

文章编号: 0258-7025(2004)05-0518-05

隧道再生大功率半导体激光器瞬态热特性研究

鲁鹏程, 崔碧峰, 李建军, 廉 鹏, 郭伟玲, 邹德恕, 沈光地

(北京工业大学电子信息与控制工程学院 北京市光电子技术实验室, 北京 100022)

摘要 讨论了隧道再生大功率半导体激光器内部的热源分布, 利用有限元方法模拟计算了其在脉冲工作下的二维瞬态热分布, 同时测量了不同时刻波长的漂移量并换算为温升值, 与计算结果进行了比较, 二者基本吻合。模拟结果还表明靠近衬底的有源区温度略高于靠近热沉的有源区温度; 用金刚石-铜热沉替换铜热沉, 还可以很好地降低器件内部温升, 使隧道再生大功率半导体激光器能够高效工作。

关键词 激光技术; 半导体激光器; 瞬态热特性; 有限元

中图分类号 TN 248.4 **文献标识码** A

Transient Thermal Characteristic Analysis of Tunnel Regeneration High-Power Semiconductor Laser

LU Peng-cheng, CUI Bi-feng, LI Jian-jun,

LIAN Peng, GUO Wei-ling, ZOU De-shu, SHEN Guang-di

(Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, College of Electronic Information & Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract Heat source of tunnel regeneration high power semiconductor laser has been discussed. Two-dimension transient thermal distribution of this kind of laser diode at pulse work is simulated by using the finite element method, and the wavelength shift is measured and converted to temperature rising value at different time, the calculated results are in agreement with the measured data. It is found that the temperature rising of the active region close to the substrate is higher than that of the active region close to the heat sink, and using the diamond-copper heat sink to replace the copper heat sink could reduce the inner temperature rising of laser diode greatly, and make tunnel regeneration high-power semiconductor laser working with high efficiency.

Key words laser technique; semiconductor laser; transient thermal characteristic; finite element method

1 引 言

隧道再生半导体激光器是一种新型的大功率半导体激光器^[1], 它的第一个优点是在相同的注入电流下, 输出光功率将与传统结构激光器的输出光功率相比要成倍增加, 这一优点可以使我们在较小的注入电流下获得比普通激光器大得多的输出光功率; 它的另一个优点是有效地解决了大功率半导体

激光器在高光功率密度时的灾变性端面损坏对激光器的限制, 并且大大改善了其光束质量。但由于它是多个有源区级联, 其工作电压随有源区的个数而增加, 产生的热量集中, 因此对这种激光器热特性的研究显得十分重要。

针对这种新型结构的激光器, 建立了相应的物理模型, 利用有限单元法对模型进行了数值模拟, 得

收稿日期: 2003-07-28; 收到修改稿日期: 2003-11-24

基金项目: 国家 973 基金(G20000683-02)、北京市自然科学基金(4032007)和国家 863 计划(2002AA312070)资助项目。

作者简介: 鲁鹏程(1976—), 男, 北京工业大学在读博士研究生, 主要从事半导体光电子器件的研究。E-mail: lupengcheng@emails.bjut.edu.cn

到了脉冲工作下的瞬态热分布,并与实验数据进行了对比,二者基本吻合。

2 理论模型

2.1 器件结构

选取具有两个有源区的隧道再生半导体激光器进行分析。图 1 为两个有源区的隧道再生大功率半

导体激光器结构,实验制作了 $100\ \mu\text{m}$ 宽台面条形器件,腐蚀深度为 $0.4\ \mu\text{m}$,淀积 SiO_2 绝缘膜 $0.2\ \mu\text{m}$,整个器件减薄到 $100\ \mu\text{m}$,器件宽度为 $600\ \mu\text{m}$,腔长 $900\ \mu\text{m}$,P 型向下烧结在无氧铜热沉上。

