

# 端抽运 DPL 中抽运光与谐振腔同轴特性

唐映德<sup>1,2</sup> 过 振<sup>2</sup> 王石语<sup>2</sup> 蔡德芳<sup>2</sup> 文建国<sup>2</sup> 李兵斌<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)  
(<sup>2</sup>西安电子科技大学理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 在端抽运圆棒二极管抽运固体激光器(DPL)中,引入偏离因子来描述抽运光轴线和激光晶体间的同轴程度;并将偏离因子对模式增益和光束质量的影响做了理论分析和模拟,并以光纤耦合半导体激光器端面抽运圆棒Nd:YAG固体激光器进行了相应实验。理论与实验结果表明,偏离因子越小,则低阶模式增益越大,在模式竞争中占据优势,输出激光的光束质量越好。要获得高增益和光束质量较好的低阶模输出,除了保证恰当的谐振腔结构外,控制抽运光与激光晶体同轴程度也是一个重要的手段。

**关键词** 激光器;同轴程度;偏离因子;模式增益;光束质量

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s102009

## Coaxial Degree Characteristics Between the Pumping Light and Laser Resonant Cavity in End-Pumping DPL

Tang Yingde<sup>1,2</sup> Guo Zhen<sup>2</sup> Wang Shiyu<sup>2</sup> Cai Defang<sup>2</sup> Wen Jianguo<sup>2</sup> Li Bingbin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)  
(<sup>2</sup>School of Science, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** In laser diode end-pumping solid-state lasers, the departure gene is introduced to describe the coaxial degree between the pumping light and the columniform laser crystal. The effects of the departure gene on the gain efficient of the oscillating modes and output beam quality are analyzed in theory, and the corresponding experiment is done with the fiber coupling diode lasers end-pumping Nd:YAG lasers. The results of the theory are in accordance with that of experiment; the departure gene is smaller, the gain of lower order mode becomes higher and the output beam quality changes better. Therefore, in order to obtain the lower order mode output with higher gain and better beam quality, control the coaxial degree between the pumping light and laser crystal is an important measure besides holding proper resonant cavity.

**Key words** lasers; coaxial degree; departure gene; mode gain; beam quality

**OCIS codes** 140.2010; 140.2020; 140.3295; 140.3300; 140.3510

## 1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运圆棒固体激光器与普通的氙灯抽运不同,氙灯抽运主要是通过调节谐振腔结构来获得好的抽运效果,而在激光二极管端面抽运圆棒固体激光器中,影响激光输出模式的因素包含抽运功率、抽运光空间强度分布、腔镜扰动、热效应等,而抽运光的抽运功率和三维分布是影响

输出模式的主要因素<sup>[1,2]</sup>。

本文在端抽运圆棒二极管抽运固体激光器(DPL)下,定义一个偏离因子来描述抽运光与激光晶体的同轴程度,对激光模式增益以及光束质量随偏离因子的变化规律进行了理论和实验研究。结果表明,抽运光是影响激光模式输出的重要因素。要获得增益高、光束质量好的低阶模输出,控制抽运光

收稿日期: 2012-01-16; 收到修改稿日期: 2012-03-09

基金项目: 中央高校业务基金(K50511070008)、国家自然科学基金(60078022)和国家重点实验室基金(51438010201DZ0102,51456050104DZ0101)资助课题。

作者简介: 唐映德(1974—),男,硕士,副教授,主要从事光学工程和无线电物理等方面的研究。

E-mail: tangyingde@sohu.com

与激光晶体同轴程度是一种非常重要的手段。

$$\exp\left\{-\frac{2[(x-\Delta x')^2+y^2]}{w^2(z)}\right\}, \quad (8)$$

式中  $H_n(\cdot)$  表示  $n$  阶厄米多项式,  $w(z)$  表示激光光斑半径。在抽运光形状一定的情况下, 则各模式的增益可计算为

$$G_n(p, \Delta x') = \iiint_V s_n(x, y, z) G(x, y, z, P) dx dy dz. \quad (9)$$

设腔长为  $L$ , 输出镜曲率半径为  $R_2$ , 则振荡光轴线相对激光晶体的偏离量  $\Delta x'$  可表示为

$$\Delta x' = \Delta x \frac{R_2 - L}{R + R_2 - L}. \quad (10)$$

晶体中的温度场分布、等效热透镜焦距或曲率半径  $R$  可根据文献[4~6]得到。

定义振荡光与抽运光的偏离因子为

$$\delta = \frac{\Delta x - \Delta x'}{\bar{\omega}_0}, \quad (11)$$

式中  $\bar{\omega}_0$  为基膜振荡光光斑半径, 将(10)代入(11)式:

$$\delta = \frac{\Delta x R}{\bar{\omega}_0 (R + R_2 - L)}. \quad (12)$$

## 2.2 偏离因子 $\delta$ 对振荡光模式增益和光束质量的影响

以腔长  $L=10$  cm, 耦合输出镜曲率半径为 1 m 的平凹腔, 通过理论计算得到基模振荡光的束腰半径为 0.3 mm, 发散角为 2.3 mrad, 以实验测得抽运光束腰半径约为 0.4 mm, 发散角为 2.57 mrad 的圆形高斯光束为例, 激活介质为 Nd:YAG,  $K_c=14$  W/(m·K), 设  $\gamma=0.5$ 。

根据(5)~(8)、(10)、(12)式, 可模拟出偏离因子随抽运功率的变化规律、各模式增益随偏离因子的变化规律如图 1 所示(图中只画出前几阶模式增益情况)。

从图 1 可知, 偏离量  $\Delta x$  一定时, 随着抽运功率的增大, 偏离因子  $\delta$  减小。表明基模振荡光轴线相对几何腔轴的偏离量  $\Delta x'$  增大, 和抽运光轴线之间的偏离程度减小; 在较小的功率( $P < 6$  W)抽运下, 偏离量  $\Delta x$  的增大, 抽运光的偏离量是影响偏离因子的主要因素; 在较大功率( $P > 6$  W)恒定抽运下, 在不同的抽运光偏离量下, 偏离因子  $\delta$  趋于相同, 影响基模振荡光轴线与抽运光轴线之间的偏离程度的因素主要是抽运光的功率。可见, 偏离因子  $\delta$  可以描述抽运光的偏离以及抽运功率对于振荡光偏离量的影响。

同理, 可以模拟出当抽运光偏离量  $\Delta x$  为 0.55 mm 时, 抽运功率逐渐增大到 8 W, 各模式增

## 2 理论分析

在端面抽运圆棒 Nd:YAG 介质中, 假设抽运功率为  $P_0$ , 在  $(x, y, z)$  处的上能级粒子数密度为  $N(x, y, z, P_0)$ , 相应的增益系数为  $G(x, y, z, P_0)$ , 则当抽运功率为  $P$  时, 可以定义  $(x, y, z)$  处的增益系数为

$$G(x, y, z, P) = G(x, y, z, P_0)^{N(x, y, z, P)/N(x, y, z, P_0)}, \quad (1)$$

式中  $N(x, y, z, P)$  表示抽运功率为  $P$  时在  $(x, y, z)$  处的上能级粒子数密度。抽运光的形状在一定的情况下, 上能级粒子数密度与抽运光的功率成正比, 故(1)式可变为

$$G(x, y, z, P) = G(x, y, z, P_0)^{P/P_0}. \quad (2)$$

同理可以得出:

$$G(x, y, z, P_0) = G_0(P_0)^{I(x, y, z, P_0)/I_0(P_0)}, \quad (3)$$

式中  $G_0(P_0)$  和  $I_0(P_0)$  表示抽运功率为  $P_0$  时抽运光中心轴线上增益系数和抽运光的强度,  $I(x, y, z, P_0)$  表示抽运功率为  $P_0$  时  $(x, y, z)$  处的抽运光强度。根据(2)式和(3)式得到当抽运功率为  $P$  时,  $(x, y, z)$  处的增益系数:

$$G(x, y, z, P) = G_0(P_0)^{(P/P_0)[I(x, y, z, P_0)/I_0(P_0)]}. \quad (4)$$

若抽运光为圆形高斯分布, 且抽运光轴线与腔轴重合, 则

$$\frac{I(x, y, z, P_0)}{I_0(P_0)} = \exp\left[\frac{-2(x^2+y^2)}{w_p^2(z)}\right], \quad (5)$$

