

文章编号: 1001-3806(2006)04-0370-03

## 用于半导体激光器的棱镜组光束整形方法

潘圆圆, 崔瑞祯, 陈刚, 巩马理\*, 黄磊

(清华大学精密仪器与机械学系光子与电子技术研究中心摩擦学国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 随着半导体激光器应用的日益广泛, 半导体激光的光束质量在二维方向极不均衡的特点限制了它的应用范围。采用一种等腰直角棱镜组的整形方法, 可实现二维方向的光束质量均匀化。实验中整形后快慢轴的光束质量比较接近, 整形效率达到 90%。经过整形的半导体激光器可以作为高功率固体激光器和光纤激光器的抽运源使用。

关键词: 激光器; 光束整形; 光束质量; 等腰直角棱镜组; 半导体激光器条

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

### Beam-shaping technique for laser diode bars with prism group

PAN Yuan-yuan, CUI Rui-zhen, CHEN Gang, GONG Ma-li, HUANG Lei

(The State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** With the ever increasing needs of high power diode laser source, it is important to obtain symmetric diode laser beam with high power so that a kind of beam-shaping technique with isosceles right-angled prism group has been used to achieve this aim. The experiment presents that the beam-quality is nearly equal for both the fast and slow axes and the reshaping efficiency is up to 90%. Diode lasers with improved beam-quality can be applied as the pumping source in many high-power solid lasers and fiber lasers.

**Key words** lasers; beam-shaping; beam-quality; isosceles right-angle prism group; laser diode bar

## 引 言

半导体激光器 (laser diode, LD) 以其电光转换效率高、体积小、带宽窄、可靠性高等优点, 在光纤通讯、固体激光器等领域等方面有广泛的应用。但是, LD 在两个方向上光束质量极不均衡的特性限制了其使用范围, 所以需要光束进行准直、整形和聚焦处理。目前国内外学者对此都进行了很多研究, 也有很多不同的整形方案, 例如德国夫朗和费激光技术所提出的阶梯反射镜法<sup>[1]</sup>, 瑞士伯尔尼大学的光纤整形<sup>[2]</sup>, 英国 Southampton 大学的双面镜整形<sup>[3]</sup>, 日本钢铁公司的多棱镜阵列整形<sup>[4]</sup>, 美国 Apoll Instruments 公司的棱镜组内反射整形<sup>[5]</sup>, 美国 Boston Laser 公司的渐变折射率透镜阵列整形<sup>[6]</sup>, 以及上海光学精密机械研究所的微片棱镜堆整形<sup>[7]</sup>等。

作者根据高功率半导体激光器光束的特点, 采用一种等腰直角棱镜组的整形方案, 将光束整形为二维方向光束质量均衡的激光光束。不仅可广泛地应用于半导体激光器端抽运固体激光器和光纤激光器中, 还可

直接作为激光源使用。与已有的技术相比, 本整形器具有原理简单、加工镀膜方便、整形效率较高等优点。

## 1 整形原理

### 1.1 半导体激光器条二维方向光束质量的不均衡性

单个 LD 发光面通常为  $1\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ , 输出光束的形状呈椭圆光锥。通常使用中由 19 个发光面组成 1 个阵列, 每两个发光面间距  $500\mu\text{m}$ , 就构成如图 1 的

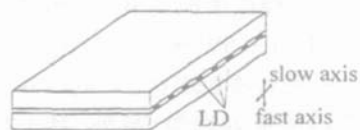


Fig 1 Laser diode bar

LD 条。LD 条在快轴方向上光束发散角约为  $30^\circ \sim 40^\circ$ , 在慢轴方向上光束发散角约为  $8^\circ \sim 10^\circ$ 。结构及特性参数决定了其快、慢轴方向上的光束质量非常不均衡, 用光束参数乘积  $P$  来衡量光束质量的好坏。  $P = w \times \theta$  其中,  $w$  是光束光腰半径;  $\theta$  是光束远场发散半角。则快轴方向  $P_f$  约为  $0.1745\text{mm} \times \text{m rad}$ , 慢轴方向  $P_s$  约为  $436\text{mm} \times \text{m rad}$ , 慢轴光束质量远差于快轴。

