

垂直腔面发射激光器的热学特性*

侯识华¹ 赵鼎² 孙永伟¹ 徐云¹ 谭满清¹ 陈良惠¹

(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: 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, 计算了垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的电势分布, 进而求解热传导方程, 得到 VCSEL 的温度分布. 详细分析了注入电流密度小于或等于阈值电流密度时, 晶片键合结构垂直腔面发射激光器的键合界面阻抗、氧化层限制孔径、外加电压以及分布布拉格反射镜的热导率的大小对 VCSEL 内部温度分布的影响.

关键词: 垂直腔面发射激光器; 晶片键合; 高温中心; 热学特性; 有限差分法

PACC: 0260; 7280E; 8160C **EEACC:** 4320J

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2005)04-0805-07

1 引言

垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 在光纤通信、光互连、并行光信息处理等领域中具有广阔的应用前景. 关于 VCSEL 的热分析已经有一些文献报道^[1-5]. 但是, 这些文献都是对注入电流密度大于阈值电流密度的情况进行讨论的, 而对注入电流密度小于或等于阈值时的 VCSEL 内部温度分布情况则未见详细的报道. 本文采用有限差分法, 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时, 其键合界面阻抗、氧化层限制孔径、外加电压以及分布布拉格反射镜 (DBR) 的热导率的大小对 VCSEL 内部温度分布的影响.

2 VCSEL 的结构

图 1 是 VCSEL 的结构示意图^[6]. 其中, p-DBR 由 31.5 对 p 型掺杂的 AlGaAs/GaAs DBR 组成. 通

过选择氧化其中一层 AlAs 层的外围部分, 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 n^+ -InP 衬底上. 通过 GaAs/InP 的晶片键合 (wafer bonding) 工艺, 将有源区与 p-DBR 熔接. 在 p-DBR 的上表面制备 p 电极, 在 n^+ -InP 衬底下表面制备环行的 n 电极, 其内部圆孔即为激光出射窗口.

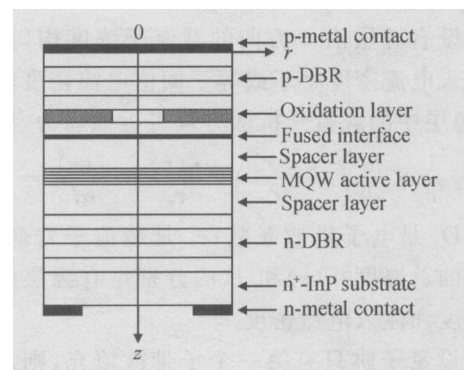


图 1 VCSEL 的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single-fused VCSEL

* 国家高技术研究发展计划资助项目 (批准号: 2001AA312180)

侯识华 男, 1969 年出生, 博士研究生, 主要从事半导体激光器的研究. Email: shhou@red.semi.ac.cn

2004-01-21 收到, 2004-10-18 定稿

3 计算方法

如图 1 所示,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 $z-r$ 平面内的分量. 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 ρ_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 50nm、电阻率为 ρ_1 、热导率为 k_1 的电阻层来表征^[7-10];其余区域的电阻率设为 ρ_1 ,热导率设为 k_1 . 量子阱有源层的电阻率设为 ρ_a ,热导率设为 k_a . n^+ -InP 衬底和 n-DBR 以及与其相邻的 InP 限制层的电阻与 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 . 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 n^+ -InP 衬底上^[3,5].

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^[3,4]:

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

注入电流密度可写为:

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

式中 ρ_a 为 (r, z) 点处的电阻率.

假设有源层沿 z 方向的载流子浓度均匀分布,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^[3,11,12]:

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

式中 D_n 是电子扩散系数; τ_n 是载流子寿命; d 是量子阱的总厚度; $n(r)$ 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^[3,13]:

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

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

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 为玻尔兹曼常数; \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^[3,14,15]:

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

式中 E_{gw} 是量子阱材料的带隙能; E_{In} 和 E_{Ip} 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:

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

有源层中的热源主要是非辐射复合和自发发射吸收产生的热量. 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^[1,2,16]:

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

式中 η_{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^[1,5]:

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

式中 T 是温度; Q 是热量密度; k 是热导率.

