

使用菲涅耳透镜的太阳光抽运 Nd:YAG 激光器

罗萍萍 刘 诚 徐 鹏 赵长明* 杨苏辉 钱燕雷

(北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要 太阳能是规模最大的可再生能源,为充分利用这一资源,太阳光直接抽运激光器是一种明智的选择。提出并搭建了采用两级会聚系统的太阳光抽运激光器系统。使用菲涅耳透镜作为大口径成像型第一级会聚系统,漫反射锥形聚光腔作为非成像型第二级会聚系统提高入射太阳光到工作物质的耦合效率。采用 Nd:YAG 晶体作为工作物质,获得了 2.85 W 的激光输出,从太阳光到激光的转换效率为 0.43%。从菲涅耳透镜会聚效率、聚光腔内激光棒轴线上的功率分布等会聚系统方面和激光输出特性方面分析了该太阳光抽运激光器的性能;探讨了转换效率低的原因,并提出了相应的改进措施。

关键词 激光器;太阳光抽运激光器;菲涅耳透镜;漫反射聚光腔;Nd:YAG 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1002002

Solar Pumped Nd:YAG Laser with Fresnel Lens

Luo Pingping Liu Cheng Xu Peng Zhao Changming Yang Suhui Qian Yanlei

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

Abstract Solar energy is the most abundant renewable energy among all kinds of energy sources, solar pumped laser can be the best choice in terms of the fully utilization of solar energy. The solar pumped laser with two stage sunlight concentration system is designed and constructed. A Fresnel lens with large diameter is adopted as a primary optical concentration device, and a cone type diffuse pumping chamber functions as a secondary concentrator is used to enhance the couple efficiency between the incident solar power and laser media. Output laser power is up to 2.85 W, with the use of Nd:YAG crystal as laser media, and 0.43% optical conversion efficiency is achieved. The performance of solar pumped laser is discussed by the concentration efficiency of Fresnel lens and the power distribution along the axis of laser rod in the cavity, as well as the laser characteristic. The reasons for low efficiency are discussed, and improvement approaches are presented.

Key words lasers; solar pumped laser; Fresnel lens; diffuse pumping chamber; Nd:YAG crystal

OCIS codes 140.3460; 350.6090; 140.5560; 140.3530

1 引 言

能源问题是制约当今社会发展的主要问题之一,太阳能作为规模最大的可再生能源,如何将之充分利用一直是各国的研究重点和热点。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^[1]。

太阳光抽运激光器的发展历史,就是太阳光会聚系统从单纯的大型成像会聚系统向成像与非成像器件相结合的小型、轻便的会聚系统转变、光光转换效率逐步提高的历史^[2]。在 20 世纪 60 年代首台激光器发明后不久,人们就开始验证利用太阳光抽运激光器的可能性^[3]。1966 年, C. G. Young^[4] 采用以

收稿日期: 2010-05-24; 收到修改稿日期: 2010-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(60978029)资助课题。

作者简介: 罗萍萍(1987—),女,硕士研究生,主要从事新型固体激光器方面的研究。E-mail: shinybo@bit.edu.cn

导师简介: 杨苏辉(1968—),女,副教授,博士生导师,主要从事固体及光纤激光器、激光雷达等方面的研究。

E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zhaochangming@bit.edu.cn

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 Nd:YAG 晶体获得了 1 W 的连续激光输出。1988 年, M. Weksler 等^[5]使用定日镜和 CPC 相结合的两级会聚系统,侧面抽运 Nd:YAG 晶体,获得了超过 60 W 的稳定激光输出,能量转换效率为 1.2%。2008 年, T. Yabe 等^[6]采用菲涅耳透镜和锥形腔的两级会聚系统,获得了 80 W 的稳定激光输出,能量转换效率达到 4.3%。菲涅耳透镜的使用,极大地简化了太阳光抽运激光器系统并降低了制造成本,提高了太阳光抽运激光器空间应用的可能性^[7]。2009 年,本实验组使用菲涅耳透镜直接抽运 Nd:YAG 晶体,观察到了激光输出,由于使用的菲涅耳透镜尺寸小且未采用多级抽运方式,输出功率极小^[8]。

本文报道了使用尺寸为 1.4 m × 1.05 m, $f = 1.2$ m 的菲涅耳透镜作为第一级会聚,锥形聚光腔作为第二级会聚的会聚系统,抽运 Nd:YAG 晶体的激光实验,对实验结果进行了分析比较。

