

# 端面抽运绿色固体激光器控温性能优化的研究

沈 渊 邓琦林

(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)

**摘要** 在激光二极管(LD)端面抽运绿色固体激光器控温部分的设计中通过引入有限元方法(FEM),使用 ANSYS 有限元分析软件,通过稳态热模拟和瞬态热模拟对控温部分的结构进行了热分析,并且根据模拟的结果对结构进行了优化。研究表明,在同样的制冷量输入下,优化后控温部分的控温能力提高了 10%左右,较初始结构有明显改善。根据优化后的结构制作了实验装置,并且对实验装置的控温能力进行了测试,通过对比实验测试数据和 ANSYS 热模拟的数据,确认相互之间的误差小于 5%。证实了有限元分析对改善温控激光二极管端面抽运绿色固体激光器控温部分性能有明显的效果。

**关键词** 激光器;绿色固体激光器;温控端面抽运;有限元分析;热分析;温控

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0902004

## Optimization Research of Temperature Controlling Performance for Green LD End-Pumped Solid-State Laser

Shen Yuan Deng Qilin

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract** Design process of green laser diode (LD) end-pumped solid-state laser, finite element method (FEM) is applied for the optimization of temperature controlling performance. Using ANSYS, a finite element analysis software, we do thermal analysis of the temperature controlling structure by steady-state thermal simulation and transient thermal simulation and optimize the structure on the basis of analytic result. The results show that with the cooling capacity in the same input, the temperature controlling capacity of the optimized temperature controlling structure arises approximately 10%, showing a significant improvement over the initial structure. An experimental setup on the basis of optimized structure is made and its temperature controlling capacity is tested. The error between the experimental data and ANSYS thermal simulation data is less than 5%. The results show that finite element analysis has a significant effect on improving the temperature controlling performance of green laser diode end-pumped solid state laser.

**Key words** lasers; green solid lasers; end temperature control pumping; finite element analysis; thermal analysis; temperature control

**OCIS codes** 140.3460; 140.3580; 140.2020

### 1 引 言

激光二极管(LD)抽运绿色激光器目前在医学诊断、彩色显示、位置指示、激光照排等领域有着广泛应用,其中在医学诊断、激光照排等领域对 LD 抽运绿色激光器的性能要求特别苛刻,对其光束质量、噪声特性、功率稳定性都有非常高的要求。因此在此类应用中普遍对激光器进行温度控制,以保证激

光器的性能。同时,随着电子产品小型化和节能的要求越来越高,对 LD 抽运的小型绿色激光器的体积和功耗的要求也随之提高。如何在更小的空间内用更低的功耗达到同样甚至更好的性能成为研究热点。常规的方法根据经验以及简单试验等方法进行设计,这样的设计方法开发周期长、开发成本高、产品功耗大。为此,在温控 LD 抽运的绿色固体

收稿日期: 2011-03-07; 收到修改稿日期: 2011-04-08

作者简介: 沈 渊(1977—),男,硕士研究生,工程师,主要从事固体激光器器件方面的研究。

E-mail: sidneyshen@hotmail.com

导师简介: 邓琦林(1961—),男,博士,副教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: dengqilin@sjtu.edu.cn

激光器控温设计中引入传热分析,对于缩短开发周期、提高性能、降低研发成本、提高客户满意度方面都有重要意义。

目前,国内外学者对半导体激光器的传热分析主要集中在无制冷 LD 及其组件上,其典型的结构只包括 LD 芯片和热沉。主要使用有限元方法(FEM)对 LD 芯片和热沉进行分析,建立 LD 芯片的温度场<sup>[1~4]</sup>。但是,对于内部集成热电制冷器(TEC)的半导体激光器以及 LD 抽运激光器组件的传热特性的报道不多,主要集中在小功率的光通信用半导体激光器组件<sup>[5,6]</sup>,与温控 LD 端面抽运绿色固体激光器的结构和条件均有一定差异。

本文以温控 LD 端面抽运绿色固体激光器为例,论述通过 ANSYS 软件进行热分析来实现对小型温控 LD 端面抽运的固体激光器的结构优化设计。

## 2 温控 LD 抽运绿色激光器的结构和温控过程

### 2.1 典型 LD 激光器结构

温控 LD 抽运绿色激光器主要由 LD、激光腔(主要由倍频晶体、激光晶体和腔片构成)、控温元件、温度反馈元件组成<sup>[7]</sup>。

控温元件一般为 TEC,因其具有结构紧凑、工作时无振动噪声、通过改变电流方向能同时实现加热和制冷、热惯量小、控温精度高、寿命长等优点,在中小功率的温控 LD 抽运绿色激光器中使用十分普遍。

