

# 键合界面阻抗对 VCSEL 的电、热学特性的影响\*

侯识华<sup>1</sup> 赵鼎<sup>2</sup> 叶晓军<sup>1</sup> 孙永伟<sup>1</sup> 谭满清<sup>1</sup> 陈良惠<sup>1</sup>

(1 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)  
(2 中国科学院电子学研究所, 北京 100080)

**摘要** 采用一电阻层来表征键合界面处的阻抗, 通过求泊松方程、电流密度方程、载流子扩散方程以及有源层结压降方程自洽解的方法, 计算了 VCSEL 的电势分布, 进而求解热传导方程, 得到 VCSEL 的温度分布. 详细分析了键合界面阻抗对晶片键合结构垂直腔面发射激光器内部的电势分布、温度分布以及有源层中的注入电流密度、载流子浓度、结压降和温度沿径向分布的影响.

**关键词** 垂直腔面发射激光器; 晶片键合; 键合界面阻抗; 电学特性; 热学特性; 有限差分法

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A

## 0 引言

波长为 1.3 ~ 1.6  $\mu\text{m}$  的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在光纤通信系统中具有广阔的应用前景. 目前制备这种长波长垂直腔面发射激光器有多种技术, 其中, 晶片键合 (wafer bonding) 技术是最成功的技术之一<sup>[1-3]</sup>. 但是, 采用这种技术制作的器件, 在键合界面处存在较大的阻抗<sup>[4-7]</sup>, 这将影响垂直腔面发射激光器的性能. 本文采用一电阻层来表征键合界面处的阻抗, 通过求泊松方程、电流密度方程、载流子扩散方程以及有源层结压降方程自洽解的方法, 计算了 VCSEL 的电势分布, 进而求解热传导方程, 得到 VCSEL 的温度分布. 详细分析了晶片键合结构垂直腔面发射激光器在注入电流密度小于或等于阈值电流密度的情况下, 其键合界面阻抗的大小对垂直腔面发射激光器内部的电势分布、温度分布以及有源层中的注入电流密度、载流子浓度、结压降和温度沿径向分布的影响.

## 1 VCSEL 的结构

图 1 是 VCSEL 的结构示意图<sup>[3]</sup>. 其中, P-DBR (distributed Bragg reflector) 由 31.5 对 P 型掺杂的 AlGaAs/GaAs DBR 组成. 通过选择氧化其中一层  $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$  层, 得到高阻氧化层限制孔, 其半径为  $r_0$ . 注入电流即通过该限制孔内未被氧化的区域注入到下部的有源区. N-DBR 由 50 对 N 型掺杂的 InGaAsP/InP DBR 组成. 有源区由 6 个 InGaAsP 量子阱和 InP 限制层构成, 其光学厚度为  $3\lambda_0/2$ ,  $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ . N-DBR 和有源区依次生长在  $\text{N}^+$ -InP 衬底上. 通过 GaAs/InP 的晶片键合工艺, 将有源区与 P-

DBR 熔接. 在 P-DBR 的上表面制备 P 电极, 在  $\text{N}^+$ -InP 衬底下表面制备环形 N 电极, 其内部圆孔即为激光出射窗口.

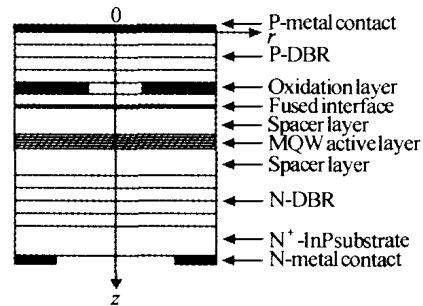


图 1 VCSEL 的结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of single-fused VCSEL

