

文章编号: 1001-3806(2017)03-0416-05

大功率半导体激光器光束整形的设计和实现

吴政南, 谢江容, 杨雁南*

(南京航空航天大学 应用物理系, 南京 211100)

摘要: 为了使线阵半导体激光器光束能更好应用于激光远程无线电力传输, 设计了基于光楔-曲面镜-棱镜组的线阵半导体激光束整形系统, 采用数值计算方法, 取得了系统中各元件的参量及理论整形效果。在此基础上加工出实物元件, 搭建整形系统。实验中测得整形后的激光光斑尺寸为 $9.9\text{cm} \times 9.6\text{cm}$, 能量均匀度为 68.9%, 系统能量传输效率为 71.3%, 光束质量可满足接收端的光电池对激光空间均匀性的要求。最后分析了仿真系统与实验系统间产生差异的原因。结果表明, 该系统可同时实现激光束阵列快轴和慢轴方向的扩束与准直, 并能够调节输出光斑的形状及光强均匀度, 且采用光学元件数量较少。光电池组件是激光无线电力传输过程的关键元件, 该设计对激光转换效率的研究有较重要的实用价值。

关键词: 光学设计; 光束整形; 线阵半导体激光器; 光楔-棱镜-曲面镜组

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.03.022

Design and implementation of beam shaping for high power semiconductor lasers

WU Zhengnan, XIE Jiangrong, YANG Yannan

(Department of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, China)

Abstract: In order to make the laser beam of linear-array semiconductor laser be better used in laser remote wireless power transmission, a linear-array semiconductor laser beam shaping system based on the set of optical wedges, curved mirrors and prisms was designed. The parameters of components in the system and the theoretical shaping results were derived by numerical calculation. After then the realistic components were processed and the experimental shaping system was built. The experimental results were that the laser spot size after shaping was $9.9\text{cm} \times 9.6\text{cm}$, energy uniformity was 68.9%, and energy transfer efficiency was 71.3%. The beam quality could meet the requirement of light cell at receiving end for laser space uniformity. The reason of the difference between the simulated and experimental system was analyzed. The results show that the system can simultaneously realize the expanding and collimation of laser beam array along fast axis and slow axis. The system can also adjust the shape and the uniformity of output light spot with less optical components. Light cell components are the key processes of laser wireless power transmission. The study has great practical value for laser conversion efficiency.

Key words: optical design; beam shaping; linear array semiconductor laser; set of optical wedge-prism-curved surface lens

引言

基于激光为能量传送载体的激光无线电力传输技术是近十几年来发展起来的一项高新技术。激光具有单色性好、方向性好、能量集中的特点, 可将光能远距离传输到配备有光电转换器件(光电池)的用电负载上, 为其实时提供充足的电能。该技术有望在微型飞行器、卫星、空间探测器等移动负载的“空中加电”技术中得到应用^[1-4]。

考虑到激光器电光能量转换的高效利用以及激光波长与光电池最佳转换波长的匹配, 目前采用较多的是输出波长为 808nm 的大功率半导体线阵或面阵激光器, 这种激光器的优点是价格低、电光转换效率高、输出功率大、激光波长与砷化镓、硅基等半导体光电池的最佳转换波长匹配好。但其输出光束发散角大、光强均匀性差, 不能直接应用于远程能量传输, 需要对输出光束进行整形处理^[5-6]。目前, 对半导体激光束整形的方式主要有: 光纤与波导管整形^[7-9]、微透镜阵列整形^[10-13]、多曲面透镜组整形^[14-16]等。其中波导管整形价格便宜、组装方便, 但装置体积较大、光学器件过多; 微透镜阵列整形结构较为简单, 但对激光束的能量耗散较大; 多曲面透镜组结构简单, 能量透过率也较为理想, 但制作价格高。

鉴于激光无线电力传输需要光斑面积较大、均匀

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377080; 51577091)

作者简介: 吴政南(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangyn@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2016-03-31; 收到修改稿日期: 2016-06-27

