

基于载流子注入产热机制的半导体激光器热模型分析

张建伟^{1,2} 宁永强¹ 张 星¹ 张 建^{1,2} 刘 云¹ 秦 莉¹ 王立军¹

(¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)
²中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为解决常用经验计算公式参数复杂、产热项考虑不足等问题,采用优化的激光器热模型分析了激光器连续工作时有源区温度的变化并进行了实验验证。通过分析有源区注入载流子产热机制,建立了替代传统的热源计算公式的经验计算公式,考虑了载流子通过激光器内部渐变异质结时的势垒电阻以提高焦耳热计算精度。制作了电极尺寸为 10 μm 、台面尺寸为 20 μm 的半导体激光器件并对器件热特性进行了模拟。由于未考虑热载流子注入效应,利用传统经验公式得出的有源区热功率密度比提出的优化模型偏低,因而理论模拟的器件内部温升也偏低。对激光器出光特性进行测试,推导出不同注入电流下激光器内部有源区的温升。测量与理论分析对比表明,采用经验公式得出的结果比实际测试结果偏低,而优化的热模型解决了该问题,利用该方法得出的有源区温升与测试结果最大偏差仅为 0.2 K,且温升随注入电流的变化趋势一致。

关键词 光电子学;半导体激光器;Comsol;热模型;自产热效应

中图分类号 TN248.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1002003

Analysis of the Thermal Model Based on the Carrier Injection Mechanisms within the Semiconductor Laser

Zhang Jianwei^{1,2} Ning Yongqiang¹ Zhang Xing¹ Zhang Jian^{1,2}

Liu Yun¹ Qin Li¹ Wang Lijun¹

(¹ State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to solve the problems existed in the calculation of self heating in the active layer of semiconductor lasers, a new model for simulating the self-heating is introduced. The heat source induced by the carrier injection is analyzed. And the method for calculating the conductance of hetero-junction is also investigated to improve the precision of calculated joule heat. Edge emitting laser is fabricated, and the width of P-contact and stripe of fabricated laser are 10 μm and 20 μm , respectively. From the simulation result, the heat source density deduced from the traditional experience model is much lower than that from the optimized thermal model suggested. Thus a lower temperature rising is proposed in the experience model. By testing the shift of the lasing characteristics at different injected currents, the temperature of active layer is gained. Finally, the change of temperature with injected current obtained from simulation and testing is compared. The temperature rising gained from the experience model is lower than that of the experimental one. However, the new optimized model solves this problem. As a result of the optimized model, the maximum deviation between simulated temperature rising and tested one is about 0.2 K when the injected current is above the threshold current.

收稿日期: 2012-04-26; **收到修改稿日期**: 2012-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(60876036, 10974012, 11074247, 60876036, 61106047)和国家自然科学基金重点项目(90923037)资助课题。

作者简介: 张建伟(1985—),男,博士,主要从事半导体激光器结构设计及外延生长等方面的研究。

E-mail: zcjlw1985@126.com

导师简介: 宁永强(1964—),男,博士,研究员,主要从事垂直腔面发射半导体激光器方面的研究。

E-mail: ningyq@ciomp.ac.cn(通信联系人)

Key words optoelectronics; semiconductor lasers; Comsol; thermal model; self-heating effect

OCIS codes 000.3860; 120.6780; 140.3070; 140.5960

1 引 言

半导体激光器由于其体积小、效率高和寿命长等优点在工业、医学和军事领域得到了广泛应用^[1~3]。随着半导体激光器性能的不不断提高,激光器内部热效应对器件性能的影响越来越明显,成为限制激光器工作特性的关键因素之一。当激光器外加连续电流时,由于内部热积累严重,会引起器件有源区温度升高,导致器件出现光波长红移、阈值电流增大、输出功率降低以及寿命缩短等现象^[4]。实验上经常采用拉曼散射、反射调制或者光致发光等方法研究激光器工作时的温度分布^[5,6],但是由于仪器设备造价昂贵,操作复杂,故不具有普遍性,并且半导体激光器结构设计时也需要一种可以有效估计激光器热效应的方法,因而用理论分析的方法估计激光器自产热效应引起的器件温度变化常见报道^[7~10]。已报道的半导体激光器热分析模型将有源区产热量采用经典的热源计算经验公式来进行计算。该计算公式中未考虑热载流子注入效应对器件热源的影响及激光器内部异质结界面势垒电阻引起的焦耳热,因而所得出的理论分析结果往往比实验结果偏低^[7~9],并且该公式中的受激辐射及自发辐射量子效率等参数难以通过理论计算或实验测试精

