

文章编号 1004-924X(2016)增-0294-06

## 菲涅尔透镜聚焦太阳光泵浦 Cr/Nd : YAG 陶瓷激光器

芦 宇<sup>1\*</sup>, 申作春<sup>2</sup>

- (1. 天津职业技术师范大学, 天津 300222;
2. 哈尔滨工业大学 可调谐激光技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**菲涅尔透镜聚焦太阳能泵浦 Cr/Nd : YAG 陶瓷激光器中, 泵浦光斑与激光棒一次轴向耦合度对激光输出功率有很大影响。采用跟踪偏差方法, 即太阳光入射方向与菲涅尔透镜表面法向量不平行导致聚焦光斑与激光棒耦合度不同的方法, 实验获得了激光输出功率随偏转角度的变化关系。该实验采用漫反射陶瓷腔, 降低了二次或多次反射聚焦泵浦对输出功率的影响。实验结果表明, 输出镜反射率为 97% 与 99% 两种情况下, 跟踪偏差角度从 0° 增加到 0.5° 时, 激光输出功率降低到初始功率的约 1/6 倍。所建立的匹配实验的物理模型其理论计算相同偏差角度结果与实验相符合。实验与理论均表明泵浦光与激光棒一次泵浦的轴向耦合效果最好, 因此除去端面遮挡, 通过增加二次聚光器获得高轴向耦合的端面泵浦光可以大幅度提高激光的输出功率。

**关键词:**太阳能泵浦激光器; 菲涅尔透镜; Cr/Nd : YAG 陶瓷; 激光输出功率; 轴向耦合度

**中图分类号:** TN248.1; TN241 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0294

## Solar-pumped Cr/Nd : YAG ceramic laser focused by Fresnel lens

LU Yu<sup>1\*</sup>, SHEN Zuo-chun<sup>2</sup>

- (1. Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;
  2. National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)
- \* Corresponding author, E-mail: luyu507@aliyun.com

**Abstract:** In solar-pumped laser with Fresnel lens and Cr/Nd:YAG ceramic, the laser output power depend highly on coupling factor of pumping light and laser rod in the axial direction. In this paper, the method of tracking angle error attributed to the incident solar ray unparallel with surface normal of Fresnel lens result, was used to calculate the dependence of laser output power on angles experimentally. By using ceramics cavity, the effect of secondary or more reflection beam condenser on the output power was reduced. The experiment result shows that the laser output powers are reduced by 1/6 of the original ones from 0° to 0.5° for refractivity of 97% and 99%, respectively. The physical model was set up to analyze the effect in different tracking angle errors, where the calculation value is in agreement with the experiment result. Results indicate that the beam and laser rod coupled in axial direction perfectly, thereby the removal of the end mask and the adoption of the second condenser will obtain highly axially coupling end pumping beam by which the laser out-

收稿日期: 2016-05-31; 修订日期: 2016-07-01.

基金项目: 天津职业技术师范大学校级启动基金资助项目 (No. XJKC031305)

put power is improved greatly.

**Key words:** solar pumped laser; Fresnel lens; Cr/Nd:YAG ceramic; output laser power; axial coupling factor

### 1 引言

从最初的 1 W 连续功率输出<sup>[1]</sup>到最大功率 500 W 激光输出<sup>[2]</sup>,太阳能泵浦激光器的高转换效率一直是各国研究者追求的目标。日本 T. Yabe<sup>[3]</sup>首次使用菲涅尔成像聚光器泵浦 Cr/Nd:YAG 陶瓷,获得了 24.4 W 的激光输出;并在增大菲涅尔透镜的接收面积为 4 m<sup>2</sup>的情况下,获得了 80 W 的激光功率<sup>[4]</sup>。目前,我国仅有北京理工大学对整个聚光和泵浦系统进行了相关研究。