温度反馈元件为热敏电阻,其结构可靠,精度高,在控温系统中有着广泛的应用。

对于低功率的 LD 抽运绿色激光器,一般采用端面抽运的方式,其中发热较大的器件主要是 LD 和激光晶体,但是倍频晶体的温度变化对输出功率的影响更为明显<sup>[8,9]</sup>。为了降低功耗和减少体积,一般使用一个 TEC 进行温控。

### 2.2 温控过程

LD 抽运绿色激光器的控温性能的评价有 3 个方面:1)工作温度范围,指激光器能够正常工作的外界环境温度最大变化范围;2)预热时间,即在外界环境温度最大变化值时,激光器开机后到能正常工作时的时间;3)控温精度,即当外界环境温度变化时,激光器控温部分的温度变化量。其中,工作温度范围和预热时间主要由结构设计和半导体制冷器选型

决定,控温精度主要由控温电源的性能决定。

在 LD 抽运绿色激光器控温部分的工作过程中,涉及到多种传热方式。在激光器刚开始工作时,是一个非稳态的过程,其中 LD 和激光晶体是主要的发热元件,而 TEC 则会根据设定值和热敏电阻实际值来判断需要对基座进行降温或升温,以保证 LD 和激光晶体工作在设定温度下。在这一过程中,LD 和激光晶体会将热量传递到基座,TEC 将基座的热量置换底板,同时基座通过隔热板和底板发生热传导,底板保持环境温度不变。同时,当系统和环境之间有了温度差,热对流和辐射就会开始起作用。当控温部分达到设定温度,TEC 就会减少热量的置换,直到控温部分在设定温度达到换热平衡,此时进入稳态传热。整个温控结构如图 1 所示。

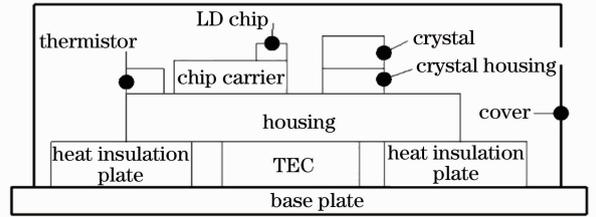


图 1 温控结构示意图

Fig. 1 Diagram of temperature control structure

在实际应用中,为了简化研究过程,需要对 LD 抽运绿色激光器的温控系统做一些基本假设:1)结构材料均匀,热物性一致;2)不考虑各个接触面之间的接触热阻;3)假设 TEC 始终工作在最大工作电流下,制冷量输出不随温度变化;4)底板散热良好,保持环境温度不变;5)环境温度保持稳定,不随温控系统本身发热变化。

### 2.3 温控模型

#### 2.3.1 LD 热模型

LD 的发热主要是由电阻产生的焦耳热,如果流经 LD 的电流为  $I_{LD}$ ,则产生的焦耳热为

$$Q_{LD} = I_{LD}^2 R_{LD}, \quad (1)$$

式中  $R_{LD}$  为该 LD 的电阻。

由于 LD 的表面积非常小,因此通过对流和辐射耗散的热量非常小,可以忽略不计。热量传递仅靠热传导的方式发生。

激光晶体和倍频晶体自身不发热,热量来自 LD 的抽运光在转换过程中产生的损耗,因此不再重复计算发热量。

#### 2.3.2 TEC 热模型

TEC 的原理是热电效应,主要是帕尔帖效应在制冷技术上的应用<sup>[10]</sup>,其制冷量  $Q_c$  可表示为

$$Q_C = \alpha_{TEC} T_C I_{TEC} - \frac{1}{2} I_{TEC}^2 R_{TEC} - K_{TEC} \Delta T_{TEC}, \quad (2)$$

式中  $K_{TEC}$  为 TEC 冷热端之间的总热导,  $\Delta T_{TEC}$  为冷热端温度差,  $T_C$  为冷端绝对温度,  $R_{TEC}$  为 TEC 的交流电阻率,  $\alpha_{TEC}$  为泽贝克系数,  $I_{TEC}$  为流经 TEC 的电流。

### 2.3.3 基座的热模型

在基座上没有主动热负载, 被动热负载有 LD 传入的热量、TEC 置换的热量、通过对流交换的热量、通过隔热板和底板发生热传导的热量和热辐射的热量。在该模型中, 光滑金属表面的发射率非常低, 其与环境的温差和表面积也很小, 热辐射的作用远小于其他因素, 因此热辐射的作用可忽略不计。

