

文章编号: 0258-7025(2006)10-1314-05

## 2.1 W 连续绿光输出的一阶准相位匹配 内腔倍频

纪 峰<sup>1,2,3</sup>, 姚建铨<sup>1,2,3</sup>, 张百钢<sup>1,2,3</sup>, 周 睿<sup>1,2,3</sup>,  
路 洋<sup>1,2,3</sup>, 张铁犁<sup>1,2,3</sup>, 张 强<sup>1,2,3</sup>, 王 鹏<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> 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, 天津 300072

<sup>2</sup> 教育部光电信息技术科学重点实验室(天津大学), 天津 300072; <sup>3</sup> 南开大学、天津大学联合研究院, 天津 300072

**摘要** 利用周期极化化学计量比掺氧化镁 LiTaO<sub>3</sub> 晶体 (PP-MgO:SLT), 对半导体激光器 (LD) 端面抽运的 1064-nm-Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器进行了一阶准相位匹配 (QPM) 内腔倍频 (ISHG)。PP-MgO:SLT 晶体长 20 mm, 极化周期为 7.93 μm (室温下), 利用外加电场极化法制作, 极化沿晶体的 z 向进行。实验中基频光波和倍频光波均沿晶体 z 向偏振以利用其最大的有效非线性系数。Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器选用三镜折叠腔结构, 在半导体激光器抽运功率为 11 W, 晶体温度为 70.4 °C 时, 产生了最大输出功率为 2.1 W 的连续绿光激光, 光-光转换效率为 19%。同时对 PP-MgO:SLT 晶体外腔单程倍频下的转换效率与晶体温度间的关系进行了理论研究。实验中测得的内腔倍频的允许温度要远大于外腔单程倍频; 另外, 观察到随着晶体温度的变化倍频光功率出现突然下降的现象, 并给出了相应的讨论。

**关键词** 非线性光学; 频率变换; 内腔倍频; 一阶准相位匹配; 周期极化化学计量比掺氧化镁 LiTaO<sub>3</sub> 晶体

**中图分类号** TN 248.1; O 437 **文献标识码** A

## 2.1 W Continuous Wave Green Light Output by First-Order Quasi-Phase-Matched Intracavity Second Harmonic Generation

Ji Feng<sup>1,2,3</sup>, Yao Jian-quan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Bai-gang<sup>1,2,3</sup>, Zhou Ri<sup>1,2,3</sup>,  
Lu Yang<sup>1,2,3</sup>, Zhang Tie-li<sup>1,2,3</sup>, Zhang Qiang<sup>1,2,3</sup>, Wang Peng<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup> College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,  
Institute of Laser and Optoelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Optoelectric Information Science and Technology,  
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>3</sup> Cooperated Institute of Nankai University and Tianjin University, Tianjin 300072, China

**Abstract** First-order quasi-phase-matched intracavity second harmonic generation (ISHG) internal to a 1064-nm-Nd:YVO<sub>4</sub> laser end-pumped by a laser diode (LD) based on MgO-doped stoichiometric periodically poled lithium tantalate (PP-MgO:SLT) is demonstrated. The PP-MgO:SLT crystal is 20-mm-long and has a grating period of 7.93 μm (at room temperature), which is periodically poled along the z-axis by using the external electric poling technique. The fundamental and second harmonic waves are of z-polarization to access the largest effective nonlinear coefficient. Using a three-mirror folded cavity design for the Nd:YVO<sub>4</sub> laser, the maximum green light output

