

文章编号: 1007-6654(2013)02-0177-05

473 nm 和 946 nm 双波长输出的全固态 Nd: YAG 激光器

李晓青, 万振菊, 冯晋霞, 张宽收[†]

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

摘要: 设计并实现了 473 nm 和 946 nm 双波长输出的全固态 Nd: YAG 激光器。利用激光二极管端面泵浦 Nd: YAG 晶体, 在三镜折叠谐振腔中插入 Brewster 窗片作为起偏器, 通过周期极化晶体 PPKTP 内腔倍频获得 473 nm 蓝光输出。同时利用 Nd: YAG 激光晶体的热退偏效应, 把 Brewster 窗片作为基频光输出耦合镜, 实现 946 nm 激光输出。通过调谐 PPKTP 的温度, 优化了倍频光和基频光的输出功率。泵浦功率 25 W 时, 实验获得了 1.8 W 的 473 nm 倍频蓝光和 0.8 W 的 946 nm 基频激光输出。

关键词: Nd: YAG/PPKTP 激光器; 双波长激光输出; 热退偏

中图分类号: O431

文献标识码: A

doi: 10.3788/ASQO20131902.0177

0 引言

利用 Nd: YAG 晶体 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 之间的能级跃迁产生的中心波长为 946 nm 的激光, 通过倍频过程可以产生中心波长为 473 nm 的蓝光。蓝光激光在彩色显示、高密度光学存储、水下通信和探测、激光医学等领域都有广泛的应用。因此利用 Nd: YAG 晶体研究产生 946 nm 和 473 nm 激光已引起大家广泛关注。2006 年, 天津大学的周睿等人采用 Nd: YAG 晶体得到了 15.2 W 的 946 nm 红外输出^[1]; 同年, 中科院的陈亚辉等人通过采用双块 Nd: YAG 晶体以及 LBO 内腔倍频获得了 3.8 W 的 473 nm 蓝光激光输出^[2]。另一方面, 946 nm 激光位于硅探测器的高探测效率波段, 其探测量子效率可达 99%, 可用于提高探测效率的非经典光场的制备^[3]。

但是, 利用 Nd: YAG 晶体产生 946 nm 波长激光属于准三能级激光系统^[4,5], 其晶体热效应比较严重。其中晶体的热致双折射效应会使激光束的偏振特性退化^[6]。为使激光器输出线偏振激光, 需要在谐振腔内插入 Brewster 窗片作为起偏器。虽然该设计增加了谐振腔的内腔损耗^[7], 但同时又可为基频 946 nm 激光提供输出耦合通道。

在本文中, 我们设计了三镜折叠激光谐振腔, 采用 Nd: YAG 晶体作为增益介质、PPKTP 作为内腔倍频晶体, 在谐振腔中插入 Brewster 窗片作为起偏器和基频光的输出耦合镜, 实验实现了 473 nm 和 946 nm 双波长激光输出。

①收稿日期: 2013-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(61227015); 国家重大科学研究计划(2010CB923101); 国家自然科学基金创新研究群体(61121064)

作者简介: 李晓青(1987—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究领域: 全固态激光技术研究。E-mail: linlixiaoqing@163.com

[†]通讯作者: 张宽收, E-mail: kuanshou@sxu.edu.cn

1 实验装置

图1为473 nm和946 nm双波长输出的全固态Nd:YAG激光器的实验装置图。泵浦源采用光纤芯径400 μm、中心波长808 nm、最大输出功率30 W的激光二极管(LD)。利用两个焦距为30 mm的透镜将泵浦光进行准直聚焦,聚焦光斑半径为200 μm。激光晶体采用尺寸为φ3×(3 mm+5 mm+3 mm)的复合Nd:YAG晶体,中间部分的掺杂浓度为1.0%,两个端面均镀808 nm高透膜($T_{808\text{ nm}} > 90\%$)和946 nm减反

