

文章编号: 1001-3806(2013)04-0437-04

## 太阳光直接抽运激光器系统及计算机模拟优化

郝嘉胤, 赵长明\*, 徐鹏, 何滔, 王华昕, 孙耀东

(北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

**摘要:** 为了实现太阳光向激光的转化,设计并搭建了采用两级汇聚系统的实验系统。用菲涅耳透镜作为第1级汇聚系统,以漫反射锥型腔作为第2级汇聚系统,采用Nd:YAG作为工作物质。在太阳光的入射功率密度大约为950W/m<sup>2</sup>时,实验最高可得到13.3W的功率输出。用LASCAD软件对谐振腔进行模拟,得到了晶体棒工作时的温度分布和折射率分布;通过改变参数,对系统进行优化,得到了输出功率随腔长和输出镜反射率的变化规律,找到了最佳腔长为142mm,最佳输出镜反射率为91%。结果表明,通过调整腔长和输出镜反射率的大小,找到最佳值,可有效地提高太阳光直接抽运激光器的输出功率。

**关键词:** 激光器; 系统优化; LASCAD软件; 太阳光抽运激光器

**中图分类号:** TN248.1      **文献标识码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2013. 04. 005

## Laser systems pumped by sunlight directly and computer simulation optimization

HAO Jia-yin, ZHAO Chang-ming, XU Peng, HE Tao, WANG Hua-xin, SUN Yao-dong

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to achieve the conversion from the sunlight to the laser, two-level aggregation experimental system was designed and built. By choosing a Fresnel lens as the first level of aggregation system, the diffuse reflectance tapered cavity as the second level of aggregation system and Nd:YAG as the working substance, the experimental maximum power output was 13.3W available, when the sunlight incident power was about 950W/m<sup>2</sup>. In order to optimize the experimental system and improve the power output, the resonant cavity was simulated by LASCAD software. The temperature distribution and the refractive index distribution during the working of the crystal rod were obtained. The system was optimized by changing the parameters. The variation of the output power along with the cavity length and the output mirror reflectivity, the best cavity length of 142mm and the output mirror reflectivity of 91% were obtained. The results show that the output power of the laser pumped by sunlight directly can be improved effectively by adjusting the cavity length and the output mirror reflectivity and the best value can be achieved.

**Key words:** lasers; system optimization; LASCAD software; solar pumped laser

### 引言

当今社会,能源问题已经成为一个比较严重的社会问题,随着自然资源的短缺,找到无污染的新能源已经成为整个人类面临的重大考验。太阳能取之不尽,用之不竭,并且无污染,是可以利用的新能源。其中,太阳光直接抽运激光器是一种极具前景的太阳能利用方式,它以太阳辐射能作为抽运源,把宽波段、非相干的太阳光转换成窄波段、相干的激光,直

接进行太阳光到激光的转换,因其能量转换环节最少、具有效率高、结构简单、性能稳定和无污染等优点而受到各国研究者的青睐<sup>[1]</sup>。

世界上第1台太阳光抽运激光器出现于1963年<sup>[2]</sup>。之后,更多的太阳光抽运激光器被报道。1966年,YOUNG采用以抛物面反射镜为主的两级会聚系统作为太阳光会聚系统,抽运钇铝石榴石晶体(neodymium-doped yttrium aluminium garnet, Nd:YAG)获得了1W的连续激光输出<sup>[3]</sup>。1988年,WEKSLER等人使用定日镜和复合抛物面聚光器相结合的两级会聚系统,侧面抽运Nd:YAG晶体,获得了超过60W的稳定激光输出,能量转换效率为1.2%<sup>[4]</sup>。2008年,日本的YABE等人用菲涅耳透镜作为第1级汇聚系统,镀铝的锥形腔作为第2级汇聚

作者简介:郝嘉胤(1987-),男,硕士研究生,现主要从事空间太阳能电站方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

