

太阳光直接抽运 1064 nm 激光放大器

王 予, 赵长明, 杨苏辉, 张海洋, 关 哲

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 设计了太阳光直接抽运 1064 nm 激光放大器,并实现了太阳光抽运下的激光放大。该激光放大器采用菲涅耳透镜和金属锥型腔相结合的太阳光会聚系统,增益介质为圆盘状 Nd:YAG 和 Nd/Cr:YAG 晶体。分析了固体激光放大的原理。通过 tracePro 仿真太阳光会聚系统,计算了增益介质表面的抽运光功率密度。基于 Nd:YAG 与 Nd/Cr:YAG 的光学与物理参数,用 LASCAD 仿真了增益介质内部的温度分布,验证了设计的可行性。在太阳辐射功率密度为 900 W/m² 和种子光最大功率为 300 mW 的实验条件下,最大激光输出为 475.1 mW。对比分析了不同的太阳光会聚系统和不同增益介质的放大实验数据,探讨了后续改进的方向。

关键词 激光器; 太阳光抽运; Nd:YAG; Nd/Cr:YAG; 锥形腔

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0301003

Solar Directly Pumped 1064 nm Laser Amplifier

Wang Yu, Zhao Changming, Yang Suhui, Zhang Haiyang, Guan Zhe

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

Abstract The solar directly pumped 1064 nm laser amplifier is designed, and the solar pumped laser amplification is realized. The laser amplifier uses Fresnel lens and metal conical cavity as sunlight gathering system. The laser materials are Nd:YAG and Nd/Cr:YAG disk. The theory of solid-state laser amplification is analyzed. The sunlight gathering system is simulated by tracePro, and the pump power density at surface of the laser material is calculated. Based on the physical properties and optical features of Nd:YAG and Nd/Cr:YAG, the internal temperature distribution of the laser material is simulated with LASCAD to verify the feasibility of the design. When the solar radiation power density is 900 W/m² and the maximum seed laser power is 300 mW, the maximum laser output power is 475.1 mW. Experimental data of different sunlight gathering systems and laser materials are analyzed comparatively to provide direction for further improvement.

Key words lasers; solar pumped; Nd:YAG; Nd/Cr:YAG; conical cavity

OCIS codes 140.3280; 140.5560; 140.3380

1 引 言

随着人类社会的发展,能源问题逐渐成为制约社会发展的主要因素,当今世界各国都大力发展新能源。太阳能作为一种清洁能源,其总量大、可再生等特点是人类解决能源问题的关键。太阳光直接抽运激光器由于其能量转换环节少、机械结构简单等特点,受到广泛关注。相比于太阳能电池等传统的太阳能利用方式,太阳光直接抽运激光器由于直接将太阳光转化为激光,减少了转换环节,提高了效率,在空间太阳能电站和新能源制备等领域有潜在的应用^[1],在空间激光通信网络建设方面也具有广阔的前景^[2-3]。但是,太阳光抽运激光器目前也存在一些弱点,如激光器自身效率较低、增益介质吸收谱与太阳光谱匹配度较低、热效应较

收稿日期: 2016-10-08; 收到修改稿日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(61378020)

作者简介: 王 予(1990—),男,硕士研究生,主要从事太阳光抽运激光放大器方面的研究。

E-mail: wy19900206@126.com

导师简介: 赵长明(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事新型固体激光技术、激光雷达等方面的研究。

E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn(通信联系人)

强等。而激光放大技术具有光束质量较高、可多级放大等优点为其发展提供了一种新的思路。将激光振荡器与激光放大器两种思路相结合,可以进一步提升太阳光抽运激光器的性能,拓展其应用空间。

本文在理论分析与仿真的基础上,设计了太阳光直接抽运激光放大器。放大器采用菲涅耳透镜作为一级会聚,锥形腔作为二级会聚,对不同材料的圆盘状增益介质进行抽运。在太阳光功率密度为 900 W/m^2 、种子光功率为 300 mW 的条件下,得到最大功率为 475.1 mW 激光放大输出,放大增益为 1.58,首次实现了太阳光抽运下的激光放大。