2 太阳光抽运激光器系统

太阳光抽运激光器系统如图 1 所示。太阳光辐射到达地球大气外层的功率密度为 1367 W/m^2 ^[9],经过大气的反射、吸收、散射等衰减后,远未达到激光器的阈值功率密度,因此需要采用有效的太阳光会聚系统对太阳光进行会聚,才能实现激光振荡输出。本文选择成本低、重量轻的菲涅耳透镜作为第一级会聚镜,该透镜可对 400~900 nm 波段内的太阳光进行会聚^[10]。为提高太阳光到工作物质的耦合效率,将作为第二级会聚的锥形聚光腔安装在菲涅耳透镜的焦点处。菲涅耳透镜和聚光腔都安装在装有电机驱动的太阳跟踪平台上,在完成聚光腔的准直之后,整套会聚系统就保持不变,通过同步跟踪



图 1 太阳光抽运激光器系统

Fig. 1 Solar pumped laser system

太阳,就能获得稳定的激光输出。

图 2 为太阳光抽运激光器实验装置示意图,直接入射的太阳光经过菲涅耳透镜会聚后聚焦到焦点处,通过被安装在焦点处的第二级会聚器——漫反射锥形聚光腔进行再会聚,提高了入射光到工作物质的耦合效率。其中,聚光腔外壳是材料为铝的长方体,腔内是入射口径为 35 mm,出射口径为 8 mm,长度为 90 mm 的圆锥形,内表面为漫反射面。使用直径为 6 mm,长度为 100 mm, Nd^{3+} 掺杂原子数分数为 1% 的 Nd:YAG 晶体作为工作物质,激光棒一端镀有 1064 nm 的高反膜,另一端镀有 1064 nm 增透膜。采用水冷的方式进行散热,冷却水充满聚光腔内壁和激光棒之间,沿棒轴线方向流动,带出废热。透射率为 1% 的耦合输出镜固定在腔外,与激光棒末端距离为 10 mm。

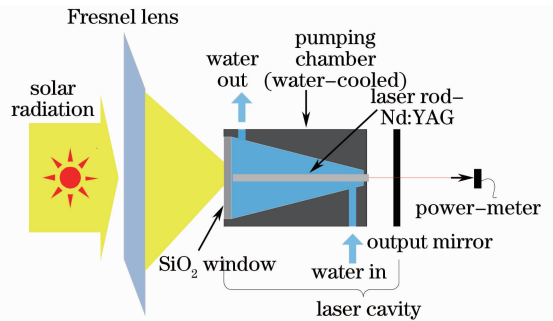


图 2 太阳光抽运激光器实验装置示意图

Fig. 2 Schematic view of experimental setup of solar pumped laser

3 实验结果

3.1 菲涅耳透镜性能测试

使用的菲涅耳透镜尺寸为 1.4 m × 1.05 m (有效面积为 1.33 m^2), 焦距为 $f = 1.2 \text{ m}$ 。通过测量菲涅耳透镜焦点处的会聚太阳光功率及其会聚光斑的功率空间分布来评估该透镜的性能。将热电堆功率计放置在透镜焦点处,在太阳光功率密度为 800 W/m^2 时,测得焦点处功率为 634 W,则该透镜会聚效率为 59.5%。

测得的菲涅耳透镜焦点处太阳光斑功率空间分布如图 3 所示。测量方法是用热电偶在光斑直径上逐点扫描测量,由于热电偶测得的温度与会聚功率成正比,因此温度的变化趋势就代表焦点处功率的变化趋势。从图中可以看出,光斑的半峰全宽 (FWHM) 约为 11 mm。