### 1.2 线性光束整形技术

LD 条的光束质量在快慢轴方向上相差很大导致整体光束质量差, 功率密度低, 严重限制了其应用范

作者简介: 潘圆圆 (1981-), 女, 硕士研究生, 从事高功率半导体激光器抽运方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: gongm@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2005-06-27; 收到修改稿日期: 2005-08-16

围。然而这样的光源经过普通的光学成像系统无法改变快慢轴光束质量的差异<sup>[8]</sup>。

为了获得二维方向均衡的光束质量,通常都是将光束先分割,再重排,原理见图 2。先把线形光束 1 在



Fig 2 The beam-shaping principle

慢轴方向上分割成相互有一定位移的多个光束段 2,将分割后的光束段 2 通过空间不同方向的位移,使光束段 2 在快轴方向平行排列成光束组 3。

设在慢轴方向上分割的段数为  $N$ ,由于慢轴方向的光腰半径变为原来的  $1/N$ ,慢轴方向新的  $P$  值减小为原来的  $1/N$ 。同时,快轴方向的新的光腰半径为原快轴光腰半径的  $N$  倍与光束段间的总间隔之和,所以快轴新的  $P$  值增大到原来的  $N$  倍以上。定义  $1:N$  为整形比,这样通过整形比为  $1:N$  的整形系统,快慢轴的  $P$  值接近,实现光束二维方向的光束质量均衡。

基于这样的整形原理,采用了下面这样一种光束整形方案,此方案采用两套错位紧密排列的等腰直角棱镜组组合构成,其整形光路如图 3 所示。入射光为

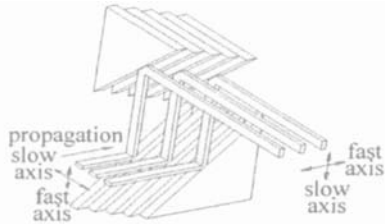


Fig 3 The beam-shaping sketch with isosceles right angle prism group

快轴准直后的线光束,在一套错位排开的棱镜组表面发生反射,线光束在慢轴方向上被分割成多个小段线光束,每一小段线光束在另一套错位排开的棱镜组表面再次发生反射,形成沿快轴方向的排列的线光束组。整形后的光束在提高慢轴光束质量的同时降低快轴的光束质量,实现二维光束的均衡。

整形方案的整形效果可以用光束质量的不对称度来衡量,即慢轴  $P_s$  值与快轴  $P_f$  值之比,该比值越接近 1,整形效果越好。该整形方案的整形效果由处于下组的单片棱镜的厚度决定。由于慢轴方向的光腰半径确定,厚度越小,棱镜组中的棱镜个数越多,分割的段数越多,快轴与慢轴方向的整形比也越大。考虑到加工水平的因素,棱镜的厚度不能过小,从而限制了整形比。但是由于单个棱镜的结构简单,棱镜的厚度可以做到 0.5mm,整形比可以达到 1:20,这样的整形比通常可以满足大部分应用的需要。

这种阶梯式反射的整形方法首先由德国夫朗和费激光技术所提出<sup>[1]</sup>,目前国际上也有很多采用类似这种阶梯式反射结构进行整形的结构<sup>[9,10]</sup>,通常采用的

是在一个整体的金属或者玻璃上加工出各个反射面的方法。而由于国内的加工水平的限制,作者采用加工出单个等腰直角棱镜,再将其错位粘合起来的方法,从而大大降低了加工的难度。

## 2 线性光束整形模拟仿真

为了验证方案的合理及高效性,作者对此整形方案进行系统的计算机仿真模拟。

由于快轴发散角太大,为了利于光束整形处理,首先要对快轴准直,快轴准直一般采用在 LD 条前沿着慢轴方向横放柱透镜准直。系统由 LD 条、快轴准直透镜和整形系统构成。根据前面整形的设计思想,结合国内光学棱镜加工工艺水平和生产价格,仿真中棱镜片的厚度设计为 1mm,并且根据实际情况,每片棱镜的 45°斜面镀有对 808nm  $\pm 5$ nm 光波长的 99.5% 的反射膜。其它仿真中的参数设置及整形结果参见表 1,整

