

文章编号: 0258-7025(2009)07-1714-05

# 输出 770 mW 的全固态连续单频蓝光激光器

王珪廷 周倩倩 李渊骥 刘建丽 张宽收

(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** 为获得稳定输出的全固态蓝光激光器,在考虑了准三能级 Nd:YAG 晶体的自吸收损耗、热致透镜效应的基础上,设计了 4 镜环形谐振腔,采用激光二极管(LD)端面抽运复合 Nd:YAG 激光晶体,在腔内插入布儒斯特片作为起偏器,由  $\lambda/2$  波片和 TGG 晶体组成单向器,通过周期极化 KTP(PPKTP)内腔倍频,实现了连续单频运转的 473 nm 蓝光激光器。当激光二极管的抽运功率为 20 W 时,最大连续单频 473 nm 蓝光输出功率为 770 mW,长期功率稳定性优于  $\pm 2.2\%$ 。利用电子伺服系统将激光器的频率锁定在共焦法-珀(F-P)腔的共振透射峰上,蓝光激光的频率稳定性优于  $\pm 5$  MHz/min。

**关键词** 激光器;单频蓝光;激光二极管端面抽运

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1714

## All-Solid-State CW Nd:YAG Blue Laser of Single Frequency Operation with 770 mW Output Power

Wang Yaoting Zhou Qianqian Li Yuanji Liu Jianli Zhang Kuanshou

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** Considering the reabsorption and thermal lens of Nd:YAG crystal when the laser operates on the transitions at 946 nm, a ring laser cavity formed by four mirrors was designed. Using a Brewster plate as a polarizer, a half-wave-plate and a TGG crystal as the optical diode and PPKTP as the frequency doubling crystal, a laser diode end-pumped 473 nm continuous wave single frequency Nd:YAG laser was demonstrated experimentally. The single frequency output power at 473 nm is 770 mW with pump power of 20 W. The long term power fluctuation is less than  $\pm 2.2\%$ . After the laser was locked to the confocal Fabry-Perot cavity resonance, the measured frequency stability of blue laser is better than  $\pm 5$  MHz/min.

**Key words** lasers; single frequency blue light; laser diode end-pumped

## 1 引 言

自从 1987 年 Risk 等<sup>[1]</sup>采用激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 晶体,非线性晶体 LiIO<sub>3</sub> 内腔倍频获得 100  $\mu$ W 的 473 nm 蓝光输出以来,由于在高密度光学数据存储、彩色显示、水下通信和医学诊断等领域有着广泛的应用前景,全固态蓝光激光器越来越受到人们的关注。目前,已有采用激光二极管抽运 Nd:YAG 晶体, BiBO 晶体内腔倍频获得 2.8 W<sup>[2]</sup>

和 LBO 晶体内腔倍频获得 3.8 W<sup>[3]</sup> 的 473 nm 蓝光输出的报道,国内也有输出 1 W 的全固态蓝光激光器的报道<sup>[4]</sup>。然而,单横模输出的内腔倍频激光器由于不同纵模之间相互竞争,产生“蓝光问题”<sup>[5,6]</sup>,影响激光器的输出稳定性和光束质量,限制了全固态蓝光激光器在高精度激光测量、高密度光存储、生物技术以及紫外频标等领域的应用。为解决这一困难,许多研究工作采取措施使激光器连续单频运转,

收稿日期: 2009-03-31; 收到修改稿日期: 2009-04-14

基金项目: 国家自然科学基金(60527003, 60878003)和国家自然科学基金创新研究群体(60821004)资助项目。

作者简介: 王珪廷(1981—),男,博士研究生,主要从事全固态激光技术方面的研究。E-mail: ytwang@email.sxu.cn

导师简介: 张宽收(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事量子光学与激光技术等方面的研究。

E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn(通信联系人)

消除纵模之间的相互耦合,以获得稳定的低噪声、窄线宽连续单频蓝光激光输出。Holleman 等<sup>[7]</sup>采用扭摆模技术的方法,LD 抽运 Nd:YAG 晶体,非线性晶体 KNbO<sub>3</sub> 内腔倍频得到 100 mW 的连续单频 473 nm 蓝光激光输出;Bode 等<sup>[8]</sup>采用单片环状的连续单频 946 nm 激光器作为抽运源,通过 KNbO<sub>3</sub> 晶体外腔倍频获得 500 mW 的连续单频 473 nm 蓝光激光输出。但要实现精密选模,比较好的方法是设计环形激光谐振腔,在谐振腔内插入光学单向器,消除空间烧孔效应,使激光器连续单向单频运转,从而实现理想的激光频率稳定性<sup>[9]</sup>。

