

列阵半导体激光器中热相互作用及改进技术的研究

晏长岭

(中国科学院长春物理研究所 长春 130023)

费文伯

(东北大学理学院 沈阳 110006)

钟景昌 赵英杰 黎荣辉

(长春光机学院半导体激光国家重点实验室 长春 130022)

提要 从半导体激光器产生的热量在热沉中的扩散入手,对列阵单元器件间的热相互作用进行了分析,提出了该过程是通过热流的扩散而发生作用的观点。通过这一分析获得了确定列阵器件中单元器件间距的理论依据。对二维列阵中上、下层器件的热相互影响以及脉冲工作的占空比进行了讨论,并将结果应用到 $1.55\ \mu\text{m}$ 半导体激光列阵器件中。采用漏光波导结构的单元器件,实现了二维 2×2 , 2×4 两种列阵,其脉冲输出峰值功率分别达到 $7\ \text{W}$ 和 $11\ \text{W}$ 。

关键词 热扩散,列阵器件,热沉,漏光波导结构,半导体激光器件

1 引言

热效应对半导体激光器性能的严重影响,使人们在研究和改进激光器件的过程中特别注意采取各种方法来降低热量的产生或减弱器件对热的敏感性^[1~3]。包括近年来作为热门课题研究的应变层量子阱激光器和垂直腔面发射激光器等新型器件也都是在巧妙地降低阈值电流,改善温度稳定性的基础上迅速发展起来的^[4,5]。

和单元器件相比,列阵器件中的热对器件性能的影响显得更复杂^[6],其中,器件之间的热相互作用对列阵器件效果的影响不容忽视。我们通过分析发现,这种热相互作用主要是由热接触通过热扩散而产生。于是,我们把研究列阵器件之间热相互作用的重点放在通过热沉的热扩散上,并由瞬态热扩散理论得出器件热沉中的热扩散模型,此模型为列阵中单元器件间距的确定找到了理论依据。

2 列阵器件中的热相互作用

为了讨论方便,先研究在单个器件情况下,器件产生的热在热沉中向左右两侧扩散的情况。由于在扩散过程中,对器件之间的热相互影响起主要作用的热扩散应是在脉冲持续时间内的扩散,它会直接对器件的激射效果产生影响,因此着重对脉冲持续时间内的扩散进行讨论。

由于器件的尺寸与热沉的尺寸相比非常小,且器件只在通电瞬间产生热,并在热沉很小的

范围内引起温升, 随时间的推移向两侧扩散, 因此, 在分析时设想了一个理想模型。假定在通电瞬间 ($\tau = 0$) 器件发热, 在热沉很小的范围内引起温升, 则热沉产生一个初始温度分布 $F(x)$, 如图 1 所示, 然后由此出发, 讨论 $\tau > 0$ 时热沉中的温度分布 $T(x, \tau > 0)$ 。在图 1 中, x' 为器件所在位置, 把器件视为热沉在 x' 处的瞬时小热源, 瞬时通电产生一个热脉冲, $\tau = 0$ 时, 由于热量来不及向两侧扩散, 使器件产生的热量在很窄的区域 $[x' - \delta, x' + \delta]$ 内产生温升 t_i , 而在器件两侧初始温度假定为 0°C , 以便简化计算。

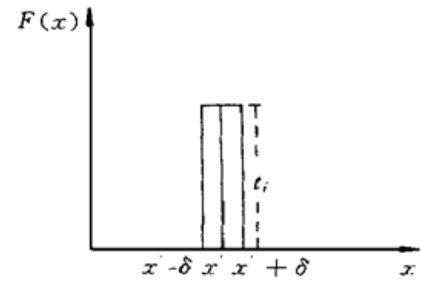


图 1 初始温度分布图

Fig. 1 Temperature distribution at the beginning

由于热沉在水平 x 轴的正反两个方向向左右延伸可假定到无限远, 无需规定边界条件, 因此, 在给定初始温度分布 $F(x)$ 后, 此热扩散过程可用数学表达式描述为

$$\frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \tag{1}$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < x' - \delta; x > x' + \delta \\ t_i & x' - \delta \leq x \leq x' + \delta \end{cases} \tag{2}$$

其中 α 为热沉的扩散系数。

对方程(1) 可以直接利用分离变量法进行求解, 得出 $\tau > 0$ 时的温度分布

$$T(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \int_{-\infty}^{\infty} F(x) \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] dx \tag{3}$$

把初始温度分布条件 $F(x)$ 代入(3) 式得

$$T(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \int_{x'-\delta}^{x'+\delta} t_i \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] dx \tag{4}$$

