

## 半导体激光器堆栈快轴光束质量计算的研究

李峙, 尧舜, 高祥宇, 潘飞, 贾冠男, 王智勇

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要:** 以高斯光束传输理论为基础, 结合半导体激光器堆栈结构, 建立了半导体激光器堆栈快轴方向光束传输理论模型, 并引入单个半导体激光器阵列的发散角和指向性因子, 对半导体激光器堆栈快轴方向光束质量计算方法进行了修正, 最后通过实验对计算结果进行验证。结果显示, 相对于实验测量值, 该理论模型计算值的误差仅为 2.14%, 与修正前的计算误差 24.16% 和 18.36% 相比, 在精度上有了很大程度的提高, 因此, 该方法可行, 能更精确的反应堆栈快轴的光束质量。

**关键词:** 指向性因子; 光束质量; 半导体激光器; 堆栈

**中图分类号:** TN248.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0085-06

## Calculation for the fast axis beam quality of the laser diode stack

Li Zhi, Yao Shun, Gao Xiangyu, Pan Fei, Jia Guannan, Wang Zhiyong

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Based on the Gaussian beam propagation theory, and combined with the structure of the laser diode stack, the fast axis beam model of the laser diode stacks was established. And considered with the divergence angle and directional factor of each diode laser array, the calculation for the fast axis beam quality of the diode laser stacks was amended which was finally verified by the experiment. The result shows that compared with the experimental measurements, the calculation error of this model is only 2.14%. Compared with the ones before amending, which are 24.16% and 18.36%, the new calculation method is improved a lot in accuracy and can reflect the fast axis beam quality of diode laser stacks more exactitudly.

**Key words:** directional factor; beam quality; diode laser; stack

收稿日期: 2013-10-21; 修订日期: 2013-11-12

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61006040)

作者简介: 李峙(1988-), 男, 硕士生, 主要从事大功率半导体激光技术方面的研究。Email: lz1113@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 尧舜(1979-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事大功率半导体激光系统集成方面的研究。Email: yaoshun@bjut.edu.cn

## 0 引言

半导体激光器由于电光转换效率高、结构紧凑等突出优点,目前广泛应用于工业、军事、科研等领域<sup>[1-5]</sup>,随着各行各业不断发展,人们对半导体激光器的输出功率有了更高的要求,因此,堆栈形式的半导体激光器更多的应用于实际当中,即将多个半导体激光器阵列在快轴方向上进行叠加,从而提高了整个光束的输出功率。同时,半导体激光器由于自身结构特点,快轴和慢轴方向上往往存在较大的发散角,不能直接进行应用,需对其进行快慢轴准直,再经过光束变换技术得到不同需求的光束应用于实际当中<sup>[6-8]</sup>。针对这些技术应用,需首先对堆栈本身光束进行量化分析,对于这种堆栈形式的半导体激光器光束质量的计算目前国内外的相关研究较少,尚未有特定的评价标准,目前对其光束质量的评价大多是在“理想状态”下进行的,即忽略了不同半导体激光器阵列发散角和光束指向性参数的差异,而实际应用中由于透镜的安装偏差、芯片自身“Smile”效应<sup>[9]</sup>、堆栈安装误差等都会导致准直之后的半导体激光器阵列发散角和光束指向性存在差异,同时半导体激光器堆栈快轴方向上为多个半导体激光器阵列发出光束的组合光,而慢轴方向上实际上有和单个半导体激光器阵列相同的光强分布,因此,对堆栈光束质量进行量化分析时需重点对其快轴方向光束质量进行研究。

鉴于上述情况以及相应研究的缺乏,文中采用基本高斯光束传输理论建立模型,并引入单个半导体激光器阵列的实际发散角,指向性参数对半导体激光器堆栈快轴方向光束质量计算进行修正,对其进行量化分析,并结合实验对其进行验证,结果表明,该计算方法相对于实际测量值误差较小,能更精确的反应堆栈快轴的光束质量。