确得出,常见的分析中多通过经验估计得出,实际上对于不同的有源区材料,这些参数均有差别,经验估计并不具有普遍性。

本文通过分析激光器有源区产热机制建立了一种新的有源区产热计算方法,并介绍了半导体激光器外延结构中各层材料及内部异质结界面电学特性的分析方法。然后,将建立的产热模型与 Comsol 软件的热电模型结合计算了激光器在不同注入电流下的有源区温升。通过实验测量半导体激光器器件内部有源区温度的变化证明所采用的热分析方法弥补了传统经验公式产热项考虑不足的缺点,并且热源计算所需的参数为器件性能参数,故更具体,也具有适用性。

2 器件结构

制作的边发射半导体激光器(EEL)工艺结构截面图及外延结构详图如图 1 所示。由于激光器腔面附近的产热主要影响出光功率等参数,而出光波长主要受有源区自产热效应的影响^[11,12],且对有源区内部温升的测量是通过测量出光波长实现的,因此计算时采用二维模型分析激光器内部自产热效应来估计有源区内部温升是合理的。

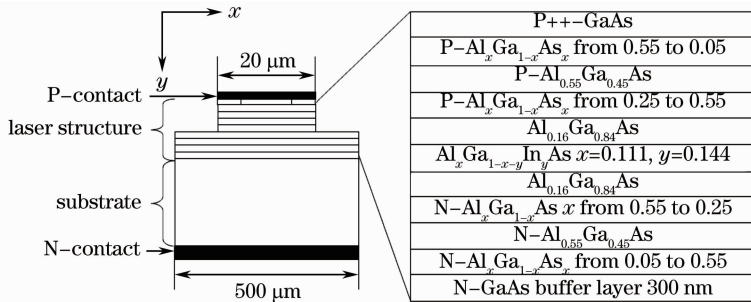


图 1 制作的 EEL 工艺结构及外延结构示意图

Fig. 1 Structure of fabricated EEL and its detail epitaxy structure

激光器外延结构有源区采用了高带阶的 AlInGaAs/AlGaAs 组合以实现对量子阱载流子的限制作用,提高器件高温工作特性。波导层采用渐变波导,在提高载流子的注入效率的同时还可以进一步提高对有源区载流子的限制作用。外延层异质结界面处采用组分渐变以降低异质结界面的势垒高度,减小器件的串联电阻。器件 P 面电流注入窗口宽度为 10 μm, P 侧面宽度为 20 μm,激光器条宽为 500 μm,腔长为 1000 μm。采用 Ti/Pt/Au 作 P

面电极, AuGeNi/Au 作 N 面电极。为提高器件的散热性能,采用芯片 P 侧接触热沉的封装方式(倒装法),最后将热沉封装在 TO3 管壳上进行性能测试。

3 理论模型

3.1 焦耳热计算

半导体激光器外加工作电流引起的体材料焦耳热以及欧姆接触层产热采用通常的材料焦耳热计算

公式：

$$Q_{\text{oul}} = j^2 \rho, \quad (1)$$

式中 Q_{oul} 为焦耳热功率密度, ρ 为各材料层的电阻率, 可由电导率计算公式推导出来; j 为注入电流密度。欧姆接触层电阻计算方法采用参考文献[8]中的方法。由(1)式可以看出, 精确分析焦耳热功率密度首先需要分析器件内部电流分布, 并需要合理地设置各层材料电导率。由于异质结界面的存在, 在该处的电导率需要单独考虑以提高电流分布以及焦耳热计算精度。

3.1.1 体材料电导率

半导体激光器采用的是 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 材料体系, 其电阻可以通过每层材料的电导率表达式推导出来。 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 层的电导率 σ 与掺杂浓度及电子迁移率有关, 即

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p, \quad (2)$$

式中 n 和 p 分别为该层材料的电子浓度及空穴浓度, q 为电子电荷量。常温下可以假设掺杂杂质全部电离, 这两个参数即可用材料掺杂浓度来代替。 μ_n 和 μ_p 分别为材料的电子迁移率和空穴迁移率。

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的电子及空穴迁移率随 Al 组分 x 的变化可用表达式描述^[13], 电子迁移率计算公式为

$$\mu_n = \begin{cases} 8 \times 10^{-3} - 2.2 \times 10^4 x + 10^4 x^2, & 0 \leq x \leq 0.45 \\ -255 + 1160x - 720x^2, & 0.45 \leq x \leq 1 \end{cases}. \quad (3)$$

空穴迁移率计算公式为

$$\mu_p = 370 - 970x + 740x^2. \quad (4)$$

3.1.2 异质结界面电导率

半导体激光器外延结构中层与层之间的界面形成异质结界面, 异质结界面处由于势垒电阻的存在导致其电流电压关系比较复杂, 处理方式与体材料不同。外加正向偏压时异质结的电流密度表达式为^[14]

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{\phi}{k_0 T}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

式中 A 为与半导体掺杂浓度及材料相关的量, T 为温度, ϕ 为异质结势垒高度, k_0 为玻尔兹曼常数, V 为异质结外加电压。

在计算异质结电导率时涉及到异质结能带的计算。异质结能带可通过泊松方程得出^[14]

