

航天激光源热设计

张昕¹, 陈昉¹, 王世新², 郭健², 何宗维¹, 卢程宏¹

(1. 中国电子科技集团公司第三十四研究所, 桂林 541004; 2. 北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘要:为满足航天应用的激光源被动散热要求,提出激光源内部大功率器件散热解决方案,设计了经由器件、印制电路板到金属结构的导热通道,将热量由器件高效传输至激光源的金属结构,确保器件温度在正常工作范围内;对激光源结构的设计和材料进行优化,增加并优化散热通道,进一步提升散热效率。仿真结果表明:在高温工况下,散热优化后的方案中芯片和激光器最高温度分别降低约 100 °C 和 1 °C,优化方案有效、可行。

关键词:航天; 激光源; 热设计

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)03-0067-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Thermal design of laser source for aerospace

ZHANG Xin¹, CHEN Fang¹, WANG Shixin², GUO Jian², HE Zongwei¹, LU Chenghong¹

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to meet the requirements of passive heat dissipation of laser source in aerospace applications, project of heat dissipation solution of high power devices in laser source is proposed. The heat conduction channel from device and printed circuit board to metal structure is designed, which can transfer heat from devices to metal structure efficiently, ensure that the device temperature is within the normal operating range. Efficiency of heat dissipation can be promoted by ways of evolving structure and material of laser source, and by ways of adding or evolving dissipation passages. Simulation results show that, when working in high temperature circumstance, In the heat dissipation optimized scheme, the maximum temperature of chip and laser is reduced by about 100 °C and 1 °C respectively, the optimized project is effective and viable.

Key words: aerospace, laser source, thermal design

0 引言

激光信息技术已广泛应用在航天通信、传感与遥感等领域。在激光通信传输过程中,光学元件的热变形会影响激光在传递路径上的相位精度^[1],对于应用在传感与遥感等方面的激光信息源,温度的变化会直接影响激光源的波长和输出功率^[2-3];激光器在工作时热耗约占总功耗的 50%~70%,若不能及时散热会使其温度急剧上升,导致输出功率下降进而影响使用寿命^[4]。因此,有必要对激光源进行散热设计。

收稿日期: 2021-06-05。

作者简介: 张昕(1983—),男,硕士,高级工程师,中国电子科技集团公司第三十四研究所集团专家,主要从事光电子技术和光通信研发工作,主持和完成的国家级项目 8 项,获省部级奖 1 项,研发的特种双波长激光源被用于为探月三期采样返回工程。



航天器通过热隔离、热控涂层、电加热/制冷^[5]和间接辐射控温^[6]等方式进行温度控制,前 2 种方式为被动式控制,后 2 种为主动式控制。其中,主动式控制系统可采用基于环路热管的毛细泵驱流体回路作为主要热沉^[7],或者在关键部位(主承力结构)设计主动加热回路来调控温度水平^[8]。但航天器内部的构造紧凑且复杂,不能实现所有温控目标与主动控温的热沉或加热/制冷面直接接触,部分热耗部件只能通过安装的结构将热量最终传输至主结构进行被动散热^[9]。这种情况下,安装结构的表面可视为恒温面,热源为激光源内部的热耗器件,热设计方案为:通过热耗器件、印制电路板(PCB)/结构边缘、激光源结构和恒温面的导热通道,使航天器温控系统能间接对激光源进行温度控制。在此基础上,本文根据应用需求,提出一种航天用激光源散热设计,并根据该设计,对激光源的 PCB 和结构进行散热优化。

1 结构整体要求

激光源的结构设计与相关部位名称如图 1 所示。结构正面顶部有整块盖板;结构内部的热耗器件为半导体激光器(LD1 和 LD2),LD1 和 LD2 安装在安装台上;结构背面的芯片 1 与芯片 2 为热耗器件,焊接在 PCB 上,芯片 2 上方为结构的后盖板;结构背面的左侧壁为侧面散热通道,为 LD2 提供散热;结构的加强筋为 PCB 提供结构支撑。结构底面、顶面和部分侧面温度恒定,依次为底部恒温面、次恒温面 1 和次恒温面 2。