## 1 理论模型的建立及分析

半导体激光器的光束质量一般用光束参数积(BPP)来描述,BPP的定义是光束的束腰半径( $w_0$ )与远场发散角( $\theta_0$ )的乘积<sup>[10]</sup>,即:

$$BPP=w_0 \cdot \theta_0 \quad (1)$$

要求得堆栈快轴方向的 BPP 值,需求得堆栈快轴方向上的束腰半径和远场发散角两个参数:

### 1.1 束腰半径

半导体激光器的束腰半径定义为其光束传播方向上的光斑最小值,对于单个半导体激光器,其快轴光束由腔面处以一定的发散角呈高斯状传输,其束腰半径位于腔面处,堆栈形式的半导体激光器为多个半导体激光器阵列在快轴方向上的叠加,因此,“理想状态”下堆栈的束腰半径仍然位于堆栈的腔面处,而实际情况下组成堆栈的各个半导体激光器阵列的指向性往往存在一定的差异,这显然会影响堆栈整体光束在传输过程中光斑大小的变化,因此,要更准确的求解实际光束的束腰半径,需引入组成堆栈的各个半导体激光器阵列的特性参数,尤其是光束指向性因子建立理论模型对堆栈光斑半径进行计算分析,进而求解出其束腰半径的大小:

半导体激光器快轴方向上光强分布为基模高斯分布,对于单个半导体激光器阵列,其传播  $s$  距离时光强分布为:

$$I(y)=\frac{A}{w_s} \exp(-2 \frac{y^2}{w_s^2}) \quad (2)$$

式中: $A$  为常数; $w_s$  为光束传播  $s$  距离后的光斑半径,对于束腰半径为  $w_0$ ,发散角为  $\theta$  的半导体激光器阵列有:

$$w_s=w_0+s \cdot \tan \theta \quad (3)$$

半导体堆栈为多个半导体激光器阵列在快轴方向上的堆叠,考虑半导体激光器阵列的指向性因子(即单个半导体激光器阵列相对于水平方向上的偏角)对堆栈快轴方向光强分布进行修正得其光强分布为:

$$I_z(y)=\sum I_i((y-\Delta y_i) \cdot \cos \alpha_i) \quad (4)$$

式中: $\Delta y_i$  为半导体激光器阵列光强分布相对于堆栈传输主光轴的位置偏移量。

将光斑半径计算公式进行修正得到半导体堆栈快轴方向占总能量  $a\%$  时光斑半径的计算公式为:

$$a\%=\frac{\int_{-y_0}^{y_0} I_z(y+Y_z) dy}{\int I_z(y+Y_z) dy} \quad (5)$$

其中, $Y_z$  为堆栈快轴方向整体光强分布的质心,即:

$$Y_z=\frac{\int I_z(y) \cdot y dy}{\int I_z(y) dy} \quad (6)$$

由公式(2)和(6)即可求出堆栈快轴光束传输到

不同位置处的光斑半径, 利用 Matlab 进行计算, 求解出其传输过程中光斑半径的最小值即为堆栈快轴方向的束腰半径。

现以由两个间距为 9 mm 的半导体激光器阵列组成的堆栈为例对光束指向性对堆栈束腰半径的影响进行简要分析, 以堆栈腔面处快轴方向为 y 轴, 光束传播方向为 z 轴建立如图 1 所示坐标系。

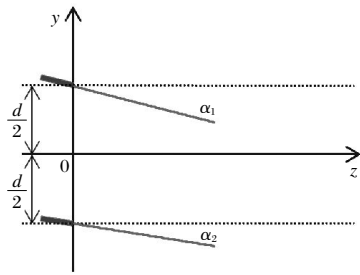


图 1 理论模型坐标系

Fig.1 Coordinate system of the module

由图 1 可以看出, 堆栈光束传播到 z 处时, 每个半导体激光器阵列传播的距离为:

$$s_i = \frac{z}{\cos \alpha_i} \quad (7)$$

假定组成堆栈的两个半导体激光器阵列束腰半径  $w_0$  均为 0.325 mm, 发散角  $\theta_0$  均为 2 mrad, 指向性参数  $\alpha_2=0$  mrad, 改变  $\alpha_1$  的值, 在 86% 能量时对其指向性对堆栈束腰半径的影响进行分析, 图 2 为计算所得的堆栈束腰半径随指向性参数  $\alpha_1$  变化的数据图。

