

文章编号: 0258-7025(2004)06-0641-05

绿光输出达 85 W 的全固态绿光激光器 谐振腔研究

周 睿, 姚建铨, 徐德刚, 郭 丽, 温午祺, 王 鹏, 于意仲

(天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所 教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了对平均功率达 85 W 的高功率、高稳定性全固态绿光激光器谐振腔特性的研究, 将高平均功率运转条件下的 KTP 倍频晶体的热透镜效应等效为一个薄透镜, 利用 ABCD 传输矩阵, 通过图解方法定性地讨论了 KTP 晶体的热透镜效应对谐振腔的稳定性和腔内激光模式的巨大影响, 理论分析表明适当大小的倍频晶体热透镜焦距不但可以有效地补偿 Nd:YAG 棒的热透镜效应, 而且对增大激光介质中的模体积和在倍频晶体处提高功率密度都有积极作用。实验中采用了 80 个 20 W 的高功率半导体激光器侧面抽运的单 Nd:YAG 棒、两个声光 Q 开关、高效平-凹谐振腔结构、对大尺寸 KTP 晶体进行角度偏离法补偿相位失配等技术, 并通过对 KTP 晶体采取适当的冷却方式, 最终实现了高功率内腔倍频激光器的高稳定性运转; 在抽运功率约为 1080 W 时, 实现了重复频率为 20.4 kHz, 脉冲宽度 230 ns, 输出功率达 85 W 的高功率、高重复频率绿光(532 nm)输出, 不稳定性仅为 $\pm 1.03\%$ 。

关键词 激光技术; 全固态绿光激光器; 谐振腔; 平-凹腔; 稳定性; KTP 晶体的热透镜效应

中图分类号 TN 248.1⁺3 **文献标识码** A

Study on Resonator of 85 W All-Solid-State Green Laser

ZHOU Rui, YAO Jian-quan, XU De-gang,

GUO Li, WEN Wu-qi, WANG Peng, YU Yi-zhong

(College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In this paper, research on the resonator of a high-average-power high stabilization 85 W all-solid-state green laser was reported. The thermal effects of the KTP crystal operating at high-average-power condition were treated as a thin lens, and the effects of this thin lens on the stability and laser modes of the resonator were graphically discussed by ABCD matrix method. Theoretical analyses indicated that an optimum focal length of this thin lens would do a great deal of good to compensate thermal lens effect of Nd:YAG rod, enlarge TEM₀₀ mode volume and enhance the laser power density at KTP crystal. In the experiment, 20 W × 80 high power laser diode arrays and double acousto-optic Q-switching were employed inside single Nd:YAG rod, and a flat-concave intracavity-frequency-doubled resonance structure was used. A maximum green power of 85 W was generated at 20.4 kHz repetition rate and 230 ns pulse width when pumped power was about 1080 W with compensating phase mismatch by angle departing and properly cooling big KTP crystal, leading to $\pm 1.03\%$ instability.

Key words laser technique; all-solid-state green laser; cavity; flat-concave resonator; stability; thermal lens of KTP crystal

收稿日期: 2003-10-15; 收到修改稿日期: 2003-12-23

基金项目: 教育部南开大学、天津大学科技合作基金项目、国家自然科学基金(60278001)、天津市光电子联合科学研究中心(013184011)、天津市科技发展计划项目和国家 863 计划[2002AA311190]资助课题。

作者简介: 周 睿(1978—), 男, 河北省秦皇岛市南戴河人, 天津大学精密仪器与光电子工程学院硕士生, 主要从事全固态激光器及非线性光学频率变换技术的研究。E-mail: zhourui@eyou.com

1 引 言

全固态绿光激光器由于具有效率高、激光输出光束质量好、运转可靠等优点,使其在可调谐激光器的抽运源、流场显示、海洋探测、光电对抗、污染检测、特别是受控热核聚变的驱动器,铀同位素分离的抽运源,以及大功率大能量的激光加工及激光医疗设备,激光微加工,激光的军事应用(激光雷达、激光制导等)等科学和工业领域中得到了广泛的应用,如全固态绿光抽运的钛宝石激光器为各种科学研究获得稳定、高效超短脉冲光源^[1];在工业领域中,高重复频率(1~30 kHz)、高平均功率(10~100 W)、脉冲宽度为几十~300 ns 的绿光激光源直接应用在材料的精密加工行业,或者通过四倍频获得紫外光源应用在半导体材料的精密加工中。

