

双散热片结构光抽运垂直外腔面发射激光器的热特性分析

刘向南¹ 王晓华¹ 王菲² 王金艳¹ 周煌² 刘鹏飞¹ 金光勇¹

(¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022
² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 利用 ANSYS 有限元热分析软件对光抽运垂直外腔面发射激光器(OPS-VECSEL)内部的热场分布和热流量分布进行了模拟,对比分析了两种散热结构的散热性能,讨论了抽运光斑的参量和金刚石散热片厚度对器件热特性的影响。模拟分析表明:在抽运功率密度较大时,与单面键合金刚石散热片结构相比,双金刚石散热片结构的 OPS-VECSEL 温升较低,引起的谐振波长差较小,热量向芯片上下两侧散失有利于器件的散热,并且随着抽运功率密度的增大,双散热片结构的散热优势就越明显;当上部金刚石散热片的厚度为 500 μm 、下部金刚石散热片的厚度在 300~500 μm 时可以实现很好的散热效果。

关键词 激光器;半导体激光器;光抽运;热管理;有限元法

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP48.091404

Analysis of Thermal Characteristic in Optically Pumped Semiconductor Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser with Double Heatspreaders

Liu Xiangnan¹ Wang Xiaohua¹ Wang Fei² Wang Jinyan¹
Zhou Huang² Liu Pengfei¹ Jin Guangyong¹

(¹ College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
² College of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract By using ANSYS finite element software, the internal distribution of heat fields and heat flow vector in an optically pumped semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting laser (OPS-VECSEL) was simulated. The heat performance of OPS-VECSEL with two different configurations of heat dissipation was compared. Besides, the effects of parameters of pump spot and thickness of heatspreader on temperature rise of VECSEL were discussed. Simulation and analysis show that the temperature rise of OPS-VECSEL with double diamond heatspreaders is much lower as well as the resonate wavelength difference at larger pump power density, and meanwhile it is beneficial for heat dissipation because the heat transports to the top and bottom side of OPS-VECSEL chip. With pump power density increasing, the superiority of heat dissipation becomes more notable. It is also showed that better heat dissipation will be achieved when the top diamond thickness is 500 μm and the bottom diamond thickness is 300~500 μm .

Key words lasers; semiconductor laser; optical pump; thermal management; finite element method

OCIS codes 140.3460; 140.5960; 140.7270; 140.6810

收稿日期: 2011-03-02; 收到修改稿日期: 2011-04-28; 网络出版日期: 2011-07-25

基金项目: 吉林省科技发展计划(20080331,20090555)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0122)、国家自然科学基金(61076039)、教育部博士点基金(20102216110001)和长春理工大学科研创新基金(XJLJG-2010-03)资助课题。

作者简介: 刘向南(1985—),男,蒙古族,硕士研究生,主要从事光抽运半导体激光器方面的研究。

E-mail: liuxiangnan110@126.com

导师简介: 王晓华(1967—),女,博士,研究员,主要从事半导体光电方面的研究。E-mail: biewang2001@126.com (通信联系人)

1 引言

近年来,光抽运垂直外腔面发射激光器(OPs-VECSEL)在激光显示、激光通信、生物医学诊断和照相洗印等领域表现出良好的应用前景^[1,2]。然而研究发现,随着抽运功率的增大,OPs-VECSEL 芯片内部沉积的废热促使器件的温升加大,产生了热翻转效应(thermal roll over effect)^[3]。OPs-VECSEL 芯片内部的热量来自帽层、有源区(gain region)和分布布拉格反射镜(DBR)所吸收的抽运光以及有源区内辐射复合和非辐射复合的量子缺^[4]。有源区沉积的废热降低了量子阱的增益,DBR 沉积的废热降低了自身的反射率,提高了激光运转的阈值,二者都直接制约着 OPs-VECSEL 的输出特性。因此,提高对器件有源区和 DBR 沉积废热的抽空速率,对其进行有效的热管理是改善 OPs-VECSEL 输出特性的关键。

本文针对 OPs-VECSEL 的热产生机理,利用有限元法分别对两种散热结构的 OPs-VECSEL 进行热特性模拟。为了降低衬底热阻的影响,首先将厚度为 500 μm 的衬底机械减薄至 200 μm ;然后用一定比例的 H_2O_2 和 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 混合溶液将剩余衬底移除掉大部分;再用一定比例的 $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 和 H_2O_2 混合溶液将衬底全部移除掉,露出腐蚀阻挡层,从而得到薄片 VECSEL。文中 A 结构是采用毛细键合法(capillary bonding)^[5]在薄片 VECSEL 帽层表面键合金刚石散热片结构,B 结构为首先将金刚石片 a 与薄片结构的帽层表面键合,然后在 DBR 下表面焊接金刚石片 b,最后将金刚石片 b 焊接到铜热沉上^[6],本文将其简称为薄片 VECSEL 双金刚石散热片结构。