## 2 计算方法

如图 1, 选用柱坐标系,  $z$  方向垂直向下指向衬底. 由于对称性, 只需计算  $z \sim r$  平面内的分量<sup>[8,9]</sup>. 设外加电压为  $V_0$ . 将 P-DBR 及与其相邻的 InP 限制层视作电阻区, 其中的高阻氧化层的电阻率设为  $\rho_0$ , 热导率设为  $k_0$ ; 在 GaAs/InP 键合界面处的阻抗, 以包含该界面、厚度为 50 nm、电阻率为  $\rho_f$ 、热导率为  $k_f$  的电阻层来表征; 其余区域的电阻率设为  $\rho_1$ , 热导率设为  $k_1$ . 量子阱有源层的热导率设为  $k_a$ .  $\text{N}^+$ -InP 衬底、N-DBR 以及与其相邻的 InP 限制层的电阻跟 P-DBR 的相比很小, 因此忽略其中的电压降和所产生的焦耳热. N-DBR 及与其相邻的 InP 限制层的热导率设为  $k_2$ .  $\text{N}^+$ -InP 衬底的温度设恒为  $T_0$ , 并设 VCSEL 的上方和侧面绝热, 热量只通过热传导经由 N-DBR 传到下部的  $\text{N}^+$ -InP 衬底上.

根据以上假设, 外加电压近似等于 P-DBR 及与其相邻的 InP 限制层中的电压降和有源层中的结压降之和. 在 P-DBR 及与其相邻的 InP 限制层中, 电势分布满足泊松方程. 在柱坐标系中, 泊松方程可近似写为<sup>[8]</sup>

\* 国家高技术研究发展计划资助课题 (No. 2001AA312180)  
Tel: 010-82304408 转 22 Email: shhou@red.semi.ac.cn  
收稿日期: 2004-03-10

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

注入电流密度可写为

$$J(r,z) = -\nabla V(r,z)/\rho \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为  $(r,z)$  点处的电阻率.

假设有源层沿  $z$  方向的载流子浓度分布均匀, 则在注入电流密度小于或等于阈值电流密度的情况下, 有源层中的载流子扩散方程可近似写为<sup>[8,10,11]</sup>

$$D_n \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dn(r)}{dr} \right) - \frac{n(r)}{\tau_n} + \frac{J(r)}{ed} = 0 \quad (3)$$

式中,  $D_n$  是电子扩散系数,  $\tau_n$  是载流子寿命,  $d$  是多量子阱的总厚度,  $n(r)$  和  $J(r)$  分别是有源层中的载流子浓度和注入电流密度.

假设量子阱只有第一个子带被填充, 则量子阱中导带电子和价带空穴的浓度可分别表示为<sup>[8,12]</sup>

$$n(r) = \frac{m_e^* K_B T_a}{\pi \hbar^2 d_w} \ln \left( 1 + \exp \frac{E_{Fn}(r)}{K_B T_a} \right) \quad (4)$$

$$p(r) = \frac{m_h^* K_B T_a}{\pi \hbar^2 d_w} \ln \left( 1 + \exp \frac{E_{Fp}(r)}{K_B T_a} \right) \quad (5)$$

式中,  $m_e^*$ 、 $m_h^*$  分别是量子阱导带电子和价带空穴的有效质量,  $E_{Fn}$  是量子阱导带电子准费米能级与电子第一子能级的能量差,  $E_{Fp}$  是量子阱价带空穴的准费米能级与空穴第一子能级的能量差,  $K_B$  为玻耳兹曼常数,  $\hbar$  为普朗克常数,  $T_a$  为有源层的温度.

有源层中的结压降可表示为<sup>[8,13,14]</sup>

$$V(r) = \frac{E_{gw} + E_{ln} + E_{lp} + E_{Fn}(r) + E_{Fp}(r)}{e} \quad (6)$$

式中,  $E_{gw}$  是量子阱材料的带隙能,  $E_{ln}$ 、 $E_{lp}$  分别为量子阱导带电子和价带空穴的第一子能级,  $e$  为单电子电荷.