由于通电瞬间器件产生热脉冲, 它释放给热沉一定的热量 $Q_{si}(\text{J}/\text{m}^2)$, 热量在瞬时来不及向两侧扩散传播, 而在器件所在位置附近很窄的区域 $(x' - \delta, x' + \delta)$ 内产生温升^[7]: $t_i = Q_{si}/(2\delta\rho c)$, 其中, ρ 为密度 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, c 为比热容 $[\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})]$, 在此窄小区域以外, 热沉仍维持 0°C 不变, 把 t_i 代入(4) 式得

$$T(x, \tau) = \frac{Q_{si}/\rho c}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \frac{1}{2\delta} \int_{x'-\delta}^{x'+\delta} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] dx \tag{5}$$

由于单元器件和热沉相比尺寸非常小, 因此可令 $\delta \rightarrow 0$, 则(5) 式变为

$$T(x, \tau) = \frac{Q_{si}/\rho c}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta} \int_{x'-\delta}^{x'+\delta} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] dx \tag{6}$$

利用中值定理, (6) 式可变为

$$T(x, \tau) = \frac{Q_{si}/\rho c}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\delta} \exp\left[-\frac{(x-x^*)^2}{4\alpha\tau}\right] \cdot 2\delta = \frac{I}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] \quad (x' - \delta < x^* < x' + \delta) \tag{7}$$

其中 $I = \frac{Q_{si}}{\rho c} (^\circ\text{C} \cdot \text{M})$, 它是反映器件对热沉加热能力强弱的常数。在此假定 $I = 1$, 则(7) 式变为

$$T(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha\tau}} \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] \tag{8}$$

于是得出了表征脉冲持续时间 τ 内器件产生的热量在热沉中扩散引起热沉温度分布的函数表达方式。不同 τ 条件下温度分布的函数关系曲线如图 2 所示。它们是以时间为参变量的正态分布曲线, 器件处于温度最高的点 x' , 随着时间的推移, 热向两侧扩散, 温度分布趋于平坦。

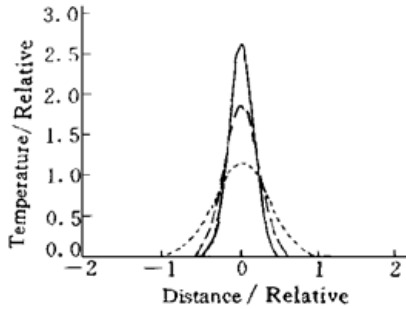


图 2 温度分布曲线

Fig. 2 Temperature distribution curves

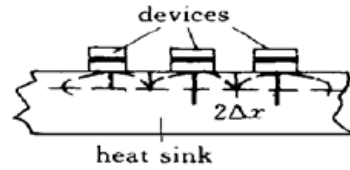


图 3 热扩散示意图

Fig. 3 Schematic diagram of thermal diffusion

根据以上对单个器件的分析结果, 对列阵情况下热沉中热扩散进行讨论。假定参与列阵的器件在光电特性上完全相同, 于是列阵中热沉的热扩散可以被近似描述成图 3 的形式。为了确定相邻器件之间通过热沉的热扩散而发生的相互作用, 假定温度为器件中心温度的 $1/e$ 为热相互作用的始点, 由方程(8) 可知, 这一点的位置 x 应满足

$$\exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau}\right] = e^{-1} \tag{9}$$

则得

$$\frac{(x-x')^2}{4\alpha\tau} = 1 \tag{10}$$

由(10) 式得出的是器件向一侧的扩散长度 $\Delta x = |x - x'|$, 因此相邻器件之间的扩散长度应该为: $2\Delta x = 2|x - x'|$, 称之为有效扩散长度。我们分别计算了在不同脉冲持续时间内的有效扩散长度值如表 1 所示。由此可见, 在脉冲持续时间内, 若相邻器件间的间距远大于相应的有效扩散长度时, 则可以认为, 此时相邻器件的热相互作用已被大幅度地削弱了, 这样一来, 就为确定列阵中单元器件间的间距找到了理论依据, 从而能有效地提高列阵的效果。

表 1 扩散长度值表

Table 1 Thermal diffusion length

| τ/ns | 100 | 200 | 500 |
|---------------------------|------|------|------|
| $\Delta x / \mu\text{m}$ | 6.8 | 9.7 | 13.4 |
| $2\Delta x / \mu\text{m}$ | 13.6 | 19.4 | 26.8 |

3 1.55 μm 单元激光器的改进技术

为了进一步提高列阵的效果, 在单个器件结构中引入漏光波导机制, 把器件设计成四层漏光波导结构, 如图 4 所示: 衬底, $n\text{-InP}(\text{Te}, n = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3})$ 限制层、漏光波导层 $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}$

