

31.5 W 太阳光抽运 Nd : YAG 固体激光器

李金华, 杨苏辉, 赵长明*, 关哲, 何东兵, 张海洋

北京理工大学光电学院, 北京 100081

摘要 设计了一种阈值较低的太阳光直接抽运的 Nd : YAG 固体激光器, 采用有效面积为 1.03 m^2 、焦距为 1.2 m 的非涅耳透镜为第 1 级太阳光会聚装置, 分腔水冷型镀金锥形腔为第 2 级太阳光会聚装置。在液体导光透镜和镀金锥形腔的共同作用下, 通过端面、侧面同时抽运直径为 5 mm 、长度为 75 mm 的 Nd : YAG 螺纹晶体棒, 获得了连续稳定的 1064 nm 激光输出。利用光学设计软件 ZEMAX 和激光谐振腔仿真软件 LASCAD 建立理论模型, 通过数值模拟验证实验结果并优化系统设计。该太阳光抽运 Nd : YAG 固体激光器的激光输出功率最高为 31.5 W , 收集效率为 30.58 W/m^2 , 激光器阈值功率为 102 W , 斜率效率为 4.25% , 太阳光到激光的能量转换效率为 3.2% 。

关键词 激光器; 太阳光抽运; Nd : YAG; 螺纹棒; 数值模拟

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.1114001

A 31.5 W Solar-Pumped Nd : YAG Solid-State Laser

Li Jinhua, Yang Suhui, Zhao Changming, Guan Zhe, He Dongbing, Zhang Haiyang

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

Abstract A solar directly pumped Nd : YAG solid-state laser with low threshold power is designed, in which Fresnel lens with the surface of 1.03 m^2 and focal length of 1.2 m is used as the primary solar radiation concentrator, and gold-plated conical cavity with a liquid light-guide lens is used as the secondary concentrator. The continuous and stable 1064 nm laser is obtained by end-side pumping Nd : YAG grooved rod with diameter of 5 mm and length of 75 mm , under combined action of liquid light guide lens and the gilded taper cavity. Theoretical model is established by optical design software ZEMAX and laser resonator simulation software LASCAD, experimental results are verified, and system design is optimized by numerical simulation. The experimental results show that output power of the laser pumped Nd : YAG solid-state laser is highest 31.5 W , laser collection efficiency is 30.58 W/m^2 , laser threshold power of is 102 W and slope efficiency is 4.25% . The energy conversion efficiency from solar radiation to laser is 3.2% .

Key words lasers; solar pumping; Nd : YAG; grooved rod; numerical simulation

OCIS codes 140.3280; 140.5560; 140.3380

1 引 言

在能源日趋紧张的当今时代, 有效地开发和利用储量丰富、使用清洁的太阳能具有重要的研究意义。太阳光抽运激光器是以太阳光为抽运源, 将宽带光谱的太阳光直接转换为窄带光谱激光的装置^[1]。相对于太阳能电池驱动的固体激光器, 其结构简单、能量转换环节少, 可实现清洁、稳定、高效的太阳光到激光的能量转换, 具有很好的空间应用前景, 如激光空间通信^[2]、轨道空间碎片清除、激光无线能量传输^[3]和光电对抗。此外, 在地面应用方面也有很大潜力, 如高温材料加工、氢镁能量循环和海洋探测等。

收稿日期: 2017-06-06; 收到修改稿日期: 2017-06-28

基金项目: 国家自然科学基金(61378020)