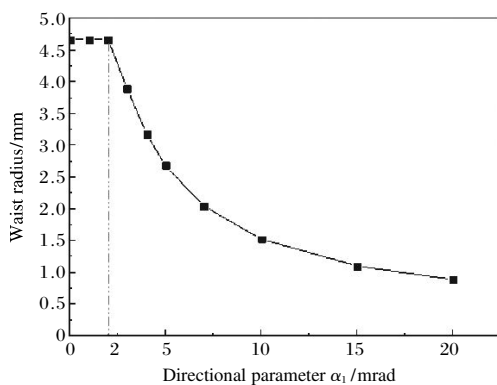


图 2 束腰半径与指向性参数对应关系

Fig.2 Relationship between waist radius and directional parameter

由图 2 可以看出, 当  $\alpha_1 < \theta_0$  时, 堆栈束腰半径变化极小, 分析原因为此时堆栈整体光束仍为发散式传播, 光束光斑半径随传播距离逐渐变大, 因此光斑最小值仍位于堆栈腔面处, 且此时指向性偏移角度

较小, 对结果影响很小; 当  $\alpha_1 \geq \theta_0$  时, 堆栈束腰半径随  $\alpha_1$  的变大而变小, 且变化速率逐渐变小, 分析可知, 此时堆栈整体光斑经历了先变小再变大的过程, 光束的指向性已经对束腰半径的位置和大小造成了影响。

### 1.2 远场发散角

“理想状态”下组成堆栈的半导体激光器阵列有着相同的发散角和一致的指向性, 此时堆栈快轴方向上整体光束仍为高斯光束, 其发散角即为单个半导体激光器阵列的发散角, 实际中由于指向性因素的影响, 整体光束已不是严格意义的高斯光束, 此时堆栈的快轴发散角需要重新进行计算。

半导体激光器远场发散角定义为高斯光束传播中双曲线的两根渐近线夹角的一半, 即:

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{w_z}{z} \quad (8)$$

且当  $z \gg z_0$  时, 发散角  $\theta$  近似的为一个常数, 称为远场发散角。其中  $z_0$  为瑞利长度。实际测量时  $z$  应在大于一定值的情况下进行<sup>[11]</sup>。因此, 需对堆栈远场光斑半径随其位置的变化做进一步的计算分析, 进而由公式(8)求解出堆栈整体的远场发散角。

仍以 1.1 节中假设为例对半导体激光器光束指向性对堆栈整体远场发散角的影响进行分析, 图 3 为计算所得的堆栈远场发散角随指向性参数  $\alpha_1$  变化的数据图; 由图 3 可以看出, 堆栈的远场发散角随  $\alpha_1$  呈线性变化的关系。

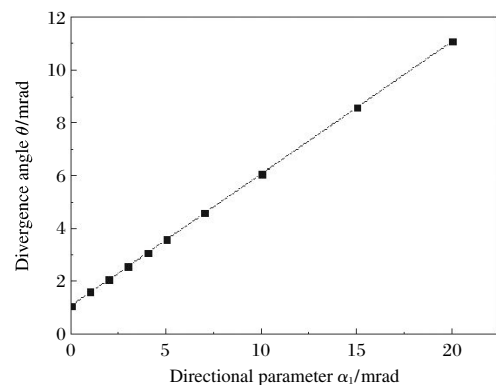


图 3 发散角与指向性参数对应关系

Fig.3 Relationship between divergence angle and directional parameter

由以上分析可以看出, 组成堆栈的半导体激光器阵列的指向性对堆栈的束腰半径和发散角均有一定的影响, 实际堆栈的装调过程中, 半导体激光阵列的指向性一般较好, 可控制在 2~3 mrad 以内, 此时,