膜($R_{946\text{ nm}} < 0.25\%$)。倍频晶体选用可以在室温条件下实现温度匹配的周期极化晶体PPKTP,尺寸为1 mm×2 mm×10 mm,两个端面均镀946 nm和473 nm双色减反膜($R_{946\text{ nm} \& 473\text{ nm}} < 0.25\%$)。激光晶体和倍频晶体分别置于紫铜控温炉内,并通过自制的控温仪进行温度控制。实验中,将Nd:YAG晶体温度控制在12 °C以提高其激光转化效率^[8];倍频晶体置于两凹面镜间,并通过控温仪优化其温度,实现最佳激光输出。

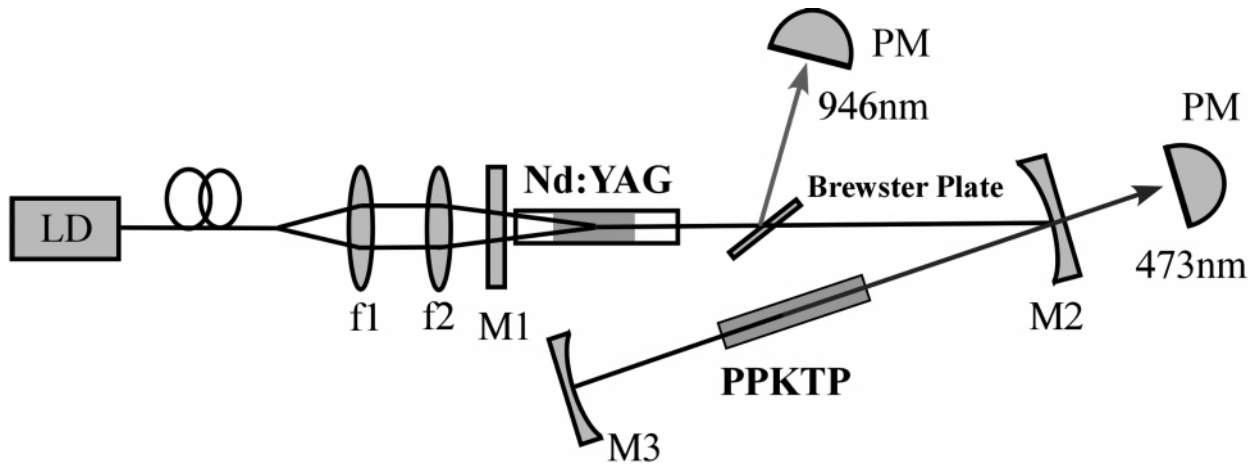


图1 双波长全固态Nd:YAG激光器的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of the dual-wavelength Nd:YAG laser

激光谐振腔是由平面镜M1和平凹镜M2、M3构成的三镜折叠腔。M1为输入耦合镜,镀808 nm、1064 nm高透膜($T_{808\text{ nm} \& 1064\text{ nm}} > 90\%$)和946 nm高反膜($R_{946\text{ nm}} > 99.5\%$);M2和M3都为曲率半径 $R = 100\text{ mm}$ 的平凹镜,M3镀946 nm、473 nm双色高反膜($R_{946\text{ nm} \& 473\text{ nm}} > 99.5\%$),M2为473 nm蓝光输出耦合镜,镀946 nm高反膜和473 nm高透膜($R_{946\text{ nm}} > 99.5\%$, $T_{473\text{ nm}} > 95\%$)。M1和M2之间以Brewster角度插入0.5 mm厚的熔融石英片作为起偏器和基频光的输出耦合镜。从平凹镜M2和Brewster窗片输出的473 nm倍频蓝光和946 nm基频光分别用激光功率计(型号:LabMax-Top/LM-10 HTD, Coherent)测量。

2 谐振腔型的参数选取

为了选取合适的谐振腔参数,我们需要计算激光晶体的热透镜焦距。晶体的热焦距可以表示为^[9]:

$$f_t = \frac{\pi K \omega_p^2}{\xi P_{in} \eta_{abs} (dn/dt)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha L)} \right) \quad (1)$$