式中  $w_p(z)$  表示光斑宽度, 在旁轴近似下:

$$w_p(z) = w_{p_0} + \theta |z - z_0|, \quad (6)$$

式中  $w_{p_0}$  和  $z_0$  分别表示抽运光的束腰半径和束腰位置,  $\theta$  表示半远场发散角。

### 2.1 偏离因子 $\delta$

在激光二极管端面抽运圆棒固体激光器中, 设抽运光的中心轴线与激光晶体轴线之间存在一定的偏离量  $\Delta x$ , 则(5)式修正为

$$\frac{I(x, y, z, P_0)}{I_0(P_0)} = \exp\left\{\frac{-2[(x-\Delta x)^2+y^2]}{w_p^2(z)}\right\}. \quad (7)$$

抽运光轴线相对腔轴的偏离, 使基模振荡光轴线相对腔轴也有一定偏离。假定基模振荡光轴线仅在  $x$  方向平移, 相对几何腔轴的偏离量为  $\Delta x'$ , 则归一化的振荡光光强分布可表示为<sup>[3]</sup>

$$s_{n,0}(x, y, z) = \frac{2}{\pi w^2(z) 2^n n!} H_n^2\left[\frac{\sqrt{2}(x-\Delta x')}{w(z)}\right] \times$$

益随偏离因子的变化关系如图 2 所示。

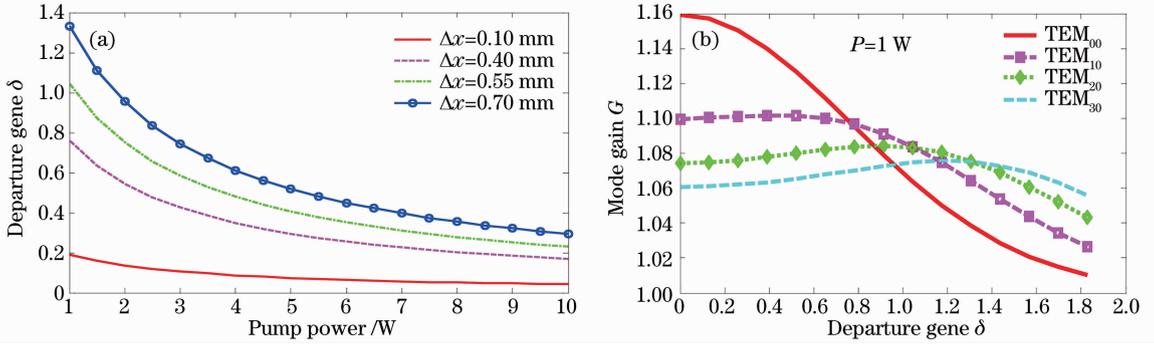


图 1 (a) 偏离因子  $\delta$  随离轴抽运光偏离量  $\Delta x$  和抽运光功率  $P$  的变化; (b) 抽运功率  $P$  一定时, 模式增益  $G$  随偏离因子  $\delta$  的变化

Fig. 1 (a) Departure gene change with  $\Delta x$  and  $P$ ; (b) mode gain varies with  $\delta$  with the pumping power invariable

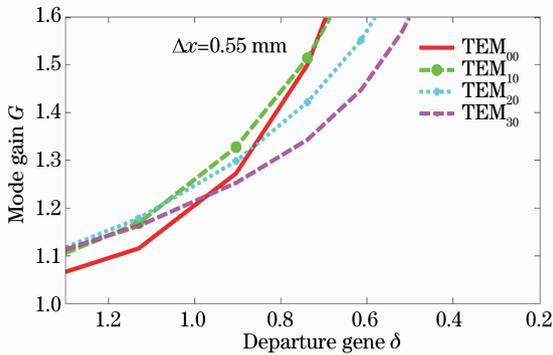


图 2 抽运光偏离量  $\Delta x$  一定时, 模式增益  $G$  随偏离因子  $\delta$  的变化

Fig. 2 Mode gain varies with  $\delta$  with the  $\Delta x$  invariable

由图 2 可以看出, 当离轴抽运光偏离量  $\Delta x$  一定时, 随着抽运功率  $P$  的增大, 偏离因子  $\delta$  减小, 各阶模式增益增加, 当偏离因子  $\delta$  减小到某个值时, 低阶模的增益大于高阶模增益, 低阶模在模式竞争中逐渐占据优势, 故输出模式逐渐由高阶向低阶变化。

