

LD 阵列侧面泵浦棒状激光介质内的光场研究

张彪, 高玮, 杨照金, 杨鸿儒

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 建立了LD 侧面泵浦激光介质内的光场分布数值模型。通过光线追迹方法, 简化了介质对泵浦光折射的计算方式。利用Matlab 软件数值模拟了泵浦光在介质内的归一化分布。提出获得高质量、高能量的激光输出参数的选取原则。当LD 的束腰半径为 $1\ \mu\text{m}$ 、LD 的数量为 40 个、介质的半径为 1.5 mm、发光面到介质的泵浦距离为 0.5 mm、介质吸收系数在 $2\ \text{cm}^{-1}\sim 6\ \text{cm}^{-1}$ 之间时, 泵浦光在激光介质内的增益分布较好。

关键词: 激光二极管阵列; 侧面泵浦; 光场分布

中图分类号: TN243

文献标志码: A

Light field distribution in side-pumped rod-shaped laser medium of laser diode arrays

ZHANG Biao, GAO Wei, YANG Zhao-jin, YANG Hong-ru

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, china)

Abstract: The numerical model of the light field distribution in the side-pumped laser medium of LD was established. An analytical solution for the pumping light refraction in the rod-shaped gain medium was simplified with ray tracing. The normalized distribution of pumping light in the medium was simulated numerically with Matlab. The selection principle to acquire the parameters of high-quality and high-energy laser output is proposed. The influence of the structural parameters on the distribution of pumping light is analyzed. The experiment result shows that the gain distribution of pumping light in the laser medium is satisfactory when the radius of the beam waist is $1\ \mu\text{m}$, the number of LD is 40, the radius of the medium is 1.5 mm, the pumping distance between the luminous surface and the medium is 0.5 mm and the absorption coefficient of the medium is $2\ \text{cm}^{-1}\sim 6\ \text{cm}^{-1}$.

Key words: laser diode array; side pump; light field distribution

引言

半导体激光器(LD)泵浦的固体激光器(DPSSL)以其效率高、热效应小、体积小、重量轻、寿命长、全固态、可靠性高等优点引起了人们的极大兴趣。相对于传统的灯泵固体激光器而言,由于二极管泵浦的固体激光器泵浦光谱与固体工作物质的吸收光谱相匹配,从总体上说热效应大大减

小,但也存在着热效应导致的负面影响。因此在二极管泵浦的固体激光器中,尤其是在大功率二极管阵列泵浦的情况下,要充分考虑到泵浦光的分布情况,对泵浦光的不均匀泵浦产生的热效应进行仔细分析,从而采取相应的补偿措施,以获得高光束质量、高重频、高能量的激光输出。

高功率DPSSL多采用侧面泵浦结构,泵浦光

由激光介质的侧面直接入射。泵浦光从介质的一侧入射,结构上的原因往往造成泵浦光分布的不均匀,加之泵浦功率较强,大量的泵浦功率转化为热功率,从而导致在晶体横截面内的温度不均匀分布,产生光学畸变。特别是热致双折射效应的存在,将使线偏振光通过工作物质时,光束质量变差且退偏严重,从而导致激光输出功率降低,大大影响了二极管泵浦固体激光器的总体电光效率。因此在大功率 LD 泵浦情况下,如何选取侧面泵浦结构参数,提高激光器的工作性能有重要实用意义。本文在已有理论的基础上^[1-3],建立了二极管阵列侧面泵浦固体激光介质的光场分布数值模型,采用光线追迹法,计算了典型条件下固体激光介质中泵浦光的光场分布情况,并讨论了多种结构参数对泵浦光场分布均匀性的影响。

1 LD 阵列侧面泵浦模型

侧面泵浦用 LD 阵列的发光截面一般是矩形,垂直于发光截面方向(y 方向)的宽度一般为 $(1 \sim 2) \mu\text{m}$, 光束发散角较大 $(35^\circ \sim 45^\circ)$, 光强近似于高斯分布;而平行于发光截面方向(x 方向)的长度则可达 10 mm , 光束发散角较小 $(10^\circ \sim 15^\circ)$ 。由于 LD 发光面尺寸长,泵浦光照射到激光介质上,除介质两端外,中间大部分区域上的泵浦光强可认为是均匀分布的。因此,只需计算介质内垂直于介质长度方向上某一截面内的泵浦光分布情况,就可知道整个介质内部的泵浦光分布情况。由于增益介质增益与泵浦光的吸收成比例,从而可通过模拟泵浦光场的分布来分析增益介质的增益分布。

