

文章编号: 0258-7025(2004)05-0513-05

瓦级连续双波长输出 Nd:YAP/KTP 稳频激光器

延 英, 罗 玉, 潘 庆*, 彭堃掇

(山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 利用半导体激光器端面抽运 Nd³⁺:YAlO₃ (Nd:YAP) 晶体, 采用五镜环形谐振腔及 KTiOPO₄ (KTP) 晶体进行内腔倍频, 同时获得了 0.54 μm 和 1.08 μm 双波长连续激光输出。计算并比较了谐振腔的两个凹面镜在取不同曲率时形成的基频光腰斑半径, 及凹面镜在不同的入射角度下引起的像散, 最终确定两凹面镜的曲率半径均为 100 mm, 其入射角度小于 3°, 以提高倍频效率。改进冷却和控温系统, 并选取掺杂浓度较低(0.6 at.-%)的 Nd:YAP 激光晶体, 以降低激光介质的热透镜效应。在光抽运功率为 10 W, 稳频伺服系统运转下, 绿光和红外光的输出功率分别为 1.02 W 和 700 mW, 频率稳定性优于 ±484 kHz 和 ±240 kHz, 功率波动小于 ±0.65% 和 ±0.5%。

关键词 激光技术; 连续双波长输出; 掺杂浓度; 五镜环形谐振腔

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

Watt Level CW Frequency-Stabilized Nd:YAP/KTP Laser with Dual Wavelength Outputs

YAN Ying, LUO Yu, PAN Qing, PENG Kun-chi

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Devices,
Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract A continuous laser-diode end-pumped Nd:YAP/KTP laser with dual wavelength outputs at 0.54 μm and 1.08 μm has been achieved. The ring laser resonator consists of five mirrors and a piece of frequency-doubling crystal KTP is placed between two concave mirrors. After calculating and comparing the waist-sizes of the fundamental wave and the astigmatism at different incident angles to the concave mirrors, the curvature radii of the concave mirrors as 100 millimeter are chosen and the incident angles of infrared light are less than 3 degree. The cooler and temperature controller of Nd:YAP rod are improved and the lower dopant concentration of the Nd:YAP (0.6 at.-%) is chosen, thus the thermal effect of the laser rod is decreased. Under a pump power of 10 W, the output powers for the second-harmonic wave and the fundamental wave of 1.02 W and 700 mW are simultaneously obtained with the intensity fluctuations less than ±0.65% and ±0.5%, respectively. With the frequency-stabilizing servo system on, the frequency stabilities for 0.54 μm and 1.08 μm wavelengths are better than ±484 kHz and ±240 kHz, respectively.

Key words laser technology; continuous dual wavelength outputs; doped-concentration; five-mirror ring resonator

1 引 言

Nd³⁺:YAlO₃ (Nd:YAP) 激光器产生的 1.08 μm 红外光能在 α 切割的 KTiOPO₄ (KTP) 晶体内实

现 II 类非临界相位匹配, 消除光束离散效应^[1], 是抽运光学参量振荡腔(OPO 腔) 获得压缩态光及纠缠光束的一种有效光源, 在量子光学和非线性光学中已得到广泛应用。1998 年我们使用连续氪灯抽运

收稿日期: 2003-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(60238010, 60378014), 国家重点基金[(973)2001CB309304]和科技部基础研究资助项目。

作者简介: 延 英(1979—), 女, 山西大学光电研究所硕士研究生, 主要从事激光技术和量子光学方面的研究工作。

E-mail: yanying@sxu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: panqing@sxu.edu.cn

Nd:YAP晶体,采用六镜环形腔,KTP晶体内腔倍频稳频,在电抽运功率为1.44 kW时获得了最高绿光输出1.0 W,当稳定输出800 mW时,频率稳定性优于 ± 1 MHz(5 min)^[2];2001年用半导体激光器抽运Nd:YAP晶体,采用四镜环形腔及KTP晶体进行内腔倍频稳频,在10 W光抽运功率下得到最高绿光输出1.1 W,频率稳定性优于 ± 550 kHz(40 s)^[3]。随着非线性光学和量子信息科学的迅速发展和应用,双波长输出稳频激光器越来越引起人们的广泛重视。半导体激光器抽运Nd:YAP晶体,利用KTP晶体内腔倍频同时产生 $0.54 \mu\text{m}$ 绿光和 $1.08 \mu\text{m}$ 红外双波长输出,利用此激光器可以满足同时抽运多个OPO腔及多组平衡零拍探测系统锁定的需要,获得关联度高的多组纠缠光束^[4],这在实现量子纠缠交换、量子网络及量子通信等研究中有着重要应用。