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} = \frac{e^{-\psi} - 1}{L_D^2} - \frac{d^2 X}{dx^2}, \quad (6)$$

对于价带, $\psi = \frac{E_F - E_V}{k_0 T} - \ln \frac{N_V}{N_A}$, $L_D^2 = \frac{k_0 T \epsilon}{q^2 N_A}$, $X =$

$\frac{\chi + E_g}{k_0 T}$, E_F 为费米能级, E_V 为价带位置, N_V 为价带有效状态密度, N_A 为掺杂浓度, ϵ 为材料的介电常数, χ 为材料的电子亲和势。而对于导带, 将(6)式中的价带参数变为导带的对应参量并相应地改变一下正负号以保证 ψ 为正值即可。

3.2 载流子注入引起的有源区产热

激光器工作时, 有源区内部产热机理可用图2解释。图中 E_L 为量子阱禁带宽度, 即量子阱能级分裂后对应的最小禁带, E_B 为势垒层禁带宽度, j_b 为注入电流密度, η_i 为有源区的内量子效率, 即载流子注入到有源区后被量子阱利用产生辐射复合的几率。CB表示有源区内部的导带带边, VB表示价带带边。注入到有源区单位面积的总载流子数可以表示为 j_b/q 。

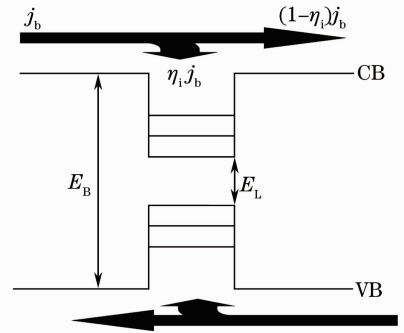


图2 外加电流时有源区各部分载流子的流向及其相互关系示意图

Fig. 2 Distribution of injected carrier and its relations while applying the voltage

电流注入到有源区后, 由于 $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$ 电流限制层比 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}$ 势垒层具有更高的能带位置, 势垒层比量子阱层具有更高的能带位置, 因而注入有源区的这些载流子以及由势垒注入到量子阱的载流子产生了能量差并会以热的形式将能量差耗散掉。这部分热源密度可以表示为

$$Q_{\text{therm}} = [(E_{\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}} - E_{\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}}) + (E_B - E_L) \eta_i] j_b / q, \quad (7)$$

式中 $E_{\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}}$ 为 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 的禁带宽度, x 为该层材料的 Al 组分。

由于注入的载流子不可能完全被量子阱俘获, 会有一部分电子或者空穴泄露到量子阱外部, 这部分载流子会在势垒区域与空穴或者电子复合产生光子。这部分光子能量较大, 很容易被吸收产热。这部分热功率密度可表示为

$$Q_{\text{leak}} = E_B (1 - \eta_i) j_b / q. \quad (8)$$

注入到量子阱的那部分载流子电子或者空穴不

会完全产生激光。当注入电流小于阈值电流时没有激光产生,可认为该部分注入电流引起的辐射复合或者非辐射复合都变为热量耗散掉,因此这部分能量也是热源的一部分,该部分产热的表达式为

$$Q_{rec} = \begin{cases} E_L \eta_i j_b / q, & j_b \leq j_{th} \\ E_L \eta_i j_{th} / q, & j_b \geq j_{th} \end{cases} \quad (9)$$

式中 j_{th} 为阈值电流密度。

另外,激光器正常工作时激光产生区域会引起较强的光吸收,激光产生区域主要集中在有源区,因而这部分产热也可以计入有源区产热里面。用 α_i , α_m 表示半导体激光器的内部损耗及腔面损耗,内部损耗即为吸收引起的光损耗,可通过变腔长实验测量出来;而腔面损耗则表示激光腔面的光损耗,利用前后腔面反射率可以计算出来。内部吸收损耗产热功率密度可表示为

$$Q_{abs} = \frac{\eta_i (j_b - j_{th}) \alpha_i E_L}{q(\alpha_i + \alpha_m)}, \quad j_b \geq j_{th}, \quad (10)$$

故激光器工作时的有源区热功率密度为(7)~(10)式各个产热项的综合,即

$$Q_{active} = Q_{thermal} + Q_{leak} + Q_{rec} + Q_{abs}, \quad (11)$$

实际上有源区量子阱及势垒能带宽度随温度会有一定的变化,然而其温度系数为 10^{-4} 量级^[15],因而在实际计算中可以不予考虑。

3.3 传统经验公式热源处理方法

根据文献[8,16],半导体激光器有源区内由于非辐射复合,辐射吸收以及自发辐射复合吸收产生

的内部热功率密度可用一个经验公式表示为

$$Q_{active} = \frac{V_j}{d_a} \{ j_{th} (1 - \eta_{sp} f) + (j_b - j_{th}) \times [1 - \eta_{ex} - (1 - \eta_i) f \eta_{sp}] \}, \quad (12)$$