**收稿日期:** 2006-01-16; **收到修改稿日期:** 2006-04-20

**基金项目:** 国家自然科学基金 (10474071), 教育部南开大学、天津大学科技合作基金和天津市科技发展计划 (033181311) 资助项目。

**作者简介:** 纪 峰 (1981—), 男, 安徽利辛人, 天津大学物理电子学专业博士研究生, 主要从事全固态激光器以及准相位匹配频率变换方面的研究工作。E-mail: jifengtju@163.com

**导师简介:** 姚建铨 (1939—), 男, 上海人, 天津大学物理电子学专业教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 目前主要从事全固态激光器及非线性光学频率变换技术方面的研究。E-mail: jqyao@tju.edu.cn

power of 2.1 W and the conversion efficiency of 19% are achieved at an incident LD pump power of 11 W. The relationship between the conversion efficiency of a single-pass extracavity second harmonic generation (ESHG) in PP-MgO:SLT and the crystal temperature is theoretically investigated. It is found that the measured acceptance temperature bandwidth of the ISHG is significantly wider than that of the ESHG. In addition, the ISHG curve shows an abrupt decrease in second harmonic power as a function of the crystal temperature, and the corresponding discussion is presented.

**Key words** nonlinear optics; frequency conversion; intracavity second harmonic generation; first-order quasi-phase-matching; MgO-doped stoichiometric periodically poled lithium tantalate crystal

## 1 引言

最常见的用于准相位匹配(QPM)的非线性晶体有周期极化 LiNbO<sub>3</sub> (PPLN), 周期极化 KTiOPO<sub>4</sub> (PPKTP), 周期极化 RbTiOAsO<sub>4</sub> (PPRTA), 周期极化 LiTaO<sub>3</sub> (PPLT) 等。其中, PPLN, PPLT 因具有非常大的二阶非线性系数, 且容易生长出大尺寸的晶体材料, 获得了更为广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。但是这两种晶体在室温下的极化反转电场均较大(>21 kV/mm), 给极化带来许多困难, 如样品易击穿, 极化反转不均匀等, 很难得到大通光孔径的极化晶体, 再加上 PPLN, PPLT 本身抗损伤阈值的能力比较低, 从而极大地限制了其在高功率水平下的应用。

最近, 出现了一种周期极化化学计量比晶体<sup>[3,4]</sup>。它通过合理地控制晶体中元素的比例, 可以降低铁电畴的极化反转电场 1~2 个量级, 较低的极化电场有利于得到高质量的均匀畴结构, 并且有利于得到大极化厚度的晶体。同时在晶体中掺入少量的氧化镁, 可以极大地提高晶体的抗损伤阈值能力<sup>[5]</sup>。因此, 将提高晶体的抗损伤阈值能力和降低极化电场有机地结合起来, 可以得到更为理想的准相位匹配光学器件, 并将成为周期极化技术的重要发展方向。

利用周期极化晶体实现全固态激光器的准相位匹配倍频是获得短波长激光输出的一种非常有效的方法。V. Pruneri 等最早报道了基于 PPLN 晶体的 1064 nm Nd:YAG 激光器的内腔倍频(ISHG), 在 450 mW 的抽运功率下, 仅获得了 400 μW 的连续绿光输出<sup>[6]</sup>, 这是准相位匹配内腔倍频的首次探索性实验。2000 年, S. Wang 等利用 PPKTP 晶体实现了 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 薄盘激光器的内腔倍频, 在 8.65 W 的抽运功率下获得了 1.3 W 的倍频绿光, 光-光转换效率为 15%<sup>[7]</sup>。2004 年, S. Greenstein 等利用 PPKTP 晶体实现了 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的内腔倍频, 抽运功率为 14 W 时获得了最大 2.3 W 的绿光输出, 在抽运功率为 12.3 W 时, 最大

光-光转换效率为 17%<sup>[8]</sup>。

本文采用周期极化化学计量比掺氧化镁 LiTaO<sub>3</sub> (PP-MgO:SLT) 作为内腔倍频晶体, 实现了全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器一阶准相位匹配内腔倍频。

