

全固态太阳光泵浦激光器热效应分析

许维琛 张海洋 赵长明

Thermal effect analysis of all-solid-state solar pumped laser

XU Weichen, ZHANG Haiyang, ZHAO Changming

引用本文:

许维琛, 张海洋, 赵长明. 全固态太阳光泵浦激光器热效应分析[J]. 应用光学, 2023, 44(6): 1219–1227. DOI: 10.5768/JAO202344.0610008

XU Weichen, ZHANG Haiyang, ZHAO Changming. Thermal effect analysis of all-solid-state solar pumped laser[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(6): 1219–1227. DOI: 10.5768/JAO202344.0610008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

星载激光雷达滤波器组件热分析及参数优化

Thermal analysis and parameter optimization of spaceborne lidar filter

应用光学. 2017, 38(4): 660–664 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407001>

200 mJ 半导体端面泵浦 MOPA 激光器研究

Research on 200 mJ semiconductor end-pumped MOPA Laser

应用光学. 2019, 40(3): 489–492 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0307001>

二极管泵浦折叠式电光调 Q 激光器

LD pumped folded electro-optic Q-switched laser

应用光学. 2018, 39(2): 274–278 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0207002>

LDA 侧面 Zigzag 泵浦多边形薄片激光放大器模拟与实验研究

Simulation and experimental study of LDA Zigzag side-pumped polygonal thin-disk laser amplifier

应用光学. 2020, 41(5): 1096–1107 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0507001>

一款新型高精度全自动多波段太阳光度计

Novel high-precision full autocontrol multi-waveband sun photometer

应用光学. 2019, 40(1): 105–112 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0105001>

低阈值锁模状态可转换的全保偏光纤激光器

Convertible all polarization-maintaining fiber laser in low threshold mode-locked state

应用光学. 2021, 42(4): 755–760 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0408002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 06-1219-09

全固态太阳光泵浦激光器热效应分析

许维琛, 张海洋, 赵长明

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

摘 要: 太阳光泵浦激光器是将太阳光直接转化为激光的装置, 具有能量转换环节少、效率高、结构简单可靠、性能稳定以及无污染等优点。对应用于空间环境 (4 K) 的全固态太阳光泵浦激光器进行了建模, 并对泵浦太阳光收集阶段进行了热效应分析。先后考虑两种安装底座和四种太阳光线偏转情况, 运用 ANSYS Workbench[®] 热分析软件分别进行了稳态热分析。针对第一种情况得到的可行性验证, 提出了下一步的改进优化意见, 并初步设想进行实际模型搭建和测试。针对第二种不可行情况, 提出了几种可能的改进措施, 并对未来的工作进行了展望。该研究为太阳光泵浦激光器在空间环境中的实际应用提供了一种全新的、采用全固态传导冷却方式温控系统的可行方案, 为未来空间太阳光泵浦激光器能够得到实际应用提供了研究资料。

关键词: 太阳光泵浦激光器; 温控系统; 空间应用; 稳态热分析

中图分类号: TN242

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0610008

Thermal effect analysis of all-solid-state solar pumped laser

XU Weichen, ZHANG Haiyang, ZHAO Changming

(School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The solar-pumped laser is a device that directly converts the sunlight into the laser. It has the advantages of less energy conversion, high efficiency, simple and reliable structure, stable performance and no pollution. An all-solid-state solar-pumped laser for the space environment (4 K) was modeled, and the thermal effect of the pumped solar collection phase was analyzed. The steady-state thermal analysis was carried out by using ANSYS Workbench[®] thermal analysis software, considering two mounting bases and four solar deflection conditions. According to the feasibility verification of the first case, the suggestions for further improvement and optimization were put forward, and the actual model building and testing were preliminarily envisaged. In view of the second infeasible case, several possible improvement measures were put forward, and the future work was prospected. This study provides a new feasible scheme of temperature control system with all-solid-state conduction cooling for the practical application of solar pumped laser in space environment, and provides research data for the practical application of space solar pumped laser in the future.

Key words: solar pumped laser; temperature control system; space application; steady-state thermal analysis

引言

能源是现代经济发展浪潮中的一个重要支柱, 已成为当今人类社会发展的不可或缺的存在^[1-3]。在众多新型能源之中, 太阳能是最理想的可再生能源。其具有取之不尽、辐射总功率大、清洁无污染

等突出特点, 必将成为未来的主要新能源之一^[4]。

太阳光泵浦激光器是利用太阳光的光能进行增益介质受激放大辐射的装置。与其他类型的激光器相比, 它具有简单的能量转换环节、稳定可靠的工作结构和性能、绿色环保无污染等优势, 在通信、

收稿日期: 2023-09-18; 修回日期: 2023-09-27

作者简介: 许维琛 (2000—), 男, 博士研究生, 主要从事新型光电子器件与技术研究。E-mail: 3120235128@bit.edu.cn

通信作者: 张海洋 (1981—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新型光电子器件与技术研究。E-mail: ocean@bit.edu.cn

