

n 型 DBR 中电势对垂直腔面发射激光器阈值的影响^{*}

赵红东¹⁾ 宋殿友¹⁾ 张智峰¹⁾ 孙 静¹⁾ 孙 梅¹⁾ 武 一¹⁾ 温幸饶²⁾

¹⁾ 河北工业大学信息工程学院, 天津 300130)

²⁾ 河北省广播电信局, 石家庄 050041)

(2004 年 1 月 5 日收到, 2004 年 2 月 12 日收到修改稿)

编制了增益波导垂直腔面发射激光器直接耦合准三维仿真软件, 给出了电势、载流子浓度、光场和热场分布. 计算结果表明, 只有同时考虑 p 型和 n 型分布布拉格反射镜中的电势, 才能准确地反映垂直腔面发射激光器的阈值特性.

关键词: 垂直腔面发射激光器, p 型 DBR 层, n 型 DBR 层, 有限差分法

PACC: 4255, 4260, 6120, 0365

1. 引 言

半导体垂直腔面发射激光器(VCSEL)与边发射激光器相比, 具有低阈值、小远场发散角、高调制频率、易实现单纵模工作和二维集成, 不必解理就能完成工艺的制作和检测等优点, 在光纤通讯、光互连、并行光信号处理、光集成元件等方面有着广泛的应用前景^[1-7].

自 1977 年 Iga 提出研制 VCSEL 的设想以来, 对这种激光器的研究取得了很大进展. 报道了理论模型^[4,5]来分析 VCSEL 的电、光、热特性, 但忽略了 n 型分布布拉格反射镜(DBR)层对 VCSEL 电势特性的影响, 这就必然会引起一定的误差. 本文建立了增益波导(VCSEL)直接耦合准三维理论模型, 通过有限差分法对泊松方程、载流子浓度和光场分布方程自洽求解, 研究了忽略 n 型 DBR 层对阈值等势线、注入电流密度、载流子浓度和光场的影响.

2. 理论模型

2.1. 激光器结构

图 1 为 VCSEL 的结构示意图. n 型和 p 型 DBR 分别由 30 和 20 个周期的 AlAs/Al_{0.16}Ga_{0.84}As 组成,

三个 In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs 应变量子阱夹在 Ga_{0.5}Al_{0.5}As 中间组成有源区, 阱和垒的厚度分别为 8 和 10nm, 所有以上各层生长在 n⁺-GaAs 衬底上. 通过质子轰击在 p 型 DBR 中形成高阻区限制电流扩展, 并在有源区中形成增益. 从顶部沿一个圆形窗口出射激光.

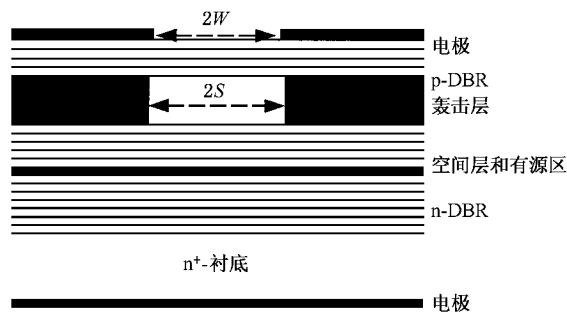


图 1 VCSEL 的结构. W 和 S 分别为输出光窗口、高阻区窗口半径

2.2. 电压和电流密度

在半导体激光器中, 电势分布 V 满足柱坐标下 Poisson 方程:

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

注入电流密度

$$J(r, z) = -\sigma_{act} \nabla V(r, z), \quad (2)$$

^{*} 河北省自然科学基金(批准号: 602074)和光电信息技术科学教育部重点实验室资助的课题.

其中 σ_{act} 为有源层的电导率.