2.2 模型建立

在一般二维传热问题中,瞬态温度场的场变量 $T(x,y)$ 在直角坐标系中应满足的微分方程是

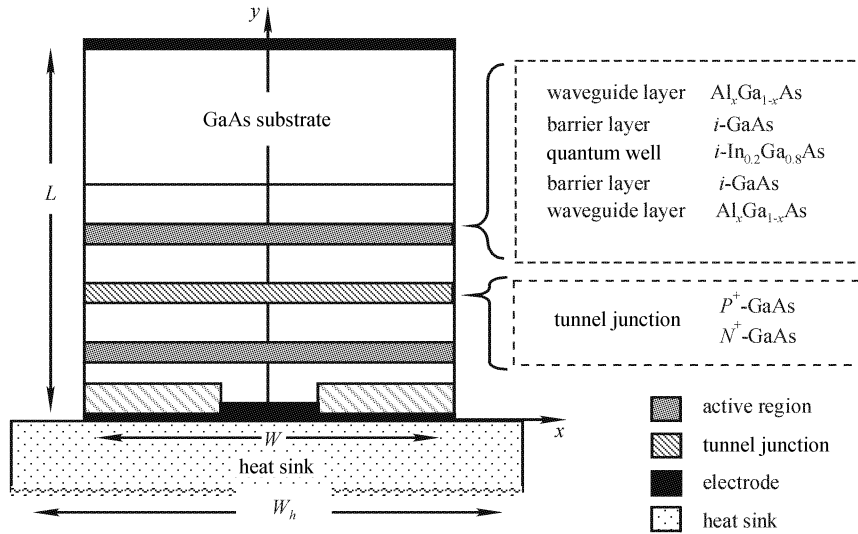


图 1 两个有源区的隧道再生半导体激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunnel regeneration semiconductor laser with two active regions

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho Q \quad (1)$$

其中, ρ 为材料密度, c 为材料比热, t 为时间, k_x, k_y 分别为 x, y 方向的热传导系数, Q 为物体内部的热流密度。为了减小计算量,选取图 1 中右半部分进行计算。边界条件和初始条件选取为:

1) 管芯与周围空气的热对流与热辐射作用交换的能量非常微弱,可以忽略不计

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=W/2} = \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=L} = 0 \quad (2)$$

W 为器件横向宽度, L 为器件的纵向尺度。

2) 忽略热沉与空气的热辐射作用,只考虑在自然对流下的热交换,即

$$k \nabla T = h(T_A - T) \quad (3)$$

h 为自然对流系数, T_A 为环境温度,计算中选取 h 为 $10\ \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$, T_A 为 $300\ \text{K}$ 。

3) 每层之间还应该满足温度与热流连续分布,即

$$\begin{cases} T_i = T_{i+1} \\ k_i \left. \frac{\partial T_i}{\partial y} \right|_{y=y_i} = k_{i+1} \left. \frac{\partial T_{i+1}}{\partial y} \right|_{y=y_{i+1}} \end{cases} \quad (4)$$

4) 在初始条件下,整个管芯与热沉的温度为环境温度 T_A ,计算时选取 $T_A = 300\ \text{K}$

$$T|_{x=0} = T_A \quad (5)$$

2.3 热源分析

为了求解方程(1),还需要对方程中的热源进行量化。经过分析,认为在隧道再生大功率半导体激光器内部,热源主要分为以下几部分:

1) 有源区在工作状况下会产生极大的载流子密度和光子密度,会有大量的非辐射复合、辐射吸收以及自发辐射吸收,因此会产生大量的热,有源区内部热流密度用下式表示^[2~4]

$$Q_{\text{active}} = \frac{V_j(1 - \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}})}{d_{\text{active}}} [j_{\text{th}} + (j - j_{\text{th}})(1 - \eta_i)] \quad (6)$$

d_{active} 为有源区的厚度, V_j 为 $p-n$ 结上的电压降, j 为注入电流密度, j_{th} 为阈值电流密度, η_{sp} 为自发发射内量子效率, η_i 为受激辐射内量子效率, f_{sp} 为自发辐射光子从有源区的逃逸因子。

2) 盖层中的热源以及衬底上面的一小部分来自对有源区自发辐射逃逸出的光子的吸收,热流密

度表示为^[3,4]

$$Q_{\text{cap}} = Q_{\text{topSub}} = j^2 \rho_j + \frac{1}{2} \times \frac{V_j j_{\text{th}} \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}}}{d_{\text{active}}} \quad (7)$$

3) 隧道结中的热源来自吸收损耗和该层的焦耳热,通过对设计的波导结构进行分析,得出隧道结处的光场相对较弱,如图 2 所示,因此忽略这部分由于吸收产生的热。热量的产生按照盖层处理,即对来自两侧有源区自发辐射逃逸出的光子的吸收以及焦耳热,热流密度可以用下式来表示

$$Q_{\text{tunnel}} = j^2 \rho_j + \frac{V_j j_{\text{th}} \eta_{\text{sp}} f_{\text{sp}}}{d_{\text{active}}} \quad (8)$$