2 理论计算

实验采用的增益介质为 Nd:YAG 晶体圆盘和 Nd/Cr:YAG 陶瓷圆盘。Nd:YAG 晶体掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd^{3+} , Nd/Cr:YAG 陶瓷掺杂原子数分数分别为 1.0% 的 Nd^{3+} 、0.1% 的 Cr^{3+} ,其光学参数和物理参数^[4-5]如表 1 所示。

表 1 光学与物理参数
Table 1 Optical and physical parameters of gain material

	Doping concentration /%	Stimulated emission cross-section / cm^2	Fluorescence lifetime /s	Scattering loss / cm^{-1}	Thermal conductivity / [W/(cm·K)]	Refractive index
Nd:YAG	Nd^{3+} : 1.0	6.5×10^{-19}	2.3×10^{-4}	0.002	0.14	1.83
Nd/Cr:YAG	Nd^{3+} : 1.0 Cr^{3+} : 0.1	6.5×10^{-19}	5.5×10^{-4}	0.003	0.14	1.83

Nd:YAG 晶体作为太阳光抽运激光器的增益介质,由于其吸收光谱与太阳光谱相对较高的匹配程度和良好的导热能力^[6],已经有了长足的发展。Nd/Cr:YAG 陶瓷在传统的 Nd:YAG 材料的基础上,加入了双掺杂的 Cr^{3+} ,利用其对光吸收的敏化作用,加强了材料在可见光波段对太阳辐射的吸收,使晶体的吸收光谱与太阳光光谱的匹配程度更高。Nd/Cr:YAG 陶瓷的主要吸收带为 $450 \sim 490 \text{ nm}$, $510 \sim 540 \text{ nm}$, $560 \sim 630 \text{ nm}$, $675 \sim 690 \text{ nm}$, $730 \sim 760 \text{ nm}$, $790 \sim 825 \text{ nm}$, $865 \sim 890 \text{ nm}$ ^[7]。其吸收系数曲线如图 1 所示。

太阳辐射相对强度曲线如图 2 所示,可以得到 Nd/Cr:YAG 陶瓷所吸收辐射与总体太阳辐射的占比为 38%,远高于 Nd:YAG 等传统太阳光抽运激光增益材料^[8]。

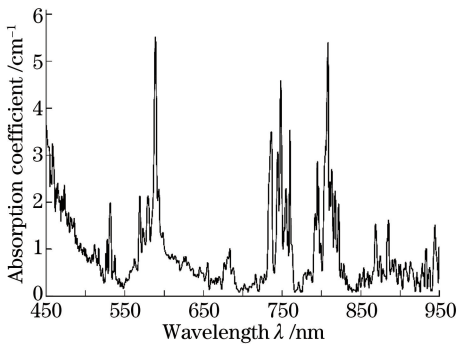


图 1 Nd/Cr:YAG 陶瓷吸收光谱曲线

Fig. 1 Absorption spectrum curve of Nd/Cr:YAG ceramics

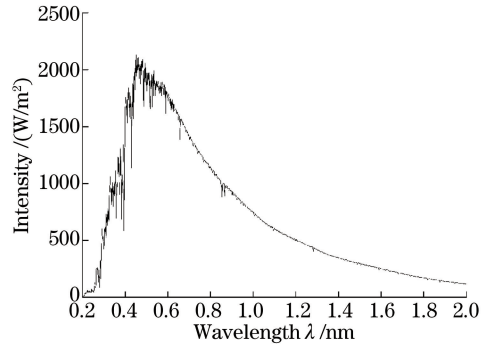


图 2 太阳辐射相对强度曲线^[6]