根据以上方程,结合相应的边界条件,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,得到差分方程,然后采用超松弛迭代法计算^[17]. 计算过程中,首先设定一个有源层结压降初值,将其作为泊松方程的下边界条件,由方程(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,再由方程(4)~(6)求有源层结压降分布. 对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,即自洽地得到 VCSEL 的电势分布. 然后,进一步求解方程(7)~(9),得到 VCSEL 的温度分布^[5,18].

计算过程中取值: $\rho_0 = 1.2 \times 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, $\rho_1 = 5 \times 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, $\rho_a = 1.2 \times 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$, $D_n = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau_n = 2 \text{ ns}$, $d_w = 7 \text{ nm}$, $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $T_a = 300 \text{ K}$, $E_{gw} = 0.805 \text{ eV}$, $m_e = 0.05 m_0$, $m_h = 0.46 m_0$, $m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$, $T_0 = 300 \text{ K}$, $\eta_{sp} = 0.8$, $f_{sp} = 0.59$ ^[2,16], $k_0 = 0.0065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $k_2 = 0.40 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[19].

4 计算结果及讨论

图 2,3 是键合界面层电阻率 ρ_f 取不同值时,

VCSEL 中的等温线分布和有源层中的温度分布. 其中, $V_0 = 3V$, $r_0 = 3\mu m$, $k_1 = 0.65 W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$, $k_2 = 0.38 W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$, 图 2 中各图的相邻等温线间隔均为 $0.02 K$, 虚线均表示有源层所在位置.

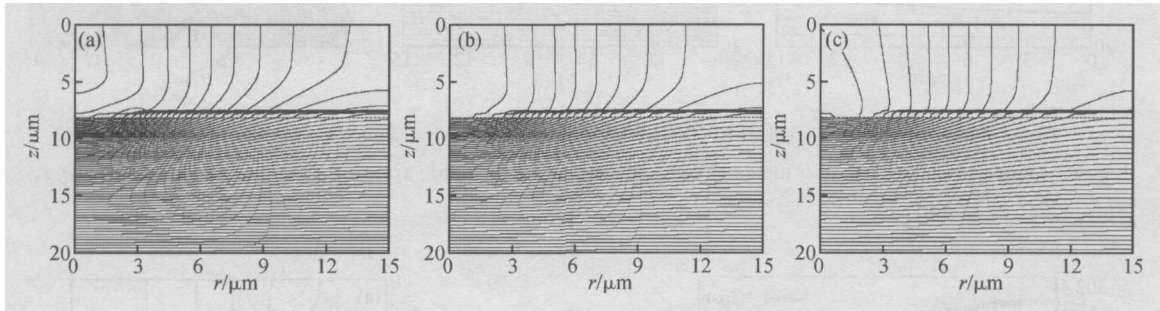


图 2 键合界面层电阻率取不同值时, VCSEL 中的等温线分布 (a) $\rho_f = 2 \Omega \cdot cm$; (b) $\rho_f = 10 \Omega \cdot cm$; (c) $\rho_f = 20 \Omega \cdot cm$

Fig. 2 Temperature distribution inside the VCSEL for different resistivity in the fused interface layer (a) $\rho_f = 2 \Omega \cdot cm$; (b) $\rho_f = 10 \Omega \cdot cm$; (c) $\rho_f = 20 \Omega \cdot cm$

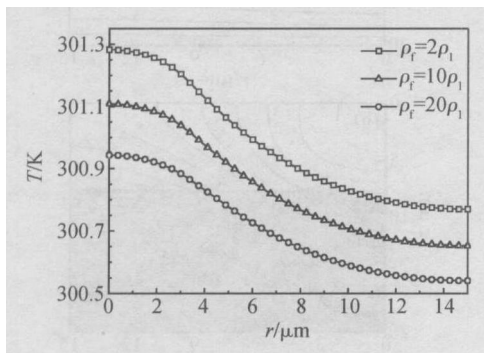


图 3 键合界面层电阻率取不同值时, 有源层中的温度分布
Fig. 3 Radial distribution of the temperature in the active layer for different resistivity in the fused interface layer

由图 2 可知, 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. 这可能是由于随着键合界面层电阻率增大, 键合界面阻抗增大, 注入电流密度减小, 使键合界面层以及有源层产生的热造成的影响相对增大造成的. 由图 3 可知, 在 $r < r_0$ 的区域, 有源层的温度较高, 而随着离中心越远, 有源层的温度逐渐降低. 这可能是由于高阻氧化层限制孔对注入电流的限制作用, 使得在 $r < r_0$ 的区域, 有源层的电流密度较大, 而在 $r > r_0$ 的区域, 随着离中心越远, 有源层的注入电流密度逐渐减小造成的. 同时可知, 随着键合界面层电阻率增大, 有源层各处的温度逐渐降低. 这可能与随着键合界面层电阻率增大, 有源层各处的注入电流密度减小有关系. 键合界面

阻抗越大, 使实现 VCSEL 激射需要的外加电压增大, 因而将加重 VCSEL 的散热问题.