式中 d_a 为有源区厚度, V_j 为节电压, $\eta_{sp} = 0.6$, $\eta_i = 0.9$, $\eta_{ex} = 0.7$, $f = 0.62$ 分别表示自发辐射量子效率、内量子效率、微分子子效率及逃逸系数。

3.4 Comsol 电热耦合计算模型

设定各层电导率及热源后,就可以利用 Comsol 内嵌的电热模型对器件电流及温度场分布进行计算。计算电流分布及传输采用拉普拉斯方程:

$$\nabla(\sigma \nabla U) = 0. \quad (13)$$

温度分布计算采用热传导公式:

$$\nabla(-k \nabla T) = Q - \rho^1 C_p \nabla T, \quad (14)$$

式中 ρ^1 为材料密度, C_p 为热容, k 为导热系数, Q 为热源的热功率密度。计算温度分布时采用稳态模型,设定激光器热沉初始温度及周围环境温度均为 288 K,与实际测试条件一致。激光器与空气界面处设定为辐射传热,辐射系数为 0.5。

4 计算及测试结果

4.1 计算结果及讨论

根据理论模型,可通过计算来确定半导体激光器在不同注入电流下的温度变化。表 1 为计算中使用的激光器及材料的基本参数,表中 x 表示 $Al_x Ga_{1-x} As$ 材料中的 Al 组分。

表 1 激光器及材料特性参数

Table 1 Characteristic parameters of the laser and material

Parameter	Value
Band gap of barrier E_B/eV	1.63
Band gap of well E_L/eV	1.49
Internal quantum efficiency η	0.9
Lasing wavelength λ/nm	830
Electron charge q/C	1.6×10^{-19}
Absorption efficient α_i/cm^{-1}	8
Reflectivity of the back mirror R_B	0.99
Reflectivity of the front mirror R_F	0.3
Boltzmann constant $k_0/(J/K)$	1.38×10^{-23}
Junction voltage V_d/V	1.5
Effective conduction band density of states N_C/cm^{-3}	$\begin{cases} 2.5 \times 10^{19} \times (0.063 + 0.083x)^{3/2}, & x < 0.45 \\ 2.5 \times 10^{19} \times (0.85 - 0.14x)^{3/2}, & x > 0.45 \end{cases}$
Effective valence band density of states N_V/cm^{-3}	$2.5 \times 10^{19} \times (0.51 + 0.25x)^{3/2}$
Heat capacity $C/(J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$0.33 + 0.12x$
Density $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$5.32 - 1.56x$
Thermal conductivity of $Al_x Ga_{1-x} As$ $k/(W \cdot cm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	$0.55 - 2.12x + 2.48x^2$
Electrical conductivity of Au $\sigma_{Au}/(\Omega^{-1} \cdot cm^{-1})$	2.1×10^6
Thermal conductivity of Au $k_{Au}/(W \cdot cm^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	301

为增加 Comsol 电热模型计算温度分布的准确性,首先需要精确设定各层材料的电导率。对半导体激光器来说,内部异质结势垒的处理方法会直接影响材料界面的电流分布,进而影响对激光器热源的计算。半导体激光器外延结构中有两个主要的异质结界面需要处理,即 P 型和 N 型掺杂的 GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As 界面。其他异质结界面处的能带差小而且载流子是从高能级流向低能级,势垒效应不明显。

根据(6)式计算了材料掺杂分子浓度为 $2 \times$

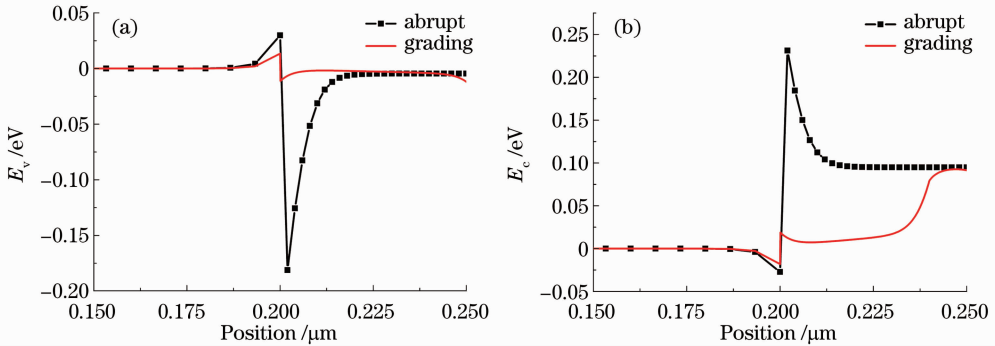


图 3 (a) P 型及(b) N 型 GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As 异质结界面处加入渐变层前后的势垒高度变化

Fig. 3 Changes of energy barrier due to the existence of grading layer for (a) P-doped and