同时计算  $B_i$  数, 对于基座, 其  $B_i = \frac{hl}{k} = 0.03 < 0.05$ , 可用集中参数法<sup>[11]</sup>

$$\rho CV_{base} \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{LD} - Q_C + Q_{conv} + Q_{RT}, \quad (3)$$

式中  $\rho$  为基座密度,  $C$  为基座比热容,  $V_{base}$  为基座体积,  $Q_{conv}$  为基座对流散热量,  $Q_{RT}$  为通过隔热板和底板导入的热量。  $Q_{conv}$  可计算为

$$Q_{conv} = hA_{baseconv} (T_{amb} - T_{base}), \quad (4)$$

其中  $h$  为对流系数,  $A_{baseconv}$  为基座对流面积,  $T_{base}$  为基座温度,  $T_{amb}$  为环境温度。有时为了降低基座对流造成的热量损失, 会在外侧包裹保温材料, (4) 式中的  $T_{base}$  需要改用保温材料外侧的温度  $T_{baseRT}$  代替,

$$T_{baseRT} = \frac{\delta_{baseRT} h T_{amb} + k_{baseRT} T_{base}}{k_{baseRT} + \delta_{baseRT} h}, \quad (5)$$

则

$$Q_{conv} = hA_{baseconv} \frac{k_{baseRT}}{k_{baseRT} + \delta_{baseRT} h} (T_{amb} - T_{base}), \quad (6)$$

式中  $k_{baseRT}$  为保温层的热传导系数,  $\delta_{baseRT}$  为保温层的厚度。从(6)式可见, 当没有保温层时, 即  $\delta_{baseRT} = 0$  时,  $Q_{conv} = hA_{baseconv} (T_{amb} - T_{base})$ 。

### 2.3.4 隔热板的热模型

隔热板主要起支撑基座的作用, 在其上下侧面分别固定基座和底板, 因此存在热传导, 其自身还受到对流和辐射的作用, 但是辐射作用很小, 可以忽略。

对隔热板进行计算的主要目的是求出通过隔热板导入基座的热量  $Q_{RT}$ , 对于此模型不需要建立隔热板的温度场模型, 因此可以采用简化的计算:

$$Q_{RT} = \frac{k_{RT} A_{RTcond} (T_{base} - T_{amb})}{\delta_{RT}} + hA_{RTconv} \frac{T_{base} - T_{amb}}{2}, \quad (7)$$

式中  $k_{RT}$  为隔热板导热系数,  $A_{RTcond}$  为隔热板接触面积,  $\delta_{RT}$  为隔热板厚度,  $A_{RTconv}$  为隔热板对流面积。

### 2.3.5 热传导方程

根据以上分析, 建立非稳态温度-时间方程组:

$$\begin{cases} Q_{LD} = I_{LD}^2 R_{LD} \\ Q_C = \alpha_{TEC} T_{base} I_{TEC} - \frac{1}{2} I_{TEC}^2 R_{TEC} - K_{TEC} \Delta T_{TEC} \\ Q_{conv} = hA_{baseconv} \frac{k_{baseRT}}{k_{baseRT} + \delta_{baseRT} h} (T_{amb} - T_{base}) \\ Q_{RT} = \frac{k_{RT} A_{RTcond} (T_{amb} - T_{base})}{\delta_{RT}} + hA_{RTconv} \frac{T_{amb} - T_{base}}{2} \\ \rho c V_{base} \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{LD} - Q_C + Q_{conv} + Q_{RT} \end{cases} \quad (8)$$

稳态时, 由(8)式可得出基座和环境温度之间温度差的解析表达式为

$$\Delta T = \frac{\alpha_{TEC} T_{amb} I_{TEC} - \frac{1}{2} I_{TEC}^2 R_{TEC} - I_{LD}^2 R_{LD}}{\frac{k_{RT} A_{RTcond}}{\delta_{RT}} + \alpha_{TEC} I_{TEC} + K_{TEC} + \frac{1}{2} hA_{RTconv} + hA_{baseconv} \frac{k_{baseRT}}{k_{baseRT} + \delta_{baseRT} h}}, \quad (9)$$

式中  $\Delta T = T_{amb} - T_{base}$ 。

分析(9)式可以得出, LD 发热量、TEC 的电流、环境温度、对流系数、对流面积、基座保温层的厚度、隔热层厚度和面积等均对  $\Delta T$  有影响。若 TEC 选定, 则对该系统进行优化的主要手段为减小分母的数值。