Fig. 2 Solar radiation relative intensity curve

地球外大气层所接受到的太阳辐射功率密度为 1367 W/m^2 ,太阳辐射在传输的过程中由于大气的吸收、散射等作用而降低,功率密度无法达到激光放大要求,因而需要对太阳辐射进行会聚。设计采用菲涅耳透镜作为第一级会聚,菲涅耳透镜具有加工简便、成本低等优点。二级会聚为金属表面的锥形腔,对经过菲涅耳透镜会聚的光线进行进一步会聚。

应用 tracePro 光线追迹软件,在太阳辐射功率密度为 900 W/m^2 的条件下,对菲涅耳透镜和锥形腔的会聚效果进行仿真,模拟抽运光会聚的过程,如图 3 所示。仿真中,光源为圆形,出射光线为平行光,数量为 30 万。单独采用菲涅耳透镜会聚太阳光时,圆盘上表面的平均辐照度为 5.6 W/mm^2 ,而加入锥形腔后,圆盘上表面的平均辐照度为 17 W/mm^2 。图 3(a)为太阳光会聚效果仿真图,图 3(b)为锥形腔结构图,图 3(c)、(d)分别为有无锥形腔的晶体表面抽运光功率分布图。从图中可以看出,加入锥形腔后可以明显地加强太阳光的会聚效果。

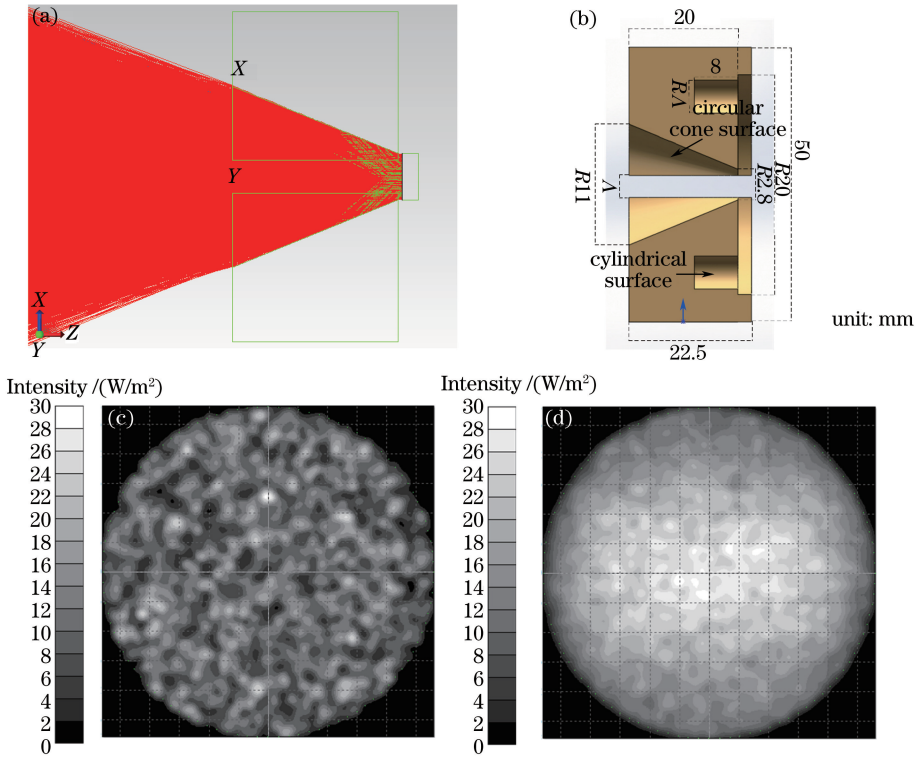


图 3 太阳光会聚效果仿真图。(a)抽运光线追迹图;(b)锥形腔剖面结构图;(c)不加入锥形腔时增益物质表面功率分布;
(d)加入锥形腔时增益物质表面功率分布

Fig. 3 Simulation of sunlight gathering effect. (a) Light tracing image of pump beam;
(b) profile structure diagram of conical cavity; (c) surface power distribution of gain material without cavity;
(d) surface power distribution of gain material with conical cavity