指向性主要影响堆栈整体光束的远场发散角而对堆栈快轴方向束腰半径影响很小。同时各半导体阵列实际发散角的不同也必将对堆栈快轴方向上整体光束质量的计算产生偏差,该模型引入了组成堆栈的各个半导体激光阵列的发散角和指向性参数对计算方法进行修正,能更准确的对堆栈快轴方向光束质量进行计算。

## 2 理论计算与实验验证

下面以现有的波长为 808 nm 的双半导体激光器阵列堆栈为例,对该理论模型做进一步的试验验证。

### 2.1 理论计算

将该堆栈如图 1 所示建立坐标系,表 1 为组成堆栈的两个半导体激光器阵列的相关特性参数,其中第 1 列为上下两个半导体激光器阵列的编号;第 2 列为坐标系中快轴方向上两个半导体激光器阵列的位置坐标;第 3 列和第 4 列分别为半导体激光器阵列经过快慢轴准直后的束腰半径和发散角,第 5 列为半导体激光器阵列的指向性参数,即半导体激光器阵列相对于水平方向的偏移角度。

表 1 单个半导体阵列的特性参数

Tab.1 Characteristic parameters of each array

No.	y/mm	$w_0$ /mm	$\theta$ /mrad	$\alpha$ /mrad
1	4.5	0.325	2.325	0.486
2	-4.5	0.325	3.487	0.483

由公式(3)~(8),通过 Matlab 对不同位置  $z$  处的光斑半径进行计算(计算时取为 86%能量值,即  $a=86$ ),由计算得该堆栈光束传输过程中光斑半径最小值为 4.675 5 mm,即该堆栈的束腰半径  $w_z=4.675 5$  mm。

图 4 为当  $z \gg z_0$  时不同位置处的光斑半径  $w$  与位置  $z$  的对应关系,有数据得到  $w$  和  $z$  呈斜率为 0.002 03 的线性变化关系,即可得堆栈的发散角  $\theta_z=2.03$  mrad,代入公式(1)可得该堆栈快轴的光束质量  $BPP_z=9.491 3$  mm·mrad。

为了与计算值作比较,采用以上理论模型对“理想状态”下堆栈的快轴光束质量进行计算,即取两个半导体激光器阵列的指向性  $\alpha=0$  mrad,整体的发散角  $\theta$  分别取为 2.325 mrad 和 3.487 mrad 进行计算,由公式(2)~(7),通过 Matlab 计算得 86%能量下两种情况的束腰半径仍为 4.675 5 mm。对两种情况下的

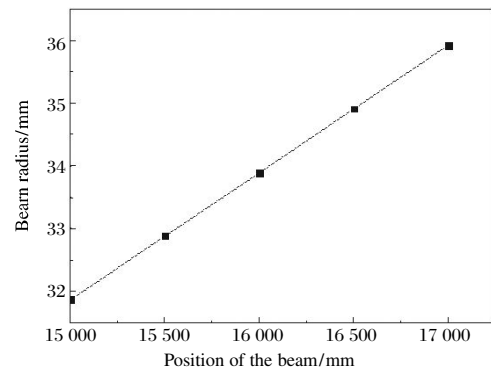


图 4 光斑半径和光斑位置对应关系

Fig.4 Relationship between beam radius and its position

远场光斑半径变化情况进行计算分别得相应变化关系如图 5 所示。

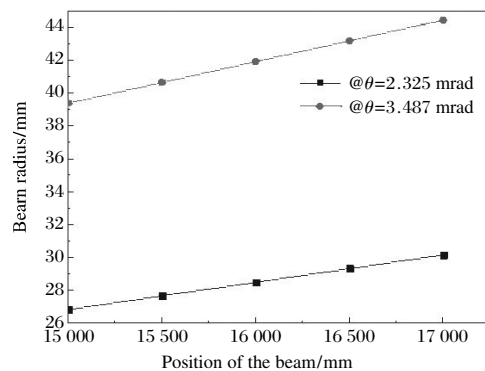


图 5 发散角分别为 2.325 mrad 和 3.487 mrad 时光斑半径和光斑位置对应关系

Fig.5 Relationship between beam radius and its position with  $\theta=2.325$  mrad and  $\theta=3.487$  mrad