其中, K 为激光晶体的热导率, ω_p 为晶体中心泵浦光斑半径, P_{in} 为入射泵浦功率, ξ 为热沉积比, η_{abs} 为晶体对泵浦光的吸收效率, dn/dt 为激光晶体折射率随温度变化的系数, α 为晶体在泵浦光波长处的吸收系数, L 为增益介质长度。在946 nm Nd:YAG激光器中,上述涉及的参数选取如下^[4, 5, 10]: $K = 13\text{ W/m}^\circ\text{C}$, $\omega_p = 200\ \mu\text{m}$, $\xi = 0.15$, $\eta_{abs} = 0.95$, $\alpha = 4\text{ cm}^{-1}$, $dn/dt = 8.7 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $L = 5\text{ mm}$ 。根据公式(1)计算得

知, 泵浦功率 25 W 时, 热焦距大约为 60 mm。因此在设计谐振腔时, 我们将激光晶体等效为一个焦距 $f_t = 60$ mm 的薄透镜。

将 M1 和 M2 之间间距记为 L_1 , 两凹面镜间距记为 L_2 , 通过 ABCD 传输矩阵理论计算可以得到谐振腔稳定性参数 $(A+D)/2$ 和激光晶体中心振荡光斑 ω_0 随 L_1 、 L_2 的变化关系, 如图 2 和图 3 所示。