新能源开发利用、军事武器等领域,尤其是太阳能丰富的空间环境中,都有极高的应用优势和极大的发展空间^[5]。

太阳光泵浦固体激光器由于其特有的优势,一直得到了国内和国际的广泛关注,并且在激光的质量和输出效率、太阳光的收集效率、激光器热效应等方面都有了极大的提高。

2020 年,里斯本新大学的 VISTAS C R 团队首次报道了 Ce:Nd:YAG 太阳能泵浦激光器的发射。在 569 W 的太阳泵浦功率下,激光器在 1064 nm 处发射 6 W 的连续波功率,收集效率为 4.9 W/m²^[6]。2021 年,乌兹别克斯坦科学院等离子体和激光技术研究所的 PAYZIYEV S 团队对太阳辐射激发下 Nd:YAG 和 Ce:Nd:YAG 的发光特性进行了对比研究,发现在相同泵浦条件下,Ce:Nd:YAG 太阳能激光器的输出功率比 Nd:YAG 太阳能激光器可达到 2 倍的提高,证实了 Ce:Nd:YAG 是太阳能泵浦激光器中 Nd:YAG 的最佳替代品之一^[7]。2022 年,北京理工大学 CAI Z T 团队通过研究不同激光介质长度下太阳能吸收功率与材料损耗之间的关系,提出了一种计算增益介质最佳长度的方法。并对直径为 3 mm~6 mm 的 Nd:YAG 晶体长度进行了优化,使直径 5.5 mm 和 6 mm 的 Nd:YAG 晶棒分别获得了 40.1 W/m² 和 36.3 W/m² 最大的收集效率^[8]。2023 年,CAI Z T 团队在 0.69 m² 有效太阳能收集面积下产生的连续波激光功率为 26.93 W,斜率效率为 6.33%^[9]。同年,CATELA M 团队提出一种多棒太阳激光泵浦方法,利用 Zemax[®]和 LASCAD[®] 软件进行了数值分析,结果表明太阳能到激光的转换效率达到 2.0%^[10]。

然而,同其他固体激光器一样,其输入的总能量中仅有一小部分被最终转化为激光能进行输出,而大部分能量都以热能的形式堆积在激光器中,并且集中分布在激光增益介质处。增益介质由于受热升温而产生的热效应是影响固体激光器输出功率稳定性和输出光束质量的一大因素。同时由于温度梯度的存在,所产生的热应力甚至会使激光增益介质断裂从而损坏激光器,无法正常工作。而且,对于输入功率越大的激光器,其相应产生的热效应也越严重^[11]。然而当前常用的几种固体激光器的温控系统,如水冷循环冷却、空气对流冷却等,由于其各自的缺点和不适应性,都无法适用于太阳光资源丰富的空间环境中。而将太空中本身就存在的低温环境纳入考虑范围之后,全

固态接触传导冷却方式则成为一种可行的更优冷却方式^[12-13]。这种冷却方式不耗能,且运行稳定不易出现故障,不额外占用空间等等,这些优点都大大弥补了液体循环冷却方式的不足,因此全固态传导冷却成为应用于空间的太阳光泵浦激光器温控系统的最佳选择。

本研究对应用于空间环境(4K)的全固态太阳光泵浦激光器进行了建模,并对泵浦太阳光收集阶段进行了热效应分析。先后针对两种安装底座、四种光线偏转情况分别进行了稳态热分析,探究其可行性。本研究为空间太阳光泵浦激光器在空间环境中的实际应用提供了一种采用全固态传导冷却方式的温控系统的可行方案,为未来空间太阳光泵浦激光器能够得到实际应用提供了研究资料。

1 全固态太阳光泵浦激光器系统模型分析

全固态太阳光泵浦激光器系统模型整体呈长方体,尺寸为 400 mm×400 mm×500 mm。模型外部由菲涅尔透镜、铝制外壳及铜制底座构成,内部主要由二次聚焦透镜、Nd:YAG 晶体棒及 YAG 锥形腔、铜制基座及光学检测器等构成。铜制底座连接空间站传感器安装底座,模型的温控系统采用全固态传导冷却方式,将太阳光收集阶段所产生的热量传导至铜制底座和铝壳,并通过热传导及热辐射两种方式进行散热。

为方便叙述,对模型进行简化处理,并进行各个面结构的标注,如图 1 所示。

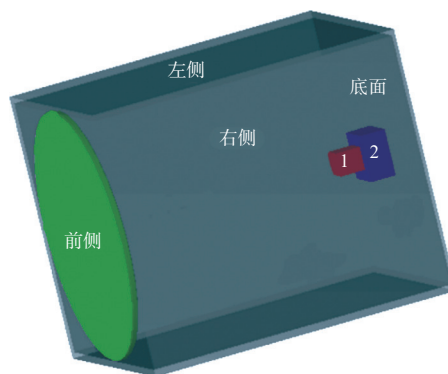


图 1 全固态太阳光泵浦激光器简化热分析模型

Fig. 1 Simplified thermal analysis model of all-solid-state solar pumped laser

图 1 中的 1、2 部分为晶体棒、锥形腔以及铜基座部分。模型外壳的底面为铜制,底面连接温

度恒为 26 ℃(299.15 K)的传感器。其余部分则为铝制, 外壳的前侧装有菲涅尔透镜。

2 全固态太阳光泵浦激光器热效应分析

2.1 基于 ANSYS Workbench®平台的热效应分析

在深冷空间, 由于没有空气等介质的存在, 太阳光泵浦激光器内部为真空。在此条件下, 激光器的传热方式主要是热传导和热辐射。热传导, 即激光器各个结构之间通过热接触将热量进行传导冷却, 这在拥有热接触的两个结构之间都可发生; 热辐射, 指将能量以电磁波的形式向空间进行传输来进行冷却。对此激光器模型而言, 首先考虑菲涅尔透镜。由基尔霍夫定律可知, 菲涅尔透镜的热吸收率较低, 故其热辐射率也较低, 不予考虑。另外, 由于激光器内部温度较高且结构紧密, 故内部空间的热辐射率也较小, 同样不予考虑。铜制底座与空间站传感器相连接, 辐射空间小, 也不予考虑。所以该激光器的热辐射散热区域主要集中于铝制外壳的 4 个外表面。

