

# N-DBR 和双氧化限制层对 VCSEL 电、光、热特性的影响\*

刘立新<sup>1,2,3</sup> 赵红东<sup>4</sup> 牛憨笨<sup>3</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

(3 深圳大学光电子学研究所, 深圳 518060)

(4 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)

**摘 要** 根据增益波导垂直腔面发射激光器直接耦合的准三维理论模型, 通过有限差分法对注入电流密度、载流子浓度、光场和热场分布方程求自洽解. 研究了垂直腔面发射激光器的电、热和光波导特性, 同时提出了一种具有双氧化限制层的增益波导垂直腔面发射激光器结构, 并通过对比研究了 N-型分布布喇格反射镜和双氧化限制层对增益波导垂直腔面发射激光器特性的影响. 计算结果表明, 如果忽略 N-型分布布喇格反射镜的影响将与实际的垂直腔面发射激光器有较大偏差; 双氧化限制层结构对激光器特性有较大的改善, 它为增益波导垂直腔面发射激光器提供了一种降低阈值, 抑制高阶横模的方法.

**关键词** 垂直腔面发射激光器; 有限差分法; N-型分布布喇格反射镜层; 双氧化限制层

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A

## 0 引言

半导体垂直腔面发射激光器(简称 VCSEL)具有极低的阈值、较小的远场发散角、调制频率高、易实现单纵模工作和二维集成等优点, 所以它在光纤通讯、光互连、并行光信号处理及光集成元件等方面有着广泛的应用前景<sup>[1,2]</sup>. 自 1977 年 Iga 提出制作 VCSEL 的设想<sup>[1]</sup>以来, 出现了多种新的激光器理论模型<sup>[3,4]</sup>来分析 VCSEL 的电、光、热特性, 但它们都忽略了 N-型布喇格反射镜(简称 DBR)层对 VCSEL 特性的影响, 这就必然会引起误差. 由于 VCSEL 的电、光、热场特性耦合关联、相互影响, 所以在计算过程中必须求解注入载流子、光场、电压以及热场分布的自洽解.

本文根据 VCSEL 直接耦合的准三维理论模型, 通过有限差分法对注入电流密度、载流子浓度、光场和热场分布方程自洽求解, 研究了垂直腔面发射激光器的电、热和光波导特性, 并提出了一种具有双氧化限制层的 VCSEL 结构, 通过对比研究了 N-DBR 和双氧化限制层对 VCSEL 特性的影响.

## 1 理论模型

### 1.1 激光器结构

图 1 为 VCSEL 的结构示意图. 中间是量子阱有源区, 上、下两部分分别为 P 型和 N 型 DBR, 由 20 和 30 个周期的  $\text{AlAs}/\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$  组成, 构成了激光器的谐振腔. 三个  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  应变量子阱夹在  $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$  组成的一波空间层中间, 阱和垒的厚度分别为 8 nm 和 10 nm, 以上各层均生长在  $\text{N}^+\text{-GaAs}$  衬底上<sup>[5~9]</sup>. P 型和 N 型 DBR 中选择氧化法形成高阻区, 来减小电流扩展, 并在有源区中形成增益区. 上下限制层的厚度分别为 P 型和 N 型 DBR 厚度的 1/3. VCSEL 为柱对称结构, 激光从顶部沿一个圆形窗口出射,  $w$  是光输出窗口半径,  $s$  是高阻区窗口半径.

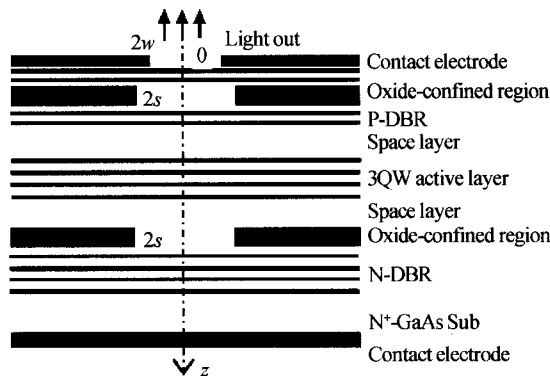


图 1 VCSEL 结构

Fig. 1 Schematic illustration of a VCSEL

### 1.2 载流子浓度分布

载流子浓度分布对增益半导体激光器的性质起着重要的作用. 半导体激光器有源区的非平衡载流子浓度  $N(r)$  在稳态时的分布<sup>[5~7]</sup>

\*河北省自然科学基金(602074)和河北省教育厅博士基金资助项目

Tel: 0755-26733319 Email: lixin.liu@126.com

收稿日期: 2004-12-13

$$D_n \nabla^2 N(r) - BN^2(r) - \frac{N(r)}{\tau_s} - \frac{g(N)P_a |\bar{E}_1|^2}{h\nu} - R_{au} + \frac{J}{ed} = 0 \quad (1)$$