2 原理分析

半导体激光器是固体激光器最有效的抽运源。但是,由于晶体对抽运光小于1的吸收效率、斯托克斯频移、非完美的量子效率及抽运光与基模的空间重叠等因素在晶体激活区域内产生的热量,导致晶体端面局部吸热非常强且随抽运光强而变化,从抽运区域边缘到圆柱棒的冷却表面,温度按对数规律降低,沿棒轴方向呈指数规律下降^[5],这种不均匀分布导致明显的热透镜效应。根据热载百分比计算公式^[6]

$$\eta_h = 1 - \eta_a \cdot \eta_s \cdot \eta_Q \cdot \eta_B \quad (1)$$

在我们的装置中, $\eta_a \approx 1$,为晶体的吸收效率; $\eta_s = 0.74$,为斯托克斯频移; $\eta_Q \approx 0.95$,为量子效率; $\eta_B \approx 0.82$,为光束重叠效率,热载百分比约43%。在10 W光抽运功率下,其中约4.3 W以热的形式不均匀地分布在晶体内。因此,在设计半导体激光器高功率抽运,单频、瓦级功率输出的固体激光器时,高效散热和激光介质的热透镜效应仍然应该是考虑的主要因素。为了克服上述问题,在设计中改进了冷却和控温系统,并选取掺杂浓度较低(0.6 at.-%)的Nd:YAP晶体。

前期工作是在不同条件下采用四镜环形腔和六镜环形腔位形,取得了良好的结果^[2,3]。四镜环形腔结构紧凑,损耗小,容易实现抽运光与基模好的空间重叠,耦合效率高,是半导体激光器抽运的中小功率激光器通常采用的位形。在四镜腔中,为了减少

0° 入射高反凹面腔镜的透射损耗和像散的影响,将一对凹面高反镜放置在尽量小的入射角位置,以增加腔内功率密度和倍频效率,但这种安排会压缩腔内有限空间,因此,在四镜腔中只有增大凹面腔镜的入射角度来换取一定空间安排光学元件。六镜环形腔虽然可以在保持入射角度的前提下增加放置元件的空间,但反射镜增多,随之腔内衍射和腔镜损耗增大,要保持高转换效率的功率输出存在一定困难。为了使谐振腔有一定空间放置光学元件同时又不增加腔内损耗,设计了五镜环形谐振腔(如图1所示), M_2 和 M_3 为 45° S偏振平面高反镜,选取合适的位置能使入射角度近似为 45° ,将透射损耗减到最小;更重要的是可以灵活地调整 M_4 和 M_5 的位置及角度,既可以保持入射角度,减少透射损耗,降低像散影响,改善光束质量,提高腔内功率密度和倍频效率,又有一定空间把光学元件放入腔中。

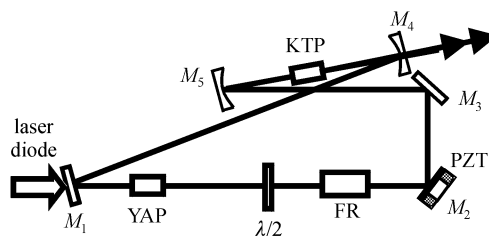


图1 五镜环形腔装置简图

M_1 :输入耦合镜; M_2, M_3, M_5 :红外高反镜; M_4 :输出耦合镜;
FR:法拉第旋转器; $\lambda/2$:1/2波片;PZT:压电陶瓷

Fig. 1 Five-mirror configuration

M_1 : input mirror; M_2, M_3, M_5 : high reflectors for infrared;
 M_4 : output mirror; FR: Faraday rotator; $\lambda/2$: half-wave plate;
PZT: piezoelectric transducer