铝壳热辐射的相关数值在设置时需要引入发射率(辐射率)这一概念。物体表面的辐射率(黑度)定义为物体表面辐射的热量与黑体在同一表面辐射热量之比:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_b} \quad (1)$$

式中: ε 为辐射率(黑度); q 为物体表面辐射热量; q_b 为黑体在同一表面辐射热量。

通过查找资料可以得到, 铝的辐射率约为 0.05^[14]。设置环境温度为 4 K, 向环境空间进行辐射。

首先考虑采取有制冷功能的 I 型传感器作为安装底座, 其可维持激光器铜制底座下表面 26 ℃(299.15 K)恒温。则此时激光器所产生的热量是依靠激光器各结构之间的热传导至恒温底座和铝壳外表面对空间热辐射两种方式共同进行, 而其他表面绝热(即无对外热辐射)。此种情况下, 参考空间站搭载舱外载荷的实际应用场景, 从而对整个激光器达到冷却的目的。激光器简化模型各部分材质及对应热导率如表 1 所示。

2.1.1 菲涅尔透镜受热情况分析

经查阅资料, 以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)制成的菲涅尔透镜具有极为良好的太阳光透过率, 一般高达 92% 以上。而透镜材料的光学吸收则会主要以热的形式作用于透镜, 在透镜内部产生热量, 并通过铝壳进行热量传导。

表 1 激光器简化模型各部分材质及对应热导率

Table 1 Materials and corresponding thermal conductivity of each part of simplified laser model

结构	材质	各向同性热导率/(W/(m·K))
晶体棒	Nd:YAG	14(20 ℃); 10.5(100 ℃)
锥形腔	YAG	14(20 ℃); 10.5(100 ℃)
铜基座和模型后底座	铜	397
菲涅尔透镜	聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)	0.19
外壳	铝合金	151

为理解计算菲涅尔透镜热吸收的具体热功率, 以透过率 92% 以上的条件为基础, 对反射损失进行计算。PMMA 的折射率与光学玻璃相近, 即 $n=1.49$ ^[15]。

当光从空间中垂直入射时, 由菲涅尔公式可推得反射率为

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (2)$$

代入 $n=1.49$, 得 $R \approx 0.04$, 即菲涅尔透镜的反射率约为 4%^[16]。故仅剩下约小于 4% 的太阳光能量由于透镜吸收和散射而损失。而经查阅相关资料可以得知, PMMA 对可见光的吸收率小于 0.5%, 即剩余的 4% 的能量大部分都通过散射而损失掉了^[17]。而太阳光的主要能量集中于可见光波段, 如图 2 所示^[18-19]。

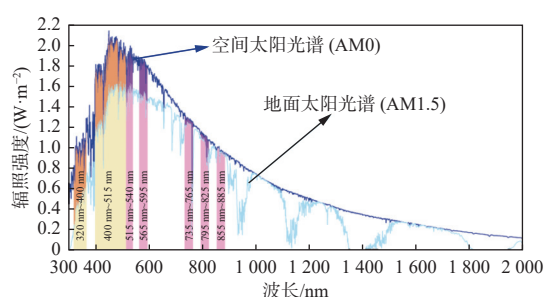


图 2 太阳光发射光谱

Fig. 2 Solar emission spectrum

故 PMMA 材料对太阳光整个波段的平均吸收率也应小于 0.5%。已知空间太阳光功率 1362 W/m², 菲涅尔透镜的面积为 0.119 46 m², 则入射菲涅尔透镜的太阳光功率为 162.7 W, 其吸收的热量入射功率的 0.5% 以内, 即小于 0.81 W。

为验证菲涅尔透镜是否会因过度受热而熔化, 将 0.81 W 的热功率均匀作用于菲涅尔透镜内部, 边界条件为铜基座底面为 26 ℃(299.15 K)恒温, 铝

壳外表面存在黑度为 0.05 的热辐射,其他表面为默认边界条件(绝热),得到稳态结果如图 3 所示。

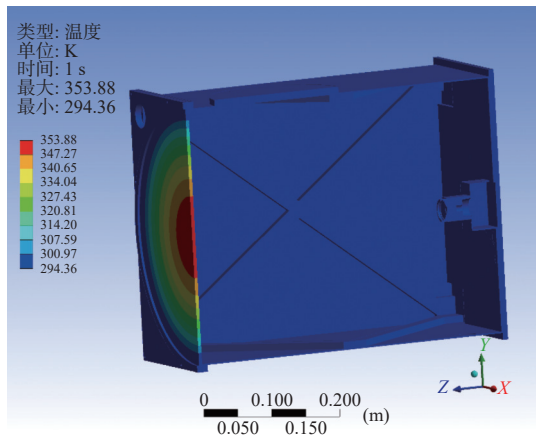


图 3 菲涅尔透镜稳态温度分布图
Fig. 3 Steady-state temperature distribution diagram of Fresnel lens

对稳态结果进行分析可以得到,待模型整体温度分布稳定之后,最低温度为 294.36 K,最高温度为 353.88 K。而非涅尔透镜材料 PMMA 的熔点为 423.15 K(150 ℃),高于分析所得到的最高温度,故菲涅尔透镜可正常工作。

2.1.2 针对空间环境中 4 种光线偏转情形的热效应分析

考虑空间真实条件下由于航天器姿态的变化引起太阳光入射光线绕 X 轴的旋转,从而使太阳光光线经过菲涅尔透镜聚焦后会照射于激光器的不同位置,在激光器主体结构产生不同的热功率分布,引起相应的温度变化。