在 P-DBR 及与其相邻的 InP 限制层中的热源主要是焦耳热, 其热量密度可表示为<sup>[9,15]</sup>

$$Q_R(r,z) = J^2(r,z)\rho \quad (7)$$

在有源层中的热源主要是非辐射复合和自发发射吸收所产生的热量. 在注入电流密度小于或等于阈值电流密度的情况下, 其热量密度可表示为<sup>[15-17]</sup>

$$Q_A = V(r)J(r)(1 - \eta_{sp}f_{sp})/d \quad (8)$$

式中,  $\eta_{sp}$  是自发发射内量子效率,  $f_{sp}$  是自发发射逃逸因子.

VCSEL 内部的热传导方程可写为<sup>[9,17]</sup>

$$\nabla^2 T(r,z) + \frac{Q(r,z)}{k} = 0 \quad (9)$$

式中,  $T$  是温度,  $Q$  是热量密度,  $k$  是热导率.

根据以上方程, 结合边界条件, 采用有限差分法可将上述相关的方程在相应的求解区域予以离散化, 得到差分格式方程, 然后采用超松弛迭代法计算<sup>[18]</sup>. 计算中, 首先预设一个有源层结压降初值, 将其作为泊松方程的下边界条件, 由式(1)~(3)求 VCSEL 的电势分布、有源层中的注入电流密度分布和载流子浓度分布, 再由式(4)~(6)求有源层结压降分布. 将求得的有源层结压降分布修正后, 将其作为泊松方程的下边界条件, 重复进行上述计算. 当相邻两次迭代计算所求得的电势差异很小, 达到所设定的精度时, 即自治地得到 VCSEL 的电势分布. 然后, 进一步求解式(7)~(9), 得到 VCSEL 的温度分布<sup>[9,19]</sup>.

计算中采用:  $V_0 = 3 \text{ V}$ ,  $r_0 = 3 \mu\text{m}$ ,  $\rho_1 = 1.2 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ ,  $\rho_0 = 5 \times 10^5 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$ <sup>[10]</sup>,  $D_n = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,  $\tau_n = 2 \text{ ns}$ ,  $d_w = 7 \text{ nm}$ ,  $K_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ,  $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ Js}$ ,  $T_a = 300 \text{ K}$ ,  $E_{gw} = 0.805 \text{ eV}$ ,  $m_e = 0.05m_0$ ,  $m_h = 0.46m_0$ ,  $m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ,  $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ ,  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $\eta_{sp} = 0.8$ ,  $f_{sp} = 0.59$ <sup>[15,16]</sup>,  $k_0 = 0.0065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_t = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_a = 0.40 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_1 = 0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $k_2 = 0.38 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[20]</sup>.

### 3 计算结果及讨论

图 2 是键合界面层电阻率  $\rho_t$  取不同值时, VCSEL 的 P-DBR 及与其相邻的 InP 限制层中的等势线分布, 图中各相邻等势线的间隔均为  $0.05 \text{ V}$ , 下边线为有源层所在位置. 由图可见, 随着键合界面层电阻率增大, 键合界面层处的等势线分布变密, 其它地方的等势线分布则变疏. 这表明随着键合界面阻抗增大, 键合界面层中的电压降增大, 其它地方

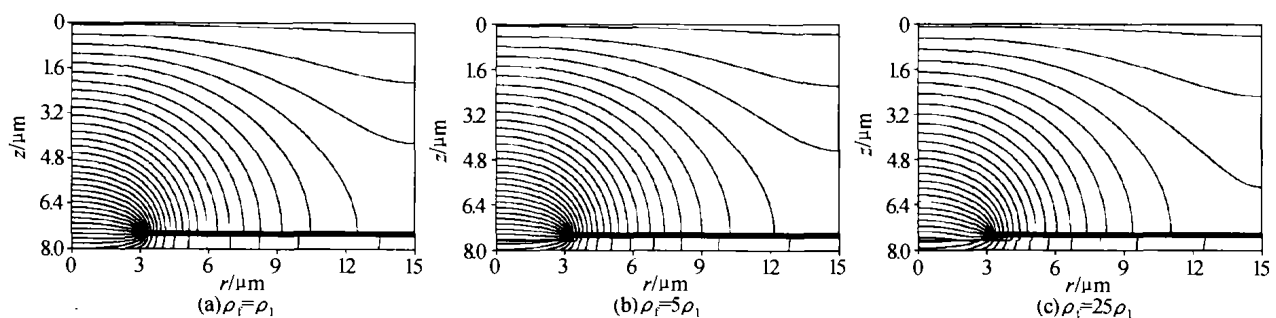


图 2 键合界面层电阻率取不同值时, VCSEL 的等势线分布

Fig. 2 The voltage distribution inside the VCSEL for different resistivity in the fused interface layer

的电压降则相应地减小.