单个 Bar 侧面泵浦棒状增益介质的情况已有数值模型,泵浦光在增益介质横截面内的光场分布^[4]为

$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{P_0}{\omega_y(x)} \exp \left[-\frac{2y^2}{\omega_y^2(x)} - \alpha(\sqrt{R_0^2 - y^2} + x) \right] \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为点 (x, y) 处的光强; P_0 为光束中心沿棒轴方向(z 方向)单位长度上的泵浦光功率; α 为介质吸收系数; R_0 为增益介质半径; $\omega_y(x)$ 为高斯光束在传播方面 x 处 y 方向上的半宽度,表达式为

$$\omega_y^2(x) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda x}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式中: ω_0 为泵浦光的束腰半径; λ 为泵浦光波长。

如图 1 所示,假设 LD 的束腰位于其发射面上,半径为 ω_0 ; LD 距离棒状增益介质的泵浦距离为 a , 介质的横截面曲率半径为 R_0 , 以其横截面的圆心为原点建立直角坐标系,则 $\omega_y(x)$ 的表达式变为

$$\omega_y^2(x) = \omega_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda(a + R_0 + x)}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right] \quad (3)$$

光束进入激光介质内部,在介质表面会有部分损耗,于是有:

$$I_{\text{内}}(x, y) = I(x, y) \cdot T_{\text{透}}(x_0, y_0) \quad (4)$$

式中: $T_{\text{透}}(x_0, y_0)$ 为入射到点 (x, y) 的光线经过介质侧面点 (x_0, y_0) 处时的透射率,其表达式为

$$T_{\text{透}}(x_0, y_0) = 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)} + \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)} \right] \quad (5)$$

式中 θ_1 和 θ_2 分别为光线在点 (x_0, y_0) 处的入射角和折射角。

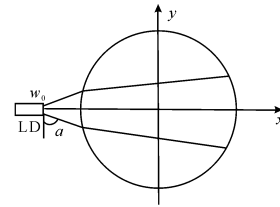


图 1 单个 Bar 侧面泵浦棒状介质示意图

Fig.1 Schematic diagram of rod-shaped medium side-pumped by one bar

在图 1 中,由于 LD 发光区的尺寸远小于激光介质的尺寸,所以可以将 LD 视为点光源, x 轴与 LD 出射光线的夹角为 θ_0 (以 x 轴以上为例), 光线与介质棒侧表面的交点为 (x_0, y_0) , 则 x_0, y_0 的值可以由以下方程求出:

$$\begin{cases} x_0^2 + y_0^2 = R_0^2 \\ y_0 = (a + R_0 - x_0) \tan \theta_0 \end{cases} \quad (6)$$

此时到达介质光线的入射角度 θ_1 为

$$\theta_1 = \theta_0 - \arctan \frac{y_0}{x_0} \quad (7)$$

由折射定律可得到光线在介质内的折射角 θ_2 :

$$\theta_2 = \arcsin(\sin \theta_1 / n) \quad (8)$$

式中 n 为介质的折射率 (Nd:YAG 的折射率为 1.82)。

假设 $R_0 = 2 \text{ mm}$; $a = 2 \text{ mm}$; 当 θ_0 取最大值 22.50° (以 LD 的最大发散角 45° 计算) 时, 光线在介质表面的入射点 (x_0, y_0) 为 $(-1.775, 0.921)$, 则可得入射角为 49.95° 和折射角 θ_2 为 24.87° 。而