度好、方向性好的光束,通过对实验室现有线阵半导体激光器参量的分析,选用光楔-曲面镜-棱镜组的方式对其进行光束整形。首先利用矩阵光学理论,计算出各器件的参量,再利用 ZWMAX 软件对整个系统进行优化,然后模拟计算出系统的整形效果,从理论上证明该系统对光束整形的可行性。在此基础上,将整个仿真系统制作了相应的光学元件并进行了实验测量,虽然实验结果与理论计算存在一定差异,但总体说来对光束的均匀性、方向性整形效果较好,可保证接收端的光电池具有较高转换效率。最后,对仿真系统与实验系统之间的整形效果差异进行了分析。该系统可为激光远程充电过程中光电池组件对激光转换效率的基础研究提供性能良好的能量传输平台。

1 整形系统理论分析与计算

1.1 激光器的性能参量与光束整形目标

需要整形的是德国 DILAS 公司生产的 LDM-3V-75A-BDS 型半导体激光器。该激光器拥有 16 个发光单元,距光源 1m 处光束的光强分布如图 1 所示。各发光单元间在慢轴(水平)方向上存在与发光单元宽度相当的无光区,且各单元光束互不平行,相邻两发光单元中心轴线间的夹角为 19.2mrad,每一发光单元的中心轴线相对光轴方向的张角依次分别为 $\pm 9.6\text{mrad}$, $\pm 28.8\text{mrad}$, $\pm 48.0\text{mrad}$, $\pm 67.2\text{mrad}$, $\pm 86.4\text{mrad}$, $\pm 105.6\text{mrad}$, $\pm 124.8\text{mrad}$, $\pm 144.0\text{mrad}$ 。各发光单元在快轴(竖直方向)和慢轴(水平方向)的发散角分别为 38.4mrad 和 4.6mrad,像散为 C.10537cm。



Fig. 1 Transmitting beam of LDM-3V-75A-BDS semiconductor laser at 1m

按照几何光学理论,光强均匀度 μ 定义为:

$$\mu = \frac{I_u - (I_{\max} - I_{\min})}{I_u} \quad (1)$$

式中, I_{\max} 为表面最强辐射照度, I_{\min} 为表面最弱辐射照度, I_u 为表面平均辐射照度。为了使此激光器能够用于无线电力传输,需要对其方向性、均匀性和光斑大小进行整形,具体目标为:激光斑在远场(约 2m)形状是边长为 10cm 的方形,光束发散角控制在 10mrad 内,均匀度不低于 60%,整形系统对光强的损失尽量小。为此要对各发光单元光束分别进行慢轴方向的平行化,实现混束效果,再分别进行快慢轴方向的扩束准直,得到矩形光斑,最后对矩形光斑进行均匀化处理,以得到符合要求的矩形光斑。

1.2 整形系统结构设计

由于需要整形的半导体激光器直接输出的激光为 16 条分离光束,且各光束间互不平行,为此首先采用了 16 个顶角不同的光楔对每束光的传播方向进行调节,使其中心轴线全部平行于光轴方向。调节原理如图 2 所示。设光楔顶角为 α ,当激光束以角度 i 入射到光楔表面时,根据折射定律,可知其出射角 β 与 α 的关系为:

$$\alpha = \frac{\beta}{n - 1} \quad (2)$$

式中, α 为光楔的顶角, β 为光束经过光楔后传播方向变化的角度, n 为玻璃的折射率。选择适当的光楔顶角 α ,可使出射光束沿水平方向,同时,由于各激光束在水平方向均为发散的,故当达到某个距离后各发光单元间的无光区会消失。所以,当光楔放置在特定位置上时,可以将 16 个发光单元发出的光束调整为沿一束光轴方向的平行光。