2 计算模型

为了探究两种结构中金刚石散热片厚度对器件散热性能的影响,首先在抽运功率为 30 W、抽运光斑半径为 50 μm 时,通过改变 A 结构中芯片上部金刚石片的厚度来讨论器件温升情况,因此选取适宜厚度的上部散热片,模拟结果如图 1 中曲线 1 所示;然后在 B 结构中选择适宜厚度的上部散热片 a 后,通过改变下部散热片 b 的厚度来讨论器件的温度变化,从而选取较佳的下部散热片厚度,模拟结果如图 1 中曲线 2 所示。由图 1 知 A 结构器件的温升随上部散热片 a 厚度的增大而降低。当上部的金刚石 a 厚度超过 500 μm 以后,器件温升与 500 μm 厚时相比变化不大,因此在选择上部的金刚石片时,其厚度在 500 μm 时可以获得很好的散热效果;而对于 B 结构来说,当上部金刚石厚度为 500 μm 、下部金刚石厚度在 300~500 μm 时,器件的温升变化很小,因此在计算中选取 500 μm 厚的下部散热片。

计算所采用的 VECSEL 芯片结构包括:500 μm 厚的 GaAs 衬底,150.4 nm 厚的 $\text{In}_{0.48}\text{GaP}$ 帽层,303.4 nm 厚的 $\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$ 窗口层,有源区由 11 个量子阱组成,每个量子阱由 121.5 nm 的 $\text{Al}_{0.04}\text{GaAs}$ 势垒、10 nm 的 $\text{In}_{0.18}\text{GaAs}$ 势阱和 14.5 nm 的 $\text{GaAsP}_{0.17}$ 应变补偿层构成;DBR 为 27.5 对 $\lambda/4$ 厚的 AlAs 和 GaAs 交替结构构成^[7]。

为了简化计算并保证计算精度,计算模型采用轴对称几何结构,同时将具有相似热分布函数的临近层作为一个复合层,即将帽层和窗口层作为一个复合层,而将有源区、DBR 分别作为一个热导率各向异性的复合层。复合层的厚度为相邻单层厚度之和,复合层的热导率等效为垂直和平行于层平面的各向异性的热导率。DBR 的底层记为坐标原点。VECSEL 二维几何结构如图 2 所示。考虑到芯片的直径为 5 mm,而芯片的厚度在

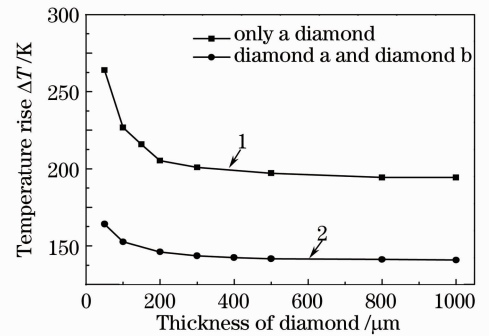


图 1 金刚石片厚度与器件温升的关系

Fig.1 Temperature rise versus thickness of diamond

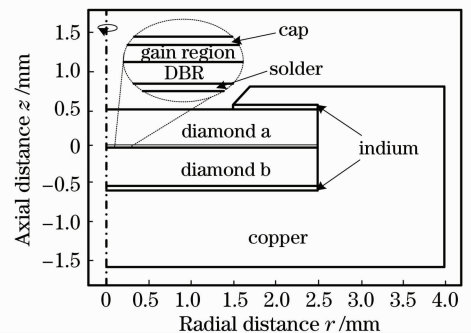


图 2 VECSEL 二维几何结构图

Fig.2 2D geometry figure of VECSEL

10 μm 左右,因此采用 μMKS 单位制来克服该结构存在较大纵横比的问题。

复合层热导率的计算方法为^[8]

$$k_r = \frac{\sum_{i=1}^N d_{z,i} \cdot k_i}{\sum_{i=1}^N d_{z,i}}, \quad (1)$$

$$k_z = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{d_{z,i}}{k_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{d_{z,i}}{k_i}}, \quad (2)$$