作者简介: 李金华(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事太阳光抽运固体激光器方面的研究。

E-mail: lijinhua930@163.com

导师简介: 杨苏辉(1968—), 女, 博士, 教授, 主要从事新型固体激光器、激光雷达方面的研究。

E-mail: suhuiyang@bit.edu.cn

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

1963年,美国普林斯顿美国无线电公司(RCA)实验室的 Kiss 等^[4]使用太阳光直接抽运放置于液氦中的 $\text{CaF}_2:\text{Dy}^{2+}$,在 27 K 温度下观察到激光输出。太阳光抽运激光器研究初期主要使用抛物面反射镜和定日镜作为主要的聚光装置,收集效率(激光器输出激光功率与入射到初级太阳光会聚系统的太阳辐射光功率之比)比较低^[5-7]。21 世纪初期,太阳光抽运激光器领域出现了许多技术革新,其中最主要的是采用菲涅耳透镜作为初级太阳光会聚装置^[8-9]。与抛物面反射镜和定日镜相比,菲涅耳透镜加工成本低、体积小、重量轻,能有效简化系统结构。菲涅耳透镜多采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),该材料对波长大于 2200 nm 的红外光和波长低于 350 nm 的紫外光都有很好的吸收,能有效剔除太阳光中不利于 Nd:YAG 吸收的杂散光^[9-10]。2007 年,日本东京工业大学的 Yabe 等^[11]采用面积为 $1.4\text{ m}\times 1.05\text{ m}$ 的菲涅耳透镜作为第 1 级会聚系统,侧面抽运直径为 3~9 mm、长度为 100 mm 的 Cr:Nd:YAG 陶瓷棒,获得了最高 24.4 W 的激光输出,收集效率为 $18.7\text{ W}/\text{m}^2$,阈值功率为 420 W。2012 年,日本东京工业大学的 Dinh 等^[8]利用有效面积为 4 m^2 的菲涅耳透镜,获得了 120 W 的 1064 nm 激光输出,其收集效率为 $30\text{ W}/\text{m}^2$,阈值功率为 900 W,并比较了 Nd:YAG 晶体和 Cr:Nd:YAG 陶瓷的性能。结果表明,损耗低、热导率高的 Nd:YAG 晶体更适用于高功率太阳光抽运激光器^[12]。2016 年,葡萄牙里斯本新大学的 Liang 等^[13]在系统中加入熔融石英非球面透镜,端面 and 侧面同时抽运直径 4 mm 的螺纹 Nd:YAG 晶体,获得了 $31.5\text{ W}/\text{m}^2$ 的多模激光输出,阈值功率为 270 W。

提升太阳光抽运激光器的实用性需要提高收集效率和降低激光器的阈值功率。采用新的激光工作物质^[11]、增大菲涅耳透镜的面积^[8]、加入各种形状的熔融石英波导以及改变聚光腔的形状^[13]等方式可提高收集效率。但激光器的阈值功率都较高,系统较大^[8,11,13]。本文利用充满去离子水的石英管构成液体导光透镜,使菲涅耳透镜的会聚斑进一步聚焦;以侧面施加螺纹工艺的 Nd:YAG 晶体棒作为激光工作物质,螺纹面可以增大晶体侧表面积,增强侧面抽运光的耦合效率与侧面液冷效果,从而降低太阳光抽运激光器的阈值功率,提升激光器的收集效率^[14]。利用 ZEMAX 和 LASCAD 软件对太阳光抽运激光器系统进行建模仿真,软件数值模拟结果与实验结果基本吻合。

2 ZEMAX 和 LASCAD 软件的建模仿真

ZEMAX 在非序列模式下设置抽运光参数和光学元件并进行光线追迹。在 ZEMAX 软件中定义 PMMA、熔融石英和水等材料对各波长入射光的折射率和吸收系数。上述材料可吸收紫外和红外辐射,在减缓 Nd:YAG 晶体的热量囤积、减弱激光器热透镜效应方面具有重要的作用。

Nd:YAG 晶体抽运阈值功率低,热力学性质良好,吸收光谱与太阳光谱具有良好的匹配度,量子效率高,机械强度优良,是太阳光抽运固体激光器比较理想的工作物质^[7]。针对 Nd^{3+} 掺杂浓度(离子数分数)为 1.0% 的 Nd:YAG 晶体在 ZEMAX 中定义了 22 个吸收峰,这些吸收峰的中心波长分别为 527,531,568,578,586,592,732,736,743,746,753,758,790,793,803,805,808,811,815,820,865,880 nm。将上述所有峰值波长和其对应的吸收系数添加到 ZEMAX 中的 Nd:YAG 材料目录。在 ZEMAX 中定义光源功率密度为 $950\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,太阳光谱与 Nd:YAG 吸收谱的有效匹配比例为 15.98%,地面太阳光的半锥发散角为 0.27° ^[15],不同波长的辐照度(单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$)以标准太阳光谱(AM1.5)的参考数据定义^[10]。图 1 为 ZEMAX 中所建太阳光抽运激光器模型。