综合以上实际情况,运用光学软件对太阳光光路进行追踪,得到表 2 所示结果。

为分析所建固态传导冷却模型的可行性,由表 2 结果可以得到,仅需考虑以上所标出的 4 种热功率分布情况即可验证模型的可行性。

针对 0°和 3°两种情况,铝壳不受热,而非涅尔透镜的热量传导主要依靠铝壳进行而与铜基座无关,从而菲涅尔透镜所产生热量的传导不会影响到铜基座的稳态热分析。故前两种情况进行分析时可以忽略菲涅尔透镜的产热而将模型进行简化。

综上所述,所需考虑的 4 种情形分别为

- 1) 0°(正入射): 晶体棒及其锥形腔受热;
- 2) 3°: 模型底座内表面及铜基座前表面受热;
- 3) 10°: 菲涅尔透镜及模型底座内表面受热;
- 4) 25°: 菲涅尔透镜及铝壳下内表面受热。

表 2 太阳光光线追迹辐照度分布

Table 2 Solar ray tracing irradiance distribution

光源绕 X 轴旋转	上面	下面	侧左面	侧右面	后面	1 面	2 面
0°	1.2	1.1	1.1	1.3	6.8	5.4	130.9
1°	5.4	1.2	1.2	1.4	15.9	19.7	123.0
2°	5.7	6.7	1.2	1.4	33.8	52.7	80.2
3°	6.0	1.6	1.2	1.4	51.2	105.3	4.5
4°	6.1	1.6	1.2	1.4	73.8	70.0	1.5
5°	5.7	1.9	1.2	1.4	122.4	5.6	0.4
10°	5.4	10.0	1.2	1.5	134.4	0.2	0.1
15°	6.1	25.5	1.4	1.5	113.9	0.1	0
20°	6.1	51.3	1.9	2.4	77.0	0.1	0
25°	9.1	121.2	4.1	4.6	12.3	0.1	0
30°	10.6	112.6	6.4	6.3	8.2	0.1	0
35°	10.8	103.4	7.5	6.8	7.6	0.1	0
40°	10.4	95.3	7.6	7.1	3.9	0.1	0
50°	8.7	66.7	7.8	7.2	1.9	0	0
60°	6.0	42.6	6.3	5.4	0.7	0	0
70°	4.1	22.1	3.3	3.7	0.3	0	0
80°	1.0	7.8	0.8	1.4	0.1	0	0
90°	0	0	0	0	0	0	0

根据光学仿真软件分别对 4 种情况的太阳光光路进行追踪得到的辐照图,在对应的位置设置热源,并进行相应的稳态热分析。

1) 0°(正入射): 晶体棒及其锥形腔受热
仿真软件得到的辐照图如图 4 所示。

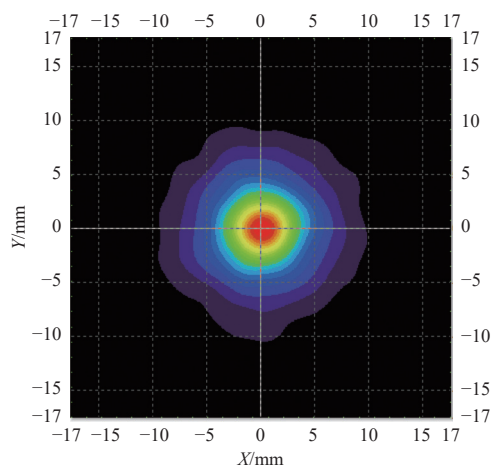


图 4 锥形腔前表面辐照度分布图
Fig. 4 Irradiance distribution diagram of front surface of conical cavity

得到的稳态结果如图 5 所示,待模型整体温度分布稳定之后,最低温度为 299.13 K,最高温度为 440.66 K,分别出现在铜基座底面和晶体棒内部。

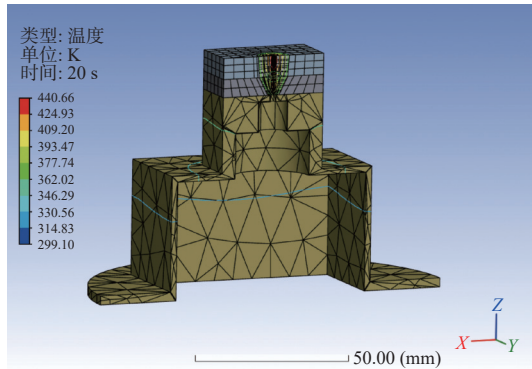


图5 稳态热分析结果图(等值线图)

Fig. 5 Diagram of steady-state thermal analysis results (contour map)

为进一步直观观察到晶体棒及锥形腔部分的热量分布,将 ANSYS Workbench®中得到的各节点温度分布数据导出,并进行计算整理,得到不同 Z 坐标位置和距 Z 轴距离的温度分布数据,并用 Origin 软件进行图像呈现得到图 6。