$\text{As}_{0.71}\text{P}_{0.29}$ (非掺杂), 有源层 $\text{In}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}_{0.64}\text{P}_{0.36}$ (非掺杂), 抗回熔层 $\text{In}_{0.58}\text{Ga}_{0.42}\text{As}_{0.71}\text{P}_{0.29}$ (非掺杂), p - InP (Zn , $p = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) 限制层, 重掺杂顶层 p^+ - $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{As}_{0.72}\text{P}_{0.28}$ (Zn , $p = 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)。由于增加了漏光波导层, 器件总的光波导层增厚, 从而降低了器件的端面临界光通量, 减弱了端面临界光通量对器件光输出功率的限制, 有利于器件大功率光输出; 其次, 由于漏光波导层使器件在具有较大的光波导层的同时, 保证了较小的有源区厚度, 从而有效地限制了器件的有源区温升, 改善了器件的温度特性; 最后, 在器件的模式选择方面, 由于漏光波导层与有源层折射率相差很小, 可以把四层漏光波导结构近似视为对称三层平板波导结构分析其模式截止条件。

对称三层平板波导结构的模式截止条件

$$D = \frac{m\lambda_0}{2 \times (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}}$$

相应的器件结构参量 $\lambda_0 = 1.55 \mu\text{m}$ $n_1 = 3.52$ $n_2 = 3.20$

代入截止条件得

$m = 0$ 对称三层平板波导基模不截止;

$m = 1$ $D_1 = 0.529 \mu\text{m}$

$m = 2$ $D_2 = 1.058 \mu\text{m}$

$m = 3$ $D_3 = 1.587 \mu\text{m}$

有源层和漏光波导层厚度之和 $d_1 + d_2 = 1.5 \mu\text{m} < D_3 = 1.587 \mu\text{m}$ 。因此, 器件谐振腔中只能存在基模、一阶模、二阶模; 三阶以上高阶模式被截止。器件在低阶模式下运转有利于激光准直。

实验中采用两相溶液法和过冷法相结合的 LPE 技术, 由水平滑动舟在 n - InP (Sn) 衬底上生长这种结构的器件。

用金相显微镜观察外延片表面光滑, 不带钢的痕迹。从扫描电子显微镜摄取外延片的电子束感生电流照片可见 p - n 结正好落在非掺杂的有源区内。外延片光刻后解理成腔长 $400 \mu\text{m}$, 条宽 $100 \mu\text{m}$ 的宽接触型器件。器件在脉冲工作状态下运转, 脉宽 $250 \sim 300 \text{ ns}$, 重复频率 $8 \sim 10 \text{ kHz}$ 。由器件的 I - V 特征曲线测出器件的正向微分电阻为 3Ω 左右。绝大多数器件阈值电流在 $1 \sim 2 \text{ A}$ 左右, 对应的阈值电流密度为 $1.6 \sim 3.3 \text{ kA/cm}^2$ 。根据半导体激光器阈值电流与温度的关系对特征温度进行了测量, 测得特征温度为 $T_0 = 129 \sim 141 \text{ K}$ (普通 DH InGaAsP 半导体激光器的 T_0 值为 $50 \sim 70 \text{ K}$ 左右^[8])。用 InGaAs 探测器作为器件的接收元件, 配以低噪声的放大器和指示器。经标准功率装置标定, 并考虑到器件脉冲工作的占空比, 最后测得器件脉冲峰值光功率在 $1 \sim 3 \text{ W}$ 左右。光谱特性测量结果表明, 在阈值附近, 大部分器件都表现出单模激射, 当工作电流加大后, 光谱峰值向短波方向有轻微的漂移, 并出现多模运转。

4 二维列阵激光器的实验结果

在列阵中, 首先由热扩散理论模型来确定列阵中相邻单元器件的间距。由于在单个器件中采用的脉冲持续时间为 $250 \sim 300 \text{ ns}$ 左右, 因此, 列阵中采用的脉冲持续时间比单个情况下的

| |
|----------------|
| p^+ -GaInAsP |
| p -InP |
| InGaAsP(Int) |
| InGaAsP(Int) |
| InGaAsP(Int) |
| n -InP |
| substrate |

图 4 漏光波导激光器结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of leaky waveguide laser structure