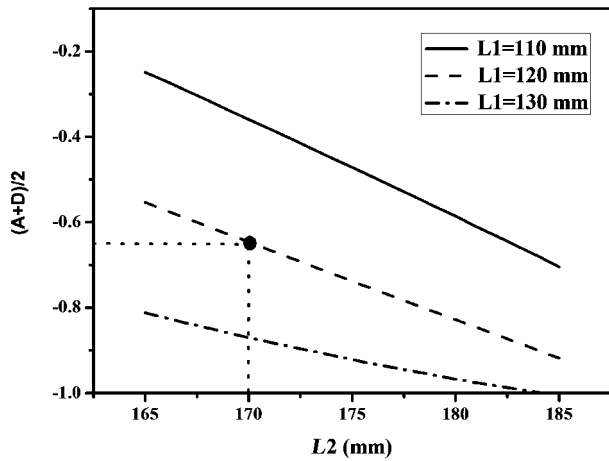


图 2 谐振腔稳定性参数 $(A+D)/2$ 随 L_1 、 L_2 的变化关系

Fig. 2 The stability parameter $(A+D)/2$ verse the length of L_1 and L_2

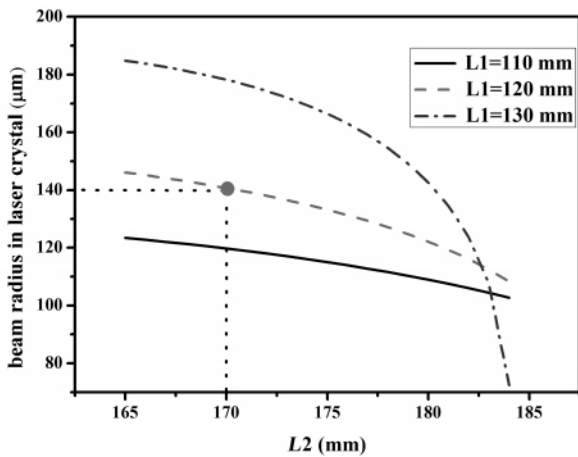


图 3 激光晶体处振荡光斑 ω_0 随 L_1 、 L_2 的变化关系

Fig. 3 The beam radius in laser crystal verse the length of L_1 and L_2

在谐振腔的设计过程中, 选取的谐振腔参数应同时满足谐振腔的稳定性条件 $-1 < (A +$

$D)/2 < 1$ 和模式匹配条件 $\omega_0/\omega_p \approx 0.8$ 。从图 2、3 中可以知道, 在满足谐振腔稳定运转的条件下使 L_1 尽可能长, 才能同时兼顾到模式匹配条件, 但是在 L_1 为 130 mm 时, $(A+D)/2$ 处于稳区边界, 激光晶体处的光斑大小随 L_2 的变化比较敏感。因此在综合考虑各种因素后, 我们选择 L_1 大约为 120 mm、 L_2 大约为 170 mm 的腔型, 从图中可知此时的 $(A+D)/2 = -0.65$, $\omega_0/\omega_p = 0.7$ 。

3 实验结果

在泵浦功率 25 W 时, 我们通过改变倍频晶体的控温温度, 优化双波长输出全固态 Nd: YAG 激光器 473 nm 倍频蓝光和 946 nm 基频光的输出功率。图 4 为倍频晶体不同温度下倍频蓝光和基频光的输出功率曲线。

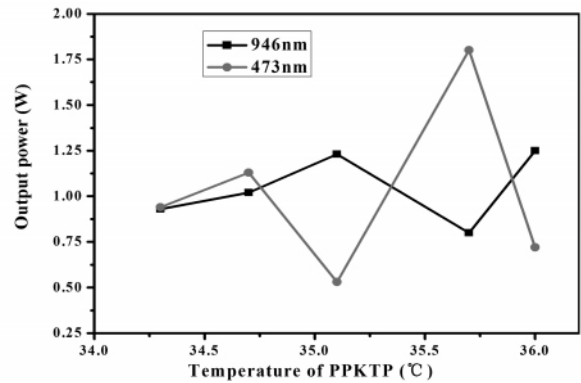
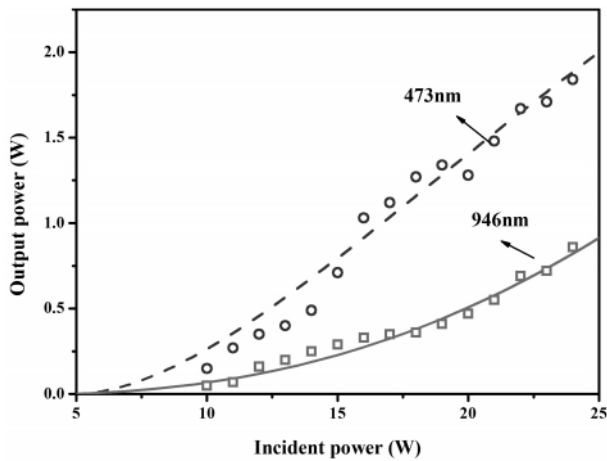


图 4 双波长激光输出功率随 PPKTP 晶体温度的变化曲线

Fig. 4 The output at dual-wavelength verse the temperature of PPKTP

由图 4 可以看出, 当 PPKTP 晶体的温度控制 35.7 °C 时, 可获得最佳倍频蓝光输出。我们在该实验条件下, 测量了 473 nm 倍频蓝光和 946 nm 基频光的输出功率, 如图 5 所示。图中圆圈和方块分别是倍频蓝光和基频光输出功率的实验测量结果。在泵浦功率 25 W 时, 最大 473 nm 倍频蓝光和 946 nm 基频光的输出功率分别为 1.8 W 的和 0.8 W。图 5 中的实线和虚线分别是利用包含能量上转换效应和晶体热退偏效应



圆圈和方块分别是倍频蓝光和基频光的测量值，实线和虚线为理论计算结果。

图5 双波长激光器的输出功率随泵浦功率的变化曲线

Circulars and squares are measured powers, dash line and solid line are the theoretical predictions.

