腔, 为 927nm ; 长波长模式对应于底腔, 为 953nm 。

1.2 理论分析

根据文献 [10] 中所建立的传输矩阵, 反射增益 G_r 为:

$$G_r = \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right) \left(\frac{n_0 B - C}{n_0 B + C} \right)^* \quad (1)$$

式中, n_0 为入射介质折射率, B, C 为整个膜系的特征矩阵的乘积的第 1 行值和第 2 行值。对于特征矩阵中复折射率 \tilde{n} 的一般表达式为:

$$\tilde{n} = (n + bN) + i(-g + \alpha)/(2k_0) \quad (2)$$

式中, n 为材料实折射率, b 代表有效折射率随载流子浓度 N 变化的比例系数, g 为增益系数, α 为损耗系数。对于有源区的量子阱层, 根据文献 [9] 中增益系数公式:

$$g_{i s l}(N_i) = g_{0 s l} \ln \left(\frac{N_i + N_{0 s l}}{N_{t r s l} + N_{0 s l}} \right) \quad (3)$$

式中, 下标 $i = 1, 2$ 分别代表顶腔与底腔, 下标 s 和 l 分别代表短波长光和长波长光。 $N_{t r s l}, g_{0 s l}$ 与 $N_{0 s l}$ 分别为短波长光和长波长光的透明载流子浓度、增益拟合参量和载流子拟合参量。结合 (2) 式, 可以得到载流子浓

度 N_i 下的有源区量子阱层复折射率 \tilde{n}_i 。对于势垒层复折射率 \tilde{n} , 增益为 $Q \tilde{n} = n + i\alpha/(2k_0)$ 。对于 DBR 层和间隔层, 增益为 Q 并忽略材料损耗, $\tilde{n} = n$ 。

由传输矩阵可以求得各种激射模式下的阈值载流子浓度, 为方便讨论分析并与文献结果比较, 需要进一步求得阈值电流, 因此, 结合稳态条件下的载流子浓度速率方程:

$$\frac{I_{1 \text{ th}}}{qV_1} - \frac{N_{1 \text{ th}}}{\tau_c} - \xi_{s l} g_{1 s} V_g P_{1 s} - \xi_{l s} g_{1 l} V_g P_{1 l} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{I_{2 \text{ th}}}{qV_2} - \frac{N_{2 \text{ th}}}{\tau_c} - \xi_{s s} g_{2 s} V_g P_{2 s} - \xi_{l s} g_{2 l} V_g P_{2 l} = 0 \quad (5)$$

式中, $I_{1 \text{ th}}, I_{2 \text{ th}}$ 为阈值电流。 q 为电子电量。 V_1, V_2 为量子阱的体积。 τ_c 为载流子寿命。 $N_{1 \text{ th}}, N_{2 \text{ th}}$ 为阈值载流子浓度。 $P_{1 s l}, P_{2 s l}, \xi_{s s}, \xi_{l s}, g_{1 s l}, g_{2 s l}$ 分别为顶腔和底腔短波长光与长波长光的平均光子浓度、增益增强因子以及增益。 V_g, v_g 为短波长光和长波长光的群速度。

2 数值分析及讨论

以文献 [9] 中报道的 CC-VCSELs 器件结构和参数作为研究的依据。以 GaAs/Al_{0.9}Ga_{0.1}As 为材料的 DBR 高低介质折射率分别为 3.500/3.078 两个有源区的横截面积都为 $100\mu\text{m}^2$, 有源区基层介质的材料折射率为 3.486。 InGaAs 量子阱和 Al_{0.15}Ga_{0.85}As 势垒在无抽运时折射率分别为 3.600/3.480 单个量子阱和势垒层的厚度分别为 8nm 和 10nm , 有源区量子阱和势垒层的内部损耗系数 $\alpha_c = 15\text{cm}^{-1}$ 。透明载流子浓度 $N_{t r 1} = N_{t r s} = 1.8 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 增益拟合参量 $g_{0 1} = 2000\text{cm}^{-1}$, $g_{0 s} = 1800\text{cm}^{-1}$, 载流子拟合参量 $N_{0 1} = N_{0 s} = 0.4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 。速率方程中各参数取值如下: $\tau_c = 1\text{ns}$, $\xi_{l s} = \xi_{s l} = 1.63$, $\xi_{s s} = \xi_{l l} = 1.92$ 。

根据前面的分析, 首先建立传输矩阵并根据反射增益确定 CC-VCSELs 达到阈值的条件。图 2 为底腔载流子浓度 N_2 一定时 CC-VCSELs 的反射增益 G_r 随

