

文章编号: 1001-3806(2007)05-0507-04

## 圆柱面镜用于端面抽运光束整形误差分析

王 英, 陈培锋, 詹 鹏

(华中科技大学 光电子科学与工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 为了简化二极管端面抽运固体激光器的快轴准直, 建立了圆柱面镜和聚焦镜作为二极管快轴准直系统的模型, 给出了系统设计方法和关键参数的控制方法, 通过仿真论证了以圆柱面镜做二极管激光器快轴校准的可行性, 抽运光腰斑的大小和位置可以通过选择柱面镜半径、光源到柱面镜的距离、柱面镜到聚焦镜的距离及聚焦镜焦距来控制。结果表明, 当柱面镜半径 3mm, 光源到柱面镜的距离 0.7mm, 柱面镜到聚焦镜的距离及聚焦镜焦距 5mm 时, 抽运 YAG 晶体可以得到大于 47% 的光-光效率。

**关键词:** 激光光学; 圆柱面镜; 准直误差; 最小光斑

**中图分类号:** O436.1 **文献标识码:** A

## Error analysis of light beam with a cylindrical lens as the beam collimator in end pumping scheme

WANG Ying, CHEN Peifeng, ZHAN Peng

(Institute of Optoelectronic Science and Engineering Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** For simplifying the diode pumped solid-state laser pump beam collimation system, a simple model was developed to the laser pumping waist design, in which the cylindrical lens was used as the fast axis beam collimator. The system design scheme and the key parameters were listed. The feasibility of the cylindrical lens as the fast axis beam collimator was proved through simulation analysis. The pumping beam waist could be controlled through elaborate selection of parameter  $R$ ,  $L_p$ ,  $L_0$  and  $f$ . The experiment showed that the optical to optical efficiency could get larger than 47% when the radius of the cylindrical lens was 3mm, the range between the laser source and the lens was 0.7mm and both the range between the cylindrical lens and the focusing lens and the focal length of the focusing lens are 5mm.

**Key words** laser optics; cylindrical lens; collimating error; minimum beam waist

### 引 言

端面抽运固体激光器比侧面抽运可以提供更高的光束质量和效率。在设计端面抽运固体激光器中, 一个关键的参数就是谐振腔中激光模场与抽运光模场的重合度, 它将决定激光器的阈值功率、输出效率和功率<sup>[1]</sup>。抽运和激光模场半径大小对激光器阈值和输出功率的影响已经有很多学者进行过研究, 理论和实验都表明, 抽运光的光斑在尺寸上匹配高斯光束的光斑比抽运光的分布更具有意义<sup>[2,3]</sup>。在激光介质中, 抽运光的有效抽运体积越小, 抽运功率密度就越高, 从而使抽运效率越大; 但是, 抽运功率密度越高, 会导致晶体热效应越剧烈, 从而使激光器的等效热焦距缩短,

热致损耗增大, 输出减小<sup>[4-6]</sup>, 因此, 存在最佳抽运光斑半径, 使抽运效率较高的同时又不至于产生过于严重的热效应<sup>[7,8]</sup>。当采用均匀的圆柱抽运光抽运时, 最佳抽运出现在腔内光斑直径与抽运光圆柱直径相比拟时<sup>[9,10]</sup>, 所以, 在光束整形时, 控制整形光束在增益介质内的光斑束腰就显得非常重要<sup>[11]</sup>。作者通过理论分析, 论证了采用圆柱面镜作为二极管抽运源快轴校准系统的可行性, 并且给出了抽运光最小光斑的设计和控制在方法。

二极管激光器其输出光束为像散椭圆高斯光束, 慢轴平面内的发散角典型值约为  $10^\circ$ , 快轴平面内的发散角约为  $40^\circ$ , 要考虑到须选择适当的耦合系统, 以便把发光面积大、光束发散度大而且  $x, y$  方向不对称的 LD 的发射光束变换成光束截面半径小于固体激光器的基模高斯光束束腰半径、发散度小的抽运光束进入增益介质, 以求与腔模空间最大限度的交叠, 从而得到高功率和高光束质量的激光输出。