图 4 为实验整体结构与基本光路图,种子光入射角 $\theta_1 = 45^\circ$,增益介质内激光折射角满足折射定律,折射角 $\theta_2 = 22.9^\circ$ 。根据激光放大器计算模型^[9],其输出公式为

$$G = \frac{SP_s}{P_{in}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{P_{in}}{SP_s} \right) - 1 \right] G_0 \right\}, \quad (1)$$

$$P_{out} = P_{in} G = SP_s \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{P_{in}}{SP_s} \right) - 1 \right] G_0 \right\}, \quad (2)$$

式中 G 为总增益, P_{in} 为输入功率, P_{out} 为输出能量, S 为种子光光斑面积, P_s 为饱和功率密度, 定义为

$$P_s = \frac{h\nu}{\gamma\sigma\tau_F}, \quad (3)$$

Nd/Cr:YAG 属于四能级系统, h 为普朗克常数, ν 为频率, $\gamma = 1$, σ 为受激发射截面, τ_F 为荧光寿命, 小信号增益 G_0 为

$$G_0 = \exp(g_0 L), \quad (4)$$

由于输入能量较低, 即 $G_0 E_{in} \ll E_s$, 所以, 可以近似得到

$$G \approx G_0 = \exp(g_0 L) = \exp \left(\frac{2g_0 d}{\cos \theta_2} \right), \quad (5)$$

式中 g_0 为小信号增益系数, L 为总增益长度, 圆盘厚度 d 。

抽运光经过会聚后直接照射在圆盘上表面, 圆盘后表面紧贴热沉, 圆盘吸收抽运光而产生的热量通过热沉传导冷却。假设圆盘内部热量产生与热沉吸收热量都是均匀的, 由于圆对称性, 可以将三维的温度分布简化为水平径向和竖直两个一维方向的温度分布。由于陶瓷圆盘厚度仅为 2 mm, 与下表面相比, 侧面与热沉的接触面积较小, 故可认为径向温度变化只受上表面辐照度的影响。而对于竖直方向温度分布, 根据一维热传导方程^[10]可以得到

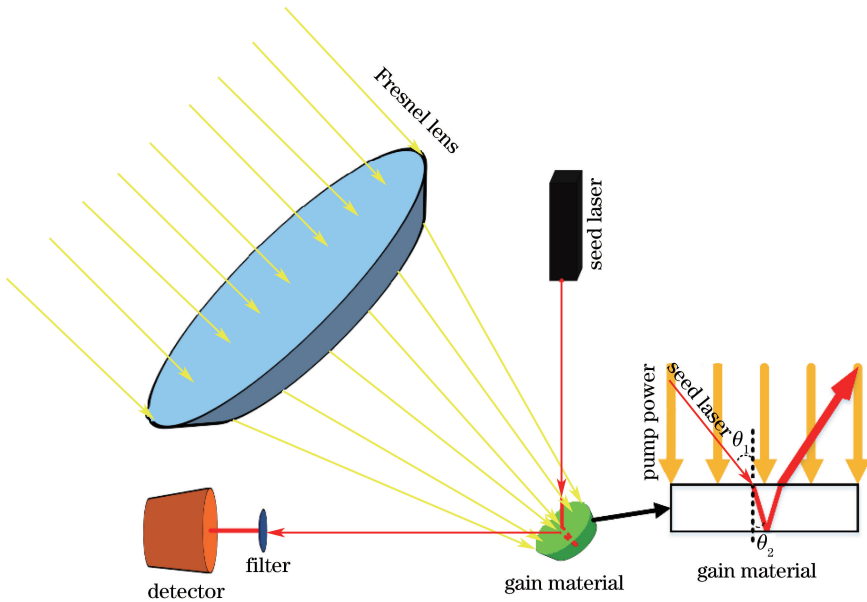


图 4 实验结构与基本光路图

Fig. 4 Image of experimental structure and basic beam path

$$\frac{d^2 T}{dl^2} + \left(\frac{1}{l}\right) \left(\frac{dT}{dl}\right) + \frac{Q}{K} = 0, \quad (6)$$

