

文章编号: 1001-3806(2007)02-0179-03

一种可用于太阳能抽运光纤激光器的聚光器

秦祖军, 周晓军*, 李 请

(电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054)

摘要: 为了研究抛物面碟形聚光器实现太阳能直接抽运光纤激光器, 根据空间太阳光谱分布特点, 采用数值方法, 计算了用该聚光器聚集太阳能抽运双包层光纤激光器时光纤吸收的太阳能量及其吸收效率。计算结果表明, 通过采用内包层数值孔径较大、掺杂适当稀土元素的双包层光纤及减小太阳光传输过程中的损耗等措施提高光纤激光器对太阳能的吸收效率, 可以实现太阳能直接抽运光纤激光器。通过光纤集束熔锥侧面耦合器构成多模光纤阵列或者聚光器阵列的结构, 可进一步提高太阳能抽运功率。

关键词: 激光技术; 太阳能直接抽运; 光纤激光器; 聚光器设计; 多模光纤阵列; 聚光器阵列

中图分类号: TN245 **文献标识码:** A

A solar concentrator in the solar-direct-pumped fiber laser system

QIN Zu-jun, ZHOU Xiao-jun, LI Qing

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054, China)

Abstract To investigate the practicability of a solar-direct-pumped fiber laser by using a parabolic dish concentrator, the solar power absorbed by the fiber laser and its absorption efficiency were calculated with numerical method based on the characteristics of solar spectrum in outer space. Results showed that it was realizable by taking such measures as using high inner-clad numerical aperture, appropriate rare-earth doped double-clad fiber and decreasing transmission loss of sunlight. In this paper, a new structure of multimode fiber array or parabolic dish concentrator array combination with tapered fiber bundles was proposed to enhance the solar pump power.

Key words laser technique; solar-direct-pumped fiber laser; concentrator design; multimode fiber array; parabolic dish concentrator array

引 言

空间和地球上的太阳能资源都极为丰富, 但是太阳能分散: 空间太阳能能量密度约为 $1350\text{W}/\text{m}^2$, 地球表面的太阳能能量密度即使是天气晴朗的条件下, 也只有约 $800\text{W}/\text{m}^2 \sim 1000\text{W}/\text{m}^2$, 难以实现直接抽运激光器。为了提高太阳能能量密度, 就需要采取聚光措施。复合抛物面聚光器是一种在太阳能抽运固体激光器中常用的聚光器^[1], 但是这种聚光器结构复杂, 制作工艺高, 对于用透镜等聚焦会出现比较严重的像差。

光纤激光器体积小、易冷却, 有着独特优势。目前, 国内有关太阳能抽运光纤激光器的报道非常少。SAIKI^[2]等报道了用金属卤化物灯模拟太阳能抽运 Nd^{3+} 掺杂的 D 形多模双包层光纤激光器的实验, 当抽运灯功率为 1.1W 时, 获得了 300mW 的激光输出功

率, 其中激光振荡的阈值灯功率约为 20mW。他们采用的聚光措施是: 抛物面聚光器进行一次聚光, 再用透镜进行二次聚光。

下面将介绍一种结构简单的可用于抽运双包层光纤激光器的抛物面聚光器。

1 聚光器设计

鉴于光纤激光器的特点, 一般聚光器无法实现对光纤激光器的抽运。FEUERMAN 等人^[3]提出了一种可以用于代替传统激光手术的系统, 其特点是通过一个抛物面碟形聚光器将聚集的太阳光经过光纤传

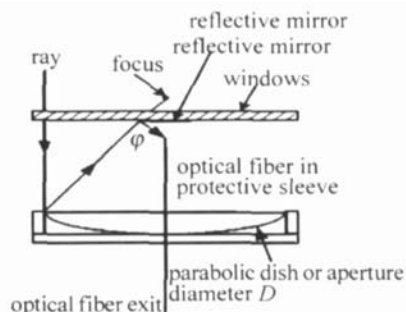


Fig 1 Parabolic dish concentrator^[3]

作者简介: 秦祖军 (1978-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光纤激光器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: xjzhou@uestc.edu.cn

收稿日期: 2006-01-20 收到修改稿日期: 2006-04-19

输到手术台。本文中介绍的抛物面聚光器将以它为锥形,图 1 为该聚光器的结构。其中, D 为聚光器直径, φ 为聚光器半角。

1.1 太阳光谱分布

太阳穿过大气层传输到地球表面的过程当中,要受到诸如臭氧、水蒸气、 CO_2 等的吸收以及大气粒子的散射而损耗相当部分的能量,而且地球表面的太阳能量因时因地而异。但是到达地球大气层外缘空间的太阳能,近似于温度为 5762K 的黑体辐射。根据黑体辐射定理,图 2 中给出了其光谱分布 $E(\lambda)$,并且与实际