二极管激光器发散角:  $\theta_x \times \theta_y = 40^\circ \times 10^\circ$ , 所以,

**作者简介:** 王 英 (1962-), 女, 副教授, 现从事激光声探, 固体激光器件与技术, 光纤激光器, 激光加工成套设备, 喇曼光纤激光器与放大器等项目的研究工作。

E-mail: wy@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2006-06-16 收到修改稿日期: 2006-07-18

需要将快轴和慢轴分别进行准直。采用相互垂直放置的两个柱面镜分别对 LD 输出光束的快、慢轴进行整形,获得平行光束。柱面镜,从  $x$  方向(快轴)和  $y$  方向(慢轴)观察,其光路是非对称的。分析柱面镜,从  $x$  轴方向看,其等效于一般透镜,对光线有会聚作用;而从  $y$  方向看,其等效于一两端面为平行平面的波片,对光线没有会聚作用,垂直与光轴的平行光穿过不会有影响,其它方向的光线穿过只会发生平移,方向、发散角都不会改变<sup>[12]</sup>。

采用两个不同曲率和厚度的柱面镜沿光轴相互垂直放置,对 LD 输出的抽运光分别进行整形,将椭圆光斑整形成一圆形光斑,之后再通过一球面聚焦镜对光斑进行聚焦,耦合进晶体中。为了达到好的准直目的,柱面镜需要采用非球面镜,尤其是用于快轴校准的镜。

### 1 二极管激光快轴准直

理想光学系统,是由等光程光线所组成的光学系统,由于二极管激光器的快轴光发散角很大,如果要进行准直,需要采用很小曲率半径的光学元件,在这种情况下,传统的球面光学元件不能达到很好的光学校正目的<sup>[13]</sup>;而慢轴光束发散角比较小,采用圆柱面镜作为校准透镜时,是可以达到很好的结果的<sup>[14]</sup>。所以,本文中主要讨论快轴校准镜的问题。

#### 1.1 快轴准直镜的理想面型参数

采用非球面柱面镜可以设计出理想的快轴校准光学系统<sup>[12]</sup>,如图 1 所示。采用 KF6 玻璃,折射率  $n_2 = 1.5174$  时,设镜面上任意一点的坐标为  $P(z, y)$ ; 根据

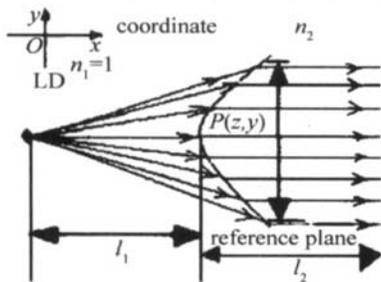


Fig 1 Optical route of idealized image system

等光程的条件,可以得到如下的方程式:

$$n_1 \cdot \sqrt{y^2 + (L_1 + z)^2} + n_2 \cdot (L_2 - z) = n_1 \cdot L_1 + n_2 \cdot L_2 \quad (1)$$

将等光程面中的  $z$  写成  $y$  的形式,只有第 1 组解是正确的。

当  $L_1 = 1.488\text{mm}$ ,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1.51742$  镜面到参考面距离  $L_2 = 20\text{mm}$  时,采用 MATLAB 模拟得到面型模拟图像,见图 2。快轴准直的六阶拟合曲线方程为:

$$y = (0.841 - 7.00Lz + 0.2178z^2 - 0.0311z^3 + 0.002z^4) \cdot 10^3 \quad (2)$$

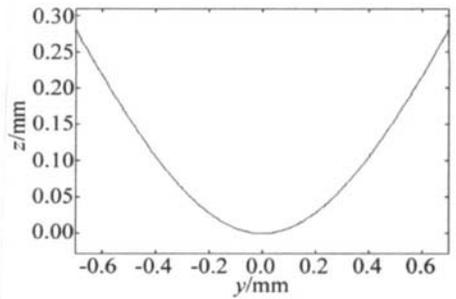


Fig 2 Idealized aspheric surface for fast axis collimator

非球面镜虽然具有最好的准直效果,但是制作工艺复杂、成本高,在该系统的应用中,一般基模高斯光束的束腰可以达到零点几个毫米量级,为了匹配最佳抽运光斑,抽运光准直的最终效果并不要求焦斑无限小,而是一个有限大小,在此前提下,可以考虑采用圆柱面代替非球面型,只要设计合理,依然可以达到较好的目的。

#### 1.2 采用圆柱面镜替代非球面型<sup>[3]</sup>

如图 3 所示,因为光源最大发散半角达到  $20^\circ$ ,为

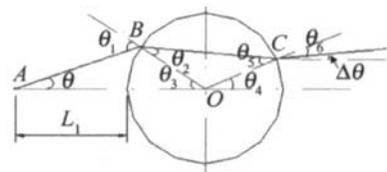


Fig 3 Spherical cylindrical lens for fast axis collimator

了保证更多的光能够被校正,所以透镜距离光源的距离不能大,设通光孔径为光学孔径的 70%,则最大距离  $L_1$  和光发散角  $\theta$  满足下式:

$$\tan\theta = \frac{0.7 \cdot R}{L_1 + R(1 - \sqrt{1 - 0.7^2})} \quad (3)$$

式中,  $R$  是柱面镜半径,  $L_1$  是光源到镜边缘的距离,  $\theta$  是光发散角。即当  $R = 1\text{mm}$  时,光源到柱面镜的距离  $L_1 < 1.579\text{mm}$ 。

通过 Zemax 光线追踪,当二极管激光器为  $2\text{W}$  时,在上述条件下可以得到光线追踪模拟,见图 4。

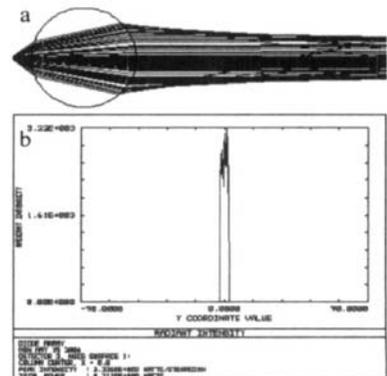


Fig 4 a—ray trace of spherical cylindrical lens for fast axis b—beam angle distribution after spherical cylindrical lens

在距离光源 15mm 处、5mm × 5mm 范围内,光强还

有 1.6W, 达到较好的光学准直效果。

## 2 二极管激光快轴准直误差

### 2.1 快轴面型误差函数

当采用圆柱面形替代非球面函数时, 以理想成像光学系统的面型为基准, 将描述该误差的函数定义为:

$$\Pi(z, y) = F_1(z, y) - F_2(z, y) \quad (4)$$

式中,  $F_1(z, y)$  和  $F_2(z, y)$  分别是球面柱透镜面形函数和理想二次非球面面形函数;  $F_1(z, y) = y^2 + (z - R)^2 - R^2$ ,  $F_2(z, y) = y - [a_0 + a_1 \cdot z + a_2 \cdot z^2 + a_3 \cdot z^3 + a_4 \cdot z^4 + a_5 \cdot z^5 + a_6 \cdot z^6]$ 。

所以:

$$\Pi(z, y) = y^2 + (z - R)^2 - R^2 - \{y - [a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x^3 + a_4 \cdot x^4 + a_5 \cdot x^5 + a_6 \cdot x^6]\} \quad (5)$$

式中,  $a_0, a_1, a_2, \dots$  为二次非球面面形六次拟合系数。当  $R = 1\text{mm}$ , 则面型误差函数:

$$\Pi(z, y) = y^2 + (z - 1)^2 - 1 - \{y - [(0.841 - 0.7001z + 0.2178z^2 - 0.0311z^3 + 0.002z^4) \cdot 10^3]\} \quad (6)$$