略短,为 200 ns 左右。把它代入(10)式得: $|x - x'| = 9.7 \mu\text{m}$;有效扩散长度为 $2|x - x'| = 19.4 \mu\text{m}$,因此,器件的间距应远大于 $2|x - x'| = 19.4 \mu\text{m}$ 。实验中选用 $500 \mu\text{m}$ 为器件的间距。其次,考虑二维列阵情况下的上、下层器件之间的热相互影响。如果在脉冲持续时间内,热流不至于渗透过上、下层器件之间的中间导电层,也就是说,若脉冲持续时间 τ 远小于热流完全透过厚度为 d_m 的中间导电层所需的时间^[6] $t_1 = d_m^2/\alpha$,即

$$\tau \ll t_1 = \frac{d_m^2}{\alpha} \quad (11)$$

其中 α 为热扩散系数,此时可以认为上、下层单元器件间的热相互影响也已被大幅度地减弱。在我们的器件列阵中,中间导电片为纯铜,其热扩散系数为: $\alpha = 1.16 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$,厚度为 $d_m = 200 \mu\text{m}$,脉冲持续时间 $\tau = 200 \text{ ns}$,代入(11)式得: $\tau = 200 \text{ ns} \ll t_1 = 38 \mu\text{s}$;则此时列阵器件中上、下层器件之间的热相互影响也被削弱。最后,分析一下脉冲工作的占空比。为了更好地发挥热沉的散热功能,应使两次脉冲的时间间隔 Δt 大于热流渗透过整个厚度为 D 的热沉的时间^[6] $t_2 = D^2/\alpha$,即

$$\Delta t > t_2 = \frac{D^2}{\alpha} \quad (12)$$

以便使热沉在脉冲间隔时间内充分散热。实验中,热沉的厚度为 0.5 cm ,由(12)式得: $\Delta t > t_2 = 210 \mu\text{s}$,因此,脉冲工作的占空比选为: $1:1500$,时间间隔 $\Delta t = 300 \mu\text{s}$ 。

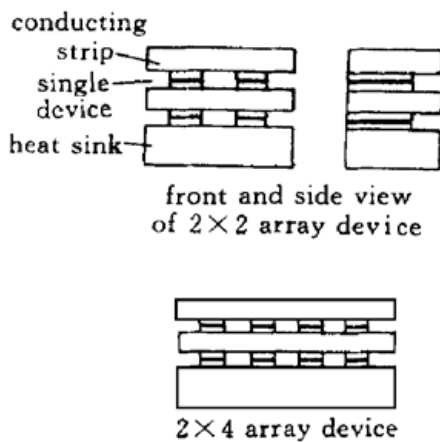


图 5 列阵器件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of array device
front and side view of 2x2 array
device and 2x4 array device

接下来,对参与列阵的器件进行选择,使每个器件尽可能一致,即主要的光电参量符合要求并且相同,同时每层器件的厚度也要求一致,以免出现个别器件接触不良,增大接触电阻,从而影响到列阵的效果。

将选出的器件进行列阵装配。在装配焊接中,选用锡一类的软焊料,以尽量减小接触电阻。

分别制作了 2×2 和 2×4 两种类型的器件列阵,如图 5 所示。装配好后,用树脂进行固定。列阵器件在脉冲工作状态下工作,脉冲宽度为 200 ns 左右,脉冲前后沿均小于 20 ns,占空比为 $1:1500$ 。对列阵器件进行测试:

(1) 阈值电流

2×2 列阵器件,阈值电流 $I_{th} = 3.5 \text{ A}$ 左右; 2×4 列阵器件,阈值电流 $I_{th} = 7.5 \text{ A}$ 左右。

(2) 光输出功率

以 InGaAs 探测器为接收元件,配以低噪声放大器及指示器,并由标准功率装置标定,考虑到脉冲的占空比,最后测得: 2×2 列阵器件最大脉冲峰值功率为 7 W 左右; 2×4 列阵器件最大脉冲峰值功率为 11 W 左右。由于单个器件的最大脉冲峰值功率在 1~3 W 左右,因此,列阵器件的输出功率小于单个器件功率之和;减小的比例随着列阵数目的增加而增加。

(3) 近场图观察

以通常的近场观测装置,摄得照片如图 6 所示,从中可见,列阵激光器发光清晰,表面亮度均匀。器件运行数十小时,近场图仍旧清晰、均匀如初,可见列阵器件有比较好的可靠性、稳定