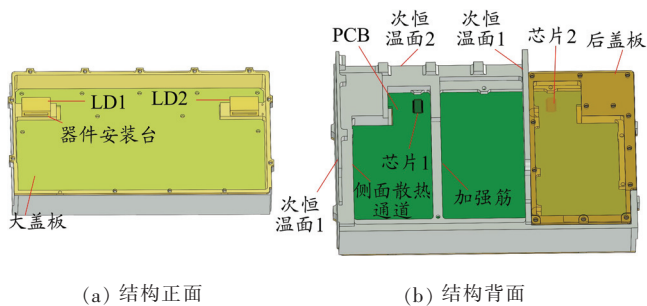


图 1 激光源结构设计

本文使用热仿真软件 Flotherm 对设计的初始方案散热情况进行仿真测试,仿真参数设置如下:激光源结构(硬铝)和激光器(铜钨合金)的材料导热率分别为 $180 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $160 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;LD 和芯片的输入热耗分别为 6 W 和 0.6 W ;环境温度、底部恒温面、次恒温面 1 和次恒温面 2 的温度分别为 55°C 、 55°C 、 60°C 和 62°C 。

2 激光源结构初始方案及散热优化设计

本文仿真监测激光器和芯片的温度,结果如图 2 所示。可以看出,LD1 和 LD2 的最高温度分别为 64.5°C 和 64.2°C ,激光器在高温工况下温度较高,接近工作温度上限;芯片 1 和芯片 2 最高温度分别为 195°C 和 194°C ,已超过工作温度上限。因此,有必要优化散热通道设计,进一步降低器件在高温工况下的最高温度。基于此,本文提出 7 个散热方案。

2.1 散热通道优化设计

方案 1: 对于焊接在 PCB 上的 2 片热耗芯片,在芯片焊接底部增加铜质散热层,散热层沿芯片的两径向延伸至激光源金属结构处,并分别与结构两处位置良好接触,形成双向散热通道,具体位置如图 3 所示。

