

键合界面对面发射激光器光与热性质的影响^{*}

何国荣 郑婉华[†] 渠红伟 杨国华 王 青 曹玉莲 陈良惠

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

(2007 年 3 月 7 日收到, 2007 年 5 月 14 日收到修改稿)

通过界面有效吸收系数的计算及界面对腔模的反射率的影响可知, 采用双面键合技术制备面发射激光器应使键合界面处于驻波场分布零点位置, 同时界面厚度应该小于 20 nm, 以使器件光学性能受界面吸收系数的影响较小. 采用有限元方法分析 VCSEL 温度分布, 结果证实薄的键合界面使 VCSEL 有源区温度对界面的热导率和电导率改变不敏感, 而厚的键合界面将可能使有源区温度有较大地升高, 给器件带来严重的不良影响. 亲水键合和疏水键合的 SEM 照片说明疏水处理界面较薄, 适合用于器件的制备, 而亲水处理界面厚度 > 40 nm, 对器件的光、热特性不利.

关键词: 键合, 面发射激光器, 热导率, 电导率

PACC: 6500, 4225B, 4225P

1. 引 言

近红外的长波长面发射激光器(VCSEL)由于其动态单模、低阈值特性、便于耦合和大规模集成等优势在光通讯、光互连上有着重要的应用, GaInNAs/GaAs, InAs/InGaAs, InGaAsP/InP 及 AlGaInAs/InP 等材料系是这个波段常用的有源区材料. 其中 GaInNAs/GaAs, InAs/InGaAs 有源区在材料生长方面仍存在着问题^[1,2], 而采用传统方法制备连续激光的 InGaAsP/InP VCSEL 的困难在于与有源层材料晶格匹配的 DBR 材料, InGaAsP/InP, AlGaInAs/InP, InAlGaAs/InAlAs 反射镜由于折射率差较小, 为达到 99% 以上的反射率需要较多对数的 DBR, 不仅使得电阻和光吸收增加, 也给材料生长提出了很高的要求, 且三元和四元材料热导性较差, 这都会直接导致 VCSEL 性能恶化.

采用键合方法可以较好地解决上述问题, 通过将折射率差较大、热导性能较好的 GaAs/AlAs DBR 与 InGaAsP 有源区键合, 可以有效地改善激光器的电、热特性, 从而实现低阈值、高温连续工作 VCSEL. 国外加州大学和 Cornell 大学等单位^[3,4]都对键合方法制备长波长 VCSEL 做了多年的研究, 并于 2003 年通过双面键合实现 1.3 μm 大功率的 VCSEL, 最高工作温度可达 134 $^{\circ}\text{C}$ ^[5].

双面键合技术的引入使得 VCSEL 器件的有源层与 DBR 之间多了两层键合界面, 键合界面的引入必然影响 VCSEL 器件光、热性能, 此方面的研究工作较少, 因而本文专门对此做了相应的理论分析.

2. 结果和分析

双面键合 VCSEL 中, 通常采用的键合都是 GaAs/InP 键合^[6]. GaAs, InP 材料的失配将使得键合界面成为从一种材料到另一种材料的过渡层, 这就意味着键合界面层是晶格被强烈扰乱的一层, 该层将对光子、电子有较强的散射、吸收和俘获作用, 因而光吸收系数、电阻和热阻均可能较大, 从而对器件性能产生影响.

2.1. 键合界面吸收系数对 VCSEL 光学性能的影响

通过传输矩阵法计算得到的 VCSEL 驻波场表明, 当最接近光学腔的材料为高折射率材料(如 GaAs), 光学腔的光学厚度应设计为 $\lambda/2$ 的奇数倍, 此时有源区处于驻波场的波峰位置, 键合界面处于驻波场的波谷位置, 如图 1(a)所示(以 1.5λ 为例), 这有利于减少键合界面的吸收损耗. 相反有源区光学厚度设计为 $\lambda/2$ 的偶数倍时, 此时有源区处于驻波场的波谷位置, 无法激射, 如图 1(b)所示(以 1λ 为例).

^{*} 国家重点基础研究发展规划项目(批准号 2003CB314902)和国家博士后科学基金(批准号 20060400488)资助的课题.

