

连续百瓦级高功率半导体阵列激光器热效应分析

刘媛媛 王 俊 李 伟 罗 鸿 李秀芳 周秀宁 刘素平 马晓宇

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要 理论分析了不同填充因子、不同腔长的阵列器件在同样的连续输出功率下的热分布情况, 讨论了金刚石热沉对阵列器件散热的影响以及比较了双面散热与单面散热时阵列器件的热分布效果。在理论分析的基础上, 采用宽波导结构, 2 mm 腔长, 80% 填充因子阵列结构, 实现了 176 W 的连续输出。

关键词 连续波激光器; 高功率; 热效应; 阵列结构

中图分类号 TN248.4

OCIS 140.2010 140.3510

文献标识码 A

Thermal Analysis of High Power Diode Laser Arrays with Hundred-Watt Continuous-Wave Output Power

Liu Yuanyuan Wang Jun Li Wei Luo Hong Li Xiufang
Zhou Xiuning Liu Suping Ma Xiaoyu

(Institution of Semiconductor, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract Temperature distribution of diode arrays in different fill factors and cavity lengths operating at the same continuous-wave output power is simulated. And the influence of diamond sink and both sides cooling on the thermal distribution of arrays are discussed. On the base of the theoretic analysis, using large waveguiding structure, 2 mm cavity length and high fill factor of 80%, continuous-wave output power of 176 W is achieved.

Key words continuous-wave lasers; high power; thermal effect; array structure

1 引言

高功率半导体阵列激光器具有功率高、体积小、效率高、光谱易调和寿命长等优点, 在抽运固体激光器和光纤激光器系统中有广泛的应用, 无论在军事上还是民用领域有明确的需求^[1,2]。其中实现连续高功率密度输出是其中的一个重要研究方向之一。普遍认为限制半导体激光器功率输出进一步提高的因素主要有两点: 光学腔面灾变效应(COD)和热效应。光学腔面灾变是由芯片解理后在腔面存在的悬挂键、表面态和空气中的氧、碳等原子玷污在高温、高热情况下发生化学反应引起的, 是一种功率不可逆现象; 热效应是由于芯片工作过程中散热不好, 导致芯片温度升高, 内损耗增加, 效率降低, 功率下降, 是一种可逆过程。实验研究表明, 阵列激光器在千瓦级连续输出时也没有出现 COD 现象^[3,4], 热效应是目前器件功率受限的主要因素。

Puchert 等^[5]采用有限元方法计算了两种不同热沉形式封装情况下器件的瞬态热分布情况; Gourevitch^[6]分析了准连续工作状态, 不同的占空比下器件的瞬态热分布; 辛国锋等^[7]利用 Ansys 软件对“三明治”封装结构进行了热分析计算; 尧舜等^[8]用 Ansys 软件模拟了在低工作电流(20 A, 30 A)下, 半导体激光器阵列的三维稳态温度分布, 并对自行研制阵列的温度变化进行了测试。本文采用有限元方法主要针对半导体激光器阵列结构对器件热分布的影响进行了理论分析, 阵列结构主要包括腔长、填充因子两个因素; 此外对散热结构对器件热分布的影响也进行了计算。

2 理论模型

对于各向同性物质的导热问题均可通过对导热微分方程

收稿日期: 2010-04-18; 收到修改稿日期: 2010-05-15

作者简介: 刘媛媛(1976—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事大功率二极管激光器及其抽运器件研制方面的研究。

E-mail: liuyy@semi.ac.cn

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{\Phi}{\rho c} \quad (1)$$

进行求解得到。式中 Φ 为单位体积内热源的生成热, ρ 为材料密度, c 为材料的比热。对于连续工作的高功率半导体阵列激光器来说, 热分布将会趋于稳定, 所以只需求解稳态导热微分方程^[3,4], 令(1)式的左边为零。

用于模拟的高功率半导体阵列激光器的理论模型^[9,10]如图1所示。采用的是标准热沉封装形式, 热沉尺寸为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$, 边界条件为三面绝热, 底面为第一类边界条件, 即恒定表面温度 ($T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$); 阵列结构示意图如图2所示, 在工作过程中电流流过器件时, 在电流注入的 pn 结区载流子复合产生激光, 同时产生多余的热, 且认为阵列器件中的热源也主要集中在发光区部分, 假设耗散的热功率 Q 定为 200 W , 则热流密度为 $Q/(ndL)$ 。其中 n 为发光区数, d 为发光区宽度, L 为阵列器件腔长, 不考虑填充因子因素, 平均热流密度可表示为 $Q/(DL)$, D 为整个器件的宽度。计算中紫铜热沉的热导率取为 $400 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, GaAs 材料的热导率为 $45 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