由数据分析得出,86%能量时两种情况下的发散角分别为 1.67 mrad 和 2.54 mrad,因此,BPP 值分别为 7.808 1 mm·mrad 和 11.875 8 mm·mrad。

### 2.2 实验验证

图 6 为半导体激光器光束质量实验测试系统,试验中选用了德国 PRIMES 公司的 FocusMonitor 光束质量分析仪对堆栈光束质量进行测量,堆栈发出的激光经过扩束准直系统和聚焦系统最后通过光束质量分析仪对该堆栈进行光束质量测量,最后用功率计对透过的高功率激光进行吸收。

图 7 为实验测得的光斑大小分布,图中为诊断仪对不同面上光斑扫描所得到的拟合曲线,其中黑色拟合线为堆栈快轴方向的光斑拟合曲线。

表 2 为实验测得的相关数据,第一列和第二列分别为在二阶矩情况下测得的整体光束的 BPP 值

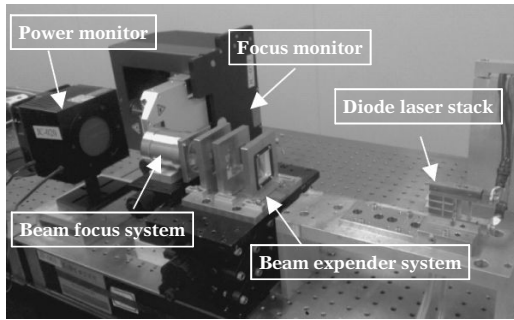


图 6 半导体激光器堆栈光束质量测试系统

Fig.6 System to measure the beam quality of the diode laser stack

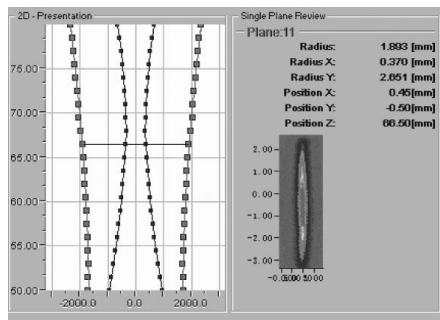


图 7 光斑大小测量结果

Fig.7 Beam size measuring results

和快轴方向的 BPP 值；第三列和第四列分别为在 86% 能量情况下测得的堆栈整体光束的光斑半径和经过聚焦过的发散角；第五列为由测量数据计算得到的堆栈快轴方向上的 BPP 值。

表 2 实验结果

Tab.2 Experimental values

BPP <sub>beam</sub> @ 2 <sup>nd</sup> moment /mm · mrad	BPP <sub>fast</sub> @ 2 <sup>nd</sup> moment /mm · mrad	Beam focus radius@86% /mm	Beam divergence angle@86% /mrad	BPP <sub>fast</sub> @86% /mm · mrad
90.635	16.654	0.969	108.895	9.694 5

表 3 为堆栈快轴方向上 86% 能量的理论计算值,其中第一列为编号,1、2、3 号分别对应实际情况计算值、取整体  $\theta=2.325$  mrad 时对应 86% 能量的计算值和取整体  $\theta=3.487$  mrad 时对应 86% 能量的计算

表 3 计算结果

Tab.3 Calculated values

No.	Waist diameter/mm	Divergence/ mrad	BPP/mm · mrad	Relative error
1	4.675 5	2.03	9.491 3	2.14%
2	4.675 5	1.67	7.808 1	24.16%
3	4.675 5	2.54	11.875 8	18.36%