全固态内腔倍频激光器是获得高效高功率稳定绿光光源的重要途径之一^[2,3]。法国的 L. Garrec^[4]等采用 30 个连续二极管激光器侧面抽运单棒,在 Z 型腔内腔 KTP 晶体倍频结构下,双端输出 27 kHz, 106 W 的高功率绿光,总的光电转换效率达到了 5.4%;Honea^[5]等报道了一种采用 KTP 倍频的 V 型腔半导体抽运 Nd:YAG 激光器,获得了 140 W 的 532 nm 绿光输出;Konno^[6]等报道的全固态内腔倍频 Q 开关 Nd:YAG 激光器的输出功率达到了 138 W,其光束衍射倍率因子 $M^2 = 11$ 。上述文献中大多采用散射紧耦合抽运、双棒补偿 Nd:YAG 棒热致双折射的谐振腔。

获得高功率绿光输出的另一种有效途径是采用主振荡功率放大器(MOPA)系统的外腔倍频技术。Pierre^[7,8]等设计的相位共轭 MOPA 系统输出了 175 W 的绿光,转换效率为 45%,可以连续运转 1 h 以上;同样采用 MOPA 系统,Hirano^[9]等先后获得了 108 W(脉冲宽度 47 μs , $M^2 = 2.5$)和 100 W 的绿光输出,其中后者的转换效率高达 65.2%。

近年来,随着国产半导体激光器质量的提高以及国外半导体激光器价格的降低,全固态高功率绿光光源的研究也得到了极大的进展。姜东升^[10]等采用国产半导体激光器组件,利用三镜 L 型腔,实现了平均功率 68 W 的绿光输出。我们对全固态、内腔倍频谐振腔中倍频晶体热效应对输出功率的影响进行了一些研究。

2 含类透镜的平-凹谐振腔研究

在高功率倍频 Nd:YAG 激光器中,激光工作物

质中会产生很严重的热效应,这种热效应可以看作类透镜效应。根据文献^[11],一个长度为 l_0 的激光棒,在考虑端面的折射时,其变换矩阵为

$$M = \begin{pmatrix} \cos(\beta l_0) & \frac{\sin(\beta l_0)}{n_0 \beta} \\ -n_0 \beta \sin(\beta l_0) & \cos(\beta l_0) \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 β 为类透镜系数, n_0 为介质内沿光轴方向的折射率。

同时,在高功率下运用时,由于基波的功率非常高,使倍频晶体中心温度也变得非常高,而晶体周围的温度较低,这样晶体内产生温度梯度,致使晶体的折射率变化^[12],也会产生一定的热透镜效应。由于一般倍频晶体的长度都很短,所以可将倍频晶体简化为一个焦距为 f 的薄透镜。这样一个经过简化的平-凹谐振腔如图 1 所示。

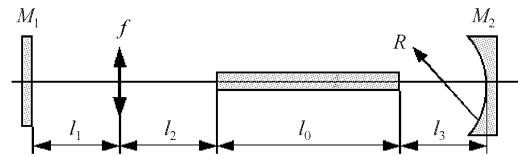


图 1 含类透镜的简单平-凹直腔示意图

Fig. 1 Scheme of flat-concave resonator with lens-like medium

谐振腔从 M_1 到 M_2 的单程传输矩阵为

$$a = \left(1 - \frac{l_2}{f}\right) [\cos(\beta l_0) - n_0 l_3 \beta \sin(\beta l_0)] - \frac{n_0 \beta l_3 \cos(\beta l_0) + \sin(\beta l_0)}{n_0 \beta f} \quad (2)$$

$$b = \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f}\right) [\cos(\beta l_0) - n_0 l_3 \beta \sin(\beta l_0)] + \left(1 - \frac{l_1}{f}\right) \left[l_3 \cos(\beta l_0) + \frac{\sin(\beta l_0)}{n_0 \beta}\right] \quad (3)$$

$$c = -n_0 \beta \left(1 - \frac{l_2}{f}\right) \sin(\beta l_0) - \frac{\cos(\beta l_0)}{f} \quad (4)$$

$$d = \left(1 - \frac{l_1}{f}\right) \cos(\beta l_0) - n_0 \beta \left(l_1 + l_2 - \frac{l_1 l_2}{f}\right) \sin(\beta l_0) \quad (5)$$