式中 K 为导热率, Q 为单位体积内产出的热量, 令 $T(l_0)$ 为圆盘边缘温度, l 为圆盘厚度, 可以得到

$$T(l) = T(l_0) + \left(\frac{Q}{4K}\right) (l_0^2 - l^2). \quad (7)$$

热沉的材料为纯铜, 内部留有水槽, 冷却水在水槽内部循环, 水冷温度设定为 7°C 。陶瓷圆盘位于热沉前表面。由于铜的导热性能良好, 其热导率为 $398\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 且圆盘与冷却水之间的铜板厚度仅为 2 mm , 设与圆盘接触的热沉表面温度为水冷设定温度, 则单位体积产生的热量可以表示为

$$Q = \frac{P_a}{\pi r_0^2 l_0}, \quad (8)$$

式中 r_0 为圆盘半径, l_0 为圆盘厚度, P_a 为圆盘吸收的总热量, 圆盘上下表面温差 ΔT 为

$$\Delta T = T(0) - T(l_0) = \frac{P_a l_0}{4\pi r_0^2}, \quad (9)$$

当圆盘产生的热量等于热沉吸收的热量时, 整个放大器系统处于稳定, 所以可以得到

$$P_a = \pi r_0^2 \epsilon [T(l_0) - T_F], \quad (10)$$

式中 ϵ 为圆盘的传热系数, 圆盘上表面温度为

$$T(0) = T_F + \frac{P_a}{\pi r_0^2} \left(\frac{l_0}{4} + \frac{1}{\epsilon}\right). \quad (11)$$

LASCAD 是一种通过有限元分析法进行激光器仿真的软件。通过 LASCAD 软件, 模拟 $900\text{ W}/\text{m}^2$ 太阳辐射抽运条件下的放大器温度分布。图 5 为陶瓷圆盘温度图, 单位为 K。可以看出, 径向温度变化不大, 而垂直方向的最大温差为 60°C , 且整体温度不高。

3 实验研究

实验所用菲涅耳透镜的尺寸为 $1.4\text{ m} \times 1.05\text{ m}$, 有效面积为 1.03 m^2 , 材质为亚克力 (PMMA), 焦距为 1.2 m 。太阳光通过菲涅耳透镜后, 再经锥形腔二次会聚后对圆盘进行抽运。锥形腔材料为铜, 表面进行抛光处理。会聚后光斑直径为 2.8 mm 。通过对 Nd:YAG 晶体和 Nd/Cr:YAG 陶瓷以及是否加入二级会聚进行对比实验, 分析激光放大器的放大效果。

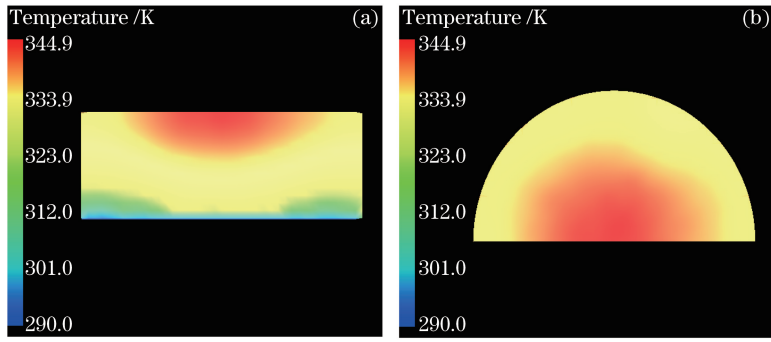


图 5 温度仿真图。(a) 竖直方向温度分布; (b) 径向温度分布

Fig. 5 Images of temperature simulation. (a) Temperature distribution in the vertical direction; (b) temperature distribution in radial direction