通过对(9)式的分析, 选取了以下两种情况进行

优化: 1) 减少隔热层和基座的接触面积, 即减小  $A_{RTcond}$  的值; 2) 增加基座保温层, 使  $\frac{k_{baseRT}}{k_{baseRT} + \delta_{baseRT} h}$  减小。

根据上述分析, 选取以下 3 种方案对比优化效果: 方案 A 为初始的结构设计; 方案 B 为对方案 A 的设计进行优化, 减小了基座和隔热板的接触面积;

方案 C 为在方案 B 的基础上将基座包裹上 1.5 mm 厚的保温材料。

### 3 激光器的热分析

采用 ANSYS 有限元分析软件,对激光器基座和半导体制冷器的不同结构设计和冷端有无保温材料的方案进行了稳态热模拟和瞬态热模拟,以分别评价工作温度范围和预热时间的性能指标,得出较优化结构设计,由于 TEC 的加热性能远好于制冷性能,因此仅仅分析制冷工况。

#### 3.1 几何模型和划分网格

由于 ANSYS 的建模能力较弱,因此使用三维设计软件 Solidworks 建立了温控系统的几何模型,从上到下依次为 LD、激光晶体和倍频晶体,固定 LD、激光晶体和倍频晶体的基座,TEC 和隔热层,底板。将其导入 ANSYS 中,设定边界条件,并进行网格化,生成控温系统的有限元模型,如图 2 所示。

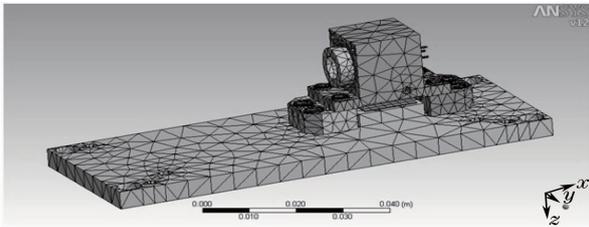


图 2 ANSYS 有限元模型

Fig. 2 Model of ANSYS finite element analysis

#### 3.2 模型材料特性

模型中使用的主要材料的热物性参数如表 1 所示<sup>[5]</sup>。

表 1 材料物性

Table 1 Material properties

Item	Material	Density / (g/cm <sup>3</sup> )	Specific	Thermal
			heat / (J · kg <sup>-1</sup> · k <sup>-1</sup> )	conductivity / (W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )
1	Kovar 4J29/SPCC	8.15	430	17.3
2	Cu OFHC	8.92	390	397
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.96	753	46
4	Heat insulator	0.1	1400	0.05
5	Steel	7.8	434	60.5
6	6061-T6	2.7	890	167
7	303	8	500	16.2
8	Polyetherimide	1.27	296	0.22

#### 3.3 模型边界条件

初始温度:环境温度和所有零部件均为 50 °C。假定激光器底板散热良好,温度始终保持和环境温

度一致,为 50 °C;假设周围空气的流速为 0.5 m/s,则和空气接触部分的对流传热系数  $h = 19.68 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;LD 发热量  $Q_{LD} = I_{LD}^2 R_{LD} = 1.02 \text{ W}$ ;预计基座的温度可控制到 20 °C,TEC 的工作电流在 1.4 A,则吸热量  $Q_c = 2.59 \text{ W}$ 。

#### 3.4 激光器稳态热分析

采用 ANSYS 模拟的主要步骤如下。选择分析类型为稳态热分析;调入激光器的实体模型;定义不同材料的导热系数;选择默认方式划分网格;定义各类边界条件。然后对 3 种结构进行求解,最后用彩色云图的探针方式在热敏电阻孔和激光晶体处采集温度数据。3 种不同结构稳态时的温度分布云图分别如图 3~5 所示。模拟结果对比如表 2 所示。

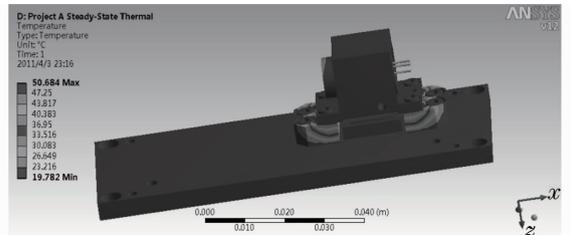


图 3 方案 A 的温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution of project A