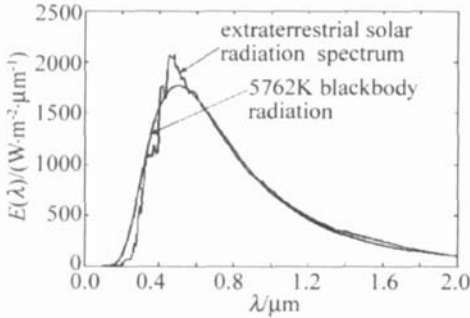


Fig 2 5762K blackbody radiation spectrum

大气层外缘空间太阳能分布^[4]进行了比较(λ 为波长)。从图 2 中可以看出,5762K 黑体辐射模型与空间太阳光谱分布极为近似,尤其在抽运光纤激光器所需的近红外波段。

设 P_{tot} 为聚光器所聚集的太阳总功率(忽略损耗),则:

$$P_{\text{tot}} = \frac{\pi}{4} D^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中, λ_1, λ_2 为太阳光谱的波长范围。显然聚光器的直径 D 越大,聚光器所能聚集的太阳能总功率越大。但是在太阳能直接抽运光纤激光器系统中,聚光器直径和聚光器聚焦光斑直径、双包层光纤内包层直径有关。

1.2 抛物面碟形聚光器设计

聚光比是表征聚光器聚集太阳能能力的量度。抛物面碟形聚光器焦斑中心的聚光比 C 最大,其直径为 d , C 和 d 分别为:

$$C = \frac{\sin^2 \varphi}{\sin^2 \theta_s}, \quad d = \frac{D \theta_s}{2 \tan(\varphi/2)} \quad (2)$$

式中, θ_s 为太阳射线与地面法线之间的夹角,称天顶角,对于地球表面一般取 0.27° 。在聚光器焦斑区 $\frac{\pi}{4} d^2$ 面积内聚集了总聚集太阳能量的 $\cos^4 \left[\frac{\varphi}{2} \right]$ 。

设聚光器聚光比最大的焦斑中心直径等于光纤内包层直径,太阳能在焦斑中心近似均匀分布。根据双包层光纤内包层直径要求以及聚光器安装对准误差,可以修正为:聚光比最大的焦斑中心直径 $d =$

1.2 mm, 光纤的内包层直径为 $d_f = 1 \text{ mm}$

设双包层光纤激光器内包层数值孔径大于 $\sin \varphi$, 此时双包层光纤激光器吸收的太阳抽运功率为:

$$P_p = 0.69 \frac{\pi}{4} D^2 \eta_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) \times \{1 - \exp[-\Gamma_p \sigma_a(\lambda) N l]\} d\lambda \quad (3)$$

式中, η_1 定义为聚光器的聚光效率, $\eta_1 = \eta_2 \times \cos^4(\varphi/2) \times \gamma$, η_2 为由聚光器损耗评估确定的太阳能传输系数; γ 因子乃考虑聚光器表面加工误差、太阳跟踪系统误差等因素对聚光效率的影响; Γ_1 为功率填充因子,近似等于光纤纤芯面积与内包层面积之比; N 为稀土离子掺杂浓度, l 为光在光纤中的传输路径长度; $\lambda_{a1}, \lambda_{a2}$ 为稀土离子吸收波长上、下限, $\sigma_a(\lambda)$ 为稀土离子的吸收截面谱, $\sigma_a(\lambda)$ 可以由实验测得。

聚光器的半角 φ 对其焦斑区聚光比 C 和聚光效率 η_1 都有很大的影响。设计抛物面聚光器时要综合考虑聚光比 C 和聚光效率 η_1 , 选择适当的聚光器半角。

1.3 聚光器的损耗以及效率评估

从太阳光经过封装窗口至光纤端面进行抽运的传输过程中,以下因素会导致太阳光功率损耗: (1) 聚光器封装玻璃窗口上的反射损耗; (2) 聚光器抛物面上的吸收损耗; (3) 反射平面镜上的损耗; (4) 光纤入射端面的菲涅耳反射损耗。上述因素降低了聚光器聚光效率,通过采取措施可以减小太阳光功率损耗。(3) 式中的聚光器能量传输系数 η_2 可由上述的损耗评估设为 $\eta_2 = 0.88$