收稿日期:2012-11-09;收到修改稿日期:2012-12-03

系统,掺  $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Nd}^{3+}$  的陶瓷棒作为工作物质,得到了 80W 的功率输出,光光转换效率为 4.3%<sup>[5]</sup>。2011 年,里斯本新大学的 LIANG,用直径 0.9m 的菲涅耳透镜,直径 4mm 的 Nd:YAG 棒作为工作物质,得到了 12.3W 的激光,相当于  $19.3\text{W}/\text{m}^2$  的汇聚效率<sup>[6]</sup>。2012 年,日本的 YABE 等人对原来的系统进行改进,将工作物质换为 Nd:YAG 晶体,并将锥形腔的水冷方式改为分腔水冷,使输出功率提高到了 120W,相当于  $30\text{W}/\text{m}^2$  的汇聚效率,是目前最高的<sup>[7]</sup>。

作者对本实验室的太阳光抽运 Nd:YAG 激光器系统做了简要的介绍,并用 LASCAD 软件对实验系统的谐振腔进行了模拟,分析了腔内的各项参量,并对参量进行了优化。

## 1 太阳光直接抽运激光器系统

作者实验室搭建的太阳光直接抽运激光器系统如图 1 所示。选择菲涅耳透镜作为第 1 级汇聚系统,锥形腔放置在菲涅耳透镜焦点处作为第 2 级汇聚系统,通过端面抽运和侧面抽运将太阳光进一步耦合到放置在锥形腔中的工作物质上。整个系统安装在电机驱动的太阳跟踪平台上,在完成聚光腔的准直之后,整套系统就保持不变,通过太阳跟踪器驱动电机跟踪太阳,就可获得稳定的激光输出。

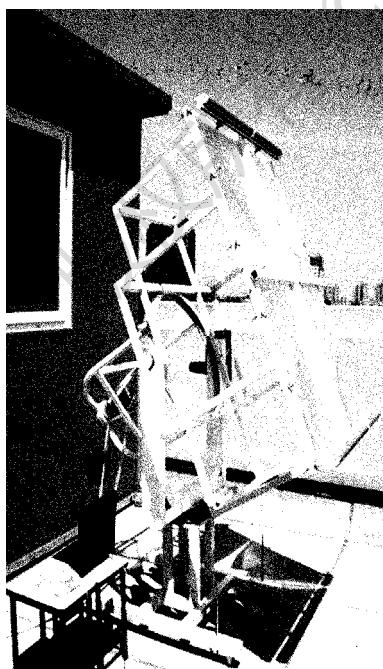


Fig. 1 System photograph of laser pumped by solar directly

菲涅耳透镜的尺寸为  $1.4\text{m} \times 1.05\text{m}$ (有效面积为  $1.3266\text{m}^2$ ),焦距为 1.2m。太阳光的入射功率密度大约为  $950\text{W}/\text{m}^2$ ,焦斑处的功率为 728W,焦斑直径

约为 11mm,而锥形腔的口径为  $\varnothing 30\text{mm}$ ,因此几乎全部焦斑的能量都可以进入腔中。所用的腔为入口直径 30mm、出口直径 8mm 的漫反腔。工作物质选用的是 Nd:YAG 晶体棒,尺寸为  $\varnothing 8\text{mm} \times 100\text{mm}$ ,前端镀有 1064nm 的全反膜。再在晶体棒后端安置一个输出镜,即可实现激光输出。工作时,整个锥形腔内和晶体棒都进行水冷,以减小热透镜效应。如图 2 所示,为整个装置的工作原理图。在太阳光的入射功率密度大约为  $950\text{W}/\text{m}^2$  的条件下最高可得到 13.3W 的功率输出。

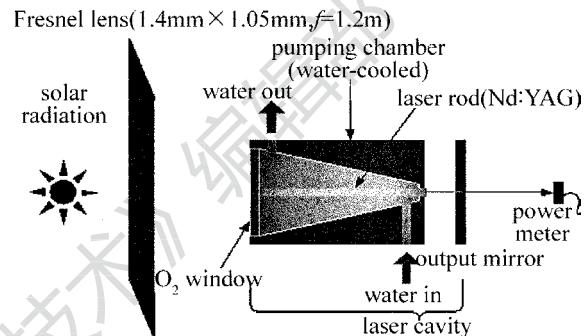


Fig. 2 Working diagram of laser pumped by sunlight directly

## 2 LASCAD 软件的模拟优化

LASCAD 是由德国 LASCAD GmbH 公司开发的激光器设计软件。具有易用和友好的人机界面,它提供了热学和光学之间复杂的多物理系统交互分析功能,这种功能通常用于激光晶体的热效应分析。并可对激光器的谐振腔进行建模和优化<sup>[8]</sup>。