两种面型曲线的差别可以从图 5 中看出。曲线 1 代表球面面形, 曲线 2 代表非球面面形。

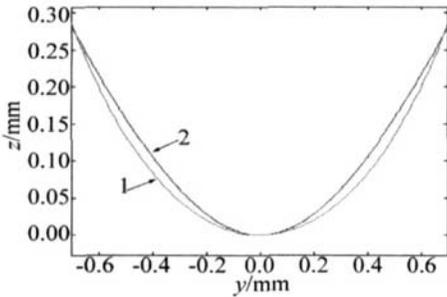


Fig 5 The error of surface

### 2.2 光束输出准直误差分析

为了更加直观地了解光校准情况, 采用输出光与平行光之间的偏离角  $\Delta\theta$  评价采用圆柱面镜与理想二次非球面柱面镜的校准误差。

下面根据几何光学的原理, 采用解析几何的方法, 计算在整形柱面镜的曲率半径  $R$  和距离光源  $L_1$ , 柱面镜为 KF6 玻璃、折射率  $n_2 = 1.517182$ , 空气折射率  $n_1 = 1$  情况下, 通过柱面镜后校准光偏离平行光的偏离角  $\Delta\theta$ , 以快轴方向为例对柱面镜  $C_1$  进行计算, 将柱面镜中的快轴等效光路局部放大如图 3 所示。

把 LD 发出的光看成发散角为  $2\theta$  的点光源, 经柱面镜整形后为平行光输出。以柱面镜曲率圆心为原点, 光轴为  $z$  轴, 坐标系如图 3 所示,  $A$  为点光源 (LD) 所在位置, 距离柱面镜端面为  $L_1$ , 可写出柱面镜弧面方程:

$$y^2 + z^2 = R^2 \quad (7)$$

光线  $AB$  为过点  $A(- (L_1 + R), 0)$ 、斜率为  $\tan\theta$  的直

线, 可写出直线  $AB$  的方程:

$$\frac{y}{x + (L_1 + R)} = \tan\theta \quad (8)$$

则联立 (7) 式和 (8) 式可求得弧面与直线  $AB$  的交点  $B$  用  $L_1, R$  表示的坐标  $(x_B, y_B)$ :

$$\begin{cases} x_B = - (L_1 + R) \sin^2\theta - \sqrt{R^2 - (L_1^2 + 2RL_1) \tan^2\theta} \\ y_B = \tan\theta [ (L_1 + R) \cos^2\theta - \sqrt{R^2 - (L_1^2 + 2RL_1) \tan^2\theta} ] \end{cases} \quad (9)$$

据此可写出弧的法线  $OB$  的斜率为:

$$\tan(\pi - \theta_3) = \frac{y_B}{x_B} \Rightarrow \tan\theta_3 = - \frac{y_B}{x_B} \quad (10)$$

入射角  $\theta_1 = \theta + \theta_3$ 。由折射定律  $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$ , 有:

$$\theta_2 = \arcsin\left[\frac{n_1}{n_2} \sin\theta_1\right] = \arcsin\left[\frac{n_1}{n_2} \sin(\theta + \theta_3)\right] \quad (11)$$

由  $BC$  组成的直线方程, 该直线通过  $(x_B, y_B)$ :  $y - y_B = \tan(\theta_3 - \theta_2)(x - x_B)$ 。

联立下列方程:

$$\begin{cases} y - y_B = \tan(\theta_3 - \theta_2)(x - x_B) \\ x^2 + y^2 = R^2 \end{cases} \quad (12)$$

