

# 确定 VCSEL 电势及载流子自洽分布算法的研究\*

赵 鼎 林世鸣

(中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 分别使用准 Fermi 能级和 pn 结模型决定 VCSEL 的有源层压降, 建立了两种自洽确定 VCSEL 中电势及载流子分布的方法. 针对电极电压变化和氧化层限制孔径变化的两种情况, 在阈值附近对器件中的结电压分布、载流子浓度分布和注入有源层电流密度分布进行了计算; 针对两者所得结果的差异进行了简要的分析, 指出了二者的特点及适用范围.

**关键词:** 准 Fermi 能级; pn 结模型; VCSEL

**EEACC:** 8220B

**中图分类号:** TN36      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-4177(2003)10-1093-06

## 1 引言

随着垂直腔面发射激光器(VCSEL)制造工艺的逐步完善, 对器件进行理论分析和建模的要求越来越迫切, 这不仅能通过深入了解激光器内部的物理过程而进一步提高器件性能, 更重要的是为在应用系统中进行有效的 CAD 设计寻求可行的方法. 在 VCSEL 中, 电、热和光过程的相互作用<sup>[1,2]</sup>最终决定器件的光场输出模式, 这其中电学过程处于十分重要的地位, 能否自洽地获得电场在器件中的分布将影响后继的热场和光场计算是否合理, 因此有必要对器件中电场的确定方法进行分析.

氧化限制层的采用在极大降低 VCSEL 阈值电流<sup>[3,4]</sup>的同时, 也使器件结构更加复杂. 通过解析方法确定电压分布以及电流扩散形式面临很大的困难, 早期的文献多引入假定分布, 但这会带来人为的误差. 除此之外器件内的电场分布还与有源层的载流子浓度分布直接相关, 因此器件内部的电场不可能仅由外加电压决定, 而是与有源层压降(通过载流子浓度决定)有动态的相互调整过程, 最终达到自

洽. 本文采用数值方法计算 VCSEL 内部的电势分布并在计算中考虑电势分布与载流子浓度分布的相互作用, 获得能准确反映器件内部电学过程的结果.

## 2 理论模型

在图 1 所示的 VCSEL 结构中, P 型 DBR 区由 AlGaAs/GaAs 堆叠构成. 考虑到目前广泛采用在 AlGaAs 与 GaAs 间引入组分渐变层来减小 P 型区的串联电阻, 此处忽略了 AlGaAs 与 GaAs 间 P-p 同型异质结的影响, 认为 P 型 DBR 层是均匀的电阻区, 具有相同的电阻率, 这样的假设是合理的<sup>[5]</sup>; 对于 N 型 DBR 区(同样由 AlGaAs/GaAs 堆叠)以及 n 型衬底, 由于其电阻率很小, 具有较大的厚度致使该区域电势变化缓慢, 不像 P 型 DBR 区那样电流扩散明显且存在高阻的氧化限制层, 因此可以把 N 型 DBR 区以及 n 型衬底当做等势区对待, 忽略其中的电势降落<sup>[5,6]</sup>; 有源区为不掺杂 GaAs/AlGaAs 量子阱, 由于工艺原因为弱 n 型, 因此在有源区的上方形成 P-n 异型异质结, 下方形成 n-N 同型异质结, 有源层电势降落的确定是要关注的主要问题.

\* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 69896260, 69937010)

赵 鼎 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 现主要从事半导体光电器件模拟方面的研究.

林世鸣 男, 1945 年出生, 研究员, 现主要从事半导体光电器件方面的研究.

2002-11-12 收到, 2003-02-24 定稿

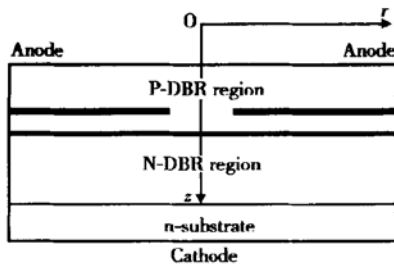


图 1 VCSEL 截面图

Fig. 1 Schematic of VCSEL cross-section

在电阻区, 电势的分布可以由 Laplace 方程描述:

$$\Delta^2 V(r, z) = 0 \quad (1)$$

这里考虑了柱坐标的对称性, 所以只涉及  $r, z$  两个方向的变化. 为了能与有源层的电势降落联系起来, 各点的电流密度按下式计算:

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

其中  $\sigma$  是电导率. 当考虑注入有源区的电流时, 只有  $z$  方向分量是需要的.