通过 LASCAD 软件,对太阳光直接抽运激光器的谐振腔进行模拟,得到了 12.26W 的输出功率,与实际得到的最高功率 13.3W 相差不大。图 3 为晶

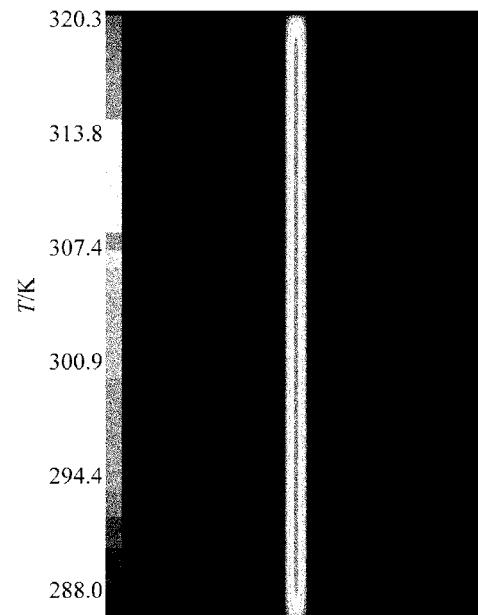


Fig. 3 Temperature distribution of crystal rod

体棒的3维分布图。由图中可以看出,由于水冷作用,整个晶体棒的温度并不高,尤其边缘部分,基本与水温一致,晶体棒内外的温差大约为30℃。

图4为晶体棒横截面上折射率分布曲线。可以看出,折射率的变化基本上是与温度一致的,内外的折射率变化比较大,因此整个晶体棒的热透镜效应比较明显。

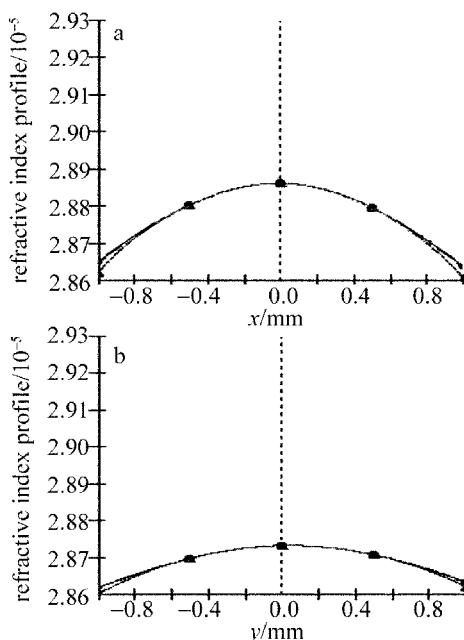


Fig. 4 Refractive index distribution curve of the cross section of the crystal rod

实验中所用的谐振腔腔长可调节范围为128mm~138mm,实验时采用的腔长为138mm。而输出镜的反射率为99%。可以考虑通过改变腔长和输出镜反射率来提高激光器的输出功率。

在不改变输出镜反射率的前提下,模拟不同腔长下的输出功率,得到了一系列数据,绘制成的曲线如图5所示。大于142mm的腔长已无法形成稳定腔,因此142mm为允许的最大腔长。由图中可以看出,随着腔长的增加,输出功率呈逐渐增大趋势,在

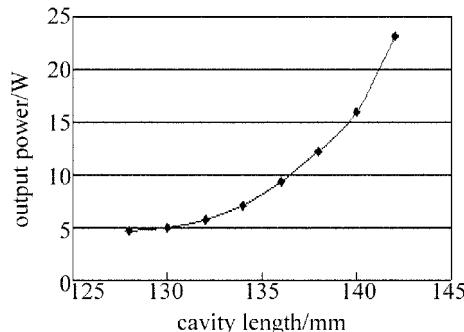


Fig. 5 Relationship between the cavity length and the output power

142mm处达到最大。可能的原因是随着腔长的增加,谐振腔的模体积增大,即晶体棒中受到受激辐射的体积增加,有更多的被抽运到激发态的原子跃迁到基态而释放出光子。虽然腔长的增加在一定程度上增大了谐振腔的损耗,但其对功率的增大作用要大于其损耗,所以激光的输出功率随腔长的增加而增大。

