

文章编号: 0258-7025(2008)09-1313-05

单级静态高峰值功率灯抽运脉冲 Nd:YAG 固体激光器

刘学胜¹ 夏姣贞² 鄢 歆¹ 虎 跃¹ 尧 舜¹ 曹银花¹ 王智勇¹

(¹ 北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022; ² 浙江树人大学基础科学部, 浙江 杭州 310015)

摘要 报道了采用对称平面平行腔结构实现单级静态输出 30 kW 高峰值功率灯抽运 Nd:YAG 固体激光器的研究结果。从速率方程出发, 推导出脉冲 Nd:YAG 固体激光器的单脉冲能量表达式, 模拟出输出镜最佳透过率及最大输出能量。通过实验选取激光器工作的最佳参数, 研制出一台高峰值功率灯抽运脉冲 Nd:YAG 激光器, 理论模拟和最佳实验结果基本一致。激光器在最大输入电压为 800 V, 脉宽为 2 ms 时, 输出最大单脉冲能量 60 J, 最大峰值功率 30 kW, 光束质量 M^2 为 5.9, 总体电光转换效率 3.3%。在最大输入电压为 800 V, 脉宽为 1.5 ms 时最大平均功率 405 W。采用该激光器切割 6 mm 低碳钢和 4 mm 不锈钢, 在脉宽为 2 ms, 频率为 6 Hz, 峰值功率为 30 kW 时, 切割 4 mm 不锈钢速度为 1 mm/s, 切割 6 mm 低碳钢速度为 1.5~2 mm/s。

关键词 激光技术; 固体激光器; 对称平面平行腔; 双灯抽运; 峰值功率

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083509.1313

High Peak Power Lamp-Pumped Pulsed Nd:YAG Solid-State Laser with One Cavity

Liu Xuesheng¹ Xia Jiaozhen² Yan Xing¹ Hu Yue¹

Yao Shun¹ Cao Yinhua¹ Wang Zhiyong¹

(¹ College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)
(² Physics Department, Zhejiang Shuren University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract The experiment results of high peak power lamp-pumped pulsed Nd:YAG laser adopting symmetrical parallel plane cavity are reported. Base on the rate equation, the expression of single pulse energy of pulsed Nd:YAG solid-state laser is derived with the simulated optimum transmissivity and maximum output energy. The optimal parameters are obtained by the experiments, and a high peak power lamp-pumped pulsed Nd:YAG laser is developed with the results of theory simulating and optimal experiments being consistent with each other. When the laser works under 800 V voltage, 2 ms pulse width, it outputs laser with energy of 60 J, high peak power of 30 kW with beam quality $M^2 = 5.9$, and the total electro-optic efficiency of 3.3%. When it works under 800 V voltage, 1.5 ms pulse width, the maximum output average power is 405 W. The 6 mm mild steel and 4 mm stainless steel were cut by the laser with the 2 ms pulse width, 6 Hz frequency and 30 kW peak power. The cutting speed for 4 mm stainless and 6 mm mild steel is 1 mm/s and 1.5~2 mm/s, respectively.

Key words laser technique; solid-state laser; symmetrical parallel plane cavity; dual-lamp pumping; peak power

1 引 言

波长 1.064 μm 的高功率 Nd:YAG 固体激光

因其波长较短、材料吸收率高、体积小、能采用光纤传输等优点, 成为工业加工领域中颇具竞争力的加

收稿日期: 2008-03-26; 收到修改稿日期: 2008-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(604070090)和北京市科技新星基金(954810900)资助项目。

作者简介: 刘学胜(1980—), 男, 四川人, 博士研究生, 主要从事大功率固体激光器的研究。

E-mail: xueshengl@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970—), 男, 重庆人, 研究员, 博士生导师, 主要从事大功率半导体及固体激光器的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn

工光源。材料加工中所用光源的峰值功率越高,加工效率也越高,加工质量(再铸层、热应力等)也越好。德国 trumpf(Hass)公司研制的高功率 Nd:YAG 脉冲固体激光器,单级脉冲平均功率为 550 W,光束参数乘积为 25 mm·mrad,最大峰值功率为 9 kW,价格昂贵。国内武汉楚天激光(集团)股份有限公司最新研制的固体激光焊接机最大单脉冲能量为 50 J,最大峰值功率为 2.5 kW;北京工业大学激光工程研究院单腔 500 W 脉冲固体激光器的最大单脉冲能量为 80 J^[1,2],最大峰值功率为 8 kW;北京佛克斯激光设备有限公司引进法国 Quantel 公司生产制造的 IQL 系列 YAG 激光器,单级最大输出功率 400 W,最大单脉冲能量 45 J,最大峰值功率为 1.8 kW,双级输出平均功率为 750 W,单脉冲能量为 70 J,最大峰值功率 2.8 kW,电光转换效率 <2%,且体积相当庞大。

本文从速率方程出发,推导出单脉冲能量表达式,并采用对称平行平面腔,通过实验选取最佳透射率,得到输出最大能量和最大峰值功率。通过理论和实验研究,得到最大单脉冲能量为 60 J,最大峰值功率为 30 kW,平均功率 405 W,光束质量 $M^2 = 5.9$,电光转换效率为 3.3%。

2 理论分析

由于 Nd:YAG 激光器为四能级系统,激光下能级寿命为 30 ns^[3]左右,对于长脉冲激光器,激光下能级粒子很快无辐射跃迁到基态,所以下能级粒子数密度为零,反转粒子数密度 Δn 即是上能级粒子数密度 n_1 , T_1 为增益等于损耗的时间, T 为激光脉冲宽度,当 $t < T_1$ 时,腔内光子数密度 $\varphi = 0$,则 n_1 随时间变化为

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{\alpha}{Vh\nu_p} P_{in} - \frac{n_1}{\tau}, \quad (1)$$

式中 P_{in} 为激光器注入电功率, $h\nu_p$ 为抽运光子能量, V 为激活介质在光束截面内的体积, τ 为激光上能级粒子寿命, α 代表抽运到激光上能级粒子数所吸收的能量占输入能量的比例, $\alpha/Vh\nu_p$ 代表单位输入电能抽运到激光上能级的粒子数密度。对 Nd:YAG 晶体,通常被抽运的粒子仅占基态粒子数很少的一部分,那么基态粒子数密度可看作常量,故 α 可以认为是常数。

对(1)式整理并积分得

$$\int_0^{\Delta n_1} \frac{1}{n_1 - \frac{\alpha\tau}{Vh\nu_p} P_{in}} dn_1 = - \int_0^{T_1} \frac{1}{\tau} dt, \quad (2)$$

则 Δn 达到阈值 Δn_t 的时间 T_1 为

$$T_1 = -\tau \ln\left(1 - \frac{Vh\nu_p \Delta n_t}{\alpha\tau P_{in}}\right), \quad (3)$$

当 $t > T_1$ 时, φ 和 n_1 所满足的速率方程^[4] 为

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Delta n \sigma c \varphi - \frac{\varphi}{\tau_R}, \quad (4)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{\alpha}{Vh\nu_p} P_{in} - \Delta n \sigma c \varphi - \frac{n_1}{\tau}, \quad (5)$$

式中 c 为光在 YAG 晶体中的传播速度; σ 为受激发射截面; τ_R 为腔内光子寿命

$$\tau_R = \frac{t_r}{\ln[1/(1-R)] + \gamma}, \quad (6)$$

式中 t_r 为光在谐振腔内往返一周的时间, R 为输出镜透过率, γ 为腔内吸收及散射损耗。

将(4)和(5)式相加,积分得

$$\int_0^{\Delta n_1} d\varphi + \int_{\Delta n_1}^{\Delta n_1} dn_1 = \int_{T_1}^T \frac{\alpha}{Vh\nu_p} P_{in} dt - \int_{T_1}^T \frac{\varphi}{\tau_R} dt - \int_{T_1}^T \frac{n_1}{\tau} dt, \quad (7)$$