式中 $d_{z,i}$ 为各单层的厚度, k_i 为各单层的热导率, N 是总层数。根据 DBR 结构的周期性,其复合层的等效热导率为

$$k_{r,\text{DBR}} = \frac{n_1 \cdot k_2 + n_2 \cdot k_1}{n_1 + n_2}, \quad (3)$$

$$k_{z,\text{DBR}} = \frac{n_1 + n_2}{n_1/k_2 + n_2/k_1}, \quad (4)$$

式中 n_1 和 n_2 分别代表交替层的折射率。计算中所用到的参数如表 1^[9,10] 和表 2^[10] 所示。

表 1 材料参数

Table 1 Value of material parameters

Material	Cap layer	RPG	DBR	Diamond	Indium	Solder	Copper
Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)	12	$k_r = 27.2$ $k_z = 23.6$	$k_r = 69.6$ $k_z = 61.2$	2000	84	30	400

表 2 模型参数

Table 2 Value of model parameters

Parameter	$z_{\text{og}}/\mu\text{m}$	$z_{\text{od}}/\mu\text{m}$	η_g	η_d	P/W	$w/\mu\text{m}$	$\alpha_g/\mu\text{m}^{-1}$	$\alpha_d/\mu\text{m}^{-1}$	T_0/K
Value	5.9138	4.1843	0.1755	1.0	10	50	1.0	0.457	293

VECSEL 芯片稳态热传导方程为

$$-\nabla \cdot (k \nabla T) = Q. \quad (5)$$

有源区和 DBR 内部热载荷的分布形式为^[11]

$$Q_g = \frac{2\eta_g P \alpha_g}{\pi w^2} \exp(-2r^2/w^2) \exp[-\alpha_g(z_{\text{og}} - z)], \quad (6)$$

$$Q_d = \frac{2\eta_d P \alpha_d}{\pi w^2} \exp(-2r^2/w^2) \exp[-\alpha_d(z_{\text{od}} - z)] \exp(-\alpha_g t_g), \quad (7)$$

式中 η_g, η_d 分别为有源区和 DBR 的热转化系数, α_g, α_d 分别为有源区和 DBR 对抽运光的吸收系数, $z_{\text{og}}, z_{\text{od}}$ 分别为有源区和 DBR 最顶部的 z 坐标值, t_g 为有源区的厚度, P 为抽运功率, w 为抽运光斑半径。设热沉底部的边界温度为常数 T_0 , 对称轴处采用轴对称边界条件, 其他边界条件设为绝热。

3 计算结果及分析

根据表 1 和表 2 中的参数, 利用 ANSYS 有限元热分析软件模拟获得 VECSEL 器件稳态温度分布情况。为了突出器件主要区域的温升情况, 图 3 给出的是器件沿 z 轴 ($-0.5 \sim 0.5 \text{ mm}$), 沿 r 轴从 $0 \sim 0.35 \text{ mm}$ 区域的温升和热矢量分布情况。图 3(a) 是模拟得到的器件的温度分布, 图中不同的颜色代表不同的温度。图 3(a) 表明器件温升较高的区域很小, 高温主要集中在有源区和 DBR 层且最高温度出现在有源区, 这是由于有源区远离热量抽运区且 DBR 热阻较大。当 $P=10 \text{ W}$, $w=50 \mu\text{m}$ 时, 由图 3(a) 可知 B 结构有源区的最高温度为 340.176 K , 而参考温度为 293 K , 则有源区最高温升为 47.176 K , 按照波长温度漂移系数为 0.3 nm/K ^[12] 计算, 增益波长漂移量约为 14.15 nm ; 同理, 在相同抽运条件下, A 结构有源层的最高温升为 65.714 K , 增益波长漂移量约为 19.71 nm 。可见, 同样抽运条件下 B 结构引起的波长漂移较小, 其散热效果较好。

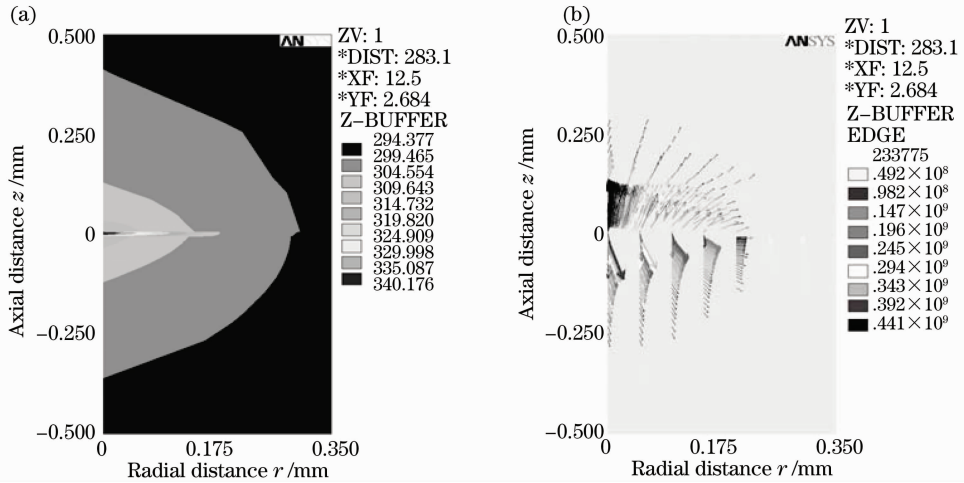


图3 (a)模拟的器件温度分布;(b)模拟的器件热矢量分布图

Fig. 3 (a) Temperature distribution of VECSEL; (b) heat flow vector distribution of VECSEL