对于五镜环形腔的内腔倍频激光器,凹面腔镜曲率半径对倍频晶体处基频光的腰斑半径及凹面腔镜在五镜腔中允许放置的最小角度有很重要的影响。为此,在Nd:YAP晶体的热透镜焦距约为125 mm(在光抽运功率为10 W时由实验测得),从YAP晶体前端面(靠近抽运光一端)经过 M_2, M_3 到 M_5 的腔长为231 mm;从 M_4 经过 M_1 到YAP晶体前端面的腔长为180 mm的五镜环形腔中,分别计算了两凹面镜取表1所示曲率半径和间距时,基频光腰斑半径,及在KTP(尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)晶体不挡光的前提下,允许放置的最小角度(φ_4 是 M_4 的入射角, φ_5 是 M_5 的入射角)。表1中结果说明,如果设计的凹面镜入射角度为 3° ,曲率半径取为50 mm时,KTP晶体位置可调节范围小,容

易挡光(晶体放置在控温炉内),且腰斑小,光束发散快,影响倍频效率;曲率半径取为 150 mm 时,两镜间距离增大,腰斑半径增大,同样影响倍频效率。所以,曲率半径为 100 mm 的凹面镜最理想。

表 1 选取不同曲率半径的凹面腔镜,计算得到腔中倍频晶体处的基频光腰斑半径及其允许放置的最小角度

Table 1 Calculated waist-sizes of the fundamental wave and the possible minimum angles for different curvature radii

$\rho_4 = \rho_5 / \text{mm}$	L_1 / mm	Z_0 / mm	$w_0 / \mu\text{m}$	$\varphi_4 / (^\circ)$	$\varphi_5 / (^\circ)$
50	56	27	25	2.4	2.1
100	126	59	57	1.1	0.9
150	214	98	96	0.6	0.5

Notes: ρ_4 (ρ_5) of concave mirrors M_4 and M_5 ; L_1 , the distance between M_4 and M_5 ; Z_0 , the distance between the beam waist and M_4 ; w_0 , the radius of the beam waist; φ_4 (φ_5), the possible minimum angle for M_4 (M_5).

表 2 在三种凹面腔镜放置角度下,计算得到两凹面镜间子午面和弧矢面的腰斑位置及半径

Table 2 Calculated the locations and the radii of the meridional and sagittal planes between concave mirrors M_4 and M_5 for three different incident angles

$\varphi_4 = \varphi_5 / (^\circ)$	Z_1 / mm	Z_2 / mm	$\Delta Z / \text{mm}$	$\Delta w / \mu\text{m}$
3	58.85	58.83	0.02	1.39
5	58.87	58.82	0.05	3.90
10	58.96	58.73	0.23	16.74

Notes: φ_4 (φ_5), the incident angle of infrared light for M_4 (M_5); Z_1 , the distance between the beam-waist in the meridional plane and the mirror M_4 ; Z_2 , the distance between the beam-waist in the sagittal plane and the mirror M_5 ; ΔZ , the difference of the two beam-waist locations; Δw , the difference of the two waist radii.

当入射光束与光轴夹角为 φ 时,环形腔凹面反射镜在子午面(竖直面)和弧矢面(水平面)内的焦距分别为^[7]

$$f_{\perp} = \frac{\rho}{2} \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

$$f_{\parallel} = \frac{\rho}{2} \cdot \sec\varphi \quad (3)$$

其中 φ 为腔内光束在凹面镜上的入射角。代入 ABCD 矩阵中可以分别求出子午面和弧矢面的光束模参数,一般情况下模参数不同,合成后为一椭圆高斯光束。像散作用不仅影响光束质量,而且缩小环形腔的稳定工作区,因此,在设计中应尽量减小像散带来的影响。计算了曲率半径为 100 mm 的凹面镜放置角度(红外光在凹面镜上的入射角)分别为 3° , 5° 和 10° 时的模参数,如表 2 所示。从表 2 看出,凹面镜入射角度为 3° 时,子午面和弧矢面的腰斑位

置相差 0.02 mm,腰斑半径相差 $1.39 \mu\text{m}$,像散的影响很小。入射角度增大,子午和弧矢腰斑的位置和半径差值增大,对倍频效率的影响增大。通过计算还知道两个凹面镜的入射角度不相等的像散影响比相等时明显。根据上述对凹面镜曲率半径及像散的分析 and 计算的结果,五镜腔中两个凹面腔镜的曲率半径设计为 100 mm,并放置在入射角度都等于 3° 的位置。