Table 1 The simulation results

	beam width/mm	divergence/(°)	beam quality/(mm × mrad)
LD bar	fast axis	0.001	0.1745
	slow axis	10	436
	$P_s/P_f$		2499
fast axis collimation	fast axis	0.5	2.2
	slow axis	10	436
	$P_s/P_f$		198
beam-shaping 1:10	fast axis	10	43.6
	slow axis	1	43.6
	$P_s/P_f$		1

形后光束的分布图可参见图 4。另外,定义整形效率为整形后的输出光功率与整形前的输出光功率之比,则该模拟系统中的整形效率经计算为 97.7%。

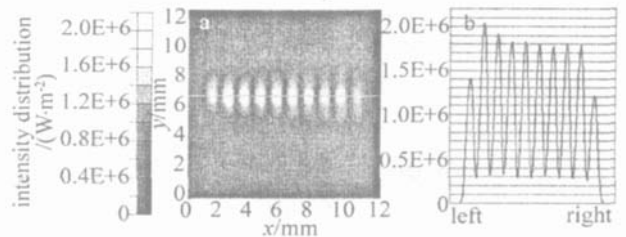


Fig 4 An image of the reshaped beam

a— the distribution of intensity b— the curve of the intensity along the axis (fast axis)

从以上结果可以看出,经过整形系统,LD 条光束在快轴和慢轴方向上的光束质量基本相同,达到了光束质量均衡的整形目的,同时整形效率也非常高。

## 3 线性光束整形实验

### 3.1 实验装置及实验结果

根据光束整形的原理及仿真结果搭建实验平台进

行验证,并对整形效果及效率进行测量。

实验中采用海特光电有限公司生产的型号为LDAC1-0808-040W的半导体激光器条。该型号的LD条输出808nm的激光,在52A的驱动电流下输出光功率40W,其快慢轴的发散角分别为40°和10°,发光区尺寸分别为0.001mm×10mm。

由于快轴发散角较大,采用圆柱透镜对快轴发散角进行准直,并且在慢轴方向上没有影响。快轴准直后的快轴光腰半径变为0.5mm,发散角约为1°。经测量准直后系统在52A驱动电流下输出光功率为38.2W。

根据仿真中的设计结果,实际加工出的棱镜片的厚度为1mm。加工出的单个棱镜参见图5,其中每片棱镜的45°斜面同样镀有对808nm±5nm光波长的99.5%的全反射膜。图5右侧为胶合好的一个棱镜组,由10片棱镜组成,相邻棱镜之间错位1mm,两个棱镜组合成整形比为1:10的整形系统。实验中测量出整形后的输出光功率为34.39W,拍摄到的整形系统后光束的光强分布见图6。

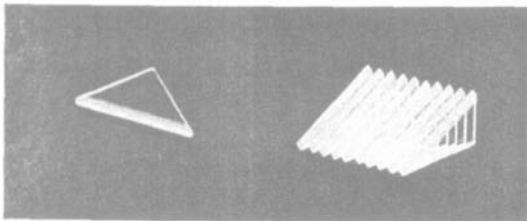


Fig 5 An isosceles right-angled prism and a group of prisms

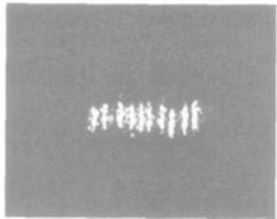


Fig 6 The intensity distribution of the reshaped beam in the experiment

### 3.2 实验结果分析

整形后慢轴的光腰半径变为原来的1/10,即1mm,而快轴的光腰半径变为原快轴光腰半径的10倍与光束段间的总间隔之和,即9.5mm。测量得到通过整形系统后快慢轴的发散角约为1.5°和10.5°。快慢轴光束质量计算如下:

$$P_f = w_f \times \theta_f = \frac{9.5\text{mm}}{2} \times \frac{1.5^\circ/180^\circ \times 3141.59\text{rad}}{2} \approx$$

$$60\text{mm} \times \text{mrad} \quad P_s = w_s \times \theta_s = \frac{1\text{mm}}{2} \times \frac{10.5^\circ/180^\circ \times 3141.59\text{rad}}{2} \approx 46\text{mm} \times \text{mrad} \quad \text{不对称度}$$