图3(b)是器件的热矢量分布图,其中不同的颜色代表不同的热流密度值,箭头代表热量的流动方向。由图3(b)可知热量主要向芯片上下两侧流动,原因在于金刚石的热导率远远大于有源区和DBR层的热导率,芯片上、下两侧的金钢石片对有源区和DBR层的热量具有较大的抽运作用,引起热量向芯片两侧流动并散失;由于最大的热流密度向芯片上部流动,可以看出此时芯片上部的散热片对降低有源区温度的作用明显优于下部散热片对降低有源区温度的影响,其原因在于DBR比窗口层和帽层的厚度大,有源区离上部热量抽运区较近。

图4和图5分别给出了不同抽运参数下,A、B结构 VECSEL 的模拟温升曲线。图4(a)表明当抽运功率一定时,随着抽运光斑半径的增大,器件温升在逐渐减小,这是由于此时抽运光斑的增大引起抽运功率密度的减小。而随着抽运光斑半径的减小,亦即功率密度增大时,B结构的温升比A结构的温升明显低很多,此时B结构的散热性好;当抽运光斑半径大于 $250\ \mu\text{m}$ 以后,两种结构的温升差别不大,其原因在于抽运功率密度减小,器件产生的热量主要从帽层导出,下散热片作用不明显。图4(b)表明当抽运功率密度一定时,随着光斑半径的增大,两种结构器件的温度都在增大,但此时B结构的温升比A结构的温升小很多,说明B结构更适合大功率工作。考虑到高功率工作时,抽运光斑半径通常都比较大($300\sim 700\ \mu\text{m}$)^[13],因此计算中选取抽运光斑半径为 $500\ \mu\text{m}$ 时,通过改变抽运功率密度来讨论器件的散热性能。由图5可知,抽运光斑半径一定时,随着抽运功率密度的增大,温升在线性增大。值得注意的是随着抽运功率密度的增大,B结构的温升要比A结构温升高很多,这表明当抽运功率密度很大时,器件下部的金刚石片发挥较大的散热作用。

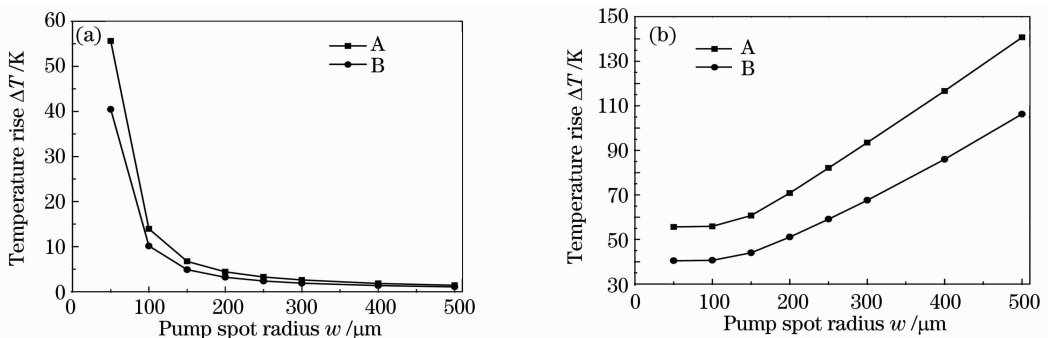


图4 抽运光斑半径与器件温升的关系。(a) 抽运功率 $P=10\ \text{W}$; (b) 抽运功率密度 $P_0=127.4\ \text{kW}/\text{cm}^2$

Fig. 4 Temperature rise versus pump spot. (a) $P=10\ \text{W}$; (b) $P_0=127.4\ \text{kW}/\text{cm}^2$

综上所述,可以得到以下结论:在相同的抽运条件下,两种散热结构的 VECSEL 的温升变化趋势相同,在抽运功率密度较低时,两种结构的温升差别不大,而当抽运功率密度较大时,B结构的散热性能要明显优于A结构,并且抽运功率密度越大,B结构的散热优势就越明显,这表明B结构更适合大功率工作。