根据太阳光的发散角 (9.32 mrad ^[11]) 以及透镜焦距,计算得到的焦点尺寸为 11.2 mm,与实验结

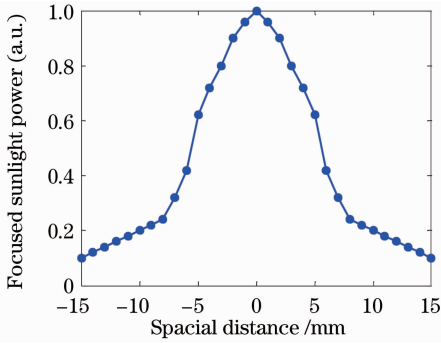


图3 会聚太阳光斑的功率空间分布

Fig. 3 Focused sunlight power distribution

果相符,由此可以证明本文使用的菲涅尔透镜能够将太阳光会聚到其理论极限。

3.2 聚光腔性能测试

聚光腔作为激光器的关键部分,其作用是将太阳光最大限度地耦合到工作物质上,提高抽运效率并使激光棒获得均匀抽运。对于漫反射聚光腔,其会聚效率的求解过程很复杂,本文只关心在激光棒上抽运光分布的均匀性,即聚光腔轴线上太阳光功率的分布情况。用于测量功率分布的实验装置为在聚光腔内用石英玻璃管代替激光棒放置在腔的轴线上,使用热电偶在管内轴向扫描测量聚光腔轴线上的温度分布情况。图4示出了扫描的归一化测量结果。从图4可知,分布曲线在聚光腔入口处(即0处)和距离入口约60mm处分别有一个尖峰,其中,第1个尖峰与菲涅尔透镜的直接会聚有关,并且由于石英管的顶端为圆形,对光线有会聚作用,由此导致第1个尖峰有最大值。第2个尖峰是聚光腔对太阳光线再聚焦作用的结果。

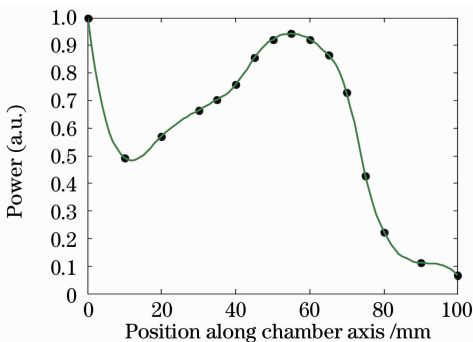


图4 热电偶扫描的沿聚光腔轴线的功率分布图

Fig. 4 Power distribution along pumping chamber axis by scanning thermocouple

3.3 激光实验结果

为了评估设计的激光器的性能优劣,有必要绘出输出功率与输入功率的函数关系曲线图。由于太阳光功率密度为固定值,无法改变,因此通过用遮光

材料从下至上遮挡部分菲涅尔透镜,改变其有效会聚面积的方法来改变入射功率大小。通过测量在相同太阳光功率密度下,菲涅尔透镜在不同有效面积下的会聚功率,得到如图5所示的会聚功率与透镜有效面积的关系曲线图。从图5可知,会聚功率并不与菲涅尔透镜面积成正比,靠近菲涅尔透镜中心处能量会聚效率高。

在输出耦合镜透射率为1%,太阳光功率密度为840 W/m²,入射到聚光腔的功率为657 W的条件下,获得最大激光输出功率为2.85 W,从太阳光到激光的转换效率为0.43%,斜率效率为1.3%,入射光功率和输出功率的函数关系如图6所示。图6中曲线在接近于阈值的非线性部分是由于抽运功率仅处在激光器阈值功率附近,导致了非均匀抽运,即紧邻棒表面的部分吸收的光要多于棒中心吸收的光。使得激光棒发射出环状激光^[12]。当使用大口径的菲涅尔透镜,输入功率远大于阈值功率时,斜率效率至少可达到3.4%^[13]。

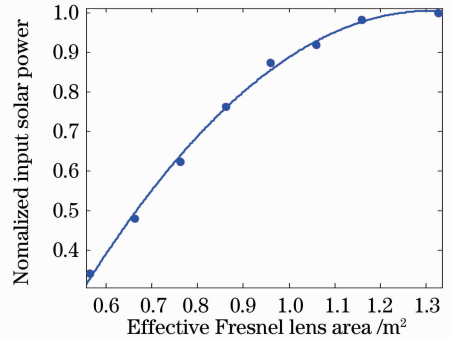


图5 输入功率与菲涅尔透镜有效会聚面积的关系曲线

Fig. 5 Input sunlight power for various effective

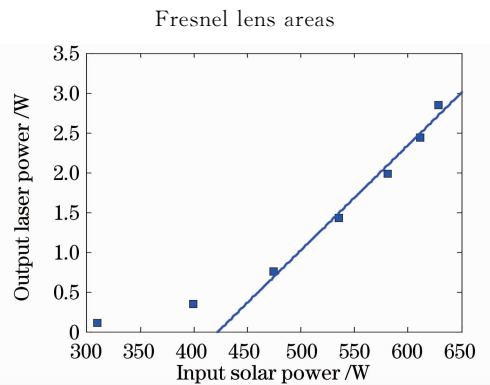


图6 输入功率与输出功率的关系曲线

Fig. 6 Laser output for various incident sunlight powers

实验获得了较高的连续输出功率,但转换效率还可以进一步提高,可以从以下几方面着手改进:1)选择与太阳光谱相匹配的宽光谱吸收的工作物质,充分利用太阳光功率,例如Cr和Nd双掺的YAG