图 4, 5 是氧化层限制孔半径 r_0 取不同值时, VCSEL 中的等温线分布和有源层中的温度分布. 其中, $V_0 = 3V$, $\rho_f = 10 \Omega \cdot cm$, $k_1 = 0.65 W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$, $k_2 = 0.38 W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$, 图 4 中各图的相邻等温线间隔均为 $0.04 K$.

由图 4 可知, 随着氧化层限制孔半径增大, VCSEL 的高温中心由处于有源层中心上部附近位置沿着 p-DBR 中心轴线逐渐上移, 并趋近于 p-面电极. 这可能是由于随着氧化层限制孔半径增大, 注入电流密度增大, 使 p-DBR 区域产生的焦耳热比有源层产生的热更多造成的. 由图 5 可知, 有源层各处的温度随着氧化层限制孔半径增大而升高. 这可能与随着氧化层限制孔半径增大, 有源层各处的注入电流密度增大有关.

图 6, 7 是外加电压 V_0 取不同值时, VCSEL 中的等温线分布和有源层中的温度分布. 其中, $r_0 = 3\mu m$, $\rho_f = 10 \Omega \cdot cm$, $k_1 = 0.65 W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$, $k_2 = 0.38 W \cdot cm^{-1} \cdot K^{-1}$, 图 6 中各图的相邻等温线间隔均为 $0.03 K$.

由图 6 可知, 随着外加电压增大, VCSEL 的高温中心由处于有源层中心上部附近位置沿着 p-DBR 中心轴线逐渐上移, 并趋近于 p-面电极. 这可能是由于随着外加电压增大, 注入电流密度增大, 使 p-DBR 区域产生的焦耳热比有源层产生的热更多

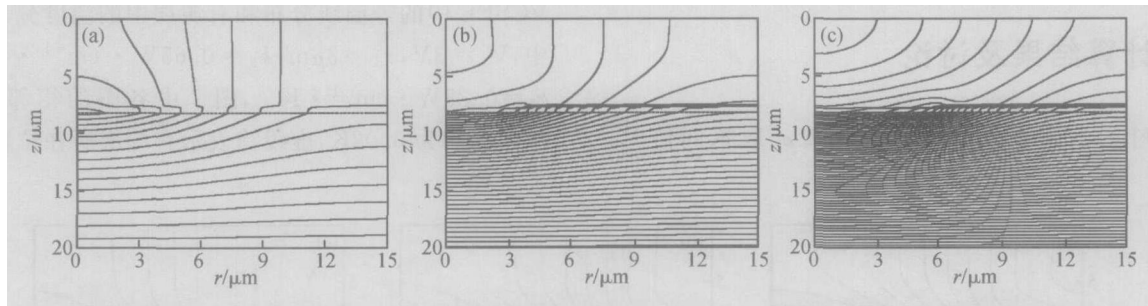


图 4 氧化层限制孔半径取不同值时, VCSEL 中的等温线分布 (a) $r_o = 2\mu\text{m}$; (b) $r_o = 4\mu\text{m}$; (c) $r_o = 6\mu\text{m}$

Fig. 4 Temperature distribution inside the VCSEL for different oxide aperture radius (a) $r_o = 2\mu\text{m}$; (b) $r_o = 4\mu\text{m}$; (c) $r_o = 6\mu\text{m}$

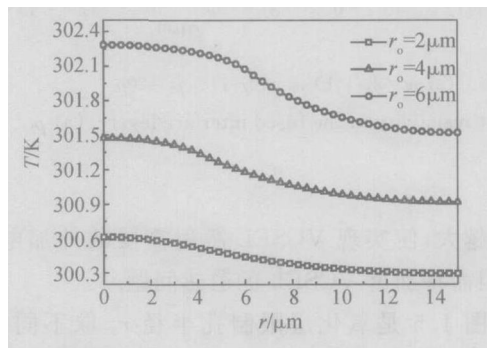


图 5 氧化层限制孔半径取不同值时, 有源层中的温度分布

Fig. 5 Radial distribution of the temperature in the active layer for different oxide aperture radius

造成的. 由图 7 可知, 随着外加电压增大, 有源层各处的温度升高. 这可能是由于外加电压增大使有源层各处的注入电流密度增大造成的.