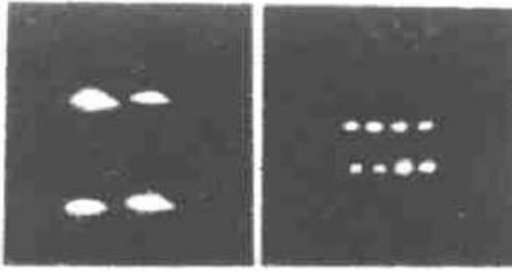


图 6 列阵近场图

Fig. 6 Near-field pattern of array device

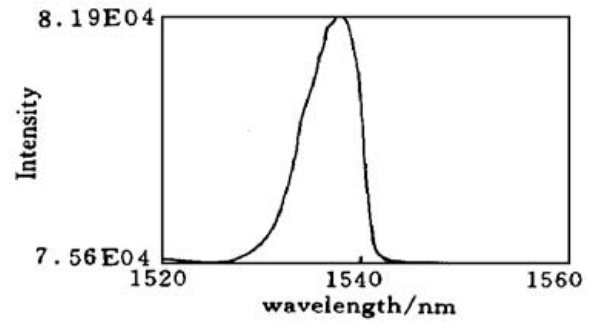


图 7 列阵器件光谱图

Fig. 7 Emission spectrum of array device

性。列阵器件的光谱分布如图 7 所示。

(4) 远场光束宽度

和单个器件相比,列阵器件的发散角略有增大。

5 结 论

分析了半导体激光器产生的热量在热沉中的扩散,并对列阵中单元器件间的热相互作用进行了研究,给出了简单的热扩散模型,由这一模型得出了确定列阵中相邻单元器件间距的理论依据。与此同时,采用漏光波导结构的单元器件,同时考虑到二维列阵中上、下层器件间的相互作用及器件脉冲工作状态对列阵效果的影响,对 $1.55 \mu\text{m}$ 二维 2×2 , 2×4 两种半导体列阵激光器作了一次成功的尝试。实验结果表明,这一理论依据在对迭层式半导体列阵器件的优化设计及提高器件列阵效果上,具有直接的指导意义,同时对其他形式的列阵半导体激光器件^[9],如在单片列阵半导体激光器件中单元器件间距的确定及器件中的脉冲工作状态等问题上也都有一定的理论和实验上的参考价值,从而为列阵半导体激光器件的设计提供了一个新的思路。

参 考 文 献

- 1 H. Temkin, D. Coblentz, R. A. Logan *et al.*. High temperature characteristics of InGaAsP/InP laser structures. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(19): 2402~ 2404
- 2 Yong-Hoon Cho, G. H. Gainer, A. J. Fischer *et al.*. "S-shaped" temperature-dependent emission shift and carrier dynamics in InGaN/GaN multiple quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(10): 1370~ 1372
- 3 Ron Huang, John G. Simmons, Paul E. Jessop *et al.*. Thermal behavior of tensile-strain InGaAsP/InP lasers with varying ridgewidth. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(7): 889~ 891
- 4 Weng W. Chow, Kent D. Choquette, Mary H. Crawford *et al.*. Design, fabrication, and performance of infrared and visible vertical cavity surface-emitting lasers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10): 1810~ 1824
- 5 Stefan Rapp, Joachim Piprek, Klaus Streubel *et al.*. Temperature sensitivity of $1.54\text{-}\mu\text{m}$ vertical-cavity lasers with an InP-based Bragg reflector. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(10): 1839~ 1945
- 6 W. Nakwaski. Simplified thermal analysis of a laser diode array. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1984, **14**(2): 266~ 267
- 7 Hongji Zhang. Thermal Conduction. Beijing: Higher Education Press, 1992 (in Chinese)

- 8 T. P. Pearsall. GaInAsP Alloy Semiconductors. Chichester, New York. Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1982. 379
- 9 C. L. Chua, R. L. Thornton, D. W. Treat *et al.*. Independently addressable VCSEL arrays on 3- μm pitch. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(7): 917~ 919

Study of Thermal Interaction and Its Improvement Technique in Semiconductor Laser Arrays

Yan Changling

(Changchun Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130023)

Fei Wenbai

(School of Physics, Northeast University, Shenyang 110006)

Zhong Jingchang Zhao Yingjie Li Ronghui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, State Key Lab of Semiconductor Laser, Changchun 130022)

Abstract Considering the diffusion of heat generated by semiconductor lasers in the heat sink, the thermal interaction among single devices in the array have been analyzed. The idea of the thermal interaction caused from the diffusion of heat current is proposed. From analyses, how to determine the separation between upper and lower devices in the 2D array and how to select the duty cycle in the pulsed operation have been studied. The result of analyses has been applied to design the 1.55 μm wavelength semiconductor laser array. Two kinds of 2D arrays of 2×2 , 2×4 consisted of single devices with leaky waveguide structure with their pulsed peak power output of 7 W and 11 W, respectively, have been completed.

Key words thermal diffusion, array, heat sink, leaky waveguide structure, semiconductor laser device