

文章编号 1004-924X(2016)05-1080-07

一体化半导体激光器的 ANSYS 热仿真及结构设计

全 伟,李光慧*,陈 熙,刘 峰

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘要:传统半导体激光器与驱动控制器多采用分离式设计,故半导体激光器系统的体积很难紧凑化,而一体化半导体激光器存在电路集成度高,发热严重等问题,因此,本文提出了对半导体激光器进行一体化、小型化设计的方法。为了保证所设计的半导体激光器运行时系统温度分布均匀,输出激光不受温度变化影响,在结构设计之前,利用 ANSYS 软件对元器件集成度较高的电路板等热源进行了热仿真,提高了集成后结构的可靠性。仿真结果显示,优化设计后的半导体激光器一体化结构满足激光器温度要求,系统温度分布均匀,能保证激光器稳定运行。设计的新型半导体激光器的整体结构尺寸仅为 85 mm×95 mm×115 mm,不仅实现了半导体激光器与驱动控制器的一体化与小型化集成,并且结构中留有准直光路设计空间,便于后期的应用研究。

关键词:半导体激光器;驱动控制器;ANSYS 热仿真;小型化;一体化

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1080

Structural design and ANSYS thermal simulation for semiconductor laser system

QUAN Wei, LI Guang-hui*, CHEN Xi, LIU Feng

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,
Beihang University, Beijing 100191, China)

* Corresponding author, E-mail: guanghui@buaa.edu.cn

Abstract: Conventional semiconductor laser technology always chooses a separate design with its controller system, so that the semiconductor laser volume can not be compressed any more. Meanwhile, the integrated structure of the semiconductor laser has serious radiation heat. To overcome the problems mentioned above, this paper proposes a new design method of the semiconductor laser for its integration and miniaturization. To guarantee the laser to be operated stably and to show good thermal management, the ANSYS software is used to perform a thermal simulation for the high-density components such as Print Circuit Board(PCB) to improve the structure reliability before the structure manufacturing. Simulation experiments indicate that designed novel structure allows the semiconductor laser to integrate with the drive controller, and has uniform temperature distribution and an appropriate space, and can guarantee the laser to operate stably. The whole sizes of the semiconductor is only 85 mm×95 mm×115 mm. Moreover, the appropriate space is left in the structure of the semiconductor, which is conducive to the design of a collimated light

收稿日期:2016-01-20;修订日期:2016-02-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61374210, No. 61227902)

path for its future applications.

Key words: semiconductor laser; drive controller; ANSYS thermal simulation; miniaturization; Integration

1 引言

以原子作为敏感介质的元器件已经在医学、计量、军事以及科学研究等领域得到了广泛应用。特别是基于 SERF 态原子自旋特性的原子陀螺仪和原子磁强计,因其可以实现超高灵敏度的惯性和磁场测量,得到了世界各国的大力支持和发展。目前研究的量子仪器其中一项关键技术就是压缩仪器体积,包括采用先进的 MEMS 技术,半导体激光器作为原子磁强计原子陀螺仪中的激光泵浦光源,其结构体积对仪器整体具有较大影响。因此研究半导体激光器小型化,集成化对研制新一代的量子仪器样机具有重要意义^[1-3]。

半导体激光器驱动器包括温度控制器,恒流源控制器,目前市面上比较流行的半导体激光器驱动器生产商包括 Throlabs 公司, Newport 公司, versent 公司等,但这些公司都将驱动器与激光器底座分立设计,造成体积大,安装不方便等缺点^[4]。在新一代的量子科学研究中并不能充分发挥半导体激光器体积小的优势,针对该问题,科研生产需要设计新型的将控制器与激光器集成于一体的半导体激光器结构。设计小型化集成度高的半导体激光器结构必然会存在电子元件高密度分布的问题,导致热流密度增加。为保证结构热应力热变形适度,且不影响激光管的正常工作环境,良好的散热冷设计成为结构设计的重点^[5-6]。