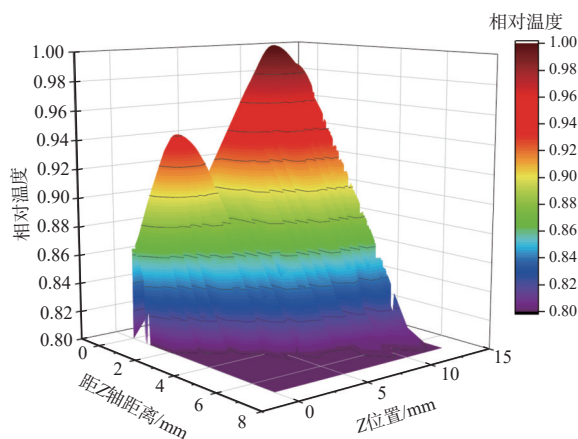


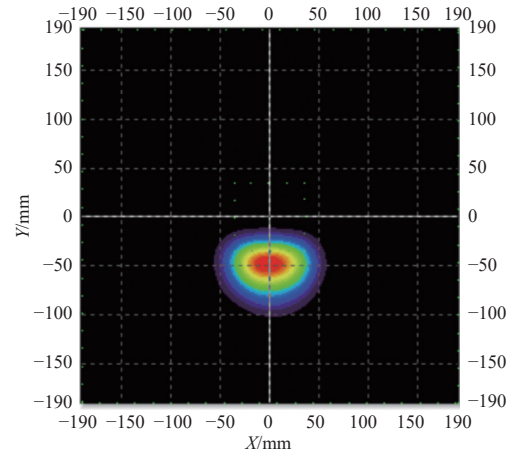
图6 晶体棒及锥形腔部分的热量分布曲线图

Fig. 6 Heat distribution curves of crystal rod and conical cavity

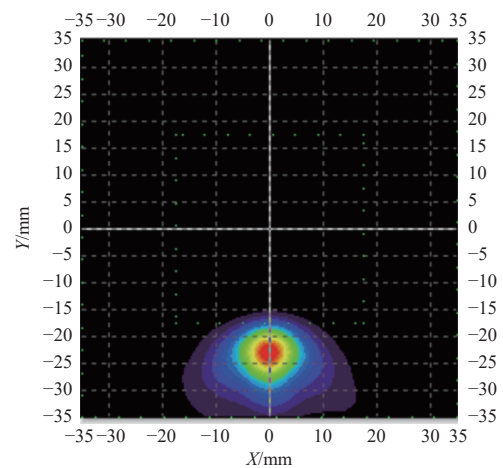
图 6 可直观看到晶体棒及锥形腔两部分的温度分布存在 2 个高热点,并向外侧逐步降低。从整体模型的温度分布可以看出,铜基座的热传导效果依旧良好,有一定温度梯度的变化但变化梯度较缓。位于晶体棒的最高温度为 440.66 K,在这个温度下 Nd:YAG 晶体可正常工作(其中 Nd:YAG 晶体熔点为 2 243.15 K)。

2) 3°: 模型底座内表面及铜基座前表面受热

仿真软件得到的辐照图如图 7 所示,得到的稳态结果如图 8 所示,待模型整体温度分布稳定之后,最低温度为 293.85 K,最高温度为 389.46 K,高热点位于铜基座。此种情况下,激光器可正常工作(其中铜熔点为 1 357.77 K)。