式中,  $D_n, B, \tau_s, R_{au}, d, J, e$  分别为扩散系数、自发辐射复合系数、载流子寿命、俄歇复合速率、有源层厚度、有源区电流密度和电子电荷.  $g(N)$  为腔增益, 可近似地表示为

$$g(N) = a[N(r) - N_{th}] \quad (2)$$

$P_a$  为腔内平均光功率

$$P_a = \frac{1}{\pi s_{act}^2} \int \frac{1}{2} c n \epsilon_0 |\Psi_1(r)|^2 dr \quad (3)$$

$|\bar{E}_1|^2$  为归一化光场强度分布

$$|\bar{E}_1(r)|^2 = \frac{|\Psi_1(r)|^2}{\frac{1}{2s} \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi_1(r)|^2 dr} \quad (4)$$

式中,  $a$  为增益系数,  $N_{th}$  为透明载流子浓度,  $n$  为有源层折射率,  $\Psi_1$  为总的横模模式.

### 1.3 电流密度分布

在量子阱激光器中, 电势分布  $V(x, y, z)$  满足泊松方程<sup>[5-7]</sup>

$$\nabla^2 V(x, y, z) = 0 \quad (5)$$

根据实际 VCSEL 结构, 选用柱坐标, 泊松方程和注入电流密度方程的准三维形式为

$$\frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (6)$$

$$J(r, z) = -\sigma_{act} \nabla V(r, z) \quad (7)$$

式中  $\sigma_{act}$  是有源层的电导率.

假定电极电压为  $V_0$ , 泊松方程边界条件为<sup>[5]</sup>

$$V = V_0 \quad (z=0, r \geq w) \quad (8a)$$

$$\frac{\partial V}{\partial z} = 0 \quad (z=0, r \leq w) \quad (8b)$$

$$\frac{\partial V}{\partial r} = 0 \quad (r=0) \quad (8c)$$

$$\sigma_i \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=z_i} = \sigma_j \frac{\partial V}{\partial z} \Big|_{z=z_j} \quad (8d)$$

式中  $\sigma_i, \sigma_j$  为连结处各层电导率.

### 1.4 光场分布

量子阱激光器的光传输满足麦克斯韦方程组, 光场的波动方程为<sup>[5,7,10]</sup>

$$\nabla^2 E + \omega^2 \mu_0 \epsilon E = 0 \quad (9)$$

式中,  $\omega = 2\pi\nu$ ,  $\mu_0$  是真空磁导率,  $\epsilon$  是介电常量. 如果采用柱坐标, 光场强度可以写成

$$E(r, \theta, z) = \Psi(r) \phi(\theta) \exp(-i\beta_z z) \quad (10)$$

式中,  $\beta_z$  为  $z$  方向传播常量

$$\phi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{im\theta}, m=0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (11)$$

将式(10)代入式(9), 得到

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial \Psi(r)}{\partial r} \right] + \left[ k_0^2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \frac{m^2}{r^2} - \beta_z^2 \right] \Psi(r) = 0 \quad (12)$$

### 1.5 热场分布

根据激光器的圆柱对称结构, 并假设在任意两层界面处温度分布连续, 且在激光器顶部、底部和侧面都没有热量损耗, 热流以二维方式流入温度为  $T_r$  的传导热沉. 则热传导方程为<sup>[5-7,10]</sup>

$$\frac{1}{\gamma_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\kappa_i} Q_i(r, t) \quad (13)$$

边界条件为

$$T(z=0) = T_r \quad (14a)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_s} = 0 \quad (14b)$$

$$\kappa_i \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_i} = \kappa_{i+1} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=z_i} \quad (14c)$$

$\kappa_i, \gamma_i$  分别为第  $i$  层的热导率和热扩散系数,  $H$  和  $r_s$  分别是 VCSEL 的高度和半径,  $Q_i(r, t)$  是第  $i$  层的热流密度.

此外, VCSEL 中主要有两种热源. 本文中认为沿  $z$  轴方向每一层热源都是均匀分布的<sup>[8,10,11]</sup>.