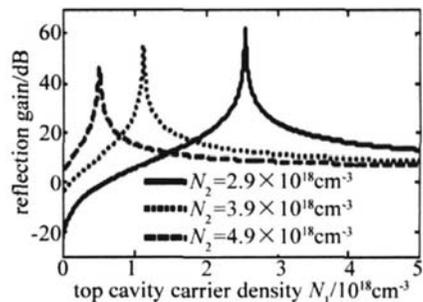


Fig 2 Reflection gain varies with the carrier density of top cavity

顶腔载流子浓度 N_1 变化关系曲线。根据激光器的激射条件, 可以知道激光器达到阈值时反射增益 G_r 应为

无限大。实际计算过程中由于计算精度的限制, 不可能计算得到无限大的增益, 但是如图 2 所示, 在底腔载流子浓度 N_2 一定时, 随着顶腔载流子浓度 N_1 的增大, 反射增益 G_r 将达到一个最大值, 事实上, 激光波长的精度取得越高, 峰值时的增益越大, 理论上可以趋向无穷大, 此时, 可以认为激光器达到阈值。同时由图中可以看出, 不同的底腔载流子浓度 N_2 有一个顶腔载流子浓度 N_1 与之对应使得反射增益 G_r 达到最大, 也就是说使得激光器达到阈值。

图 3 为激光波长分别为 λ_s 和 λ_l 时的顶腔与底腔

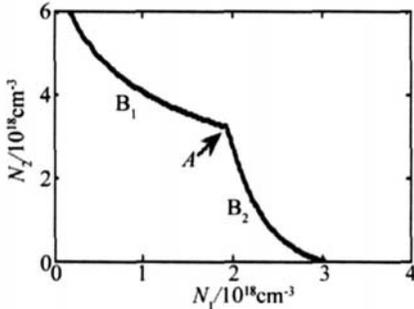


Fig 3 The threshold carrier density of the CC-VCSELs

的阈值载流子浓度曲线。其中曲线 B_1 为 λ_l 光刚刚达到阈值时的载流子浓度; 曲线 B_2 为 λ_s 光刚刚达到阈值时的载流子浓度; A 点为短波长光和长波长光都达到阈值时的载流子浓度, 之后, 载流子浓度保持在 A 点不变。由图中可以看出随着顶腔载流子浓度 N_1 的增大, 达到阈值时所需的底腔载流子浓度 N_2 逐渐变小。

以上讨论没有考虑量子阱中载流子浓度对有效折射率的影响, 即令 $b=0$, 下面考查考虑到量子阱载流子浓度对有效折射率的影响时激光波长随载流子浓度的变化情况, 而后讨论它对阈值载流子浓度的影响。图 4a~图 4c 中, 分别为对应于图 3 中曲线 B_1 上点、曲线 B_2 上点、 A 点的激光波长曲线, 其中实线为 $b=0$ 时的情况, 虚线为 $b=-1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时的情况, 可以看出不同曲线上的点对应于不同的激光状态, 在考虑到量子阱载流子浓度对有效折射率的影响时, 激光波长会略微减小。图 4d 为 $b=-1.2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时对应于图 3 中 A 点 (实线) 与曲线 B_1 上的点 (虚线) 的长波长波段的激光波长比较, 可看到激光波长减小的程度会随载流子浓度的变化而变化。同时在考虑到量子阱载流子浓度对有效折射率的影响后, 尽管激光波长发生的变化会引起达到阈值时的最大增益的变化, 但是阈值载流子浓度却没有变化, 因此可确定有效折射率因量子阱载流子浓度而产生的变化对阈值条件不会产生影响。

为方便与文献 [9] 中的实验结果相比较, 需要根据阈值载流子浓度曲线结合载流子浓度速率方程来讨论 CC-VCSELs 的阈值电流。

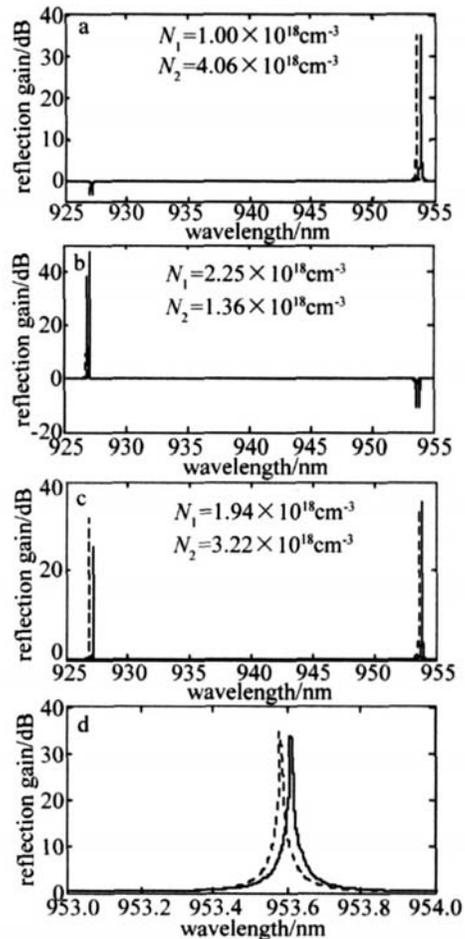


Fig 4 The influence of value of b on the emission wavelengths at different carrier density