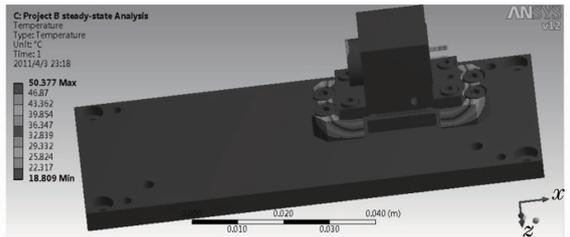


图 4 方案 B 的温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution of project B

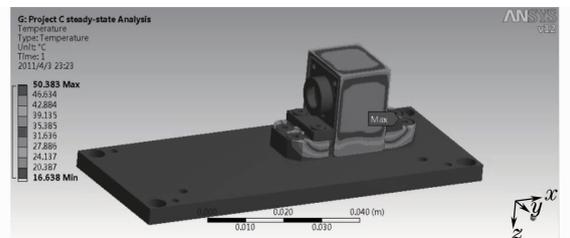


图 5 方案 C 的温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution of project C

表 2 稳态模拟结果

Table 2 Steady-state simulation results

	Lowest temperature / °C	Temperature at thermistor / °C	Temperature at crystal / °C
Project A	19.78	21.75	22.3
Project B	18.8	20.78	21.28
Project C	16.63	18.61	19.1

### 3.5 激光器的瞬态热分析

选择分析类型为瞬态热分析,其他定义和稳态分析一致。模拟结果如图6所示。

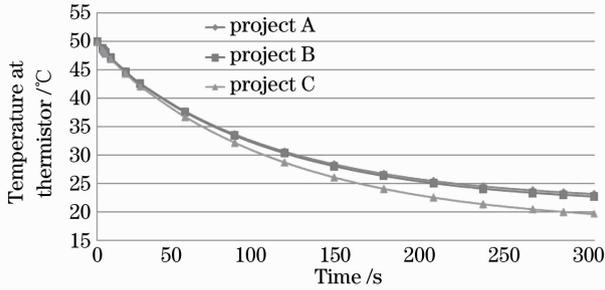


图6 瞬态模拟结果

Fig. 6 Results of transient thermal simulation

### 3.6 模拟结果分析

从模拟的稳定后冷热极限温度的结果来看,方案A、B、C得到的控温部分温度逐个降低。

对于方案A和方案B,主要差异在控温部分和平面底板之间接触的表面积,方案B控温部分的接触面积比方案A更小,直接减少了通过热传导从底板进入控温部分的热量,因此方案B的控温部分温度会更低,但是其效果并不是很好。稳态模拟的结果,方案B和方案A之间的温差只有 $0.97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,仅降低了 $3.4\%$ ,效果不明显。从瞬态热模拟的结果来看,方案A和方案B的降温曲线几乎是重合的,最终在 $300\text{ s}$ 时,方案A和方案B也只有 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温差,没有明显改善。

而对于方案B和方案C,方案C通过在控温部分增加保温材料,使得控温部分表面和环境的温差降低,减小了对流负载。稳态模拟的结果,这个改善使得方案C较方案B温控部分的温度下降了 $2.17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降低了 $7.4\%$ ,效果较明显。而在瞬态热模拟的图上,可见方案C在 $50\text{ s}$ 后就和方案B有了明显差异, $300\text{ s}$ 时有了 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的温差,效果明显。

通过优化,最终方案C比方案A稳态时在控温部分和激光晶体处的温度分别下降了 $3.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $3.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,降幅分别为 $10\%$ 和 $10.4\%$ ,瞬态热模拟在 $300\text{ s}$ 时较方案A有 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度差,效果明显。

## 4 实验验证

根据ANSYS模拟的结果,选择了最优方案C的结构进行测试。

通过温度循环箱将环境温度控制在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,通过一个温控装置将激光器的底板温度稳定在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。激光器使用Melles Griot CVI的06DLD205电源驱

动,工作在恒电流状态下,将激光器的工作电流设定到和模拟值一致。将控温部分的温度设定到 $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温控电流设置和模拟值一致。

同时打开温控和LD驱动,每隔 $20\text{ s}$ 记录下热敏电阻的阻值,直到热敏电阻到达设定值或时间到达 $300\text{ s}$ 。该组数据为预热时间。然后过 $2\text{ h}$ 记录下稳定后的温度值,即得到控温能力最大值。实验结果如图7所示。