谐振腔的往返传输矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a \left(d - \frac{2b}{R}\right) + bc & b \left(d - \frac{2b}{r}\right) + bd \\ a \left(c - \frac{2a}{R}\right) + ac & b \left(c - \frac{2a}{R}\right) + ad \end{bmatrix} \quad (6)$$

激光棒中的热透镜焦距和类透镜系数之间的关系如图 2 所示。

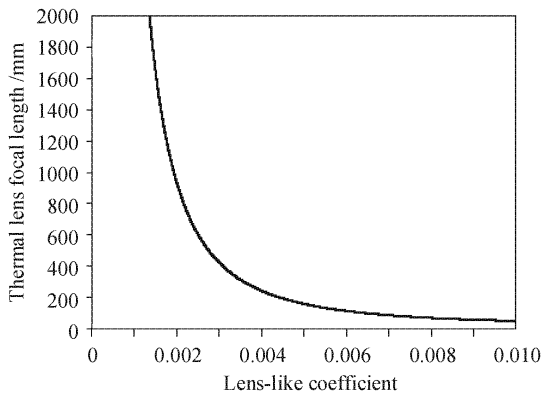


图 2 类透镜系数与热透镜焦距的关系

Fig. 2 Lens-like coefficient versus thermal lens focal length

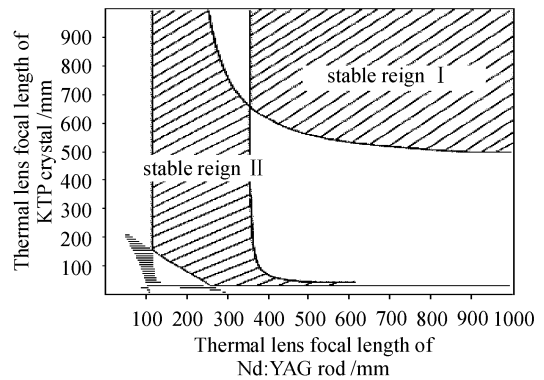


图 3 稳定区分布示意图

Fig. 3 Stable reigns of the resonator

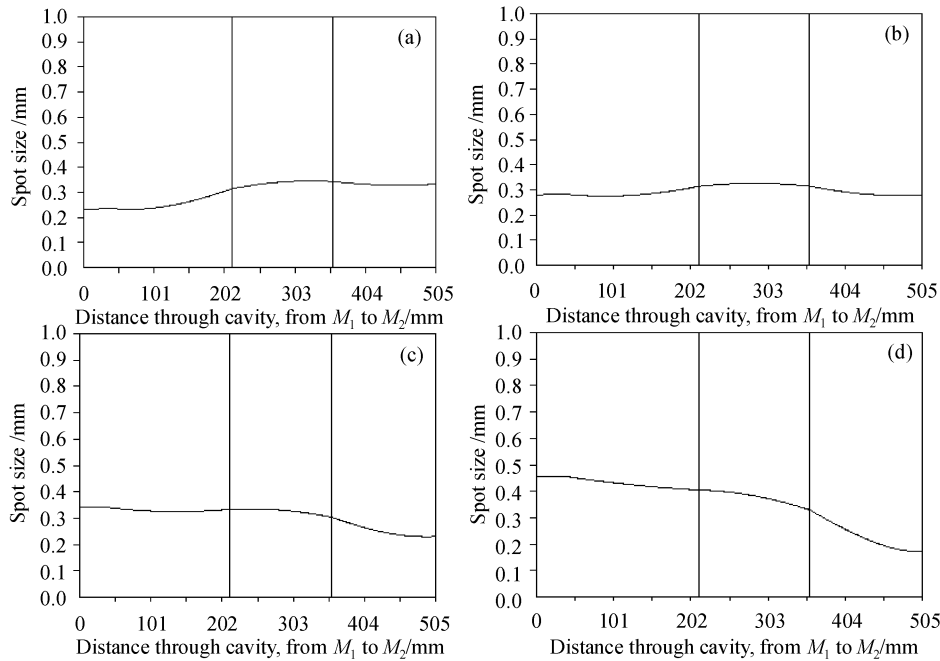


图 4 倍频晶体的热透镜焦距分别为 400 mm(a), 600 mm(b), 800 mm(c), 1000 mm(d) 时谐振腔内各处的基模高斯光束半径分布示意图

