

周期极化KTiOPO₄晶体和频单块非平面环形腔激光产生连续单频589 nm黄光

谢仕永 张小富 杨程亮 乐小云 薄勇 崔大复 许祖彦

Continuous-wave single-frequency 589 nm yellow laser generated from sum frequency of single-block non-planar ring cavity laser in periodically poled KTiOPO₄ crystal

Xie Shi-Yong Zhang Xiao-Fu Yang Cheng-Liang Le Xiao-Yun Bo Yong Cui Da-Fu Xu Zu-Yan

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 094203 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.094203

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.094203>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I9>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

掺Er³⁺氟化物光纤振荡器中红外超短脉冲的产生

Theoretical study on generating mid-infrared ultrashort pulse in mode-locked Er³⁺: ZBLAN fiber laser

物理学报.2016, 65(4): 044206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.044206>

神光-III激光装置时标激光和任意反射面速度干涉仪探针光源产生技术

Research of time fiducial laser and probe laser of velocity interferometer system for any reflector for Shenguang-III laser facility

物理学报.2016, 65(2): 024203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024203>

基于模糊控制的自适应光学校正技术

Adaptive optics correction technique based on fuzzy control

物理学报.2016, 65(1): 014206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014206>

Nd:LuYAG 混晶 1123 nm 被动调Q激光器

A diode pumped passively Q-switched Nd:LuYAG laser emitting at 1123 nm

物理学报.2015, 64(17): 174203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.174203>

部分相干双曲余弦厄米高斯光束在非Kolmogorov大气湍流中的传输特性

Propagation properties of partially coherent Hermite-cosh-Gaussian beams in non-Kolmogorov turbulence

物理学报.2015, 64(3): 034208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034208>

周期极化KTiOPO₄晶体和频单块非平面环形腔 激光产生连续单频589 nm黄光*

谢仕永¹⁾²⁾ 张小富^{1)†} 杨程亮²⁾ 乐小云¹⁾ 薄勇³⁾ 崔大复³⁾ 许祖彦³⁾

1)(北京航空航天大学物理科学与核能工程学院, 北京 100191)

2)(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130033)

3)(中国科学院理化技术研究所, 激光物理与技术研究中心, 北京 100190)

(2015年12月16日收到; 2016年1月18日收到修改稿)

单次通过周期极化KTiOPO₄晶体和频单块非平面环形腔1064 nm与1319 nm激光产生连续单频589 nm黄光. 通过琼斯矩阵模拟计算对单块非平面Nd:YAG晶体参数进行了优化设计, 实验获得1080 mW和580 mW的连续单频1064 nm和1319 nm激光输出. 两束激光单次通过周期极化KTiOPO₄晶体和频产生14.8 mW, $M^2 = 1.14$ 的589 nm黄光, 相应的和频效率为0.9%. 研究了周期极化KTiOPO₄温度对和频效率的影响, 得到其温度接收带宽为1.5 °C. 通过改变1064 nm Nd:YAG晶体的温度可实现589 nm黄光波长精确对应钠原子 D_{2a} 吸收谱线, 调谐精度达到0.164 pm.

关键词: 单频黄光, 单块非平面环形腔, 和频

PACS: 42.55.-f, 42.60.Da, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.65.094203

1 引言

可调谐单频激光源在激光雷达、光学计量、光纤传感、高分辨激光光谱学及相干探测等领域有广泛而重要的应用^[1-5]. 连续单频的589 nm黄光可用于激光冷却钠原子^[6], 另外还可以通过共振荧光研究激光与钠原子相互作用过程, 为自适应光学的钠导星研究提供重要依据^[7]. 随着半导体激光(LD)技术的不断发展完善, 由其抽运的固体激光器由于具有体积小、寿命长、效率高、结构紧凑等优点而逐步取代气体、染料激光器成为获取可调谐单频激光源的研究热点. Wang等^[8,9]通过LiB₃O₅(LBO)晶体腔外和频环形腔Nd:YAG 1064 nm与1319 nm激光产生高功率准连续微秒脉冲的窄线宽589 nm黄光. 刘杰

等^[10]通过KTiOPO₄(KTP)晶体腔内和频驻波腔Nd:YAG激光产生调Q脉冲的窄线宽589 nm黄光. 以上两种方式通过腔内插入标准具压窄589 nm黄光线宽, 但均未实现单频输出. 目前产生连续单频固体589 nm黄光的技术手段包括: 共振腔和频1064 nm与1319 nm Nd:YAG激光^[11,12]; 共振腔倍频1178 nm拉曼光纤激光^[13,14]. 两种技术途径分别通过非线性和频与倍频获得589 nm激光, 均利用共振增强腔提高非线性转化效率, 从而大大提高了系统的复杂性, 并对控制技术提出很高的要求.

本文在理论模拟的基础上完成了单块非平面环形腔(SBNPRC)Nd:YAG激光器的优化设计, 获得连续单频1064 nm与1319 nm的激光输出; 两束激光单次通过周期极化KTiOPO₄(PPKTP)晶体和频产生14.8 mW波长可精确调谐的单频589 nm黄光, 整个系统相对简单, 较易实现.