本文首先通过理论分析温度对半导体激光器输出特性影响,证明温度均匀稳定分布对激光器有重要意义。然后针对半导体激光器的一体化小型化进行了结构设计,并对激光器系统工作时的主要热源即集成于一体的电路板进行了热仿真及优化,优化集成后的总体积仅有 85 mm×95 mm×115 mm。最后通过对设计的半导体激光器系统实验测试,结构满足正常工作条件,没有因为结构热分布不均匀影响输出特性。

2 半导体激光器温度对输出特性影响

2.1 温度对激光频率的影响

半导体激光器以半导体为材料,而半导体材

料特性受温度影响。由式(1)知半导体激光器输出波长 λ 由禁带宽度 E_g 决定,而根据经典 Varshni 公式可推得禁带宽度 E_g 与温度 T 存在关系(2),其中 $E_g(0)$ 为绝对零度时的禁带宽度,与材料特性有关, α_E 与 β_E 是与材料有关的常数,可由查表获得^[7]:

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g}, \quad (1)$$

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha_E T^2}{T + \beta_E}. \quad (2)$$

当温度升高时,激光器有源区禁带宽度变窄,输出波长向长波长方向移动。

2.2 温度对激光功率的影响

激光器输出光功率 P 与外微分量子效率 η_d 、阈值电流 I_{th} 关系为:

$$P = \eta_d \frac{h\nu}{e} (I - I_{th}), \quad (3)$$

其中: h 为普朗克常数, ν 为频率, e 为单位电荷量, I 为注入电流; $\frac{h\nu}{e}$ 为常数。

阈值电流与温度关系为:

$$I_{th}(T) = I_0 \exp(T/T_0), \quad (4)$$

其中: T_0 称为特征温度,与激光器材料与器件结构相关^[8]。

激光器阈值电流随温度升高而增大,根据式(3)知,在电流恒定情况下激光器输出功率与微分量子效率有关,而微分量子效率随温度增大减小,故激光器输出功率随温度升高减小。

3 一体化半导体激光器结构的 ANSYS 热仿真

3.1 一体化半导体激光器结构设计

首先利用 PCB 板很薄的特点,采用叠加安装的方法集成,但由于温控 PCB 体积小,大功率元件发热严重,影响底座激光管散热进而影响激光波长和功率,因此结合 Ansys 热仿真,对发热较严重的电路板进行了优化设计,进而保证新设计半导体激光器系统稳定运行。

该半导体激光器采用 TO-56 封装,激光管安装在散热铜片上,铜片放置在 TEC 上,TEC 下面为硬铝合金 2A12-T4 制的散热片作为热沉。整

个组件类似蝶形封装,该设计将温控与电流源控制器壳体集成,系统由 6 个基本组件组成,底座由激光管安装座与矩形肋片式散热器组成,控制器材料均为硬铝合金 2A12-T4。图 1 所示为半导体激光器底座。电流源控制组件一方面用来安装电流源 PCB 板,另一方面设计了 1 个小的圆形透镜安装孔。透镜可以在大恒光电选购。图 2 所示为集成半导体激光器控制器的半导体激光器系统,考虑 PCB 板上芯片最大尺寸,安装不发生干涉,系统整体尺寸为 85 mm×95 mm×115mm。

电流源控制器组件与温度控制器组件都利用了 PCB 板薄的优势,进行叠装方式设计,中心圆筒的连接,既减轻了系统壳体重量,又能起到固定 PCB 板,增强系统导热的作用。另一方面,由于半导体激光器存在光束在垂直于结平面上远场发散角和平行于结平面的远场发散角相差较大的缺点,半导体激光器系统几乎在所有领域应用中都必须增加光束准直系统。新型半导体激光器另一个创新之处是系统设计的圆筒,可以设计准直光路,真正实现激光器,驱动控制器,准直光路集于一体,最大限度应用结构空间,实现小型化^[8-9]。