## 2 理论分析

实验中采用的倍频晶体 PP-MgO:SLT, 利用外加电场极化法制作, 极化沿晶体的  $z$  向进行, 极化周期为 7.93 μm (室温下)。此大小的周期可以保证晶体在 73 °C 附近实现 1064 nm 基频光的一阶准相位匹配倍频。晶体长 20 mm, 厚 1 mm, 两个端面均镀有 532 nm 和 1064 nm 的双高透膜, 晶体放置在温控炉中, 工作温度范围为 25~250 °C。基频光波和倍频光波均沿晶体  $z$  向偏振以利用晶体的最大有效非线性系数。

目前, 很难从理论上确定 PP-MgO:SLT 晶体准相位匹配倍频的理想温度, 原因主要是还没有 PP-MgO:SLT 晶体的温度依赖塞耳迈耶尔(Sellmeier)方程和描述晶体长度变化的热膨胀系数方程, 只能在实验中测出晶体的最佳匹配温度。另外, 即使晶体非常薄, 非线性晶体中的温度分布也与在温度控制器上设定的温度不尽相同。而且, 当我们改变抽运光注入功率时, 由于晶体对抽运光的吸收导致晶体中的热分布动态变化, 故实验参数的变化导致晶体内部热分布与设定的温度不相同。因此, 为了获得二次谐波产生的高输出功率, 温度的设定必须随着抽运功率的改变而改变。

但是, 可以通过近似计算来大体确定晶体的工作温度。采用普通的钽酸锂晶体(CLT)的热膨胀系数( $a = 1.6 \times 10^{-5}$ ,  $b = 7.0 \times 10^{-9}$ )<sup>[9]</sup> 替代 PP-MgO:SLT 晶体的热膨胀系数, 晶体的热膨胀方程表示为

$$\Delta(T) = \Delta(25)[1 + a(T - 25) + b(T - 25)^2], \quad (1)$$

式中  $\Delta(T)$  为在温度  $T$  下的晶体极化周期。同时采用未掺 MgO 的 SLT 晶体的温度色散方程来替代

PP-MgO:SLT 晶体的温度色散方程。SLT 晶体中 e 光折射率的温度色散方程为<sup>[10]</sup>

$$n_e^2(\lambda, T) = A + \frac{B + b(T)}{\lambda^2 - [C + c(T)]^2} + \frac{E}{\lambda^2 - F^2} + \frac{G}{\lambda^2 - H^2} + D\lambda^2, \quad (2)$$

其中  $A = 4.502483$ ,  $B = 0.007294$ ,  $C = 0.185087$ ,  $D = -0.02357$ ,  $E = 0.073423$ ,  $F = 0.199595$ ,  $G = 0.001$ ,  $H = 7.99724$ ,  $b(T) = 3.483933 \times 10^{-8}(T + 273.15)^2$ ,  $c(T) = 1.607839 \times 10^{-8}(T + 273.15)^2$ ,  $\lambda$  为光波长。

小信号近似下倍频光效率转换公式可表示为<sup>[11]</sup>

$$\eta_Q = \frac{d_Q^2 I_\lambda}{2c\epsilon_0} \cdot \frac{16\pi^2 L(T)^2}{n_{\lambda/2}(T) \cdot n_\lambda(T)^2 \cdot \lambda^2} \times \text{sinc}^2 \left[ \frac{\Delta k_Q(\lambda, T) \cdot L(T)}{2} \right], \quad (3)$$

式中  $d_Q$  为准相位匹配的有效非线性系数,  $I_\lambda$  为基频光强,  $c$  为真空中的光速,  $\epsilon_0$  为真空中的介电常数,  $L(T)$  为温度  $T$  下的晶体长度,  $n_\lambda(T)$ ,  $n_{\lambda/2}(T)$  分别为基频光波与倍频光波在温度  $T$  下的折射率,  $\Delta k_Q(\lambda, T) = 4\pi[n_{\lambda/2}(T) - n_\lambda(T)]/\lambda - 2\pi/\Lambda(T)$  为准相位匹配下的相位失配量。利用公式(3)从理论上得到了周期为  $7.93 \mu\text{m}$ (室温)的 PP-MgO:SLT 晶体倍频转换效率同其温度的关系曲线,如图 1 所示。PP-MgO:SLT 晶体的理论准相位匹配温度大约为  $74.1^\circ\text{C}$ , 允许温度为  $1.3^\circ\text{C}$ 。