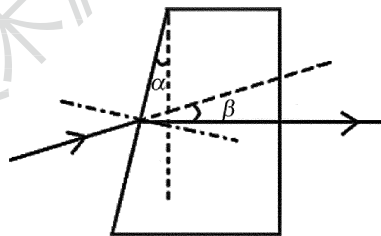


Fig. 2 Effect of optical wedge on the direction of optical transmission

在此基础上,对光束慢轴方向进行准直,并且将光束的截面光斑整形。对于低功率半导体激光器,由于其发光单元的填充因子小于 0.3,慢轴发散角较小,直接利用在快轴准直透镜后叠加慢轴方向微柱透镜的方式进行光束准直即可。但对于要整形的半导体线阵激光器,为了获得高输出功率,其发光单元的宽度明显增大,填充因子达到 0.5^[17]。这就意味着入射光束在慢轴方向上的总发散角远比低功率激光器大得多,此时再使用微透镜整形方式将面临许多技术上的困难,为此选择柱透镜对其慢轴进行准直。再考虑到对光斑截面大小及形状的要求,光束也需要扩束。综合考虑,选用了倒置的伽利略望远镜系统^[18]。该系统由一个平凹透镜和一个平凸透镜按光学间隔 $\Delta = 0$ 的方式组合而成。

垂轴放大率 M 为:

$$M = -\frac{f_2}{f_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (3)$$

式中, f_2 为平凸透镜的焦距, f_1 为平凹透镜的焦距, D_2 为出瞳直径, D_1 为入瞳直径。扩束倍数与两柱透镜的焦距比有关。

而经慢轴准直后,光束在慢轴方向上的发散角可以

认为只由平凸透镜的焦距 f_2 和平凹透镜的焦距 f_1 决定。故可以通过合理选择两个柱透镜的焦距,使光束的截面光斑形状为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的方形,并且将光束的慢轴发散角准直到实验需求的范围内。

经过上述整形后,激光器发出的 16 条光束被整形成为一条光束,且截面光斑形状为 $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ 的方形,慢轴发散角也已符合要求。但均匀度较差,且快轴方向的发散角不符合要求,因此还要对光束进行均匀化和压缩快轴发散角的整形。常用的快轴准直方式分为宏观透镜准直法和微透镜准直法。而关于光束能量均匀化,描述激光束能量均匀度 γ 的公式为:

$$\gamma = 1 - \frac{\sum_i^m E_i - \bar{E}}{m \bar{E}} \quad (4)$$

式中, E_i 为采样点数值, \bar{E} 为采样平均值, m 为采样点个数。由于经过上述整形后的光斑整体强度呈带状分布,且每个带宽内部不同位置的光强也有差别。所以要得到均匀度好的光斑,不仅要矩形光斑整体上进行均匀化处理,还要对每个发光单元发出的光束进行再均匀化。对这种形式的光斑,难以采用传统柱透镜均匀化的方法^[19]。综合考虑,本系统中采用了平凸棱镜组对光斑进行均匀化,并对快轴进行准直。当入射光经过平凸棱镜组时,由于棱镜单元的光学作用形成彼此独立传播的光通道,每束光通道内光能量的均匀度会优于入射光,经过棱镜后,光通道内的能量叠加于光屏的同一区域,叠加后重新生成的光斑,其能量均匀度会远高于初始入射光斑。最终截面光斑的均匀度与棱镜曲面的弧度值 θ 、光束入射到棱镜的位置、角度等情况相关;而当光束通过平凸棱镜后,快轴方向的发散角也会被准直。最终快轴方向的发散角可以认为只与激光器本身的性能参量,即棱镜距离光源的位置 d 以及棱镜曲面的弧度值 θ 有关。因此不仅棱镜对应面的弧度、棱镜与光源的距离必须合适,还要保证每个棱镜的宽度正好等同于对应发光单元发出的光束在此位置处的宽度,长度略大于光束在此位置处的长度,且每个棱镜中心轴线必须对准相应发光单元的中心轴线位置,使每个发光单元发出的光束刚好完全透过棱镜,才能达到预期的整形效果。

1.3 系统的 ZEMAX 仿真及优化

确定了整形系统的光学结构后,接下来再对其进行数值仿真及优化。首先在 ZEMAX 中模拟出 16 个发光单元的发光情况。在非序列模式下,可以利用多个位于同一平面、彼此平行、间距相等的二极管光源来模拟,效果如图 3 所示。在离输出端 500mm 处光强分布,模拟激光束与实际激光束数据基本一致。