在包层、DBR层和衬底层中热源主要是焦耳热. 热流密度可表示为

$$Q_i(r) = j^2(r) \rho_i \quad (15)$$

$\rho_i$  为相应层的电阻率.

在有源层主要热源是非辐射复合和自发发射吸收, 可表示为

$$Q_a(r) = \frac{V(r)(1 - \eta_{sp} f_{sp})}{d} [j_{th} + (j(r) - j_{th})(1 - \eta_i)] \quad (16)$$

式中  $d$  是有源层厚度,  $\eta_{sp}$  和  $\eta_i$  分别为自发发射和受激发射的内部量子效率,  $f_{sp}$  是自发发射逃逸因子,  $j_{th}$  是有源区的平均阈值电流密度.

## 2 计算方法及结果

对热传导方程的求解, 可以采用格林函数的方法<sup>[8,10,11]</sup>. 这里为了与其它方程更好耦合, 采用有限差分法(简称 FDM)和矩阵特征值法求解以上方程的自洽解<sup>[6,7,12,13]</sup>. 通过对比研究 N-DBR 和双氧化限制层对 VCSEL 电、光、热特性的影响. 为简化计算, 只取两个激射模式(基模  $\Psi_0$  和一阶模  $\Psi_1$ , 这时  $\Psi_i = \Psi_0 + \Psi_1$ ). 计算过程中采用的主要物理参量列于表 1.

表 1

| 参量         | 符号          | 数值                                          |
|------------|-------------|---------------------------------------------|
| 电子扩散系数     | $D_n$       | $48 \text{ cm}^2/\text{s}$                  |
| 透明载流子浓度    | $N_{th}$    | $1.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$        |
| 激光频率       | $\nu$       | $3.482 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}$       |
| 自发发射逃逸因子   | $f_{sp}$    | 0.667                                       |
| 自发发射内部量子效率 | $\eta_{sp}$ | 0.5                                         |
| 受激发射内部量子效率 | $\eta_i$    | 0.9                                         |
| N-DBR 电阻率  | $\rho_n$    | $3.19 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{m}$ |
| P-DBR 电阻率  | $\rho_p$    | $0.0023 \Omega \cdot \text{m}$              |
| GaAs 折射率   |             | 3.655                                       |
| AlAs 折射率   |             | 3.178                                       |

图 2 为单氧化限制层的电势分布, 电流方向垂直于等势线. 图 3 为考虑 N 型 DBR 和双氧化限制层时的等势线分布. 可见, N-DBR 层有电流分布, 下限制层也可以起到部分限制电流的作用.

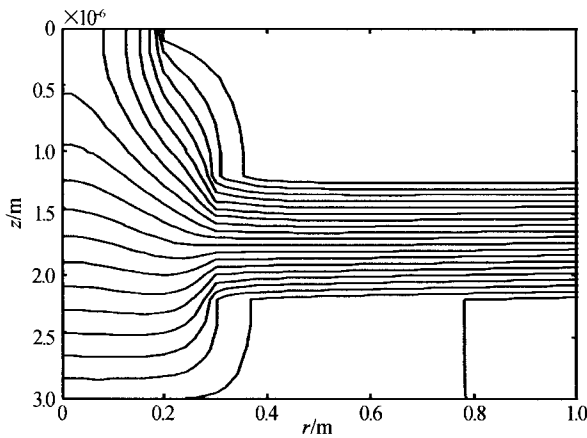


图 2 单氧化限制层 VCSEL 中的等势线分布  
Fig. 2 Electric potential distributions in VCSEL with single oxide-confined region

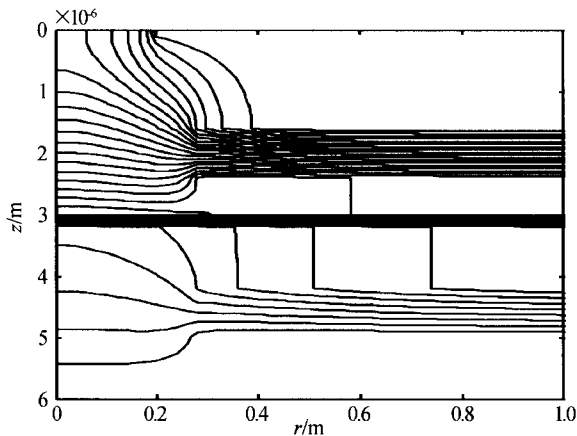


图 3 双氧化限制层 VCSEL 中的等势线分布  
Fig. 3 Electric potential distributions in VCSEL with double oxide-confined regions

图 4、图 5 和图 6 为考虑和不考虑 N-DBR 及下限制层时, 注入有源区电流密度分布、有源区中载流子浓度分布和温度分布的比较, 从图中可以看出, 当

考虑到 N 型 DBR 及下限制层时, 电流密度和载流子浓度比不考虑时都有一定程度的减小, 且扩展程度减小, 同时温度降低, 这对于降低 VCSEL 的阈值有利<sup>[14]</sup>.