$$P_s/P_f = 46/60 \approx 0.77$$

由于棱镜有一定的加工误差,例如等腰直角棱镜45°角的角度误差,棱镜光学反射面与侧面垂直度的误

差等。这些误差导致快慢轴的发散角较整形前有所增加,快慢轴各增加了0.5°左右。而由于快轴整形前的发散角本身较小,为慢轴的1/10从而引入0.5°的误差导致快轴 $P_f$ 值增加的比慢轴多,所以造成实验结果与仿真结果存在差异。

解决此问题可以有两个途径。一是提高加工精度,减小引入的角度误差。二是改变快轴准直系统,使快轴准直后的发散角减小,而光腰半径可以适当增大,例如准直之后的快轴发散角变为0.6°,光腰半径为0.7mm,仍可以应用于实验中的整形系统,整形后快轴的光腰半径变为0.7mm,发散角同样引入0.5°的角度误差即1.1°,此时快轴的 $P_f$ 值代入公式计算得46.2mm×mrad,不对称度为1。

另外,根据前面的整形效率定义,该整形系统的整形效率为90%(34.39W/38.21W)。由于个别棱镜光学反射面边缘存在微小崩裂而造成对激光的散射,粘合时棱镜间的胶层对光的部分吸收,以及装调误差的影响,整形效率比模拟值略低。若对这几方面进行一些改进,整形效率还可以进一步提高。

### 4 结束语

在对半导体激光器条的发射光束进行快轴准直的基础上,采用一种等腰直角棱镜组进行光束整形的方案,并进行了模拟仿真,得到了很好的结果。根据仿真结果搭建实验平台进行整形实验,整形效率达到90%,并且整形后的光束在二维方向光束质量较为均衡。这样的器件可以应用于半导体激光器端抽运固体激光器和光纤激光器中,可以有效地提高此类激光系统的总体效率。

### 参 考 文 献

- [1] DU K M, LOOSEN P. Arrangement for guiding and shaping beams from a rectilinear laser diode array [P]. US Patent 5887096, 1999-03-23.
- [2] GRAF T, BALMER J E. High power Nd:YLF laser end pumped by a diode laser bar [J]. Opt Lett 1993, 18(16): 1317~1319.
- [3] CLARKSON W A, NEILSON A B, HANNA D C. Beam shaper [P]. US Patent 5825551, 1998-10-20.
- [4] YAMAGUCHI S, KOBAYASHI T, SAITO Y *et al*. Collimation of emissions from a high power multistripe laser diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small spot [J]. Opt Lett 1995, 20(8): 898~900.
- [5] WANG Zh J, GHEEN A Z, WANG Y. Optical coupling system for a high power diode pumped solid state laser [P]. US Patent 6377410B1, 2002-04-23.
- [6] FERMANN M E. Configuration of and method for optical beam shaping of diode laser bars [P]. US Patent 6700709, 2004-03-02.
- [7] GUO M X, LU Y T, SHEN G Q. Beam shaping device for diode laser [J]. Applied Laser 2003, 23(4): 215~216 (in Chinese).

之中,导致了牙齿表面温度的降低;激光脉冲的宽度、间隔、个数决定了最终的温度,如果脉冲间隔不是远大于脉宽,多脉冲照射下,在牙齿表面出现了热量的累积。然而在牙齿内壁出现了相反的情况:脉冲数越多,牙齿内壁的温度也就越高。

