

文章编号: 1000-7032(2012)11-1247-05

大功率垂直腔面发射激光器列阵的热模拟及优化

张立森^{1,2}, 宁永强^{1*}, 刘迪^{1,2}, 张星¹, 秦莉¹, 刘云¹, 王立军¹

(1. 发光学及应用国家重点实验室 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对垂直腔面发射激光器的产热情况进行了分析, 简化了热源, 建立了列阵的热传导模型, 利用 Comsol Multiphysics 软件对模型进行了模拟计算。通过改变底发射列阵的单元直径和间距, 对列阵的温升进行了计算。研制了 4×4 , 5×5 和 8×8 三种不同尺寸的列阵, 功率分别为 580, 1 440, 2 100 mW, 对应功率密度分别为 115, 374, 853 W/cm²。通过光谱的波长漂移计算出 4 A 时的温升分别为 120, 58, 38 °C。采用小孔径单元制作的列阵可以有效地降低列阵单元间的热串扰, 获得高功率输出。

关键词: 垂直腔面发射激光器列阵; 大功率; 热串扰

中图分类号: TN248.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20123311.1247

Thermal Simulation and Optimization of Structure in High-power Vertical Cavity Surface Emitting Laser Array

ZHANG Li-sen^{1,2}, NING Yong-qiang^{1*}, LIU Di^{1,2}, ZHANG Xing¹,
QIN Li¹, LIU Yun¹, WANG Li-jun¹(1. State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn

Abstract: The heating distribution of vertical cavity surface emitting laser array (VCSEL) is analyzed. The heating source is simplified and the heat transport model is established. The Comsol Multiphysics software is used for all numerical simulations. The temperature rise is computed by changing the cell diameter and gap between the adjacent cells. Three kinds of arrays are manufactured: 4×4 , 5×5 and 8×8 . The power are 580, 1 440 and 2 100 mW, the corresponding power density are 115, 374 and 853 W/cm², respectively. The values of temperature rise at 4 A are 120, 58 and 38 °C, which are obtained by redshift of wavelength. The arrays made up of small size cells can effectively reduce the thermal crosstalk and improve the output power.

Key words: vertical cavity surface emitting laser array; high power; thermal crosstalk

收稿日期: 2012-04-18; 修订日期: 2012-05-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(10974012, 11074247, 61106047, 61176045, 61106068, 51172225, 61006054); 国家自然科学基金重点(90923037)资助

作者简介: 张立森(1985-), 男, 山东聊城人, 主要从事高功率垂直腔面发射激光器的研究。

E-mail: zhls1209@163.com, Tel: (0431)86176335

1 引 言

与传统的边发射激光器相比,垂直腔面发射激光器(Vertical cavity surface emitting laser, VCSEL)具有光束圆形对称、单纵模输出、阈值低、可二维集成、成本低等优点,引起了人们的广泛关注^[1-4]。随着芯片外延技术的发展及工艺的进步,VCSEL的性能也不断提高,并逐步从实验室走向市场,广泛应用于光纤通讯、激光打印、固体及光纤激光器泵浦等领域。目前市场化的器件主要是用于光纤通讯的小功率器件,其有源区尺寸一般不超过 20 μm ,输出功率不超过 100 mW。而用于泵浦等方面的激光光源要求具有较高的输出功率。VCSEL 实现高输出功率的方法主要有以下两种:一是增大单管器件的尺寸,二是制作列阵器件。其中方法一使得器件具有更大的发光面积,可以提高输出功率并减小串联电阻;但是器件的尺寸不能无限增大,否则会引起电流注入不均匀,从而导致功率密度的减小和光束质量的下降,具有很大的局限性。2005 年,长春光机所制作的 500 μm 口径的 VCSEL 单管器件的连续输出功率达到了 1.95 W^[5],而普林斯顿公司将这一纪录提高到了 3 W^[6],出光口径为 350 μm 。迄今为止,这是单管器件在连续工作条件下所得到的最大功率。方法二将多个发光单元进行集成,在实现高功率输出的同时可以保持较高的转换效率及光束质量,是提高功率的主要研究方向。2001 年,Michael Miller 等制作的 VCSEL 列阵器件输出功率达到 1.55 W^[7]。2008 年,Princeton Optronics 公司利用 5 mm \times 5 mm 的列阵芯片在 320 A 连续电流下得到 230 W 的输出功率^[8]。但是与单管器件相比,列阵中单元器件产生的热不仅对自身有影响,对周围的单元也有很大的影响,不同单元间的热串扰成为限制其发展的主要障碍。