可以得到  $C$  点坐标  $(x_C, y_C)$ 。第 2 个面的入射角:  $\theta_5 =$

$$[\theta_4 - (\theta_3 - \theta_2)]; \tan\theta_4 = \frac{y_C}{x_C}$$

由折射定律  $n_2 \sin\theta_5 = n_1 \sin\theta_6$ , 有:

$$\theta_6 = \arcsin\left[\frac{n_2}{n_1} \sin\theta_5\right] = \arcsin\left[\frac{n_2}{n_1} \sin(\theta_4 - \theta_3 + \theta_2)\right] \quad (13)$$

所以, 校准误差  $\Delta\theta = \theta_4 - \theta_6$ 。通过 MATLAB 仿真, 可以得到如图 6 所示结果。

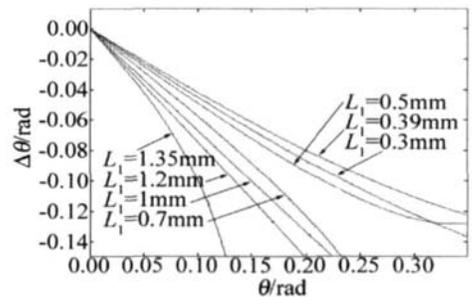


Fig 6 The angle error after the spherical lens of the fast axis light

图 6 中  $\theta$  代表入射光发散角,  $\Delta\theta$  为输出光偏离平行光的角度; 可以看出, 采用圆柱面镜作为快轴准直镜时的关键参数为圆柱面半径  $R$  和光源到柱面镜的距离  $L_1$ , 当  $L_1 = 0.39\text{mm}$  时, 入射光  $+20^\circ$  时, 通过该柱面镜后角度偏差为  $-5.7^\circ$  左右。

理想非球面镜的校准光束为平行光, 而以圆柱面镜代替理想非球面镜时, 输出光束会有部分偏离平行光光线, 确定圆半径之后, 可以通过优化光源到圆柱面

镜的距离  $L_1$ , 对校准光的结果进行优化。

### 3 快轴准直光束的聚焦

#### 3.1 二极管激光快轴准直聚焦后的光斑大小

这个锥形光束通过慢轴校正柱面镜后, 将通过聚焦镜将抽运光汇聚到工作物质中去。如图 7所示。

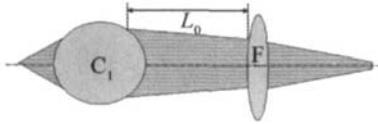


Fig 7 Fast axis light collimator

通过近轴光学矩阵法, 光线参数  $M$  经过光学元件的传输矩阵  $R$  后, 输出参数为  $M'$ :

$$M' = R \cdot M = \begin{bmatrix} n_2 \cdot u_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{f} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \cdot u_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

在该系统中,  $u_1 = \Delta\theta$ ,  $y_1 = y_c - L_0 \cdot \Delta\theta$  所以:

$$\begin{cases} u_2 = u_1 + y_1 / f = \Delta\theta + (y_c - L_0 \cdot \Delta\theta) / f \\ y_2 = y_1 = y_c - L_0 \cdot \Delta\theta \\ u_3 = y_1 / f = (y_c - L_0 \cdot \Delta\theta) / f \end{cases} \quad (15)$$

如果平行光入射, 则出射光线  $u_2 = y_1 / f$ , 聚焦在焦距处; 以  $u_2$  角度入射的光线, 将汇聚到焦点之前的轴上点, 如图 8所示, 二极管激光发出的光线角度  $\theta$  在  $0 \sim \pm 20^\circ$  之间变化时:

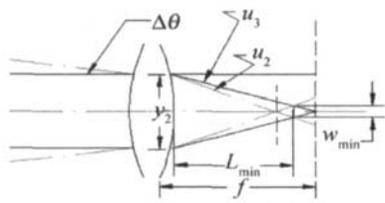


Fig 8 Beam waist of parallel ray and deflective ray

±20°之间变化时:

$$w_{min} = \frac{\tan u_2 - \tan u_3}{\tan u_2 + \tan u_3} \cdot (y_c - L_0 \cdot \Delta\theta) \quad (16)$$

