

文章编号: 0258-7025(2010)02-0379-06

大功率无铝量子阱半导体激光阵列特性

胡黎明^{1,2} 李再金^{1,2} 秦 莉¹ 杨 晔^{1,2} 王 焯^{1,2} 刘 云¹ 王冰冰³ 王立军¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激发态开放实验室, 吉林 长春 130033;
² 中国科学院研究生院, 北京 100049; ³ 清华大学工程物理系, 北京 100084)

摘要 针对微通道热沉封装的大功率无铝量子阱半导体激光阵列(LDA)建立三维有限元模型,模拟分析了热沉温度、工作电流以及占空比等工作条件对有源区温度的影响,并通过实验手段研究了不同工作条件下,大功率半导体激光阵列的输出特性的变化情况。结果表明,热沉温度越高、占空比越大时,器件达到稳态所需时间越长,有源区温度越高,中心波长红移越大;阈值电流越大,转换效率、斜率效率越低,输出功率越小。外推了半导体激光阵列在 20 °C 热沉温度,20% 高占空比,300 A 高注入电流条件下工作的输出特性,得到输出功率超过 300 W,转换效率达 45%,且没有出现热饱和现象。

关键词 激光器;半导体激光阵列;温度;占空比;有限元法;大功率

中图分类号 TN248.4 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103702.0379

Characteristics of High Power Al-Free Quantum-Well Laser Diode Array

Hu Liming^{1,2} Li Zaijin^{1,2} Qin Li¹ Yang Ye^{1,2} Wang Ye^{1,2} Liu Yun¹

Wang Bingbing³ Wang Lijun¹

¹ Key Laboratory of Excited State Processes, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract A three dimensional finite element thermal-model is presented for a micro-channel packaged high-power Al-free quantum-well laser diode array(LDA). The influence of working conditions, such as ambient temperature, operating current and duty cycle, on the temperature of the active region is simulated in this paper. And the variety of the output characteristics of LDA working under different conditions is studied experimentally. It is found that longer time to reach steady-state, higher temperature of the active region, greater red shift of peak wavelength and threshold current, lower conversion efficiency and slope efficiency and lower output power are gained when the laser diode array works at higher ambient temperature and duty cycle. The output characteristics of the laser diode array is extrapolated when it works under the conditions of 20 °C ambient temperature, 20% duty-cycle and 300 A injecting current. The results show that the output power exceeds 300 W and the conversion efficiency achieves 45% and no thermal rollover appears.

Key words lasers; laser diode array; temperature; duty-cycle; finite element method; high power

1 引 言

半导体激光器作为一种高效的电光转换器件以

其体积小、效率高、寿命长等优势在工业、医学以及军事领域得到了广泛的应用^[1~3]。近些年,随着材

收稿日期: 2009-03-04; 收到修改稿日期: 2009-03-30

基金项目: 国防基础科研(A1320070032)、装备预先研究项目(61501060108)和吉林省科技厅发展计划项目(20075001)资助课题。

作者简介: 胡黎明(1984—),男,博士研究生,主要从事大功率半导体激光器方面的研究。E-mail: henryhulm2003@163.com

导师简介: 王立军(1946—),男,研究员,博士生导师,主要从事大功率半导体激光技术方面的研究。

E-mail: wanglj@ciomp.ac.cn

料生长、封装散热等技术的不断发展,半导体激光器的输出功率、电光转换效率、寿命以及光束质量等性能都有很大的提高。半导体激光器性能是各种因素综合影响的结果。Juan Jiménez^[4]提出材料生长、芯片制作过程中引入的缺陷会引起器件的缓慢退化,且退化会因工作时的电流、热、应力等因素而增强;A. R. Dhamdhere等^[5]认为封装过程中引入的剩余应力和缺陷是限制半导体激光器寿命提高的关键因素。本文主要研究不同工作条件对大功率半导体激光阵列(LDA)输出特性的影响。利用有限元方法模拟了有源区温度随工作条件的变化;通过实验测试比较分析了工作条件对输出特性的影响;结合实验结果外推半导体激光阵列在更高注入电流下工作的输出功率和转换效率。