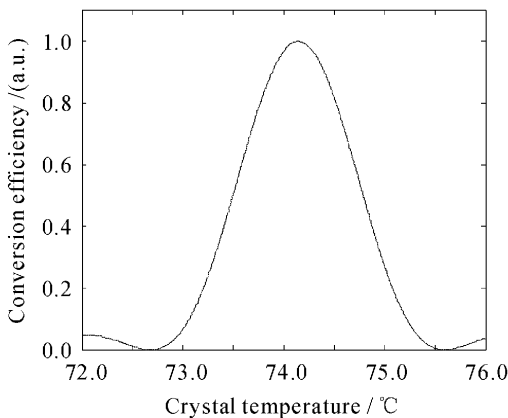


图 1 倍频转换效率与晶体温度间关系的理论计算曲线  
Fig.1 Theoretical conversion efficiency as a function of the crystal temperature for collinear QPM second harmonic generation

### 3 实验装置与结果讨论

实验采用如图 2 所示的三镜折叠腔结构。半导体激光器(LD)抽运源为美国相干(Coherent)公司

生产的带尾纤输出的 EN60825-1 型半导体激光器, 光纤数值孔径为 0.22, 芯径为  $800 \mu\text{m}$ , 经过耦合系统整形、准直后, 光斑半径约为  $400 \mu\text{m}$ , 耦合效率为 80%。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体采用  $a$  轴切割, 晶体尺寸为  $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ , Nd<sup>3+</sup> 离子的掺杂浓度为 0.5%; 晶体一端镀 808 nm 高透, 1064 nm 高反的双色膜作为输入腔镜, 另一端镀 1064 nm 增透膜。M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 曲率半径分别为 200 mm, 100 mm, 均镀有 1064 nm 全反(反射率  $R > 99.8\%$ ), 532 nm 高透的双色膜, 倍频光从两个方向输出。

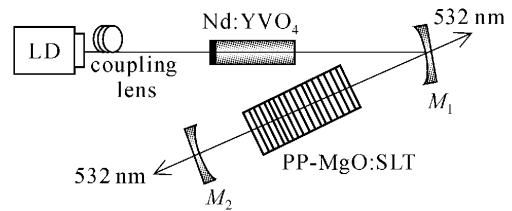


图 2 内腔倍频的实验装置  
Fig.2 Experimental setup of the ISHG

在以前的工作中,曾利用此块晶体实现了单程外腔连续倍频<sup>[12]</sup>。在不同的输入功率和聚焦条件下,得到的温度控制器最佳设定温度也不相同。在基频光功率为 3.14 W, 聚焦光斑半径为  $100 \mu\text{m}$  的条件下,测得的温度控制器最佳设定温度为  $73.2^\circ\text{C}$ , 允许温度测量值为  $1.6^\circ\text{C}$ , 与理论分析的结果基本相符。在基频光功率为 7.69 W, 聚焦光斑半径为  $50 \mu\text{m}$  的条件下,实验测得的最佳设定温度为  $72.8^\circ\text{C}$ 。这说明随着基频光功率的增大和光斑半径的变小,使得温度控制器的最佳设定温度不断降低,这得归因于晶体对抽运光的吸收而导致晶体实际温度的升高。在内腔倍频的结构中,由于极高的内腔功率密度,将会导致非线性晶体对倍频光和基频光的吸收进一步增强,因此温度控制器的最佳设定温度应该继续降低,并且随着抽运功率的增大而降低,这在本实验中得到了很好的验证,在抽运功率为 11 W 时,温度控制器的最佳设定温度为  $70.4^\circ\text{C}$ 。