(b) N-doped GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As heterojunction

图 4 为根据(5)式计算的 N 型掺杂半导体体材料及异质结的电流电压关系。由图可以看出,当加在异质结上的电压大于势垒高度时, J - V 曲线近似为线性关系。为方便比较,图 4 中取对数坐标。由于 N 型 GaAs/Grading/Al_{0.55}Ga_{0.45}As 异质结中存在势垒电阻,相同电压下该结构的电流密度要比 GaAs 和 Al_{0.55}Ga_{0.45}As 体材料的电流密度小很多。根据 J - V 曲线计算了 N 型渐变层的电导率为 $7.525 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

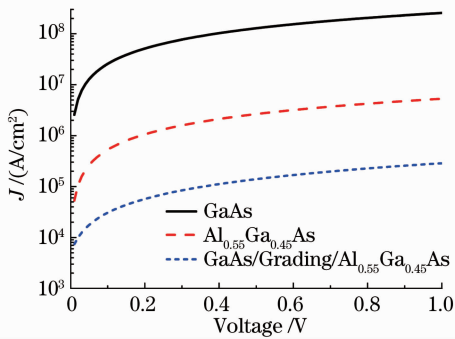


图 4 N 型掺杂 GaAs、Al_{0.55}Ga_{0.45}As 以及带有渐变层的 GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As 异质结的电流密度与电压关系图

Fig. 4 Current density versus voltage of N-doped GaAs、Al_{0.55}Ga_{0.45}As and GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As heterojunction

10^{18} cm^{-3} 时 P 型和 N 型 GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As 异质结界面处在没有渐变层和有 50 nm 渐变层时界面的能带结构,如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,加入渐变层后 P 型掺杂的异质结界面处势垒高度明显降低,势垒高度变为 0.02 eV,小于常温下的热电子激发能 (0.026 eV),因此 P 侧的渐变异质结界面处的势垒电阻可以忽略,将该渐变层当作体材料处理即可。N 型掺杂的异质结渐变界面势垒高度约为 0.11 eV,约为未加入渐变层时的势垒高度的一半,虽然降低了界面势垒,但仍然要考虑该势垒高度对电导率的影响。

将激光器结构及各层材料参数设定好之后,在 Comsol 软件参数设定中将热功率密度 Q_{active} 定义在有源区量子阱区域,且将其定义为全局变量,其值定义为(11)或(12)式。式中的注入电流密度设定为 Comsol 软件计算电流分布后得出的纵向(+y 方向)电流密度。利用 Comsol 的稳态电热模型计算出电流密度分布后,软件会根据计算公式自动得出所定义的 Q_{active} 在量子阱位置的分布情况并将其作为热源计算器件热分布情况。图 5 为根据上述方法得到的激光器注入电流为 20 mA 时利用传统经验公式(虚线)及优化的新模型(实线)分别得到的有源区热源功率密度 Q_{active} 在横向的分布情况。

由图 5 可以看出,相同注入电流下传统经验公式计算得到的热功率密度值比利用优化后的热模型所得到的值偏小。这主要是因为优化后的热源功率密度在(11)式中考虑了载流子由势垒层进入量子阱后热载流子注入引起的产热,而传统的经验公式(12)式并未考虑该产热项,因而,据此可以推断,采用传统经验公式计算出的内部温升要比优化的热模型得出的结果低。

图 5 中有源区热源功率密度不只存在于电流注入窗口位置,在两侧也有热量产生,并且离中心位置

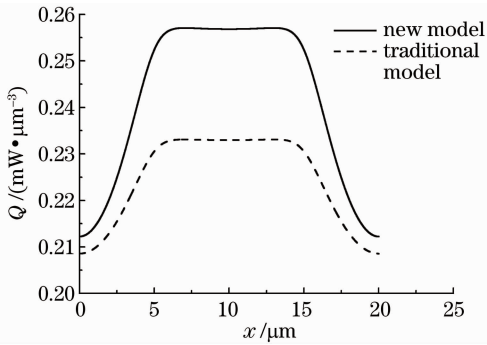


图 5 注入电流为 20 mA 时有源区热源功率密度横向分布

Fig. 5 Distribution of the heat source density within the active layer of laser when the injected current is 20 mA

越远产热量越小,由(7)~(12)式可以看出,热源功率密度与注入电流成正比。由于激光器外延及工艺结构中未特意引入电流限制结构,因而电流在激光器横向会存在扩散现象,因此热源功率密度 Q 的这种分布形式是由注入电流的扩散效应引起的。激光器结构中有源区的中心区域对应电流注入窗口区域,该区域的电流占注入电流的主要部分,注入载流子的受激辐射复合也主要发生在这部分区域,为了获取激光器激射波长受温度变化的影响,计算有源区温度时应主要考虑该区域的温度变化。