种子激光源为长春飞秒科技有限公司的红外固体激光器,输出波长为 1064 nm,功率调节范围为 0~300 mW。种子光由光纤输出,通过光纤准直器(CFC-8X-C, Thorlabs, 美国)进行准直。准直后种子光的光斑直径为 2 mm。Nd:YAG 晶体直径为 12 mm, Nd/Cr:YAG 陶瓷圆盘直径为 6 mm,二者厚度均为 2 mm。上表面镀 1064 nm 增透膜,下表面镀 1064 nm 高反膜。种子光以 45°角入射圆盘表面,经下表面高反膜反射后,再次以 45°出射。滤光片中心波长为 1064 nm、半峰全宽为 10 nm,功率计探头采用 THORLABS 公司型号 S302C,滤光片紧贴功率计探头,已消除杂散光对实验结果的影响。

4 结果分析

实验分别于太阳辐射 900 W/m² 和 584 W/m² 的条件下进行。当入射种子光为 300 mW 时,得到最高连续激光输出功率为 475.1 mW,最大放大增益为 1.58。

实验结果对比如图6所示,图中,曲线为相应条件下的理论计算值。实验分别在 584 W/m² 和 900 W/m² 的太阳辐射条件下测量无锥形腔二次会聚的 Nd:YAG 的激光输出,两种条件下最大输出功率分别为 326.3 mW 与 341.6 mW,增益分别为 1.09 与 1.14。同时,在 900 W/m² 条件下测量了加入锥形腔后的激光输出,其最大功率为 450.5 mW,增益为 1.50。结合理论仿真与实验数据,可以看到,作为二次会聚,锥形腔能够明显提升抽运光的会聚效果。单独使用菲涅耳透镜时,抽运光斑直径为 10 mm,增益物质表面功率密度为 5.7 W/mm²,加入锥形腔后,光斑直径缩小至 5.6 mm,表面功率密度提升为 17.0 W/mm²,因而抽运效率更高,放大效果更好。

如图 7 所示,分别在太阳辐射功率密度为 622 W/m² 和 900 W/m² 条件下对 Nd/Cr:YAG 进行放大实验,实验过程中没有加入锥形腔,两种条件下的最大放大输出功率分别为 417.8 mW 和 475.1 mW,最大增益分别为 1.39 与 1.58。与太阳辐射功率密度为 900 W/m² 条件下的 Nd:YAG 相比,最大输出功率由

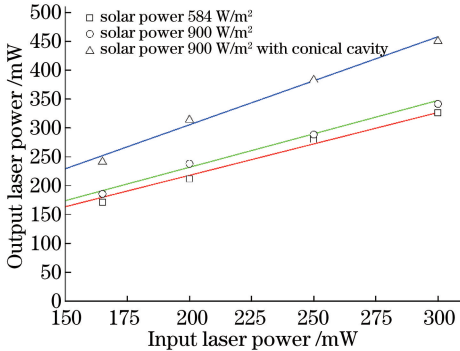


图 6 Nd:YAG 加入锥形腔前后的实验结果对比图
Fig. 6 Experimental results comparison between Nd:YAG and Nd:YAG with conical cavity

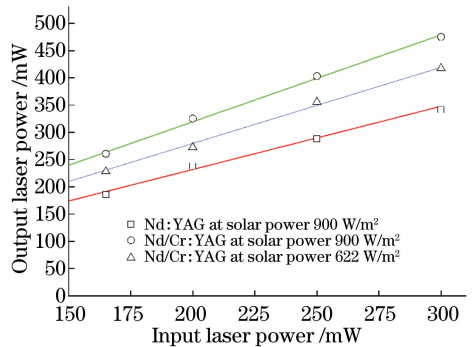


图 7 Nd:YAG 与 Nd/Cr:YAG 实验结果对比图
Fig. 7 Experimental results comparison between Nd:YAG and Nd/Cr:YAG