(7) 式中最后一项为自发辐射,利用 $\Delta n \approx \Delta n_t$ 可得

$$\int_{T_1}^T \varphi dt = \left(\frac{\alpha}{Vh\nu_p} P_{in} - \frac{\Delta n_t}{\tau}\right) (T - T_1) \tau_R, \quad (8)$$

$$E_{in} = T \times P_{in}, \quad (9)$$

将(3),(6),(9)式代入(8)式,并利用

$$E_{out} = \int_{T_1}^T \frac{Sch\nu}{2} \varphi \ln\left(\frac{1}{1-R}\right) dt, \quad (10)$$

$$t_r = 2l/c, \quad (11)$$

$$V = Sl, \quad (12)$$

式中 S 为光束横截面积, l 为 YAG 晶体长度.可得

$$E_{out} = \frac{\alpha\nu}{\nu_p} \left(E_{in} - \frac{T}{\tau} \frac{Vh\nu_p \Delta n_t}{\alpha}\right) \times \left[1 + \frac{\tau}{T} \ln\left(1 - \frac{T}{\tau} \frac{Vh\nu_p \Delta n_t}{\alpha E_{in}}\right)\right] \times \frac{\ln[1/(1-R)]}{\ln[1/(1-R)] + \gamma}, \quad (13)$$

式中 ν 为激光频率。(13)式为 Nd:YAG 脉冲激光器输出能量表达式。

将经典参数: $\alpha = 0.07$, $\nu/\nu_p = 0.5$, $\gamma = 0.1$, $\sigma = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,并设 $P_{in} = 985 \text{ kW}$, $l = 15 \text{ cm}$, $S = 0.5024 \text{ cm}^2$,由(13)式和 $\Delta n_t = \{\ln[1/(1-R)] + \gamma\}/2\sigma l$,模拟得到输出能量与透过率的关系,如图 1 所示。由图可见,激光器在最佳透过率 75% 时获得最大能量输出。在脉宽 $T = 2 \text{ ms}$ 时,输入电能量为 1970 J 时,模拟激光器输出为 65.4 J,其输入-输出能量的关系如图 2 所示。当 $R = 75\%$ 时,由图 2 可见输出功率随抽运功率的增大近线性增加,曲线与输

入能量坐标轴的交点 68 J 为谐振腔的阈值点, 当输入电能量大于 68 J 时产生激光。

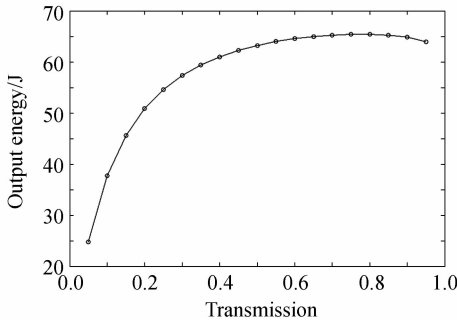


图 1 透过率与输出能量曲线

Fig. 1 Transmissivity versus output energy

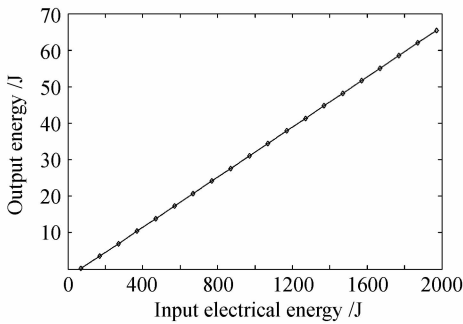


图 2 输入-输出能量曲线

Fig. 2 Output energy versus electrical input energy

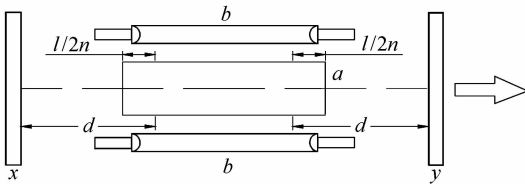


图 3 谐振腔结构示意图。a: 工作物质; b: 抽运灯; x, y: 腔镜

Fig. 3 Schematic experimental setup of laser. a: laser rod; b: pump lamp; x, y: cavity mirror