本文建立了合适的物理模型,对太阳能泵浦系统进行了理论分析。通过跟踪偏差角度调整获得 0°~0.5°下激光的输出功率,测得的激光输出功率与所计算的结果相吻合,从而验证了理论模型的正确性。最后分析了太阳光聚光光斑与激光棒轴向耦合度对激光输出功率的影响,明确了未来提高太阳能泵浦激光器输出功率的方向。

### 2 理论模型与数值模型

图 1 给出了太阳能泵浦激光器的物理模型,此模型考虑了泵浦光的空间分布,但是没有考虑激光介质增益与光束的空间分布。从图 1 可以看出,激光介质位于腔的中心,右面的输出镜是平凹反射镜,在激光介质的左端面上镀高反射膜,腔长 85 mm,输出镜曲率半径为 300 mm。

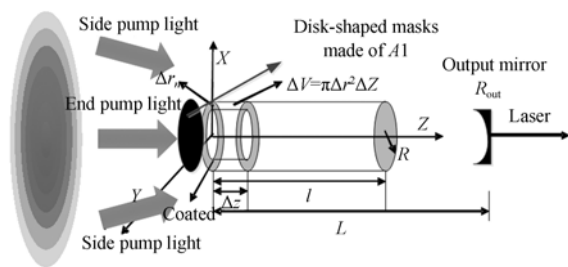


图 1 太阳能泵浦激光器的计算模型

Fig. 1 Calculation model of solar pumped laser

激光输出功率表达式如下<sup>[5]</sup>:

$$P_{out} = (Ahc/\lambda_L/\sigma)[(N_i\sigma l - \gamma)/\gamma] \times [(1/2)\ln(1/R_{out})][W_p - W_{th}], \quad (1)$$

$$W_{th} = \frac{\gamma}{\tau_e(N_i\sigma l - \gamma)}, \quad (2)$$

$$\gamma = \left[ \alpha l + \left[ \frac{1}{2} \right] \ln \left[ \frac{1}{R_{out}} \right] \right]. \quad (3)$$

其中:A为激光束截面,W<sub>th</sub>为泵浦速率阈值,λ<sub>L</sub>为激光波长,l为激光介质长度,σ是受激发射截面,α为激光在介质中传输的散射和吸收损耗。

注入的泵浦光是轴对称的,通常为类高斯分布,所以泵浦速率在柱坐标下表示为<sup>[6-7]</sup>:

$$W_p = \frac{\bar{\xi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \iiint_V \lambda F_{abs}(\lambda, r) dV d\lambda}{N_i h c V}, \quad (4)$$

$$F_{abs}(\lambda, r) = \frac{F(\lambda, r)(1 - e^{-\alpha(\lambda)l})\pi\Delta r^2}{\pi\Delta r^2 l}, \quad (5)$$

其中:V = πR<sup>2</sup>l, F(λ, r)为泵浦功率密度分布函数,α(λ)为不同波长的吸收系数,λ为泵浦光波长,ξ̄被定义为平均量子效率。

根据几何光学理论,光迹追踪被用来仿真分析菲涅尔透镜对焦平面固定区域的聚焦平均功率密度与吸收的平均功率密度。这里设计的菲涅尔透镜参数如表 1 所示,该菲涅尔透镜与实验中采用的型号为 NTK-CF600 菲涅尔透镜一致。菲涅尔透镜与太阳光的光学参数由表 2 给出,地表太阳光谱被分割为 20 间隔。根据 Cr/Nd:YAG 陶瓷激光介质的吸收谱可知,大于 1 μm 的光波几乎不可能被激光介质吸收,所以计算的能量占总能量的 75.75%。

表 1 平凸菲涅尔透镜的基本参数

Tab. 1 Basic parameters of convex Fresnel lens

(mm)				
Focal length	Groove pitch	Aperture	thickness	Material
600	0.5	600	3	PMMA