Fig. 4 Spot size in the resonator with different KTP crystal thermal lens focal length

(a) 400 mm; (b) 600 mm; (c) 800 mm; (d) 1000 mm

实验装置如图 5 所示,当 $l_1 = 34$ mm, $l_2 = 180$ mm, $l_3 = 147$ mm, $l_0 = 144$ mm, $R = 2000$ mm 时的谐振腔的稳定性随 Nd:YAG 棒的热透镜焦距和倍频晶体的热透镜焦距的变化情况如图 3 所示。

随着抽运功率的增加, Nd:YAG 棒的热透镜焦距逐渐地减小,同时倍频晶体的热透镜焦距也从大逐渐减小,在这个期间内整个谐振腔工作在稳定区 I;当抽运功率继续增加, Nd:YAG 棒的热透镜焦距减小至某一由谐振腔参数 (l_1, l_2, l_3) 确定的特定

值(在图 3 中为 380 mm 左右)时,谐振腔模式将由稳定区 I 过渡到稳定区 II,此时,谐振腔的模式不稳定,对输出功率有影响;最终,在强抽运条件下,谐振腔将工作在稳定区 II,因此将重点讨论谐振腔工作在稳定区 II 的情况。

当棒的热透镜焦距为 225mm,倍频晶体的热透镜焦距分别为 400 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm 时谐振腔内的基模高斯光束半径分布如图 4 所示。

由图 3, 4 可见,由于倍频晶体的热透镜效应的

存在,对谐振腔内的基波模式分布有很大的影响。适当大小的倍频晶体热透镜焦距不但可以有效地补偿 Nd:YAG 棒的热透镜效应,而且对增大激光介质

中的模体积和在倍频晶体处提高基波强度都有积极的作用。因此选择合适的倍频晶体冷却方式,以获得合适的倍频晶体热焦距将是不得不考虑的问题。

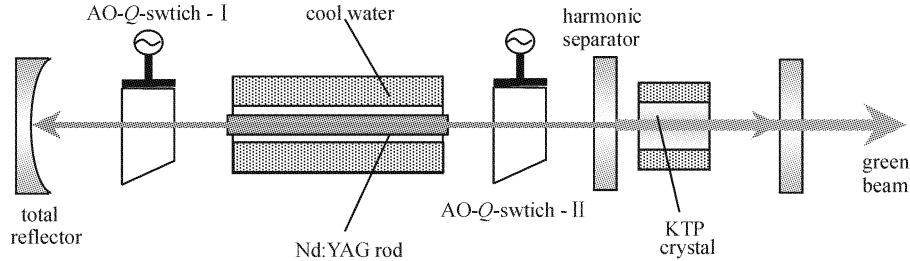


图 5 高功率内腔倍频谐振腔结构示意图

Fig. 5 Resonator structure of high power intracavity-frequency-doubled laser

3 实验研究

在实验中采用美国 CEO 公司生产的半导体激光器组件,它由 80 个 20 W 二极管激光器组成,按照五角形等间距侧面抽运 Nd:YAG 棒,其总抽运功率为 1600 W,结构如图 6 所示,输出特性如图 7 所示。

类相位匹配的 KTP 晶体 ($\varphi = 23.6^\circ, \theta = 90^\circ$),其尺寸为 $7 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。谐振腔采用简单的平凹直腔结构。声光器件的驱动功率为 100 W,工作频率为 27 MHz,衍射效率为 20%,其调制频率为 1~50 kHz。两套声光系统通过 DG535 信号发生器来控制它们的同步,使声光达到最佳关断状态。