假定在多模均可起振的情况下, 保持抽运功率  $P$  为 2.5 W, 抽运光偏离量  $\Delta x$  从 0.10 mm 增大到 0.70 mm, 可模拟出基模增益占总增益的比例随偏离因子的变化关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 当抽运功率较小时, 输出模式主要受偏离量的影响, 基模在总模式增益中的比例减小, 故输出激光光束质量变差。

同理, 当保持抽运光的偏离量  $\Delta x$  为 0.55 mm 时, 输入功率从 1.5 W 增加到 8.0 W, 可模拟出基模增益占总增益的比例随偏离因子  $\delta$  的变化规律, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 当抽运光的偏离量  $\Delta x$  不变时, 随着抽运功率  $P$  的增大, 抽运光功率对激光输出模式逐渐占主要地位。

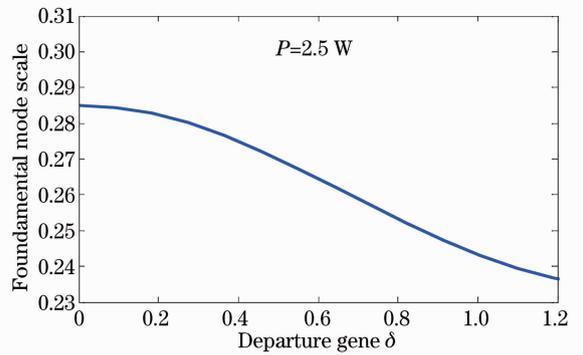


图 3 在抽运光功率一定下, 基模增益占总增益的比例随偏离因子  $\delta$  的变化

Fig. 3 Scale of the gain of the fundamental mode in overall gain changes with  $\delta$  with the pumping power invariable

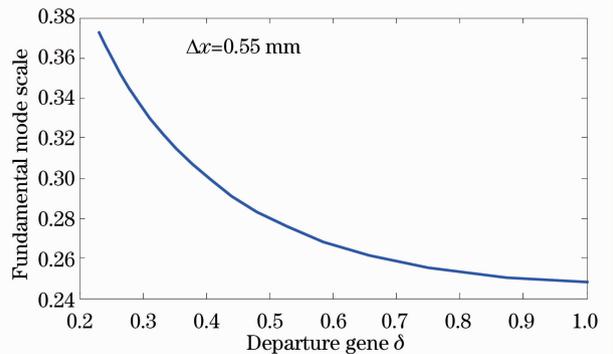


图 4 在抽运光偏离量  $\Delta x$  不变下, 基模增益占总增益中的比例随偏离因子  $\delta$  的变化

Fig. 4 Scale of the gain of the fundamental mode in overall gain changes with  $\delta$  with  $\Delta x$  invariable

### 3 实验结果及其分析

实验装置如图 5 所示, 抽运源为 SDL10 W 光纤耦合半导体激光器, 固定在一个可微调的三维支架上, 利用组合透镜把光纤头的输出光耦合进入激

活介质,激活介质采用掺杂原子数分数为 1%,尺寸为  $\Phi 4 \times 10$  mm 的 Nd:YAG 晶体棒,其抽运端面镀有 808 nm 增透、1064 nm 高反膜,耦合输出镜选用曲率半径为 1000 mm、透射率为 11.2% 的凹面镜,腔长 100 mm。利用谐振腔参数理论计算得到振荡光束腰半径为 0.32 mm,实验中利用刀口法测得抽运光束腰半径为 0.4 mm。采用半导体致冷器 (TEC) 致冷,并利用循环冰水带走 TEC 热端的热量,使激光器工作在最佳的温度上,从而实现谱线匹配。

在抽运功率保持 1 W 不变时,当  $\Delta x = 0, 0.40, 0.55, 0.70$  mm 时,用 CCD 拍摄下输出模式随偏离因子的变化如图 6 所示。