2 理论计算与实验结果分析

2.1 理论基础

半导体激光器在 10 °C~50 °C 温度范围内工作时的阈值电流和外微分子效率随温度呈指数关系变化^[6]

$$I_{\text{tha}2} = I_{\text{tha}1} \exp\left(\frac{T_{\text{a}2} - T_{\text{a}1}}{T_0}\right), \quad (1)$$

$$\eta_{\text{da}2} = \eta_{\text{da}1} \exp\left(\frac{T_{\text{a}1} - T_{\text{a}2}}{T_1}\right), \quad (2)$$

式中 $I_{\text{tha}1}$, $I_{\text{tha}2}$, $\eta_{\text{da}1}$, $\eta_{\text{da}2}$ 分别为 $T_{\text{a}1}$, $T_{\text{a}2}$ 温度下的阈值电流和外微分子效率, T_0 , T_1 分别为阈值电流和外微分子效率的特征温度。考虑温度影响后输出光功率可以表示为

$$P_{\text{out}} = V_d \eta_{\text{d}}(T_r) \exp\left(\frac{-\Delta T}{T_1}\right) \left[I - I_{\text{th}}(T_r) \exp\left(\frac{\Delta T}{T_0}\right) \right], \quad (3)$$

电光转换效率 η_c 为

$$\eta_c = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} =$$

$$\frac{V_d \eta_{\text{d}}(T_r) \exp(-\Delta T/T_1) [I - I_{\text{th}}(T_r) \exp(\Delta T/T_0)]}{I(V_d + IR_s)}, \quad (4)$$

式中 V_d 为起始电压, I 为工作电流, P_{in} 为注入激光器的电功率, R_s 为串联电阻, $I_{\text{th}}(T_r)$, $\eta_{\text{d}}(T_r)$ 分别为器件在 T_r 热沉温度下工作时的阈值电流和外微分子效率, ΔT 为有源区温升, 可以表示为^[7]

$$\Delta T = T_{\text{act}} - T_r = R_{\text{th}} P_{\text{thermal}} = R_{\text{th}} P_{\text{in}} (1 - \eta_c) \frac{\tau}{\Sigma}, \quad (5)$$

式中 T_{act} 为有源区温度, R_{th} 为热阻, P_{thermal} 为平均热

耗散功率, τ 为脉冲宽度, Σ 为脉冲周期。由(1)~(5)式可以看出,影响 LDA 输出特性的主要因素是有源区温升 ΔT , 而它又与工作电流、热沉温度、占空比等因素有关。因此,以下主要针对占空比等因素对 LDA 输出特性的影响进行分析。

大功率半导体激光阵列工作时热流传递服从热传导方程,瞬态时微分传导方程为

$$cg \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(t), \quad (6)$$

式中 T 为温度, t 为时间, c 为材料热容, g 为材料密度, κ 为材料热传导系数, $Q(t)$ 为热功率密度。稳态时温度不随时间变化, 即有

$$\kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(t) = 0. \quad (7)$$

半导体激光阵列内部热源主要有^[8~10]:有源区内载流子的非辐射复合、辐射吸收以及自发辐射吸收产生热流密度

$$Q_{\text{act}} = (V_j/d_a) \{ j_{\text{th}}(1 - \eta_{\text{sp}}f) + (j - j_{\text{th}}) [1 - \eta_{\text{ex}} - (1 - \eta_i)f\eta_{\text{sp}}] \}, \quad (8)$$

盖层以及衬底对有源区自发辐射逃逸光子的吸收产生热流密度

$$Q_{\text{cap}} = Q_{\text{sub}} = \frac{V_j j_{\text{th}} \eta_{\text{sp}} f}{2d_i}, \quad (9)$$