同时,对于 LD2 的散热通道,在安装凸台的背面增设铝材质小盖板(厚度 2 mm),以增加散热通道面

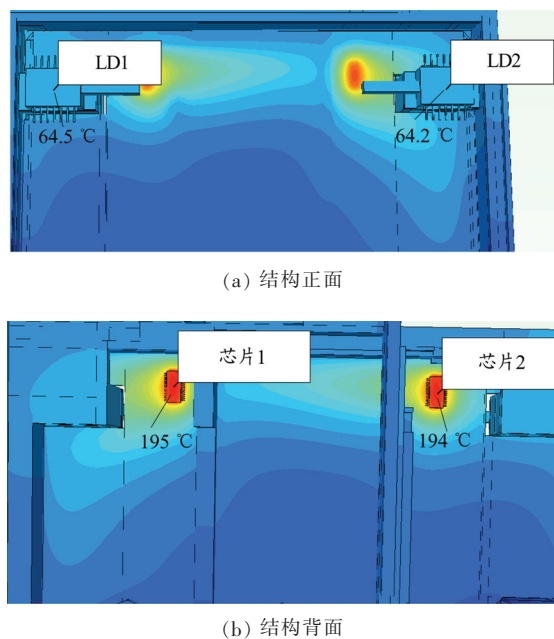


图 2 仿真结果图

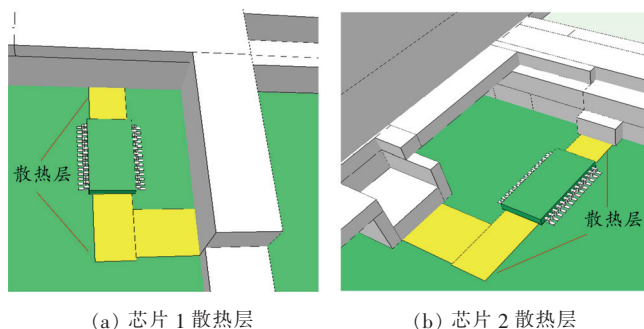


图 3 芯片增加散热层位置

积,增设的位置如图 4 所示。仿真测试增加散热通道后,高温工况下 2 片芯片和 LD1、LD2 的温度分布,结果分别如图 5 和图 6 所示。可以看出,增加散热层后, 55°C 工况下,芯片 1 和芯片 2 最高温度分别由 195°C 和 194°C 降至 83.6°C 和 80.4°C ;LD1 散热通道未变,最高温度仍为 64.5°C ;对于安装台旁边增加小盖板的 LD2, 55°C 工况下,最高温度由 64.2°C 降至 63.4°C 。这证明该优化方案散热效果提升明显,方案有效。

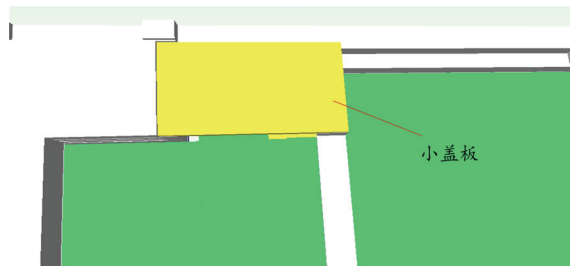
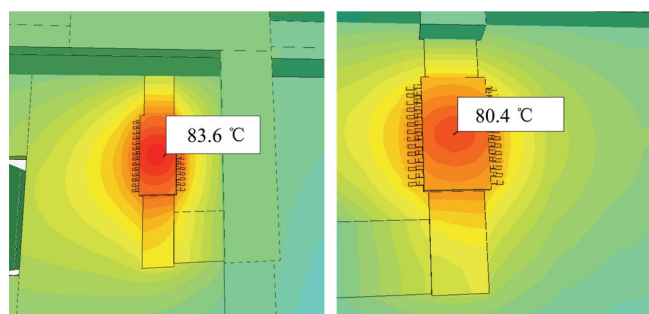
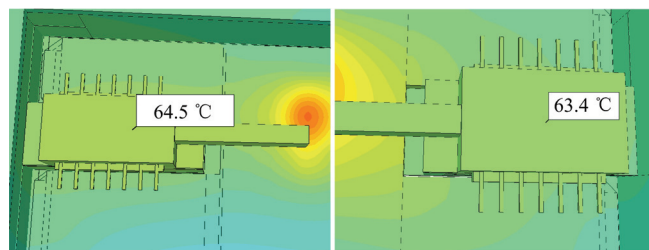


图 4 加设小盖板位置



(a) 芯片 1 热分布 (b) 芯片 2 热分布

图 5 加设散热层后芯片热分布图

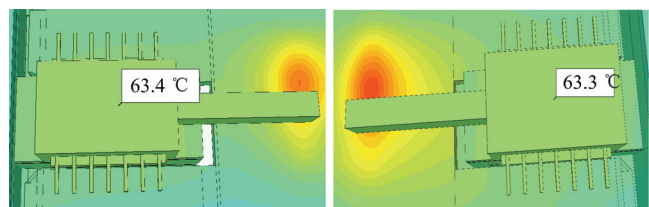


(a) LD1 热分布 (b) LD2 热分布

图 6 增加小盖板后 LD1 和 LD2 温度分布图

2.2 散热通道材质优化

方案 2:在方案 1 的基础上,针对 LD1 的散热通道后盖板和 LD2 的散热通道小盖板,本文分别进一步优化设计。初始方案下小盖板和后盖板材质为铝,厚度为 2 mm。由于铜的导热系数为 $385 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,高于铝的 $180 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,因此本文将材质铝改为铜,计算采用铜质小盖板和后盖板时结构的热分布,结果如图 7 所示。