图 8, 9 是分布布拉格反射镜中的热导率 k_1 和 k_2 取不同值时, VCSEL 中的等温线分布和有源层中的温度分布. 其中, $V_o = 3\text{V}$, $r_o = 3\mu\text{m}$, $f = 20$, 图 8(a), (b) 和 (c) 中各相邻等温线间隔分别为 0.04, 0.1 和 0.1 K.

将图 8(a) 与图 2(c) 相比较可知, 随着 p-DBR 中的热导率 k_1 减小, VCSEL 的温度升高, 高温中心由处于有源层中心上部附近位置沿着 p-DBR 中心轴线逐渐上移, 并趋近于 p-面电极. 将图 8(b) 与图 2(c) 相比较可知, 随着 n-DBR 中的热导率 k_2 减小, VCSEL 的温度升高. 但是, 高温中心仍然处在有源层中心上部附近, 这可能与前面假设中忽略了 n-DBR 中的电压降和所产生的焦耳热有关. 将图 8(c) 与图 8(a), (b) 和图 2(c) 相比较可知, 随着 k_1 和 k_2 同时减小, VCSEL 的温度升高, 并且不难发现, k_2 减小有助于使高温中心下移. 将图 9 与图 3 相比较可知, 随着 k_1 和 k_2 减小, 有源层各处的温度升高.

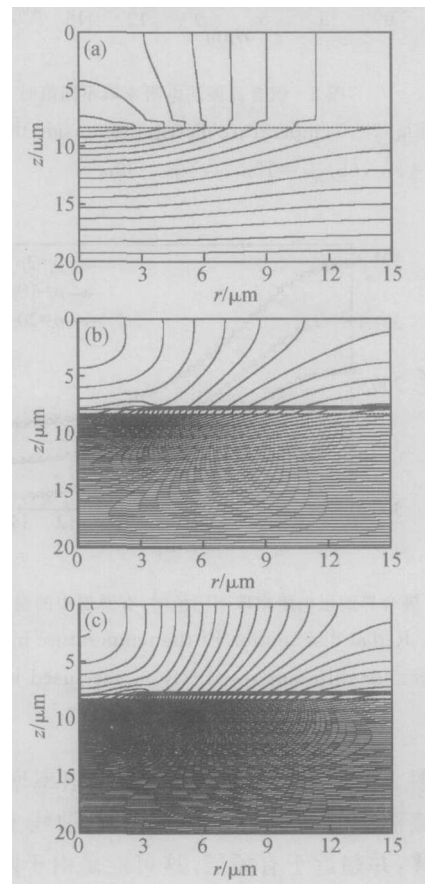


图 6 外加电压取不同值时, VCSEL 中的等温线分布 (a) $V_o = 2.5\text{V}$; (b) $V_o = 3.5\text{V}$; (c) $V_o = 4.5\text{V}$

Fig. 6 Temperature distribution inside the VCSEL for different applied voltage (a) $V_o = 2.5\text{V}$; (b) $V_o = 3.5\text{V}$; (c) $V_o = 4.5\text{V}$

图 9 中, (c) 与 (b) 情况下的曲线出现交叉, 这是由于 (c) 中 k_1 的取值比 (b) 中 k_1 的取值小, 使得在 (c) 中情况下, p-DBR 中部产生的热更难以传递到有源层边缘, 从而使有源层边缘的温度与 (b) 中情况下的相比有所下降. 由上述结果可见, 上、下反射镜中的

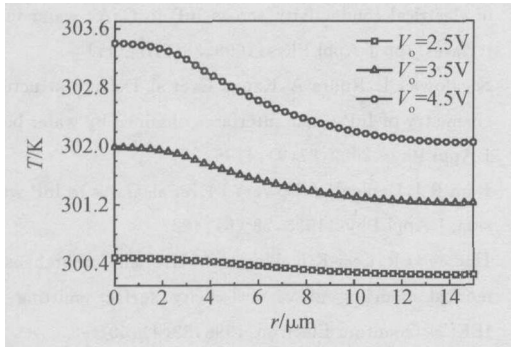


图 7 外加电压取不同值时,有源层中的温度分布

Fig. 7 Radial distribution of the temperature in the active layer for different applied voltages