下面针对近阈值(此时的出射光功率为 0)的情况, 分别说明两种确定有源层压降的处理方法.

### 2.1 通过准 Fermi 能级确定有源层压降

注入有源区各处的载流子浓度不同, 将沿梯度降落方向发生扩散. 由于有源层纵向厚度很小, 可以认为纵向浓度均匀, 只考虑径向的载流子浓度变化<sup>[5,6]</sup>. 载流子在双异质结有源层中的输运可以由文献[6]中提出的“静止电子, 扩散空穴”模型描述, 用下式表示:

$$\frac{D_n}{r} \times \frac{d}{dr} \left[ r \frac{dn(r)}{dr} \right] - \frac{n(r)}{\tau_{nr}} - Bn^2(r) + \frac{J_{eff}(r)}{ed} = 0 \quad (3)$$

其中  $D_n$  是扩散系数;  $d$  是量子阱有源层等效厚度;  $e$  是电子电荷;  $\tau_{nr}$  是载流子非辐射复合时间;  $J_{eff}(r)$  是注入有源层的电流密度;  $B$  是自发射系数, 典型值为  $1.0 \times 10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$ , 注意到  $B$  是很小的, 在计算中可以忽略它的影响.

由(3)式得到载流子浓度的径向分布之后, 可以通过电子和空穴的准 Fermi 能级差得到在阈值附近有源层的电势降落<sup>[7]</sup>. 对于量子阱情形, 其数学表示如下:

$$n(r) = \frac{m_e^* k_B T}{\pi \hbar^2 d_w} \ln \left[ 1 + \exp \frac{F_n(r) - E_{1n}}{k_B T} \right] \quad (4)$$

$$p(r) = \frac{m_h^* k_B T}{\pi \hbar^2 d_w} \ln \left[ 1 + \exp \frac{E_{1p} - F_p(r)}{k_B T} \right] \quad (5)$$

$$V_{junc}(r) = (F_n(r) - F_p(r))/e \quad (6)$$

其中  $k_B$  是 Boltzman 常数;  $\hbar$  是普朗克常数;  $T$  代表温度;  $d_w$  是量子阱宽度;  $m_e^*$  和  $m_h^*$  分别为导带电子和价带空穴的有效质量;  $E_{1n}, E_{1p}$  分别是量子阱中电子第一子能级和空穴第一子能级;  $F_n, F_p$  分别是电子和空穴的准 Fermi 能级. 由有源层的电中性条件, 可以认为  $n(r) \approx p(r)$ .

从前面分析中已知 N 型 DBR 区以及 n 型衬底可当做等势区, 因此该区域电子的准 Fermi 能级  $F_n$  是水平线, 由电子  $F_n$  能级的空间连续性, 得到在有源层中电子的准 Fermi 能级也是无变化的<sup>[6]</sup>.

通过载流子浓度求得有源层压降后, 将其作为电阻层下边界条件, 此时电阻区中的电势分布可以得到确定解. 具体过程是: 首先假定有源层上方电势  $V_{assum}$ , 以此作为边界条件求解(1)式, 之后由(2)式求出注入有源层的电流密度, 再利用(4)、(5)及(6)式由准 Fermi 能级定出新的电势  $V_{junc}$ , 对前面假定的有源层电势进行修正:

$$V_{nassum} = V_{assum} + \zeta V_{junc} \quad (7)$$

式中  $\zeta$  是比例系数. 用新得到的电势  $V_{nassum}$  作为边界重复上述过程, 直到相邻两次求得的电势变化很小时, 认为各物理量达到自洽分布.

### 2.2 通过 pn 结模型确定有源层压降

如图 2 所示, 在有源区的压降用正向偏置二极管模型表示.