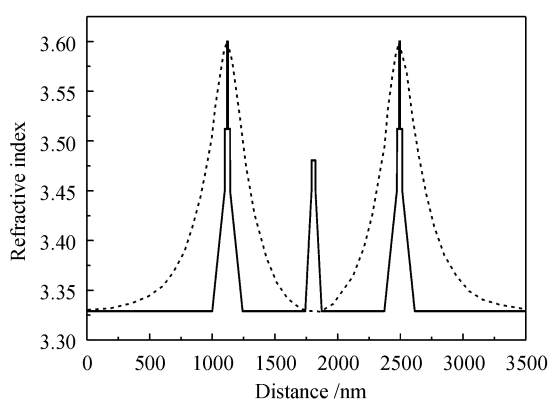


图 2 具有两个有源区的隧道再生半导体激光器的波导结构以及近场分布

Fig. 2 Waveguide structure and near field of tunnel regeneration semiconductor laser with two active regions

4) 其他层的热源都是焦耳热的形式,热流密度为

$$Q_j = j^2 \rho_j \quad (9)$$

其中 ρ_j 代表每一层的电阻率。 P 面合金层中的热流密度用接触电阻表示

$$Q_c = j^2 \rho_c / d_c \quad (10)$$

其中 ρ_c 代表合金层与 P 型 GaAs 的接触电阻,根据实验数据选取 $\rho_c = 2.1 \times 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm}^2)$,对于 N 型一侧合金层中的热流密度,由于其厚度与衬底相比很小,可以忽略不记。

3 结果与讨论

针对上述设计的器件结构以及物理模型,利用有限元方法进行了模拟计算,计算时选取的参数 $V_j = 1.7 \text{ V}$, $j_{\text{th}} = 198 \text{ A/cm}^2$, $j = 2.8 \times j_{\text{th}}$, $\eta_{\text{sp}} = 0.6$, $f_{\text{sp}} = 0.5$, $\eta_i = 0.97$, In 的厚度为 $10 \mu\text{m}$,热沉厚度为 2 mm ,材料参数、电阻值如表 1,表 2 所示。图 3 是热沉为无氧铜时管芯内部不同位置的温度分布

图,从中可以看到靠近衬底的有源区温度最高,其次为隧道结处的温度,靠近热沉的有源区温度与二者相比稍微低一些。我们做了不同占空比下波长漂移实验,测量时 $I = 500 \text{ mA}$,频率为 100 Hz ,脉宽为 $20 \mu\text{s}$, $50 \mu\text{s}$, $100 \mu\text{s}$, $200 \mu\text{s}$, $300 \mu\text{s}$, $500 \mu\text{s}$, $1000 \mu\text{s}$ 。以 $20 \mu\text{s}$ 下测得的波长为基准,得到各个时刻下的波长漂移量,再根据半导体带隙与温度的关系导出公式(11),得到激射波长为 980 nm 附近光跃迁的波长温度系数为 0.2766 nm/K ,用漂移量除以波长温度系数就可以得到各时刻下有源区的温升。

$$\frac{d\lambda}{dT} = -\frac{hc}{E_g^2} \cdot \frac{dE_g}{dT} = -\frac{dE_g}{dT} \cdot \frac{\lambda^2}{hc} \quad (11)$$

表 1 计算时用到的各层材料参数

Table 1 Material parameter of every layer used for the calculation

Material	K /(W/m · K)	C_p /(J/kg · K)	P /(kg/m ³)
GaAs	46	322	4318
In _{0.2} Ga _{0.8} As	7.19	336.4	5389
Al _{0.35} Ga _{0.65} As	11.4	363	4774
In	83.7	239	7310
Au	301	132.3	19320
Cu	385	385	8960
Diamond	1800	6200	3510

表 2 计算时用到的各层电阻率

Table 2 Resistance index of every layer for the calculation

Material	$\rho / \Omega\text{m}$
p -Al _{0.35} Ga _{0.65} As	3.1E-5
n -Al _{0.35} Ga _{0.65} As	1.19E-5
n^+ -GaAs tunnel junction	6E-6
p^+ -GaAs tunnel junction	1E-5
GaAs substrate	9E-6

图 3 中黑色方块值是由实验测得的数据换算得到的温升,虽然实验得到的温度值只是两个有源区共同作用下的近似温升,但基本上可以验证计算结果的合理性。图 4 是热沉为无氧铜时,在 20 ns 至 $1000 \mu\text{s}$ 时间段内从金属层至衬底的温度随电流注入时间的变化趋势,可以看出在最初时间内两个有源区的温度相对于其他层都比较高,随着时间推移隧道结处温度开始上升,原因是因为这一层夹在两个有源区中间,两边的热量都向这一层扩散,而隧道结处并没有散热装置,因此隧道结温度最终将超过