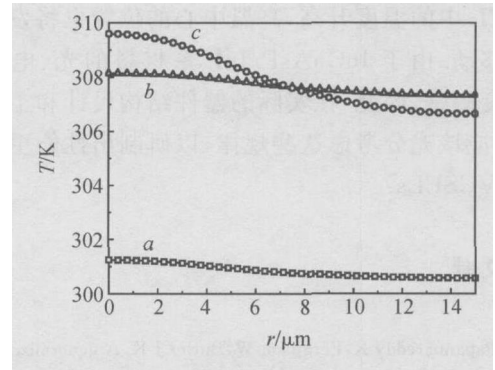


图 9 分布布拉格反射镜中的热导率 k_1, k_2 取不同值时,有源层中的温度分布 $a: k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.38 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; b: k_1 = 0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; c: k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Fig. 9 Radial distribution of the temperature in the active layer for different thermal conductivity values of the DBRs $a: k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.38 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; b: k_1 = 0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; c: k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

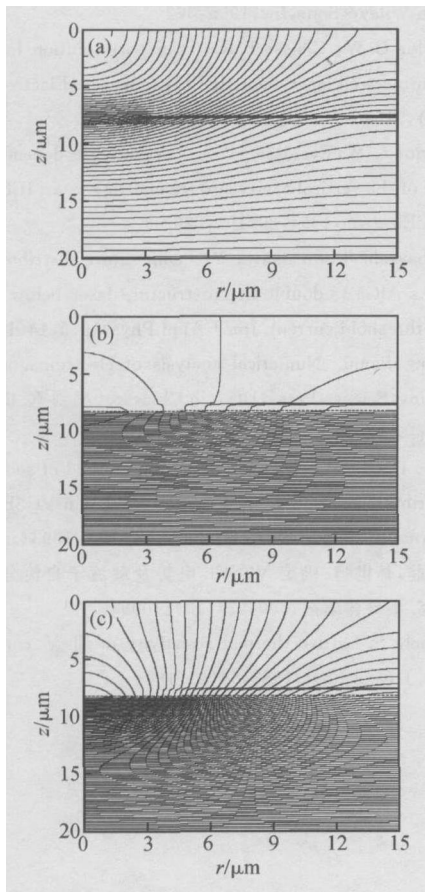


图 8 分布布拉格反射镜中的热导率 k_1, k_2 取不同值时,VCSEL 中的等温线分布 (a) $k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.38 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; (b) k_1 = 0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; (c) k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Fig. 8 Temperature distribution inside the VCSEL for different thermal conductivity values of the DBRs (a) $k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.38 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; (b) k_1 = 0.65 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}; (c) k_1 = 0.065 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, k_2 = 0.038 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

热导率的大小对 VCSEL 中的温度分布有着重要的影响. 因此,在实际应用中应该尽量选用热导率大的材料来制作反射镜,以改善 VCSEL 的热学特性.

5 结论

采用有限差分法,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. 详细分析了在注入电流密度小于或等于阈值电流密度的情况下,晶片键合结构垂直腔面发射激光器的键合界面阻抗、氧化层限制孔径、外加电压以及分布布拉格反射镜的热导率的大小对垂直腔面发射激光器内部温度分布的影响. 结果表明,在外加电压不变的情况下,随着键合界面阻抗增大,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,而有源层各处的温度也随之下降. 随着氧化层限制孔径或者外加电压增大,VCSEL 的高温中心远离有源层,由处于 VCSEL 有源层中心上部附近位置沿着 p-DBR 中心轴线逐渐上移,并趋近于 p-面电极,而有源层各处的温度也随之上升. 而在同样的外加电压下,随着分布布拉格反射镜的热导率减小,

VCSEL 中的温度升高,高温中心的位置也将发生相应的移动.由于 InGaAsP/InP 系材料的光、电特性对温度敏感,因此,在实际的器件结构设计和工艺设计中,应该充分考虑这些规律,以研制出性能更加优异的 VCSELs.