利用平行光管,测量了不同抽运电流下的 Nd:YAG 棒的热透镜焦距如图 8 所示。

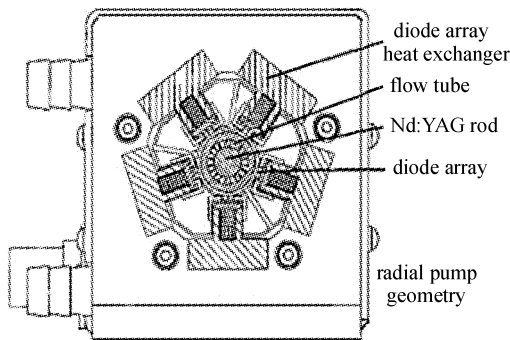


图 6 抽运组件剖面图

Fig. 6 Cross section of pumping module

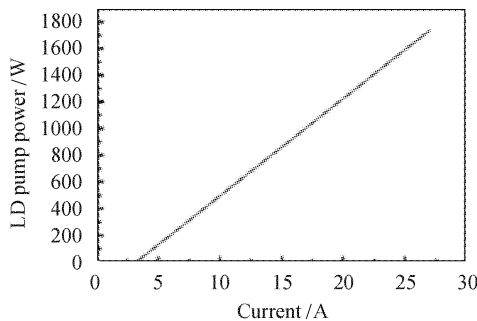


图 7 半导体激光器组件的输出特性

Fig. 7 LD output power

激光介质的尺寸为 $\phi 6.34 \text{ mm} \times 144 \text{ mm}$,两端磨成平面,镀 1064 nm 的增透膜。倍频晶体采用 II

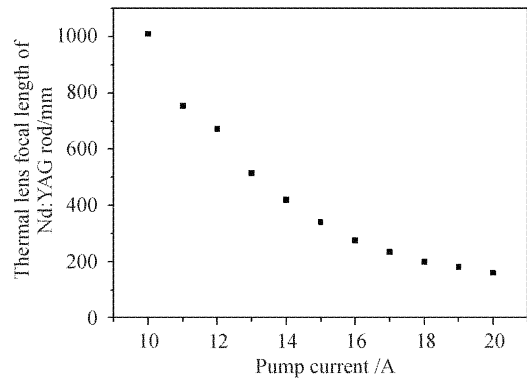


图 8 Nd:YAG 棒的热透镜焦距

Fig. 8 Thermal lens focal length of Nd:YAG rod

在实验中,发现在抽运电流逐渐增大的过程中,当抽运功率约为 840 W 左右时,绿光输出功率的增加很小。结合图 3 和图 8 可以看到,此时在谐振腔内 1064 nm 基波有一个从稳定区 I 向稳定区 II 过渡的过程,从而影响了倍频绿光的输出,这与实验吻合得很好。在理论分析的基础上,不断地调整 l_1, l_2, l_3 和 R 的大小,尽量寻找不但可以很好地补偿 Nd:YAG 棒和 KTP 晶体的热透镜效应,同时可以增大 Nd:YAG 棒中的模体积和使得在 KTP 晶体内光斑半径较小的谐振腔参数。最终,当取 $l_1 = 34$