3 实验装置和结果

激光器所用抽运源是美国 Coherent 公司生产的光纤耦合激光二极管阵列,输出中心波长为 803 nm 的部分偏振光。增益介质是沿 b 轴方向生长的 Nd:YAP 晶体(捷克 CRYTUR 公司生产),掺杂浓度为 0.6 at.-%,尺寸为 $\phi 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。两个端面对 $1.08 \mu\text{m}$ 透射率均大于 99.9%,前面对 803 nm 透射率大于 99.7%。内腔倍频晶体是 α 切割的 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ KTP 晶体,前后表面对 $1.08 \mu\text{m}$ 和 $0.54 \mu\text{m}$ 均高透。放于磁场中的 $\phi 4 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ TGG 晶体和 $\lambda/2$ ($\lambda = 1.08 \mu\text{m}$) 波片组成单向器,光单次通过时旋转角为 8° 。

五镜环形谐振腔(见图 2)由三个平面镜 M_1 , M_2 , M_3 和两个凹面镜 M_4 , M_5 组成。 M_1 是输入耦合镜,一面对 803 nm 增透 ($T > 96\%$),另一面对 0° 入射红外光高反 ($R > 99.7\%$)。 M_2 和 M_3 是 45° 入射红外光 S 偏振高反平面镜 ($R > 99.7\%$)。 M_5 和 M_4 是曲率半径为 100 mm 的凹面镜,前者对 0° 红外反射率大于 99.98%,后者是输出耦合镜, 0° 红外反射率为 99.2%,二者的入射角度均小于 3° ,间距为 $L_1 \approx 126 \text{ mm}$ 。在 10 W 光抽运功率下,实验测得 0.6 at.-% 的 Nd:YAP 晶体的热透镜焦距约 125 mm,利用 ABCD 矩阵计算可知^[8],激光器工作在稳区范围内,如图 3 所示。将 YAP 晶体放在 M_1 与 M_2 之间的腰斑位置^[3,9],光斑直径约 $440 \mu\text{m}$;倍频晶体 KTP 放在凹面镜 M_4 与 M_5 之间的腰斑位置,距 M_4 约 59 mm,光斑直径约 $104 \mu\text{m}$ 。

用自制的控温仪及冷却系统控制 Nd:YAP 晶体和 KTP 晶体的温度分别为 20.00°C 和 74.93°C (控温误差不超过 $\pm 0.5\%$),在 10 W 光抽运功率下采用 0.6 at.-% 的 Nd:YAP 晶体,五镜环形谐振腔及 KTP 晶体进行内腔倍频,可同时得到 1.02 W 绿光 ($0.54 \mu\text{m}$) 和 700 mW 红外光 ($1.08 \mu\text{m}$) 连续双波长稳定输出。在同一谐振腔中,换用掺杂浓度为

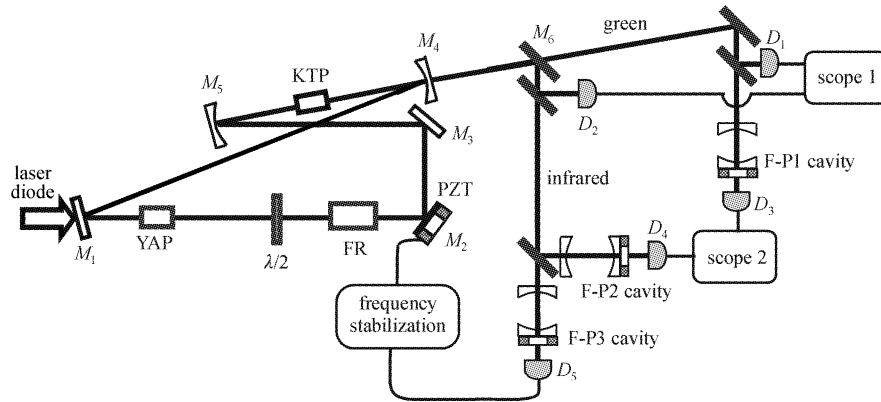


图 2 内腔倍频 Nd:YAP/KTP 双波长输出激光器装置简图

$M_1 \sim M_5$: 腔镜; M_6 : 绿光增透红外高反镜; $D_1 \sim D_5$: 探测器; $\lambda/2$: $1/2(1.08 \mu\text{m})$ 波片; FR: 法拉第旋转器; F-P1, F-P2: 分别为绿光和红外光的共焦参考腔; F-P3: 模清洁剂; PZT: 压电陶瓷; scope 1: 观察绿光和红外光的功率波动; scope 2: 观察绿光和红外光的频率漂移