由图 2 可知,当光线的入射角度小于 50° 时,介质对光线的透过率基本相同。在高功率 LD 泵浦激光介质的系统中,一般介质的半径都比较大 (R_0 大于 2 mm)。为了提高泵浦光的利用率和系统光-光转换效率,LD 与激光介质之间的距离 a 一般都比较小(通常 $a \leq 2\text{ mm}$),最终 LD 在介质侧表面的最大入射角一般都小于 50° 。也就是说在分析高功率 LD 侧面泵浦激光介质内的光增益时,可以不考虑光线进入介质时由于介质反射产生的对泵浦光增益分布的影响,而只是认为介质对 LD 光线的透射率为固定值,如 90% 。因此,在模拟计算介质内的光增益分布且考虑介质对 LD 光线的反射时,不需要计算各个入射点的坐标值及对应的入射角和折射角,而认为介质表面各点对光线的透射率 $T_{\text{透}}(x_0, y_0)$ 均相同,与入射点坐标 (x_0, y_0) 无关且取值为常数 0.9 。此方法在简化计算的同时也达到了尽可能真实地反映实际泵浦光分布及能量损耗程度的目的。

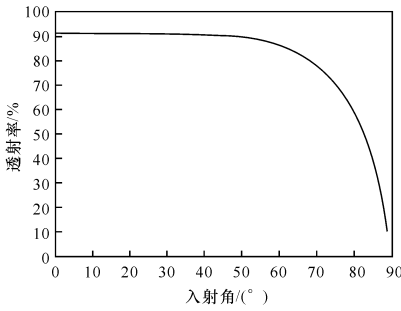


图 2 透射率随入射角度 θ_i 的变化

Fig. 2 Variation of transmissivity with incident angle θ_i

要得到高能量的激光输出,就要采用多个 LD 泵浦介质的结构方式,如将图 1 中的 LD 以坐标原点为中心旋转几个角度,在每个角度上放置 LD,用 n 个 LD 进行泵浦,从而提高了泵浦光的入射功率。将介质内点 (x, y) 的坐标沿顺时针方向旋转角度 θ ,则坐标变为 (x_θ, y_θ) ,此时也将图 1 的坐标平面以原点为中心旋转了角度 θ ,在坐标变换过程中,变换关系为

$$\begin{cases} y_\theta = y \cdot \cos \theta + x \cdot \sin \theta \\ x_\theta = -y \cdot \sin \theta + x \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (9)$$

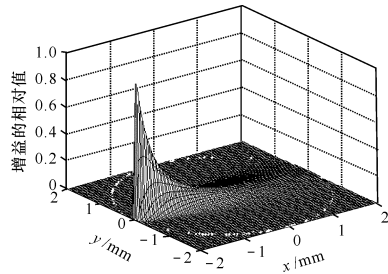
将通过以上坐标变换得到的 (x_θ, y_θ) 值代入 (4) 式,得到 LD 旋转后在点 (x, y) 的光强 $I_{\text{内}}(x, y)$,则点 (x, y) 处第 i 个 LD 产生的光强为 $I_{\text{内}i}(x, y)$,从而得到 n 个 LD 不同角度上点 (x, y) 产生的总光强为

$$I_{\text{总}}(x, y) = \sum_1^n [I_{\text{内}i}(x, y)] \quad (10)$$

为提高泵浦光在介质内的分布均匀性,LD 都是环绕介质棒几何均匀排列的,以图 1 所示的位置为原始坐标系,其他 LD 均为旋转坐标系,最终得到原始坐标系下多个 LD 侧面泵浦光场在介质内的分布情况。

2 计算结果及分析

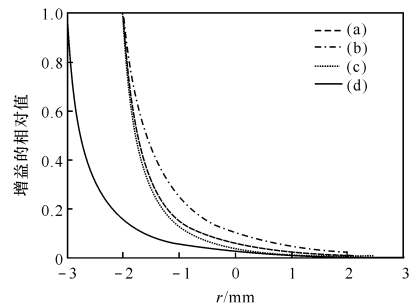
采用 Matlab 软件进行程序设计,开发了计算机模拟程序。输入泵浦结构的各个参数,如增益介质吸收系数和半径、LD 个数及其束腰半径、LD 与增益介质之间的泵浦距离等参数,就可以计算出激光棒横截面内抽运光的分布情况。图 3 为单个 LD 侧面泵浦的泵浦光强度分布图;图 4 为泵浦光分布



$$r=2\text{ mm}, \omega_0=2\text{ }\mu\text{m}, \alpha=4\text{ cm}^{-1}, a=0.3\text{ mm}$$