本文报道了激光二极管端面抽运的全固态连续单频 Nd:YAG 环形激光器的设计及实验结果。通过周期极化 KTP(PPKTP)晶体内腔倍频,激光器的连续单频蓝光输出功率达 770 mW,长期功率稳定性优于±2.2%,频率稳定性优于±5 MHz/min。

## 2 激光器的设计

Nd:YAG 激光晶体与其他掺钕激光晶体相比有着良好的光学质量和高的热导率,特别是该晶体基态的 Stark 分裂较大,导致激光的自吸收损耗相对较小<sup>[6]</sup>。实验中选择 Nd:YAG 作为激光晶体,在利用 Nd:YAG 晶体的<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>能级跃迁获得 946 nm 激光输出的基础上,通过内腔倍频技术获得 473 nm 蓝光激光输出。在<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>→<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub>激光跃迁中,下激光能级为基态,属于准三能级系统。激光器实现 946 nm 激光高效率运转的困难在于:1)该激光的受激辐射截面仅为 $4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[10]</sup>,比该晶体的 $1.064 \mu\text{m}$ 激光发射截面( $2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ )小一个数量级,因此在设计激光器的时候要考虑如何抑制 $1.064 \mu\text{m}$ 激光振荡,并设计合适的激光谐振腔和抽运系统以降低激光器的抽运阈值功率;2)由于常温下激光下能级存在一定粒子数,导致严重的自吸收损耗,利用准三能级速率方程可以得到激光器阈值抽运功率和在受激辐射条件下自吸收损耗的表达式<sup>[11]</sup>

$$P_{\text{th}} = \frac{\pi h \nu_p (\omega_0^2 + \omega_p^2)}{4 \sigma \eta_p (f_a + f_b) [1 - \exp(-\alpha l)]} \times (\delta + 2 \sigma f_a N_d l), \quad (1)$$

$$\delta_{\text{abs}} = \frac{\sigma f_a N_d l I_{\text{sat}}}{I} \ln \left( 1 + \frac{2I}{I_{\text{sat}}} \right), \quad (2)$$

其中 $\sigma$ 为受激辐射截面, $N_d$ 为激活粒子的掺杂浓度, $l$ 为激光晶体长度, $I = \Phi c h \nu_l / (\pi \omega_0^2 n l)$ 为腔内激光功率密度, $I_{\text{sat}} = h \nu_l / [(f_a + f_b) \sigma]$ 为饱和功率密

度, $\Phi$ 为腔内振荡光子总数, $c$ 为真空中光速, $h \nu_l$ 为振荡激光光子能量, $h \nu_p$ 为抽运光光子能量, $n$ 为激光晶体对振荡光的折射率, $\omega_0$ 为激光晶体中振荡光的光斑大小, $\omega_p$ 为激光晶体中抽运光的光斑大小, $\tau$ 为上激光能级粒子自发辐射寿命, $\delta$ 为输出透射损耗和其他内腔损耗, $f_b$ 为激光上能级粒子数占亚稳态总的粒子数百分比, $f_a$ 为由于基态的 Stark 分裂、激光下能级粒子数占总的基态粒子数的百分比,且可表示为

$$f_a = \frac{g_a \exp(-E_a/KT)}{Z_a}, \quad (3)$$

其中 $Z_a = \sum_i g_i \exp(-E_i/KT)$ , $g_a$ 和 $g_i$ 为能级简并度, $E_i$ 为能级能量, $K$ 为玻尔兹曼常数, $T$ 为激光晶体的温度。图 1 是利用实验参数计算的在抽运功率为 20 W 时,Nd:YAG 晶体的自吸收损耗随晶体温度的变化关系。从上述分析和图 1 中可以看到,激光器阈值抽运功率和自吸收损耗随晶体温度降低而减小。因此在设计激光器的时候采用了有效的激光晶体散热装置,并将激光晶体的温度控制在 $12 \text{ }^\circ\text{C}$ ,以获取高效 946 nm 激光运转。