(a) 模型底座内表面



(b) 铜基座前表面

图7 太阳光辐照度分布图

Fig. 7 Solar irradiance distribution diagram

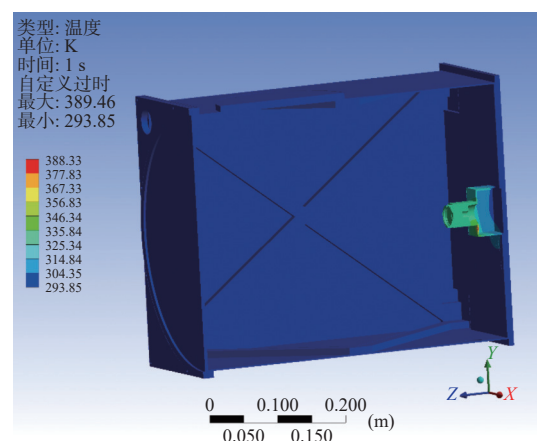


图8 稳态热分析结果图

Fig. 8 Diagram of steady-state thermal analysis results

3) 10°: 菲涅尔透镜及模型底座内表面受热

仿真软件得到的辐照图如图 9 所示,得到的稳态结果如图 10 所示,待模型整体温度分布稳定之后,最低温度为 294.36 K,最高温度为 353.88 K,高热

点位于菲涅尔透镜。此种情况下,激光器可正常工作(其中铜熔点为 1 357.77 K, PMMA 熔点为 423.15 K)。

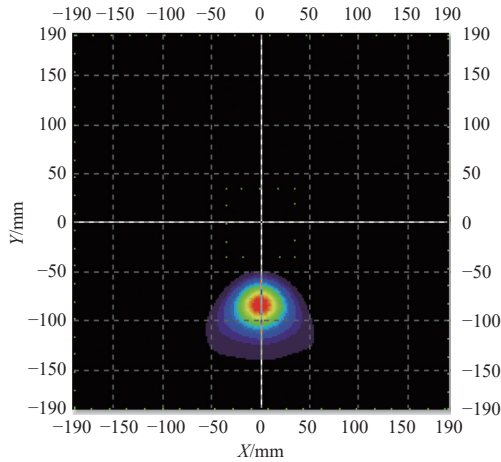


图 9 太阳光辐照度分布图

Fig. 9 Solar irradiance distribution diagram

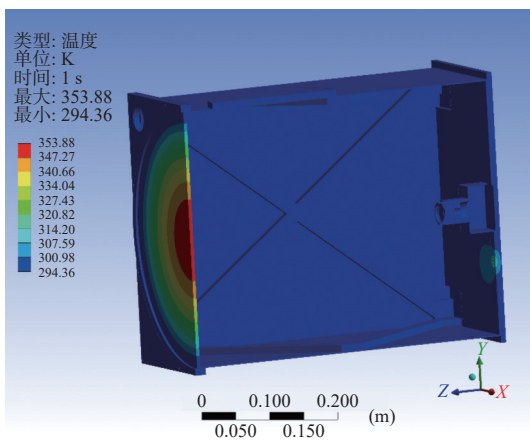


图 10 稳态热分析结果图

Fig. 10 Diagram of steady-state thermal analysis results

4) 25°: 菲涅尔透镜及铝壳下内表面受热仿真软件得到的辐照图如图 11 所示。

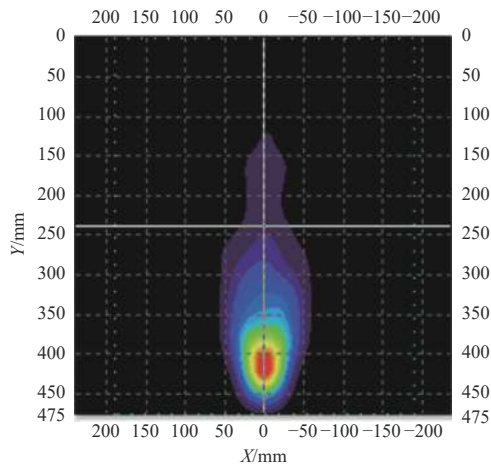


图 11 太阳光辐照度分布图

Fig. 11 Solar irradiance distribution diagram

得到的稳态结果如图 12 所示,待模型整体温度分布稳定之后,最低温度为 298.95 K,最高温度为 435.97 K,高热点位于铝壳下内表面。菲涅尔透镜最高温度小于 344.62 K。此种情况下,激光器可正常工作(其中铝合金熔点约为 800 K, PMMA 熔点为 423.15 K)。

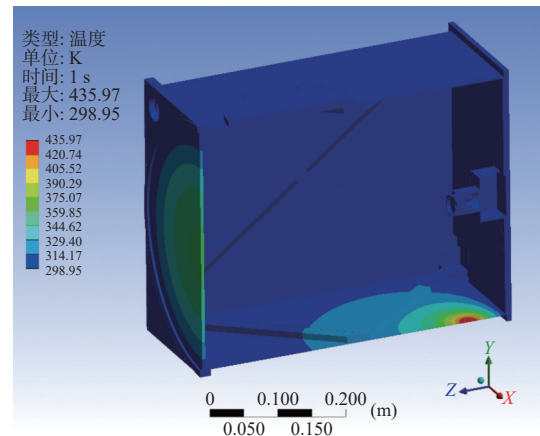


图 12 稳态热分析结果图

Fig. 12 Diagram of steady-state thermal analysis results

2.1.3 结论

当考虑依靠激光器各结构之间的热传导至恒温底座和铝壳外表面对空间热辐射两种方式共同进行冷却散热,而其他表面绝热(即无对外热辐射)时,分别对四种空间真实条件下,由于航天器姿态的变化引起太阳光入射光线绕 X 轴旋转的情况进行热稳态分析,均得到了可行性验证,具体结果如表 3 所示。

表 3 结果汇总

Table 3 Summary of results

光线偏转角度	简化后受热情况	最高温度(位置)	结论
0°	晶体棒及其锥形腔受热	440.66 K(晶体棒)	可行
3°	模型底座内表面及铜基座前表面受热	389.46 K(晶体棒)	可行
10°	菲涅尔透镜及模型底座内表面受热	353.88 K(菲涅尔透镜)	可行
25°	菲涅尔透镜及铝壳下内表面受热	435.97 K(铝壳)	可行

3 全固态太阳泵浦激光器的进一步研究

另外,还需探究仅通过铝制外壳热辐射进行冷却的可能性,所以还需考虑仅依靠结构间热传导及铝壳的热辐射而非通过恒温底座进行冷却这一方式。此种情况下,同样参考空间站搭载舱外载荷的实际应用场景,采取无制冷功能的 II 型传感

器作为安装底座。

3.1 采用非恒温制冷底座的热效应分析

参考第二章节, 同样运用光学软件对太阳光光路进行追踪, 仍可得到以下 4 种情况的可行性验证需要:

- 1) 0° (正入射): 菲涅尔透镜、晶体棒及其锥形腔受热;
- 2) 3° : 菲涅尔透镜、模型底座内表面及铜基座前表面受热;
- 3) 10° : 菲涅尔透镜及模型底座内表面受热;
- 4) 25° : 菲涅尔透镜及铝壳下内表面受热。

由于此时的边界条件改变, 即底座绝热而非恒温, 故整个激光器所产生的热量只能通过结构间热传导及铝外壳的热辐射向空间中进行辐射散热, 从而达到冷却的目的。针对以上 4 种情况的分析, 虽然菲涅尔透镜的热吸收功率很小, 但由于其与铝壳直接相连, 故都应予以考虑, 不能进行简化。

- 1) 0° (正入射): 菲涅尔透镜、晶体棒及其锥形腔受热

对稳态结果 (如图 13 所示) 进行分析可以得到, 由于菲涅尔透镜的最高温度高于 547.34 K, 此时已熔化, 故该种情况不可行 (其中 PMMA 熔点为 423.15 K)。

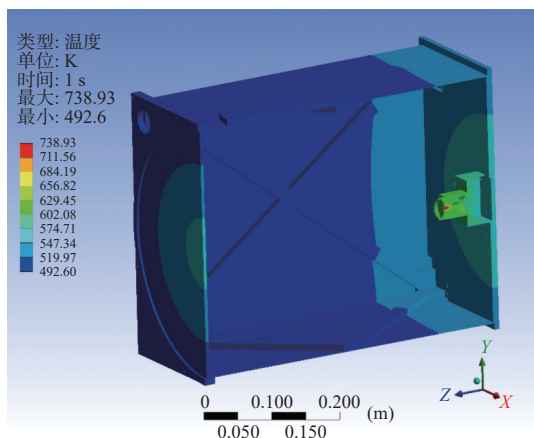


图 13 稳态热分析结果图

Fig. 13 Diagram of steady-state thermal analysis results

- 2) 3° : 菲涅尔透镜、模型底座内表面及铜基座前表面受热

对稳态结果 (如图 14 所示) 进行分析可以得到, 由于菲涅尔透镜最高温度高于 476.59 K, 此时已熔化, 故该种情况不可行 (其中 PMMA 熔点为 423.15 K)。