图 3 单个 LD 侧面泵浦的泵浦光强度分布图

Fig. 3 Intensity distribution of pumping light side-pumped by single LD



- (a) $r=2\text{ mm}, \omega_0=2\text{ }\mu\text{m}, \alpha=4\text{ cm}^{-1}, a=0.3\text{ mm}$
- (b) $r=2\text{ mm}, \omega_0=2\text{ }\mu\text{m}, \alpha=4\text{ cm}^{-1}, a=0.6\text{ mm}$
- (c) $r=2\text{ mm}, \omega_0=2\text{ }\mu\text{m}, \alpha=\text{cm}^{-1}, a=0.3\text{ mm}$
- (d) $r=2\text{ mm}, \omega_0=2\text{ }\mu\text{m}, \alpha=6\text{ cm}^{-1}, a=0.3\text{ mm}$

图 4 光强分布随着棒半径、吸收系数和泵浦距离的变化

Fig. 4 Variation of light-intensity distribution with rod radius, absorption coefficient and pumping distance

在 x 方向(泵浦光传播方向)上随着吸收系数、激光棒半径 r 和 LD 与激光棒的泵浦距离 a 的变化情况。

由图 4 可以看出,吸收系数、泵浦距离和激光棒半径的差异对泵浦光在增益介质中的分布具有较大的影响,因此在设计泵浦结构时应综合考虑,保证泵浦光均匀分布。

2.1 介质吸收系数的影响

图 5 为 20 条 LD Bar 组成的阵列环绕激光棒,其参数为 $r=2\text{ mm}$, $w_0=2\text{ }\mu\text{m}$, $a=1\text{ mm}$ 。当吸收系数较小时(如图 5(a)),泵浦光在棒中心仍有较高的增益分布,横截面内呈现中心高、两边低的增益分布形式。由于吸收系数较小,即离子掺杂浓度较小,激光输出功率也相对较小。当吸收系数较大时(如图 5(b)),光增益在介质边缘也较大,中心部分相对较小,造成泵浦光的非均匀泵浦较大。因此,必须选择合适的介质吸收系数,才能获得较为合适的泵浦光分布,达到高质量光束输出的目的。

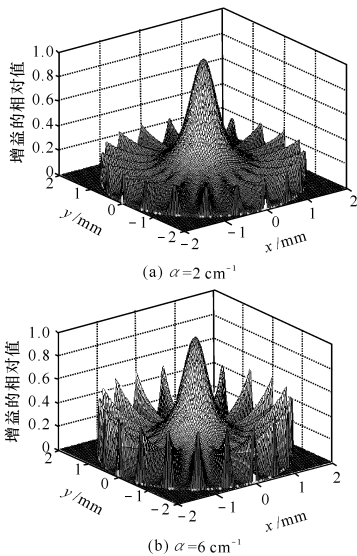


图 5 不同吸收系数时激光棒截面内的泵浦光分布图

Fig. 5 Distribution of pumping light in laser rod cross-section at different absorption coefficient

2.2 LD 泵浦距离的影响

图 6 为 20 条 LD Bar 组成的阵列环绕激光棒,其参数 $r=2\text{ mm}$, $w_0=2\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha=2\text{ cm}^{-1}$ 。当泵浦距离较小时(如图 6(a)),光增益在介质边缘也较大,中心部分相对较小,泵浦光分布不均匀。当泵浦距离较大时(如图 6(a)),增益介质边缘的增益较小,中心处增益较大,有利于高质量激光的输出。

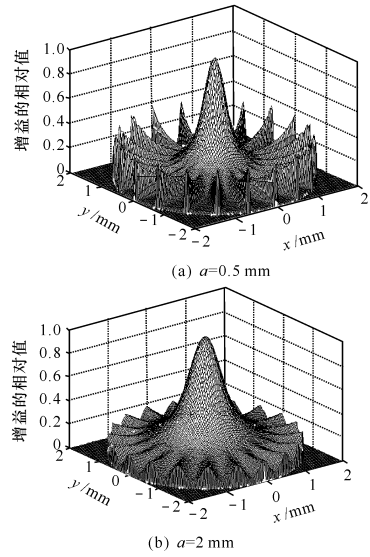


图 6 不同泵浦距离时激光棒截面内的泵浦光分布图

Fig. 6 Distribution of pumping light in laser rod cross-section at different pumping distance