对垂直腔面发射激光器列阵的报道很多^[9-11],但是对其产热情况进行理论分析的文章还很少。为了降低列阵器件中不同单元的热串扰,我们建立了简单的模型,给出了热传导方程,采用有限元的方法对列阵进行了热模拟,从单元直径及单元间距的角度对列阵进行了优化。实验结果表明,所建立的理论模型与实验基本相符,对实验有较好的指导作用,能够降低单元间的热串扰,提高器件的输出功率。

2 理论模型与计算

图 1 为垂直腔面发射激光器列阵的截面图,图中没有画出热沉部分。垂直腔面发射激光器的热行为非常复杂,很多参数都与温度有关。除了要考虑有源区发热以外,还要考虑由于 DBR 串联电阻引起的焦耳热。由于电子的迁移率比空穴的迁移率大得多,n-DBR 的串联电阻小,电流分布分散,电流密度小,发热比 p-DBR 要小得多。为简化模型,我们不考虑 n-DBR 及衬底的发热,且假设不同热源分别为均匀分布。这样,我们认为热源只有两部分:一是 p-DBR 的串联电阻引起的焦耳热,二是有源区发热。p-DBR 的串联电阻引起的焦耳热可表示为:

$$Q_{\text{DBR}} = I^2 R, \quad (1)$$

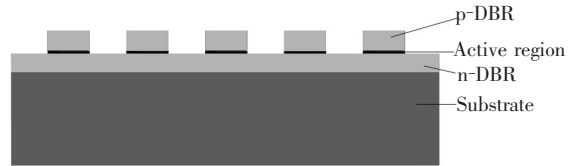


图 1 垂直腔面发射激光器列阵截面图

Fig. 1 Schematic of the VCSEL array

其中, I 为器件所加电流, R 为 p-DBR 的电阻。有源区的发热可表示为:

$$Q_{\text{active}} = (P_{\text{loss}} - Q_{\text{DBR}} \cdot V_{\text{DBR}}) / V_{\text{active}}, \quad (2)$$

$$P_{\text{loss}} = \frac{1 - \eta}{\eta} P_{\text{opt}}, \quad (3)$$

其中, V_{DBR} 和 V_{active} 分别为 p-DBR 和有源区的体积, P_{loss} 为器件损耗的功率, η 为器件的效率, P_{out} 为器件的光输出功率。根据数学物理方法的理论,对于体热源在连续工作情况下的稳态热传导方程可以用下式表示^[12-13]:

$$Q(\mathbf{r}) + \nabla \cdot [\lambda \cdot \nabla T(\mathbf{r})] = 0, \quad (4)$$

其中, λ 为材料的热导率, T 为温度分布函数, \mathbf{r} 代表位置矢量。 $Q(\mathbf{r})$ 代表不同位置产生的热量,在我们的模型中,只有 p-DBR 和有源区需要设置,而其他地方的为 0;加号后面的部分代表不同位置的散热量,稳态情况下两者的和为 0。要想得到列阵器件的温度分布,只有上面的方程是不够的,还需要给出相应的边界条件。为了简化计算,我们忽略了芯片表面的辐射和对流传热,因为芯片的面积很小且在固体材料中,这两种传热方式与热传导相比要小的多。另

外,假设热沉底部与一恒温热源相连,温度为 293.15 K。这样热沉底部的恒温面的边界条件可以写为^[12]:

$$\mathbf{n}[\lambda \cdot \nabla T(\mathbf{r})] = 0, \quad (5)$$

而在热沉的其它表面,热量只能通过与空气热交换进行散热,其边界条件可以写为^[12]:

$$\mathbf{n}[\lambda \cdot \nabla T(\mathbf{r})] = h[T_{\text{HS}} - T(\mathbf{r})], \quad (6)$$

其中, \mathbf{n} 为器件表面的法向量, h 为热沉与空气的换热系数, T_{HS} 为恒温热源的溫度。上述方程可以

表 1 材料主要参数

Table 1 The main parameters of material

Material	$\kappa / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
Chip	45	327	5.32×10^3
In	81.6	233	7.29×10^3
Cu	400	385	8.7×10^3

