

太阳光泵浦固体激光器的研究与应用

王 菲¹, 王晓华^{2,3}, 房 丹², 李 广², 魏 丹¹, 杜丽芳², 王子强¹

(1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

3. 长春理工大学高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要:在介绍太阳光泵浦固体激光器工作原理的基础上,分别对太阳光泵浦固体激光器的固体工作物质、太阳光收集聚光装置和泵浦方式的研究状况进行了综述,探讨了太阳光泵浦固体激光器的发展趋势及其应用前景。

关键词:太阳光泵浦; 固体激光器; 工作物质; 收集聚光器; 泵浦方式

中图分类号: TN245 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2011.07.006

Research and application of solar pumped solid-state lasers

WANG Fei¹, WANG Xiao-hua^{2,3}, FANG Dan², LI Guang²

WEI Dan¹, DU Li-fang², WANG Zi-qiang¹

(1. College of Opto-Electronics Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. National Key Lab on High Power Semiconductor Laser, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The principle of solar pumped solid-state laser is introduced, then the research developments of the solid-state medium, collector system and pumping configuration are summarized respectively. The developing tendency and application of solar pumped solid state laser are also discussed.

Key words: solar pumped; solid-state laser; active medium; collector; pumping configuration

1 引 言

随着地球人口的增长,能源问题已成为迫切需要解决的焦点问题之一,越来越多的人将解决的关键投注在太阳能、风能及潮汐能等自然能源上。在人类可能利用的自然能源中,太阳能规模最大。

太阳光光谱中包含有许多常用的激光泵浦带,将经大压缩比会聚后具有高能量密度的太阳光耦合到激光介质中,使阳光中有用的泵浦光对介质进行泵浦而产生激光输出成为可能。1963年 Z. J. Kiss 等人^[1]首次报道研制出太阳光泵浦 $\text{CaF}_2: D_y^{2+}$ 激光器,标志着太阳光泵浦固体激光器的诞生,并引起了研究人员的广泛关注。1966年, C G Young^[2]首次报道采用 610 mm 口径抛物面聚光器收集太阳光直接泵浦钕玻璃和 Nd:YAG 实现了激光运转,采用端面泵浦方式获得了 1.25 W,采用侧面泵浦方式获

得了 0.8 W 激光输出,效率低于 1%。

2 太阳光泵浦固体激光器的工作原理

太阳辐射经过收集器收集耦合到激光晶体上进行激励,为使收集的太阳光尽可能地耦合到晶体上,通常还采用复合抛物面聚光器 CPC 作为二级聚光器。激光晶体的侧面与冷却水接触从而将自身产生的废热导出。激光器在太阳光的泵浦激励下,克服阈值后在高反镜 HR 和输出耦合镜 AR 构成的谐振腔内形成激光振荡。图 1 为太阳光泵浦固体激光器的典型结构示意图。

基金项目: 吉林省科技支撑计划 (No. 20086012); 吉林省青年科研基金 (No. 2011) 资助。

作者简介: 王 菲 (1977 -), 男, 硕士, 讲师, 主要从事新型激光器, 固体激光技术及激光测试技术方面的研究。E-mail: feewang@163.com