[†] E-mail: whzheng@red.semi.ac.cn

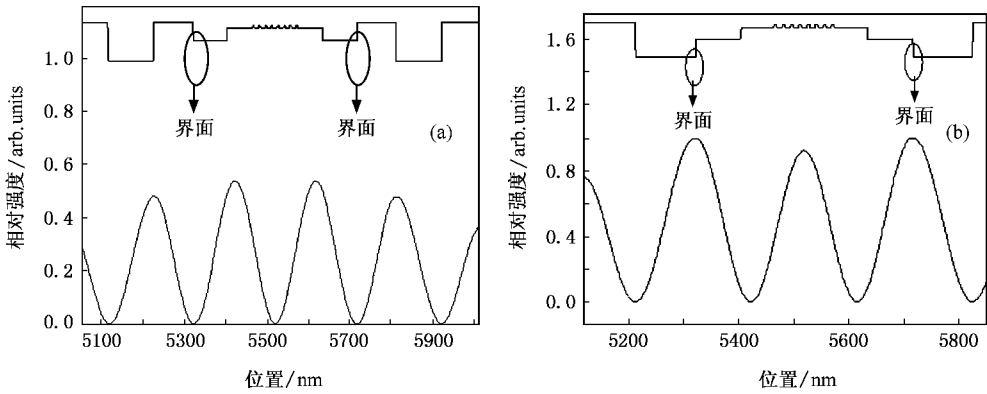


图 1 (a)1λ 光学腔和 (b) 1.5λ 光学腔的驻波场及折射率分布

考虑垂直腔激光器的单程吸收时, 需要考虑界面处驻波强度, 对于界面的有效吸收系数, 我们采用如下公式^[7]:

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_{\text{mat}} \times (2 - \xi),$$

$$\xi = \frac{\sin\left[\frac{2\pi n}{\lambda}(l + 2x_0)\right] + \sin\left[\frac{2\pi n}{\lambda}(l - 2x_0)\right]}{2\pi n l / \lambda},$$

其中 α_{eff} 和 α_{mat} 分别为界面的有效吸收系数和材料吸收系数, n 为折射率, l 为键合界面厚度, λ 为激光波长, x_0 为界面偏移驻波零点的距离. 图 2 为通过该公式计算得到的有效吸收系数与实际吸收系数的比值随 x_0 和 l 的变化曲线. 由图可见, 当键合界面位于驻波场电场零点附近时, 有效吸收系数迅速减小, 越接近驻波场电场极大值, 界面的有效吸收系数与材料吸收系数比值也越接近 1. 随着键合界面厚度的增加, 其比值随键合界面位置的变化曲线逐渐变平坦, 当界面厚度为 40 nm 时, 在零点处的比值也超过了 0.2, 说明界面厚度的增加和界面位置偏离零点都将造成界面有效吸收系数的增大.

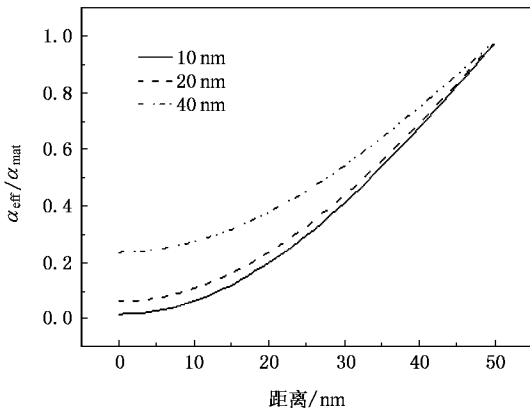


图 2 界面到驻波零点的距离与界面厚度对有效吸收系数的影响

对于掺杂浓度为 10^{18} cm^{-3} 的 n-GaAs 和 n-InP 而言, 在 $1.3 \mu\text{m}$ 的吸收系数约为 $(5-6) \times 10^{-7} \text{ nm}^{-1}$, 而键合界面处吸收系数要大许多, 可达到 $1 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ [7]. 图 3 是键合界面处于驻波场最小值时, 1.5λ 光学腔模处的反射率与吸收系数和键合界面厚度的关系. 由图可见, 在键合界面厚度为 10 和 20 nm 时, 腔模处的反射率几乎不变, 界面吸收系数的增大对腔模影响不明显, 而界面厚度为 40 nm 时, 腔模的反射率才会随吸收系数的增大而有明显上升. 如果键合界面吸收系数接近 $1 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ 时, 腔模反射率将趋向于 1, 这意味着此时 VCSEL 整体反射谱平坦, 光学腔无腔模, 说明此时光学腔失效, 键合 VCSEL 无法实现激励.