列阵的出光方式有两种,根据出光方式的不同,焊接方式也有两种。顶发射是利用焊料将列阵的衬底与热沉焊接在一起,这种方式适用于小功率和波长较短衬底吸收强的器件;而底发射是将芯片倒装,使得 p-DBR 与热沉接触,这种方式因为有源区与热沉离的更近,更有利于散热,所以大功率列阵的制作通常采用倒装的方式。但倒装方式也有其局限性,短波长器件的衬底的吸收比较强,如果采用该方式反而会降低器件的输出功率。图 2(a)、(b) 分别为底发射和顶发射列阵有源区在相同条件下的温度分布,图 2(c) 为列阵中间列 5 个单元有源区的温度分布情况。从图中可以看出,顶发射列阵的最高温度达到 370 K 以上,而同样条件下的底发射列阵的最高温度不到 340 K,而且顶发射列阵不同点的温差很大达到 50 K,底发射列阵不同位置的温差仅为 20 K。这说明底发射方式有利于散热,更适合实现大功率输出。以下的模拟计算主要针对底发射列阵。

我们通过改变列阵单元的直径 D 和相邻单元的间距 d (此处的间距并非圆心距,而是单元边缘最近两点的距离) 这两个参数,来寻找列阵温度分布的规律,计算结果列在图 3 中。由图 3 可以明显看出,当 d 一定时,列阵的温度与 D 呈线性关系, d 越小则温度越高,随 d 的变化也越快。 D 对温度的影响要远大于 d 对温度的影响,当 $D > 150 \mu\text{m}$ 时,器件的最高温度均大于 350 K,内部温升很高。由于有源区的材料增益随温度升高

采用有限元的方法进行计算,我们使用的是 Comsol Multiphysics 软件。

3 计算与实验结果

该模型的计算只需要用到 Comsol Multiphysics 中的热传导模块,首先画出器件的几何结构,然后设置每层的材料参数,最后对器件的热源和边界条件进行设置。计算所需的材料参数列在表 1 中,其他数据可以根据实验测得。

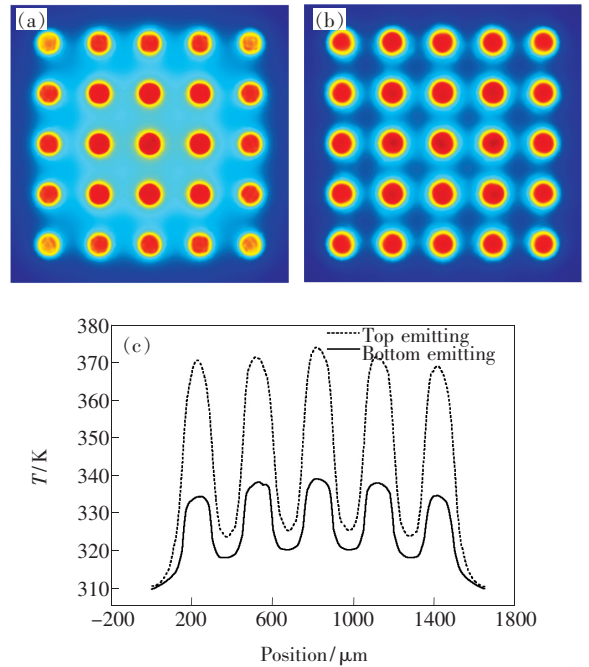


图 2 (a) 底发射列阵的温度分布; (b) 顶发射列阵的温度分布; (c) 两种列阵中间行的温度分布曲线。

Fig. 2 Temperature distribution of (a) bottom-emitting and (b) top-emitting arrays. (c) Temperature distribution of the middle row of the two kinds of arrays.

而降低,且增益峰值波长随温度而红移的速度较快(约 0.3 nm/K),所以温度过高会引起增益峰值波长与腔模严重失谐,导致器件性能变差。在这种情况下,为了降低温升就需要增加间距 d ,这样反而降低了芯片的利用率和功率密度。所以制作列阵时,单元直径不宜选择过大,应小于 $150 \mu\text{m}$,