除有源区外各层材料产生的焦耳热流密度

$$Q_{\text{jou}} = j^2 \rho_i, \quad (10)$$

欧姆接触电阻产生的热流密度

$$Q_c = \frac{j^2 \rho_c}{d_c}, \quad (11)$$

式中 V_j , j , j_{th} 分别为结电压、注入电流密度、阈值电流密度, d_a , d_c 分别为有源层、欧姆接触层厚度, d_i 为有源层外第 i 层的厚度, ρ_i , ρ_c 为第 i 层的电阻率和欧姆接触电阻, η_{sp} , η_i , η_{ex} 为自发辐射量子效率、内微分子效率和外微分子效率, f 为光子穿透限制层到达衬底和盖层的逃逸系数^[9,11]

$$f = 1 - [1 - (n_c/n_a)^2]^{1/2}, \quad (12)$$

式中 n_c 和 n_a 分别为限制层和有源层的有效折射率。

本文分析的是 GaAsP/InGaP/AlGaInP 材料系半导体激光阵列,结构示意图如图 1 所示。阵列宽 W_x 为 1 cm, 发光单元周期为 500 μm , 发光单元台面条宽为 150 μm , 腔长 L_y 为 1 mm, 管芯厚度 H_z 为 120 μm , 隔离沟道腐蚀到有源区, SiO_2 绝缘层厚度为 0.15 μm , P 面向下烧结在微通道热沉上, In 焊料厚度为 10 μm , P 面电极厚度为 0.5 μm , N 面电极厚度为 1 μm 。

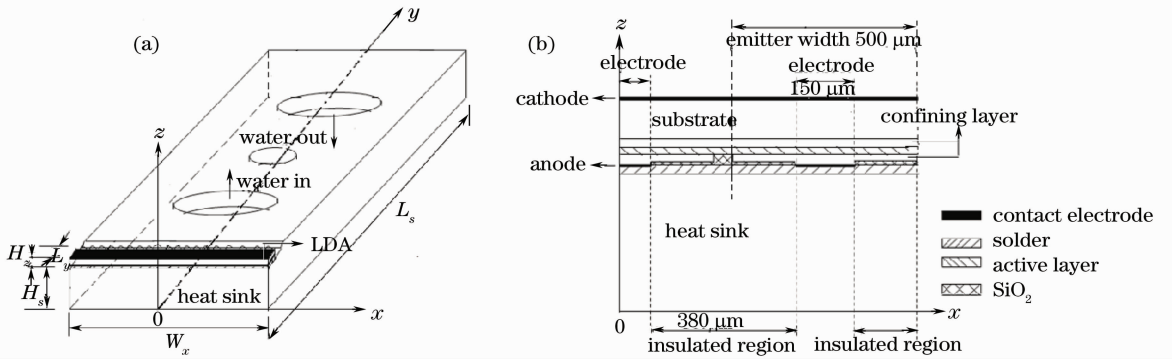


图 1 半导体激光阵列示意图。(a)LDA 三维示意图；(b)LDA 相邻发光单元截面图

Fig. 1 Scheme of the laser diode array. (a) three-dimensional scheme of LDA; (b) scheme of cross sectional view of the adjacent emitters of LDA

模拟时所作假设和边界条件：

1) 把全部热源集中到有源区^[9,12]，假设热源均匀分布在电极区内，绝缘区无热源分布，且各发光单元热源一致；

2) 忽略管芯与周围空气的热对流和热辐射作用

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{|x|=W_x/2} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0, L_y} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H_s+H_z} = 0, \quad (13)$$

3) 忽略热沉表面自然对流热交换，假设微通道中水流可以把热量全部带走，热沉底部温度恒定为 T_r

$$T \Big|_{z=0} = T_r, \quad (14)$$

4) 各层材料之间满足温度和热流连续分布

$$T_i = T_{i+1}, k_i \frac{\partial T_i}{\partial z} \Big|_{z=z_i} = k_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial z} \Big|_{z=z_{i+1}}, \quad (15)$$