综上, 键合界面对双面键合 VCSEL 的影响主要决定于两点: 一是键合界面与驻波场零点的距离, 这决定了界面有效吸收系数的大小; 二是键合界面的厚度, 界面厚度影响着光学腔的有效性. 有源区采用 1.5λ 光学腔, 此时键合界面处于驻波场的波谷位置, 而有源区量子阱处于驻波场峰值位置. 当键合界面

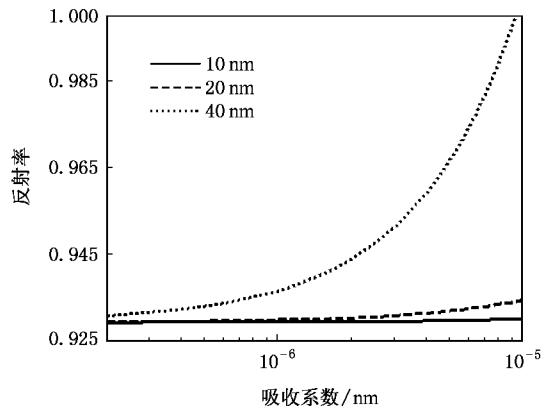


图 3 键合界面的吸收系数和界面厚度对 1.5λ 光学腔模式反射率的影响

厚度小于等于 20 nm 时,键合界面对垂直端面发射激光器的光吸收影响影响较小.

2.2. 键合界面对 VCSEL 热特性的影响

VCSEL 热源产生主要考虑有源区均匀分布的热源和 p-DBR 和 n-DBR 的电阻生热.

有源区热源主要由有源层中的非辐射复合和自发辐射吸收热产生,该区域内的焦耳热可以忽略,具体可表示为^[8]

$$Q = \frac{V(r) \{ 1 - \eta_{sp} f_{sp} \}}{d} [j_{th} + (1 - \eta_i) \{ \chi(r) - j_{th} \}],$$

式中 $V(r)$ 为结电压, d 为有源区厚度, η_{sp} 为自发辐射内量子效率, f_{sp} 为自发发射逃逸因子, j_{th} 为阈值电流, η_i 为内量子效率, $\chi(r)$ 为注入电流. 上下 DBR 的均匀分布的热源功率密度可表示为 $\chi(r) \chi R$.

考虑半径为 20 μm 的台柱,出光孔半径 10 μm 的 VCSEL,因 VCSEL 结构为轴对称结构,因而只需考虑二维结构,示意图见图 4.

参数设定:注入电流 11 mA,阈值电流 2.5 mA,结电压 6.5 V^[11],内量子效率 0.9,自发辐射内量子

效率 0.5,自发发射逃逸因子 0.667^[9,10].

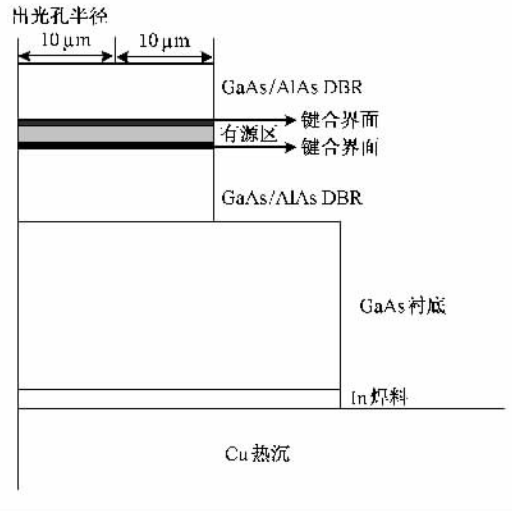


图 4 VCSEL 结构示意图

对于 DBR 和有源区,其热导率、热容和密度采用等效参数设定,计算采用的参数如表 1 所示.此外还用到 DBR 电阻率 $1.2 \times 10^4 \Omega \cdot \mu\text{m}$,室温设定为 20 $^\circ\text{C}$.

表 1 材料参数列表

材料	热导率(W/K·m)	热容(J/K·kg)	密度(kg/m ³)
GaAs	55	330	5320
n-DBR 和 p-DBR(Al _{0.9} Ga _{0.1} As/GaAs)	60.4	390	4560
有源层	45	250	5000
Cu(热沉)	393	385	8960
In(焊料)	81.6	240	7310

VCSEL 内部的热传导方程为^[11] $\nabla^2 T(r, z) + \frac{Q(r, z)}{k} = 0$, T 为温度, Q 是热量密度, k 是热导率.