图 3 是键合界面层电阻率  $\rho_i$  取不同值时, VCSEL 的等温线分布, 图中各相邻等温线的间隔均为 0.02 K, 虚线表示有源层所在位置. 由图可见, 随着键合界面层电阻率增大, VCSEL 的高温中心由处于 P-DBR 中心轴线上部位置逐渐下移, 并趋近于

有源层. 这表明在一定的外加电压下, 随着键合界面增大, 键合界面层产生的焦耳热的影响增大. 由于 InGaAsP/InP 系材料的光、电特性对温度敏感, 因此, VCSEL 的高温中心趋近于有源层, 将可能使 VCSEL 的温度特性恶化.

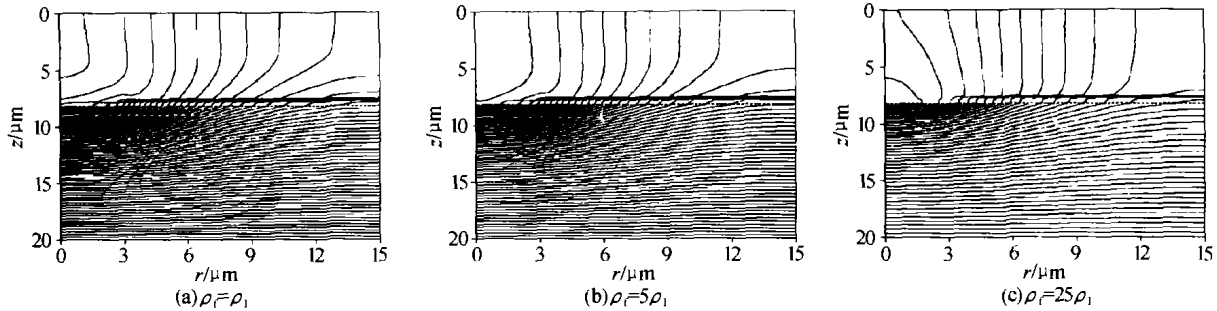


图 3 键合界面层电阻率取不同值时, VCSEL 的等温线分布  
Fig. 3 Temperature distribution inside the VCSEL for different resistivity in the fused interface layer

图 4 是键合界面层电阻率  $\rho_i$  取不同值时, 有源层中的注入电流密度、载流子浓度、结压降和温度沿径向的分布. 由图可见, 随着键合界面层电阻率增大, 有源层各处的注入电流密度、载流子浓度、结压

降和温度均降低. 这个结果与图 2 和图 3 的结果显然相一致. 而且由此可知, 键合界面阻抗越大, 将使 VCSEL 实现激射所需要的外加电压越大, 因而将可能加重 VCSEL 的散热问题.