封装时依据对太阳光能量阻挡损耗最小的原则确定光纤激光器入射端面的反射平面镜直径及其至抽运光纤端面的距离^[3]。

(3) 式中 γ 表示聚光器表面加工误差、太阳自动跟踪系统误差等对聚光效率的影响。在现代加工技术(抛物面形面误差可达到几个微米)及太阳自动跟踪技术(跟踪精度可达到 $\pm 0.05^\circ$) 条件下,足以使得入射太阳光线由于各种误差而导致光线偏离正入射的角度 θ 满足 $\sin \theta \approx \theta$ ^[5]。根据光线的逆向追踪法推导出的与偏离角度 θ 相关的抛物面碟形聚光器光接收函数 $f(\theta)$ 及近似为高斯分布的太阳亮度有效函数 $B_{\text{eff}}(\theta)$,

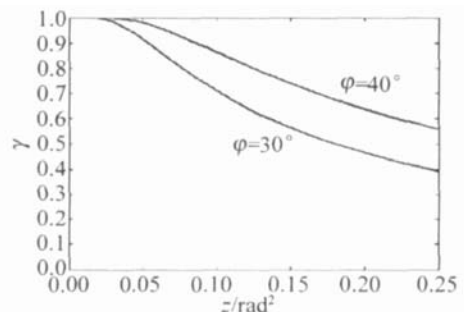


Fig 3 Effect factor γ caused by total errors

对 θ 积分求出偏离角度对聚光器效率的影响因子 γ , 得到了图 3 所示聚光器半角 $\varphi = 30^\circ, \varphi = 40^\circ$ 时 $\gamma(z)$ 的近似值^[6-8], 图中 $z = (\sigma_s^2 + \sigma_o^2) \cdot C_s$, σ_s 为聚光器系统中常用的太阳均方根宽度, $\sigma_s(\text{空间}) \approx 3.6 \text{ mrad}$, σ_o 与抛物面加工误差及太阳跟踪系统误差相关, C_s 为整个抛物面碟形聚光器的平均聚光比。根据目前抛物面加工精度、太阳自动跟踪系统精度及抛物面聚光器平均聚光比^[5], 可取 $z|_{\varphi=30^\circ} = 0.187, z|_{\varphi=40^\circ} = 0.24$ 。

1.4 抛物面聚光器数值计算实例

对上述结果以掺 Yb 双包层光纤激光器为例进行数值计算。设计算中所用的主要参数为: Yb 的吸收波长范围为 900nm ~ 1050nm, Yb 的分子浓度 $C_{Yb} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 吸收截面如图 4 所示, 光纤激光器内包层直

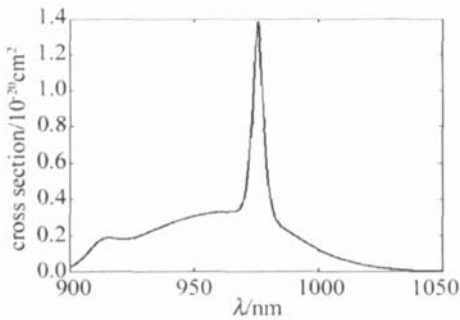


Fig 4 Absorption cross section of Yb ions

径 $d_i = 1 \text{ mm}$, 内包层数值孔径为 0.66, $\Gamma_p = 0.01$, 光纤长度 $L = 20 \text{ m}$ 。定义光纤激光器的太阳能吸收效率为

$$\eta, \eta = \frac{P_p}{0.88P_{\text{tot}}}$$

Table 1 Results of numerical calculation of concentrator

concentrator half angle $\varphi / (^\circ)$	concentrator diameter D / mm	absorption power P_p / W	absorption efficiency $\eta / \%$
30	128	0.33	2.25
40	175	0.65	2.35

由表 1 可以看出, Yb 掺杂光纤激光器对太阳能吸收效率是很低的, 原因之一是其吸收带位于太阳能较弱的波段, 如图 2 所示。由上述可知, 为了提高吸收效率 η , 可以选择: (1) 高数值孔径双包层光纤或者双包层光子晶体光纤; (2) 吸收谱比较宽, 且吸收带位于太阳能较强波段的稀土掺杂元素, 或者通过共掺杂其它元素以增加吸收谱宽, 如 Nd/Cr 共掺杂; (3) 通过措施减小太阳光传输过程中的损耗等。