5) 初始温度为热沉温度

$$T \Big|_{t=0} = T_r. \quad (16)$$

2.2 理论模拟分析

利用 ANSYS 软件模拟了 LDA 在不同条件下工作时热沉温度随时间的变化情况：1) 热沉温度为 20°C ，工作电流为 180 A ，占空比不同 ($200\ \mu\text{s}$, 1000 Hz ; $100\ \mu\text{s}$, 1000 Hz ; $100\ \mu\text{s}$, 500 Hz)；2) 占

空比为 20% ($200\ \mu\text{s}$, 1000 Hz)、工作电流为 180 A ，热沉温度不同；3) 热沉温度为 20°C ，占空比为 20% ($200\ \mu\text{s}$, 1000 Hz)、注入电流不同。模拟时假设器件热阻恒定不变，结果如图 2 所示。

从图 2 看出，脉冲工作时有源区温度变化大致分为 3 个阶段：加电流后的前几十微秒内，有源区温度缓慢上升；几十微秒到几十毫秒内相邻热源叠加，热积累效应促使温度快速上升；几十毫秒以后温度趋于恒定，进入热稳态。图 2(a) 给出热沉温度为 20°C ，工作电流为 180 A ，占空比分别为 5% ， 10% ， 20% 时，阵列器件分别经过 10, 18, 25 个周期后进入稳态，稳态温度分别为 296.101 K ， 299.124 K ， 304.828 K 。这是因为热沉温度和注入电流一定时，随着占空比的增加，LDA 工作产生的废热增加，热积累与弛豫过程的交替频率增大，而微通道热沉的传热速率是一定的，跟不上有源区热量的变化速率，从而导致有源区温度的上升速度增大，进入热稳态时间增加以及稳态温度的升高。由图 2(b) 可知，相同电流大小、相同占空比条件下工作时随着热沉温度的上升，热稳态时有源区的温度相应上升，但有

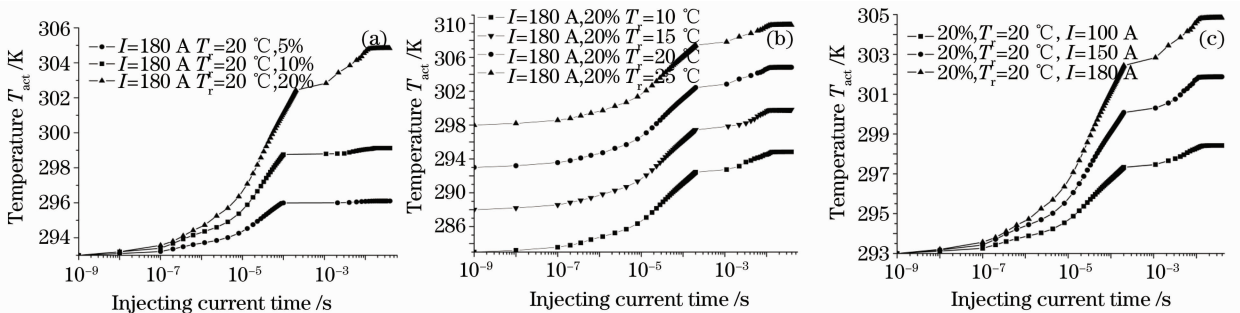


图 2 不同工作条件下有源区温度随时间的变化关系。(a)不同占空比；(b)不同热沉水温度；(c)不同工作电流

Fig. 2 Temperature of active region versus injecting current time under different working conditions.