靠近热沉的有源区,而靠近衬底有源区的温度始终高于靠近热沉有源区和隧道结处的温度,这是由于热沉的热学参数与衬底相比更容易散热的原因。

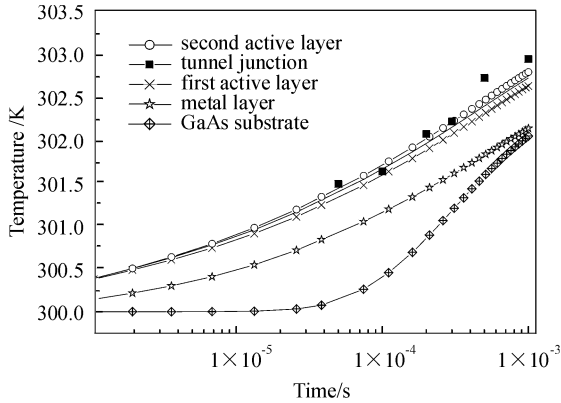


图 3 热沉为无氧铜时,管芯内部各层中心处温度随注入电流时间的变化趋势

Fig. 3 Temperature distribution vs injecting current time of every layer inner laser diode with copper heat sink

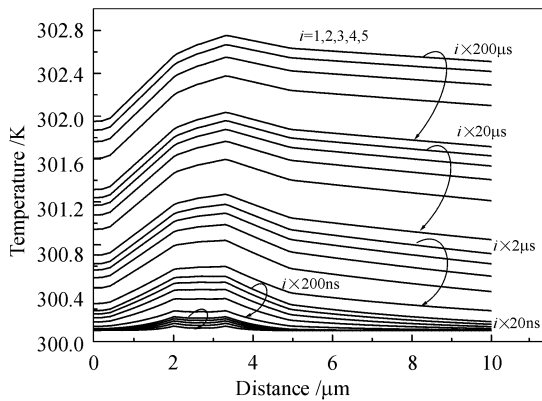


图 4 热沉为无氧铜时,时间从 20 ns 至 1000 μs 范围内管芯内部沿 y 轴方向瞬态温度分布

Fig. 4 Transient temperature distribution of laser diode from 20 ns to 1000 μs along the y-axis with copper heat sink

图 5(a), (b) 分别是热沉为无氧铜时,两个有源区沿 x 轴的瞬态温度分布,可以看到在最初时间内有源区内温度基本持平,电极两边温度基本不变,随着时间推移热量逐渐向两侧扩散,温度变化呈现缓变趋势。图 6 是在假设计算的各个参数保持不变的情况下,在无氧铜热沉上增加一层厚度为 300 μm 金刚石薄膜^[5,6],原因是金刚石薄膜是所有物质中热导率最高的。从计算结果上可以很清楚地看到,每一层的温度都相应地下降了许多,说明采用更好的散热方式,可以有效降低器件内部温升。

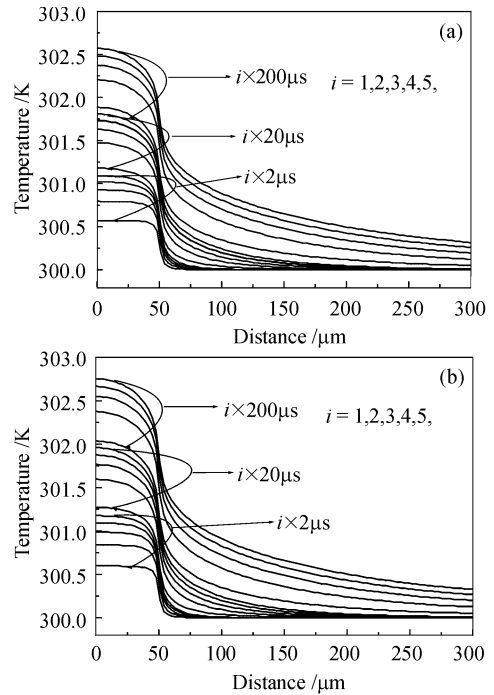


图 5 热沉为无氧铜时,第一个有源区(a)和第二个有源区(b)沿 x 轴方向瞬态的温度分布

Fig. 5 Transient temperature distribution of first active region (a) and second active region (b) along the x-axis with copper heat sink