图 9中,  $w_{min4}(\theta)$ ,  $w_{min6}(\theta)$ ,  $w_{min8}(\theta)$ ,  $w_{min9}(\theta)$  分别代

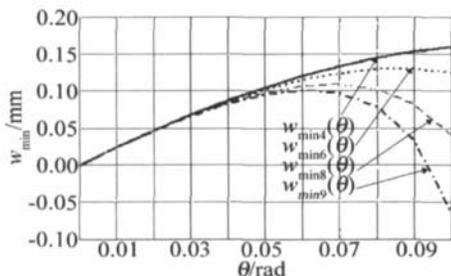


Fig 9 The focus of the ray with  $\theta$  in  $6^\circ$  when  $L_0$  is 4mm, 6mm, 8mm, 9mm respectively

表透镜距离柱面镜的位置  $L_0$  为: 4mm, 6mm, 8mm, 9mm时, 通过聚焦镜的最小光斑; 当  $L_0 > 10$ mm 时, 光斑  $w_{min}$  会突然增大; 但是当  $L_0 < 9$ mm 时,  $L_x$  处的最小光斑可以达到小于 0.2mm, 与腔内的基模高斯光束束

腰在同一个数量级。所以, 只要选择透镜距离柱面镜的位置  $L_0$ , 就可以达到控制光斑尺寸的目的。完全可以用于端面抽运的系统之中。

#### 3.2 实验结果

采用上述设计思想, 为抽运 2W 的端面二极管抽运固体激光器设计了快轴校准光学系统。

(1) 二极管激光器参数为:  $\theta_{||} = 10^\circ$ ,  $\theta_{\perp} = 40^\circ$ ;  $P = 2W$ ; (2) 设计圆柱面镜参数为:  $R = 1.5$ mm, 长 10mm, 到光源距离  $L_1 = 0.7$ mm; 聚焦镜  $f = 5$ mm, 距离柱面镜  $L_0 = 0.7$ mm; (3) 谐振腔采用平-平腔, 85% 的输出耦合,  $3\text{mm} \times 3\text{mm} \times 5\text{mm}$  的 YAG 晶体, 得到光-光效率大于 47%, 达到很好的效果。

图 10为采用圆柱面镜作为二极管抽运快轴校正

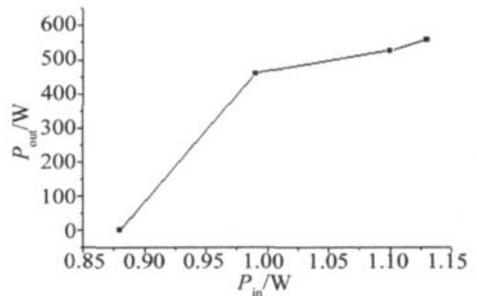


Fig 10 The output curve of laser

镜所设计的 2W 抽运固体激光器的输出特性, 此实验结果表明, 采用圆柱面镜替代理想的非球面柱面镜, 可以达到非常好的光束准直和聚焦效果, 使得激光器输出参数取得良好结果, 光-光效率达到 46% ~ 48%; 同时可以降低成本、简化工艺。

### 4 小结

采用光线追踪的方法, 建立了圆柱面镜面形对二极管激光器快轴校准时的模型及设计方法; 分析了采用圆柱面镜面形对二极管激光器快轴校准时的误差, 得出了采用圆柱面镜面形准直时的关键控制参数是圆柱面半径  $R$  及光源到圆柱面的距离  $L_1$ ; 论证了采用圆柱面镜面作为准直镜时, 只要控制后面聚焦镜  $f$  的焦距和柱面镜到聚焦镜的距离  $L_0$ , 就可以使工作物质中的抽运最小光斑达到零点几个毫米数量级, 该尺寸与基模高斯光束的束腰在同样的数量级, 所以完全满足抽运要求。