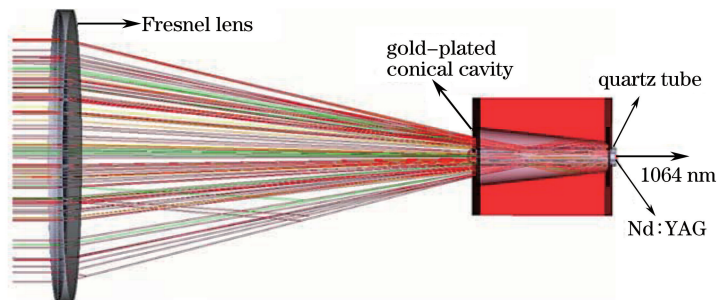


图 1 ZEMAX 太阳光抽运激光器建模

Fig. 1 ZEMAX modeling of solar-pumped laser

利用放在晶体中心切平面和前端面的平面探测器,可以获得晶体侧面和端面的抽运光功率分布。探测器探测的晶体中心切平面的抽运光功率分布如图 2(a)所示,峰值功率密度为 $533.74 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$,总的侧面抽运功率为 355.41 W ,由于锥形腔的作用,抽运光主要分布在晶体的前端和中部;探测器探测的晶体前端面的抽运光功率分布如图 2(b)所示,峰值功率密度为 $878.43 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$,总的端面抽运功率为 184.99 W ,通过液体导光透镜的聚焦后,端面抽运光可以更集中地作用于晶体端面。

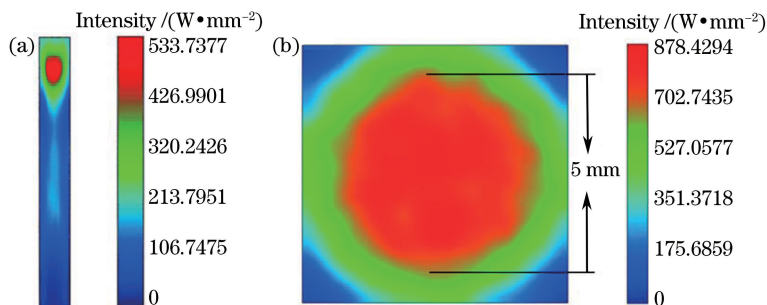


图 2 ZEMAX 探测器探测的晶体中心(a)切平面和(b)前端面的抽运光功率分布

Fig. 2 (a) Pumping power distribution on the center tangent plane of crystal detected by ZEMAX detectors; (b) pumping power distribution on the front end face

在光线追迹中,ZEMAX 追迹 10 万条射线,晶体棒和体探测器协同定位,包含 18.75 万个像素点,通过编写优化函数,ZEMAX 进行自动优化。ZEMAX 中体探测器可以记录晶体棒吸收通量的三维数据,将此吸收通量数据导入 LASCAD 的抽运光分布文件中,进行相关数值分析。晶体棒的温度分布、热负荷分布和应力强度分布分别由 ZEMAX 软件计算的吸收能量得到,如图 3 所示。LASCAD 中建立的 Nd : YAG 晶体和谐振腔结构如图 4 所示。LASCAD 中,拟合抽运光功率的分布,设置平均抽运波长为 660 nm ,通过优化谐振腔腔长、输出镜的反射率和曲率半径,得到最优的输入输出功率曲线,输出镜不同反射率所对应的输入输出功率曲线如图 5 所示。通过运行光束传输代码(BPM),获得激光谐振腔右侧输出镜处的强度轮廓如图 6 所示。

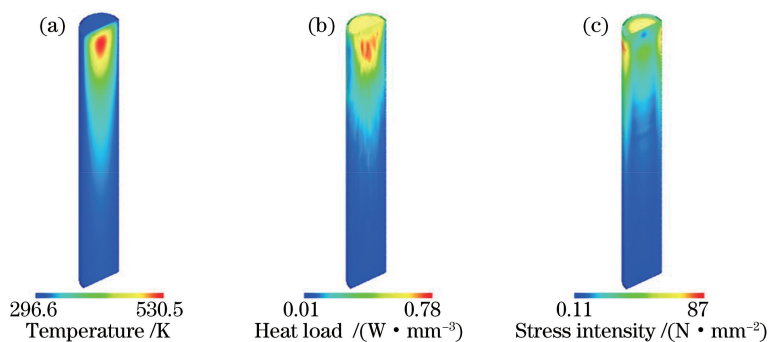


图 3 Nd : YAG 晶体棒不同位置处的(a)温度分布、(b)热负荷分布和(c)应力强度分布

Fig. 3 (a) Temperature distribution, (b) heat load distribution and (c) stress intensity distribution of Nd : YAG crystal rod at different positions