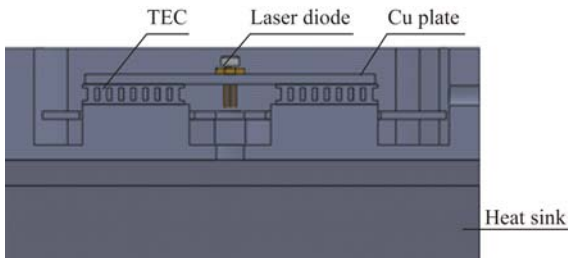


图 1 半导体激光器底座及 TO-56 激光管剖面图
Fig. 1 TO-56 laser diode and sitter cutaway view

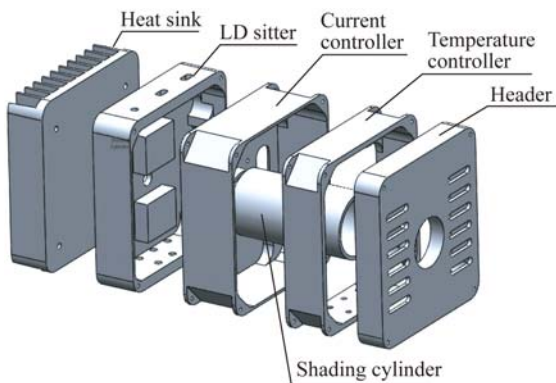


图 2 半导体激光器系统的三维爆炸视图
Fig. 2 Three-dimensional exploded view of semiconductor laser systems

一体化半导体激光器由于结构集成度高,而温

控电路板上大功率元件较多,容易产生散热不良的问题。为解决散热,通常用的方法有设计风扇、导热管等。而半导体激光器频率,线宽依赖于高精度的电流源控制注入电流稳定,通过测试,在工作环境恒定不变的条件下,对电流源施加风力(震动)影响,电流源输出电流发生明显大幅跳动,这对激光器的光束质量甚至激光器寿命产生巨大破坏,应该严格避免。图 3 和图 4 所示分别为相同条件下施加震动与不加震动的电流源输出曲线。图 3 在震动时间点波动较大。为不影响电流源工作,又能兼顾该结构体积小风扇位置选择难度大的问题,设计结构时并不添加风扇来增加散热^[10]。

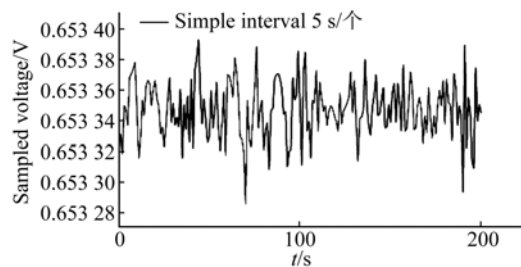


图 3 震动条件下电流源稳定度

Fig. 3 Stability of current source with vibration

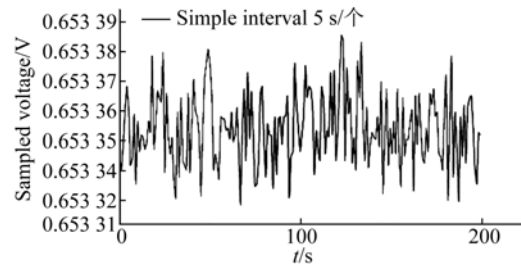


图 4 无震动条件下电流源稳定度

Fig. 4 Stability of current source without vibration

3.2 基于 Ansys 的结构建模、热仿真

软件 Icepak 作为针对电子设备板级,系统级热仿真的软件,与主流 CAD 软件有接口,可以将三维实体导入并设置材料参数进行建模。ANSYS Icepak 提供 Hexa Unstructured(非结构化网格)、Hexa Cartesian(结构化网格)、Mesher-HD(六面体占优)3 种网格类型,可以通过局部加密网格,连续划分与非连续划分网格方式控制网格质量,精确得到与模型本身几何相贴体的网格。通过边界条件,求解参数设置,用 Fluent 求解器进行求解计算,得到精度较高的计算结果,计算结果输出到 CFD-Post 可显示等值云图、矢量、迹线等^[11-12]。