2.3 棒直径的影响

图 7 为 20 条 LD Bar 组成的阵列环绕激光棒,其参数为 $w_0=1\text{ }\mu\text{m}$, $\alpha=2\text{ cm}^{-1}$, $a=0.5\text{ mm}$ 。当棒半径较小时(如图 7(a)),泵浦光在棒中心有较高的增益分布,有利于低阶模的振荡,降低介质的热效

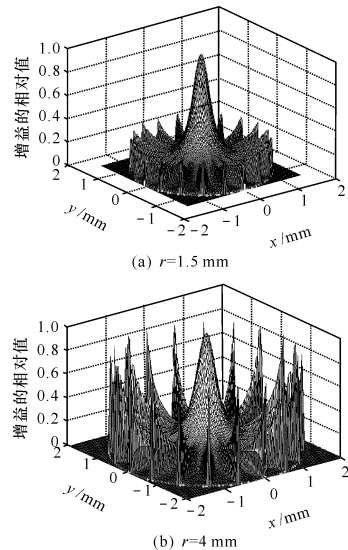


图 7 不同棒半径时激光棒截面内的泵浦光分布图

Fig. 7 Distribution of pumping light in laser rod cross-section at different rod radius

应,提高激光的输出能量。当棒半径较大时(如图7(b)),泵浦光在棒中心的增益较小,主要是由于泵浦光在传输过程中大部分能量在介质边缘被吸收的缘故。

2.4 LD 个数的影响

图8为40条LD Bar组成的阵列环绕激光棒,参数为 $r = 2 \text{ mm}$, $\omega_0 = 2 \mu\text{m}$, $\alpha = 2 \text{ cm}^{-1}$, $a = 2 \text{ mm}$ 。与图6(b)相比,图8(a)棒边缘的泵浦光相对棒中心较弱,泵浦光分布呈高斯状(如图8(b)),泵浦光能量主要集中在棒中心附近,棒边缘部分吸收的泵浦光能量相对较小且较为均匀。

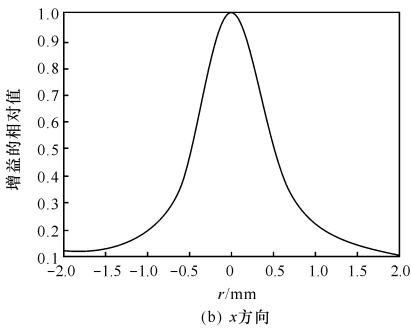
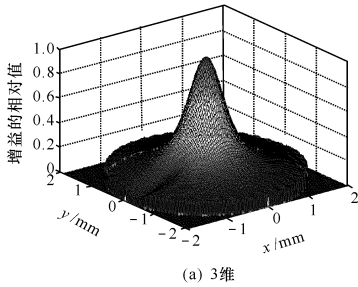


图8 40条LD Bar 泵浦时激光棒截面内的泵浦光分布图
Fig. 8 Distribution of pumping light in laser rod cross-section while 40 LD bars are pumping

2.5 LD 束腰半径的影响

图9为40条LD Bar组成的阵列环绕激光棒,其参数为 $r = 2 \text{ mm}$, $\omega_0 = 1 \mu\text{m}$, $\alpha = 2 \text{ cm}^{-1}$, $a = 2 \text{ mm}$ 。与图8相比,图9中棒边缘的泵浦光相对较强,泵浦光分布虽然也呈高斯状,但泵浦光能量分布较为均匀,输出的激光模式相应较差,不利于低阶模的激光输出。

2.6 仿真结果分析

总结上述LD阵列环绕泵浦激光棒泵浦光场的模拟计算可以看到,在LD侧面直接泵浦结构中,LD的束腰半径、泵浦距离、LD Bar的个数以及

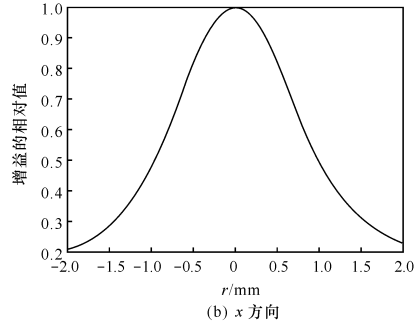
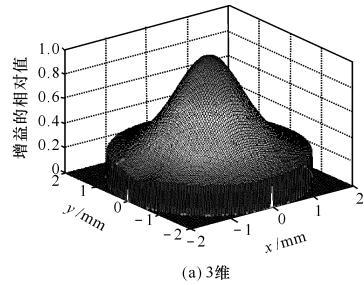