2 光纤阵列和聚光器阵列

上述计算结果表明光纤吸收的太阳能是很小的。可以通过以下途径提高双包层光纤吸收的抽运太阳能: (1) 采用多模光纤阵列, 增加聚光器直径 D , 见图

5a (2) 采用聚光器阵列结构, 见图 5b。这两种方法都涉及将聚光器聚集的太阳光分别由多束多模光纤耦合到双包层光纤内包层, 光纤集束熔锥结构^[9]为实现多模光纤阵列和聚光器阵列提供了一种有效设计方案。

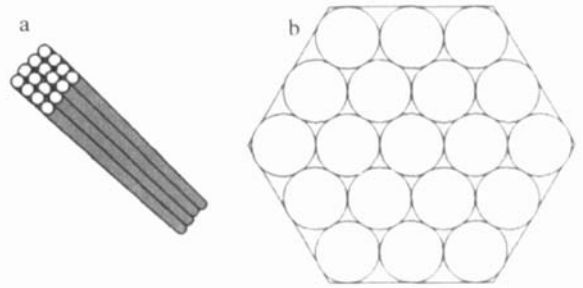


Fig 5 a—multimode fiber array b—concentrator array

光纤集束熔锥侧面耦合器由多束多模光纤和去掉外包层的双包层光纤缠绕在一起, 在高温火焰中加热使之熔化, 并在光纤两端拉制光纤, 使光纤熔融区形成锥形段, 这样就能够将聚光器聚集的太阳光分别由多束多模光纤通过双包层侧面导入内包层, 实现太阳能对光纤激光器的侧面抽运。有很多关于 $N \times 1$ 集束熔锥侧面耦合器的制作以及相关实验的报道^[10-11], 取得的实验结果证明了这种结构在多 LD 抽运双包层光纤激光器中的实用性。

3 结 论

介绍了一种结构简单、紧凑的抛物面碟形聚光器, 聚光器聚光比最大的中心焦斑区直径为 1.2mm。该聚光器可以实现太阳能直接抽运内包层直径为 1mm 的双包层光纤激光器。根据大气层外缘空间太阳光谱分布特点, 计算了在不同聚光器半角条件下光纤激光器吸收的太阳能抽运功率。同时, 提出了采用光纤集束熔锥侧面耦合器与多模光纤阵列或者聚光器阵列相结合的结构来提高光纤激光器的太阳能抽运功率的方法。

参 考 文 献

[1] LANDO M, KAGAN J, LNYEK N B *et al*. A solar-pumped Nd:YAG laser in the high collection efficiency regime [J]. *Opt Commun*, 2003, 222: 371~381.
 [2] SAKITA, UCHIDA S, MASAKI K. Solar-pumped Nd doped multimode fiber laser with a D-shaped large clad [A]. *Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion* [C]. Sendai AIP Conference Series, 2004: 378~389.
 [3] FEUERMAN D, GORDON JM. Solar surgery: remote fiber optic irradiation with highly concentrated sunlight in lieu of lasers [J]. *Opt Engng*, 1998, 37(10): 2760~2767.
 [4] THEKAKARA M P. Extraterrestrial solar spectrum, 3000~6100 Å at 1-Å intervals [J]. *Appl Opt*, 1974, 13(3): 518~522.
 [5] FEUERMAN D, GORDON JM, HULEHL M. Solar fiber-optic concentrators: first experimental results and field experience [J]. *Solar Energy*, 2002, 72(6): 459~472.

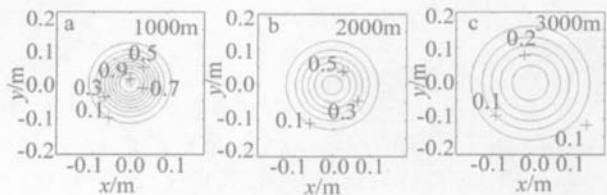


Fig 3 The distribution of light intensity and its iso line at different propagation distances

半径为 10cm 时, 不同传输距离截面上光强的分布情况。

由图 3 中光强及其等值线分布可得: 在 1000m, 2000m, 3000m 处光束中心的相对光强分别为: 91.62%, 65.20%, 27.98%, 束宽分别为: 10.55cm, 12.06cm, 14.23cm。由此可得: 无风稳态热晕效应存在时, 随着传输距离的增大, 相对峰值光强在迅速下降, 截面上的光束能量在向周围扩展, 束宽在逐渐加大, 这对强激光的远距离传输是极其不利的。