根据有限元分析法,波长为 λ<sub>m</sub> 在区域为 Δr<sub>n</sub> 下的泵浦光功率密度为:

$$F(\lambda_m, \Delta r_n) = \Delta(\lambda_m) I_s \frac{\pi (D/2)^2}{\pi \Delta r_n^2} \frac{N(\lambda_m, \Delta r_n)}{N} T(\lambda_m), \quad (6)$$

其中:  $N(\lambda_m, \Delta r_n)$  为第  $\lambda_m$  中心波长下穿过  $\Delta r_n$  区域内的光线数,  $N$  为总入射光线数,  $T(\lambda_m)$  为  $\lambda_m$  中心波长经过菲涅尔透镜的透过率,  $\Delta(\lambda_m)$  为  $\lambda_m$  中心波长占有所有波长的权重如表 2 所示,  $I_s$  为测得的地球表面的功率密度, 其值为  $0.076 \text{ W/cm}^2$ ,  $D$  为菲涅尔透镜的直径。根据式(1)~式(6), 太阳光透过 PMMA 的光学参数和物理参数分别如表 2、表 3 所示,  $P_{\text{out}}$  被计算出来。

表 2 丙烯酸脂透镜与太阳光的光学参数<sup>[9-10]</sup>

Tab. 2 Optical parameters of acrylic lens and sunlight<sup>[9-10]</sup>

Increment center/mm	Average absorb $\alpha$ / $\text{cm}^{-1}$	Weight factor	Refractive indice	Transmission factor
0.348	0.698476	0.0267	1.5250	0.68
0.415	1.07982	0.0275	1.5155	0.95~0.97
0.440	1.394928	0.0244	1.5018	0.95~0.97
0.460	1.186293	0.0291	1.4999	0.95~0.97
0.480	0.810864	0.032	1.4982	0.95~0.97
0.500	0.502365	0.0327	1.4968	0.95~0.97
0.515	0.850502	0.0323	1.4954	0.95~0.97
0.540	0.947756	0.0322	1.4942	0.95~0.97
0.560	0.569005	0.0319	1.493	0.95~0.97
0.585	1.714885	0.0473	1.4918	0.95~0.97
0.615	0.849671	0.0473	1.4906	0.95~0.97
0.645	0.48814	0.0475	1.4895	0.95~0.97
0.675	0.434031	0.0456	1.4886	0.95~0.97
0.710	0.296949	0.0537	1.4876	0.95~0.97
0.755	1.44526	0.0591	1.4865	0.95~0.97
0.805	1.631703	0.0562	1.4854	0.95~0.97
0.860	0.472644	0.0623	1.4845	0.95~0.97
0.940	0.23672	0.0606	1.4832	0.95~0.97

表 3 泵浦效率与 Cr/Nd:YAG 陶瓷激光输出功率的计算参数

Tab. 3 Parameters used in calculation of solar pumping rate and output power of Cr/Nd:YAG ceramic laser

Parameter	Value	Reference
$D$ (rod diameter)/mm	5	
$l$ (rod length)/mm	70	
Effective pumped length/mm	60	
$\tau_e$ (fluorescence lifetime)/ms	1.1	Ref[9]
$N_t$ (total number density)/ $\text{cm}^{-3}$	$1.52 \times 10^{20}$	
$\alpha$ (loss coefficient)/ $\text{cm}^{-1}$	$2 \times 10^{-3}$	Ref. [11]
$\xi$	0.77	Ref. [12]
$R$ (mirror)/%	95, 97, 99	
$I_s$ (on the earth surface)	$0.076 \text{ W/cm}^2$	