仿真模型主要为半导体激光器结构中的 PCB 板,电流源 PCB 板上元件最大功率仅有 0.4 W,其发热并不会影响系统工作环境^[13]。温控 PCB 板大功率发热元件较多,且为了压缩整体结构,在有限尺寸内发热元件较集中,故需要进行散热分析,由于 PCB 板上一些电阻电容等小功率元件产热极少,故在建模时将其忽略,只对大功率元件建模。而稳态分析只需要导热系数,比热,密度仅在瞬态分析需要考虑^[14]。表 1 所示为仿真模型的功率,材料参数及导热系数。考虑到 PCB 板为各向异性传热,为建模准确性 PCB 板模型定义为沿板面和垂直于板面分别均匀的材料,沿板面 PCB 主要材料为 Cu,热传导率为 388 W/mK,垂直于板面主要材料为 FR4 基板,热传导率为 0.25 W/mK。根据传热学公式,综合 PCB 板面积厚度,计算得 PCB 沿板面热传导率与垂直于板面的热传导率分别为 15 W/mK 和 0.38 W/mK。

Ansys 热仿真过程,网格的划分质量直接决定了求解计算的精度是否可以收敛。仿真中,由于系统结构内包含有圆弧特征的几何体,故采用 Mesher-HD(六面体占优网格)划分。且考虑到系统中包含有散热翅片,PCB,芯片等小、长的组件,为了减少网格数量,便于计算,采用非连续性网格划分。所建热仿真模型没有风扇等强迫对流边界条件,均采用自然对流方式换热,计算区域 Cabinet 的 6 个面设置为 Opening 开口属性。且模型采用自然冷却的散热方式,考虑辐射换热,辐射换热类型选择为 Discete Ordinates 辐射模型^[15]。

表 1 温控 PCB 板元件功耗及导热系数

Tab. 1 Temperature controller PCB electronic component Power and Thermal conductivity

元件名称	IRF630	TIP35C	LM1117	LM7805C	LM7905C	IRFZ48N
功耗/W	4	6	6	4	4	2
导热系数 (W·mK ⁻¹)	20	20	20	20	20	20

4 仿真及实验结果分析

4.1 Ansys 热仿真结果

由图 5 所示的温控板温度云图知,电流源板

发热不明显,而温控板由于存在一些大功率元件发热严重,需要更改结构或对 PCB 板进行重新布局优化设计。根据电流源震动实验结果知,从结构体积和系统稳定运行考虑,该系统不适合设计风扇等风道来增加散热,最佳方法是优化元件布局^[16-17]。图 6 所示为优化后温控板温度云图分布,通过将高热元件均匀布局,且在大功率元件后安装散热片,PCB 板上最高温度不超过 50℃,能够保证电子元器件可靠工作。图 7 所示为导入布线后 PCB 板呈现出的各向异性导热率,PCB 板 4 个角固定螺钉,中间通过铝合金制套筒连接,故导热率较高,该仿真云图符合设计情况。图 8 所示为整体系统仿真结果,虽然温控 PCB 板稳态运行局部温度可以达到 50℃,但中间通过铝合金制套筒连接导热的方法,稳态工作时整体系统的温度仍能保持与环境温度相同,并不影响激光器正常工作。且在分析温控设计中,该结构可以用传统的建立 SPICE 模型方法对 TEC 激光管建模分析。