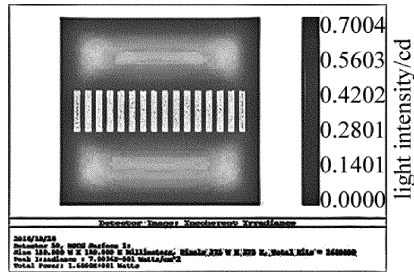


Fig. 3 Laser source simulated by ZEMAX

然后在 ZEMAX 中输入光楔-棱镜-曲面镜组整形系统的参量,由于激光器发出的光束线阵具有对称性,故设计出 8 对对称的光楔即可。光楔的玻璃材质均选用常见的 BK7 玻璃,类型选择为多边形物镜。各项参量见表 1。

Table 1 Parameters of optical wedge

wedge	length/mm	height/mm	thickness/mm	deflection angle $\alpha/^\circ$	wedge angle $\beta/^\circ$
1	150	9.38	12.68	8.25	15.99
2	150	9.38	12.31	7.15	13.86
3	150	9.38	11.94	6.05	11.72
4	150	9.38	11.58	4.95	9.59
5	150	9.38	11.23	3.85	7.46
6	150	9.38	10.87	2.75	5.33
7	150	9.38	10.52	1.65	3.20
8	150	9.38	10.17	0.55	1.07

平凹、平凸透镜以及棱镜组(棱镜组中每个棱镜的参量均相同)的玻璃材质也选择 BK7 玻璃,类型均选择为环形透镜。各项参量见表 2。

Table 2 Parameters of flat concave lens, flat convex lens and prism lens

flat concave lens	length/mm	height/mm	central thickness/mm	edge thickness/mm	first radius/mm	second radius/mm
	160	50	5	10	66	infimum
flat concave lens	length/mm	height/mm	central thickness/mm	edge thickness/mm	first radius/mm	second radius/mm
	160	160	20	3	infimum	197
prism lens	length/mm	height/mm	thickness/mm	first radius/mm	second radius/mm	
	160	9.5	5	545	infimum	

整形系统的整体仿真结构如图 4 所示。

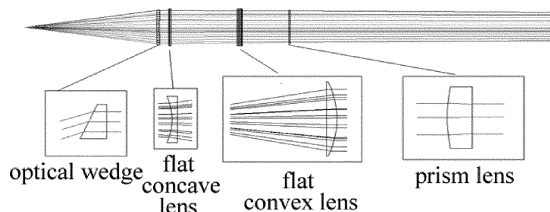


Fig. 4 Schematic diagram of simulation structure of shaping system

为了在保证输出光斑形状、均匀性的前提下,最大限度地提升激光传输系统的能量传输效率,还需要对系统进行整体性能优化。先在 ZEMAX 序列模式里调用 afocal image space 函数,用以优化子午面和弧矢面内的波像差及光线高度,以保证输出光斑为 10cm × 10cm 的方形;然后在 ZEMAX 非序列模式里调用 NSDD 与 NSTR 函数,以优化光斑均匀度及系统整体传输效率,以保证系统在输出光束符合要求的前提下,拥有最大的能量传输效率。

优化后,出射光斑具体状况如图 5 所示。光斑形状为边长 10cm 的正方形,光束发散角为 6mrad,光强均匀度达到了 82%,系统的整体能量传输效率为 86%。即使在远场范围(2m 附近)匀光效果仍较好,在 1.5m ~ 4m 范围内光斑大小也基本没有变化。ZEMAX 仿真结果表明,该系统可达到预期的整形目标。