### 3 实验装置

实验方案采用手动微调跟踪太阳的外场平台进行实验研究。如图 2 所示, 阳光泵浦 Cr/Nd:YAG 陶瓷激光系统由大小  $1.4 \text{ m} \times 1.05 \text{ m}$  且焦距为  $1.2 \text{ m}$  的非涅尔透镜放置在手动跟踪太阳的调整架上。材料为 PMMA 可以吸收波长大于  $2200 \text{ nm}$  的红外辐射与波长小于  $350 \text{ nm}$  的紫外辐射。聚焦直径为  $25 \text{ mm}$  的焦斑能量为总能量的  $60\%$ , 当地表太阳光功率密度为  $760 \text{ W/m}^2$  时聚焦功率为  $594 \text{ W}$ , 由热电偶测得归一化的焦斑光强能量分布, 如图 3 所示。从图 3 可以看出, 焦斑处光强的半高宽约为  $11 \text{ mm}$ , 与根据成像理论计算出的太阳像斑的直径一致。直径为  $5 \text{ mm}$ 、长为  $70 \text{ mm}$  的  $0.1 \text{ at}\% \text{ Cr}^{3+}$  与  $1 \text{ at}\% \text{ Nd}^{3+}$  双掺 YAG 陶瓷激光棒被放置在入口直径为  $25 \text{ mm}$ 、出口直径为  $8 \text{ mm}$  的陶瓷漫反射锥形腔的轴线上。棒的上端镀激光波长的完全反射膜 ( $R > 99.8\% @ 1064 \text{ nm}$ ), 另一端镀激光波长增透膜 ( $R < 0.3\% @ 1064 \text{ nm}$ ), 实验采用了两种输出耦合镜, 其反射率分别为  $99\%$  与  $97\%$ , 曲率半径为  $300 \text{ mm}$ , 谐振腔长约为  $85 \text{ mm}$ 。



图 2 太阳光泵浦装置

Fig. 2 Photo of solar pumped laser setup

上述实验条件下, 调整跟踪架使得焦斑与锥形腔入口重合, 这时认为入射太阳光与非涅尔透镜近似垂直, 从而获得了反射率为  $97\%$  与  $99\%$  的两种输出镜的最大激光输出功率分别为  $0.62 \text{ W}$  与  $0.59 \text{ W}$ 。由于激光输出功率较小, 为了证明所

测得的功率为窄带激光而非地表太阳光的辐射功率,这里通过光纤光谱仪测得 Cr/Nd:YAG 陶瓷的激光输出波长与单掺的 Nd:YAG 激光介质相同为 1 064.3 nm,线宽为 2.6 nm,测量结果如图 4 所示。