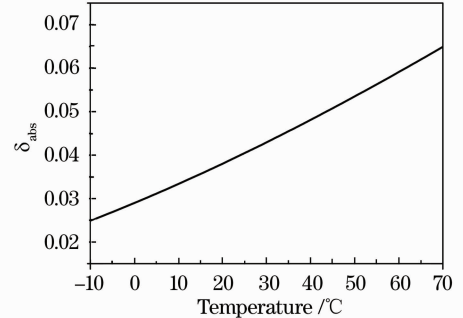


图 1 Nd:YAG 晶体的自吸收损耗随晶体温度的变化曲线

Fig. 1 Reabsorption loss of Nd:YAG crystal versus temperature of crystal

为获得高效 946 nm 激光运转,降低激光器的抽运阈值功率,在激光器的设计过程中将在激光晶体中采用较小的振荡激光和抽运激光的光斑,而且准三能级激光运转不可避免地对激光的再吸收,都将使激光晶体的热效应更加严重。在激光谐振腔设计过程中,必须考虑激光晶体的热致透镜效应的影响,因此测量了激光晶体热致透镜的热焦距。图 2 是实验测得的 Nd:YAG 晶体和两端为没有 Nd 离子掺杂的复合 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距随抽运激光功率的变化关系。图中,圆点为实测的 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距,虚线为该晶体热透镜焦距理论计算值;方块为实测的复合 Nd:YAG 晶体的热透镜焦

距,实线为该晶体热透镜焦距的理论计算值。从图中可以看到,在相同抽运功率下,复合 Nd:YAG 晶体的热致透镜效应要小于一般 Nd:YAG 激光晶体。因此,为获得高效稳定的激光输出,在实验中选用了复合 Nd:YAG 晶体作为激光晶体,当抽运功率为 20 W 时,实测的复合 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距为 156 mm。

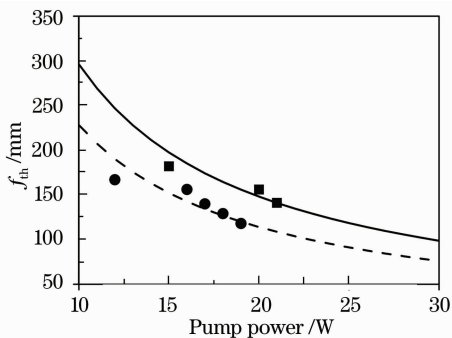


图 2 Nd:YAG 激光晶体的热透镜焦距随抽运激光功率的变化

Fig. 2 Thermal focal length of Nd:YAG crystal versus pump power

为使激光器实现连续单频运转,设计了如图 3 所示的由腔镜  $M_1 \sim M_4$  构成的 4 镜环形谐振腔, $M_1, M_2$  为平面反射镜, $M_3, M_4$  是曲率半径为 100 mm 的凹面反射镜。考虑到 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距为 156 mm,利用 ABCD 矩阵理论计算了谐振腔稳定性条件  $|A+D|$ ,激光晶体处激光光斑大小以及倍频晶体处激光光斑大小随  $M_3-M_4$  之间腔长  $L_1$  和  $M_3-M_2-M_1-M_4$  之间腔长  $L_2$  的变化关系。在谐振腔的设计中要考虑:1)为使激光器稳定运转,要满足激光晶体中振荡激光光斑的大小随热焦距的变化不灵敏,即热不灵敏条件  $|A+D|=0$ <sup>[12]</sup>;2)在大功率抽运条件下,由于热致衍射损耗也比较严重,为了得到最大的输出功率,激光晶体中振荡激光腰斑和抽运光腰斑的交叠率应为 0.85<sup>[13]</sup>;3)为实现高效倍频蓝光输出,倍频晶体中振荡激光腰斑的大小需满足

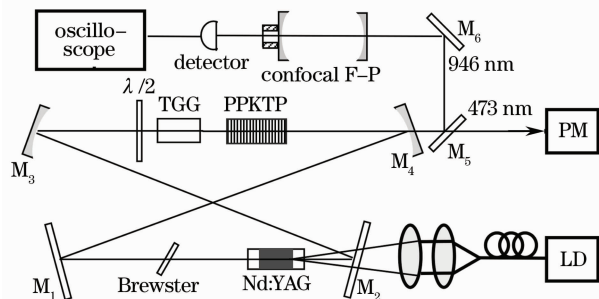


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup

最佳倍频条件<sup>[14]</sup>。根据计算结果,选取  $L_1$  为 123 mm,  $L_2$  为 240 mm,在此谐振腔结构下,  $|A+D|=0.45$ ,激光晶体中振荡激光腰斑为 190  $\mu\text{m}$ ,倍频晶体中振荡激光腰斑为 100  $\mu\text{m}$ 。