- 3) 10° : 菲涅尔透镜及模型底座内表面受热

对稳态结果 (如图 15 所示) 进行分析可以得

到, 由于菲涅尔透镜最高温度高于 558.31 K, 此时已熔化, 故该种情况不可行 (其中 PMMA 熔点为 423.15 K)。

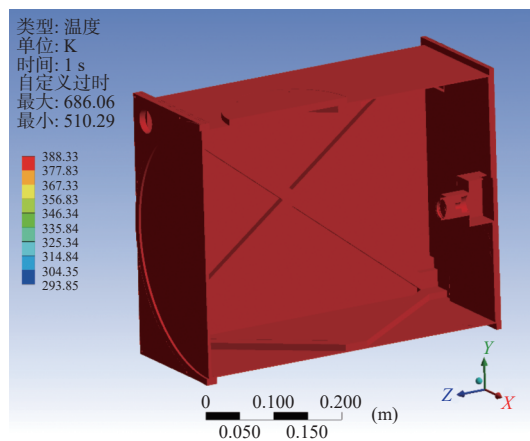


图 14 稳态热分析结果图

Fig. 14 Diagram of steady-state thermal analysis results

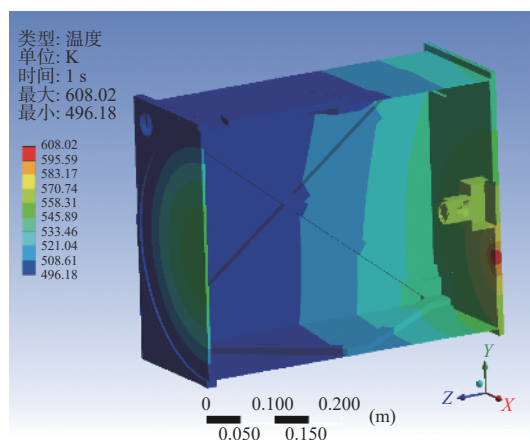


图 15 稳态热分析结果图

Fig. 15 Diagram of steady-state thermal analysis results

- 4) 25° : 菲涅尔透镜及铝壳下内表面受热

对稳态结果 (如图 16 所示) 进行分析可以得

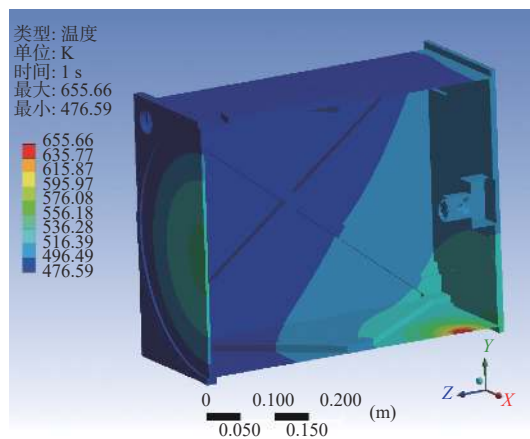


图 16 稳态热分析结果图

Fig. 16 Diagram of steady-state thermal analysis results

到,由于菲涅尔透镜最高温度高于 636.28 K,此时已熔化,故该种情况不可行(其中 PMMA 熔点为 423.15 K)。

3.2 结论

当考虑仅依靠结构间热传导及铝壳的热辐射而非通过恒温底座进行冷却这一方式,且其他表面绝热(即无对外热辐射)时,分别对四种空间真实条件下,由于航天器姿态的变化引起太阳光入射光线绕 X 轴旋转的情况进行热稳态分析,均得到了不可行的验证,具体结果如表 4 所示。

表 4 结果汇总

Table 4 Summary of results

光线偏转角度	简化后受热情况	结论
0°	菲涅尔透镜、晶体棒及其锥形腔受热	不可行
3°	菲涅尔透镜、模型底座内表面及铜基座前表面受热	不可行
10°	菲涅尔透镜及模型底座内表面受热	不可行
25°	菲涅尔透镜及铝壳下内表面受热	不可行

不可行原因均是由于菲涅尔透镜的最高温度高于其熔点(423.15 K),从而导致其熔化而无法正常工作。

4 结论

首先,调研了常见的固体激光器温控系统,并结合空间中的具体复杂环境,通过分析得到全固态传导冷却是适合应用于空间环境的太阳光泵浦激光器的一种可行的冷却方式。其次,对全固态太阳光泵浦激光器模型进行了模型简化。考虑铜制底座连接空间站具有恒温制冷功能的 I 型传感器安装底座,结合空间真实条件下由于航天器姿态的变化引起太阳光入射光线的旋转,运用 ANSYS Workbench®热分析软件,对四种光线偏转情况分别进行了稳态热分析,并通过分析结果得到了可行性验证。随后,在铜制底座连接恒温制冷功能安装底座这一情况得到可行性验证的基础上,将制冷底座改为无恒温制冷功能的 II 型传感器作为安装底座,此时激光器仅依靠铝壳对空间热辐射这种方式进行冷却。通过分析,得到了不可行的结论。不可行的原因均是由于菲涅尔透镜温度过高。最后,本研究为空间太阳光泵浦激光器在空间环境中的实际应用提供了一种全新的、采用全固态传导冷却方式的温控系统的可行方案,并且为采用无恒温制冷功能的 II 型传感器作为安装底