边界条件设定为^[12] $\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=s} = 0$, $T(z=0) = T_0$. 其中, H 表示器件高度(包括衬底和热沉), r 表示径向, s 表示器件半径, T_0 代表室温. 采用有限元方法可对上述物理模型进行分析.

当键合界面的电阻和热导率(设为 R_{int} 和 D_{int})与 GaAs(设为 R_0 和 D_0)一致,则整体温度分布如图 5 所示,有源区最高温度为 49.19 $^\circ\text{C}$. 温度分布呈梯度分布,高温区域由有源区向 DBR 扩展.

通过有限元方法计算得到键合界面有源区的最高温度与电阻和热导率的关系如图 6(a)(b)所示. 由图 6(a)可见,随着键合界面电阻的增加,界面的

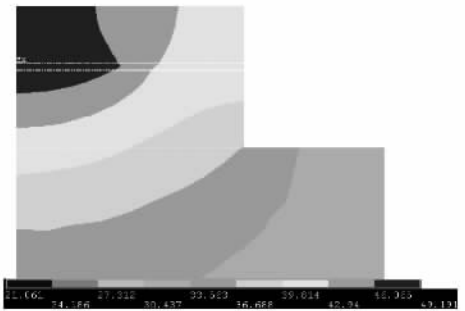


图 5 键合界面参数与 GaAs 参数一致时 VCSEL 的温度分布图

发热量增加,高温区域会扩展,有源区温度也会有相应的升高.当键合界面较薄的时候(10 nm 和 20 nm),键合界面的发热量相对有源区和 DBR 的发热量较小,因而有源区的温升曲线相对平坦.只有当 $R_{int}/R_0 > 100$ 时,有源区温度才会有明显地上升.当

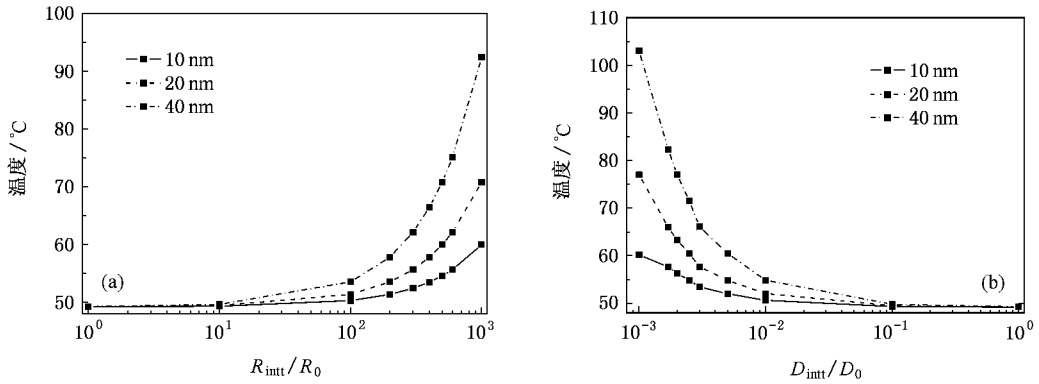


图6 键合界面的厚度及(a)电阻率(b)热导率对有源区的温度影响

键合界面较厚时(40 nm),有源区温度随 R_{int}/R_0 增加而上升明显,当 $R_{int}/R_0 = 1000$ 时,温度能达到 93°C,几乎为 $R_{int}/R_0 = 1$ 时的两倍。

有源区温度随热导率的变化如图 6(b)所示,随着键合界面热导率的降低,热量在键合界面的传递受到了限制,高温区逐渐集中于有源区附近,从而导致有源区温度升高.与图 6(a)相似,当键合界面为 10 nm 和 20 nm 时,有源区温升随热导率的降低变化较小,只有在 $D_{int}/D_0 < 0.01$ 时,有源区温度才会有明显地上升.而对于 40 nm 的键合界面,器件温度特性受热导率影响巨大,在 $D_{int}/D_0 = 0.001$ 时,有源区温度能达到 104°C,是 $D_{int}/D_0 = 1$ 时有源区温度的两倍多。

以上说明键合界面较薄时,由于界面对热量传递的阻挡作用和发热影响不明显,因而键合界面热导率的下降和电阻的增大对 VCSEL 热特性影响幅度较小.而当键合界面较厚时,界面将严重阻碍有源层的热量向外传递,同时还可能由于自身有较大的发热量而形成新的热源,从而导致有源区的温度快速上升。