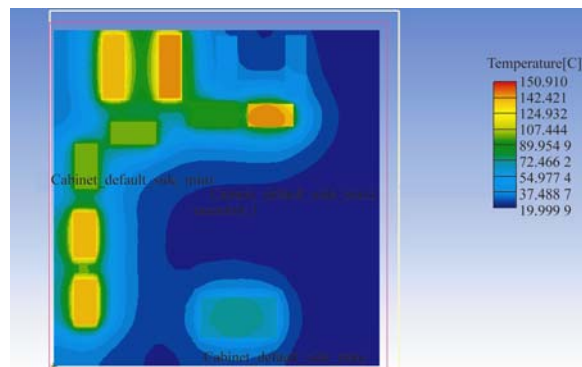


图 5 优化前温控 PCB 板温度云图

Fig. 5 Temperature controller PCB Isotherm plot before optimization

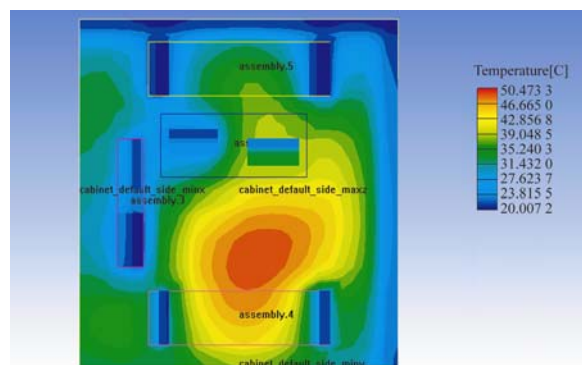


图 6 优化后温控 PCB 板温度云图

Fig. 6 Temperature controller PCB Isotherm plot after optimization

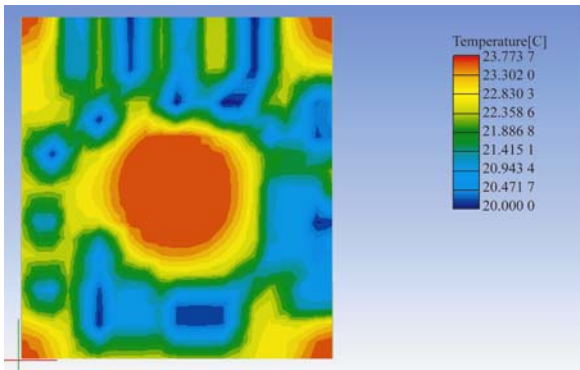


图 7 优化后 PCB 板各项异性导热率

Fig. 7 Temperature controller PCB isotropic thermal conductivity after optimization

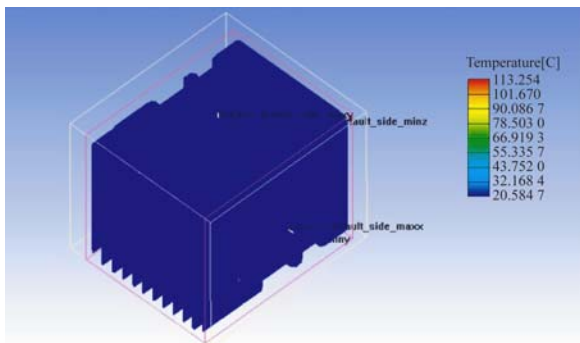


图 8 优化后半导体激光器系统温度云图

Fig. 8 Semiconductor laser System temperature Isotherm plot after optimization

设计过程中,温控 PCB 板,电流源 PCB 通过大量筛选元件,压缩 PCB 板尺寸,最终利用 PCB 板厚度仅有 1.5 mm 的优点,采用叠装的方式集成。该系统电磁干扰极微弱,可忽略不计。另外结构中间圆筒可作准直扩束等光路设计,后期可继续优化研究^[18]。

4.2 半导体激光器输出特性实验结果

4.2.1 温度对频率特性的影响

图 9 所示为所设计的半导体激光器系统实物照片,采用所设计的半导体激光器结构(包括用 Ansys 热仿真并优化后的控制器电路板),设定环境温度为 25℃,工作电流值设定为 35 mA,调节激光器工作温度在 15~40℃内,并记录对应的频率值。图 10 所示为拟合得到的 $T-\lambda$ 曲线。由实验结果可知,首先所设计的激光器结构能够正常运行,所得到的 $T-\lambda$ 曲线与理论分析一致;另外由 $T-\lambda$