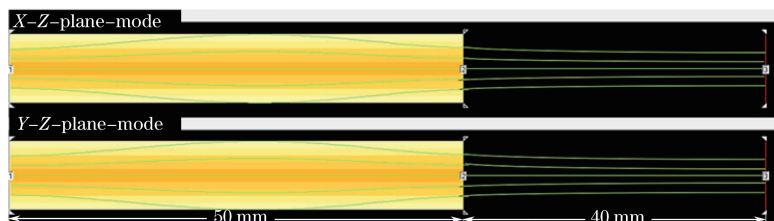


图 4 LASCAD 中的谐振腔结构

Fig. 4 Resonant cavity structure in LASCAD

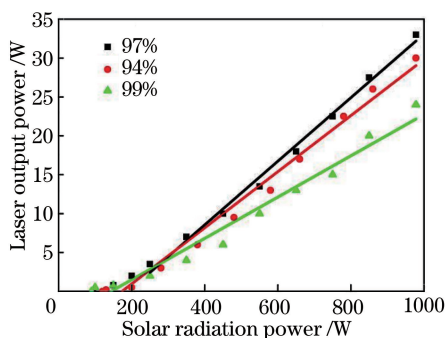


图 5 输出镜不同反射率所对应的输入输出功率曲线
Fig. 5 Input and output power curves of output mirror with different reflectivities

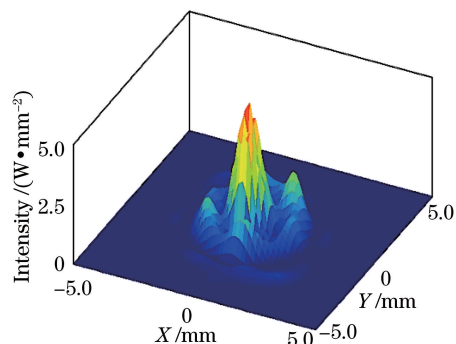


图 6 LASCAD 中谐振腔右侧输出镜处的强度轮廓
Fig. 6 Intensity profile at output mirror on the right side of resonator in LASCAD

3 太阳光端面 and 侧面同时抽运 Nd : YAG 固体激光器的实验研究

实验系统如图 7(a)所示,有效面积为 1.03 m^2 的非涅耳透镜作为第 1 级会聚,其焦距为 1.20 m ,会聚的焦斑直径为 11.2 mm 。非涅耳透镜材料为 PMMA,该材料对 $400 \sim 900 \text{ nm}$ 的光透过率高,可以吸收紫外光和红外光,但存在很大的色差,所以用非涅耳透镜将太阳光直接聚焦到激光工作物质的效率非常低,必须使用非成像元件进一步会聚太阳光。采用分腔水冷型镀金锥形腔作为第 2 级会聚,用冷却的去离子水充满石英管构成液体导光透镜,对抽运光进一步会聚,增强端面抽运的效果;镀金锥形腔将未能聚焦到晶体端面的抽运光反射到 Nd : YAG 螺纹晶体棒的螺纹面,最终达到端面 and 侧面共同抽运的效果。通过软件仿真和实验测试,发现内径为 9 mm 的石英管可以为直径 5 mm 的晶体棒提供足够的冷却效果,同时保证更好地聚焦太阳光。分腔水冷型镀金锥形腔结构如图 7(b)所示,其输入窗口直径为 30 mm ,输出窗口直径为 20 mm ,分腔水冷型镀金锥形腔腔长为 50 mm 。Nd : YAG 螺纹晶体棒安装在锥形腔中间的石英管内,螺纹棒螺距为 0.6 mm ,齿深为 0.1 mm , Nd^{3+} 的掺杂浓度为 1.0% ,晶体前端面镀 1064 nm 反射率大于 99.8% 的高反(HR)膜和 $300 \sim 900 \text{ nm}$ 可见光波段透射率大于 99.5% 的增透(AR)膜,后端面镀 1064 nm 透射率大于 99.8% 的增透膜。采用曲率半径为 900 mm 、波长为 1064 nm 处的反射率为 97% 的凹面镜作为输出镜,输出镜安装在晶体棒后端 40 mm 处,与晶体棒的前端组成平凹腔。使用螺纹棒的优点在于较大的侧面可以接收锥形腔中更多的抽运光,抽运光在晶体棒侧面分布更均匀化。另外,螺纹棒可以提供更好的散热性能,减少晶体的热透镜效应,从而降低激光器的阈值,提高激光器的输出功率^[16]。