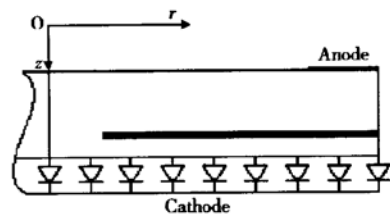


图 2 有源层的 pn 结模型

Fig. 2 PN junction model of active layer

此时, 载流子的扩散对有源层各处电势的影响被忽略, 在求解(1)式时不明显涉及载流子计算. 电阻区的电势分布自洽确定之后, 再通过(3)式确定载流子的分布, 尽管这两个过程被分别进行, 但在后面将看到载流子分布与采用 2.1 节中方法所得结果相比差别很小. 通过 pn 结的电流与电压关系如下:

$$V_{\text{junc}}(r) = \frac{nk_B T}{e} \ln \frac{J(r)}{J_{\text{sat}}} \quad (8)$$

其中  $J_{\text{sat}}$  是暗电流密度;  $n$  是理想系数, 一般取为 2.  $\text{pn}$  结模型尽管是对结压降的近似描述, 但在器件分析和实际计算中被广泛使用<sup>[8,9]</sup>.

与 2.1 节中提到的迭代计算类似, 首先给定假设的有源层电势, 作为边界条件求解 (1) 式, 之后由 (8) 式计算出新的电势值作为边界条件重复求解 (1) 式, 直到相邻两次计算误差小于给定值时终止. 注意这里不使用 (7) 式做修正, 另外也不计算载流子的分布.

### 3 计算结果及讨论

考虑对外加电压恒定, 氧化限制孔径变化; 外加电压变化, 氧化限制孔径恒定两种情况进行计算并

对结果进行比较. 有源层半径取为  $15\mu\text{m}$ , 电极处在 P 型 DBR 区上方从内半径  $13\mu\text{m}$  至器件边缘的环形区域内, 有源层上方电阻区 (包括 P 型 DBR 区和空间层) 厚度为  $3.15\mu\text{m}$ , 高阻限制区是厚度约  $0.08\mu\text{m}$  的薄氧化铝层.

在 VCSEL 激光器中 P 型 DBR 区中的电阻率对器件的影响主要体现在它形成的热源产生焦耳热使器件性能下降. 对于电场分布而言, 电阻率只是造成电势在电阻区中的降落, 而对电势分布形式没有大的影响, 我们取不同电阻率进行计算均得到类似的结果. 在下面的计算中采用的是较小的电阻率.

电极电压取  $1.7\text{V}$ , 限制窗口半径分别取  $1.5$ 、 $2.0$  和  $3.0\mu\text{m}$  时, 有源层上方的电势、注入电流密度及有源层中的载流子浓度沿径向的分布情况如图 3.4 所示.

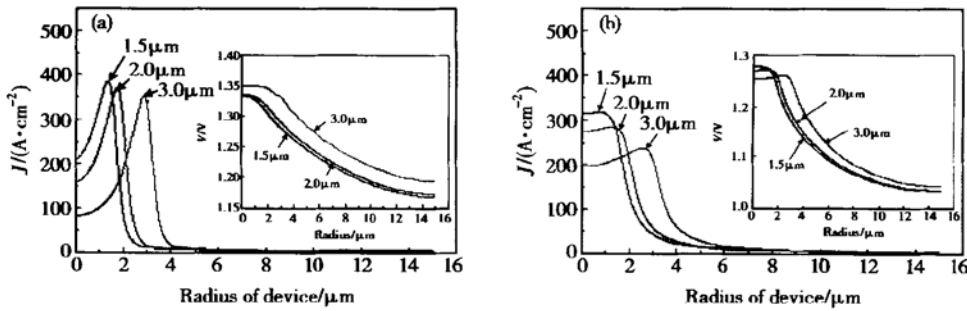


图 3 采用准 Fermi 能级方法 (a) 和  $\text{pn}$  结模型 (b) 得到注入电流密度及有源层压降 (插图) 随半径变化  
Fig. 3 Injected current density and voltage drop of active layer (Inset) along device radius obtained by quasi-Fermi level method (a) and PN junction model (b)

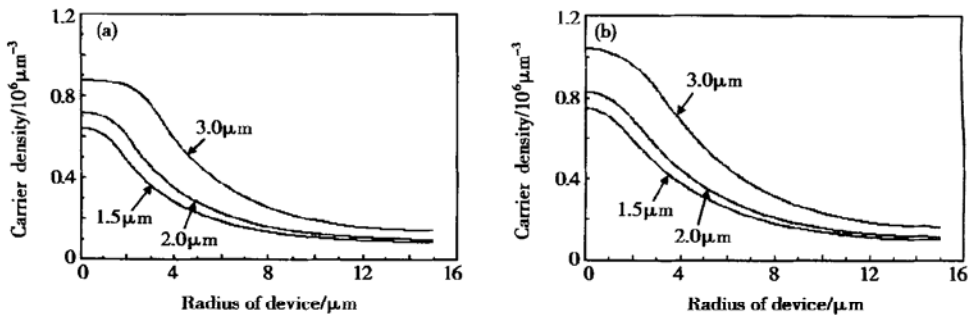


图 4 采用准 Fermi 能级方法 (a) 和  $\text{pn}$  结模型 (b) 得到载流子浓度随半径变化  
Fig. 4 Distribution of carrier density along device radius obtained by quasi-Fermi level method (a) and PN junction model (b)