拟合曲线得到该激光器温调率为 0.286 9 nm/℃,反映了温度对激光器输出频率特性的影响,因此保证激光器工作时结构散热均匀具有重要意义。



图 9 半导体激光器系统实物照片

Fig. 9 Semiconductor laser system photo

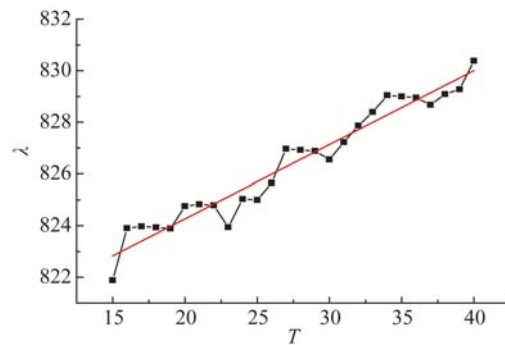


图 10 激光器功率随温度变化曲线

Fig. 10 Curve of laser power with temperature

4.2.2 温度对功率特性的影响

采用激光器系统(包括用 Ansys 热仿真并优化后的控制器电路板),设定环境温度为 25℃,调节激光器工作温度,分别测其工作在 20℃、25℃、30℃、35℃和 40℃的电流-功率特性,图 11 所示为 $I-P$ 特性曲线。从实验结果可以看出所设计的激光器结构系统输出的电流-功率特性与理论分析一致,也证明了所设计的激光器系统能正常工作运行,另一方面从 $I-P$ 曲线可知温度升高会使激光器的阈值电流增大,也会降低 $I-P$ 曲线的斜率,即降低激光器工作效率。因此保证所设计激光器散热良好不仅可以改善激光输出频率特性,也可以消除由于温漂导致的激光输出效率降低问题。且在激光器长期运行过程中,温度不均或过高都会影响激光器工作寿命。

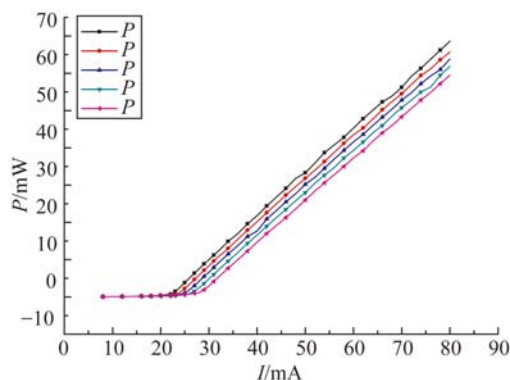


图 11 不同温度下功率电流关系曲线

Fig. 11 Power with current curve at different temperature

参考文献:

- [1] KORNACK T W, GHOSH R K, ROMALIS M V. Nuclear spin gyroscope based on an atomic comagnetometer [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95 (23), 230801.
- [2] 秦杰. 基于 ^{129}Xe -Cs 的 SERF 原子自旋陀螺仪原理实验研究[D]. 北京:北京航空航天大学, 2012. QIN J. *Experimental study SERF atomic spin gyroscope principle based ^{129}Xe -Cs* [D]. Beijing: Beihang University, 2012. (in Chinese)
- [3] COOK E C, MARTIN P J, BROWN-HEFT T L, et al.. High passive-stability diode-laser design for use in atomic-physics experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(4):043101.
- [4] 邢辉, 赵慧洁, 张颖, 等. 热控涂层性能在轨测试用辐射计原理样机的设计与仿真[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(2):241-246. XING H, ZHAO H J, ZHANG Y, et al.. Design and simulation of a radiometer prototype for thermal control coating characteristic on-orbit test [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32 (2):241-246. (in Chinese)
- [5] WEY T, PHAM D, FINFROCK D. Modeling of a closed-loop pump laser temperature control unit, including nonlinear electronics controller, and thermoelectric cooler and mechanical assembly [C]. *Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium on*. IEEE, 2006, 4:2637-2641.
- [6] ANTONOVA E E, LOOMAN D C. Finite elements for thermoelectric device analysis in ANSYS [C]. *Thermoelectrics, 2005. ICT 2005. 24th International Conference on*. IEEE, 2005:215-218.
- [7] COLDREN L A, CORZINE S W, MASHANOVITCH M L. *Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits* [M]. John Wiley & Sons, 212.
- [8] PANKOVE J I. Temperature dependence of emission efficiency and lasing threshold in laser diodes [J]. *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 1968, 4(4):119-122.
- [9] 李亮, 宋健, 李永, 等. 制动器热分析的快速有限元仿真模型研究[J]. *系统仿真学报*, 2005, 17 (12):2869-2877. LI L, SONG J, LI Y, et al.. Study on fast finite element simulation model of thermal analysis of vehicle brake [J]. *Journal of System Simulation*, 2005, 17(12):2869-2877.
- [10] DZIURDZIA P, KOS A. Tool for fast modelling active heat sinks [C]. *Semiconductor Thermal Measurement and Management, 2001. Seventeenth Annual IEEE Symposium*. IEEE, 2001: 174-179.
- [11] 郭亮, 吴清文, 颜昌翔. 空间光谱成像仪热设计及其分析与验证[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(6): 1272-1280. GUO L, WU Q W, YAN CH X, et al.. Thermal design of space spectral imaging apparatus and its analysis and verification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(6):1272-1280. (in Chinese)
- [12] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社, 2008. ZHAO ZH N. *Heat Transfer* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)
- [13] 王永康. ANSYS ICEPAK 电子散热基础教程 [M]. 北京:国防工业出版社, 2015. WANG Y K. *ANSYS ICEPAK Electronic cooling basic tutorial* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)