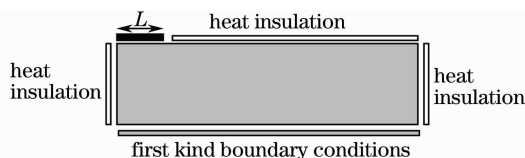


图1 热效应分析示意图

Fig. 1 Structure of thermal analysis

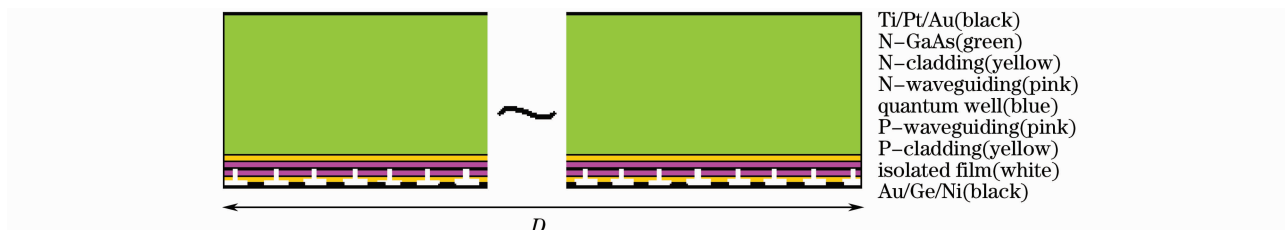


图2 阵列器件结构示意图

Fig. 2 Sketch map of diode laser arrays

3 计算结果

利用有限元分析方法对理论模型进行了热分布的模拟。在不考虑填充因子的情况下, 对不同腔长的阵列器件热分布进行了模拟计算, 结果如图3(a)所示。当腔长分别为 $1, 1.5, 2 \text{ mm}$ 时, 阵列中央区的温度最高, 分别为 $181.2 \text{ }^\circ\text{C}, 161.8 \text{ }^\circ\text{C}, 143.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 阵列中心与边缘处的温度差分别为 $69 \text{ }^\circ\text{C}, 60 \text{ }^\circ\text{C}, 52 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随着腔长的增加, 器件的最高温度线性降低, 温度分布趋于平缓。图3(b)所示为在标准热沉和阵列器件之间加入一层金刚石热沉(厚度为 0.3 mm)的模拟结果, 金刚石热沉的导热率非常高, 接近 $1100 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{ }^\circ\text{C})$, 图中表明金刚石热沉可以快速地将热从半导体材料中扩散开来, 传导到铜热沉, 所以有金刚石热沉时阵列条的中心温度比没有金刚石热沉时降低了 $8 \text{ }^\circ\text{C}$, 中心与边缘区的温度差为 $31 \text{ }^\circ\text{C}$, 即阵列条边缘区的温度升高了, 整个阵列器件上的温度分布趋于平缓, 这一点有利于减少由于热膨胀系数不同而产生的应力和减少器件整体的光谱宽度。图3(c)所示为采用双面散热方式即阵列器件两面均采用标准热沉进行散热, 边界条件相同时的模拟结果。可以看到阵列中心区温度大幅度降低, 从原来的 $143.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 降低到约 $96 \text{ }^\circ\text{C}$, 降低了 33% , 边缘区和中心区的温度差也降低到了约 $28 \text{ }^\circ\text{C}$ 。可见双面散热结构对于改善阵列器件的散热效果有重要的作用。不同填充因子的器件的热分布如图3(d)所示。温度波动稍大的是 30% 填充因子的器件热分布, 发光区为 $150 \text{ } \mu\text{m}$, 周期为 $500 \text{ } \mu\text{m}$; 温度波动小的是 50% 填充因子器件热分布, 发光区为 $100 \text{ } \mu\text{m}$, 周期为 $200 \text{ } \mu\text{m}$ 。从阵列中心区和边缘区温度来看, 两种情况下的热分布图差别并不大, 所以可以认为填充因子对器件热分布来说影响并不大, 而且填充因子增加, 温度波动还趋于缓和。此外从功率输出的角度考虑, 填充因子越大, 每个发光区的光功率密度会降低, 有利于获得高功率输出。