(a) LD1 热分布 (b) LD2 热分布

图 7 材质变化后 LD 热分布图

综合方案 1 和方案 2 的仿真结果可以看出,小盖板和后盖板材质为铜后,后盖板对应的 LD1 的最高温度由 $64.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $63.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,降温改善明显;小盖板对应的 LD2 的最高温度由 $63.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $63.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$,降温改善不明显。这表明可采取后盖板为铜的方案,但小盖板为铜的方案不可取。

2.3 散热通道厚度优化

在方案 1 设计的基础上,将小盖板和后盖板的厚度由 2 mm 增加至 3 mm,分别计算小盖板和后盖板材

质为铝(方案 3)和铜(方案 4)情况下 LD 的热分布,结果统计如表 1 所示。

表 1 增加散热通道厚度仿真结果统计

方案	小盖板与后盖板参数	LD1 最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	LD2 最高温度/ $^{\circ}\text{C}$
方案 3	材质铝,厚度 3 mm	64	63.3
方案 4	材质铜,厚度 3 mm	62.8	63.3

上述结果表明:对于 LD1 的散热通道后盖板,增加后盖板的厚度和增加厚度并改变材质,对应 LD1 的最高温度由 $64.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别降至 $64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $62.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,改善了 LD1 的散热情况;对于 LD2 的散热通道小盖板,无论是增加小盖板厚度还是改变材质,对 LD2 的散热情况均无改善。

2.4 其它优化设计

方案 5:在方案 1 的基础上,将加强筋厚度由 1.5 mm 增加至 3 mm,并将侧面散热通道的高度由 7 mm 增加至 10 mm,其它参数设置不变。高温工况下,仿真计算激光源结构的热分布情况,得到 LD1 和 LD2 的最高温度分别为 $63.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $63.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比方案 1 可知,增加加强筋厚度与侧面散热通道高度对提升激光器散热无明显改善。

方案 6:在方案 2 的基础上,采用大盖板同时作为 2 个激光器的散热通道,其厚度为 2 mm,材质由铝改变为铜,其它参数设置不变。高温工况下,仿真计算此时激光源结构的热分布,得到 LD1 和 LD2 的最高温度分别为 $62.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $63.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比方案 2 可知,优化大盖板材质对提升激光器散热无明显效果。

方案 7:在方案 2 的基础上,将大盖板参数优化为 3 mm 厚的铝,其它参数设置不变。高温工况下,仿真计算此时激光源结构的热分布,得到 LD1 和 LD2 的最高温度分别为 $63.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $63.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。相比方案 2 可知,增加大盖板厚度对提升激光器散热无明显效果。

3 结果统计

本文统计所有方案的输入条件与相应结果,如表 2 所示。对比表 2 中的数据可以得到以下结果:

①增加导热层后,两芯片的最高温度分别从 $195 \text{ }^{\circ}\text{C}/194 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $83.6 \text{ }^{\circ}\text{C}/80.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,说明增加导热层可显著降低芯片最高温度;

②为 LD2 增加散热通道小盖板,LD2 最高温度由 $64.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $63.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$,说明增加小盖板能有效降低 LD2 最高温度;