图 6 为利用 Comsol 电热模型计算的在不同注入电流下采用两种不同的热源模型得到的半导体激光器横向中心位置对应的各外延层的温度分布情况(图 1 中 $+y$ 方向),有源层左侧为 P 型掺杂外延层,右侧为 N 型掺杂外延层, $y=0$ nm 处对应器件与热沉界面, $y=3500$ nm 处为器件衬底与外延层界面。由于 N 型掺杂层距离热沉远,热量传输慢,并且 N 型 GaAs/Al_{0.55}Ga_{0.45}As 渐变异质界面势垒电阻较大,产生的焦耳热大,因而 N 侧衬底与外延层界面处的温度比有源区及 P 侧都要高,如图 6 所示。N 型外延层一侧接触的是衬底层,而 P 型外延层接触的是热沉,因而 P 型掺杂外延层一侧的导热速率远大于 N 型外延层,导致图 6 中该区域纵向温度分布比较陡峭而 N 型掺杂外延层内纵向温度分布较为平缓。由图 6 可以看出,虽然激光器内部温度分布趋势一致,但是采用两种不同热源模型得到的激光器温度数值有明显差别。热源功率密度采用传统经验公式计算时,得到的激光器内部温升比采用优化后的热模型计算得到的结果要低,跟前面利用热源分布预测的结果相一致。并且在距离热沉的位置越远的外延层,两种模型得到的温度差别也就越大。

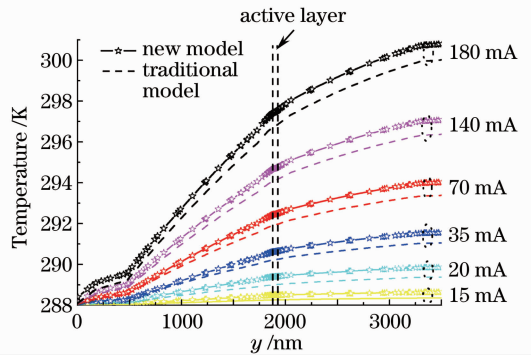


图 6 Comsol 电热模型计算的半导体激光器在不同注入电流下的纵向温度分布,起点为 P-contact 层

Fig. 6 Calculated temperature distribution in different injected currents along the epitaxy layers of semiconductor laser by Comsol, starting from the P-contact

4.2 器件测试结果及讨论

图 7 是制作的 EEL 器件测试的功率-电流-电压 ($P-I-V$) 曲线及注入电流在 100 mA 时的发光光谱图。测试时环境温度为 15 °C,器件的阈值电流为 53 mA,串联电阻为 0.63 Ω,斜率效率为 0.7 W/A,在连续(CW)注入电流 140 mA 时器件的输出功率为 54 mW,器件的转换效率为 22%,连续注入电流为 100 mA 时器件的出光波长为 829 nm,光谱半峰全宽约为 1.2 nm。

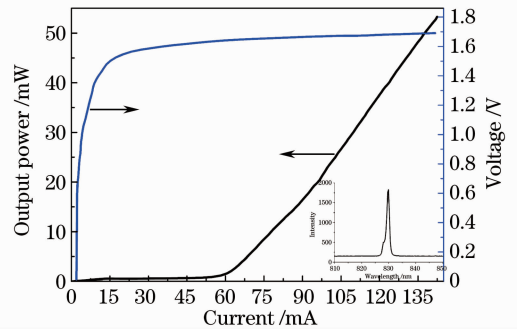


图 7 半导体激光器连续 CW 工作特性

Fig. 7 CW $P-I-V$ characteristic of semiconductor lasers

为了研究半导体激光器工作时有源区内部温度变化,首先变温测量激光器有源区不同温度下的出光波长。采用占空比为 0.006%,脉宽 60 ns 的脉冲激光电源给激光器加上电流以消除自产热效应。变温测量时将封装好的激光器管脚插入测量专用的温控模块电流接触孔,且该模块接有半导体制冷器 (TEC),使用 Laird 公司的 MTTC-1410 系列温控器控制激光器底座及热沉的温度。待温度稳定后给激光器外加窄脉冲电流并测量半导体激光器的出光波长。调节温控器变换器件温度,得到出光波长随

温度的漂移曲线。波长测量采用 Ocean Optics 的 USB2000+ 光纤光谱仪, 用 200 μm 口径光纤接受激光器的出射激光。由于该测试条件下可以忽略激光器的自产热效应, 因而此时的激光器温度可以代表相同出光波长下激光器内部有源区的温度。通过出光波长与器件内部温度的关系即可反推出不同注入电流下激光器的内部温升。

图 8 为变温测量的激光器出光波长随器件温度的变化关系。激光器外加 100 mA 的纳秒脉冲电流, 图中 15 $^{\circ}\text{C}$ 时对应的出光波长为 827.8 nm。可以看出激光波长随温度线性变化, 拟合该曲线得到曲线斜率为 0.262 nm/K, 该值即为激光器有源区出光波长的温漂系数。

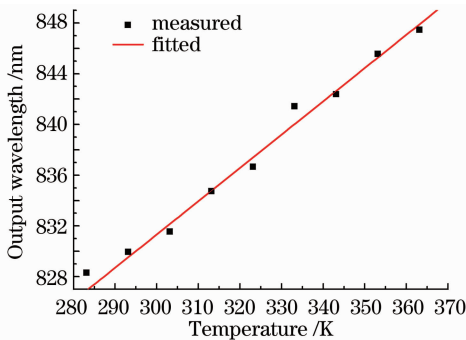


图 8 半导体激光器在不同温度下的激光波长

Fig. 8 Lasing wavelengths of semiconductor lasers operating at different temperatures

图 9 为激光器连续工作时测量的激光器的出光波长随注入电流的关系。随着注入电流的增加, 激光器内部有源区自产热效应增强引起器件出光波长红移。由于器件在阈值电流附近时(60~70 mA)激光光谱较差, 出现了多个激光波长峰叠加的形式, 对其进行高斯拟合后所得到的中心波长会受到这种光谱的影响, 从而导致该处出光波长随注入电流的变化与拟合曲线偏差较大, 因而由这两点处的出光波长推断出的有源区内部温度误差较大。另外, 测量中有些数据点偏离拟合曲线较大, 故采用图 9 中拟合曲线分析激光器实际温升以正确表征器件温升趋势。

根据图 8 及图 9 对半导体激光器热特性的测试, 利用波长-温度拟合曲线即可推算出在不同注入电流下的有源区温升。推算出的有源区内部温升与注入电流关系及利用 Comsol 电热模型计算出的结果对比如图 10 所示。

图 10 显示了在阈值电流附近有源区实际温升与理论计算的温升有较大差异, 由于阈值电流附近

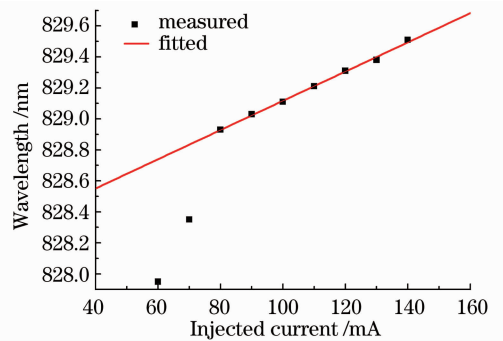


图 9 所制作的半导体激光器不同工作电流下的激光波长

Fig. 9 Lasing wavelengths of the fabricated semiconductor lasers working at different injected currents

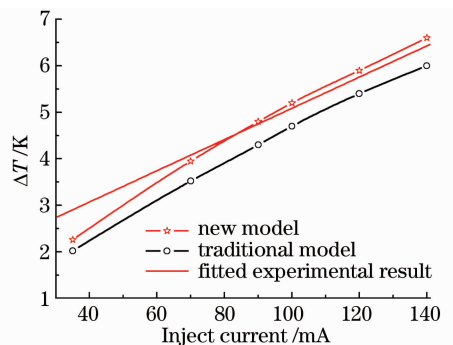


图 10 理论计算及实际测量的激光器内部温升与注入电流关系比较

Fig. 10 Comparison between simulated and measured temperature change of laser at different injected currents

根据出光波长估计有源区温度时误差较大, 因而该注入电流位置处的测试结果不足以说明理论模拟结果是否可靠; 当注入电流继续增加, 有源区内部的温升与理论计算结果逐渐相符。注入电流大于 80 mA 后, 采用传统经验公式计算热源功率密度得到的不同注入电流下的有源区温升比实际测量结果普遍偏低, 在前面的模型分析中认为这是由于该公式未考虑热载流子注入产热项引起的。采用优化后的热模型计算得到的相应的有源区温升与实际测量结果吻合较好, 注入电流大于 80 mA 时最大偏差小于 0.2 K, 证明提出的热模型具有很好的可靠性。并且图 10 中由于热载流子注入产生的热源密度与注入电流密度成正比, 在注入电流较大时, 使用传统经验公式与优化模型得出的结果差别较大。采用优化后的热模型理论计算的有源区温升比实际测试结果稍稍偏高, 这可能是由(9)式中的自发辐射复合产热项造成的。器件实际工作时载流子自发辐射复合产生的光会有一部分输出到激光器外部, 如果将其完

全作为产热项处理,则会使得计算出的有源区产热量偏高,从而引起理论计算的温升比实际测试偏高,而理论模拟结果与实际测试结果偏差小于0.2 K,这说明自发辐射复合项产生的影响不大,模型中的处理是比较合理的。

器件测试及理论分析结果对比表明,所使用的热模型实现了可靠分析半导体激光器有源区温升的目标。激光器工作电流在80 mA以上时,理论模拟与实际测量的器件内部温升差别小于0.2 K。

5 结 论

通过对激光器载流子注入引起的各项产热机制进行分析,建立了新的激光器热模型,分析了半导体激光器外加连续电流工作时的内部有源区温度变化,并将其与传统的经验公式分析方法进行了对比。制作了10 μm 电流注入窗口,20 μm 台面的边发射半导体激光器,利用建立的二维半导体激光器模型对器件工作时内部有源区温度变化进行了模拟。对比结果表明,优化后的激光器热模型解决了常用的传统经验公式中存在的参数较为复杂且热源考虑不足的问题。理论计算在阈值电流附近(60 mA)的温升与实际测试的结果偏差较大,这是由阈值电流附近激光器出光光谱较差导致的测量误差引起的。而当注入电流超过80 mA时理论计算结果与实际测量结果最大偏差仅为0.2 K。由于激光器正常工作时的电流一般是阈值电流的2倍左右,因此采用的激光器热分析方法可以有效地预测激光器正常工作时的内部有源区温升。

参 考 文 献

- 1 H. König, G. Groninger, P. Brick *et al.*. Brilliant high power laser bars for industrial applications [C]. *SPIE*, 2008, **6876**: 687616
- 2 Zhao Yihao, Wang Jun, Wang Cuiluan *et al.*. Study of high-power broad area distributed-feedback laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802005
赵懿昊,王 俊,王翠鸾等. 大功率宽条分布反馈激光器研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802005
- 3 L. M. Hu, Z. H. Lu, B. Wang *et al.*. Closure of skin incisions by laser-welding with a combination of two near-infrared diode lasers; preliminary study for determination of optimal parameters [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2011, **16**(3): 038001

- 4 H. J. Yi, J. Diaz, I. Eliashevich *et al.*. Temperature dependence of threshold current density J_{th} and differential efficiency η_d of high power InGaAsP/GaAs ($\lambda=0.8\ \mu\text{m}$) lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(3): 253~255
- 5 J. M. Rommel, P. Gavrilovic, F. P. Dabkowski *et al.*. Photoluminescence measurement of the facet temperature of 1 W gain-guided AlGaAs/GaAs laser diodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, **80**(11): 6547~6549
- 6 P. W. Epperlein, G. L. Bona, P. Roentgen. Local mirror temperatures of red-emitting (Al) GaInP quantum well laser diodes by Raman scattering and reflectance modulation measurements [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(6): 680~682
- 7 Xie Hongyun, Chen Guoying, An Zhenfeng *et al.*. Temperature distribution analysis of high power laser arrays in static working condition [J]. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2003, **24**(10): 1084~1088
谢红云,陈国鹰,安振峰等. 大功率半导体激光器阵列稳态温度分布分析[J]. *半导体学报*, 2003, **24**(10): 1084~1088
- 8 Hu Liming, Li Zaijin, Qin Li *et al.*. Thermal analysis of high-power, high-duty-cycle laser diode array [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1055~1060
胡黎明,李再金,秦 莉等. 高占空比大功率半导体激光阵列热特性分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1055~1060
- 9 Wu Bin, Li Yi, Hu Shuangshuang *et al.*. Design and thermal characteristics analysis of uncooled 980 nm semiconductor laser packaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 799~803
武 斌,李 毅,胡双双等. 非制冷980 nm半导体激光器封装设计与热特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 799~803
- 10 Ding Xiaochen, Zhang Pu, Xiong Lingling *et al.*. Thermal reaction of high power semiconductor laser with voids in solder layer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902006
丁晓尘,张 普,熊玲玲等. 大功率半导体激光器贴片层空洞热效应影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902006
- 11 S. Todoroki. Influence of local heating on current optical output power characteristics in $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, **60**(1): 61~65
- 12 F. P. Dabkowski, A. K. Chin, P. Gavrilovic *et al.*. Temperature profile along the cavity axis of high power quantum well lasers during operation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **64**(1): 13~15
- 13 P. Jansen, N. Maene, W. D. Raedt *et al.*. AlGaAs/GaAs: High electron mobility transistor simulations with PRISM [J]. *European Transactions on Telecommunications*, 1990, **1**(4): 433~437
- 14 Zhang Jianwei, Ning Yongqiang, Wang Zhengfu *et al.*. Optimization of p-DBR of high power vertical cavity surface emitting laser with low series resistance [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(1): 65~70
张建伟,宁永强,王贞福等. 大功率垂直腔面发射激光器中减小p-DBR串联电阻的途径[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(1): 65~70
- 15 I. Vurgaftman, J. R. Meyer, L. R. Ram-Mohan. Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2001, **89**: 5815~5875
- 16 I. Camps, J. C. González, M. Sánchez. Calculation of the thermal resistance and temperature distribution in blue-green semiconductor lasers [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1997, **12**(12): 1574~1578

栏目编辑:宋梅梅