因此, 从计算结果可以看出: 增加腔长, 双面散热均有助于改善器件热特性, 金刚石热沉, 增加填充因子将有助于使器件的温度分布均匀化。

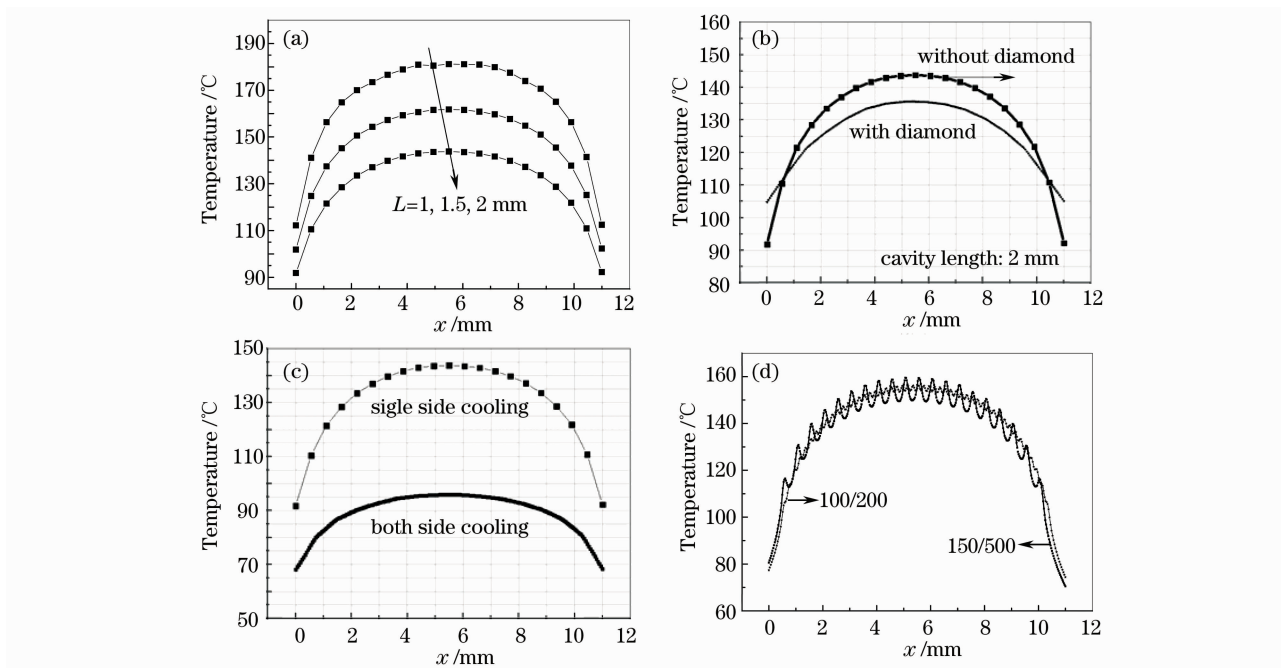


图3 不同条件下阵列器件的温度分布。(a)不同腔长;(b)有、无金刚石过渡;(c)单、双面散热情况;(d)不同占孔比
Fig. 3 Temperature distributions of diode arrays under different conditions. (a) with different cavity length; (b) with and without diamond sink; (c) single side cooling and both sides cooling; (d) with different fill factors

4 实验结果

在理论计算基础上,采用宽波导结构、2 mm腔长、80%填充因子的阵列结构,封装方式采用p面标准通水热沉软焊料烧结,n面钢箔接触标准通水热沉散热,实现了176 W的连续功率输出。图4(a)所示为光谱的漂移情况,图4(b)为输出功率和电压与电流的关系曲线图。从图4(a)中可以看出,光谱中心波长从30 W到176 W漂移近21.4 nm,相当于阵列条温度升高了约70 °C,热沉温度若为25 °C,则阵列条温度至少大于95 °C。由图4(b)可知,当工作电流为200 A时,电光转换效率为47.1%,总热阻大约为0.45 K/W,而且随着输出功率的增加,光谱中心波长漂移的速度加快,说明阵列的散热还不理想,从功率曲线上也可以看出,输出功率在连续170 W时出现热饱和。