2.3. 载流子浓度

载流子浓度分布对增益半导体激光器行为起重要作用, 根据电子和空穴连续性方程, 稳态时半导体激光器有源区的非平衡载流子满足:

$$D_n \nabla^2 N(r) - BN^2(r) - \frac{N(r)}{\tau_s} - \frac{g(N(r))P_a |E|^2}{h\nu} + \frac{J}{ed} = 0, \quad (3)$$

其中 D_n , B , τ_s , d , J 分别为扩散系数、自发辐射复合系数、载流子寿命、有源层厚度和有源区电流密度, $g(N(r))$ 为增益, P_a 为腔内平均光功率.

2.4. 光场分布

激光器的光波满足 Maxwell 方程组, 采用柱坐标中光场强度可以写成

$$E(r, \theta, z) = \psi(r) \phi(\theta) \exp(-i\beta_z z), \quad (4)$$

其中 β_z 为 z 方向传播常数,

$$\phi(\theta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{im\theta}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

其中 $\psi(r)$ 满足:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi(r)}{\partial r} \right) + \left(k_0^2 \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - \frac{m^2}{r^2} - \beta_z^2 \right) \psi(r) = 0. \quad (6)$$

2.5. 热场分布

根据实际的激光器圆柱对称结构, 并假设在任意两层界面处温度连续分布, 在激光器顶部、底部和

侧面都没有热量损耗, 热流向热沉传递, 热传导方程为

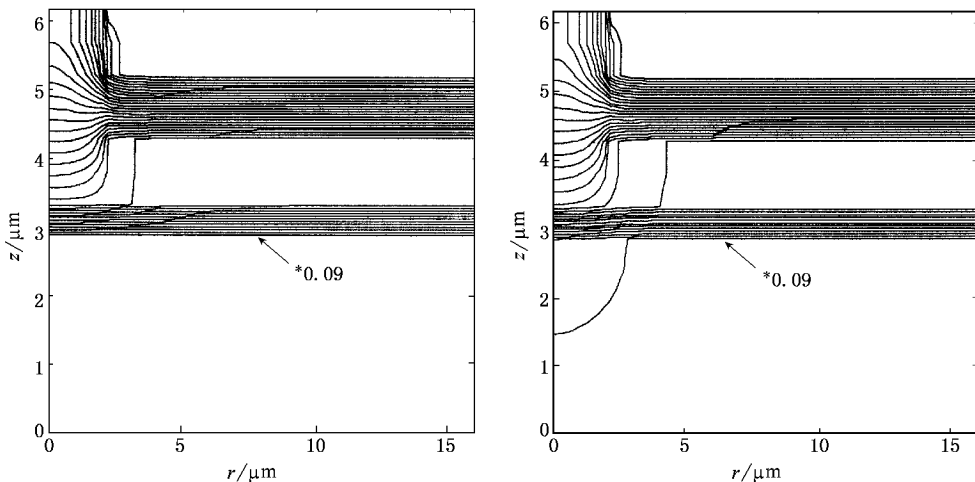
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{\kappa_i} Q_i(r, z) = 0, \quad (7)$$

$Q_i(r, z)$ 分别为有源区、两个包层 n 型和 p 型 DBR 层及衬底层的热流密度.

3. 计算方法与结果

采用有限差分法(FDM)和矩阵特征值法求解上方程的自洽解. 首先通过有限差分法把方程(1), (3)(6)(7)离散化, 再把方程(6)转化成求解代数特征值的问题, 通过自洽计算得到稳定解. 计算中所用物理参数: 电子扩散系数为 $4.8 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, 内部损耗为 $4.6 \times 10^3 \text{ m}^{-1}$, p 型 DBR 层电导率和 n 型 DBR 层电导率分别为 4.348×10^2 和 $3.13 \times 10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, 自发射内量子效率和受激发射内量子效率分别为 0.5 和 0.9, 高质子轰击区的半径为 $2 \mu\text{m}$.