(a) different duty-cycles; (b) different ambient temperatures; (c) different injecting currents

源区温升随时间的变化关系相同。图 2(c) 给出相同热沉温度、相同占空比条件下,随着工作电流的增大,废热增加,导致有源区温升速度的增大和稳态温度的升高,但进入稳态所需的时间不变。

2.3 实验结果分析

利用大功率半导体激光器综合参数测试仪测试阵列在 0.4% (100 μ s, 40 Hz) 低占空比下工作时的光谱特性,其中工作电流为 50 A,热沉温度分别为 10 $^{\circ}$ C, 15 $^{\circ}$ C, 20 $^{\circ}$ C, 25 $^{\circ}$ C,得到中心波长分别为 798.2, 799.6, 800.8, 802 nm,由此得出中心波长随温度的变化系数约为 0.25 nm/ $^{\circ}$ C。

测试 LDA 在热沉温度为 20 $^{\circ}$ C, 占空比为 20%, 不同电流下工作时的输出波长、功率和转换效率,得到各电流下工作时有源区温升和相应的平均热耗散功率,结合(5)式可以计算出热阻。图 3 中实验拟合曲线可以看出 LDA 的稳态热阻为 0.328 K/W,与模拟得到的 0.32 K/W 很接近,从而证实了模拟的

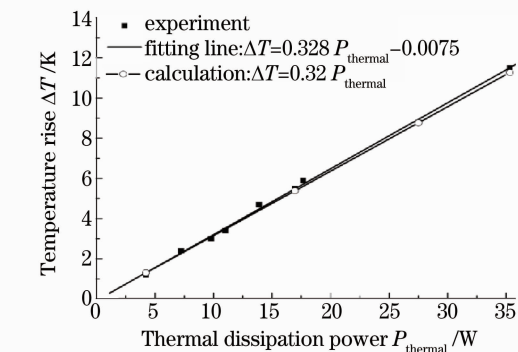
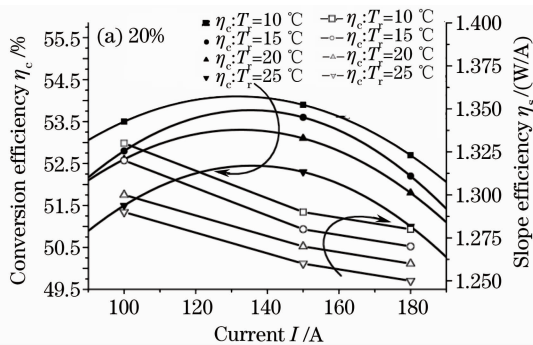


图 3 有源区温升跟热功率的关系

Fig. 3 Temperature rise of active region versus dissipation power

2.3.1 工作条件对转换效率、斜率效率的影响

分析了不同工作条件下 LDA 的转换效率 η_c 和斜率效率 η_s 的变化情况,结果如图 4 所示。

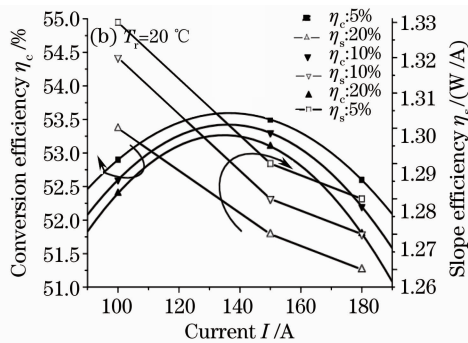


图 4 转换效率、斜率效率随工作条件的变化关系。(a) 20% 占空比和不同热沉温度, (b) 20 $^{\circ}$ C 热沉温度和不同占空比

Fig. 4 Variety of conversion efficiency and slope efficiency versus working conditions. (a) 20% of duty-cycle and different ambient temperatures; (b) 20 $^{\circ}$ C ambient temperature and different duty-cycles