(1) 对应图 3 中曲线 B_1 , 短波长光尚未激射, 长波长光刚刚达到阈值。此时 $P_{l1} = P_{21} = 0, P_{l s} = P_{2 s} = 0$ 由 (4) 式、(5) 式可得:

$$I_{l \text{ th}} = N_{l \text{ th}} q V_1 / \tau_e, I_{2 \text{ th}} = N_{2 \text{ th}} q V_2 / \tau_e \quad (6)$$

式中, $N_{l \text{ th}}, N_{2 \text{ th}}$ 即为曲线 B_1 上的值, $I_{l \text{ th}}, I_{2 \text{ th}}$ 为长波长光达到阈值时的抽运电流。这样结合曲线 B_1 与 (6) 式可以得到如图 5 所示的曲线 D_1 。

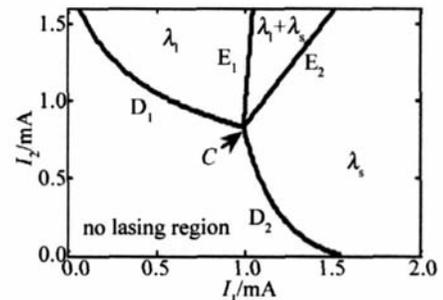


Fig 5 The threshold currents of the CC-VCSELs

(2) 对应图 3 中曲线 B_2 , 长波长光尚未激射, 短波长光刚刚达到阈值。

同理可得 (6) 式, 但式中 $N_{l \text{ th}}, N_{2 \text{ th}}$ 为曲线 B_2 上的值, $I_{l \text{ th}}, I_{2 \text{ th}}$ 为短波长光达到阈值时的抽运电流。这样结合曲线 B_2 与 (6) 式可以得到如图 5 所示的曲线 D_2 。

(3) 对于图 3 中的 A 点, 必须分两种情况讨论。

第 1 种情况: 长波长光已经激励, 短波长光刚刚达到阈值。

此时 $P_{1s} = P_{2s} = 0$, 引入耦合因子 K_1 , 令 $P_{21} = K_1 \cdot P_{1s}$, 代入 (4) 式、(5) 式可得:

$$I_{2th} = qV_2 \left[\frac{N_{20}}{\tau_e} + K_1 \cdot \frac{\xi_2 |g_{21}|}{\xi_1 |g_{11}|} \left(\frac{I_{1th}}{qV_1} - \frac{N_{10}}{\tau_e} \right) \right] \quad (7)$$

式中, N_{10} , N_{20} 即为 A 点的载流子浓度, I_{1th} , I_{2th} 为长波长光激励后, 短波长光达到阈值时的抽运电流。由 (7) 式可以得到如图 5 所示的曲线 E_1 。

第 2 种情况: 短波长光已经激励, 长波长光刚刚达到阈值。

此时 $P_{11} = P_{21} = 0$, 引入耦合因子 K_2 , 令 $P_{2s} = K_2 \cdot P_{1s}$, 代入 (4) 式、(5) 式可得:

$$I_{2th} = qV_1 \left[\frac{N_{20}}{\tau_e} + K_2 \cdot \frac{\xi_2 |g_{21}|}{\xi_1 |g_{11}|} \left(\frac{I_{1th}}{qV_1} - \frac{N_{10}}{\tau_e} \right) \right] \quad (8)$$

式中, I_{1th} , I_{2th} 为短波长光激励后, 长波长光达到阈值时的抽运电流。由 (8) 式可以得到如图 5 所示的曲线 E_2 。耦合因子 K_1 , K_2 定义为一定波长时顶腔与底腔平均光子数的比值, 在两腔载流子浓度确定的情况下, K_1 , K_2 值就确定了, 具体计算方法可以结合传输矩阵和边界条件进行, 由于篇幅所限, 这里只给出计算结果: $K_1 = 3.17$, $K_2 = 0.32$ 。