在最大抽运功率为 11 W 时,测得的倍频光输出功率与温度控制器设定温度之间的关系曲线如图 3 所示。与外腔单程倍频相比,内腔倍频的允许温度显著变宽。出现这一现象的主要原因是由于激光器增益谱宽(0.8 nm)远大于一阶准相位匹配倍频的波长允许带宽(0.13 nm),导致在不同的温度下对应增益谱线中不同的纵模起振,因而允许温度加宽。另外,还观察到随着晶体温度的变化倍频光功率出现突然下降的现象,并有两个下降区间。这主

要是由于各纵模之间的和频效应,使得起振的不同纵模随着温度的连续变化出现了跳变,在倍频光功率上表现为突然的下降,在 PPKTP 的内腔倍频实验中也观察到了类似的现象<sup>[8]</sup>。

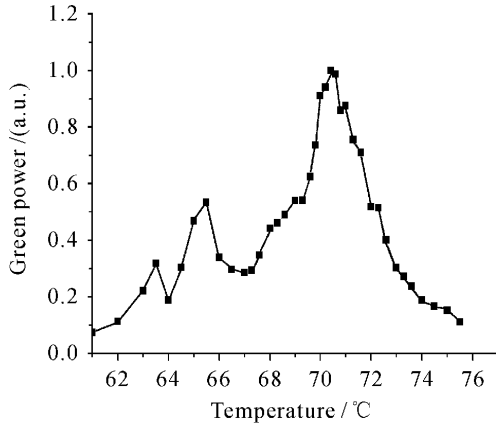


图 3 实验测得的倍频光输出功率与晶体温度间的关系曲线

Fig. 3 Experimental data of the second harmonic output power as a function of the crystal temperature

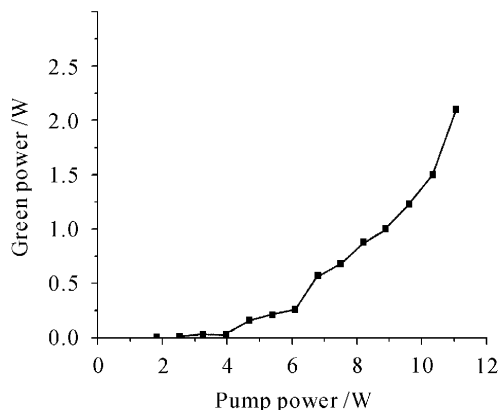


图 4 532 nm 倍频光输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Output power of 532-nm-green radiation as a function of the LD pump power

图 4 是当温度控制器设定温度为 70.4 °C 时,测得的总的 532 nm 激光输出功率随抽运功率的变化曲线。在注入抽运功率为 11 W 时,产生了最大输出功率为 2.1 W 的连续绿光激光,光-光转换效率为 19%。在最佳温度匹配点处,倍频光功率出现了一定的起伏,经分析,引起该现象的原因有以下几种:首先是各纵模之间的和频效应,即所谓的“绿光问题”;其次,当抽运光功率很高时,非线性晶体的吸收严重,晶体出现光束热聚焦现象,导致输出不稳定,这在外腔单程倍频中也曾观察到<sup>[2,13]</sup>;三是匹配温度较低,受晶体光折变效应的影响,也会使功率有起伏,通过提高晶体匹配温度,可以消除光折变的影响<sup>[14]</sup>。

## 4 结 论

采用 V 型折叠腔进行了半导体激光器端面抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器一阶准相位匹配内腔倍频的实验研究,并对晶体的允许温度曲线进行了理论分析和实验研究。在半导体激光器功率为 11 W,温度控制器最佳设定温度为 70.4 °C 的条件下,最终获得了 2.1 W 连续绿光输出,光-光转换效率达到 19%。通过横向移动倍频晶体,输出的倍频光功率变化很小,这说明晶体铁电畴的极化反转比较均匀,但是由于晶体厚度的原因限制了倍频光功率的进一步提高。期待将来能够制作出更大极化厚度的准相位匹配晶体,以获得更高的倍频光功率输出。