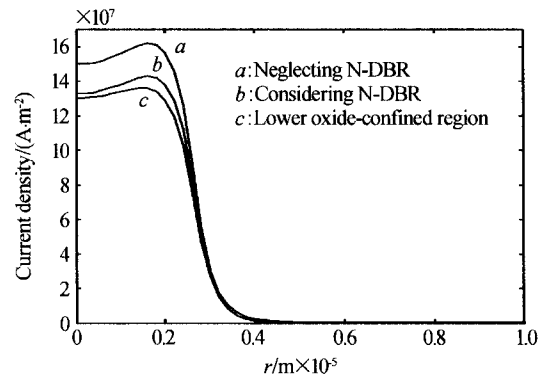


图 4 电流密度分布  
Fig. 4 Current density distributions

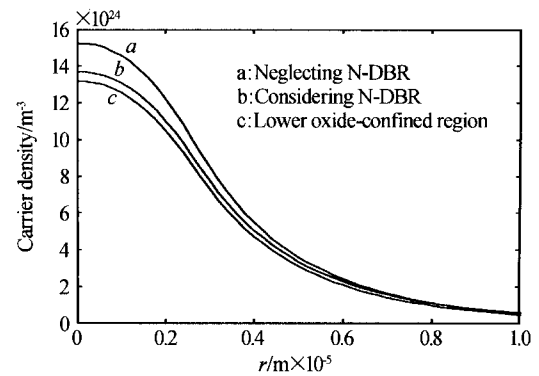


图 5 载流子浓度分布  
Fig. 5 Carriers concentration distributions

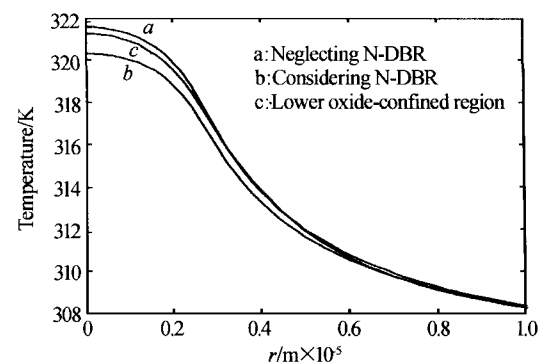


图 6 温度分布  
Fig. 6 Temperature distributions

最后计算了 VCSEL 的光场. 图 7 为单氧化或双氧化限制层结构 VCSEL 激光腔内的基模和一阶模的分布, 分别用  $A_0, A_1, B_0, B_1$  表示. 通过比较可发现, 当 VCSEL 为双氧化限制层结构时, 与单氧化限制层结构相比, 基模强度增加 ( $\sim 7.4\%$ ), 一阶模强度有明显降低 ( $\sim 11.5\%$ ).

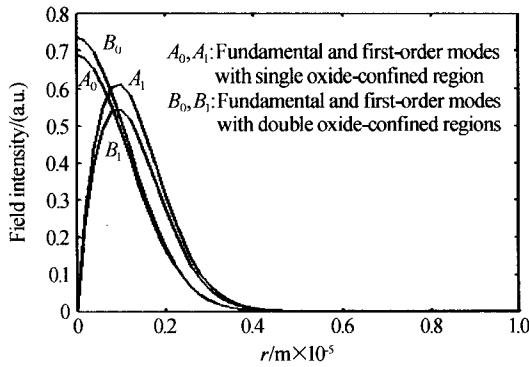


图7 单氧化或双氧化限制层结构 VCSEL 激光腔内的基模和一阶模分布

Fig. 7 Fundamental and first-order modes distributions in VCSEL cavity with single or double oxide-confined regions

### 3 结论

本文建立了一个直接耦合的准三维理论模型,通过有限差分法求解泊松方程、载流子扩散方程、热传导方程和光场方程的自洽解,实现了电、热和光场的耦合,并考虑了 N-DBR 及双氧化限制层对 VCSEL 特性的影响。