图9 40条LD Bar($\omega_0 = 1 \mu\text{m}$)泵浦时激光棒截面内的泵浦光分布图

Fig. 9 Distribution of pumping light in laser rod cross-section while 40 LD bars ($\omega_0 = 1 \mu\text{m}$) are pumping

介质的吸收系数、棒的半径等参数对增益介质中的光分布都有较大的影响,归纳起来,其对泵浦光分布的影响如下:

1) LD的束腰半径越大、泵浦距离越长,泵浦光传输到增益介质时能量较为分散,被介质边缘吸收的能量也较低,中心处的增益相对较大,光增益分布较为均匀,热效应较小;但由于LD的发散角较大,可能会导致部分泵浦光不能进入增益介质而降低泵浦系统的泵浦效率,同时也导致泵浦结构的尺寸偏大,影响其紧凑性。

2) LD Bar的数量越多,泵浦均匀性也就越高,泵浦光大部分分布在棒中心附近,有利于高质量激光的输出。

3) 在输出的激光能量能够满足要求的情况下,尽量选用半径小的激光棒,有利于提高增益介质中泵浦光的分布均匀性,减小由于非均匀泵浦造成的热不均匀分布,提高整个激光系统电光效率。

4) 在选取增益介质的吸收系数时,应依据泵浦系统的各项参数,有针对性地选取。吸收系数太小时,泵浦光会穿透增益介质入射到对面的LD上而对其产生破坏作用,且输出激光功率也会受到影

响;吸收系数太大时,大部分泵浦光会被介质表面所吸收,造成中心低、周围高的泵浦光分布形式,最终也会影响激光的光束质量及其输出功率。

3 结论

通过对半导体侧面泵浦激光增益介质内泵浦光分布的模拟计算,分析了泵浦结构中各个参数对泵浦光分布的影响规律。设计泵浦结构时应尽量采用数量多的LD对称放置的泵浦方式;泵浦光传输到增益介质的光斑越大,泵浦光的吸收分布也就越均匀。

本文依据激光二极管的传输特性建立了二极管侧面泵浦固体激光器泵浦结构的数值模型,运用该模型可模拟LD束腰半径、增益介质吸收系数等参数对泵浦光分布的影响。

参考文献:

[1] Farruch U O, Buocristiani A M, Byvik C E. An analysis of the temperature distribution in finite

solid-state laser rods [J]. IEEE J Quantum Electron, 1988,24(11):2253-2264.

[2] 王建华,金锋,翟刚,等.二极管阵列侧面泵浦固体激光介质的光场分布[J].红外与激光工程,2005,34(4):421-458.

WANG Jian-hua, JIN Feng, ZHAI Gang, et al. Pump uniformity study of solid state laser rods dircet side-pumped by laser diode [J]. Infrared and Laser Engineering. 2005, 34 (4): 421-458. (in Chinese)

[3] 毛少卿,黄涛,温中一,等.半导体侧面泵浦固体激光器均匀性的计算和分析[J].激光技术,1997,21(3):185-188.

MAO Shao-qing, HUANG Tao, WEN Zhong-yi, et al. Calculation and analyze of homogenoity of diode side pumped solid laser [J]. Laser Technology, 1997,21(3):185-188. (in Chinese)

[4] XIE Wen-jie, TAM Sui-chung, LAM Yee-loy, et al. Influence of the thermal effect on the TEM₀₀ mode output power of a laser-diode side pumped solid-state laser[J]. Applied Optics,2000,39(30):5482-5487.

(上接第333页)

study of automatic testing method on the consistency of optical axis for the continuous vail-focus laser communicating system [J]. SPIE, 2002, 4927: 433-435.

[11] 杨鸿儒. 新概念高能激光武器与强激光光学计量检

测技术[J].应用光学,2005,26(2):1-6.

YONG Hong-ru. The novel high-energy laser weapons and optical metrology test technology for high-energy laser [J]. Journal of Applied Optics, 2005,26(2):1-6. (in Chinese)