## 参 考 文 献

- Zhang Baigang, Yao Jianquan, Ding Xin *et al.*. Continuously tunable optical parametric oscillator based on multi-grating periodically poled lithium niobate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):897~902  
张百钢,姚建铨,丁欣等. 连续调谐输出的多周期极化铌酸锂晶体光学参量振荡器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):897~902
- Liang Xiaoyan, Hou Wei, Wang Jiasheng *et al.*. Quasi-cw frequency doubling in bulk periodically poled LiTaO<sub>3</sub> [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4):307~309  
梁晓燕,侯玮,汪家升等. 周期极化 LiTaO<sub>3</sub> 的准连续倍频[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4):307~309
- Takaaki Hatanaka, Koichiro Nakamura, Tetsuo Taniuchi *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillation with periodically poled stoichiometric LiTaO<sub>3</sub>[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(9):651~653
- Yao Jianghong, Chen Yahui, Xu Jingjun *et al.*. Study on periodical poling domain reversal characteristics of near-stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(1):192~196  
姚江宏,陈亚辉,许京军等. 近化学计量比铌酸锂晶体周期极化畴反转特性研究[J]. *物理学报*, 2002, **51**(1):192~196
- Chen Yunlin, Guo Juan, Liu Xiaojuan *et al.*. A study on periodic poling of different compositions of MgO:LiNbO<sub>3</sub> [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(1):156~159  
陈云琳,郭娟,刘晓娟等. 周期极化掺镁不同组分 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(1):156~159
- V. Pruneri, J. Webjörn, P. St. J. Russell *et al.*. Intracavity second harmonic generation of 0.532 μm in bulk periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Commun.*, 1995, **116**(1-3):159~162
- S. Wang, V. Pasiskevicius, E. Laurell *et al.*. Intracavity frequency doubling of Nd:YVO<sub>4</sub> disk laser with periodically poled KTiOPO<sub>4</sub> [C]. *Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO - Technical Digest*, 2000. 16~17
- S. Greenstein, M. Rosenbluh. Dynamics of cw intra-cavity second harmonic generation by PPKTP [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **238**(4-6):319~327
- Y. S. Kim, R. T. Smith. Thermal expansion of lithium tantalate and lithium niobate single crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 1969, **40**(11):4637~4641
- Ariel Bruner, David Eger, Moshe B. Oron *et al.*. Temperature-dependent Sellmeier equation for the refractive index of stoichiometric lithium tantalate [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(3):194~196
- Yao Jianquan. *Nonlinear Optical Frequency Conversion and Laser Tuning Technology* [M]. Beijing: Science Press, 1995. 69~108  
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. 69~108

12 Zhang Baigang, Yao Jianquan, Lu Yang *et al.*. High-efficiency single-pass cw quasi-phase-matched frequency doubling based on PP-MgO:SLT [J]. *Chinese Physics*, 2005, **14**(2):353~358

13 G. D. Miller, R. G. Batchko, W. M. Tulloch *et al.*. 42%-efficient single-pass cw second-harmonic generation in

periodically poled lithium niobate [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22** (24):1834~1836

14 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*. Quasi-phase-matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO<sub>3</sub>[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11):2102~2116

### 1906 W 高效准连续全固态激光器\*

随着高峰值功率、高占空比的准连续半导体激光(LD)技术的进步,促进高平均功率准连续全固态激光的快速发展。采用高效抽运耦合技术、高效冷却技术、大基模体积谐振腔设计、多级串接热补偿技术以及最佳输出耦合优化等,实现了准连续1064 nm激光输出,输出功率达1906 W,光-光效率为50.8%。