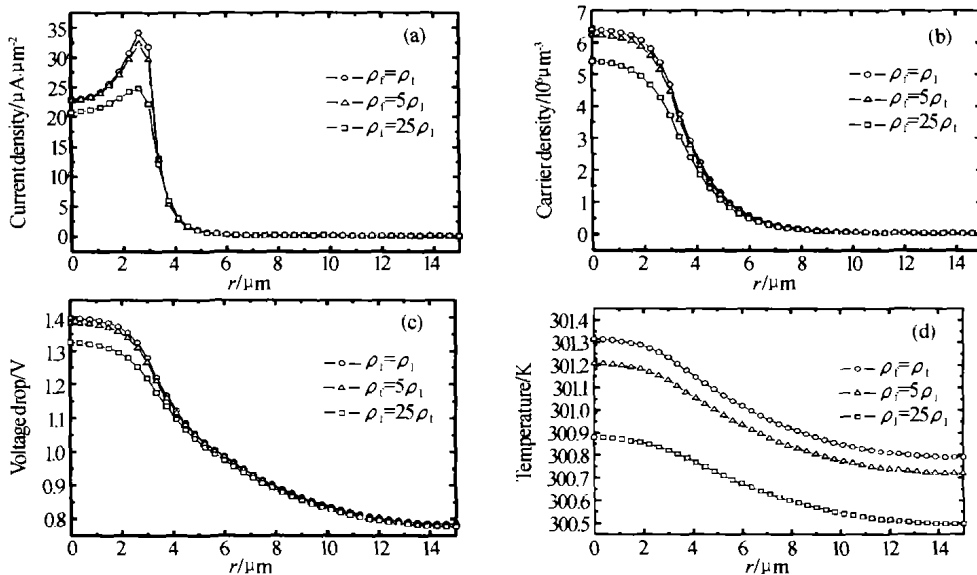


图 4 键合界面层电阻率取不同值时, 有源层中的 (a) 注入电流密度、(b) 载流子浓度、(c) 结压降和 (d) 温度沿径向的分布  
Fig. 4 Radial distribution of the (a) injected current density, (b) carrier density, (c) voltage drop, and (d) temperature in the active layer for different resistivity in the fused interface layer

### 4 结论

采用求泊松方程、电流密度方程、载流子扩散方程以及有源层结压降方程自洽解的方法, 计算了 VCSEL 的电势分布, 进而求解热传导方程, 得到 VCSEL 的温度分布. 详细分析了在注入电流密度小于或等于阈值电流密度的情况下, 键合界面阻抗对晶片键合结构垂直腔面发射激光器内部的电势分布、温度分布以及有源层中的注入电流密度、载流子浓度、结压降和温度沿径向分布的影响. 结果表明, 在一定的外加电压下, 随着键合界面阻抗增大, 键合

界面层中的电压降增大, VCSEL 的高温中心由处于 P-DBR 中心轴线上部位置逐渐下移, 并趋近于有源层, 而有源层各处的注入电流密度、载流子浓度、结压降和温度则相应地逐渐降低. 键合界面阻抗越大, 使 VCSEL 实现激射所需要的外加电压越大, 因而将可能加重 VCSEL 的散热问题. 因此, 采用晶片键合技术制备这种长波长垂直腔面发射激光器应该尽可能地提高键合界面的质量, 减小键合界面的阻抗, 以减小键合界面阻抗对 VCSEL 性能产生的不良影响.