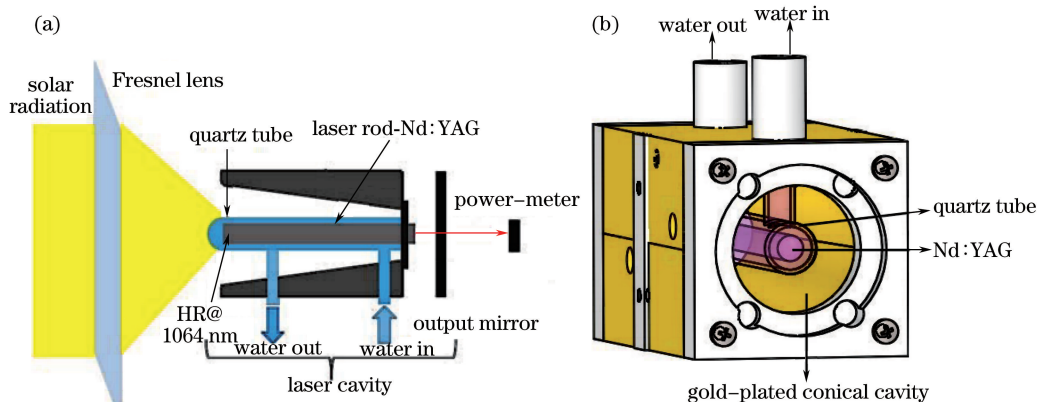


图 7 (a)太阳光抽运激光器结构简图;(b)分腔水冷型镀金锥形腔结构图
Fig. 7 (a)Structure diagram of the solar-pumped laser;(b) gold-plated conical cavity with a liquid light-guide lens

4 实验结果及分析

2017 年 3 月 7 日中午,北京太阳光功率密度为 950 W/m^2 ,水冷机将循环的水温控制在 $6 \text{ }^\circ\text{C}$,流速为

6 L/min。将谐振腔与菲涅耳透镜同轴放置,整个系统安装在由电机驱动的三维调整架上,用于实时跟踪太阳方位,以获得稳定的连续激光输出。实验中在谐振腔的前端加入一个直径为 11 mm 的光阑,只允许端面抽运光进入,获得的最高输出功率仅为 10 W,这可证明侧面抽运光对于高功率的输出更有意义。实验过程中将置于菲涅耳透镜焦点位置处的锥形腔前移 5 mm,可提高侧面抽运光的比例,获得更高功率的激光输出。实验结果和软件仿真结果的对比如图 8 所示,太阳光抽运直径为 5 mm、长度为 75 mm 的 Nd:YAG 螺旋纹棒获得了最高输出功率为 31.5 W 的激光输出,ZEMAX-LASCAD 软件数值模拟的最高输出功率为 33 W,与实验结果相差 4.76%,ZEMAX-LASCAD 的数值模拟结果与实验结果基本吻合。

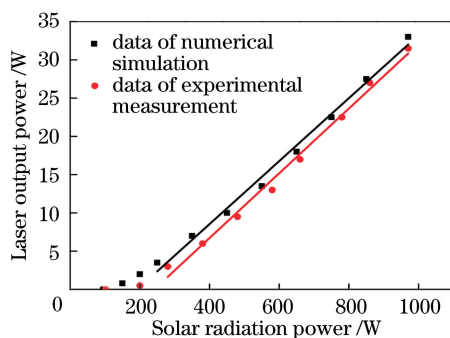


图 8 LASCAD 软件模拟仿真数据与实验数据对比图

Fig. 8 Comparison of experimental data and simulation data of LASCAD

在分腔水冷型镀金锥形腔内,用石英管代替激光棒放置在腔的轴线上,热电偶在管内测量抽运腔轴线上温度分布如图 9(a)所示,实验测得的温度分布趋势和仿真结果一致;利用 Thorlabs 公司的 BC106N-VIS-CCD 相机光束分析仪探测到激光光斑的强度轮廓如图 9(b)所示,与图 6 的仿真效果相近。但由于端面抽运光斑较大,端面和侧面同时抽运,导致输出激光的光束质量较差。