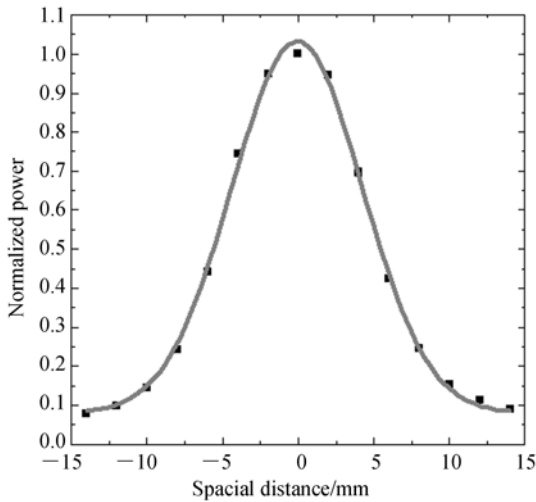


图 3 聚焦太阳光的能量分布

Fig. 3 Power distribution of focused sunlight

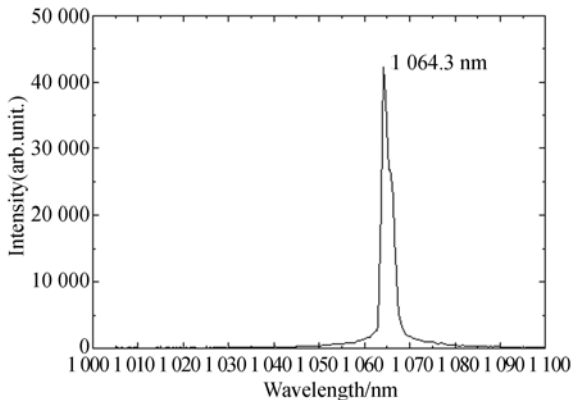


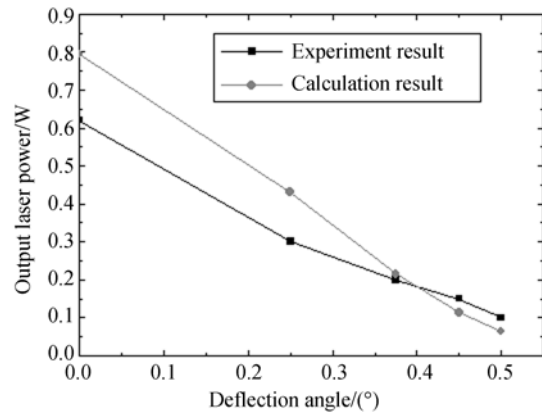
图 4 Cr/Nd:YAG 陶瓷激光的振荡光谱

Fig. 4 Scillation spectrum of Cr/Nd:YAG ceramic laser

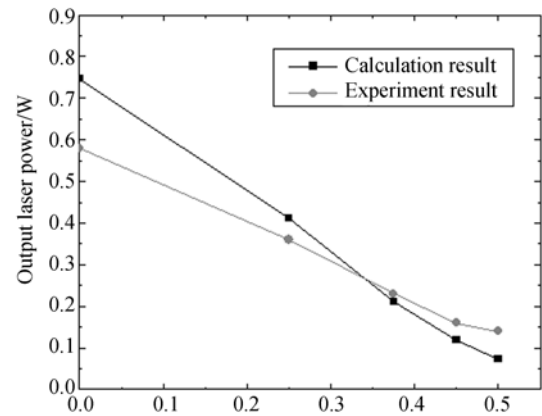
#### 4 理论结果与实验结果的对比分析

实验中聚光系统采用的菲涅尔透镜与本文理论计算时设计的菲涅尔透镜均为成像菲涅尔透镜,根据式(1)~式(6)以及表 1 的物理参数计算出在无跟踪太阳情况下,即入射光线与菲涅尔透镜平面法向量的倾角不同时,所输出的激光功率。

图 5 为输出反射率分别为 97%与 99%的情况下,实验数据与理论计算结果的对比。实验值与理论值比较接近,但存在偏差,原因是聚光系统与泵浦系统不是自动跟踪太阳,而是手动跟踪,并且通过计时的方式推算出某一时刻太阳光的偏转角度。但可以看出,理论计算值的趋势与实验结果是一致的。



(a)R=97%



(b)R=99%

图 5 不同反射率下实验结果与计算结果的对比

Fig. 5 Contrasts of experiment results with calculation results for different reflectivities(R)

在不同泵浦能量条件下,输出镜反射率对激光输出功率的影响一直是所关注的问题。由图 6 可以看出在准确地跟踪太阳,即无偏转角情况下输出镜反射率为 97%时的激光输出优于反射率为 99%的激光输出;当入射光线偏转角为 0.1°以上时,99%的激光输出好于 97%的激光输出。其主要原因在于当入射光线与菲涅尔透镜平面不垂直时,偏转越大入射到晶体侧面的泵浦能量越小,这时泵浦光功率密度接近泵浦阈值,所以要选择

较高的输出反射率来降低泵浦阈值,从而增加激光输出功率;反之当泵浦光能量远大于泵浦阈值时,可以通过降低输出镜的反射率来达到提高激光输出功率的目的。因为根据式(2)与式(3)可知,虽然泵浦速率阈值增加,但泵浦光能量远大于泵浦阈值,所以根据式(1),这项可以忽略,同时由式(1)可以看到反射率降低时输出功率增大。这个分析与实验结果基本一致。如果激光介质端面