2.3. 实验结果与分析

我们对亲水、疏水处理后的键合界面做了 SEM

分析,结果如图 7(a)(b)所示.疏水处理的键合界面薄而清晰,而亲水处理的键合界面有一明显的受氧化影响的界面层,该层厚度 > 40 nm,由致密的氧化层和晶格失配引入的缺陷组成.由于键合界面为受晶格强烈扰乱的一层,其电导率和热导率都较低,光吸收系数也较大,文献 [4] 指出落在 p-GaAs/p-InP 键合界面的电压 > 1 V,键合界面吸收系数可达 100 cm^{-1} ,也远远大于 GaAs, InP 材料的光吸收系数.键合界面的压降和强烈的光吸收都会对器件的性能造成影响,综合前面的考虑,界面应该越薄越好,当界面厚度达到 40 nm 时将影响光学腔性能,甚至导致光学腔失效,也可能使器件的温升加剧,热导变差,从而使器件性能变差,甚至无法工作.亲水处理的键合界面由于厚度 > 40 nm,根据前面的计算结果我们可以得知这种厚度的键合界面将给器件带来严重的不利影响,不利于器件的制备.而界面厚度为 nm 级别的疏水键合界面使得 VCSEL 热性能对界面热导率和电阻率不敏感,因而制备 VCSEL 应该采用疏水键合方法.加州大学^[4,7]和 Cornell 大学^[13,14]都采用双面疏水键合的方法制备了低阈值、大功率 VCSEL,并于 2003 年通过双面键合实现了室温连续工作,最大单模输出功率达 2 mW,最高工作温度达 134°C,

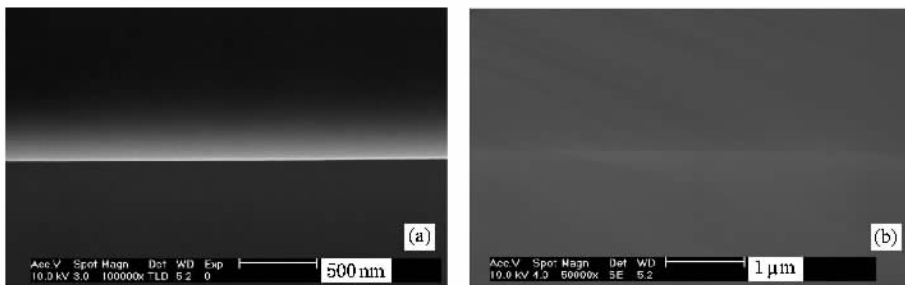


图7 (a)亲水键合界面和(b)疏水键合界面的 SEM 照片

波长 ~ 1320 nm 的 VCSEL^[5]. 双面疏水键合 VCSEL 的良好性能证明疏水性质的键合界面对器件性能影响较小.

图 8 为我们实验制备的双面疏水键合 VCSEL 结构 SEM 照片,由图可看到疏水键合界面薄而完整,几乎与外延生长的材料相当,界面为十分完美的突变界面,因而可以认为疏水键合将键合界面对器件的光、热性能影响很小.关于疏水键合制备 VCSEL 的可行性以及键合界面对结构的电、光性质实验研究,我们已在文献 14 做过总结.

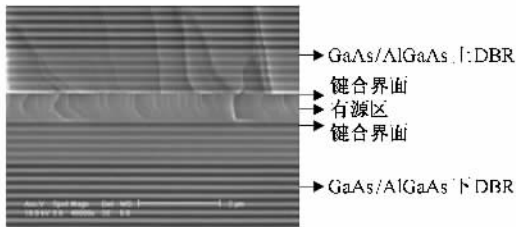


图 8 双面键合 VCSEL 结构的 SEM 照片

3. 结 论

由 VCSEL 驻波场分布可知,对于采用双面键合

技术制备 VCSEL,应该采用 $\lambda/2$ 奇数倍的光学腔以使有源区位于驻波场的极大值.键合界面有效吸收系数及对 VCSEL 腔模的影响与界面所处位置和界面厚度直接相关.当界面处于驻波场零点位置附近时,有效吸收系数较小,当趋近于驻波场极大值时,有效吸收系数将逐渐与材料的吸收系数一致.键合界面的厚度与键合 VCSEL 腔模处的反射率相关,当界面厚度小于等于 20 nm 时,腔模处反射率随吸收系数的增大未有明显增加,而界面厚度达到 40 nm 时,腔模处反射率随吸收系数增大而明显增大.界面吸收系数接近 $1 \times 10^{-5} \text{ nm}^{-1}$ 时,腔模反射率将趋向于 1,此时无腔模,光学腔失效.