从图 4 可看出,不同工作条件下 LDA 的电光转换效率保持在 51% 至 54% 之间,且随着电流的增大, η_c 先增大到最大值后减小;介于阈值电流较大的缘故,斜率效率一直保持在 1.25~1.33 W/A 之间,且随电流的增大而减小。由图 4(a) 可知,占空比固定为 20% 时,随着热沉温度的升高, LDA 的内部损耗增大,量子效率降低,导致电光转换效率和斜率效率的下降。例如工作电流为 150 A 时,转换效率从 10 $^{\circ}$ C 时的 53.9% 降低到 25 $^{\circ}$ C 时的 52.3%,斜率效率从 10 $^{\circ}$ C 时的 1.29 W/A 降低到 25 $^{\circ}$ C 时的 1.26 W/A。从图 4(b) 可以看出,当热沉温度为 20 $^{\circ}$ C,工作电流为 150 A 时,电光转换效率和斜率效率随着占空比的增加而下降,分别从 5% 时的 53.5% 和 1.29 W/A 降低到 20% 时的 53.1% 和 1.27 W/A。

2.3.2 工作条件对中心波长的影响

图 5(a) 占空比 20%, 电流分别为 100, 150, 180 A 时,中心波长随热沉温度的变化关系。随着热沉温度的升高, LDA 有源区温度升高,中心波长向长波漂移。例如电流为 180 A 时,中心波长从 10 $^{\circ}$ C 的 800.8 nm 增大到 25 $^{\circ}$ C 的 805 nm,相应源区的温度从 10 $^{\circ}$ C 的 293.4 K 上升到 25 $^{\circ}$ C 的 310 K,与图 2(b) 中的模拟结果基本符合。图 5(b) 给出热沉温度固定为 20 $^{\circ}$ C 时,随着占空比的增加,中心波长红移,且电流越大红移越厉害。

2.3.3 工作条件对输出光功率的影响

鉴于实验室所用大功率半导体激光电源的限制,能提供的最大工作电流为 180 A,占空比最大 20%,测试得到输出功率随工作条件的变化情况如图 6 所示。

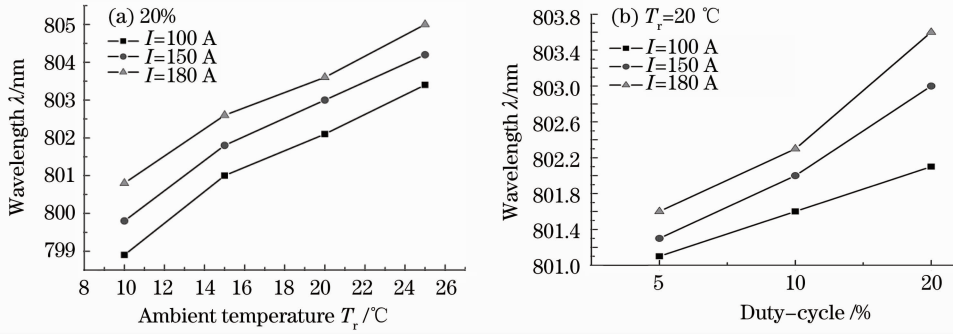


图 5 中心波长随工作条件的变化关系。(a) 相同占空比下,中心波长随热沉温度的变化;
(b) 相同热沉温度下,中心波长随占空比的变化

Fig. 5 Variety of peak wavelength versus working conditions. (a) peak wavelength versus ambient temperature at the same duty-cycle; (b) peak wavelength versus duty-cycle at the same ambient temperature