收稿日期: 2011-01-13; **修订日期:** 2011-02-17

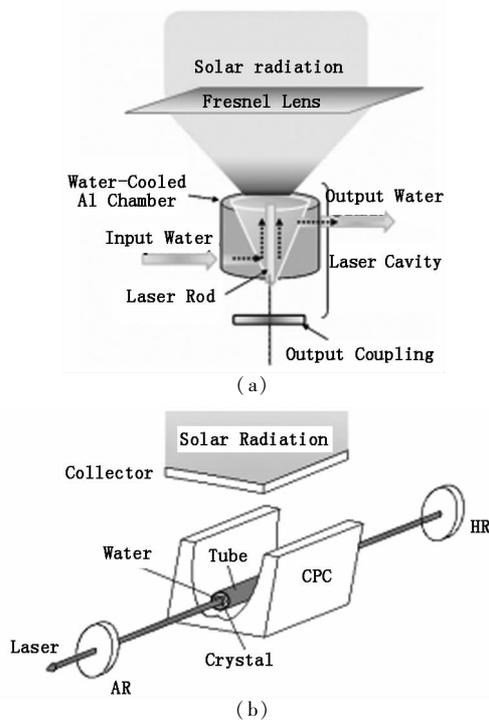


图1 太阳光泵浦固体激光器结构示意图

Fig. 1 configuration of solar pumped solid state laser

3 太阳光泵浦固体激光器的研究现状

3.1 固体工作物质的研究

最先实现太阳光泵浦运转的固体工作物质是 Nd:YAG 单晶和钹玻璃,二者均具有较宽的吸收谱带,但总的效率相对较低。于是,研究人员开始寻找适于太阳光泵浦的新型激光工作物质。太阳光是连续宽光谱光源,其辐射光谱覆盖紫外到红外波段,较强的光辐射发生在 350 ~ 600 nm 波段,而其他波段相对较弱。从总的能量分布来看,紫外波段、可见光波段和红外光波段占有比例分别为 4%, 44% 和 55%,于是对太阳光泵浦固体激光器工作物质的探索主要是针对工作物质的吸收谱与太阳光谱匹配特性,匹配较好的激光介质则激光器的阈值就会低一些,且效率高。此后研究人员分别对 Er:Tm:Ho:YAG、红宝石、Cr:Nd:YAG、Cr:Nd:YAG 陶瓷晶体、紫翠玉宝石及 Cr:Nd:GSGG 等固体工作物质^[3-4]进行了探索。2003 年, M Lando^[5]报道了太阳光直接泵浦 Nd:YAG 晶体,采用两级聚光获得了 45 W 连续激光输出,斜效率约为 7.5%,转换效率约为 5.6%。2007 年, M Endo^[6]报道了太阳光泵浦微片 Cr:Nd:GSGG 激光器,获得了 5.6% 的转换效率。2007 年, T. Yabe 等人^[7]采用 1.3 m² 的非涅耳透镜收集太阳光并泵浦 Cr:Nd:YAG 陶瓷激光晶体,获得了 24.4 W 的 1064 nm 激光输出,斜效率为 11% ~ 14%,总转换效率为 2.9%。2009 年, Tomomasa Ohkubo 等人^[8]报道了采用 4 m² 非涅耳透

镜收集太阳光进行端面 and 侧面混合泵浦 Cr:Nd:YAG 陶瓷激光晶体,获得 80 W 激光输出,斜效率达 9%,总转换效率为 4.3%。

虽然在实验上对不同的太阳光泵浦固体工作物质取得了一定的进展,但和理论上的极限值还有较大的差距,优化太阳光泵浦固体激光器的实验参数是进一步提高激光器效率的关键,当然探索和寻找最佳的固体激光介质的努力一直没有间断过,尤其是通过多种激活离子的共掺来提高激光器的效率。

3.2 太阳光收集聚光装置的研究

收集聚光装置是太阳光泵浦激光器的关键部件,提高收集系统的收集效率是提高激光器输出功率和太阳光利用率的关键,当然,关注收集效率的同时也要考虑加工难度、成本和质量等多种因素。收集聚光装置主要由两部分组成,即太阳光收集光学装置和聚光装置。C G Young^[2]分别采用口径为 61 cm 的消像差弯月透镜和抛物面透镜来收集太阳光,聚光装置分别采用内壁镀制了具有高反射率银的圆筒和圆锥。

为了收集到更多的太阳光,大口径收集光学系统被广泛应用于太阳光泵浦激光器。1984 年, Haruo Arashi 等人^[9]采用口径为 10 m 的抛物面镜收集太阳光来泵浦 Nd:YAG 晶体。为了对斜入射的太阳光进行有效收集而达到最大理论的聚光比,非成像光学元件-复合抛物面聚光器(CPC)的光学特性引起了研究人员的注意。1988 年, M Weksler 等人^[10]报道了三级收集聚光的太阳光泵浦激光器,第一级采用 10 m × 10 m 的定日镜反射,第二级采用 600 片透镜阵列聚光,第三级采用二维复合抛物面聚光器(2D-CPC)进行聚焦来泵浦 Nd:YAG 晶体获得 60 W 激光输出,斜效率达 2.4%。1993 年, V Krupkin 等人^[11]报道了采用 660 m² 的光学系统收集太阳光并侧面泵浦 Nd:YAG 获得最大功率为 500 W 的激光输出。为了降低太阳偏移对光收集效率的影响,3D-CPC 被引入到收集聚光装置中。2003 年, M Lando^[4]报道了采用 61 个六边形反射镜组成的 6.75 m² 收集光学系统收集太阳光直接泵浦 Nd:YAG 晶体,2D-CPC 和 3D-CPC 相结合聚光获得了 45 W 连续激光输出,斜效率约为 7.5%,转换效率约为 5.6%。

由于大口径光学元件和 CPC 制作困难且质量较大,其收集的太阳能量有限。研制大面积、轻质量的光学元件是收集更多太阳光的关键。基于低成本、轻质量、小非涅耳数和高收集效率的要求,采用 PMMA 材料制作的非涅耳透镜成为太阳光收集装置的首选器件之一,并在太阳光泵浦激光器中取得了

广泛应用。2007年, T. Yabe 等人^[7]报道了采用 1.3 m^2 菲涅耳透镜收集太阳光, 收集到的太阳光强度为 518 W/m^2 , 收集效率为 66.4%。2009年, Tomomasa Ohkubo 等人^[8]报道了采用 4 m^2 菲涅耳透镜收集太阳光, 收集到的太阳光强度为 465 W/m^2 。