座提供了参考和可行的改进思路,为未来空间太阳光泵浦激光器能够得到实际应用提供了研究资料。

太阳能作为最理想的可再生能源。其具有取之不尽、辐射总功率大、清洁无污染等突出特点,必将成为未来的主要新能源之一。而相对于其他类型的激光器,太阳光泵浦激光器具有能量转换环节少效率高、结构简单可靠、性能稳定以及无污染等优点,利用太阳光的光能进行泵浦,使其在太阳能丰富的空间中更具应用前景,有极高的应用优势和极大的发展空间。

本研究在得到了采用具有恒温制冷功能的 I 型传感器作为安装底座的可行性验证之后,可以继续后续激光器其他部分和总体的优化设计,例如可通过键合 YAG 晶体棒来改变晶体棒的热效应,以及对晶体棒单独进行热应力的分析以防止热梯度较高而导致晶体棒的断裂,并进行模型实际搭建和验证。同时,对于采用无恒温制冷功能的 II 型传感器作为安装底座的不可行验证结果,初步设想可通过改变铝壳的形状结构,增大其表面积,或者在铝壳表面增加热管,从而提高其散热能力,以降低达到稳态之后的温度值。

参考文献:

- [1] 张海龙. 中国新能源发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
ZHANG Hailong. Research on the new energy development in China[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [2] 朱俊生. 中国新能源和可再生能源发展状况[J]. 可再生能源, 2003, 21(2): 3-8.
ZHU Junsheng. Development situation of new & renewable energy in China[J]. Renewable Energy, 2003, 21(2): 3-8.
- [3] 郑立捷. 各国新能源汽车扶持政策一览[J]. 经济, 2009(8): 28-29.
ZHENG Lijie. A list of support policies for new energy vehicles in various countries[J]. Economy, 2009(8): 28-29.
- [4] 杜炜, 杜成毅. 关于太阳能热利用技术发展趋势探究[J]. 能源与节能, 2023(3): 59-62.
DU Wei, DU Chengtao. Development trend of solar heat utilization technology[J]. Energy and Conservation, 2023(3): 59-62.
- [5] 赵长明, 赵彬, 何建伟. 太阳光泵浦固体激光器及其空间应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(增刊3): 95-99.

- ZHAO Changming, ZHAO Bin, HE Jianwei. Solar pumped solid state lasers and its space applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S3): 95-99.
- [6] VISTAS C R, LIANG D W, GARCIA D, et al. Ce: Nd: YAG continuous-wave solar-pumped laser[J]. *Optik*, 2020, 207: 163795.
- [7] PAYZIYEV S, SHERNIYOZOV A, BAKHRAMOV S, et al. Luminescence sensitization properties of Ce: Nd: YAG materials for solar pumped lasers[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127283.
- [8] CAI Z T, ZHAO C M, ZHANG H Y, et al. Investigation of dependence of solar-pumped laser power on laser medium length[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2022, 12(2): 026501.
- [9] CAI Z T, ZHAO C M, ZHAO Z Y, et al. Efficient 38.8 W/m² solar pumped laser with a Ce: Nd: YAG crystal and a Fresnel lens[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 1340.
- [10] CATELA M, LIANG D W, VISTAS C R, et al. Stable emission of solar laser power under non-continuous solar tracking conditions[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(10): 2697.
- [11] 陶毓伽, 淮秀兰, 李志刚, 等. 大功率固体激光器冷却技术进展[J]. *激光杂志*, 2007, 28(2): 11-12.
- TAO Yujia, HUAI Xiulan, LI Zhigang, et al. Advancement of cooling techniques in high-power solid state laser[J]. *Laser Journal*, 2007, 28(2): 11-12.
- [12] 邓传明, 于伟东. 太空环境中舱外航天服的外层防护问题[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2004, 30(4): 110-116.
- DENG Chuanming, YU Weidong. Issues on the out-layer protection of spacesuit in space environment[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2004, 30(4): 110-116.
- [13] 陶毓伽. 大功率固体激光器冷却研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2010.
- TAO Yujia. Study on cooling of high power solid-state laser[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [14] NI N, ZHANG K Y, HU J P, et al. Combined use of blackbody and infrared radiation for accurate measurement of temperature field of aluminum alloys[J]. *Optik*, 2022, 268: 169763.
- [15] 姚叙红, 朱林泉, 薛忠晋, 等. 菲涅尔透镜提高太阳能利用率的研究[J]. *红外*, 2009, 30(3): 30-34.
- YAO Xuhong, ZHU Linquan, XUE Zhongjin, et al. Research on Fresnel lens for improving utilization of solar energy[J]. *Infrared*, 2009, 30(3): 30-34.
- [16] 刘家兴, 刘高福, 陈德良. 菲涅尔公式讨论光波反射和折射时振幅的变化[J]. *物理通报*, 2021(7): 23-26.
- LIU Jiaying, LIU Gaofu, CHEN Deliang. Discussion on the change of amplitude of light wave in reflection and refraction using Fresnel's formula[J]. *Physics Bulletin*, 2021(7): 23-26.
- [17] 王忠辉, 辛勇. 注射速度对高透光性PMMA制件光学性能的影响[J]. *工程塑料应用*, 2017, 45(2): 64-68.
- WANG Zhonghui, XIN Yong. Effect of injection velocity on optical properties of high transmittance PMMA injection molded parts[J]. *Engineering Plastics Application*, 2017, 45(2): 64-68.
- [18] ASTM. Standard tables for reference solar spectral irradiances: direct normal and hemispherical on 37° tilted surface: ASTM G173-03[S]. America: ASTM, 2020.
- [19] SAMUEL P, YANAGITANI T, YAGI H, et al. Efficient energy transfer between Ce³⁺ and Nd³⁺ in cerium codoped Nd: YAG laser quality transparent ceramics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 507(2): 475-478.