从图 3 可见准 Fermi 能级方法确定的电流密度分布在电流限制区内的变化很大, 而由  $\text{pn}$  结模型得

到的结果则比较平坦. 随着限制孔径增大, 二者的电流密度峰值均有所下降, 反映出限制孔径对提高注

入电流密度的作用. 从插图中描绘的有源层上方电势随半径变化的曲线可见, 准 Fermi 能级方法得到的结果比较平缓, pn 结模型得到的结果则在限制区内比较平坦, 在限制区外下降较快, 两种方法得到的曲线有较大的差异, 但二者在限制孔径区域内差别在 0.08V 以内, 这是由于两种方法在计算时涉及到的结点不同以及 pn 结模型固有缺陷(将在后面详述)造成的.

从图 4 中注意到两者求得的载流子浓度分布形状在有源区中差别较小, 且差异随限制孔径的减小而下降. 这表明 pn 结模型近似对载流子浓度分布形

状的影响很小(浓度幅值的差异是由于注入总电流不同造成的), 原因是: (1) 尽管二者得到的电流密度分布不同, 但载流子分布很大程度上只取决于有源层中注入的电流总量; (2) 限制孔径比较整个有源区半径来讲很小, 电流主要从限制窗口注入; (3) 载流子扩散系数比较大, 有助于减小注入电流密度分布不同造成的差异.

限制窗口半径取 2.0 $\mu\text{m}$ , 电极电压分别取 1.4、1.7 和 2.0V 时, 有源层上方的电势、注入电流密度及有源层中的载流子浓度沿径向的分布情况表示在图 5.6 中.

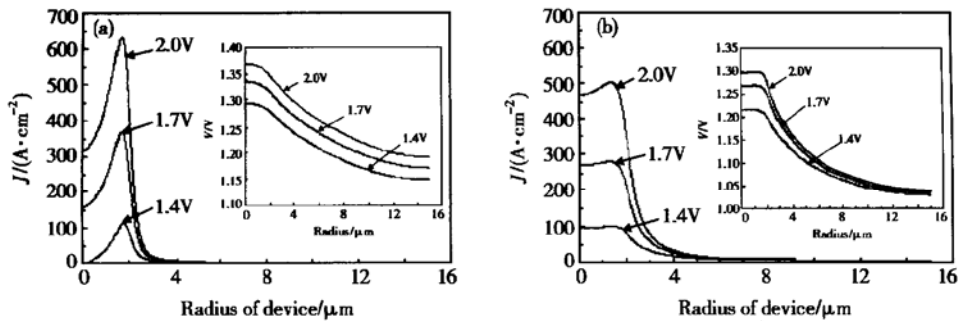


图 5 采用准 Fermi 能级方法(a)和 pn 结模型(b)得到注入电流密度及有源层压降(插图)随半径变化  
Fig. 5 Injected current density and voltage drop of active layer( inset) along device radius obtained by quasi-Fermi level method (a) and PN junction model (b)

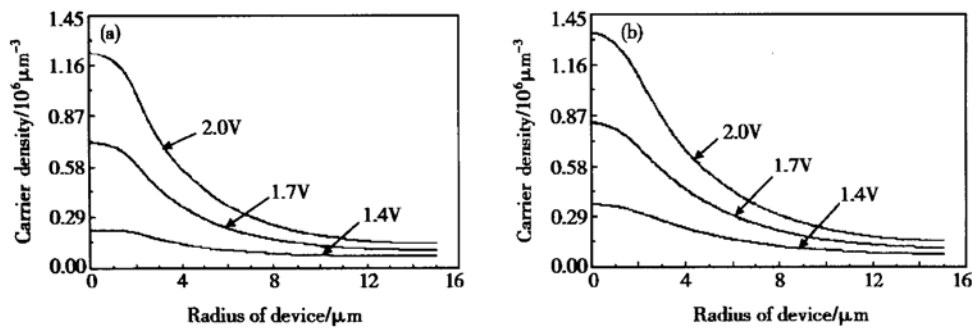


图 6 采用准 Fermi 能级方法(a)和 pn 结模型(b)得到载流子浓度随半径变化  
Fig. 6 Distribution of carrier density along device radius obtained by quasi-Fermi level method (a) and PN junction model (b)