高能高重复频率脉冲固体激光器连续工作时同连续固体激光器一样, YAG 晶体被视为焦距为 f 的类透镜, 晶体的屈光度 $D = 1/f$, 晶体类透镜主平面离端面距离一级近似为 $l/2n$, l 为晶体长度, n 为晶体中心折射率, 谐振腔采用对称平行平面谐振腔, 其结构如图 3 所示, d 为类透镜主平面到谐振腔前后镜面的距离。由温度、热致双折射、端面效应导致晶体折射率与半径成二次方关系^[5], 则沿晶轴传播的光束也将发生二次方的空间相位畸变, 从而导致激光器效率降低, 稳定性变差, 这些问题都可通过谐振腔的优化设计来解决。

输出耦合镜处的单程 ABCD 光学矩阵可表示

为

$$M = \begin{bmatrix} A' & B' \\ C' & D' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -D & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - dD & d(1 - dD) + d \\ -D & 1 - dD \end{bmatrix}, \quad (14)$$

屈光度 D ^[5] 表示为

$$D = \frac{P_{in}}{FK} \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dt} + n_0^3 \beta C_{r,\theta} + \frac{r_0 \beta (n_0 - 1)}{l} \right), \quad (15)$$

由于球面谐振腔 g 参数为

$$g_1 = A' - B'/R_1, \quad g_2 = D' - B'/R_2, \quad (16)$$

对于平面平行谐振腔 $R_1 = R_2 = \infty$, 所以

$$g_1 = A' = 1 - dD, \quad g_2 = D' = 1 - dD, \quad (17)$$

由式(16)可以看出, 随着 Nd:YAG 晶体棒的热焦距变化, g_1 和 g_2 值会发生相应的变化, 谐振腔的工作点在 g 参数坐标系上是一条动态直线, 如图 4 所示。图中为对称谐振腔的 g 参数动态工作曲线, 两坐标轴 ($g_1 = 0, g_2 = 0$) 和双曲线 $g_1 \times g_2 = 1$ 决定了谐振腔的稳定区和非稳定区的范围。因为采用对称谐振腔, 所以动态工作点 $A(1, 1)$ 开始沿直线过原点 $B(0, 0)$, 到达点 $C(-1, -1)$, 再进入非稳区, 在动态曲线移动过程中, 经过 $g_1 = 0, g_2 = 0$ 和 $g_1 \times g_2 = \pm 1$ 的三个临界点, 当 $g_2 = g_1 = 1$ 时, $D = 0$; 当 $g_2 = g_1 = 0$ 时, $D = 1/d$; 当 $g_2 = g_1 = -1$ 时, $D = 2/d$ 。

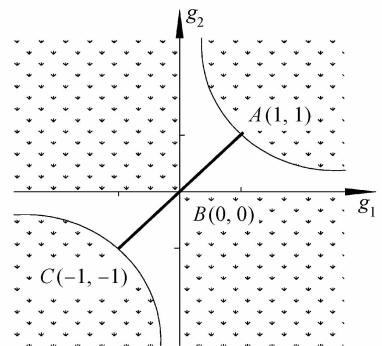


图 4 谐振腔稳区图, 阴影部分为非稳区

Fig. 4 Stability diagram of an optical resonator. Shadow areas indicate the regions of unstable operation

工业级脉冲固体激光器的注入电功率大, 在逐渐注入电功率的同时, 由于晶体的热效应加强, 谐振腔的稳定点也随之移动。当注入功率为零或很小时, $D = 0$, 谐振腔工作在图 4 $A(1, 1)$ 点, 加大电功率, D 增大, 当 $D = 1/d$ 时, 谐振腔工作在临界点 $B(0, 0)$, 输出功率不稳定, 继续加大电功率, D 继续增大, 当 $D = 2/d$ 时, 谐振腔工作在临界点 $C(-1, -1)$, 该点输出功率最大, 但不稳定, 通常注入的电

功率比在 C 点的电功率低。

3 实验结果与分析

激光器的高能量、高峰值功率输出与灯的电光效率、晶体吸收率、谐振腔能量转换效率及抽运腔内各种损耗息息相关。实验抽运源采用 $\phi 9 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 双灯 ($V(\text{Kr}) : V(\text{Xe}) = 9 : 1$) 抽运, 晶体采用 Nd 原子数分数为 1%, 尺寸为 $\phi 8 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的 Nd:YAG 激光晶体。抽运腔采用双椭圆金属镀金腔, 谐振腔采用具有大模体积的对称平行平面腔, 其实验结构如图 3 所示。通过对光学谐振腔 $g_1 \sim g_2$ 参数及谐振腔的光学长度^[6,7] 进行优化设计, 使激光器在整个工作范围内均稳定工作, 并优化输出镜透过率使激光器输出功率最高, 能量最大。