341.6 mW增加至 475.1 mW,放大增益也有较大提升。 Cr^{3+} 可以将吸收的能量传递给处于激光上能级的 Nd^{3+} ,延长了 Nd^{3+} 的上能级粒子寿命,并且加强了Nd:YAG对450~550 nm太阳辐射的吸收效果,提升了其作为太阳光抽运激光工作物质的性能。

5 结 论

设计了太阳光抽运 1064 nm 连续激光放大器,实现了太阳光抽运下的激光放大。对会聚系统的会聚效果、工作物质内部的温度分布以及放大器的输出功率进行了仿真。分别在太阳辐射功率密度为 584、622、900 W/m^2 以及种子光最大功率为 300 mW 的条件下进行了激光放大实验。当太阳光抽运激光放大器的工作物质为 Nd:YAG 晶体、会聚系统仅为菲涅耳透镜时,其放大增益较低,实验中最大输出功率仅为 341.6 mW。设计分别通过加入二级锥形腔会聚系统和以 Nd/Cr:YAG 陶瓷代替 Nd:YAG 晶体两种方案对其进行了改进。加入锥形腔作为二级会聚可以有效地提高抽运效率,从而提高放大效果,放大输出功率由 341.6 mW 提升至 450.5 mW。而采用 Nd/Cr:YAG 陶瓷材料则是从工作物质方面对放大器进行改良,由于其上能级粒子寿命和吸收谱与太阳光谱的匹配程度均大于 Nd:YAG,因而作为太阳光抽运增益介质优势明显,实验中输出功率由 341.6 mW 提升到 475.1 mW。实验结果验证了该设计方案的可行性,能够在太阳光抽运的条件下实现激光放大,同时也表明提高抽运效率与增益介质自身性能将是提高太阳光抽运激光器效率的可行方法。

参 考 文 献

- [1] Zhao Changming, Zhao Bin, He Jianwei. Solar pumped solid state lasers and its space applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(z3): 95-99.
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(z3): 95-99.
- [2] Jiang Lun, Hu Yuan, Wang Chao, *et al.* A study of one point to multi points simultaneous space laser communication optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0506001.
江 伦, 胡 源, 王 超, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学系统研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0506001.
- [3] Zhang Yalin, An Yan, Wang Chao, *et al.* Study on the rotating parabolic substrate surface in space laser communication network[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(7): 0706003.
张雅琳, 安 岩, 王 超, 等. 空间激光通信网中旋转抛物面基底面型研究[J]. 光学学报, 2015, 35(7): 0706003.
- [4] Saiki T, Imasaki K, Motokoshi S, *et al.* Disk-type Nd/Cr:YAG ceramic lasers pumped by arc-metal-halide-lamp[J]. Optics Communications, 2006, 268(1): 155-159.
- [5] Saiki T, Motokoshi S, Imasaki K, *et al.* Oscillation property of rod-type Nd/Cr:YAG ceramic lasers with quasi-solar pumping[C]. Lasers and Electro-Optics, 2007, 830: 915-917.
- [6] He Jianwei. Study of solar pumped solid state laser[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009: 34-37.
何建伟. 太阳光泵浦固体激光器系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009: 34-37.
- [7] Zhang Liwei. Study on solar pumped Cr and Nd co-doped YAG ceramic laser [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2010: 26-32.
张立伟. 太阳光泵浦 Cr/Nd:YAG 陶瓷激光器研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010: 26-32.
- [8] Myers D R, Emery K, Gueymard C. Revising and validating spectral irradiance reference standards for photovoltaic performance evaluation[C]. ASME Solar 2002: International Solar Energy Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2002: 367-376.
- [9] Saiki T, Motokoshi S, Imasaki K, *et al.* Two-pass amplification of CW laser by Nd/Cr:YAG ceramic active mirror under lamp light pumping[J]. Optics Communications, 2009, 282(5): 936-939.
- [10] Koechner W. Solid-state laser engineering[M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang, Transl. Beijing: Science Press, 2002: 357-359.
克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥, 译. 北京: 科学出版社, 2002: 357-359.