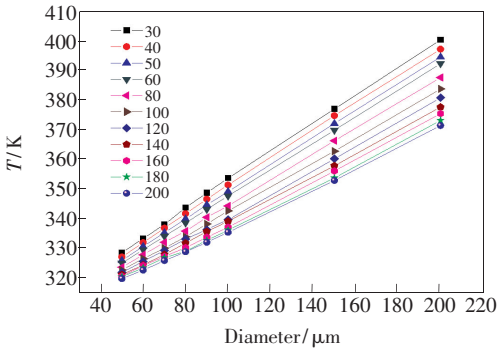


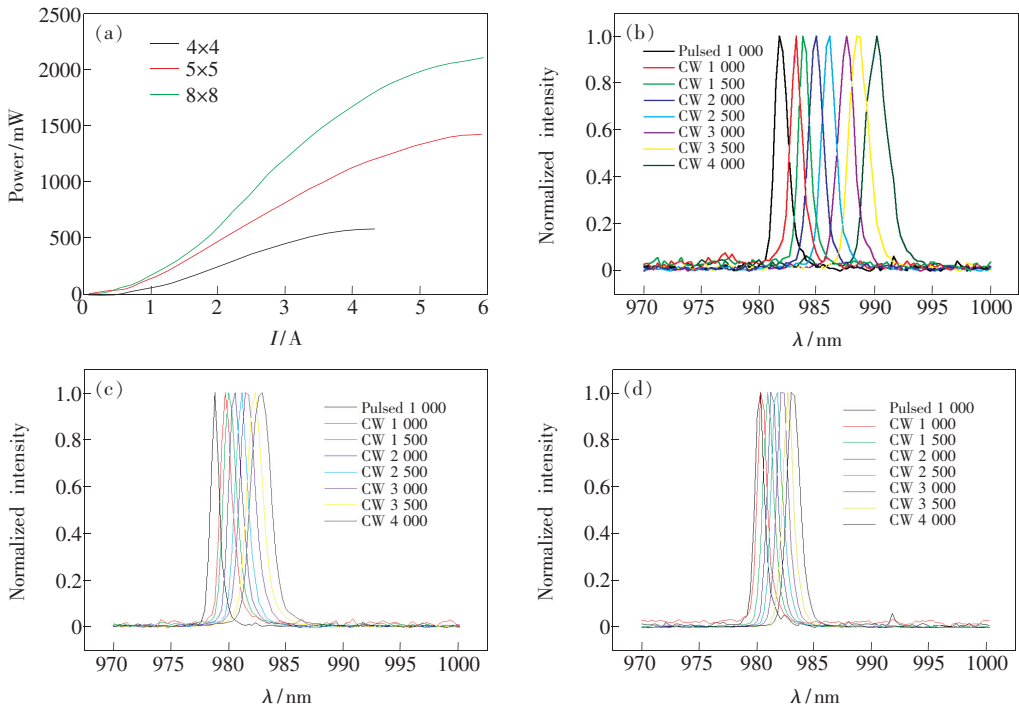
图 3 不同参数下的温度曲线

Fig. 3 The dependence of temperature on the cell diameter for different pitch

最佳值在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间。

我们对三种不同的列阵进行了测试并对实验结果进行对比。 4×4 列阵的单元直径为 $200 \mu\text{m}$, 间距为 $30 \mu\text{m}$; 5×5 列阵的单元直径为 $140 \mu\text{m}$, 间距为 $80 \mu\text{m}$; 8×8 列阵的单元直径为 $70 \mu\text{m}$, 间距为 $30 \mu\text{m}$ 。其中 4×4 列阵的发光面积最大, 8×8 列阵的发光面积最小。图 4(a) 为三种列阵的输出功率曲线, 4×4 列阵在注入电流为 4.4 A 时输出功率开始饱和, 达到最大值 580 mW ; 而另外两种列阵在 6 A 时才达到饱和, 5×5

和 8×8 的输出功率分别达到了 1440 mW 和 2100 mW 。三种列阵对应的功率密度分别为 $115, 374, 853 \text{ W/cm}^2$ 。同样的间距, 单元直径为 $70 \mu\text{m}$ 的 8×8 列阵的功率密度是直径 $200 \mu\text{m}$ 的 4×4 列阵的 7 倍。从以上数据可以推断, 列阵的热串扰导致的温升对器件功率产生了很大的影响。为了证实这一推论, 我们对三种列阵在不同电流下的光谱进行了测试, 通过波长随温度的漂移推算有源区的温度。图 4(b)、(c)、(d) 分别为 4×4 、 5×5 、 8×8 列阵在不同电流下的归一化光谱。列阵在脉冲电流下工作时, 热的影响很小, 激光波长基本不变, 室温下 (300 K) 没有温升的波长。VCSEL 的波长随温度漂移速率的典型值为 $0.07 \text{ }^\circ\text{C/nm}$, 根据波长的漂移就可以推测器件的内部温升。从图中可以明显看出, 4×4 列阵的波长随着电流的增加漂移很快, 到 4 A 时, 波长漂移量为 8.44 nm , 对应温升为 $120 \text{ }^\circ\text{C}$; 5×5 列阵和 8×8 列阵的波长漂移量分别为 4.09 nm 和 2.63 nm , 对应温升分别为 $58 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 。三种列阵对应的绝对温度分别为 $420, 358, 338 \text{ K}$, 与模拟计算的 $400, 362, 338 \text{ K}$ 的结果比较符合, 很好地验证了理论模型的正确性。