Fig. 5 Outputs of the dual-wavelength laser verse the pump power

的准三能级激光器理论^[11]计算得到的 946 nm 基频光和 473 nm 倍频蓝光的输出功率随泵浦功率的变化曲线。可以看出理论计算和实验结果基本吻合。

4 总结

我们采用三镜折叠激光谐振腔设计,选用复合 Nd: YAG 晶体作为激光增益介质,周期极化晶体 PPKTP 作为内腔倍频晶体,在谐振腔中插入的 Brewster 窗片作为起偏器和基频光的输出耦合镜,实验实现 473 nm 倍频蓝光和 946 nm 基频光的双波长激光输出。在通过调节 PPKTP 倍频晶体温度优化倍频光与基频光输出功率的基础上,实验获得了 1.8 W 的 473 nm 倍频蓝光和 0.8 W 的 946 nm 基频激光输出。通过进一步优化 473 nm 和 946 nm 双波长激光器的输出功率和模式,该激光器在量子光学研究领域可用于产生波段位于探测效率高的非经典光场。

参考文献:

- [1] ZHOU R, LI E, LI H, *et al.* Continuous-wave, 15.2 W Diode-end-pumped Nd: YAG Laser Operating at 946 nm [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**: 1869-1871.
- [2] CHEN Y, PENG H, HOU W, *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.
- [3] AOKI T, TAKAHASHI G, FURUSAWA A. Squeezing at 946 nm with Periodically Poled KTiOPO₄ [J]. *Opt Express*, 2006, **14**: 6930-6935.
- [4] FAN T Y, BYER R L. Modeling and CW Operation of a Quasi-Three-Level 946 nm Nd: YAG Laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, **23**: 605-612.
- [5] STEFAN BJURSHAGEN, RALF KOCH. Modeling of Energy-transfer Upconversion and Thermal Effects in End-pumped Quasi-three-level Lasers [J]. *Appl Opt*, 2004, **43**: 4753-4767.
- [6] RENZHONG HUA, SATOSHI WADA, HIDEO TASHIRO. Principles and Limitations of a Quarter-wave Plate for Reducing the Depolarization Loss from Thermally Induced Birefringence in Nd: YAG Lasers [J]. *Opt Commun*, 2000, **175**: 189-200.
- [7] KARR M A. Nd: YAG Laser Cavity Loss Due to an Internal Brewster Polarizer [J]. *Appl Opt*, 1971, **10**: 893-895.
- [8] WANG Yao-ting, LIU Jian-li, LIU Qin, *et al.* Stable Continuous-Wave Single-Frequency Nd: YAG Blue Laser at 473 nm Considering the Influence of the Energy-Transfer Upconversion [J]. *Opt Express*, 2010, **18**: 12044-12051.
- [9] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, *et al.* Thermal Modeling of Continuous-wave End-pumped Solid-state Lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 1990, **56**: 1831-1833.
- [10] KOECHNER W. Solid-State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer, 1999: 415-422.

- [11] BJURSHAGEN S, EVEKULL D, KOCH R. Efficient Generation of Blue Light By Frequency Doubling of a Nd: YAG Laser Operation on ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ Transitions [J]. *Appl Phys B*, 2003, **76**: 135-141.

All-Solid-State Nd: YAG Dual-Wavelength Laser at 473 nm and 946 nm

LI Xiao-qing, WAN Zhen-ju, FENG Jin-xia, ZHANG Kuan-shou[†]

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

Abstract: We report an all-solid-state dual-wavelength laser at 473 nm and 946 nm. By the way of composite crystal Nd: YAG end-pumped by a laser diode at the central wavelength of 808 nm, the three-mirror folded cavity is designed to realize laser output. The periodically poled crystal PPKTP is employed as frequency doubling crystal. Given the existence of thermal depolarization of Nd: YAG crystal, the Brewster plate is inserted into the cavity as a polarizer and output coupler of fundamental laser. The output power of 1.8 W at 473 nm and of 0.8 W at 946 nm is obtained simultaneously at the pump power of 25 W.

Key words: Nd: YAG/PPKTP lasers; dual-wavelength output; thermal depolarization