实验利用中国科学院物理所光物理实验室研制的400 W级准连续半导体激光侧抽运激光头,每个激光头装有 $\phi 7\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 尺寸的Nd:YAG激光晶体,掺杂原子数分数为0.5%,采用六个相同的激

光头串接振荡的系统方案,如图1所示,其中包括6个400 W级的准连续半导体激光侧抽运激光头、三个90°石英旋光片和两个端镜(M<sub>1</sub>为对1064 nm全反射平面镜, M<sub>2</sub>为对1064 nm部分输出耦合平面镜, T<sub>1064 nm</sub> = 80%)。同时在以下三个方面进行优化设计:一是利用低掺杂原子数分数的Nd:YAG晶体和优化的抽运耦合结构实现较均匀的抽运增益分布;二是利用热近非稳腔技术优化设计了谐振腔结构获得大基模体积的激光运转;三是利用偶数支晶体棒串接加90°旋光片结构来补偿Nd:YAG晶体的热致双折射效应,最后获得高效的激光输出。

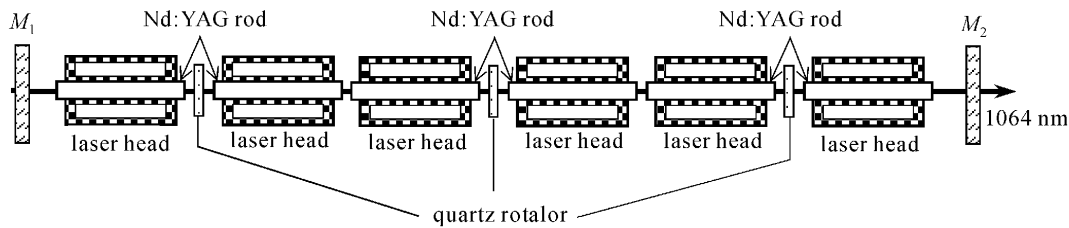


图1 准连续全固态激光器实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of quasi-continuous wave all-solid-state laser (QCW-DPL) setup

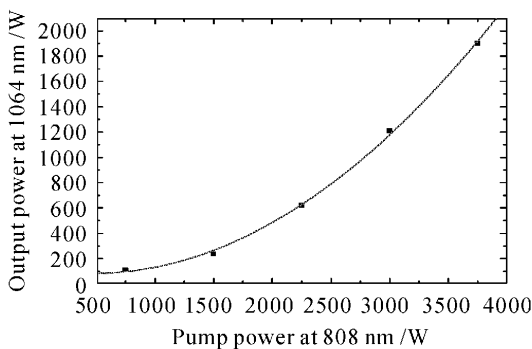


图2 准连续全固态激光器 1064 nm 激光输出功率曲线

Fig. 2 Power characteristics of QCW-DPL

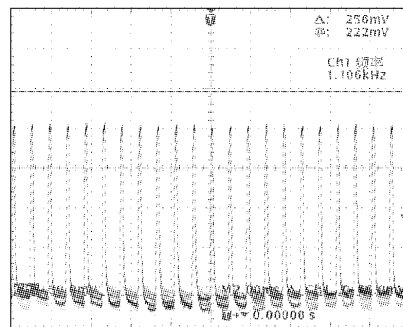


图3 示波器测量的脉冲波形

Fig. 3 Pulse shape of QCW-DPL

实验获得激光输出功率曲线如图2所示。当准连续半导体激光抽运平均功率为3750 W时,激光输出平均功率达1906 W,光-光转换效率为50.8%。在此输出功率下,测得激光重复频率为1.1 kHz,脉冲宽度为224 μs,如图3所示。

中国科学院物理研究所, 北京 100080  
 彭钦军, 张鸿博, 薄 勇, 崔前进, 周 勇,  
 杨晓冬, 许家林, 崔大复, 许祖彦  
 收稿日期: 2006-09-19

\* 中国科学院科技创新方向性项目(KGCX2-SWJG)资助项目。