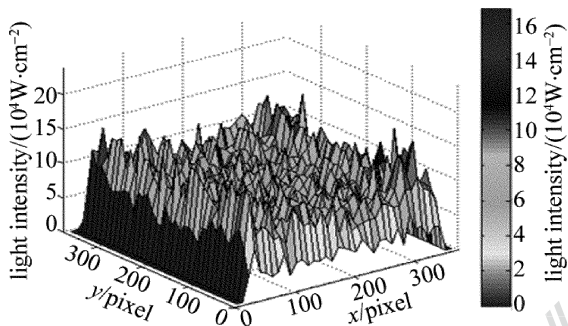


Fig. 5 Intensity distribution of shaping beam

2 半导体激光阵列光束整形系统的实现

在经过理论分析和数值计算证明了光楔-棱镜-曲面镜系统对线阵半导体激光束的整形效果后,根据优化所得各整形组件的参量加工制作了实物系统。并对整形效果进行了实验测量,同时也对仿真计算与实验测量整形效果的差异进行了分析。

2.1 实际光斑的获得与性能测量

将加工好的光楔、曲面镜及棱镜组的各元件按图 6 摆放在光路中的给定位置,其中光源与光楔、平凹透镜、平凸透镜、棱镜组之间的距离分别为 0.5m, 0.55m, 0.805m 和 1m,观察屏放置在离光源 2m 处的远场位置。

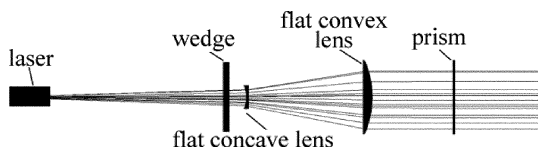


Fig. 6 Model of beam shaping system

最终搭建好的光路如图 7 所示。开启激光器,反复微调整形元件的位置,直到屏上达到较为理想的整形光斑。此时,距发射器 2m 处的光斑轮廓照片如



Fig. 7 Picture of experimental device

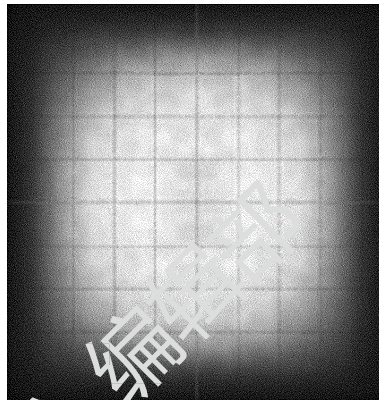


Fig. 8 Facula at 2m

图 8 所示。

为了测得 2m 处光斑的功率分布,实验中首先将激光器的输出功率调节最小值附近(约为 2W),并在光路中放置光强衰减片以防止探测器饱和;然后将硅光电二极管探测器(进光孔直径 2mm)放置在 2 维调节架上,沿通过光斑中心的水平、竖直两个方向的十字线上每隔 2mm 测量一组数据;最后利用所测得的数据进行拟合计算,得到光斑总功率和光强均匀度。最终得到整形后光束的参量为:光斑形状为 9.9cm × 9.6cm 的矩形;光束快轴(竖直方向)和慢轴(水平方向)的发散角基本相同,均约为 7.1mrad;当激光器输出功率为 30W 时,光屏表面激光功率为 24.39W,系统整体的能量传输效率为 68.9%,小于理论传输效率 86%;光强均匀度为 71.3%,也小于理论均匀度 82%。

2.2 实际数据与理论数据误差分析

从测量的结果可以看出,实际整形系统对光束的整形效果无论是均匀度还是传输效率都与理论上的数值模拟结果存在一定差距。造成这些差距的原因主要有以下两点:(1)在实际制作各光学元件过程中,由于制作技术精度有限,实际元件的光学表面和理论相比总存在一定误差;激光线阵发出的光束由于 smile 效应,会发生一定程度的弯曲,导致部分能量外泄;光学元件不可能做到完全透射,表面对光有反射损失等,这些都会导致实验结果小于理论数值;(2)在实验过程中,各光学元件位置的调节不可能都做到最佳,在实验中发现,由于元件数量相对较多,调节过程中一些元件相互影响,例如光楔的数量达到了 16 个,实际操作中