图 2(a) 为忽略 n 型 DBR 中电势的等势线分布. 图 2(b) 为同时包含 p 型和 n 型 DBR 中电势. 同时分析两种 DBR 中电势, 研究的区域要扩大一倍, 编制程序和运算时间要相应地增加. 图 2 电势线稠密程度表示流过电流的大小和方向, 由图 2 可以看出, 在 p 型 DBR 区内, 从电极流出的电流通过限制孔向下扩展流向有源区. 有源区中载流子沿径向扩散形成的增益波导, 为激射激光提供了必要条件. 同时电流和激光产生热源引起温度上升, 温度场向外扩散. 另一方面, 载流子和温度的扩散影响电势和光场, 它们相互依赖并在有源区内产生耦合.



(a) 只包含 p 型 DBR 中电势

(b) 同时包含 p 型和 n 型 DBR 中电势

图 2 阈值时 VCSEL 中的电势分布

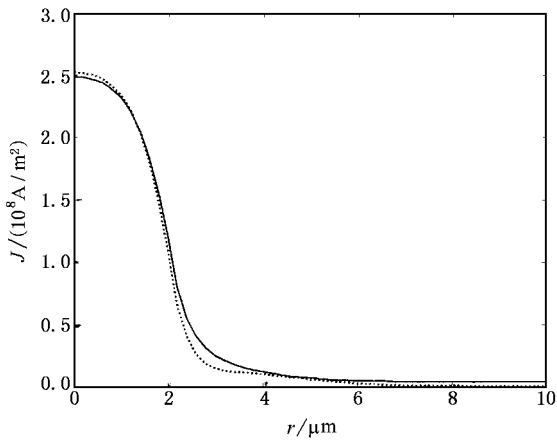


图3 VCSEL 中阈值电流密度 $S = 2\mu\text{m}$ r ——为包含 p 型和 n 型 DBR 中电势 $\dots\dots$ 为忽略 n 型 DBR 中电势