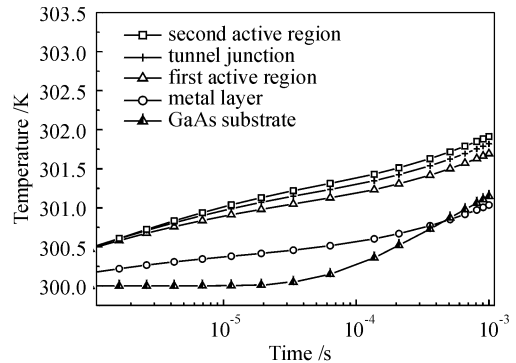


图 6 热沉为金刚石-铜时,管芯内部各层中心处温度随注入电流时间的变化趋势

Fig. 6 Temperature distribution vs injecting current time of every layer inner laser diode with diamond-copper heat sink

4 结 论

通过有限元法模拟计算了两个有源区的隧道再生半导体激光器的瞬态热特性,得到了该器件的内部温度分布。结果表明在脉冲注入下,随着时间的变化,有源区温度逐渐升高,靠近衬底的有源区温度略高一些,这是由于其远离热沉的原因;由于隧道再

生大功率半导体激光器与普通半导体激光器相比,增加了一个或几个有源区,这样必然带来相对高的温升,但是与多个普通半导体激光器直接串连起来相比,温升势必又低了许多。采用更好的散热方式,如采用金刚石-铜热沉,还可以大大降低器件内部的温升,这样能够使隧道再生半导体激光器充分发挥它的优点,从而更加有效地工作。

参 考 文 献

- 1 Lian Peng, Yin Tao, Gao Guo *et al.*. Novel coupled multi-active region high power semiconductor lasers cascade via tunnel junction [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12):2374~2377
廉 鹏,殷 涛,高 国 等. 新型多有源区隧道再生光耦合大功率半导体激光器[J]. *物理学报*, 2000, **49**(12):2374~2377
- 2 T. Kobayashi, Y. Furukawa. Temperature distributions in the GaAs-AlGaAs double-heterostructure laser below and above the threshold current [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1975, **14**(12):1981~1986
- 3 Zhang Xiaobo, Gao Dingsan. Transient thermal effects calculation in InP/InGaAsP stripe geometry semiconductor laser diode [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1989, **10**(5):362~367
张 晓 波,高 鼎 三. InP/InGaAsP 条形半导体激光器中的瞬态温度特性理论计算[J]. *半导体学报*, 1989, **10**(5):362~367
- 4 Y. G. Zhao, J. G. McInerney. Transient temperature response of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(9):1668~1673
- 5 Xie Zhikun, Shen Jinjin, Chen Kangsheng. Thermo-properties simulation for diamond radiator in semiconductor by TLM method [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1998, **19**(9):691~697
谢 志 坤,沈 进 进,陈 抗 生. 半导体器件中金刚石散热器性能的传输线矩阵(TLM)法分析[J]. *半导体学报*, 1998, **19**(9):691~697
- 6 Gu Changzhi, Jin Zengsun, Lü Xianyi *et al.*. Semiconductor laser fabricated with heat sink of diamond film [J]. *Chinese J. Semiconductors*, 1997, **18**(11):840~843
顾 长 志,金 曾 孙,吕 宪 义 等. 使用金刚石膜热沉的半导体激光器特性研究[J]. *半导体学报*, 1997, **18**(11):840~843



华中科技大学激光技术与工程研究院 招 生 启 事

华中科技大学激光技术与工程研究院是我国“六·五”至“九·五”国家重点科技攻关计划“激光技术”项目的主要牵头单位之一。1986年和1995年国家计委先后批准在华中科技大学建设了从事应用基础研究的“激光技术国家重点实验室”和从事产品研究开发的“激光加工国家工程研究中心”。经过30多年的艰苦奋斗,激光研究院现拥有物理电子学与光学工程硕士点、博士点、博士后流动站、国家级重点学科,已成为我国大功率激光器、激光加工系统和工艺、激光医疗设备的主要研究开发基地和高层次人才培养基地。

为了适应现代经济建设和社会发展对高层次人才的需要,加速培养一批国家急需的从事物理电子学与光电子学领域工作的高层次工程技术和工程管理人才,华中科技大学激光技术与工程研究院正在积极开展电子与信息工程领域的各类研究生的培养工作,包括:在职人员攻读工程硕士学位、高等学校教师在攻读硕士学位、同等学力人员攻读硕士学位、在职博士、全日制硕士和博士研究生。热烈欢迎相关单位集体报名办班和个人报名深造。欢迎垂询和报名,招生简章备索。

联系人:许德胜(副教授,院长助理)

地 址:湖北武汉市珞瑜路1037号;邮政编码:430074

电 话:027-87541782(兼传真);E-mail:xuds@hust.edu.cn

网 站:http://laser.hust.edu.cn