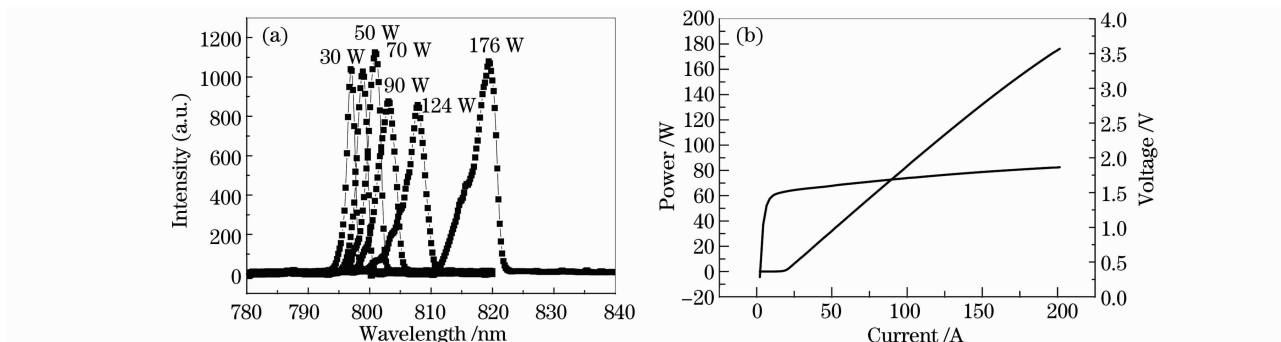


图4 实验结果。(a)光谱漂移曲线;(b)光功率和电压与工作电流曲线
Fig. 4 Result of test. (a) spectral shifts at different output powers; (b) power and voltage curves varying with current operating at 25 °C

5 结论

采用有限元方法对不同阵列结构(腔长、填充因子)和不同散热形式(单面、双面标准热沉散热、金刚石过渡)进行了模拟计算分析。采用宽波导结构和2 mm腔长,80%填充因子,标准通水热沉双面散热实现了连

续 176 W 的功率输出。实验结果反映出了阵列器件的散热问题仍然是功率进一步提升的制约因素,是今后的研究工作中的关键问题。此外,理论计算模拟显示,用 0.3 mm 厚度的金刚石作为过渡热沉可以使阵列器件中心温度降低大约 10 °C,但同样的封装形式下实验结果并没有优势。分析原因有两点:其一是金刚石硬度较大,与 GaAs 芯片的热膨胀系数不同带来的应力较大;其二是导热很好的金刚石本身是绝缘材料,尽管作了表面金属化,但是在工作电流较大的情况下也会有热产生,使散热效果变差。

参 考 文 献

- 1 H. G. Treusch, A. Ovtchinnikov, X. He *et al.*. High-brightness semiconductor laser sources for materials processing: Stacking, beam shaping, and bars[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 601~614
- 2 J. G. Endriz, M. Vakili, G. S. Browder *et al.*. High power diode laser arrays[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 952~965
- 3 N. Lichtenstein, Y. Manz, P. Mauron *et al.*. 325 Watt from 1 cm wide 9xx laser bars for DPSSL-and FL-applications[C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 1~11
- 4 H. X. Li, I. Chyr, X. Jin *et al.*. >700W continuous-wave output power from single laser diode bar[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(1): 4th January
- 5 R. Puchert, A. Bär wolff, M. Voß *et al.*. Transient thermal behavior of high power diode laser arrays[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2000, **23**(1): 95~100
- 6 A. Gourevitch, B. Laikhtman, D. Westerfeld *et al.*. Transient thermal analysis of InGaAsP-InP high-power diode laser arrays with different fill factors[J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**(8): 084503
- 7 Xin Guofeng, Hua Jizhen, Chen Guoyin *et al.*. 941 nm CW high output power semiconductor laser diode arrays[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2004, **10**(2): 269~272
辛国锋, 花吉珍, 陈国鹰 等. 941 nm 连续波高功率半导体激光器线阵列[J]. *功能材料与器件学报*, 2004, **10**(2): 269~272
- 8 Yao Shun, Ding Peng, Zhang Liang *et al.*. Numerical optimization of heat dissipation of high power diode laser module[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2008, **29**(1): 49~51
尧 舜, 丁 鹏, 张 亮 等. 大功率半导体激光器模块散热结构的数值优化[J]. *半导体光电*, 2008, **29**(1): 49~51
- 9 Friedrich Bachmann, Peter Loosen, Reinhart Poprawe, High Power Diode Lasers Technology and Applications[M]. Berlin Springer Science Business Media, 2007. 87~92
- 10 M. N. Özisik, Heat Conduction[M]. Yu Changmin Transl, Beijing: High Education Press, 1983. 506~521
M. N. 奥齐西克, 热传导[M]. 俞昌铭主译, 北京: 高等教育出版社, 1983. 506~521