从图 5 中得知随外加电压的增加, 注入电流密度有较大的上升, 二者的计算结果均反映了这一点, 不同之处在于使用 pn 结模型得到的电流密度在限制区变化比较平坦; 插图中显示出随电极电压的增加, 二者的有源层压降也随之加大, 这是注入有源区电流加大的自然结果, 它们曲线形状的差异与图 3 中的结果类似.

图 6 中的结果同样显示出两种方法得到的载流子浓度分布曲线十分相似, 再次说明 pn 结模型的合理性.

量子阱激光器中, 载流子的运动在垂直于结平面的方向受到限制, 其运动是准二维的. 载流子浓度与 Fermi 能级的关系由(4)、(5)式描述, 当其中指数函数的幂是较大的负值时, 它们退化为载流子服从

Boltzman 分布的结果:

$$n(r) = \frac{m_e^* k_B T}{\pi \hbar^2 d_w} \exp\left[\frac{F_n(r) - E_{In}}{k_B T}\right] \quad (9)$$

$$p(r) = \frac{m_h^* k_B T}{\pi \hbar^2 d_w} \exp\left[\frac{E_{Ip} - F_p(r)}{k_B T}\right] \quad (10)$$

考虑到 pn 结模型是在载流子服从 Boltzman 分布的情况下得到的<sup>[10]</sup>, 因此使用 pn 结模型有其合理性, 但在有源区中心附近由于注入载流子浓度较大(此时载流子出现简并), 这时需要用 Fermi 分布描述, 所以在有源层中心其误差是比较大的; 用准 Fermi 能级确定有源层压降是精确的方法。

尽管 pn 结模型存在理论上的局限, 但仍然是一种值得考虑的方法. 首先注意到对于有源层的载流子浓度分布而言, 前面的计算已表明其分布形式并不受到结压降的很大影响. 其次, 在载流子注入浓度较小, 即满足  $E_{In} - F_n > 2k_B T$ ,  $F_p - E_{Ip} > 2k_B T$  时, Fermi 分布就近似为 Boltzman 分布, 这时 pn 结模型是精确的. 第三, 准 Fermi 能级方法在实际计算中要求巨大的时间开销(近似正比于精度的倒数), 这在实际的器件模拟程序中难以接受; 比较而言, 采用 pn 结模型可以在几百秒内完成迭代. 如果单纯从计算的角度考虑, pn 结模型还可以通过调整(8)式中的暗电流密度  $J_{sat}$  达到更好的效果.

在后继的计算中, 重要的是考虑有源层中载流子的分布. 由前面的讨论得知如果在两种方法中使得注入有源层的电流总量相同(即二者电流密度曲线下的面积相等, 通过调整暗电流密度  $J_{sat}$  实现), 则不仅可以获得载流子浓度分布形状相同的曲线, 而且其幅值也将相同, 我们的计算表明了这一点, 这样在考虑电光转换过程对有源层进行电子空穴辐射复合计算时将不会引入很大的误差.

图 7 的结果是使用准 Fermi 能级确定有源层压降的方法解得的电阻区中等势线分布, 使用 pn 结模型得到的结果与此类似. 外加电极电压是 1.7V, 限制窗口半径 2.0 $\mu$ m, 图中等势线按字母“C”逆时针方向从 1.69V 以 0.01V 为间隔变化到 1.08V. 可以看到高阻限制层对电流的阻挡作用十分明显, 从器件上方边缘处注入的电流在限制层上方几乎向中心横向流动, 从四周聚集到限制窗口处发生转向向下注入有源层. 在限制层下方, 电流也出现向器件边缘的横向流动现象, 但是从图中可见等势线分布随着半径方向越来越稀疏, 说明电流主要集中在窗口附近. 另外要注意到限制窗口中心(包括器件中心部

分)的等势线分布比较稀疏, 这反映出电流是顺着窗口边缘通过限制层, 中心电流密度较小(图 3(a)和图 5(a)中电流密度曲线的形状反映了该现象, 但注意它们是有源层上方的分布), 继续向下流动经过空间层时, 由于扩散作用使电流分布的差异有所减小, 这里可以看到空间层有使注入电流分布均匀的作用. 如果在限制层下方直接放置有源层, 则中心注入载流子浓度太低对抑制高阶横模是不利的.