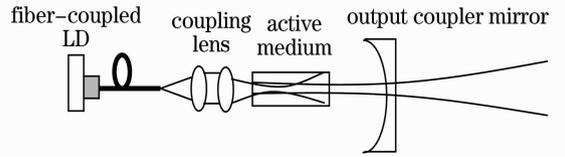


图 5 光纤耦合 LD 端面抽运固体激光器结构示意图  
Fig. 5 Schematic of fiber-coupling LD end-pumped solid-state laser

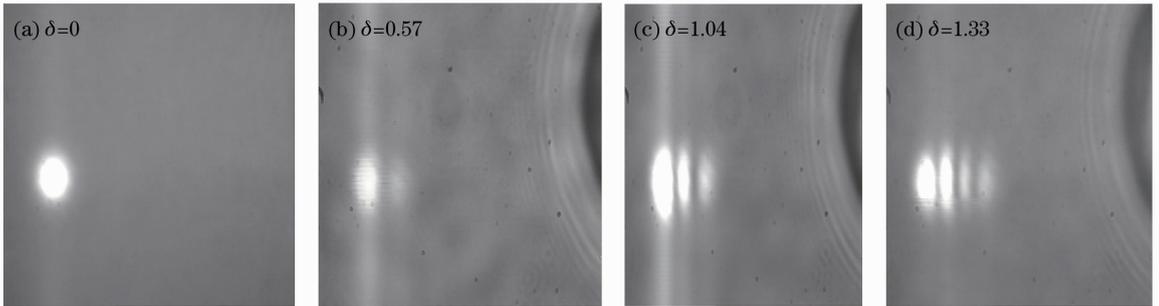


图 6 抽运功率一定,激光输出模式随偏离因子  $\delta$  的变化

Fig. 6 Output mode varies with  $\delta$  with the pumping power invariable

从图 6 可知,在抽运功率保持 1 W 不变下,随着偏离因子  $\delta$  的增大,输出模式从低阶模向高阶模变化。依据图 1,在小功率抽运下,抽运光的偏离量对激光输出模式的影响占主要地位。随着抽运光的偏离量  $\Delta x$  的增加,偏离因子增大,当偏离因子  $\delta$  增大到 0.7 左右时,一阶模的增益将逐渐大于基模,当偏离因子  $\delta$  增大到 1.1 左右时,二阶模的增益大于一阶,当偏离因子  $\delta$  增大到 1.4 左右时,四阶模的增

益大于三阶,也即高阶模将随着偏离因子的增大而在模式竞争中逐渐占据优势,因此,输出模式逐渐从低阶向高阶变化。实验结果与理论分析结果吻合较好。

保持抽运光偏离量  $\Delta x$  不变,增大抽运功率(从 1 W 增大到 8 W),用 CCD 拍摄输出模式随  $\delta$  的变化。实验中发现抽运光在不同的偏离量下模式随  $\delta$  的变化规律相似。图 7 列出了其中一个抽运位置下 ( $\Delta x = 0.55$  mm) 的激光输出模式随  $\delta$  的变化。

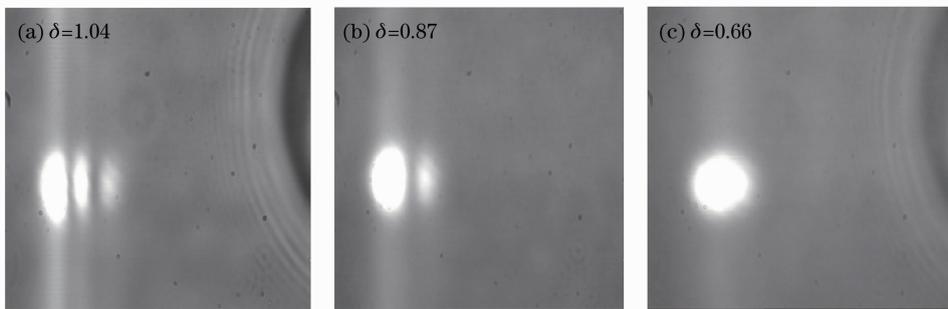


图 7 抽运光偏离量  $\Delta x$  一定,激光输出模式随偏离因子的变化

Fig. 7 Output modes vary with  $\delta$  with  $\Delta x$  invariable

从图 7 可知,当抽运光的偏离量  $\Delta x$  一定时,随着偏离因子的减小,低阶模在模式竞争中逐渐占据优势,故输出模式逐渐从高阶向基模变化。该结果与图 2 和图 4 所示的理论基本吻合。