#### 参考文献

[1] MEAD P E, BUSH S P, DAV B C C. Single-mode operation of diode-pumped Nd:YAG lasers by pump-beam focusing [J]. IEEE J Q E, 1994, 30(12): 2902~2906  
[2] HALL D G, SMITH R J, RICE R R. Pump-size effects in Nd:YAG lasers [J]. Appl Opt, 1980, 19(18): 3041~3043

### 3 小 结

求解了多点抽运方式下掺镜光纤稳态二能级速率方程组,在保留了再发射项主体的近似情况下,得出了多点抽运光纤激光器的输出功率的近似解析解。然后,对抽运光利用效率进行讨论,可以看到,抽运源越靠近光纤端口,抽运光利用效率越高;并且对单点和多点抽运方案中,抽运光的功率在光纤内的分布进行了对比,结论是多点抽运可以缓解光纤局部过度吸收;最后,将输出功率的解析解与数值解进行对比,结果表明,所推导出的解析解与数值模拟的结果差异很小,可以为多点抽运的光纤激光器的设计和试验提供参考和依据。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] WEI W L, YAN P, OU P *et al*. Numerical analysis and experimental results of output characteristics for strongly pumped Yb<sup>3+</sup> doped double-clad fiber laser [ J ]. *Optical Technique* 2004, 30( 1 ): 13 ~ 19( in Chinese ).
- [ 2 ] LI C, SONG J D. Diode pumped high power fiber lasers and applications [ J ]. *Proc SPIE*, 1999, 3862: 246 ~ 253
- [ 3 ] GUO M X, SHEN G Q, LIU Y T. Technology of laser diode beam shaping [ J ]. *Laser Technology*, 2003, 27( 4 ): 357 ~ 361( in Chinese ).
- [ 4 ] CHEN Y F. Design criteria for concentration optimization in scaling diode end-pumped lasers to high powers: influence of thermal fracture [ J ]. *IEEE J Q E*, 1999, 35( 2 ): 234 ~ 239
- [ 5 ] XIONG Z, LI Z H, MOORE N *et al*. Detailed investigation of thermal effects in longitudinally diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> lasers [ J ]. *IEEE J Q E*, 2003, 39( 8 ): 979 ~ 985
- [ 6 ] JAGU S J, KWATKOWSKI J, ZENDZIAN W *et al*. Characterization of thermo-optic effects in diode end pumped lasers [ J ]. *Proc SPIE*, 2005, 5958: 595821-1 ~ 595821-8
- [ 7 ] FAN T Y, SANCHEZ A. Pump source requirements for end-pumped lasers [ J ]. *IEEE J Q E*, 1990, 26( 2 ): 311 ~ 316
- [ 8 ] KOSHEL R J, WALMSLEY I A. Non-edge-ray design in improved optical pumping of lasers [ J ]. *Opt Engng*, 2004, 43( 7 ): 1511 ~ 1521.
- [ 9 ] HALL D G. Optimum mode size criterion for low gain lasers [ J ]. *Appl Opt* 1981, 20( 9 ): 1579 ~ 1583.
- [ 10 ] PAOLO L. Design criteria for mode size optimization in diode-pumped solid-state lasers [ J ]. *IEEE J Q E*, 1991, 27( 10 ): 2319 ~ 2326
- [ 11 ] LIU J H, LÜ J H, LU J R *et al*. Mode matching research of high power end pumping SSDL [ J ]. *Acta Optica Sinica* 2000, 20( 2 ): 186 ~ 189( in Chinese ).
- [ 12 ] ZHANG Y M. Applied optics first vision [ M ]. Beijing: China Machine Press, 1982: 25 ~ 53( in Chinese ).
- [ 13 ] WANG P Y. Beam-shaping optics delivers high-power beams [ J ]. *Laser Focus World* 2001, 37( 12 ): 115.
- [ 14 ] JABCZYNSKI J K. Quasi-geometrical approach in laser diode optics problems [ J ]. *SPIE*, 1995, 2538: 202 ~ 211

(上接第 510 页)