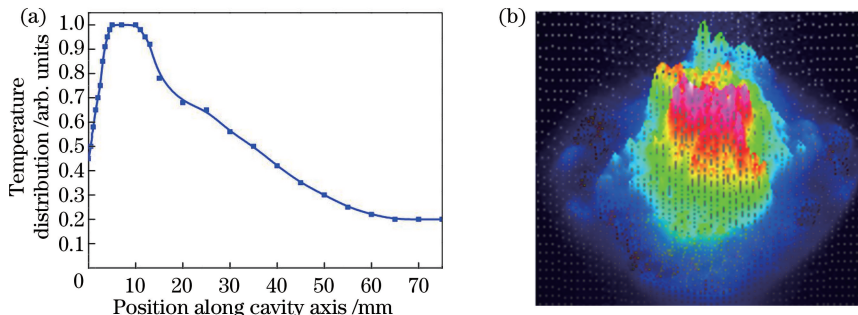


图 9 (a)抽运腔轴线上的温度分布;(b)激光光斑的强度轮廓

Fig. 9 (a) Temperature distribution on the pump cavity axis; (b) intensity profile of laser spot

5 结 论

设计了一种阈值功率较低的太阳光直接抽运 Nd:YAG 固体激光器,以有效面积为 1.03 m^2 的菲涅耳透镜作为太阳光第 1 级会聚装置,分腔水冷型镀金锥形腔作为第 2 级会聚装置。在液体导光透镜和镀金锥形腔的共同作用下,通过端面与侧面同时抽运直径为 5 mm、长度为 75 mm 的 Nd:YAG 晶体螺旋纹棒,获得了最高输出功率为 31.5 W、连续稳定的 1064 nm 激光输出,收集效率为 30.58 W/m^2 ,激光器阈值功率为 102 W,斜率效率为 4.25%,太阳光到激光的转换效率为 3.2%。利用 ZEMAX 和 LASCAD 软件对太阳光抽运激光器系统进行建模仿真,软件数值模拟结果与实验结果相差 4.76%,ZEMAX-LASCAD 软件数值模拟对以后新型太阳光抽运激光器的设计具有很好的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Rowe D G. Solar-powered lasers[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 64-65.

- [2] Guan Z, Zhao C M, Yang S H, *et al.* Demonstration of a free-space optical communication system using a solar-pumped laser as signal transmitter[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(5): 055804.
- [3] Gao Fengbin, Zhao Changming, Guan Zhe, *et al.* Laser beam propagation process in atmosphere [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 041404.
高凤彬, 赵长明, 关哲, 等. 激光能量穿过大气层的传输过程[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 041404.
- [4] Kiss Z J, Lewis H R, Duncan R C, Jr. Sun pumped continuous optical maser[J]. *Applied Physics Letters*, 1963, 2(5): 93-94.
- [5] Young C G. A sun-pumped cw one-watt laser[J]. *Applied Optics*, 1966, 5(6): 993-997.
- [6] Weksler M, Shwartz J. Solar-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(6): 1222-1228.
- [7] 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(1/2/3/4/5/6): 371-381.
- [8] Dinh T H, Ohkubo T, Yabe T, *et al.* 120 watt continuous wave solar-pumped laser with a liquid light-guide lens and an Nd : YAG rod[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2670-2672.
- [9] Liang D, Almeida J. Highly efficient solar-pumped Nd : YAG laser[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26399-26405.
- [10] Almeida J, Liang D, Guillot E. Improvement in solar-pumped Nd : YAG laser beam brightness[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2115-2119.
- [11] Yabe T, Ohkubo T, Uchida S, *et al.* High-efficiency and economical solar-energy-pumped laser with Fresnel lens and chromium codoped laser medium[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(26): 261120.
- [12] Wang Yu, Zhao Changming, Yang Suhui, *et al.* Solar directly pumped 1064 nm laser amplifier[J]. *Chinese J Lasers*, 2017, 44(3): 0301003.
王予, 赵长明, 杨苏辉, 等. 太阳光直接抽运 1064 nm 激光放大器[J]. *中国激光*, 2017, 44(3): 0301003.
- [13] Liang D, Almeida J, Vistas C R, *et al.* Solar-pumped Nd : YAG laser with 31.5 W/m² multimode and 7.9 W/m² TEM₀₀-mode collection efficiencies[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2017, 159: 435-439.
- [14] Gao Yanwei, Liu Xiaofeng, Sun Nianchun, *et al.* The experimental investigation of Nd : YAG grooved rods' thermal focal distance[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(3): 6-7.
高彦伟, 刘晓峰, 孙年春, 等. 刻螺纹对 Nd : YAG 晶体棒的热透镜效应影响实验研究[J]. *激光杂志*, 2008, 29(3): 6-7.
- [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.
- [16] Xu P, Yang S H, Zhao C M, *et al.* High-efficiency solar-pumped laser with a grooved Nd : YAG rod[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(18): 3941-3944.