偏离量  $\Delta x$  下,对输出光进行测量,得到输出激光光束质量因子  $M^2$  随偏离因子的变化曲线如图 8 所示。

从图 8 可以看出,当抽运功率  $P = 2.5$  W 时,激光输出模式主要受偏离量的影响。随着抽运光偏离量  $\Delta x$  的增大,偏离因子的增大,  $M^2$  因子增大,光束

在抽运光功率为 2.5 W 时,抽运光轴线在不同

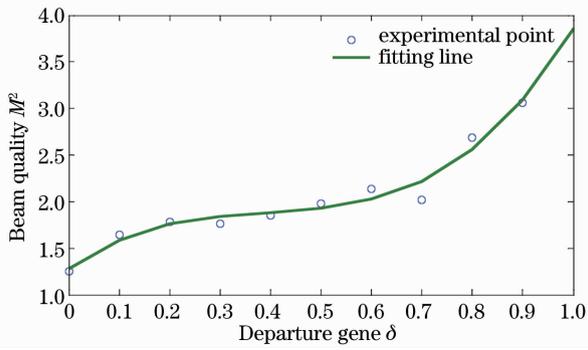


图 8 抽运功率  $P$  一定时  $M^2$  因子随偏离因子  $\delta$  的变化

Fig. 8  $M^2$  gene varies with  $\delta$  with the pumping power invariable

质量变差。根据图 4 可知,随着偏离因子的增大,基模在输出激光中的比例减小,故光束质量变差。实验结果与理论基本吻合。

## 4 结 论

在激光二极管端面抽运固体激光器中,当抽运光的形状一定下,引入了偏离因子  $\delta$  来描述抽运光与激光晶体的同轴程度,并研究了偏离因子对振荡光模式的增益和光束质量的影响。理论和实验结果表明,抽运光是影响激光输出模式的主要因素,控制抽运光与激光谐振腔同轴程度,减小偏离因子可以

获得增益高和光束质量较好的低阶模输出。

## 参 考 文 献

- 1 Ding Xin, Li Xue, Sheng Quan *et al.*. Impact of radial and tangential thermal lens effect on output characteristics of high brightness lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (11): 2780~2783  
丁欣,李雪,盛泉等. 径向、切向热透镜效应对高亮度激光器输出特性的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2780~2783
- 2 Liu Wei, Wang Shiyu, Lian Tianhong *et al.*. Influence of spatial intensity distribution of pump light on transverse modes distribution in cavity [J]. *Electronic Science & Technology*, 2010, **23**(10): 118~122  
刘玮,王石语,连天虹等. 泵浦光空间强度分布对激光腔内横模分布的影响[J]. *电子科技*, 2010, **23**(10): 118~122
- 3 Walter Koechner. *Solid-State Laser Engineering*[M]. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- 4 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Thermal lens determination in solid-state laser by using astigmatic cavity[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0908006  
郑耀辉,王雅君,彭堃墀. 一种利用像散腔测量热透镜焦距的方法[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0908006
- 5 Li Jian, Chen Feng, Zhang Haijuan *et al.*. Research of quasi-three-level thermal effect of laser-diode-pumped Nd:YAG crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2404~2408  
李健,陈锋,张海娟等. 激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体准三能级的热效应研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2404~2408
- 6 Pan Sunqiang, Liu Chong, Zhao Zhigang *et al.*. Thermal effects and thermal focal length measurement of laser diode end-pumped solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37** (10): 2445~2450  
潘孙强,刘崇,赵智刚等. 激光二极管端面抽运固体激光器的热效应和热透镜焦距测量[J]. *中国激光*, 2010, **37**(10): 2445~2450

栏目编辑:李文喆