在保持原腔长的条件下,模拟不同的输出镜反射率对输出功率的影响,得到的数据绘制成曲线如图6所示。由图可以看出,输出镜反射率对输出功率的影响是比较大的,95%为最佳反射率。这样的趋势很好理解:当反射率很小时,工作物质达不到阈值,输出功率为0;当反射率为1时,没有激光能够输出,输出功率也为0。因此,中间必然有一个输出功率最大的反射率。

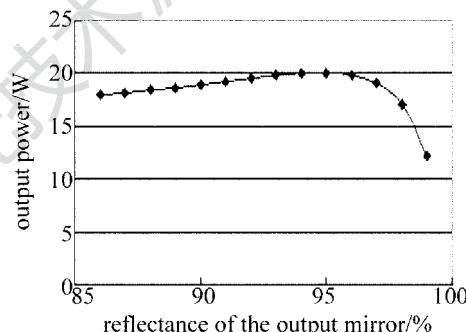


Fig. 6 Relationship between the output mirror reflectivity and the output power with the cavity length of 138mm

同样的输出镜反射率下,谐振腔在允许的最大腔长处输出功率最高。模拟在最大腔长下不同输出镜反射率的输出功率,找到谐振腔所能达到的最大输出功率。如图7所示,在输出镜反射率为0.91时,输出功率可达到最大45.07W。因此,腔长142mm,输出镜反射率0.91为可调节参量的最佳值,此时激光器可输出最大功率。

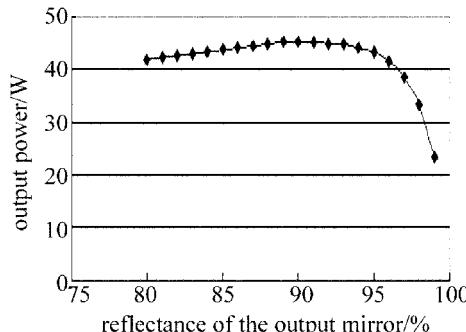


Fig. 7 Relationship between the output mirror reflectivity and the output power with the cavity length of 142mm

### 3 结 论

对太阳光直接抽运激光器系统进行了简要的介绍,在太阳光的入射功率密度大约为  $950\text{W/m}^2$  的条件下,最高可得到  $13.3\text{W}$  的功率输出。通过 LAS-CAD 软件的模拟,找到了输出功率与腔长和输出镜反射率的关系:输出功率随腔长的增大而变大,在稳定腔允许的最大腔长处达到最大;输出功率随输出镜反射率的变化是先增大后减小,在最佳反射率处达到最大;当谐振腔为最大腔长,输出镜反射率为与之对应的最佳反射率时,激光器可输出最大功率。因此,本实验系统还有提高的空间。下一步,将进行一系列实验,以 LAS-CAD 软件模拟的数据为参考,找到系统的最佳腔长和输出镜反射率。

### 参 考 文 献

[1] LUO P P, LIU Ch, XU P, *et al.* Solar pumped Nd:YAG laser with

Fresnel Lens [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38 (10): 1002002 (in Chinese).

- [2] SIMPSON G R. Continuous sun-pumped room temperature glass laser operation [J]. Applied Optics, 1964, 36 (7): 1671-1678.
- [3] YOUNG C G. A sun-pumped CW one-watt laser [J]. Applied Optics, 1966, 5 (6): 993-998.
- [4] WEKSLER M, SHWARTZ J. Solar-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, QE24 (6): 1222-1228.
- [5] YABE T, BAGHERI B, OHKUBO T, *et al.* 100W-class solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle [J]. Journal of Applied Physics, 2008, 104 (8): 083104.
- [6] LIANG D W, ALMEIDA J. Highly efficient solar-pumped Nd:YAG laser [J]. Optics Express, 2011, 19 (27): 26399-26405.
- [7] DINH T H, OHKUBO T, YABE T, *et al.* 120watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and an Nd:YAG rod [J]. Optics Letters, 2012, 37 (13): 2670-2672.
- [8] ZHANG Q, WANG Y F, HOU J Y, *et al.* Simulation and experimentation of high power high repetition U folded resonator laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23 (4): 943-948 (in Chinese).