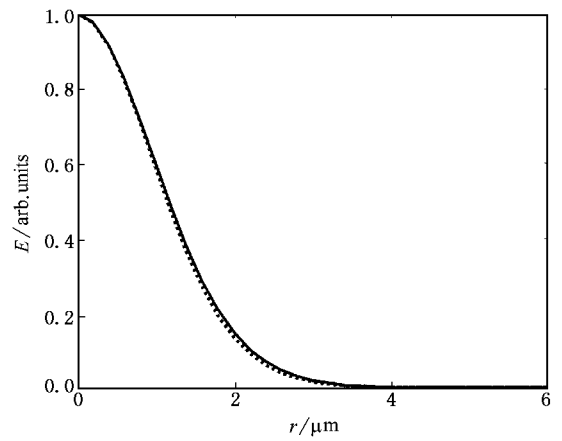


图5 阈值时 VCSEL 中光场 图注同图3

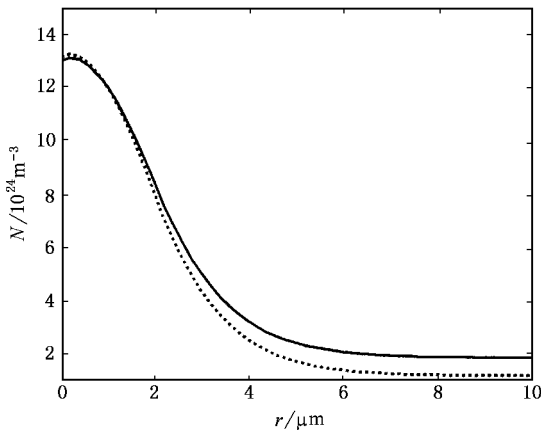


图4 VCSEL 中阈值载流子密度 图注同图3

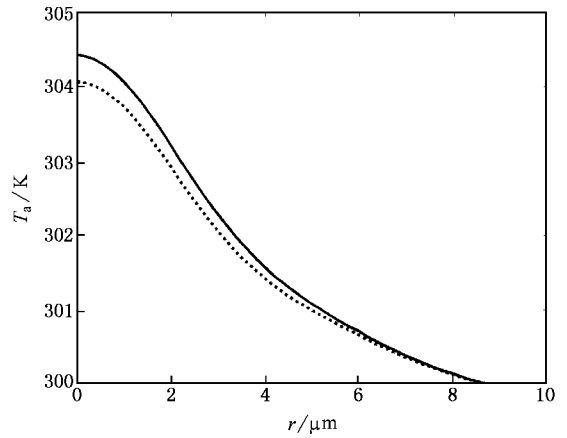


图6 阈值时 VCSEL 有源区的温度 图注同图3

虽然 n 型 DBR 的电阻率小于 p 型 DBR 区域,但是在 n 型 DBRs 中仍然存在一定的压降和等势线,并且 n 型 DBR 存在电势影响了 p 型 DBR 中等电势线分布,如图 3(b)所示.忽略 n 型 DBR 中电势分布,认为电流通过有源区后均匀地垂直向下流动,n 型 DBRs 的压降和 n 型 DBR 中电流的扩展被忽略,因此两个模型计算的阈值电流密度存在差异(图 3).考虑 n 型 DBR 的电势后,阈值电流密度和载流子密度在较大范围扩展,阈值电流和器件温升高于简单模型,并且基模光场也存在差异,见图 4 至图 6.

4. 总 结

建立了统一考虑 p 型和 n 型 DBR 的模型,表明 n 型 DBR 中的电势对垂直腔面发射激光器阈值特性的影响.忽略 n 型 DBR 中电势分布,只考虑 p 型 DBR 中的电场,可以使模型简化,但是必然产生两方面的误差:n 型 DBR 中存在的压降,不能包含电流在 n 区的扩展,利用简单模型描述的阈值电流、阈值载流子密度、阈值有源区温度扩展范围要小于整体考虑器件情况.

[1] Iga K, Koyama F and Kinoshita S 1988 *IEEE J. Quantum Electron.* **24** 1845
 [2] Zhao H D et al 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 1

[3] Hadley G R et al 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 607
 [4] Zhao Y G, Zhang Y S and Huang X L 1999 *Chin. J. Semicond.* **20** 963 (in Chinese) 赵一广、张宇生、黄显玲 1999 半导体学报

- 20 963] Chinese] 郭长志、陈水莲 1997 物理学报 46 1731]
- [5] Zhao Y G and McInerney J G 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** [7] Zhao H D *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 77 (in Chinese] 赵红东等 2003 物理学报 52 77]
- [6] Guo C Z and Chen S L 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1731 (in

Influence of the potential in n-type DBR on threshold in vertical-cavity surface-emitting lasers *

Zhao Hong-Dong¹⁾ Song Dian-You¹⁾ Zhang Zhi-Feng¹⁾ Sun Jing¹⁾ Sun Mei¹⁾ Wu Yi¹⁾ Wen Xing-Rao²⁾

¹⁾(College of Information Engineering , Hebei University of Technology , Tianjin 300130 ,China)

²⁾(Television Broadcasting Office ,Hebei Province ,Shijiazhuang 050041 ,China)

(Received 5 January 2004 ; revised manuscript received 12 February 2004)

Abstract

In this paper , a simulation software with a direct coupling in quasi-three-dimensions for the gain-waveguide vertical-cavity surface-emitting lasers has been realized. The electrical field , carrier density , optical-field and temperature distributions in the vertical-cavity surface-emitting lasers are given. The proper threshold characteristics are shown only when the potentials in the p-type and n-type DBR layers are studied together.

Keywords : vertical-cavity surface-emitting lasers , p-type DBR layers , n-type DBR layers finite-difference method

PACC : 4255 , 4260 , 6120 , 0365

* Project supported by the Natural Science Foundation of Hebei Province ,China(Grant No. 602074) ,and the Funds of Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science ,Ministry of Education ,Tianjin University ,China.