通过实验研究, 最终选取几何腔长为 760 mm, 输出镜最佳透过率为 65%。实验测出不同脉宽下抽运灯两端电压对输出单脉冲能量曲线如图 5 所示。当抽运脉宽为 0.3 ms, 抽运频率为 40 Hz 时, 最大输出单脉冲激光能量为 7 J, 峰值功率为 23 kW。当抽运脉宽为 2 ms, 抽运频率为 6 Hz 时, 随着抽运

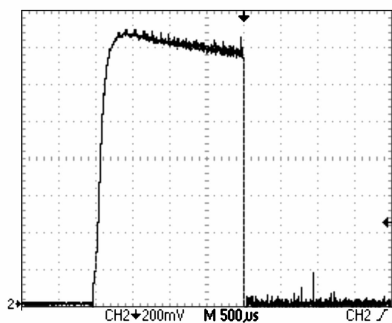


图 5 脉宽为 2 ms, 单脉冲能量为 60 J 的输出激光波形图

Fig. 5 Waveform of output laser with the pulse width 2 ms, single pulse energy 60 J

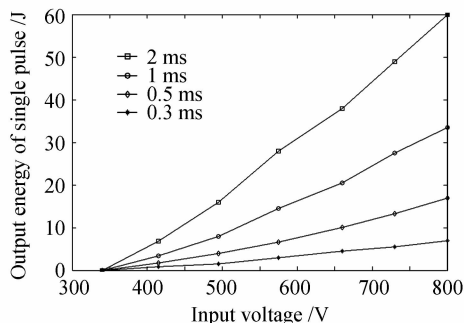


图 6 不同脉宽下脉冲电压与单脉冲能量的关系

Fig. 6 Experimentally measured pulse voltage versus single pulse energy with different pulse widths

电压从 340 V 增加到 800 V, 输出激光能量也从 0 J 成近线性增加到 60 J, 通过光电探头和示波器测得每个脉冲输出激光波形如图 5 所示, 每格为 0.5 ms, 产生激光脉冲宽度为 2 ms, 所以输出激光的最大峰值功率为 30 kW。其中当抽运脉宽为 0.5 ms, 脉冲频率为 24 Hz, 输入功率为 12 kW (800 V) 时, 输出单脉冲能量为 16.9 J, 采用激光功率计测量输出平均功率 405 W, 总电光转换效率为 3.3%。如图 6, 随着电压的增大, 输出能量成线性增加, 无明显拐点, 说明脉冲激光器热致双折射^[8] 效应所产生的径向、切向热焦距^[9] 在通过 $g_1 \sim g_2$ 临界点时双焦点几乎同时进入谐振腔内, 输出功率无明显变化, 与理论模拟的输出能量随输入能量的线性变化曲线相似。曲线与坐标轴的交点即为激光器的阈值注入能量, 实验测得阈值电压为 340 V, 对应的注入能量即阈值能量为 56 J, 实验在脉宽为 2 ms 时输出的最大单脉冲能量 60 J 与模拟的最大单脉冲能量 65.4 J 也很接近。

图 7 是在电压为 800 V 时, 脉宽对激光工作频率的关系曲线。由图可知, 在脉宽为 2 ms 时, 频率最大为 6 Hz, 在脉宽为 0.05 ms 时, 频率为 245 Hz。

光束质量是在激光器注入能量为 1970 J, 脉宽为 2 ms, 频率为 6 Hz 时采用感光像纸成像法测量的, 输出口处光斑如图 8 (a), 近似测量约为 8.1 mm, 离此处 1 m 远的光斑如图 8 (b), 其包含 86% 激光能量的光斑直径为 9.1 mm, 求得输出激光束的光束参数乘积为 $2 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 光束质量 $M^2 =$