热蚀除的目的是快速加热要蚀除的组织,使其在很短的时间内达到产生相变所需的高温,在热量传递到周围组织之前移除热的组织,这就要求选取激光参数时必须满足:(1)激光与牙齿热作用的表面温升要在短时间达到相变所需的温度;(2)牙齿内部的高温区尽可能小;(3)牙髓腔壁的温升要小。由以上的分析可知,与长脉冲相比,短脉冲激光与牙齿热作用的表面温升快,牙齿内部高温区小,牙髓腔的温升小,应尽量选用短脉宽单脉冲激光对牙齿热蚀除。然而在实际应用中,短脉宽单次脉冲很难达到所需的蚀除深度。脉冲个数的增加会导致蚀除深度的增加,以及牙髓腔温升的增加。在要求的蚀除深度下,如果减小激光的脉宽,则势必要增加激光脉冲个数,才会达到所要求的蚀除深度;反之,如果要减小激光脉冲个数,则又必须增加激光的脉宽,因此,在实际应用中要考虑二者的权衡。在用多脉冲激光对牙齿进行蚀除时,应控制单个脉冲能量,使其刚好为达到牙齿表层相变所需的能量,这样一方面没有多余的能量扩散到牙齿内部,产生热量的累积,另一方面热的组织被蚀除,不会将热量传递给周围的组织。

## 5 结 论

建立了激光与牙齿相互作用的热传输模型,对不同激光参数照射下牙齿内部的热分布进行了数值模拟,并对相关的光热机理进行了探讨。提出了利用光热作用蚀除牙齿时,为防止牙齿内部温升过高应采用

的措施。在入射激光总能量不变的前提下,增加激光的脉宽或者增加激光脉冲的个数,将使牙齿表面温度的降低,牙齿内部的高温区域扩展,损坏范围增加;激光脉冲的宽度、间隔、个数决定了牙齿表面最终的温度,如果脉冲间隔不是远大于脉宽,多脉冲照射下,在牙齿表面出现了热量的累积。然而在牙齿内壁出现了相反的情况:脉宽越大,脉冲数越多,牙齿内壁的温度也就越高。在用多脉冲激光对牙齿进行蚀除时,应控制单脉冲能量,使其刚好为达到牙齿表层相变所需的能量,这样一方面没有多余的能量扩散到牙齿内部,产生热量的累积,另一方面热的组织被蚀除,不会将热量传递给周围的组织。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] MORIYAMA E H, ZANGARO R A, V ILLAVERDE A B *et al* Optical transfer simulation in laser irradiated human dentin [ J ]. *Journal of Biomedical Optics*, 2003, 8( 2 ): 298~ 302.
- [ 2 ] POWELL G, WHISENANT B, MORTON T. Carbon dioxide laser oral safety parameters for teeth [ J ]. *Lasers on Surgical Medicine*, 1990, 10( 2 ): 389~ 392.
- [ 3 ] LIU L, HUANG Ch Y, LI Zh J. Investigation on caries prevention by 1.06 $\mu$ m laser [ J ]. *Laser Technology*, 2005, 29( 3 ): 255~ 257 ( in Chinese ).
- [ 4 ] NIEMZ M H. *Laser tissue interactions fundamentals and applications* [ M ]. Xi'an Xi'an Jiaotong University Press, 1999, 53~ 56 ( in Chinese ).
- [ 5 ] MORIYAMA E H, ZANGARO R A, LOBO P D C *et al* Mathematical simulation of the thermal diffusion in dentine irradiated with Nd:YAG laser using finite difference method [ J ]. *Proc SPIE*, 2002, 4610: 67~ 73.
- [ 6 ] UHRIG G, MEYER D, FOTH H J *et al*. Transient FEM calculation of the spatial heat distribution in hard dental tissue and after IR laser ablation [ J ]. *Proc SPIE*, 2001, 4249: 61~ 71.
- [ 7 ] FRIED D, GLENA R E, FEATHERSTONE J *et al*. Nature of light scattering in dental enamel and dentine at visible and near-infrared wavelengths [ J ]. *Appl Opt*, 1995, 34( 3 ): 1278~ 1285.
- [ 8 ] GUO M X, SHEN G Q, LIU Y T. The technology of laser diode beam shaping [ J ]. *Laser Technology*, 2003, 27( 4 ): 357~ 361 ( in Chinese ).
- [ 9 ] DORSCH F, HENNING P, NICKEL M. High brightness fibre-coupled diode laser module [ J ]. *SPIE*, 1998, 3285: 192~ 198.
- [ 10 ] WOIAK E L, ALTO P, ENDRIZ J G *et al*. Packaged laser diode array system and method with reduced asymmetry [ P ]. US Patent 6044096, 2000-03-28.

(上接第 372页)