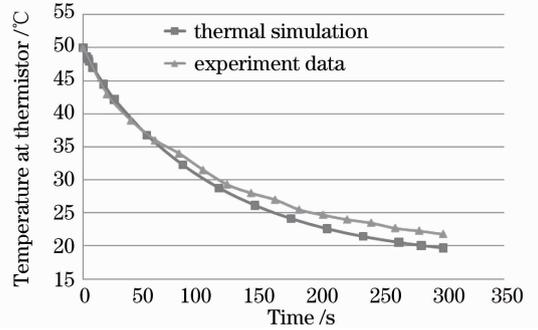


图7 瞬态模拟和实际结果对比

Fig. 7 Comparison between simulation and actual transient results

由图7可见,稳定后控温部分测温电阻处实际温度为 $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而模拟结果为 $18.61\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,差值占温度降幅的比例为 $3.8\%$ 。 $300\text{ s}$ 时控温部分测温电阻处实际温度为 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而模拟结果为 $19.68\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,差值占温度降幅的比例为 $4.4\%$ 。可见控温部分的模拟结果和实际测试的结果的差异小于 $5\%$ ,模拟的结果与实际测试的结果很接近。

测试结果和模拟结果之间有一定差异,主要是因为实际的热传递过程是十分复杂的,在热分析模型中很难考虑到所有的因素,如连接各个元件的导线热传导的因素、基座部分和空气之间的热传导、基座部分的热辐射等。

## 5 结 论

采用有限元分析软件ANSYS,对于3种不同结构的LD抽运绿色激光器的控温部分的温度进行了稳态热分析和瞬态热分析,得到了它们的稳态温度分布图和瞬态降温曲线。同时,将优化后的结构进行了实验测试。结果表明:

- 1) 通过ANSYS软件对LD抽运绿色激光器的控温部分的有限元模拟,可以针对某一特定结构的优化效果进行分析,评价该优化措施的有效性。
- 2) 通过对3种不同结构的稳态温度分布图和瞬态降温曲线进行对比,验证了结构优化对于控温性能提高的有效性。

3) 用优化后的结构制作了激光器样品并进行实验测试,实验值和模拟结果基本吻合,证实了在激光器控温结构设计中运用 ANSYS 软件进行优化的可行性。

## 参 考 文 献

- 1 Lu Pengcheng, Cui Bifeng, Li Jianjun *et al.*. Transient thermal characteristic analysis of tunnel regeneration high-power semiconductor laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 518~522  
鲁鹏程, 崔碧峰, 李建军等. 隧道再生大功率半导体激光器瞬态热特性研究[J]. 中国激光, 2004, **31**(5): 518~522
- 2 Wang Zhiqun, Yao Shun, Cui Bifeng *et al.*. Thermal characteristic of high beam quality laser diode array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(10): 2497~2501  
王智群, 尧舜, 崔碧峰等. 高光束质量大功率半导体激光阵列的热特性[J]. 中国激光, 2010, **37**(10): 2497~2501
- 3 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
- 4 Y. J. He, Y. G. Zhang, K. J. Nan *et al.*. Thermal analysis of ridge waveguide InAsP/InGaAsP MQW lasers by using finite-element method[C]. *SPIE.*, 2002, **4913**: 199~203
- 5 Hee Jin Lee, Joon Shik Yoon, Charn-Jung Kim. Numerical analysis on the cooling of a laser diode package with a thermoelectric cooler[J]. *Heat Transfer-Asian Research*, 2001, **30**(5): 357~370
- 6 Marko Labudovic, Jin Li. Modeling of TE cooling of pump lasers [J]. *IEEE Trans. Components and Packaging Technol.*, 2004, **27**(4): 720~730
- 7 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer, 2006. 139~145
- 8 Li Bingbin, Guo Zhen, Song Xiaolu *et al.*. Direct heat dissipation from pumped end in laser diode end-pumped solid-state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 59~65  
李兵斌, 过振, 宋小鹿等. 端面抽运固体激光器中抽运端面的直接散热[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 59~65
- 9 Shen Deyuan, Wang Changqing, Shao Zongshu *et al.*. The output impact of an intracavity-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser end pumped from crystal temperature[J]. *Chinese J. Lasers*, 1996, **A23**(5): 385~388  
沈德元, 王长青, 邵宗书等. 晶体温度对 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内倍频激光器输出的影响[J]. 中国激光, 1996, **A23**(5): 385~388
- 10 Xu Desheng. Thermoelectric Cooling and Application Technology [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 1992. 7~17  
徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992. 7~17
- 11 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer (4th Ed.) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 117~121, 555~556  
杨世铭, 陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 117~121, 555~556