表 2 结构优化与对应计算结果统计

方案号	设计输入条件			LD1/LD2 最高温度/℃	芯片 1/芯片 2 最高温度/℃	备注
	后盖板 (厚度/材质)	小盖板 (厚度/材质)	其它			
初始	2 mm/铝	无	无导热层	64.5/64.2	195/194	—
方案 1	2 mm/铝	2 mm/铝	有导热层	64.5/63.4	83.6/80.4	增加铝制小盖板对散热有改善
方案 2	2 mm/铜	2 mm/铜	有导热层	63.4/63.3	83.6/80.4	后盖板为铜对散热有改善,但有增重
方案 3	3 mm/铝	3 mm/铝	有导热层	64/63.3	83.6/80.4	—
方案 4	3 mm/铜	3 mm/铜	有导热层	62.8/63.3	83.6/80.4	散热好,增重多
方案 5	2 mm/铝	2 mm/铝	有导热层,增厚侧面通道与加强筋	63.3/63.2	83.6/80.4	散热好,增重多
方案 6	2 mm/铜	2 mm/铜	有导热层,大盖板为 2 mm 厚的铜	62.9/63.2	83.6/80.4	散热好,增重多
方案 7	2 mm/铜	2 mm/铜	有导热层,大盖板为 3 mm 厚的铝	63.2/63.3	83.6/80.4	散热好,增重多

③将盖板材质由铝质优化为铜质,2 个 LD 最高温度均降低 1.1 ℃,说明盖板材质为铜情况下,优化有效;

④增加盖板厚度或优化大盖板参数对降低 LD 最高温度效果不明显;而且,大量应用铜质材料(方案 4、方案 7),不仅散热效果改善不明显,还显著增加产品重量;

⑤优化侧面散热通道与加强筋厚度,对散热效果无明显改善,说明该散热通道为次要散热通道;

⑥相同材质下,增加盖板厚度可分别将 LD1 最高温度降低 0.5 ℃和 0.6 ℃,但厚度增加将增加产品重量;

⑦在激光源重量允许情况下,在平衡散热效果和控制产品重量两方面上,方案 2 为最优方案;在激光源重量控制严格情况下,方案 1 可作为最优方案。

4 结束语

本文提出了给激光源 PCB 上焊接的大功耗器件散热的方案,设计双向导热通道,即在器件焊接位置的 PCB 上覆铜质导热层,并延伸至结构边框,将器件的热量有效传输至激光源的金属结构。计算结果表明:相同厚度下,铜的散热效果优于铝质;相同材质时,厚度越大,材料的散热效果越好,但厚度增加到一定程度后(≥ 3 mm),即使材质为铜,散热效果改善也不明显,且厚度增加将导致严重的产品增重。对应用较广泛的 LD,除了通过安装台散热外,还可增加散热

通道(小盖板),或优化散热通道参数(材质与厚度)提升散热效果;热设计时应重点关注主要散热通道,次要散热通道的优化对改善散热效果不明显。本文的研究内容可为航天产品主动散热的热设计提供参考,实际应用时,应平衡散热效果与产品重量 2 个方面,选取最佳方案。

参考文献:

[1] 孟恒辉,耿利寅,李国强. 激光通信器热设计与热试验[J]. 红外与激光工程,2014,43(7):2295–2299.
[2] 李明月,何君. 国外军用大功率半导体激光器的发展现状[J]. 半导体技术,2015,40(5):321–327.
[3] 刘梦涵,崔碧峰,何新,等. 大功率低阈值半导体激光器研究[J]. 中国激光,2016,43(5):1–6.
[4] 艾淑平. 半导体激光器恒温控制单元的控制模式与算法研究 [D]. 长春:东北师范大学,2005.
[5] 訾克明,吴清文,李泽学,等. 某空间光学遥感器的热分析和热设计[J]. 光学技术,2008,34(增刊):89–91.
[6] 江帆,吴清文,王忠素,等. 空间相机遮光罩的低功耗热设计[J]. 红外与激光工程,2019,45(9):1–6.
[7] 黄金印,潘福明,傅伟纯,等. 高分七号卫星激光测高仪热设计及验证[J]. 航天器工程,2020,29(3):138–143.
[8] 于峰,徐娜娜,赵振明. “高分四号”卫星相机在轨温度分析及热设计优化[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(1):177–186.
[9] 李军,李宁宁. 电源板散热片装配工序操作方法改善研究[J]. 桂林电子科技大学学报,2010,30(3):266–269.