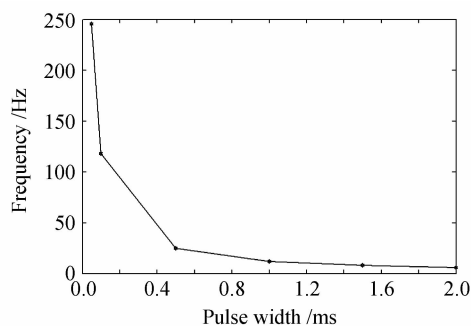


图 7 脉宽与激光工作频率的关系

Fig. 7 Pulse widths versus frequency

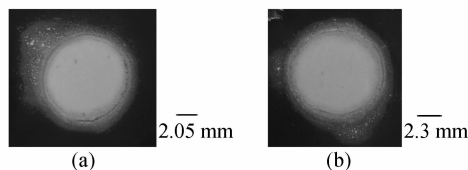


图 8 输出镜处的光斑(a)和 1 m 远处光斑(b)

Fig. 8 Spots at the position of output mirror (a) and 1 m faraway (b)

$2 \times \pi/\lambda = 5.9$ 。

实验中,还用该激光器加工 6 mm 低碳钢和 4 mm 不锈钢。在脉宽为 2 ms,频率为 6 Hz,峰值功率为 30 kW 时,切割 4 mm 不锈钢速度为 1 mm/s,切割 6 mm 低碳钢速度为 1.5~2 mm/s,端口再铸层、热影响区相比峰值功率低的常规激光器有明显改善。而对于高重复频率的参数:脉宽为 0.05 ms,频率为 245 Hz,峰值功率 > 24 kW,则可用于薄钢板的高速切割,由此可见该激光器在材料加工中的应用潜力相当大。

4 结 论

报道了一台峰值功率高达 30 kW 的脉冲固体激光器,该激光器单腔输出最大单脉冲能量达 60 J,静态峰值功率达 30 kW,最大平均功率 405 W,在频率为 245 Hz 时仍能保证峰值功率 > 23 kW,光束质量 $M^2 = 5.9$,电光转换效率为 3.3%。该激光器适合不同厚度板材的快速切割,将大大提高了激光器在工业应用中的竞争力。

参 考 文 献

1 Xuesheng Liu, Zhiyong Wang, Qiang Wu *et al.*. 500-W high average power, high beam quality Nd:YAG solid-state laser with one focusing reflector [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 409~411

2 Liu Xuesheng, Wang Zhiyong, Yan Xin *et al.*. A high-energy good-beam-quality krypton-lamp-pumped Nd:YAG solid-state laser with one pump cavity [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25**(2):521~523

3 Xu Rongfu, Liu Jinghai. *Laser Device and Technology* [M]. 1st ed., Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1986. 112
徐荣甫,刘敬海. 激光器件与技术教程[M]. 第 1 版. 北京:北京工业学院出版社, 1986. 112

4 Zhou Bingkun, Gao Yizi, Chen Tirong. *The Principle of Laser* [M]. 4th ed., Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 148
周炳琨,高以智,陈倜嵘. 激光原理[M]. 第 4 版. 北京:国防工业出版社, 2000. 148

5 W. Koehner. *Solid State Laser Engineering* [M]. 5th ed., Beijing: Science Press, 2002. 363~364
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 第 5 版. 北京:科学出版社, 2002. 363~364

6 Horst Weber. Resonators for high power solid state lasers-the fight for beam-quality [C]. *SPIE*, 1998, **3267**:2~13

7 B. N. Upadhyaya, P. Misra, K. Ranganathan *et al.*. Beam quality considerations of high power Nd:YAG lasers [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2002, **34**(3):193~197

8 Liu Chong, Ge Jianhong, Xiang Zhen *et al.*. Thermal-induced birefringence-compensated laser system with two Nd:YAG rods [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1483~1487
刘 崇,葛剑虹,项 震等. 双棒串接补偿热致双折射效应激光谐振腔[J]. 中国激光, 2007, **34**(11):1483~1487

9 Wang Sha, Liu Chong, Chen Jun *et al.*. Influence of resonator structure of solid-state laser on thermal focal length measurement [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10):1431~1435
汪 莎,刘 崇,陈 军等. 固体激光腔型结构对热透镜焦距测量的影响[J]. 中国激光, 2007, **34**(10):1431~1435