就很难做到每一个光楔都能严格将每个发光单元发出光束的中心轴线整理到光轴方向;不同元件之间的位置很难做到完全精确,导致光斑形状有所变形等。

3 结论

针对 LDM-3V-75A-BDS 半导体激光器输出的线阵激光束,设计出了一套基于光楔-棱镜-曲面镜组的光束整形系统。先通过 ZEMAX 进行仿真,并通过设计相应的优化函数,得到了系统的传输效率和光斑均匀性最优时的参量。

在此基础上,制作了实物整形系统,并对整形效果进行了实验测量,结果表明,系统的整体能量传输效率为 71.3%,光强均匀度为 68.9%,小于理论计算得到的结果。通过分析比较,找出了造成实际数据逊于仿真数据的原因。与传统的整形方式相比,该整形系统结构简单、能量传输效率较高、对半导体激光器本身没有特殊要求、相应的光学元件便于制作。经过实验验证,整形后的光束可满足激光远程能量传输的要求。

参考文献

- [1] BLACKWELL T. Recent demonstration of laser power beaming at DFRC and MSFC[C]//AIP Conference Proceeding Beamed Energy Propulsion. New York, USA: American Institute of Physics, 2005: 73-85.
- [2] GEORGE T, TOBIAS K, BEN S. High power semiconductor laser cheer the United State light beam transmission competitions[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(10):64-66(in Chinese).
- [3] HOFFMAN J M. To infinity and beyond! —How to get fuel to future interplanetary vehicles; beam it up to them with lasers[J]. Machine Design, 2007, 79(5): 78-88.
- [4] LIU X G, HUA W Sh, LIU X. Experimental investigations of laser intensity and temperature dependence of single crystal silicon photovoltaic cell parameters[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(8): 0802011(in Chinese).
- [5] YIN Zh Y, WANG Y F, JIA W W, et al. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(7): 29-35(in Chinese).
- [6] YANG P, YANG Y N. The research of monocrystalline silicon solar cells efficiency under laser[J]. Laser Technology, 2012, 36(5): 696-699(in Chinese).
- [7] BERGER J, WELCH D F, STREIFER W, et al. Fiber-bundle coupled, diode end-pumped Nd:YAG laser [J]. Optical Letters, 1988, 13(4): 306-308.
- [8] QIAO L, YANG Y N. The experimental research of laser wireless power transmission efficiency[J]. Laser Technology, 2014, 38(5): 590-594(in Chinese).
- [9] LIU L, GUO Sh F, LU Q Sh, et al. Study of thermal distortion in composite slab amplifiers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(7): 1678-1682(in Chinese).
- [10] GAO Q H. Research on high power semiconductor laser beam shaping [D]. Xi'an: Xidian University, 2005: 25-34(in Chinese).
- [11] DU K, BAUMANN M, EHLERS B. Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode-laser bars [C]// Advanced Solid State Lasers. Miami, USA: Fiber-Optic Components, 1997: 390-393.
- [12] XING Sh Sh, RAN Y H, JIANG H B, et al. Illumination mode conversion system based on micromirror array in lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(11): 94-103(in Chinese).
- [13] LEI Ch Q, WANG Y F, YIN Zh Y, et al. Homogenization system for diode laser stack beams based on microlens array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(5): 0502009(in Chinese).
- [14] CLARKSON W A, HANNA D C. Two-mirror beam-shaping technique for high-power diode bars [J]. Optical Letters, 1996, 21(6): 375-377.
- [15] DENG X, LIANG X, CHEN Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array [J]. Applied Optics, 1986, 25(3): 377-381.
- [16] LI Z, LI W, LÜ H, et al. A novel method for respiration-like clutter cancellation in life detection by dual-frequency IR-UWB radar [J]. Microwave Theory and Techniques, 2013, 61(5): 2086-2092.
- [17] WANG Y F, LEI Ch Q, YIN Zh Y, et al. Collimation of high fill factor diode laser slow axis beam [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061402(in Chinese).
- [18] WANG Zh X, PAN Y M, YIN Sh Y, et al. Laser processing lens of long focal depth and high resolution[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 191-195(in Chinese).
- [19] DICKEY F M, HOLSWADE S C. Laser beam shaping: theory and technology [M]. New York, USA: Marcel Dekker Press, 2000: 273-283.