为得到高质量高效率的倍频蓝光输出,需要选择高质量的非线性晶体作为内腔倍频晶体。使用较为广泛的倍频晶体有  $\text{KNbO}_3, \text{BBO}, \text{BIBO}, \text{LBO}$  等。 $\text{KNbO}_3$  晶体的有效非线性系数最大、走离角小,但它的光谱接受带宽窄,使用中易发生晶畴反转;BBO 的有效非线性系数较大,但相位匹配角度范围窄,走离效应严重,激光输出呈椭圆形;BIBO 的有效非线性系数较大,光损伤阈值高,但双折射率差较大,相位匹配波长随角度的变化灵敏;LBO 晶体有良好的物理化学性质,损伤阈值很高,光谱接受带宽较宽,走离角小,但有效非线性系数和倍频效率较低。随着准相位匹配技术的发展,周期性极化的非线性晶体(如 PPLN, PPKTP 等)由于可以利用其最大的  $d_{33}$  非线性系数、避免走离效应等优点而受到人们的青睐<sup>[6]</sup>,特别是 PPKTP 晶体无光折变效应,可以在室温附近实现温度匹配。因此实验选用 PPKTP 作为非线性晶体来实现高效倍频蓝光输出。

### 3 实验装置与结果

图 3 是 LD 端面抽运的 Nd:YAG 环形激光器,PPKTP 晶体内腔倍频获得连续单频蓝光激光输出的实验装置示意图。抽运源采用芯径为 400  $\mu\text{m}$  的光纤耦合输出的中心波长为 808 nm,最大输出功率为 25 W 激光二极管,抽运激光经焦距为 30 mm 和 30 mm 两个透镜准直和聚焦后入射到激光晶体上,聚焦后的抽运激光半径约为 200  $\mu\text{m}$ 。激光晶体为  $\phi 3 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$  的复合 Nd:YAG 晶体,其中间为 5 mm 长的掺杂原子数分数为 1.0% 的 Nd:YAG,两边分别为 3 mm 长的不掺杂 YAG 晶体。Nd:YAG 晶体的两个端面分别镀 808 nm, 1.064  $\mu\text{m}$  高透膜 ( $T_{808 \text{ nm}, 1.064 \mu\text{m}} > 90\%$ ) 和 946 nm 减反膜 ( $R_{946 \text{ nm}} < 0.25\%$ ),激光晶体的侧面用铝箔包住装在温度恒定的紫铜夹内,紫铜夹用热电制冷器通过自制的高精度控温仪进行温度控制,控温仪的控温精度为 0.1%。在实验中,为减小晶体的自吸收损耗,提高激光器的转换效率,把 Nd:YAG 晶体的温度控制在 12  $^{\circ}\text{C}$ 。激光谐振腔为由平面镜  $M_1, M_2$  和平凹镜  $M_3, M_4$  构成的环形谐振腔,平面镜  $M_1, M_2$  为输入耦合镜,分别镀 808 nm, 1.064  $\mu\text{m}$  高透膜 ( $T_{808 \text{ nm}, 1.064 \mu\text{m}} > 90\%$ ) 和 946 nm 高反膜 ( $R_{946 \text{ nm}} >$