Fig. 2 Experimental setup of intracavity doubling Nd:YAP/KTP laser with dual wavelength outputs

$M_1 \sim M_5$: cavity mirrors; M_6 : dichroic mirror; $D_1 \sim D_5$: detectors; $\lambda/2$: half-wave plate; FR: Faraday rotator; F-P1, F-P2: confocal reference cavities; F-P3: mode cleaner; PZT: piezoelectric transducer; scope 1: for recording the intensity fluctuations of dual wavelengths; scope 2: for monitoring the frequency stabilities of dual wavelengths

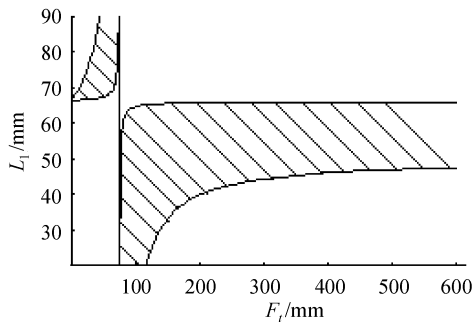


图 3 五镜环形腔稳区图

F_t : 激光晶体热透镜焦距; L_1 : 两凹面镜间距离

Fig. 3 Stable region of five-mirror ring cavity

F_t : thermal focal length;

L_1 : distance between two concave mirrors

0.8 at.-% 的 Nd:YAP 晶体时输出绿光功率为 700 mW, 红外功率为 720 mW; 选用 1.0 at.-% 的 Nd:YAP 晶体时输出绿光功率为 820 mW, 红外功率为 400 mW; 但要实现较长时间单频稳定运转比较困难。所以, 选取 0.6 at.-% 的 Nd:YAP 晶体, 并在最高功率输出时, 测得绿光和红外的频率抖动和功率波动, 如图 4~7 所示。绿光参考腔 F-P1 和红外参考腔 F-P2 的自由光谱区均为 1500 MHz, 示波器 (scope2) 上绿光和红外透射峰一个自由光谱区的扫描时间分别为 62 ms 和 50 ms, 所以示波器上 1 ms 对应绿光和红外光的频率抖动分别为 24.2 MHz 和 30 MHz。图 4 显示激光器锁定后绿光通过 F-P1 腔的透射峰曲线, 从波形的抖动得出绿光的频率抖动

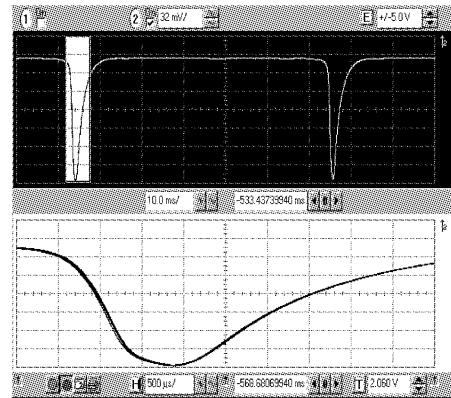


图 4 扫描 F-P1 腔, 绿光透射峰曲线 (1 min)

Fig. 4 Second-harmonic wave transmission through the scanning F-P1 cavity (1 min)

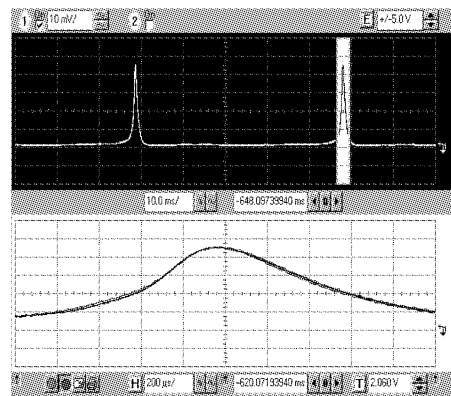


图 5 扫描 F-P2 腔, 红外透射峰曲线 (1 min)

Fig. 5 Frequency stability of the fundamental wave through the scanning F-P2 cavity (1 min)