## 参考文献

- 1 Black K A , Abraham P , Margalit N M , *et al.* Double - fused 1.5  $\mu\text{m}$  vertical cavity lasers with record high  $T_0$  of 132 K at room temperature. *Electronics Letters*, 1998, **34**(20): 1947 ~ 1949
- 2 Karim A, Abraham P, Lofgreen D, *et al.* Wafer bonded 1.55  $\mu\text{m}$  vertical-cavity lasers with continuous-wave operation up to 105°C. *Applied Physics Letters*, 2001, **78**(18): 2632 ~ 2633
- 3 Rapp S, Salomonsson F, Streubel K, *et al.* All-epitaxial single-fused 1.55  $\mu\text{m}$  vertical cavity lasers based on an InP Bragg reflector. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, **38**: 1261 ~ 1264
- 4 Salomonsson F, Streubel K, Bentell J, *et al.* Wafer fused p-InP/p-GaAs heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 1998, **82**(2): 768 ~ 774
- 5 Hammar M, Wennekes F, Salomonsson F, *et al.* Systematics of electrical conductivity across InP to GaAs wafer-fused interfaces. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1999, **38**(2B): 1111 ~ 1114
- 6 Sagalowicz L, Rudra A, Kapon E, *et al.* Defects, structure, and chemistry of InP-GaAs interfaces obtained by wafer bonding. *Journal of Applied Physics*, 2000, **87**(9): 4135 ~ 4146
- 7 Ram R J, Dudley J J, Bowers J E, *et al.* GaAs to InP wafer fusion. *Journal of Applied Physics*, 1995, **78**(6): 4227 ~ 4237
- 8 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
- 9 赵鼎, 林世鸣. VCSEL 稳态热特性分析. *光电子·激光*, 2004, **15**(1): 21 ~ 24  
Zhao D, Lin S M. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(1): 21 ~ 24
- 10 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
- 11 Zhang J P. Single mode power and modal behaviour in buried vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEE Proc Optoelectron*, 1995, **142**(2): 87 ~ 93
- 12 Chuang S L. *Physics of Optoelectronic Devices*. New York: John Wiley&Sons, Inc., 1995, 362 ~ 363
- 13 Taylor G W, Claisse P R. Transport solution for the SCH quantum-well laser diode. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, **31**(12): 2133 ~ 2141
- 14 Taylor G W, Evaldsson P A. Temperature dependent operation of the vertical cavity surface emitting laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, **30**(10): 2262 ~ 2270
- 15 Kobayashi T, Furukawa Y. Temperature distribution in the GaAs-AlGaAs double-heterostructure laser below and above the threshold current. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1975, **14**(12): 1981 ~ 1986
- 16 Nakwaski W, Osinski M. Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, **27**(6): 1391 ~ 1401
- 17 Papannareddy R, Ferguson W, Butler J K. A generalized thermal model for stripe-geometry injection lasers. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(9): 3565 ~ 3569
- 18 盛剑霓. 电磁场数值分析. 北京: 科学出版社, 1984. 10 ~ 21  
Sheng Jianni. *Numerical Analysis of Electromagnetic Fields*. Beijing: Science Press, 1984. 10 ~ 21
- 19 赵鼎, 林世鸣. 确定 VCSEL 电势及载流子自洽分布算法的研究. *半导体学报*, 2003, **24**(10): 1093 ~ 1098  
Zhao D, Lin S M. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, **24**(10): 1093 ~ 1098
- 20 Adachi S. Lattice thermal resistivity of III-V compound alloys. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(4): 1844 ~ 1848

## Influence of Electrical Resistance of the Fused Interface on the Electrical and Thermal Characteristics of VCSELs

Hou Shihua<sup>1</sup>, Zhao Ding<sup>2</sup>, Ye Xiaojun<sup>1</sup>, Sun Yongwei<sup>1</sup>, Tan Manqing<sup>1</sup>, Chen Lianghui<sup>1</sup>

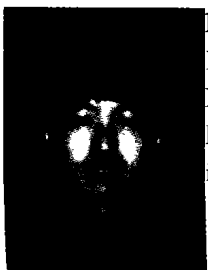
<sup>1</sup> Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083

<sup>2</sup> Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Received date: 2004-03-10

**Abstract** The electrical resistance of the fused interface is simply characterized using a resistive layer, and the voltage distribution inside the vertical-cavity surface-emitting lasers (VCSELs) are calculated by using a method of finding self-consistent solutions for the Poisson's, injected current density, carrier diffusion, and voltage drop equations, and the temperature distribution inside the VCSELs are obtained subsequently by solving the thermal conduction equation. The influences of the electrical resistance of the fused interface on the distribution of voltage and temperature inside the single-fused VCSELs and the radial distribution of the injected current density, carrier density, voltage drop and temperature in the active layer are analyzed in detail.

**Keywords** VCSEL; Wafer bonding; Electrical resistance of the fused interface; Electrical characteristics; Thermal characteristics; Finite difference method



**Hou Shihua** was born on September 6, 1969, in Hunan Province, China. He received his Bachelor's degree from Hunan Normal University in 1998 and received his Master's degree from Xinjiang Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, in 2001. He is currently pursuing his Ph. D. degree in Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences. His current research interests include design, simulation and fabrication of VCSELs.