99.5%)。平凹镜  $M_3, M_4$  的曲率半径为 100 mm, 分别镀 946 nm 高反膜( $R_{946 \text{ nm}} > 99.5\%$ )和 473 nm 高透膜( $T_{473 \text{ nm}} > 90\%$ ),  $M_1, M_2$  之间振荡激光腰斑半径为 190  $\mu\text{m}$ , 和抽运激光的模式可以较好地匹配。用一个厚度为 0.5 mm 的熔融石英片作为布儒斯特片来起偏和检偏。在谐振腔中插入由一个 946 nm  $\lambda/2$  波片和置于磁铁中的 TGG 晶体构成的光学单向器, 迫使激光器单向运转, 从而实现 946 nm 连续单频振荡。选用一块尺寸为 1 mm(厚)  $\times$  2 mm(宽)  $\times$  10 mm(长), 极化周期为 6.5  $\mu\text{m}$  的 PPKTP 作为倍频晶体, 且晶体的 1 mm  $\times$  2 mm 透光面均镀 946 nm 和 473 nm 减反膜( $R_{946 \text{ nm}, 473 \text{ nm}} < 0.25\%$ ), PPKTP 晶体置于晶体炉中用自制的高精度控温仪进行温度控制, 控温仪的控温精度为 0.01%。把 PPKTP 晶体插入平凹镜  $M_3, M_4$  之间的振荡激光腰斑半径为 100  $\mu\text{m}$  的腰斑处, 同时将晶体温度精确控制在 30  $^\circ\text{C}$ , 通过仔细调节准直激光器各个光学元件, 即可获得高效的倍频蓝光输出。

由腔镜  $M_4$  输出的连续单频蓝光激光经双色镜  $M_5$  (镀 946 nm 高反膜和 473 nm 减反膜) 过滤掉 946 nm 激光后用美国相干公司 FieldMaster 功率计 (PM) 测量其功率。图 4 是实测的 473 nm 连续单频激光输出功率随抽运光功率的变化关系。激光器的阈值抽运功率为 4.5 W, 当抽运光功率为 20 W 时, 最大连续单频蓝光输出功率为 770 mW。图 5 是实测的蓝光激光的长期功率稳定性曲线, 在 4 h 内激光器蓝光激光的输出功率峰峰值波动小于  $\pm 2.2\%$ 。

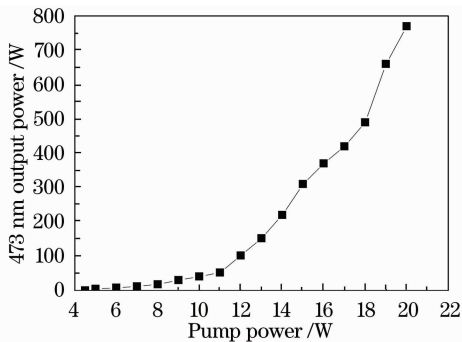


图 4 473 nm 连续单频激光输出功率随抽运光功率的变化曲线

Fig. 4 473 nm single frequency laser output power versus pump power

把经双色镜  $M_5$  反射的 946 nm 激光注入到扫描共焦法-珀(F-P)腔(自由光谱范围为 750 MHz, 精细度为 500), 监视激光器的运转模式, 其透射信号用光电探测器探测, 示波器(型号: TDS2024)记

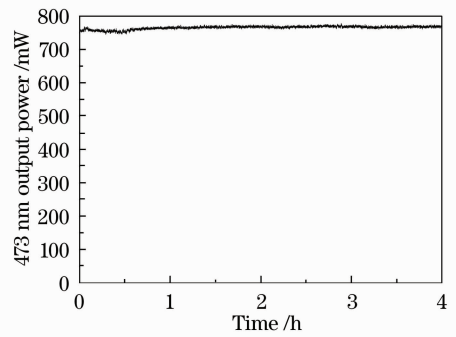


图 5 473 nm 连续单频激光输出功率的长期波动曲线

Fig. 5 Long-term output power fluctuations of the 473nm single frequency laser

录, 如图 6(a)所示, 激光器为单频运转。当激光器自由运转时, 外界的机械振动、晶体温度波动等因素对激光谐振腔腔长的扰动会导致输出激光频率的漂移和波动, 实验测量的蓝光激光的频率波动为  $\pm 40 \text{ MHz/min}$ 。为了改善激光器的频率稳定性, 利用电子伺服系统将激光器的频率锁定在另一个共焦 F-P 腔(自由光谱范围为 750 MHz, 精细度 500)的共振透射峰上。当激光器的频率锁定后, 扫描共焦 F-P 腔的透射信号如图 6(b)所示, 输出激光的频率稳定性得到明显改善, 946 nm 激光的频率稳定性优于  $\pm 2.5 \text{ MHz/min}$ , 可以对应计算出 473 nm 连续单频蓝光激光的频率稳定性优于  $\pm 5 \text{ MHz/min}$ 。