计算结果表明:在精密计算及实际的器件制造时,必须考虑到 N-DBR 的影响,否则会带来较大的误差;同时双氧化限制结构可以起到较好的限制电流的作用,使载流子浓度随之降低,限制了有源区温度的升高和展宽,对于降低 VCSEL 阈值,抑制高阶横模有一定的帮助,是制造 VCSEL 器件时可以采用的一种方法。

#### 参考文献

- Iga K, Koyama F, Kinoshita S. Surface emitting semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1988, **24**(9):1845~1855
- 江剑平. 半导体激光. 北京:电子工业出版社,2000. 169~188  
Jiang J P. Semiconductor Lasers. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 169~188
- Hadley G R, Lear K L, Warren M E, et al. Comprehensive numerical modeling of vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, **32**(4):607~616
- Huffaker D L, Graham L A, Deng H, et al. Sub-40 $\mu$ A continuous-wave lasing in an oxidized vertical-cavity surface-emitting laser with dielectric mirrors. *IEEE Photon Tech Lett*, 1996, **8**(8): 974~976
- 赵一广,张宇生,黄显玲. 垂直腔面发射半导体激光器的电、热和光波导特性. 半导体学报, 1999, **20**(11):963~970  
Zhao Y G, Zhang Y S, Huang X L. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, **20**(11):963~970
- Liu S A, Lin S M, Kang X J, et al. Numerical analysis of steady current and temperature distributions and characteristics of transverse mode in VCSEL. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, **20**(11):1034~1039
- 刘立新,赵红东,高铁成,等. 垂直腔面发射激光电、光特性分析. 光子学报, 2003, **32**(5): 517~519  
Liu L X, Zhao H D, Gao T C, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(5):517~519
- 刘立新,赵红东,曹萌. 垂直腔面发射激光器热场特性分析. 微纳电子技术, 2003, (4):8~11  
Liu L X, Zhao H D, Cao M. *Micronanoelectronic Technology*, 2003, (4):8~11
- 晏长岭,宁永强,秦莉,等. 高功率 InGaAs 量子阱垂直腔面发射激光器的研制. 光子学报, 2004, **33**(9):1029-1031  
Yan C L, Ning Y Q, Qin L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(9):1029~1031
- Zhao Y G, McInerney J G. Transverse-mode control of vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1996, **32**(11):1950~1958
- Zhao Y G, McInerney J G. Transient temperature response of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, **31**(9):1668~1673
- Xin Guofeng, Zhao Hongdong, Chen Guoying, et al. Influence of N-type DBR on characteristics of VCSEL. *Proc SPIE*, 2002, **4913**:221~225
- 侯识华,赵鼎,叶晓军,等. 键合界面阻抗对 VCSEL 的电热学特性的影响. 光子学报, 2005, **34**(4):503~506  
Hou S H, Zhao D, Yie X J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4):503~506
- 高洪海,林世鸣,高学军,等. 垂直腔面发射激光器热特性的实验研究. 光子学报, 1997, **26**(6):522~526  
Gao H H, Lin S M, Gao X J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(6):522~526

## Influences of N-DBR and Double Oxide-confined Regions on the Characteristics of Electrical, Optical and Thermal Fields in VCSEL

Liu Lixin<sup>1,2,3</sup>, Zhao Hongdong<sup>4</sup>, Niu Hanben<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

<sup>2</sup> Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

<sup>3</sup> Institute of Optoelectronics, Shenzhen University, Shenzhen 518060

<sup>4</sup> School of Information Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130

Received date: 2004-12-13

**Abstract** In this paper, a direct coupling theoretical model in quasi-three-dimension for the gain-wave guide Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL) has been created. With the finite-difference method, self-consistent solutions for the injected current density, carrier concentration, optical field and thermal conduction equations are realized to study the characteristics of electrical, optical and thermal fields distribution in VCSEL. A VCSEL with double oxide-confined regions is introduced. The influences of N-DBR layers and double oxide-confined regions on the characteristics of VCSEL are analyzed contrastively. The calculation results show that if N-DBR layers are not considered, there must be some errors to the practical VCSEL. The results also indicate that the structure of double oxide-confined regions in VCSEL has been improved greatly the characteristics of lasers, and it provides a method of reducing threshold current and controlling high-order modes.

**Keywords** Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser (VCSEL); Finite-difference method (FDM), N-DBR layers; Double oxide-confined regions



**Liu Lixin** was born in 1977. She received the B. S. degree and M. S. degree from Hebei University of Technology in 2000 and 2003 respectively. She is currently working toward the Ph. D. degree in physical electronics at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences.