

激光与光电子学进展

基于封装原型的半导体激光器热分析建模研究

马泽坤, 林涛*, 赵荣进, 孙婉君, 穆妍, 李亚宁, 解佳男

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 为了在热仿真时得到可靠的有源层温度分布,采用基于芯片封装结构原型的 808 nm 高功率半导体激光器单管有限元模型,引入条型区、热沉覆铜层和键合引线等影响因素,研究了高功率半导体激光器单管稳态工作时有源层的热分布特性。在简易模型的基础上分别单独引入并计算了条型区、热沉覆铜层和键合引线对器件有源层平均温度的影响,将这些影响因素同时引入得到了本文新模型,并使用该模型和简易长方体堆叠模型仿真了半导体激光器单管稳态工作下的温度分布,得到有源层的平均温度分别为 42.089 °C 和 46.405 °C,使用实验数据计算得到器件有源层的平均温度为 41.708 °C,简易模型的仿真结果误差为 11.26%,本文模型的仿真结果误差为 0.91%。对同一封装结构参数、不同转化效率和波长的多个高功率半导体激光器单管进行了热特性计算,进一步验证本文模型仿真结果的准确性。

关键词 激光器; 高功率半导体激光器; 有限元模型; 单管; 热分析; 有源层平均温度

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2314003

Research on Thermal Analysis Modeling of Semiconductor Laser Based on Package Prototype

Ma Zekun, Lin Tao*, Zhao Rongjin, Sun Wanjun, Mu Yan, Li Yaning, Xie Jianan

School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract In this paper, a finite element model of an 808-nm high-power semiconductor laser single tube based on the actual package structure of the chip is used to obtain a reliable temperature distribution of the active layer during thermal simulation. The thermal distribution characteristics of the active layer during steady state operation are investigated by introducing various influence factors, such as ridge, copper layer on heatsink, and bonded wires. First, based on the simple finite element model, the effects of the stripe region, copper heatsink layer, and bonding wire on the average temperature of the active layer of the device were introduced and calculated. Then, these influence factors were simultaneously used to obtain the new model. The average temperatures of the active layer obtained with the simple model and the new model were 42.089 °C and 46.405 °C, respectively. The average temperature of the active layer of the device calculated using experimental data of output wavelength variation with injection current was 41.708 °C. Simulation results of the simple model showed an error of 11.26%. The error of simulation results of the proposed model is 0.91%. Finally, the thermal characteristics of several high-power semiconductor laser single tubes with the same package structure parameters and different conversion efficiencies and wavelengths were calculated to verify the accuracy of the simulation results.

Key words lasers; high power semiconductor lasers; finite element model; single tube; thermal analysis; average temperatures of the active layer

OCIS codes 140.5960; 140.6810; 310.6805

收稿日期: 2021-03-10; 修回日期: 2021-03-18; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2020GY-044)、西安市科技计划项目(2020KJRC0077, 2019219814SYS013CG035)

通信作者: *littlintao@163.com

1 引言

激光器的应用需求日益增长,如激光泵浦、材料处理、光通信、医疗应用和激光打印等,这些应用中都需要较高的输出功率^[1-3]。而高功率半导体激光器的性能受结温的影响较大,过高的结温会使器件的阈值电流升高,转换效率和输出功率降低^[4-5]。基于各种各样的应用场景,需要不同的设计来满足半导体激光器输出功率、工作温度和寿命的需要。激光器的输出功率主要受废热生成的制约^[6]。提高激光器输出功率有两个关键途径:一是最大限度地提高转换效率,即减少废热生成;二是尽可能地降低热阻,即降低结温^[7-8]。使用有限元方法(FEM)进行激光器温度特性计算已经应用于大量研究中。2002年,Labudovic^[9]基于有限元分析方法,提出一种高功率半导体激光器内部传热和残余应力三维模型,研究得出使用金刚石热沉比传统氮化铝(AIN)热沉的散热能力更好。2014年,李江等^[10]使用有限元模拟和实验测试的方法,分析微通道冷却巴条激光器的热特性,对结果误差定性分析。2015年,Bezotosnyi等^[11]使用有限元方法建立高功率半导体激光器的三维热模型,结合实验确定了优化设计后的金刚石热沉可以使器件可靠运行时的热载荷提高至30 W。2016年,Ni等^[12]通过使用有限元分析方法,研究了高功率半导体激光器单管的三明治结构热沉材料对器件热特性的影响。2019年,Deng等^[13]应用有限元分析方法模拟并结合实验分析了高功率半导体激光器阵列的温度分布和热阻。

结合实际器件进行建模,是进行有限元分析的首要步骤。在先前的一些工作中^[11,14-16],对芯片及其封装结构使用了简化的长方体结构进行建模,这种方式的优点是建模简单,便于分析和计算。但是,该方法没有具体考虑芯片及其封装的实际结构,仿真得到的有源层温度不完全可靠。本文在建模时,考虑了芯片的条形结构、热沉覆铜层及键合引线对仿真结果的影响,并结合实验数据对模型仿真结果的准确性进行验证。

2 基本原理

2.1 模型内热源分布

半导体激光器的热生成过程如下:当工作电流注入到有源层时,电子和空穴的非辐射复合,会放

出一定热量;当注入电流达到阈值电流后,光子吸收的过程包括非辐射复合再吸收以及有源层内自由载流子的吸收,由于光子的散射、衍射和吸收,热量会进一步提升;随着注入电流的不断升高,由于各层材料的电阻损耗,会产生焦耳热。

激光器工作产生的热量分为有源层内产生的热量和有源层外的其他层产生的焦耳热^[17-18]。

$$g(x, y, z) = g_a(x, y, z) + g_j(x, y, z), \quad (1)$$

式中, $g(x, y, z)$ 表示激光器内总的热功率, $g_a(x, y, z)$ 表示有源区内的热功率, $g_j(x, y, z)$ 表示焦耳热。

$$g_a(x, y, z) = \left[(A_{nr} + C_A n^2) n + \frac{c}{n_{eff}} a_{int} (I_f + I_b) + (1 - 2\beta) B_r n^2 \right] h\nu, \quad (2)$$

等式右边的第一项为有源区内部的非辐射复合和俄歇效应产生的热,第二项为缺陷处散射的辐射吸收产生的热,第三项为自发辐射吸收产生的热量。自发辐射过程的随机性使得这种热源分布与热源产生的热量穿过有源层附近层的程度很难测量,因此在计算时,假设这部分由自发辐射产生的热量也存在于有源区内。所有自发辐射产生的光子在没有耦合到向前行波和向后行波时,都会在有源层内转化为热量。 A_{nr} 为非辐射复合系数, C_A 为俄歇复合系数, n 为载流子浓度, c 为真空中光速, n_{eff} 为有效折射率, a_{int} 为有源区的内损耗, I_f 为向前行波的光子密度, I_b 为向后行波的光子密度, B_r 为辐射系数, β 为自发辐射值, $h\nu$ 为光子能量。

$$g_j(x, y, z) = \frac{I^2 R_s}{V}, \quad (3)$$

焦耳热与芯片中各层材料的电阻值紧密相关。波导层低掺杂,衬底相较于其他层有较高的厚度,以及P型掺杂的限制层中空穴较低的迁移率,使得这些层中的电阻值较高。(3)式中, I 为注入电流, R_s 为器件的串联电阻, V 为芯片中各层材料的总体积。

半导体激光器运行时,内部的热量主要通过热传导的方式进行传递,激光器稳态工作时,热传导方程可以表示为

$$K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0, \quad (4)$$

式中, T 为温度, K 为具体材料的热导率, Q 为热功率。

激光器工作时,内部的主要热量生成集中分布

在有源层。Wu 等^[19]将热源按照一定的比例分布于各界面层进行计算。计算得到的有源区在各热源作用下的热阻与将热源集中分布在有源层时的热阻间仅有 0.6% 的误差。证明了将热源集中设置于芯片的有源层的假设对求解有源层温度时的合理性。

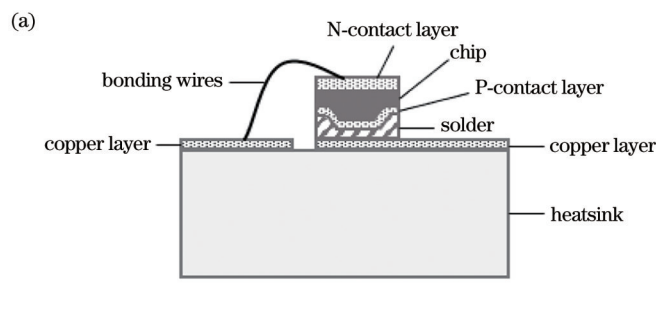
2.2 有源层温度计算

半导体激光器有源层温升,可以按如下公式进行计算:

$$\frac{\lambda_{T_2} - \lambda_{T_1}}{\Delta T} = k, \quad (5)$$

式中,在同一注入电流 I 下, λ_{T_2} 表示温度为 T_2 时激光器工作波长, λ_{T_1} 表示温度为 T_1 时激光器工作波长, ΔT 为 T_1 和 T_2 之间的温度差, k 为波长的温度系数。

$$\frac{\lambda_{I_2} - \lambda_{I_1}}{k} = \Delta T, \quad (6)$$



式中, λ_{I_2} 和 λ_{I_1} 分别表示在 TEC 温度为 25 °C、输入电流 $I = 10$ A 及 $I = 0 \sim 2$ A 时激光器工作波长, k 为波长的温度系数, ΔT 为有源层的温升。使用(5)式求解出温度系数 k , 代入(6)式中, 求解出有源层的温升 ΔT 。

$$T_0 + \Delta T = T_{\text{active}}, \quad (7)$$

式中, T_0 为激光器有源层的初始温度, T_{active} 为器件稳态工作时有源层的温度。

3 模拟分析与验证

建模和仿真的对象为条宽为 390 μm COS 封装 808 nm 条形单管激光器。条形半导体激光器具有功率高、制造工艺简单和成本较低等优势^[20]。封装原型结构如图 1 所示, 使用的器件各层结构和材料参数如表 1 所示。

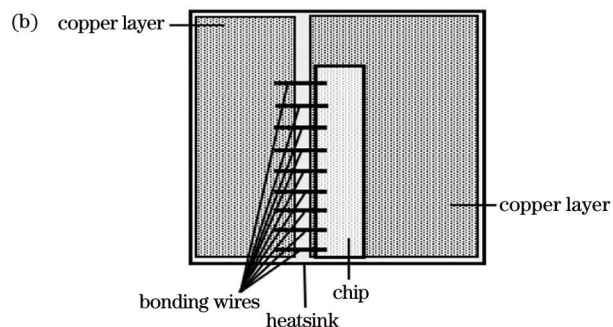


图 1 芯片及其封装结构示意图。(a)主视图;(b)俯视图

Fig. 1 Schematic diagram of chip and its package structure. (a) Main view; (b) top view

表 1 各层结构及材料参数

Table 1 Structure and material parameters of each layer

Layer	Material	Thickness / μm	Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
N-contact	Au	0.4	315
N-contact	Au	0.1	315
N-contact	Ge	0.1	64
N-contact	Ni	0.1	60.7
Substrate	GaAs	100	46
Lower cladding layer	$\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$	1.1	11
Lower waveguide layer	$\text{Al}_{0.33}\text{GaAs}$	0.6	12.04
Active layer	$\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.795}\text{In}_{0.085}\text{As}$	0.008	4
Upper waveguide layer	$\text{Al}_{0.33}\text{GaAs}$	0.4	12.04
Upper cladding layer	$\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$	1.1	11
Cap	GaAs	0.15	46
Insulating layer	SiO_2	0.2	1.28
P-contact	Ti	0.1	17
P-contact	Pt	0.1	69.1
P-contact	Au	0.1	315
P-contact	Au	0.4	315
Solder	AuSn	5	57
Copper	Cu	80	398
Heatsink	AlN	460	120

使用简易模型对器件 1 进行了稳态热仿真,仿真前进行如下设置^[21]。

(1) 激光器运行时,将所有的热功率集中设置在有源层;

(2) 有限元模型初步仿真的对象为器件 1,808 nm 单管 COS 封装的半导体激光器,腔长为 2 mm,条宽为 390 μm,条形区的高度为 1 μm,热沉底部温度 25 °C,注入电流 10 A 时,器件的输出功率为 9.09 W,转化效率为 50.70%,产生的热功率为 8.84 W;

(3) 考虑了空气对流散热的影响,将除热沉底

部外的其他所有面设置为对流面,选取空气在室温下的自然对流系数 6 W/(m²·K);

(4) 8.84 W 的热功率全部加在有源层,有源层的体积为 6.24 × 10³ μm³,即有源层上添加的热功率密度为 1.4165 × 10¹⁵ W/m³;

(5) 设置热沉底部为恒温 25 °C,器件实际使用时需要放置在热电冷却装置(TEC)上,正常使用时 TEC 温度一般为 25 °C。

得到的热特性仿真计算结果如图 2 和图 3 所示。

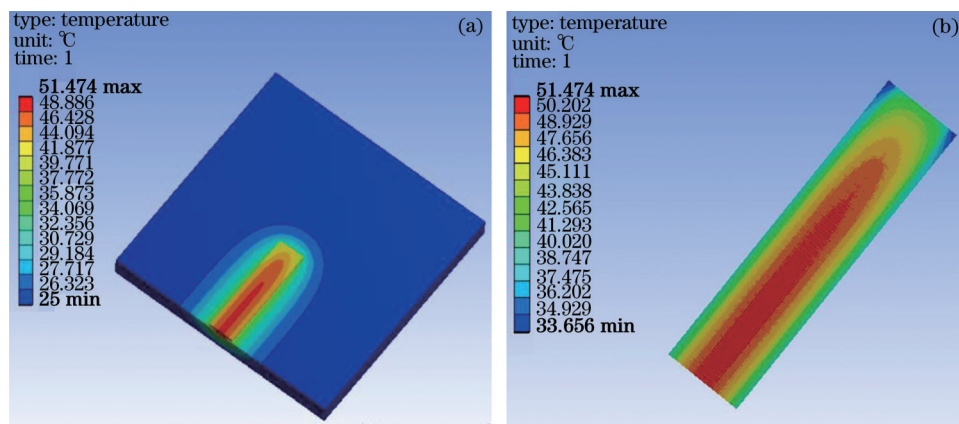


图 2 简易模型稳态热仿真结果。(a)模型整体温度分布;(b)有源层温度分布

Fig. 2 Results of steady-state thermal simulation of simple model. (a) Overall temperature distribution of model; (b) temperature distribution of active layer

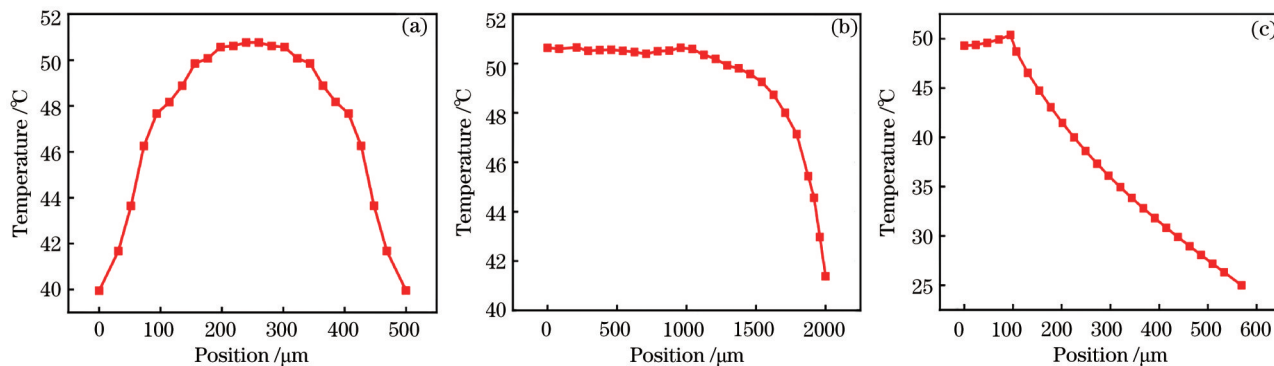


图 3 简易模型温度分布结果。(a)前腔面温度分布;(b)沿腔长方向温度分布;(c)前腔面垂直方向温度分布

Fig. 3 Temperature distribution results of the simple model. (a) Temperature distribution at the front cavity surface; (b) temperature distribution along the cavity length direction; (c) temperature distribution in the vertical direction of the front cavity surface

分别为简易模型单独引入条形结构、热沉覆铜层和键合引线,通过热特性仿真计算得到在简易模型基础上引入单一影响因素时,芯片有源层平均温度的变化。

由图 4 可知,条形结构、热沉覆铜层和键合引线都会对有源层的平均温度产生影响,而简易模型忽略了这三项因素。图 4(a)表明,有源层的平均温度

随着条形区宽度的增加而逐步降低,这是由于随着条形区宽度的增加,芯片垂直散热的面积得到扩展,芯片有源层热量传导的垂直散热路径拓宽,产生的热量可通过垂直的传热路径直接传递给热沉,而不需要过多依赖横向传热,从而使芯片有源层的平均温度降低。由此,可以得出,为了缩小仿真结果与芯片实际工作温度的差距,条形结构在建模中

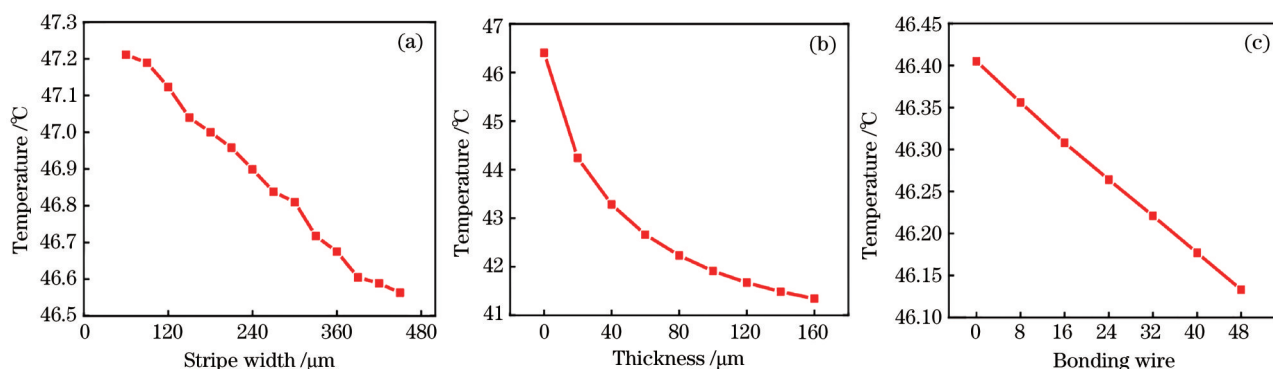


图 4 有源层平均温度与引入单一影响因素时的关系。(a)条形区宽度;(b)热沉覆铜厚度;(c)键合引线层数量

Fig. 4 Simulation results of the average temperature of the active layer with single influence factor. (a) Stripe width; (b) thickness of copper layer on heat-sink; (c) number of bonding wires

是需要考虑的必要因素之一。图 4(b)表明,热沉覆铜层的厚度变化对有源层的温度变化有直观影响。随着热沉覆铜层厚度增加,有源层平均温度明显降低,热沉覆铜层的热导率为 398 W/mK,而芯片的主体材料为砷化镓(GaAs),热导率远低于铜,因此,热沉覆铜层的引入在缩小与芯片有源层实际温度误差上有着重要作用,恰当的覆铜层厚度能够起到增强散热的效果^[12]。图 4(c)表明,随着键合引线数量的不断增加,有源层的平均温度呈下降趋势,这是由于引线数量增多会导致引线与芯片及热沉覆铜层间的接触面积增大,由于引线材料的导热系数为 315 W/mK,明显高于芯片材料和热沉覆铜层材料的导热系数,这使得芯片产生的一部分热量通过引线传递至热沉覆铜层,有源层的平均温度降低。键合引线的引入缩小了仿真结果与实际温度间的误差。在简易模型

的基础上,引入条形结构、热沉覆铜层和键合引线,建立复杂模型。复杂模型的整体结构和芯片内部的局部结构放大如图 5(b)和(d)所示。

图 5 为简易模型和复杂模型的对比。图 5(a)为简易模型,简易模型整体由长体结构堆叠而成。图 5(b)为复杂模型,复杂模型引入了热沉覆铜层、条形区和键合引线等影响因素,N型金属化层和P型金属化层分别通过 48 根直径为 25 μm 的金线和金锡合金(AuSn)焊料与热沉覆铜层相接,在一定程度上增加了建模和网格划分的复杂性。图 5(c)和图 5(d)为简易模型和复杂模型芯片内部结构的局部放大图。相较于简易模型,复杂模型芯片内部设置了条形区,考虑了 SiO₂ 隔离介质层,模型从下至上依次为:焊料层、P 型金属化层(Au 层/Au 层/Pt 层/Ti 层)、Cap 层与 SiO₂ 层、上限制层、上波导层、有源层和下波导层。

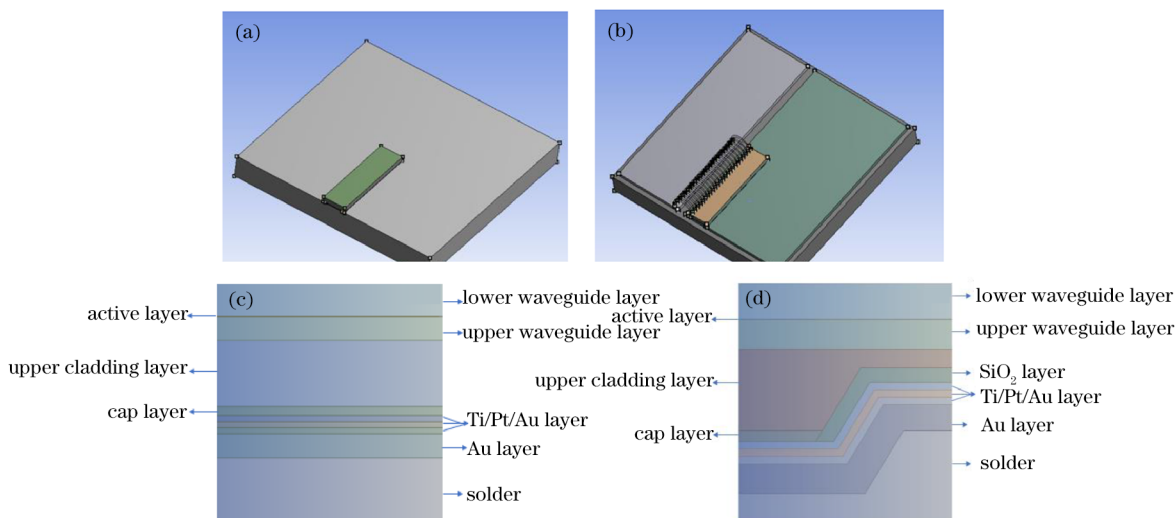


图 5 简易模型与复杂模型对比。(a)简易模型;(b)复杂模型;(c)简易模型芯片内部结构局部放大;(d)复杂模型芯片内部结构局部放大

Fig. 5 Comparison of simple model and complex model. (a) Simple model; (b) complex model; (c) local enlargement view of internal structure of simple model chip; (d) local enlargement view of internal structure of complex model chip

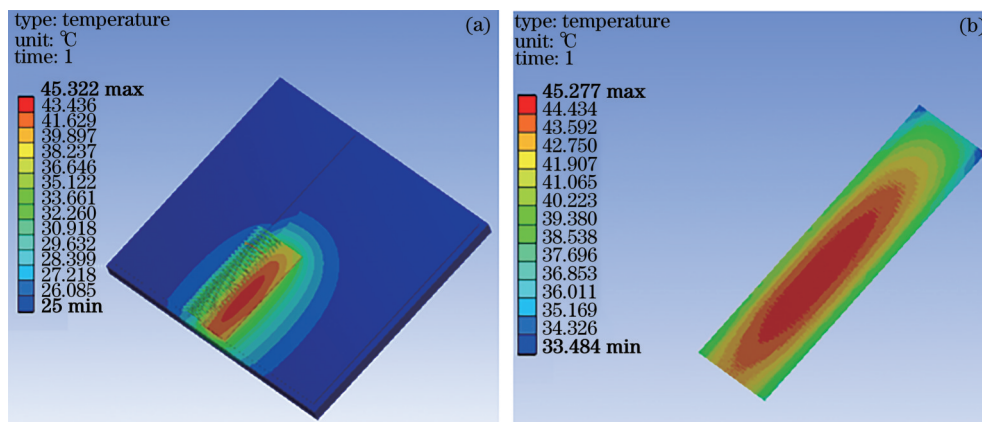


图 6 复杂模型稳态热仿真结果。(a)模型整体温度分布;(b)有源层温度分布

Fig. 6 Results of steady-state thermal simulation of the complex model. (a) Overall temperature distribution of the model; (b) temperature distribution of the active layer

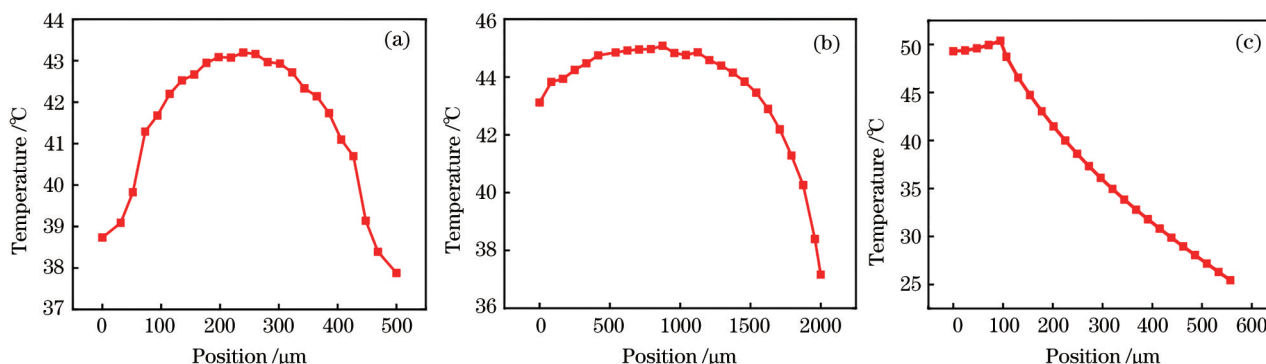


图 7 复杂模型温度分布结果。(a)前腔面温度分布;(b)沿腔长方向温度分布;(c)前腔面垂直方向温度

Fig. 7 Temperature distribution results of the complex model. (a) Temperature distribution of front cavity surface; (b) temperature distribution along the cavity length direction; (c) temperature distribution in vertical direction of front cavity surface

图 6 和图 7 为复杂模型的仿真结果。对比图 6 与图 2, 两种模型的最高温度均出现在有源层, 简易模型和复杂模型计算得到的有源层平均温度分别为 46.570 °C 和 42.694 °C。对比图 7 和图 3, 复杂模型和简易模型的前腔面温度的分布规律一致, 但在沿腔长方向温度分布却有较大区别。在简易模型中, 最高温度出现在前腔面处, 随着位置的递进, 温度呈递减趋势; 而在复杂模型中, 最高温度出现在沿腔长方向的中心位置, 温度曲线呈现先增高后递减的趋势。造成这种差别的原因是, 在建模时, 简易模型将芯片与热沉做了边沿对齐的处理, 而在实际封装时, 热沉覆铜层的边沿与热沉边沿会有 100 μm 的距离。芯片焊接在热沉覆铜层上, 丰富的散热路径, 使得芯片的前端和后端都得到很好的散热, 而在芯片的中间位置, 热量只能向下传递, 没有向前和向后的传热路径, 故造成温度中间高两端低的分布趋势。图 3(c) 和图 7(c) 为腔面中心处垂直方向的温度分布, 器件上方的对流散热、键合引线

的热量传导以及 GaAs 衬底较低的热导率, 这使得这部分区域的温度要略低于器件内部, 随着垂直方向位置的递进, 温度略有上升, 由于热沉底面较低的温度以及 AlN 热沉相对于芯片材料有较高的热导率, 路径上的温度呈不断下降的趋势。

简易模型和复杂模型热特性仿真计算得到的有源层的平均温度有较大差别。为此, 本文使用器件 1 的输出波长实验数据, 计算出器件有源层的真实平均温度, 进一步验证复杂模型热特性仿真计算结果的准确性, 器件 1 输出波长的实验数据如图 8 所示, 在 10 A 的注入电流下, 热沉温度为 25 °C 和 50 °C 时, 器件 1 的转化效率分别为 50.70% 和 45.98%。

根据上述内容, 使用输出波长的实验数据, 由 (4) 式得到器件 1 的温度系数 $k = 0.2412 \text{ nm}/^\circ\text{C}$, 由 (5) 式和 (6) 式可得热沉温度为 25 °C 时, 有源层的平均温度为 41.708 °C。对比有限元模型的仿真结果, 简易模型和复杂模型仿真得到的有源层平均温度分别为 46.405 °C 和 42.089 °C。复杂模型与求得的

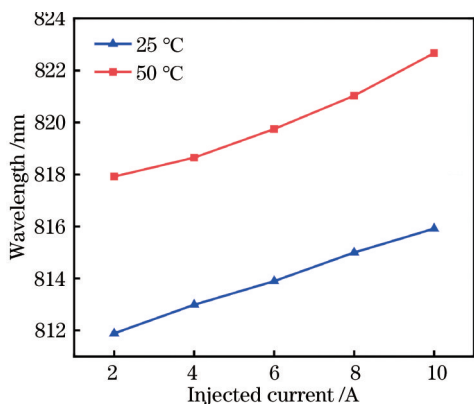


图 8 热沉底面温度分别为 25 °C 和 50 °C 时, 输出波长随注入电流的变化
Fig. 8 Output wavelength variation with injection current when the temperature of heat sink bottom surface is 25 °C and 50 °C

器件实际稳态工作有源层温度间的误差为 0.91%, 而简易模型与求得的器件实际稳态工作时有源层

平均温度间的误差高达 11.26%。当热沉温度为 50 °C 时, 计算得到有源层的平均温度为 69.693 °C, 复杂模型和简易模型求解得到的有源层平均温度分别为 68.306 °C 和 72.93 °C, 误差分别为 1.99% 和 4.64%。显然, 本文提出的复杂模型与器件实际稳态工作有源层温度更为接近, 降低了仿真结果与高功率半导体激光器稳态工作时有源层平均温度的误差。

为了进一步验证模型仿真结果的准确性, 以确定复杂模型能够降低仿真结果与实验计算结果间的误差, 使用同一半导体激光器结构及封装参数、不同输出波长和转换效率的高功率半导体激光器单管器件 2、器件 3、器件 4、器件 5 与器件 6。针对上述情形, 分别使用简易模型和复杂模型对其进行稳态热仿真, 随后将仿真得到的有源层平均温度与实验数据计算得到的有源层平均温度进行对比。图 9 和图 10 为所得实验数据。

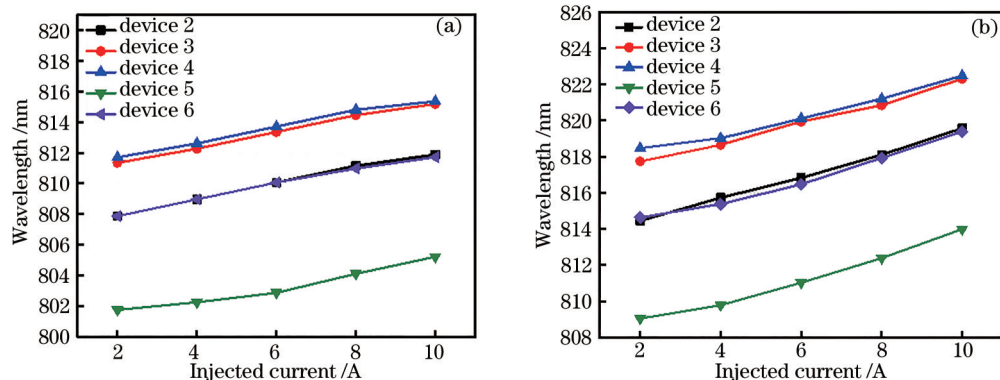


图 9 不同热沉底面温度下输出波长随注入电流的变化。(a) 热沉底面温度为 25 °C; (b) 热沉底面温度为 50 °C
Fig. 9 Output wavelength varying with injection current at different heat sink surface temperatures. (a) Heat sink bottom temperature is 25 °C; (b) heat sink bottom temperature is 50 °C

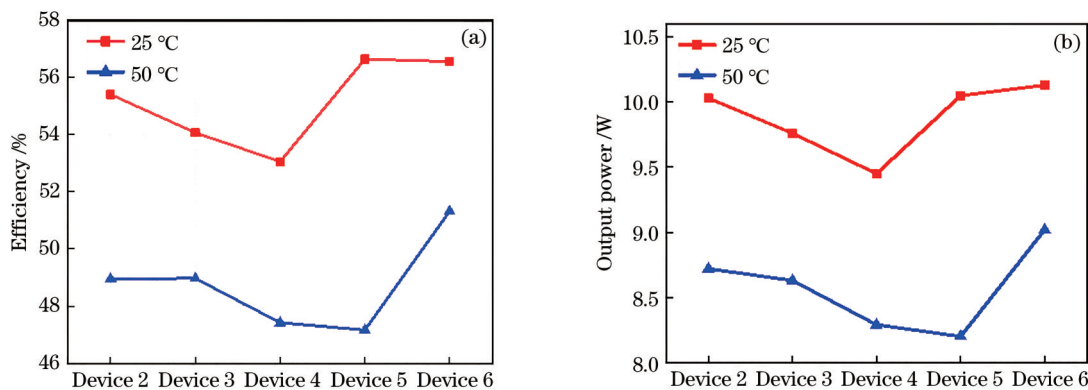


图 10 注入电流为 10 A 时的器件效率和器件输出功率。(a) 器件效率; (b) 器件输出功率
Fig. 10 Device efficiency and device output power with injection current of 10 A. (a) Device efficiency; (b) device output power

由(4)~(6)式得到热沉底面温度分别为 25 °C 和 50 °C 时, 器件 2、器件 3、器件 4、器件 5 及器件 6 稳态工作时有源层的平均温度, 如图 11(a) 所示。使用简

易模型和复杂模型, 得到的器件 2、器件 3、器件 4、器件 5 及器件 6, 热沉底面温度为 25 °C 和 50 °C 时, 有源层平均温度的仿真结果如图 11(b) 和 11(c) 所示。

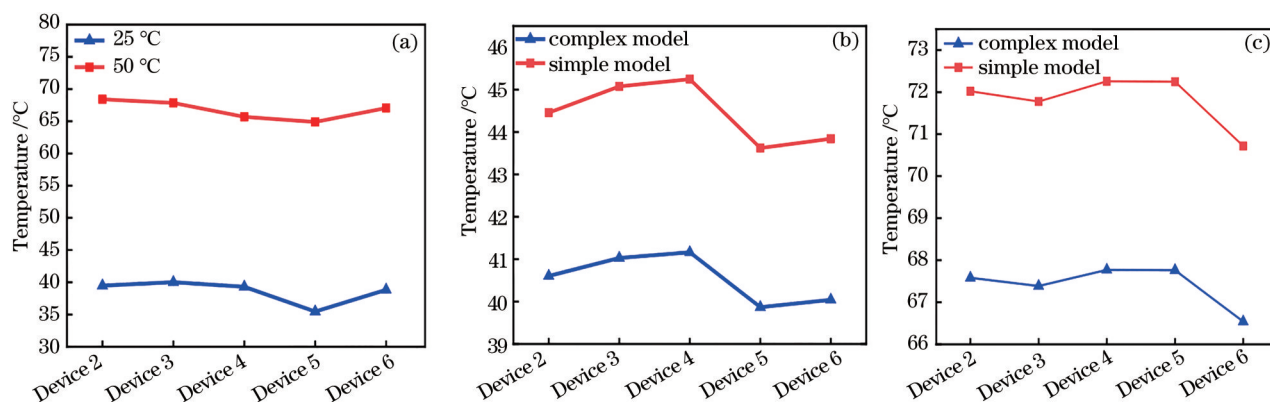


图 11 热沉底面温度为 25 °C 和 50 °C 时的有源层平均温度实验结果和仿真结果。(a) 实验结果; (b) 热沉底面温度为 25 °C 时的仿真结果; (c) 热沉底面温度为 50 °C 时的仿真结果

Fig. 11 Simulation results and experimental results of average temperature of active layer when the temperature of heat sink bottom surface is 25 °C and 50 °C. (a) Experimental results; (b) simulation results when the temperature of heat sink bottom surface is 25 °C; (c) simulation results when the temperature of heat sink bottom surface is 50 °C

根据仿真结果和实验计算结果,可分别得到,使用简易模型和复杂模型仿真得到的器件稳态工

作时有源层平均温度与实验计算得到的器件稳态工作时有源层平均温度之间的误差,如图 12 所示。

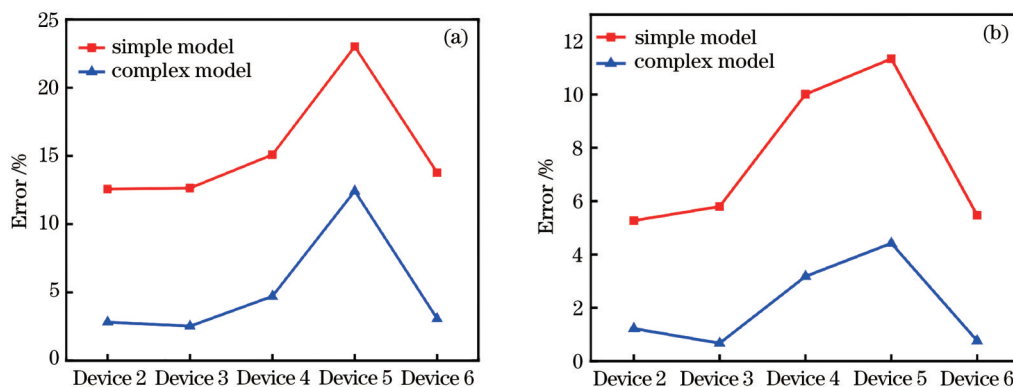


图 12 热沉底面温度为 25 °C 和 50 °C 时实验结果与两种模型仿真结果的误差。(a) 热沉底面温度为 25 °C (b) 热沉底面温度为 50 °C

Fig. 12 Error between the experimental results and the simulation results of the two models when the temperature of heat sink bottom surface is 25 °C and 50 °C. (a) Heat sink bottom temperature is 25 °C; (b) heat sink bottom temperature is 50 °C

从图 12 可以看出,相较于复杂模型,简易模型得到的仿真结果与实验数据计算结果间存在较大的误差。使用复杂模型进行高功率半导体激光器单管稳态热仿真,能够使仿真结果与器件稳态工作时实际有源层平均温度间的误差降低,得到更接近高功率半导体激光器稳态工作时有源层平均温度的仿真结果,进而有效提升各项热仿真工作结果的准确性。

4 结 论

近年来,有限元方法逐渐成为分析激光器工作时温度分布的主要模拟方法,简易长方体堆叠结构模型具备建模简单、便于求解的优点,但是忽略了芯片及其封装结构的实际影响。在一些研究中,求解得到的仿真结果缺少实验依据的支撑,准确性较

低。分析了激光器芯片实际封装时,条形结构、键合引线和热沉覆铜层等因素对仿真结果的影响,建立了复杂模型,得到了热沉底面温度为 25 °C 时简易模型和复杂模型的仿真结果。对比两种模型的仿真与实验结果,仿真得到的两者有源层的平均温度分别为 46.405 °C 和 42.089 °C,相差较远。激光器实际稳态工作有源层温度为 41.708 °C,复杂模型仿真结果的误差为 0.91%,而简易模型仿真结果的误差高达 11.26%。热沉底面温度为 50 °C 时,复杂模型仿真结果的误差为 1.99%,简易模型仿真结果的误差则为 4.64%。可见,稳态热仿真时使用复杂模型能够降低仿真结果与实验计算结果的误差。同一封装结构参数、不同转化效率和波长的多个高功率半导体激光器单管的热特性的计算结果,进一步验

证了模型仿真结果的准确性。

参 考 文 献

- [1] Ma X Y, Zhang N L, Zhong L, et al. Research progress of high power semiconductor laser pump source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(12): 120-129.
马骁宇, 张娜玲, 仲莉, 等. 高功率半导体激光泵浦源研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(12): 120-129.
- [2] Chen L H, Yang G W, Liu Y X. Development of semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500001.
陈良惠, 杨国文, 刘育衍. 半导体激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500001.
- [3] Martín-Martín A, Avella M, Iniguez M P, et al. Thermomechanical model for the plastic deformation in high power laser diodes during operation[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(7): 073105.
- [4] Wang J W, Kang L J, Zhang P, et al. High-power semiconductor laser array packaged on microchannel cooler using gold-tin soldering technology[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8241: 82410H.
- [5] Yuan Q H, Jing H Q, Zhong L, et al. Thermal stress in high-power semiconductor laser packaging[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1001009.
袁庆贺, 井红旗, 仲莉, 等. 大功率半导体激光器封装热应力研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1001009.
- [6] Strauss U, Müller M, Swietlik T, et al. Next generation 8xx nm laser bars and single emitters[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7918: 79180T.
- [7] Li H X, Chyr I, Jin X, et al. >700 W continuous-wave output power from single laser diode bar[J]. Electronics Letters, 2007, 43(1): 27-28.
- [8] Veyrié D, Gilard O, Sanchez K, et al. New methodology for the assessment of the thermal resistance of laser diodes and light emitting diodes[J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(4): 456-461.
- [9] Labudovic M. Finite element modeling of high power laser diodes[C]//10th IEEE International Conference of Advanced Thermal Processing of Semiconductors, September 25-27, 2002, Vancouver, BC, Canada. New York: IEEE Press, 2002: 177-182.
- [10] Li J, Li C, Xu H, et al. Thermal analysis of high power semiconductor laser bar[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(12): 1474-1479.
李江, 李超, 徐昊, 等. 高功率半导体巴条激光器的热特性分析[J]. 发光学报, 2014, 35(12): 1474-1479.
- [11] Bezotosnyi V V, Krokhin O N, Oleshchenko V A, et al. Thermal regime of high-power laser diodes[J]. Physics Procedia, 2015, 72: 399-404.
- [12] Ni Y X, Ma X Y, Jing H Q, et al. Finite element analysis of expansion-matched submounts for high-power laser diodes packaging[J]. Journal of Semiconductors, 2016, 37(6): 76-80.
- [13] Deng Z, Shen J, Gong W C, et al. Temperature distribution and thermal resistance analysis of high-power laser diode arrays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 134: 41-50.
- [14] Cao W D, Feng Y, Yan C L, et al. Analysis of thermal characteristics of semiconductor laser packaging based on ANSYS Workbench[J]. Modern Physics, 2018, 8(4): 232-238.
曹伟冬, 冯源, 晏长岭, 等. 基于 ANSYS Workbench 半导体激光器封装热特性分析[J]. 现代物理, 2018, 8(4): 232-238.
- [15] Zhang X L, Bo B X, Qiao Z L, et al. Analysis of thermal characteristics based on a new type diode laser packaging structure[J]. Optical Engineering, 2017, 56(8): 085105.
- [16] Wang S N, Bo B X, Xu L Y, et al. Thermal analysis on semiconductor laser with non-injection region[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2014, 35(8): 969-973.
王胜楠, 薄报学, 许留洋, 等. 基于腔面非注入区的半导体激光器的热特性分析[J]. 发光学报, 2014, 35(8): 969-973.
- [17] Szymanski M. Mathematical models of heat flow in edge-emitting semiconductor lasers[M]//Heat transfer-engineering applications. London: InTech, 2011.
- [18] Romo G, Smy T, Walkey D, et al. Modeling facet heating in ridge lasers[J]. Microelectronics Reliability, 2003, 43(1): 99-110.
- [19] Wu D H, Zah C E, Liu X S. Three-dimensional thermal model of high-power semiconductor lasers[J]. Applied Optics, 2019, 58(14): 3892-3901.
- [20] Meng X, Ning Y Q, Zhang J W, et al. Research progress of red semiconductor laser diodes for laser display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 180001.
孟雪, 宁永强, 张建伟, 等. 面向激光显示的红光半导体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 180001.
- [21] Jing H Q, Zhong L, Ni Y X, et al. Thermal analysis of high power density laser diode stack cooling structure[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2016, 37(1): 81-87.