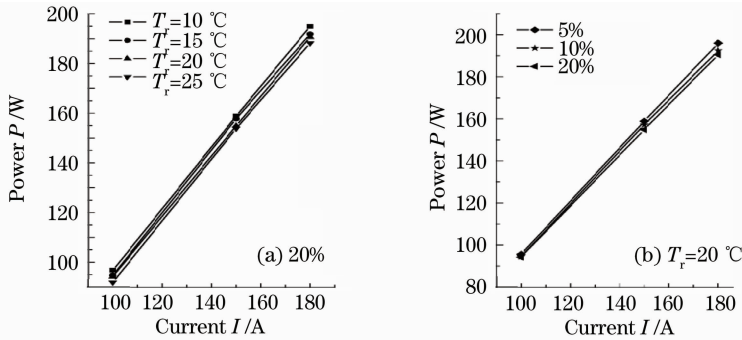


图 6 工作条件对输出功率的影响

Fig. 6 Influence of working conditions on output power

由图 6 可知,工作电流为 180 A,占空比为 20% 时,输出功率从 10 $^\circ\text{C}$ 时的 195 W 减小到 25 $^\circ\text{C}$ 时的 188.2 W;工作电流为 180 A,热沉温度为 20 $^\circ\text{C}$ 时,输出功率从 5% 时的 196 W 降低到 20% 的 190.6 W。可见占空比越大,热沉温度越高,有源区温度越高,输出功率越小。

3 预测大功率半导体激光阵列的输出特性

测试中发现工作电流加到最大的 180 A 时,输出功率与电流呈现良好的线性关系,完全没有热饱和趋势。因此,有必要对 LDA 在更高电流下工作的输出特性做预测。

实验测得 0.4% (100 μs , 40 Hz) 占空比, 50 A 电流,热沉温度分别为 10 $^\circ\text{C}$, 20 $^\circ\text{C}$ 时的阈值电流和电光转换效率分别为 22.8 A, 24.5 A 和 41.8%, 38.5%, 忽略热效应影响结合 (1), (2) 和 (4) 式计算出阈值电流和外微分量子效率的特征温度约为 $T_0=140\text{ K}$, $T_1=537\text{ K}$ 。将测试和计算得到的下列参数: $I_{\text{th}}(T_r)=25.5\text{ A}$, $T_0=140\text{ K}$, $T_1=537\text{ K}$,

$R_{\text{th}}=0.328\text{ K/W}$, $\eta_d(T_r)=0.83$, $R_s=3.2\text{ m}\Omega$, $V_d=1.54\text{ V}$, $\frac{\tau}{\Sigma}=0.2$ 代入 (4) 式和 (5) 式, 外推出 LDA 在占空比为 20%, 热沉温度为 20 $^\circ\text{C}$ 条件下工作的 $P-I$ 与 η_c-I 关系曲线, 如图 7 所示。

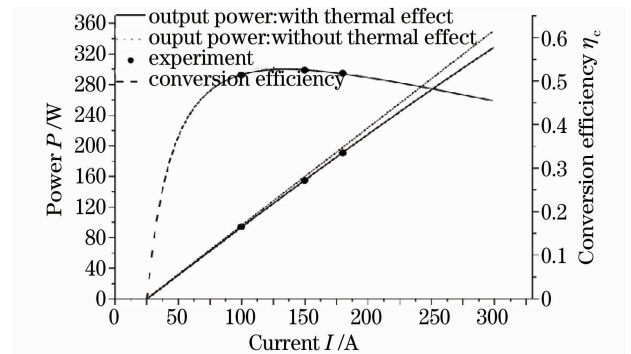


图 7 外推的输出功率和转换效率

Fig. 7 Extrapolation of output power and conversion efficiency

从图 7 可以看出, 电流较小时热效应对输出功率影响小, 实线和短点线基本重合; 随电流的增大, 热效应增强, 导致输出功率降低。实际测得的输出功率和转换效率跟考虑热效应后的外推值符合得很

好,说明了外推的可信度,同时也进一步佐证了第2节的分析。电流加大到300 A时,功率达到328.2 W,转换效率为45%,且没出现热饱和与光学灾变。考虑到实际工作时波长、阈值电流和微量子效率等因素变化影响,功率会有所下降,但也将达到300 W量级。国际上,Nlight公司的微通道封装线阵20℃连续输出达346 W^[13],Coherent公司热传导热沉封装线阵25℃,20%占空比下功率达200 W^[14];国内,微通道封装线阵20%占空比时输出功率达61.8 W^[15],电光转换效率为38%。对比可以看出我们的半导体激光阵列较国外还有差距。