由图 5 可以看出, 阈值电流曲线 D_1 , D_2 , E_1 , E_2 把图分成了 4 个区域, 对应于 CC-VCSELs 的 4 种激励状态, 分别为未激励, 长波长光 λ_1 激励, 短波长光 λ_2 激励, 长波长光 λ_1 与短波长光 λ_2 同时激励。通过控制顶腔和底腔的抽运电流可以选择激励状态。例如, 若需要长波长光 λ_1 与短波长光 λ_2 同时激励, 只需顶腔和底腔电流取值在曲线 E_1 与 E_2 之间即可。其中的 C 点为长波长光 λ_1 与短波长光 λ_2 同时达到阈值时的阈值电流, 称为双阈值点。本文中计算得到的双阈值点为 (1 mA, 0.75 mA), 而文献 [9] 中根据速率方程模型计算得到的双阈值点为 (0.6 mA, 1.1 mA), 实验结果为 (0.6 mA, 0.3 mA)。与文献 [9] 中的计算结果相比较, 本文中计算结果虽然因为取值与计算误差的原因在数

值上有差别, 但是电流曲线趋势基本一致, 并且双阈值点也更接近实验结果, 证明了本方法的可行性。

3 结 论

采用传输矩阵和载流子速率方程相结合的方法分析和探讨了垂直耦合腔面发射半导体激光器的阈值特性, 利用这种方法得到了与以往的实验及理论研究相一致的结果, 证明了这种方法的可行。根据阈值电流曲线可以把 CC-VCSELs 分为 4 种激励状态, 并且可以通过控制顶腔和底腔的抽运电流来选择所需的激励状态, 研究结果对 CC-VCSELs 的实际应用具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] KEN CH I I Surface emitting laser— its birth and generation of new optoelectronics field [J]. IEEE Journal Select Topics in Quantum Electronics 2000, 6(6): 1201~1215.
- [2] KOSAKA H. Smart integration and packaging of 2D VCSELs for high speed parallel links [J]. IEEE Journal Select Topics in Quantum Electronics 1999, 5(2): 184~193.
- [3] WANG C L, PAN C L Tunable multiterahertz beat signal generation from a two-wavelength laser diode array [J]. Opt Lett 1995, 20(11): 1292~1294.
- [4] SUZUKI T, OHIDA M, YOKOYAMA K *et al* Stroboscopic two-wavelength interferometer for ir line displacement measurement [J]. CLEO Lasers and Electro-Optics 2003, 2: 638.
- [5] PELLAND N I P, STANLEY R P, HOUDRE R *et al* Dualwavelength emission from coupled semiconductor microcavity [J]. A P L, 1997, 71(7): 864~866.
- [6] CARLIN J F, STANLEY R P, PELLAND N I P *et al* The dualwavelength bit vertical cavity surface emitting laser [J]. A P L, 1999, 75(7): 908~910.
- [7] BRUNNER M, GULDEN K, HOVEL R *et al* Continuous-wave dualwavelength lasing in a two-section vertical cavity laser [J]. IEEE Photonics Technology Letters 2000, 12(10): 1316~1318.
- [8] GRASSO D M, CHOQUETTE K D. Threshold and modal characteristics of composite resonator vertical cavity lasers [J]. IEEE J Q E, 2003, 39(12): 1526~1530.
- [9] BADILITA V, CARLIN J F, ILEGEM S M. Rate equation model for coupled-cavity surface-emitting lasers [J]. IEEE J Q E, 2004, 40(12): 1646~1656.
- [10] JIA X K, LUO B, PAN W *et al* Research of gain of vertical cavity semiconductor optical amplifiers based on transfer matrix method [J]. Laser Technology 2005, 29(4): 377~379(in Chinese).

(上接第 615 页)

- [5] ILDAY F O, WISE F W. High energy femtosecond stretched pulse fiber laser with a nonlinear optical loop mirror [J]. Opt Lett 2002, 27(17): 1531~1533.
- [6] MA H Q, ZHAO W, ZHANG W *et al* Wavelength passively mode-locked fiber laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 289~291(in Chinese).
- [7] DORAN N J WOOD D. Nonlinear optical loop mirror [J]. Opt Lett

1988, 13(1): 56~58.

- [8] WANG Zh Y, YU Zh H, GAO P L *et al* Figure-eight shape actively and passively mode-locked erbium-doped fiber laser [J]. Acta Optica Sinica 2003, 23(11): 1341~1345(in Chinese).
- [9] HEH R, YUAN X H. Analysis of the characteristics of the all-optical switch based on nonlinear amplifying loop mirror [J]. Chinese Journal of Lasers 2005, 32(3): 418~422(in Chinese).