通过有限元方法分析 VCSEL 温度分布可知,薄的键合界面使 VCSEL 有源区温度对界面的热导率和电导率改变不敏感,而厚的键合界面将阻碍热量的传输或成为新的热源,将导致有源区温度有较大地升高,给 VCSEL 器件带来严重的不良影响.

由键合的 SEM 照片可知,疏水处理界面较薄,适合用于器件的制备.而亲水处理界面厚度 > 40 nm,因而亲水处理的键合结构将给器件的光学和热学性质带来不利影响,甚至可能使器件无法激射.

- [1] Ni H Q, Xu X H, Zhang W 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1474 (in Chinese) [倪海桥、徐晓华、张 纬等 2004 物理学报 **53** 1474]
- [2] Tong C Z, Niu Z C, Han Q, Wu R H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3651 (in Chinese) [佟存柱、牛智川、韩 勤、吴荣汉 2005 物理学报 **54** 3651]
- [3] Qian Y, Zhu Z H, Lo Y H 1997 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **9** 8
- [4] Karim A, Björlin S, Piprek J, Bowers J E 2000 *IEEE J. SEL TOP QUANT* **6** 1244
- [5] Jayaraman V, Mehta M, Jackson A W 2003 *IEEE Photon. Tech. Lett.* **15** 1495
- [6] Lao Y F, Wu H Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4335 (in Chinese) [劳燕锋、吴惠桢 2005 物理学报 **54** 4335]
- [7] Margalit M N 1998 *Ph. D. Dissertation* (University of California), Santa Barbara, ECE Tech. p52

- [8] Nakwaski W, Osinski M 1991 *IEEE J. Quantum Electron* **27** 1391
- [9] Rahman B M A, Lepkowski S P, Grattan K T V 1995 *IEE Proc. - Optoelectron* **142** 82
- [10] Nakwaski W, Osinski M 1991 *IEEE J. Quantum Electron* **27** 1391
- [11] Papannareddy R, Ferguson W, Butler J K 1987 *J. Appl. Phys.* **62** 3565
- [12] Ivanov P S, Aukhoivanov I A, Lysak V V, Kublik A V, LFNM ' 2000, 23 May, 2000, Kharkiv, Ukraine p53
- [13] Zhu Z H, Ejeckam F E, Qian Y, Zhang J Z, Zhang Z J, Christenson G L, Lo Y H 1997 *IEEE J. Quantum Electron* **3** 927
- [14] He G R, Zheng W H, Qu H W, Yang G H, Wang Q 2007 *Chin. J. Semiconduct.* **28** 444 (in Chinese) [何国荣、郑婉华、渠红伟、杨国华、王 青 2007 半导体学报 **28** 444]

Influence of fused interface on the optical and thermal characteristics of vertical cavity lasers^{*}

He Guo-Rong Zheng Wan-Hua[†] Qu Hong-Wei Yang Guo-Hua Wang Qing
Cao Yu-Lian Chen Liang-Hui

(*Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China*)

(Received 7 March 2007; revised manuscript received 14 May 2007)

Abstract

From the effective absorption coefficient of bonded interface and the relationship of interface to reflectivity at cavity mode for double bonded vertical cavity laser, it can be seen that bonded interfaces should be positioned at the null of standing wave distribution, and the thickness of interface should be less than 20 nm. Using the finite elements method, the temperature contour map of laser can be calculated. Results showed that the influence of thin interface to thermal characteristics of VCSELs is slight, while thick interface will lead to temperature increase of active region. SEM images demonstrate that hydrophobic bonding is suitable for the fabrication of the device, while hydrophilic bonding interface is unfavorable to optical and thermal properties of devices with interface thickness larger than 40 nm.

Keywords : bonding, surface-emitting laser, thermal conductivity, electrical conductivity

PACC : 6500, 4225B, 4225P

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314902) and the National Science Foundation of Post-doctoral Scientists of China (Grant No. 20060400488).

[†] E-mail : whzheng@red.semi.ac.cn