4 结 论

针对 OPS-VECSEL 的散热问题,采用 ANSYS 有限元热分析软件对单面和双面金刚石片散热结构的薄片 OPS-VECSEL 进行了热分布特性的对比分析。模拟结果表明在抽运功率密度较高时,双面金刚石散热片结构的薄片 VECSEL 比单面键合金刚片结构的薄片 VECSEL 散热性能好很多,所引起的波长漂移小;同时讨论了抽运光斑的半径、功率和功率密度等参量的变化对器件温升的影响,结果表明,在相同的抽运条件下,两种散热结构的 VECSEL 的温升变化趋势相同,而双金刚石散热片结构的 VECSEL 在大功率工作条件下的散热优势更为突出;在讨论金刚石片厚度对器件温升的影响中发现上部金刚石片为 $500\ \mu\text{m}$ 、下部金刚石片的厚度在 $300\sim 500\ \mu\text{m}$ 时就可以获得很好的散热效果。以上模拟分析结果为 OPS-VECSEL 散热结构的改良和优化提供了一定的理论依据,对器件工艺具有一定的指导意义。

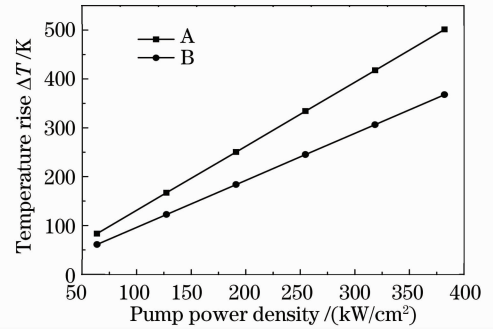


图 5 抽运功率密度与器件温升的关系
Fig. 5 Temperature rise versus pump power density ($\omega=500\ \mu\text{m}$)

参 考 文 献

- 1 He Chunfeng, Li Jun, Qin Li *et al.*. Spectral analysis of OPS-VECSEL [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2007, **13**(3): 97~99
何春风, 李 军, 秦 莉 等. 光抽运垂直外腔面发射激光器的光谱特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2007, **13**(3): 97~99
- 2 Hua Lingling, Song Yanrong, Zhang Peng *et al.*. Study on the gain characteristics of optically pumped semiconductor laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1702~1708
华玲玲, 宋晏蓉, 张 鹏 等. 光抽运半导体激光器增益特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1702~1708
- 3 J. Chilla, S. Butterworth, A. Zeitschel *et al.*. High power optically pumped semiconductor lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 143~150
- 4 Chen Baizhong, Dai Teli, Liang Yiping *et al.*. Finite element analysis of thermal management in optical pumping semiconductor vertical-external cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(10): 2745~2750
陈柏众, 戴特力, 梁一平等. 用有限元法讨论光抽运垂直外腔面发射半导体激光器的散热性能[J]. *中国激光*, 2009, **36**(10): 2745~2750
- 5 Z. L. Liao. Semiconductor wafer bonding via liquid capillarity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(5): 651~653
- 6 J. V. Moloney, A. R. Zakharian, J. Hader *et al.*. Designing new classes of high power, high brightness VECSELs [C]. *SPIE*, 2005, **5990**: 599003
- 7 W. J. Alford, T. D. Raymond, A. A. Allerman. High power and good beam quality at 980 nm from a vertical external-cavity surface-emitting laser [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(4): 663~666
- 8 H. Lindberg, M. Strassner, E. Gerster *et al.*. Thermal management of optically pumped long-wavelength InP-based semiconductor disk lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(5): 1126~1134
- 9 W. Nakwaski. Thermal conductivity of binary, ternary, and quaternary III-V compounds [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(1): 159~166
- 10 A. J. Kemp, G. J. Valentine, Jon-Mark Hopkins *et al.*. Thermal management in vertical-external-cavity surface-emitting lasers: finite-element analysis of a heatspreader approach [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, **41**(2): 148~155
- 11 A. J. Kemp, John-Mark Hopkins, A. J. Maclean *et al.*. Thermal management in 2.3- μm semiconductor disk lasers: a finite element analysis [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2008, **44**(2): 125~135
- 12 M. Kuznetsov, F. Hakimi, R. Sprague *et al.*. Design and characteristics of high-power ($>0.5\text{-W}$ CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀ beams [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1999, **5**(3): 561~573
- 13 Yiyang Lai, J. M. Yarborough, Yushi Kaneda *et al.*. 340-W peak power from a GaSb 2- μm optically pumped semiconductor laser (OPSL) grown mismatched on GaAs [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2010, **22**(16): 1253~1255