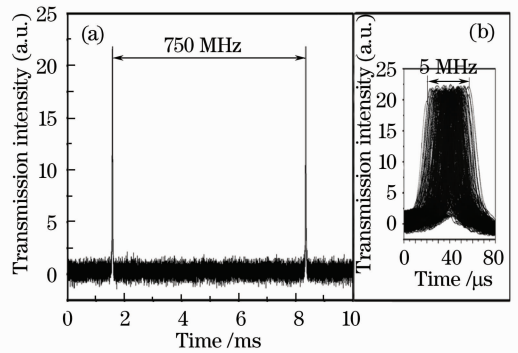


图 6 (a) 扫描共焦 F-P 腔的透射曲线; (b) 激光器锁定后, 1 min 内激光器的频率抖动

Fig. 6 (a) Transmission of the scanned confocal F-P cavity; (b) Frequency shift in 1 min when the laser was locked

## 4 结 论

设计并实现了一台稳定输出全固态连续单频 473 nm 蓝光激光器。在激光器的设计过程中, 分析讨论了当 Nd:YAG 实现准三能级运转, 获得 946 nm 激光跃迁时, 晶体的自吸收损耗和热致透镜

效应;在考虑激光器稳定运转并满足热不灵敏条件、激光晶体中振荡激光抽运激光的模式匹配以及最佳倍频条件的基础上设计了4镜环形谐振腔。采用激光二极管端面抽运复合Nd:YAG激光晶体,通过PPKTP内腔倍频,实现了稳定的连续单频473 nm蓝光激光输出。最大连续单频473 nm蓝光输出功率为770 mW,长期功率稳定性优于 $\pm 2.2\%$ 。利用电子伺服系统将激光器的频率锁定在共焦F-P腔的共振透射峰上,蓝光激光的频率稳定性优于 $\pm 5$  MHz/min。该激光器在高精度激光测量、高密度光存储、生物技术以及紫外频标等领域有着广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 W. P. Risk, W. Lenth. Room-temperature, continuous-wave, 946 nm Nd:YAG laser pumped by laser-diode arrays and intracavity frequency doubling to 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12): 993~995
- 2 C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BiBO laser with 2.8 W output power at 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- 3 Y. Chen, H. Peng, W. Hou *et al.*. 3.8 W of cw blue light generated by intracavity frequency doubling of a 946-nm Nd:YAG laser with LBO [J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**: 241~243
- 4 Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. 1.1 W CW output, all-solid-stated blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 523~526  
王军营,郑 权,薛庆华等. 1.1 W连续输出473 nm全固态蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 523~526
- 5 V. Gaebler, B. Liu, H. Eichler *et al.*. Efficient blue cw Nd:YAG microchip laser with two intracavity frequency doublers [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(18): 1343~1345
- 6 M. Pierrou, F. Laurell, H. Karlsson *et al.*. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO<sub>4</sub> crystal [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(4): 205~207
- 7 G. Hollemann, E. Peik, H. Walther. Frequency-stabilized diode-pumped Nd:YAG laser at 946 nm with harmonics at 473 nm and 237 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(3): 192~194
- 8 M. Bode, I. Freitag, A. Tunnermann *et al.*. Frequency-tunable 500-mW continuous-wave all-solid-state single-frequency source in the blue spectral region [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1220~1221
- 9 Zheng Yaohui, Zhang Kuanshou. All-solid-state blue laser of single-frequency operation end-pumped by diode laser [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2004, **10**(1): 42~46  
郑耀辉,张宽收. LD端面抽运的全固化单频蓝光激光器[J]. *量子光学学报*, 2004, **10**(1): 42~46
- 10 T. Y. Fan, Robert L. Byer. Continuous-wave operation of a room-temperature, diode-laser-pumped, 946-nm Nd:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(10): 809~811
- 11 P. Zeller, P. Peuser. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the  $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$  transitions of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 34~36
- 12 K. C. Peng, L. A. Wu, H. J. Kimble. Frequency stabilized Nd:YAG laser with high output power [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(7): 938~940
- 13 Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: Influence of thermal effect [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~1429
- 14 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin *et al.*. All-solid-state high-efficiency high-power Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser of single-frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 739~742  
郑耀辉,卢华东,李凤琴等. 全固态高输出功率单频Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 739~742