5 结 论

本文在设计结构前期,运用 Ansys 的 Icepak 仿真软件在电子散热仿真方面的优点,仿真分析整体系统的温度分布,对整个系统后期加工、稳定运行有重要指导意义,避免了后期工作因为热问题导致的实验误差甚至重大经济损失。该方法不仅可以成功的运用于本次半导体激光器一体化结构设计中,在以后其他光机电一体化设计中也具有重要作用^[19-20]。

- [14] 华庆, 殷景华, 焦国芹, 等. 基于 ANSYS 的功率 VDMOS 器件的热分析及优化设计[J]. 电子器件, 2009, 32(2):354-356.
HUA Q, YIN J H, JIAO G Q, *et al.*. Thermal analysis and optimization of power VDMOS transistor based on analysis [J]. *Chinese Journal of Electro Device*. 2009, 32(2):354-356. (in Chinese)
- [15] 阳红, 殷国富, 方辉, 等. 机床有限元热分析中对流换热系数的计算方法研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(4):241-248.
YANG H, YIN G F, FANG H, *et al.*. Research on calculation methods of convective heat transfer coefficients for machine tool's thermal analysis [J]. *Journal of Sichuan university (Engineering science edition)*, 2011, 43(4):241-248. (in Chinese)
- [16] 陈立恒, 吴清文, 罗志涛, 等. 空间相机电子设备热控系统设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(9):2145.
CHEN L H, WU Q W, LUO ZH T, *et al.*. Design for thermal control system of electronic equipment in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9):2145. (in Chinese)
- [17] 张斌. 集成电路芯片级热分析方法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2015.
ZHANG B. The methods of chip-level thermal analysis of integrated circuits [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] 宋洪涛, 宾鸿赞. 热仿真技术在电子设备结构设计中的作用[J]. *Applied Science and Technology*, 2001, 28(8):4-6.
SONG H T, BING H Z. Application of thermal simulation in the structural design of electronic system [J]. *Applied Science and Technology*, 2001, 28(8):4-6. (in Chinese)
- [19] 吴清彬, 陈时锦, 董申. 参数优化方法在轻质反射镜结构设计中的应用[J]. 光学精密工程, 2003, 11(5):466-471.
WU Q B, CHEN SH J, DONG SH. Optimization of parameters structural design of lightweight reflector [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5):466-471. (in Chinese)
- [20] 杨剑锋, 徐振邦, 吴清文, 等. 空间光学载荷六维隔振系统的设计[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5):1347-1357.
YANG J F, XU ZH B, WU Q W, *et al.*. Design of six dimensional vibration isolation system for space optical payload [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1347-1357. (in Chinese)

作者简介:



李光慧(1993—),女,山西大同人,硕士研究生。2014年于重庆大学获得学士学位,主要从事半导体激光器驱动控制方面的研究。E-mail:guanghui@buaa.edu.cn

导师简介:



全伟(1977—),男,山东临沂人,副教授,2008年于北京航空航天大学攻读精密仪器及机械专业博士学位,主要从事新型惯性原子陀螺与原子磁强计技术(新一代导航传感器),高稳定激光光源控制技术,以及基于恒星敏感器的惯性基组合定姿和组合导航技术(多传感器系统信息融合与处理)等方面的研究工作。E-mail:quanwei@buaa.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)