陶瓷等^[14,15];2)通过研究和设计适合太阳光抽运的聚光腔的外型尺寸以及反射材料来进一步提高聚光腔的会聚效率。

4 结 论

设计并搭建了具有两级会聚系统的太阳光抽运激光器系统。其中,第一级会聚系统使用重量轻、生产成本低的菲涅耳透镜,具有较好的聚焦特性,会聚的太阳光斑的半峰全宽为 11 mm。第二级会聚采用锥形聚光腔提高了太阳光与激光工作物质的耦合效率;聚光腔的性能通过热电偶扫描测得的聚光腔轴线上的功率分布来测试,测得的聚光腔轴线上功率分布相对均匀,能够满足均匀抽运的要求。使用尺寸为 $\phi 6\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的国产 Nd:YAG 晶体作为工作物质,在入射到抽运腔的功率为 657 W 时获得最大激光输出功率 2.85 W,光光转换效率为 0.43%,当输入功率远大于阈值功率时,斜率效率可达到 3.4%。

参 考 文 献

- 1 T. Yabe, S. Uchida, K. Yoshida *et al.*. An overview of entropia laser initiative[C]. Proceeding of 4th International Symposium on Beamed Energy Propulsion, Nara Japan, 2006, **830**: 21~30
- 2 Zhao Changming, He Jianwei, Yang Suhui. History and development of solar pumped lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1671~1678
赵长明,何建伟,杨苏辉. 太阳光直接抽运的激光器研究历史和发展趋势[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1671~1678
- 3 G. R. Simpson. Continuous sun-pumped room temperature glass laser operation[J]. *Appl. Opt.*, 1964, **3**(6): 783~784
- 4 C. G. Young. A sun-pumped CW one-watt laser[J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(6): 993~998
- 5 M. Weksler, J. Shwartz. Solar-pumped solid-state lasers[J].

- IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **QE-24**(6): 1222~1228
- 6 T. Yabe, B. Bagheri, T. Ohkubo *et al.*. 100W-class solar pumped laser for sustainable magnesium-hydrogen energy cycle [J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **104**(8): 083104
- 7 Zhao Changming, Zhao Bin, He Jianwei. Solar pumped solid state lasers and its space applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(s): 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**(s): 95~99
- 8 He Jianwei, Zhao Changming, Yang Suhui *et al.*. Solar pumped Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 255~256
何建伟,赵长明,杨苏辉等. 太阳光直接抽运的 Nd:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 255~256
- 9 Che Nianzeng, Yan Dayuan. Radiometry and Photometry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990. 476~488
车念曾,阎达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1990. 476~488
- 10 T. Funatsu, T. Yabe, T. Ohkubo *et al.*. Study of solar pumped laser for Fossil-fuel-free energy cycle using magnesium[J]. *Rev. Laser Engng. Suppl. Vol.*, 2008, **36**: 1153~1156
- 11 P. Gleckman. Achievement of ultrahigh solar concentration with potential for efficient laser pumping [J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(21): 5385~5391
- 12 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. 5th edition, Sun Wen, Jiang Zewen, Cheng Guoxiang transl., Beijing: Science Press, 2002. 102~107
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第5版. 孙文,江泽文,程国祥译. 北京:科学出版社, 2002. 102~107
- 13 T. Yabe, T. Ohkubo, S. Uchida *et al.*. High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium co-doped laser medium[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(26): 261120
- 14 Zhang Liwei, Zhao Changming, Yang Suhui *et al.*. Study on the feasibility of Cr, Nd:YAG ceramic used for solar pumped lasers [J]. *Laser Technology*, 2011, **35**(2): 193~195
张立伟,赵长明,杨苏辉等. Cr, Nd:YAG 陶瓷作为太阳光抽运材料的可行性研究[J]. *激光技术*, 2011, **35**(2): 193~195
- 15 Zhao Bin, Zhao Changming, He Jianwei *et al.*. The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1797~1801
赵 彬,赵长明,何建伟等. 太阳光抽运固体激光工作物质的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1797~1801