3.3 泵浦方式的研究

固体激光器的泵浦方式通常有端面泵浦和侧面泵浦两种, 其中端面泵浦方式效率相对较高但不适于高功率运转, 而侧面泵浦方式效率相对较低但适于高功率强泵浦情况^[12]。C G Young^[2]采用太阳光端面泵浦方式获得了 1.25 W 激光输出, 采用太阳光侧面泵浦方式获得了 0.8 W 激光输出, 效率低于 1%。鉴于经过光学系统收集到阳光的聚焦特性和提高激光器泵浦效率的要求, 研究人员引入了混合泵浦方式, 此方式是采用端面泵浦和侧面泵浦相结合的方式, 如 2009年 Tomomasa Ohkubo 等人^[8]报道了采用 4 m^2 菲涅耳透镜收集太阳光进行端面和侧面混合泵浦 Cr:Nd:YAG 陶瓷激光晶体获得 80 W 激光输出, 斜效率达 9%, 总转换效率为 4.3%。

4 太阳光泵浦固体激光器的发展趋势

随着人类对太阳能利用的进一步深入, 太阳光泵浦固体激光器与其他激光器一样, 研究影响激光器阈值、转换效率、输出功率及光束质量的因素, 获得高质量的激光器是研究人员一直关注的热点问题, 也是新型激光器发展的必然趋势。同时, 伴随着实际应用的需要, 激光器的小型化也是不容忽视的问题之一。

关于太阳光泵浦固体激光器的研究工作在许多新的方向可以被丰富地拓展:

(1) 寻找适于在空间应用的大面积、高效率的太阳光收集系统, 增大收集太阳光的面积和提高太阳光的收集效率;

(2) 设计合理结构和参数的聚光装置, 提高聚光器的聚光效率, 进而增大激光工作物质的吸收效率;

(3) 探索适于太阳光泵浦的新型固体激光工作物质, 优化激光工作物质的结构参数, 降低激光器的振荡阈值, 使激光器更容易实现激光输出; 提高激光器的转换效率, 从而提高能量的利用率, 减少废热的产生, 提高激光器输出光束的光束质量。与此同时, 具有低阈值和高转换效率的激光工作物质将会进一步利于整个激光器的小型化;

(4) 采用多级泵浦腔在谐振腔内串接或者是多路组束放大, 从而获得更高功率的激光输出, 以满足不同应用的需求。

5 太阳光泵浦固体激光器的应用

太阳光泵浦固体激光器在军事和民用等领域均

具有广泛潜在的应用前景。太阳光泵浦固体激光器不仅是空间激光通信的良好光源, 还可以应用于空间无线能量传输、空间光电对抗、空间太阳能发电及激光动力推进等领域。在民用领域, 大功率太阳光泵浦固体激光器可以与运动控制系统相结合研制出绿色激光加工系统应用于工业生产, 如激光打标、激光清洗、激光热处理、激光切割及激光焊接等。

随着太阳光泵浦激光技术研究的日益成熟, 其应用领域也将会得到不断的扩展。

参考文献:

- [1] Z J Kiss, H R Lewis, R C Duncan. Sun pumped continuous maser [J]. Applied Physics Letters, 1963, 2 (5): 93 - 94.
 - [2] C G Young. A sun-pumped cw one-watt laser [J]. Applied Optics, 1966, 5 (6): 993 - 997.
 - [3] R M J Benmair, J Kagan, Y Kalisky, et al. Solar-pumped Er, Tm, Ho:YAG laser [J]. Optics Letters, 1990, 15 (1): 36 - 38.
 - [4] I H Hwang, J H Lee. Efficiency and threshold pump intensity of CW solar-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1991, 27 (9): 2129 - 2134.
 - [5] Lando M, Kagan J, Linyekin B, et al. A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime [J]. Optics Communications, 2003, 222 (1 - 6): 371 - 381.
 - [6] M Endo. Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers [J]. Optics Express, 2007, 15 (9): 5482 - 5493.
 - [7] T Yabe, T Ohkubo, S Uchida, et al. High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with fresnel lens and chromium codoped laser medium [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90 (261120): 1 - 3.
 - [8] Tomomasa Ohkubo, Takashi Yabe, Kunio Yoshida, et al. Solar-pumped 80 W laser irradiated by a fresnel lens [J]. Optics Letters, 2009, 34 (2): 175 - 177.
 - [9] Haruo Arashi, Yasuo Oka, Nenokichi Sasahara, et al. a solar-pumped CW 18 W Nd:YAG laser [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1984, 23 (8): 1051 - 1053.
 - [10] Weksler M, Shwartz J. Solar-pumped solid-state lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24 (6): 1222 - 1228.
 - [11] V Krupkin, Y Kagan, A Yogev. Non imaging optics and solar laser pumping at the weizmann institute [J]. Proc. SPIE: Nonimaging Optics, 1993, 2016: 50 - 60.
 - [12] Liu Yuan, Fang Gaozhan, Ma Xiaoyu, et al. High power diode pumped solid state lasers [J]. Laser & Infrared, 2002, 32 (3): 139 - 142.
- 刘媛, 方高瞻, 马骁宇, 等. 大功率二极管泵浦固体激光器 [J]. 激光与红外, 2002, 32 (3): 139 - 142.