值;第二列和第三列分别为束腰半径和发散角,第四列为堆栈的快轴光束质量计算值,第五列为相对于测量值的相对误差。

### 2.3 结果分析

由以上数据可以看出,三种情况下的束腰半径均为 4.675 5 mm,分析原因为该堆栈指向性精度较好,单个半导体激光器阵列指向性偏差角度很小,引入理论模型当中对束腰半径影响极小;而三种情况下发散角和 BPP 值相差较大,由表 3 可以看出,通过引入单个半导体激光器阵列发散角和指向性因子后,理论计算值相对于实验测量值误差仅为 2.14%,相对于“理想状态”下的误差 24.16%和 18.36%计算精度有了很大程度的提高,计算中单个半导体激光器阵列的束腰半径均采用了经验值 0.325 mm (实际值在该值附近),远远小于半导体激光器阵列间距,经大量理论计算证得,取得合理范围内其他值时仍可得到相同结论,因此,该计算可行,能更精确的计算堆栈快轴的光束质量。

### 3 结论

通过建立半导体激光器堆栈理论模型,综合考虑各个半导体激光器阵列准直后的发散角和指向性参数对快轴光束质量的影响,对半导体激光器堆栈快轴方向光束质量计算方法进行了修正。通过理论分析得出,组成半导体激光堆栈的单个阵列发散角对堆栈快轴方向整体光束质量影响较大,而一般情况下指向性偏差较小,对堆栈快轴方向束腰半径影响很小,主要影响堆栈整体光束的远场发散角。最后通过实验对计算结果进行验证,结果显示,相对于实验测量值,该理论模型计算值的误差仅为 2.14%,比修正前的计算方法(误差为 24.16%和 18.36%),在精度有了很大程度的提高,该方法可行,能更准确的反应堆栈快轴的光束质量。

### 参考文献:

[1] Cao Yinhua, Liu Youqiang, Qin Wenbin, et al. Kilowatt diode laser with beam quality better than all-solid-state laser [J]. *Chinese J Laser*, 2009, 36 (9): 2282-2285. (in Chinese)  
曹银花, 刘友强, 秦文斌, 等. 光束质量超过全固态激光器的千瓦直接半导体激光器 [J]. *中国激光*, 2009, 36 (9):

- 2282–2285.
- [2] Ma Xiaoyu, Wang Jun, Liu Suping. Present situation of investigations and applications in high power semiconductor laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 189–194. (in Chinese)  
马骁宇, 王俊, 刘素平. 国内大功率半导体激光器研究及应用现状[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 189–194.
- [3] Robin K Huang, Bien Chann, Leo J Missaggia, et al. Highbrightness wavelength beam combined semiconductor laser diode arrays[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(4): 209–211.
- [4] Andre Timmermann, Jens Meinschien, Perter Bruns, et al. Next generation high –brightness diode lasers offer new industrial applications[C]//SPIE, 2008, 6876: 6870U.
- [5] Koenning T, Alegria K, Wang Z, et al. Macro –channel cooled, high power, fiber coupled diode lasers exceeding 1.2 kW of output power[C]//SPIE LASE Photonics West, 2011: 7913–7918.
- [6] König H, Grönninger G, Lauer C, et al. Brilliant low –fill –factor diode laser bars at 9xx nm for fiber coupling [C]//SPIE, 2009: 719803–719803.
- [7] Sturm V, Treusch H G, Loosen P. Cylindrical microlenses for collimating high –power diode lasers[C]//SPIE, 1997, 3097: 717–726.
- [8] Liu Guojun, Bo Baoxue, Qu Yi, et al. High power semiconductor lasers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(S): 5–6. (in Chinese)  
刘国军, 薄报学, 曲轶, 等. 高功率半导体激光器技术发展与研究[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S): 5–6.
- [9] Lang Chao, Yao Shun, Chen Bingzhen, et al. “Smile” effect on the beam quality for diode laser array [J]. *Chinese J Laser*, 2012, 39(5): 33–37. (in Chinese)  
郎超, 尧舜, 陈丙振, 等. 半导体激光器列阵的“Smile”效应对光束质量影响研究[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 33–37.
- [10] Friedrich G, Bachmann. Chances and limitations of high power diode laser[C]//SPIE, 2004, 5336, 95–101.
- [11] Chen Qiuling. Study on high – power laser diode ’ s divergence angle testing system[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008. (in Chinese)  
陈秋玲. 高能半导体激光器发散角测试系统研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.