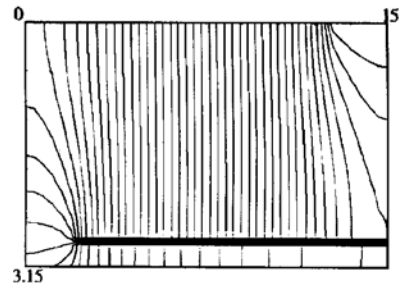


图 7 VCSEL 电阻区的等势线分布

Fig. 7 Distribution of equal voltage line of VCSEL resistive region

## 4 总结

本文分别采用准 Fermi 能级方法和 pn 结模型建立了两种迭代确定 VCSEL 中电势及载流子浓度自洽分布的算法, 并在近阈值附近对电极电压恒定, 限制孔径变化; 电极电压变化, 限制孔径恒定两种情况下二者的计算结果进行了比较, 注意到这两种方法求得的载流子浓度分布十分接近. 另外通过分析指出准 Fermi 能级方法及 pn 结模型的特点和使用范围. 对数值方法而言, 使用 pn 结模型确定结压降是合理的, 并且在计算上可行.

激光器工作于阈值以上时, 载流子分布方程中需要计入辐射复合项以包含电光转换过程对其分布的影响, 此时器件的出射光功率、有源层中的光场分布都是必须要考虑的因素, 进一步的分析结果将在后继的文章中给出.

## 参考文献

- [ 1 ] Hadley G R, Lear K L, Warren M E, et al. IEEE J Quantum Electron, 1996, 32(4): 607
- [ 2 ] Conradi O, Helfert S, Pregla R. IEEE J Quantum Electron, 2001, 37(7): 928
- [ 3 ] Lear K L, Choquette K D, Schneider R P, et al. Electron Lett, 1995, 31(3): 208

- [ 4 ] MacDougal M H, Dapkus P D, Pudikov V, et al. IEEE Photonics Technol Lett, 1995, 7(3): 229
- [ 5 ] Lengyel G, Meissner P, Patzak E, et al. IEEE J Quantum Electron, 1982, 18(4): 618
- [ 6 ] Joyce W B. J Appl Phys, 1982, 53(11): 7235
- [ 7 ] Taylor G W, Claisse P R. IEEE J Quantum Electron, 1995, 31(12): 2133
- [ 8 ] Kumar T, Ormondroyd R F, Rozzi T E. IEEE J Quantum Electron, 1984, 20(4): 364
- [ 9 ] Whiteaway J E A. IEE Proc, 1982, 129(3): 89
- [ 10 ] Liu Enke, et al. Semiconductor physics. Beijing: National Defence Industry Press, 1994[ 刘恩科, 等. 半导体物理学. 北京: 国防工业出版社, 1994]

## Calculation Method of Self-Consistent Distribution of Voltage and Carrier Density in VCSEL\*

Zhao Ding and Lin Shiming

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors,  
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Two different methods are introduced, which are quasi-Fermi level and pn junction model employed to determine the voltage of active layer in VCSEL. For two situations, which are anode voltage ascertained and confinement aperture varying and confinement aperture ascertained and anode voltage varying, the distribution of voltage in the resistive region, distribution of injected current and carrier density in the active layer and the voltage drop at laser's active region are calculated by using these two methods. Results manifest that the voltage distribution above active layer merely has no effect on the distribution of carrier density in the active layer, meanwhile the characteristics and applicable condition of these two methods are outlined. It can be concluded that pn junction model is a reasonable and appropriate approximate method for the simulation.

**Key words:** quasi-Fermi level; pn junction model; VCSEL

**EEACC:** 8220B

**Article ID:** 0253-4177(2003)10-1093-06

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 69896260 and 69937010)

Zhao Ding male, was born in 1977. He is presently working towards his Master degree with focus on the simulation of optoelectronic devices.

Lin Shiming male, professor, was born in 1945. Now his major interest includes design and fabrication of optoelectronic devices and OEIC-CAD.

Received 12 November 2002, revised manuscript received 24 February 2003

©2003 The Chinese Institute of Electronics