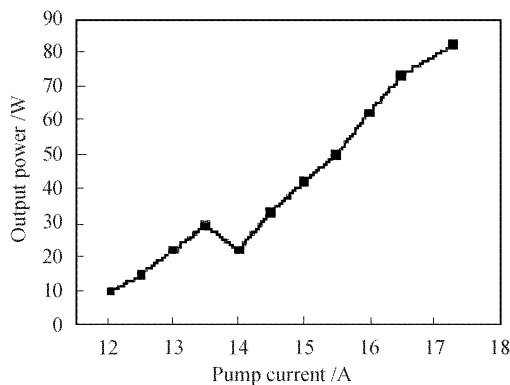


图9 不同抽运电流下的绿光输出功率

Fig. 9 Green laser output power with different pump current

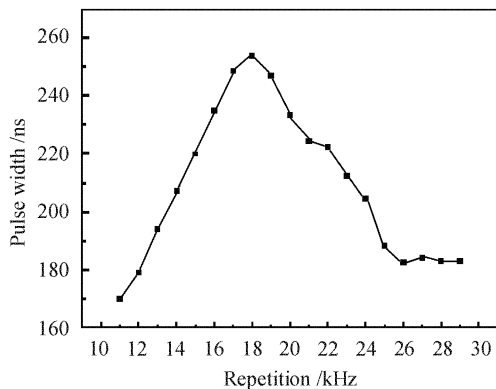


图 10 在不同重复频率下的脉冲宽度

Fig. 10 Pulse width versus the repetition

mm, $l_2 = 180$ mm, $l_3 = 147$ mm 和 $R = 2000$ mm 时,在抽运功率约为 1080 W 时,实现了重复频率为 20.4 kHz,脉冲宽度 230 ns,输出功率为 85 W 的高功率、高重复频率绿光(532 nm)输出,不稳定性为 1.03%。分别测量了输出特性曲线(如图 9 所示)及脉冲宽度随重复频率的变化曲线(如图 10 所示)。

4 结 论

研究了全固态内腔倍频谐振腔中倍频晶体热效应对输出功率的影响,采用了双声光 Q 开关、高效平-凹谐振腔结构,对大尺寸 KTP 晶体进行角度偏离法补偿相位失配技术^[13],实现高功率内腔倍频激光器的稳定运转;在抽运功率约为 1080 W 时,实现了重复频率为 20.4 kHz,脉冲宽度 230 ns,输出功率为 85 W 的高功率、高重复频率绿光(532 nm)输

出,不稳定性为 1.03%。此外,如果能合理地选择谐振腔参数,将 Nd:YAG 棒的热透镜和 KTP 晶体的热透镜组合成能自动调节的望远镜系统,不但可以有效地提高绿光的输出功率,而且对稳定性的提高也是大有裨益的,这方面的研究工作正在进行中。

参 考 文 献

- 1 Y. Nabekawa, K. Kuramoto, T. Togashi *et al.*. Generation of 0.66-TW pulses at 1 kHz by a Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(17):1384~1386
- 2 Zheng Quan, Zhao Ling, Jiang Yaoliang *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd:YAG/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):492~494
郑 权,赵 岭,姜耀亮等. LD 抽运被动调 Q Nd:YAG/LBO 绿光激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(6):492~494
- 3 Xue Qinghua, Zheng Quan, Ye Ziqing *et al.*. Analysis of eigenstates on LD-pumped Nd:YVO₄/KTP intracavity-doubled green lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):877~880
薛庆华,郑 权,叶子青等. LD 抽运腔内倍频 Nd:YVO₄/KTP 绿光激光器的本征态分析[J]. 中国激光, 2003, **30**(10):877~880
- 4 B. J. Le Garrec, G. J. Raze, P. Y. Thro *et al.*. High-average-power diode-array-pumped frequency-doubled YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24):1990~1992
- 5 E. C. Honea, C. A. Ebberts, R. J. Beach *et al.*. Analysis of an intracavity-doubled diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser producing more than 100 W of power at 0.532 μm [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(15):1203~1205
- 6 S. Konno, T. Kojima, S. Fujikawa *et al.*. High-brightness 138-W green laser based on an intracavity-frequency-doubled diode-side-pumped Q-switched Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(2):105~107
- 7 R. J. St. Pierre, D. W. Mordaunt, H. Injewan *et al.*. Diode array pumped kilowatt laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1):53~58
- 8 R. J. St. Pierre, G. W. Holleman, M. Valley *et al.*. Active tracker laser (ATLAS) [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1997, **3**(1):64~70
- 9 Y. Hirano, N. Pavel, S. Yamamoto *et al.*. 100-W class diode-pumped Na:YAG MOPA system with a double-stage relay-optics scheme [J]. *Opt. Commun.*, 1999, **170**:275~280
- 10 Jiang Dongsheng, Zhao Hong, Wang Jianjun *et al.*. 68 W green-beam operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(Suppl.):102~104
姜东升,赵 鸿,王建军等. 平均功率达 68 W 的 LD 抽运倍频 Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(增刊):102~104
- 11 Ma Yangwu, Chen Yuqing. *Laser Devices* [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1994. 178
马养武,陈钰清. 激光器件[M]. 杭州:浙江大学出版社,1994. 178
- 12 Yao Jianquan. *Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tunable Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995. 58~63
姚建铨著. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京:科学出版社,1995. 58~63
- 13 Yao Jian-quan, Yu Yi-zhong, Chen Jin *et al.*. Thermal effect in KTP crystals during high power laser operation [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, **18**(10):1356~1359