4 结 论

通过理论模拟和实验测试研究了热沉温度、工作电流以及占空比对大功率半导体激光阵列有源区温度和输出特性的影响。热沉温度越高、占空比越大时,器件达到稳态所需时间越长,中心波长红移越厉害,输出功率越小,电光转换效率和斜率效率越低。这是因为随着热沉温度的上升和占空比的增大,工作产生的废热增加,有源区温升 ΔT 增大,导致波长红移的加剧;有源区温度的升高又促使内部载流子的非辐射复合效应增强,漏电流和辐射损耗增大,从而降低内量子效率和外微量子效率,增大阈值电流,导致输出功率、转换效率和斜率效率的降低。然而,温度太低、占空比太小时,LDA的输出能量太低,难以满足实际需求。因此,在实际应用中应根据需求优化工作条件以达到最佳效果。对LDA在20℃的热沉温度,20%的占空比,300 A的注入电流条件下工作时的输出特性进行预测,得到输出功率超过300 W,转换效率达45%,且没有出现热饱和与光学灾变现象,说明封装散热技术能够满足器件高占空比工作的要求。

参 考 文 献

1 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

- 2 H. König, G. Grönninger, Peter Brick *et al.*. Brilliant high power laser bars for industrial applications [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687616
- 3 Shan Xiaonan, Zhang Jing, Wang Lijun. Design of 980 nm high-power semiconductor laser therapeutic equipment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl): 435~438
单肖楠, 张 晶, 王立军. 980 nm 大功率半导体激光治疗仪的设计 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(增刊): 435~438
- 4 Juan Jiménez. Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes [J]. *C. R. Physique*, 2003, **4**(6): 663~673
- 5 A. R. Dhamdhare, A. P. Malshe, W. F. Schmidt *et al.*. Investigation of reliability issues in high power laser diode bar packages [J]. *Microelectronics Reliability*, 2003, **43**: 287~295
- 6 Roland Diehl. High Power Diode Lasers [M]. Heidelberg: Springer, 2000. 200~201
- 7 Song Haipeng, Wen Jimin, Zeng Xiongwen *et al.*. Research of pulse injection method for measuring LD chip temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3): 407~410
宋海鹏, 温继敏, 曾雄文等. 测量激光器结温的脉冲注入法研究 [J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 407~410
- 8 Zhang Xiaobo, Gao Dingsan. The thermal effects in semiconductor laser arrays [J]. *J. China Institute of Communications*, 1990, **11**(5): 34~38
张晓波, 高鼎三. 阵列式半导体激光器中的热特性 [J]. *通讯学报*, 1990, **11**(5): 34~38
- 9 S. Murata, K. Nishimura. A simple new laser diode array model for thermal interaction analysis [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(9): 4715~4723
- 10 Zhang Lei, Cui Bifeng, Huang Hongjuan *et al.*. Steady-state temperature distribution changes of stripe quantum-well laser caused by solder void [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1203~1207
张 蕾, 崔碧峰, 黄宏娟等. 焊料空隙对条形量子阱激光器温度分布的影响 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1203~1207
- 11 Joanne S. Manning. Thermal impedance of diode lasers comparison of experimental methods and a theoretical model [J]. *J. Appl. Phys.*, 1981, **52**(5): 3179~3184
- 12 W. B. Joyce, R. W. Dixon. Thermal resistance of heterostructure lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**(2): 855~862
- 13 P. Crump, J. Wang, T. Crum *et al.*. > 360 W and > 70% efficient GaAs-based diode lasers [C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 21~29
- 14 M. Mondry, M. Fouksman, H. Zhou *et al.*. High power, reliable 808 nm laser bars for QCW and CW applications [C]. *SPIE*, 2006, **6104**: 610408
- 15 Xie Hongyun, An Zhenfeng, Chen Guoying *et al.*. High duty-cycle high power semiconductor laser array [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 22~24
谢红云, 安振峰, 陈国鹰等. 高占空比大功率激光器阵列 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 22~24