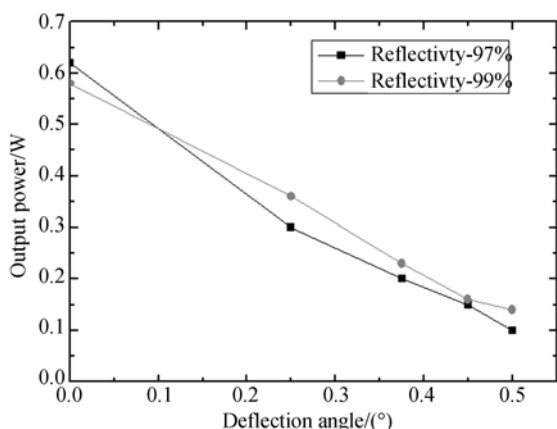


图 6 激光输出功率随入射太阳光偏转时变化情况

Fig. 6 Output laser power dependent on deflection angle of incident sun light

#### 参考文献:

- [1] YOUNG CG. A sun-pumped cw one-watt laser[J]. *Appl. Opt.*, 1966, 5(6): 993-997.
- [2] KRUPKIN V, KAGAN Y, YOGEV A. Non imaging optics and solar laser pumping at the Weizmann institute[J]. *SPIE*, 1993, 2016: 50-60.
- [3] 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]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(26): 261120.
- [4] 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.
- [5] HWANG I H, LEE J H. Efficiency and threshold pump intensity of CW solar-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(9): 2129-2134.
- [6] WEKSLER M, SSHWARTZ J. Solar-pumped solid-state laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, 24(6): 1222 - 1228.
- [7] DEVOR D P, DESHAZER L G, PASTOR R C. Nd : YAG quantum efficiency and related radiative properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1989, 25(8): 1863-1873.
- [8] YEH N. Optical geometry approach for elliptical Fresnel lens design and chromatic aberration[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2009, 93(8): 1309-1317.
- [9] LEUTZ R, SUZUKI A. *Nonimaging Fresnel Lenses; Design and Performance of Solar Concentrators*[M]. Berlin (Heidelberg/New York): Springer, 2001.
- [10] ASTM. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances; Direct Normal and Hemispherical on 370 Tilted Surface[S]. *Book of Standards*, 2003, 14(4): ASTM G173-03e1.
- [11] SAIKI T, NAKATSUKA M, FUJIOKA K, et al.. Cross-relaxation and spectral broadening of gain for Nd/Cr : YAG ceramic lasers with white-light pump source under high-temperature operation

未被遮挡,泵浦能量将进一步增加,那么实验中需要进一步降低反射效率以提高能量输出。

## 5 结 论

本文对泵浦的太阳光功率密度及激光介质进行了有限元分析,建立了光与物质相互作用的物理模型。对实验中侧面泵浦系统进行了理论分析,计算结果与实验值相吻合,验证了理论模型的可行性。最后,分析了反射率为 97%与 99%两种情况下,跟踪偏差角度从 0°增加到 0.5°时,激光输出功率均降低到初始功率的 1/6,表明泵浦光斑与激光棒的轴向耦合对激光输出功率有极大影响。该理论模型的建立为未来设计端面附带二次聚光泵浦太阳能激光器方案的优化奠定了基础。

## 6 致 谢

感谢北京理工大学朱宝亮老师在聚光腔设计方面的帮助,特别感谢北京理工大学的赵长明教授提供外场实验平台的支持,以及其学生在外场实验中给予的帮助。

- tion [J]. *Optics Communications*, 2011, 282 (12): 2980-2984.
- [12] SIKI 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.
- [13] ENDO M. Optical characteristic of Cr<sup>3+</sup> and Nd<sup>3+</sup> codoped Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics [J]. *Optics & Laser Technology*, 2010, 42(3): 610-616.
- [14] LU Y, SHEN Z, LU J, *et al.*. Pumping efficiency of solar-pumped CrNd : YAG ceramic rod with Fresnel lens [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2013, 34(2):120-128.

#### 作者简介:



芦 宇(1982—),男,黑龙江齐齐哈尔人,博士,讲师,2007年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事新型固体激光器的研究。E-mail: luyu507@ aliyun.com