参考文献

- [1] Papannareddy R, Ferguson W, Butler J K. A generalized thermal model for stripe-geometry injection lasers. *J Appl Phys*, 1987, 62(9) :3565
- [2] Nakwaski W, Osinski M. Thermal properties of etched-well surface-emitting semiconductor lasers. *IEEE J Quantum Electron*, 1991, 27(6) :1391
- [3] Zhao Yiguang, Zhang Yusheng, Huang Xianling. Electrical, thermal and optical-waveguiding characteristics of vertical-cavity surface-emitting lasers. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(11) :963 (in Chinese) [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]
- [4] Liu Shi'an, Lin Shiming, Kang Xuejun, et al. Numerical analysis of steady current and temperature distributios and characteristics of transverse mode in VCSEL. *Chinese Journal of Semiconductors*, 1999, 20(11) :1034
- [5] Zhao Ding, Lin Shiming. Analysis of stable heat characteristics in VCSEL. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, 15(1) :21 (in Chinese) [赵鼎, 林世鸣. VCSEL 稳态热特性分析. *光电子 · 激光*, 2004, 15(1) :21]
- [6] Rapp S, Salomonsson F, Streubel K, et al. All-epitaxial single-fused 1.55 μm vertical cavity lasers based on an InP Bragg reflector. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38 :1261
- [7] Salomonsson F, Streubel K, Bentell J, et al. Wafer fused p-InP/p-GaAs heterojunctions. *J Appl Phys*, 1998, 82(2) :768
- [8] Hammar M, Wennekes F, Salomonsson F, et al. Systematics of electrical conductivity across InP to GaAs wafer-fused interfaces. *Jpn J Appl Phys*, 1999, 38(2B) :1111
- [9] Sagalowicz L, Rudra A, Kapon E, et al. Defects, structure, and chemistry of InP-GaAs interfaces obtained by wafer bonding. *J Appl Phys*, 2000, 87(9) :4135
- [10] Ram R J, Dudley J J, Bowers J E, et al. GaAs to InP wafer fusion. *J Appl Phys*, 1995, 78(6) :4227
- [11] 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
- [12] Zhang J P. Single mode power and modal behaviour in buried vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Proc Optoelectron*, 1995, 142(2) :87
- [13] Chuang S L. *Physics of optoelectronic devices*. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1995 :362
- [14] Taylor G W, Claisse P R. Transport solution for the SCH quantum-well laser diode. *IEEE J Quantum Electron*, 1995, 31(12) :2133
- [15] Taylor G W, Ewaldsson P A. Temperature dependent operation of the vertical cavity surface emitting laser. *IEEE J Quantum Electron*, 1994, 30(10) :2262
- [16] Kobayashi T, Furukawa Y. Temperature distribution in the GaAs-AlGaAs double-heterostructure laser below and above the threshold current. *Jpn J Appl Phys*, 1975, 14(12) :1981
- [17] Sheng Jianni. *Numerical analysis of electromagnetic fields*. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese) [盛剑霓. *电磁场数值分析*. 北京: 科学出版社, 1984]
- [18] Zhao Ding, Lin Shiming. Calculation method of self-consistent distribution of voltage and carrier density in VCSEL. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, 24(10) :1093 (in Chinese) [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]
- [19] Adachi S. Lattice thermal resistivity of III-V compound alloys. *J Appl Phys*, 1983, 54(4) :1844

Thermal Characteristics of VCSELs*

Hou Shihua¹, Zhao Ding², Sun Yongwei¹, Xu Yun¹, Tan Manqing¹, and Chen Lianghai¹

(1 *Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*)

(2 *Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: 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, the oxide aperture size, the applied voltage, and the thermal conductivity value of the distributed Bragg reflectors on the temperature distribution inside the single-fused VCSELs below and at the threshold are analyzed in detail.

Key words: VCSELs; wafer bonding; location of the maximal temperature; thermal characteristics; finite difference method

PACC: 0260; 7280E; 8160C **EEACC:** 4320J

Article ID: 0253-4177(2005)04-0805-07

* Project supported by National High Technology Research and Development Program of China (No. 2001AA312180)

Hou Shihua male, was born in 1969, PhD candidate. His current research interests include design, simulation, and fabrication of VCSELs.

Email: shhou@red.semi.ac.cn

Received 21 January 2004, revised manuscript received 18 October 2004

©2005 Chinese Institute of Electronics