2.4 无风稳态热晕对远场光束能量分布的影响

热晕会对远场光束能量的分布产生影响, 在一定条件下, 远场能量分布将呈现“草帽型”分布, 即中心的光强小于周围的光强值。

图 4 中激光束腰斑半径一定 (取为 10cm), 激光的发射和接受装置间距离一定 (取为 3000m)。通过

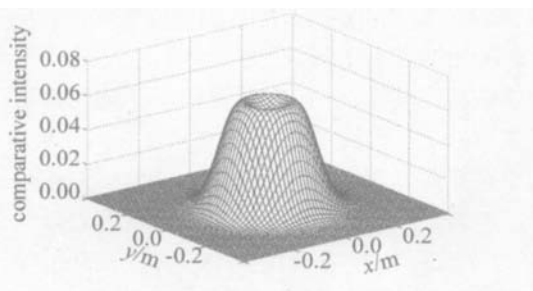


Fig 4 The straw hat shape distribution of light intensity at far field

模拟计算发现: 当发射功率一旦超过 3700W, 接受装置处光强分布将呈现草帽型分布。另外, 计算结果表明: 随着发射功率的增加, 截面上中心的相对光强将进一步降低。这对依靠强激光的热烧蚀效应破坏的激光武器来说是极为不利的。

3 结束语

详细探讨了无风时基模高斯光束的稳态热晕效应, 推导了一定传输距离处截面上光强分布, 通过数值计算, 研究了激光传输参数对稳态热晕效应的影响。研究表明: 无风稳态热晕效应存在时, 随着发射功率的增大, 截面上峰值功率密度会先增大后减小; 随着基模高斯光束腰斑半径的增大, 截面上峰值光强在逐渐增大; 随着传输距离的增大, 截面上峰值光强在逐渐减小, 能量在随着束宽的增大在逐渐向周围扩展。在一定传输距离和一定的腰斑半径条件下, 若发射功率超过某特定值, 截面上的光强分布会呈现中心光强小于周围光强的“草帽型”分布。

参 考 文 献

- [1] SU Y, WANG M. High energy laser system [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2004, 143~144 (in Chinese).
- [2] GEBHARDT F G. Twenty-five years of thermal blooming: an overview [J]. SPE, 1990, 1221: 2~25.
- [3] WANG M, SU Y. Computation and analysis on focus shift of laser caused by atmospheric thermal blooming [J]. Calculation Physics, 2002, 19(5): 449~452 (in Chinese).
- [4] ZHENG Zh LU Y X, LÜ B D. Propagation properties of Hermite-Laguerre-Gaussian beam [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 641~644 (in Chinese).
- [5] QIANG X W. Analytical investigation on nonlinear thermal distortion effect of laser beams propagation in the atmosphere [J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(6): 6~10 (in Chinese).
- [6] LIU J, LIU Sh F, JIN G. Thermal effects on laser propagating in a closed tube with air [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2004, 15(1): 100~103 (in Chinese).
- [7] LI Zh G, WANG Sh B, GUO D H *et al*. Experimental study of guiding and triggering of air discharges by laser induced plasma [J]. Laser Technology, 1999, 23(6): 332~334 (in Chinese).
- [8] TAO X Y, JI X L, LÜ B D. Numerical simulation of the thermal effect in a beam control system [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 514~516, 596 (in Chinese).
- [9] GE Z M, LÜ Zh W, LIN D Y. The research and development of the stimulated Brillouin scattering in the optical component [J]. Laser Technology, 2002, 26(5): 375~378 (in Chinese).
- [10] LÜ B D. Propagation and control of high power lasers [M]. Beijing National Defence Industry Press, 1999, 254~259 (in Chinese).

(上接第 181 页)

- [6] RABL A. Active solar collectors and their applications [M]. New York: Oxford University Press, 1985, 196.
- [7] BENDT P, RABL A. Optical analysis of point focus parabolic radiation concentrators [J]. Appl Opt, 1981, 20(4): 674~683.
- [8] RABL A. Comparison of solar concentrators [J]. Solar Energy, 1976, 18(2): 93~111.
- [9] DONG S F, CHENG G H, YANG L Z. Studies on the pump coupling

and laser feedback in double cladding fiber lasers [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 523~525 (in Chinese).

- [10] HEADLEY C, FISHTAY M, YABLON A D. Tapered fiber bundles for combining laser pumps [J]. Proc SPIE, 2005, 5709: 263~272.
- [11] ZHANG SM, WANG J, DONG F J. Cladding pumped erbium-ytterbium Co-doped double clad fiber ring laser operating in L-band [J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(5): 656~658 (in Chinese).