图 4 (a) 三种不同列阵的输出功率曲线; (b) 4×4 列阵在不同电流下的光谱; (c) 5×5 列阵在不同电流下的光谱; (d) 8×8 列阵在不同电流下的光谱。Fig. 4 (a) The dependence of the output power on current for different arrays. The dependence of spectrum on current for different arrays: (b) 4×4 , (c) 5×5 , (d) 8×8 .

4 结 论

建立了垂直腔面发射激光器阵列的热传导模型, 利用 Comsol Multiphysics 软件对模型进行了模拟计算。计算结果显示, 顶发射阵列的最高温度达到 370 K 以上, 而同样条件下的底发射阵列的最高温度仅仅不到 340 K, 说明底发射方式更适合用于大功率阵列的制作。通过改变底发射阵列中的单元直径和间距, 得出了阵列温升的趋势。为了降低温升并增加功率密度, 单元直径应小于

150 μm , 最佳值为 50 ~ 100 μm 。实验制作了 4×4 、 5×5 和 8×8 阵列并进行了测试, 单元直径分别为 200, 140, 70 μm , 功率分别为 580, 1 440, 2 100 mW, 对应功率密度分别为 115, 374, 853 W/cm^2 。对于同样的间距, 单元直径为 70 μm 的 8×8 阵列的功率密度是直径 200 μm 的 4×4 阵列的 7 倍, 很好地验证了理论模型的正确性。通过光谱的波长漂移计算出 4 A 时的温升分别为 120, 58, 38 $^\circ\text{C}$, 说明采用小孔径单元制作的阵列可以有效降低阵列单元间的热串扰, 获得高功率输出。

参 考 文 献:

- [1] Wang Z F, Ning Y Q, Li T, *et al.* High-power large-aperture bottom-emitting 980-nm VCSELs with integrated GaAs microlens [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(4):239-241.
- [2] Zhang L S, Ning Y Q, Zeng Y G, *et al.* High-power bottom-emitting vertical-cavity surface-emitting lasers under continuous-wave, quasi-continuous-wave, and pulsed operation [J]. *Appl. Phys. Exp.*, 2011, 4:052102-1-3.
- [3] Zhang Y, Ning Y Q, Qin L, *et al.* Design and fabrication of vertical-cavity surface-emitting laser with small divergence [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(1):47-52 (in Chinese).
- [4] Ma Q, Tian Z H, Wang Z F, *et al.* A theoretical model of high power VCSEL based on the thermal-offset-current [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, 30(4):463-466 (in Chinese).
- [5] Li T, Ning Y Q, Sun Y F, *et al.* High-power InGaAs VCSEL's single devices and 2-D arrays [J]. *J. Lumin.*, 2007, 122(123):571-573.
- [6] D'Asro L A, Jean F S, James D W. High-power, high-efficiency VCSELs pursue the goal [J]. *Photonics Spectra*, 2005, 39(2):64-66.
- [7] Michael M, Martin G, Roger K, *et al.* Improved output performance of high-power VCSELs [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, 7(2):210-216.
- [8] Jean F S, Chuni L G, Viktor K, *et al.* High-power vertical-cavity surface-emitting arrays [J]. *SPIE*, 2008, 6876:68760D-1-9.
- [9] Hou L F, Feng Y, Yang Y Z, *et al.* The wet etching process of high-power VCSEL [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(6):598-602 (in Chinese).
- [10] Zhang Y, Ning Y Q, Wang Y, *et al.* High power nonuniform linear vertical-cavity surface-emitting laser array with a Gaussian far-field distribution [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(13):2719-2723.
- [11] Wang Z F, Ning Y Q, Zhang Y, *et al.* High power and good beam quality of two-dimensional VCSEL array with integrated GaAs microlens array [J]. *Opt. Exp.*, 2010, 18(23):23900-23905.
- [12] Holger M, Raimond D, Stephan G, *et al.* Design of high power VCSEL arrays [J]. *SPIE*, 2012, 8276(82760B):1-8.
- [13] Shi J J, Qin L, Ning Y Q, *et al.* Coherent measurement and analysis of vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(8):834-838 (in Chinese).