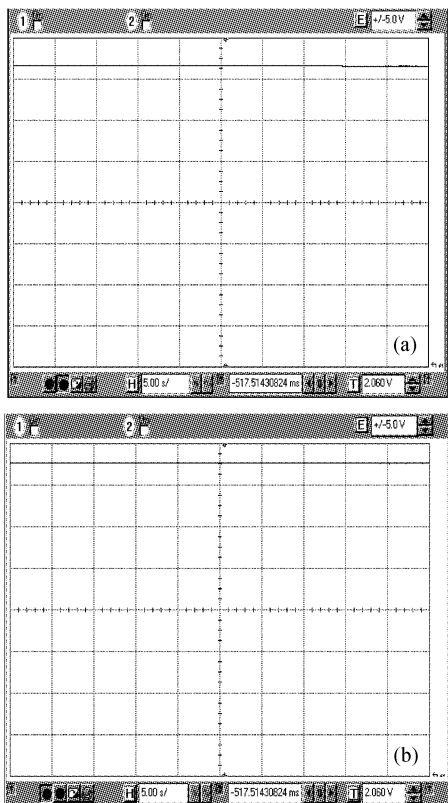


图 6 绿光功率(a)和红外光功率(b)波动曲线
Fig. 6 Intensity fluctuation of the second-harmonic wave (a) and the fundamental wave (b)



图 7 自由运转, 曲线 1 为扫描 F-P2 腔红外光透射峰曲线, 曲线 2 为扫描 F-P1 腔绿光透射峰曲线(1 min)
Fig. 7 Curve 1, fundamental wave transmission through the scanning F-P2 cavity with frequency-stabilized system off (1 min); curve 2: second-harmonic wave transmission through the scanning F-P1 cavity with frequency-stabilized system off (1 min)

小于 ± 484 kHz(1 min)。图 5 表示激光器锁定后红外光经过 F-P2 腔的透射峰曲线, 频率抖动小于

± 240 kHz(1 min)。图 6(a), (b) 表示绿光和红外光的功率波动, 分别为 $\pm 0.65\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 。图 7 显示激光器自由运转时绿光和红外光的频率稳定性, 分别小于 ± 6 MHz 和 ± 3 MHz(1 min)。

4 结 论

我们设计的五镜环形谐振腔, 保持两凹面镜的入射角度小于 3° , 两个 45° 平面高反镜的入射角度近似为 45° , 减小了腔内透射损耗和像散影响, 提高了腔内功率密度和倍频效率。通过实验比较, 选取掺杂浓度合适的(0.6 at.-%)Nd:YAP 晶体, 降低了热效应对激光输出的影响。在 10 W 抽运功率下, 采用 KTP 晶体内腔倍频, 得到频率稳定的 1.02 W 绿光和 700 mW 红外光连续双波长激光输出, 这为同时抽运多个光学参量振荡腔产生高关联度高压缩度的 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)纠缠光束提供了可靠的光源。

参 考 文 献

- 1 V. M. Garmash, G. A. Ermakov, N. I. Pavlova *et al.*. Efficient second-harmonic generation in Potassium titanate-phosphate crystals with noncritical matching [J]. *Sov. Tech. Phys. Lett.*, 1986, **12**(10):505~506
- 2 Pan Qing, Zhang Tiancai, Zhang Yun *et al.*. Intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized cw ring Nd:YAP laser [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(12):2394~2396
- 3 Li Xiaoying, Pan Qing, Jing Jietai *et al.*. LD pumped intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YAP/KTP laser with 1.1 W output at 540 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**:165~171
- 4 Zhang Jing, Xie Changde, Peng Kunchi. Controlled dense coding for continuous variables using three-particle entanglement states [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**:032318-1~032318-6
- 5 J. Frauchiger, P. Albers, H. P. Weber. Modeling of thermal lensing and higher order ring mode oscillation in end-pumped cw Nd:YAG [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4):1046~1056
- 6 W. Koehner. *Solide-State Laser Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 320
W. Koehner 著. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 320
- 7 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1992. 289~290
吕百达. 激光光学[M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 289~290
- 8 Peng Kunchi, Wu Ling-an, H. J. Kimble. Frequency-stabilized Nd:YAG laser with high output power [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(7):938~940
- 9 Zhang Kuanshou, Zhang Yun, Xie Changde *et al.*. All-solid state out-of-plane Nd:YAG ring laser of single-frequency operation [J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(8):1041~1044
张宽收, 张云, 谢常德等. 全固化非平面单频 Nd:YAG 环形激光器[J]. 光学学报, 1996, **16**(8):1041~1044