* 应用光学国家重点实验室资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xfzhang@buaa.edu.cn

2 SBNPRC Nd:YAG 激光器的设计与实验

LD 抽运的 SBNPRC 虽输出功率略小, 但由于采用了一体化的结构, 因而具有结构紧凑, 稳定性高的优势, 已成为获取可调谐单频激光输出的优选方案. 国际上 SBNPRC 单频固体激光器由 Kane 等 [15,16] 提出并开展了大量研究. 在国内, 北京理工大学 [17]、哈尔滨工业大学 [18]、清华大学等 [19] 单位也报道了相关的结果, 从不同的角度对这类激光器的性能进行了研究.

图 1 (a) 所示为 SBNPRC 激光介质示意图. 单块激光介质置于外加磁场 H 中, A 点既是抽运 LD 的入射点, 也是振荡激光的耦合输出点, 晶体内部 B, C, D 三个点所在的面是全反射面, 光在晶体内部沿着 A, B, C, D 振荡形成非平面环形腔的结构. 激光介质本身在外加磁场作用下相当于法拉第旋光器, 全内反射引入的相位延迟将起到半波片的作用. 图示 A 点镀有对抽运激光高透且对腔内振荡的 p 偏振光和 s 偏振光反射率不同的膜, 起到部分起偏器的作用. 以上的共同作用使得环形腔两个方向上的四个本征态存在损耗差, 形成光学单向器, 实现单向运转, 消除空间烧空, 得到单纵模激光输出.

为了简化对 SBNPRC 的分析, 按照腔内激光传输的过程做出了如图 1 (b) 的几何参数示意图. 由于对称性, 只需选择四个参数就可以决定整个光路, 分别是 AE, CE 的长度与角度 θ_A, β 的大小. 以 A 处为开始点, 激光有两条反向的传输环路, 逆时针方向 (CCW) 路径为 A→B→C→D→A, 顺时针

方向 (CW) 路径为 A→D→C→B→A. 规定在琼斯矩阵表达式中, 有关 CCW 方向的上标为 +, 有关 CW 方向的上标为 -. 可以推导在介质中传输一个环路的琼斯矩阵为:

CCW 方向

$$M_{CCW} = M_A R(-\gamma_{AB}) R(\theta_{AB}) M_D R(-\gamma_{BC}) \times R(-\theta_{BC}) M_C R(\gamma_{BC}) R(\theta_{BC}) M_B \times R(\gamma_{AB}) R(-\theta_{AB}); \quad (1)$$

CW 方向

$$M_{CW} = R(-\gamma_{AB}) R(-\theta_{AB}) M_B R(-\gamma_{BC}) R(\theta_{BC}) \times M_C R(\gamma_{BC}) R(-\theta_{BC}) M_D R(\gamma_{AB}) \times R(\theta_{AB}) M_A. \quad (2)$$

以上两式中, M_A 为输出耦合面 A 点的琼斯矩阵, $M_{B,C,D}$ 分别为 B, C, D 处全内反射的琼斯矩阵, $R(\gamma)$ 为法拉第旋光效应引起的旋转琼斯矩阵, $R(\theta)$ 为传输过程坐标系变换引起的坐标系旋转琼斯矩阵. 在上述表达式中, 已经利用光路关于平面 ACE 的对称性, 用 AB(BC) 取代了 AD(CD).

两个传输方向上琼斯矩阵的本征值 λ 与本征向量 E 分别满足本征方程:

$$M_{CCW} \cdot E_{CCW} = \lambda_{CCW} \cdot E_{CCW}, \quad (3)$$

$$M_{CW} \cdot E_{CW} = \lambda_{CW} \cdot E_{CW}. \quad (4)$$

每个方程求解可以得到两个本征值, 本征值模表示不计增益时本征偏振态环绕一周后振幅与原振幅的比值, 相位则包含了环绕一周后的相移信息. 环绕一周后各本征模对应的功率损耗 (Loss) 为

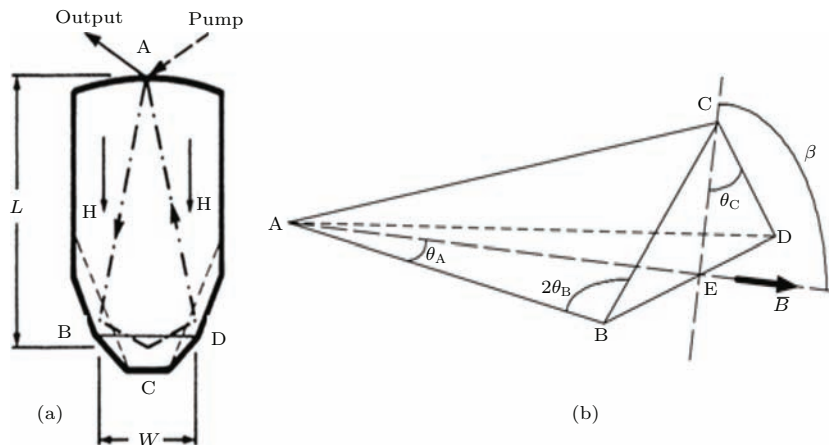


图 1 (a) SBNPRC 激光介质示意图; (b) SBNPRC 几何参数示意图

Fig. 1. (a) SBNPRC Laser medium; (b) SBNPRC geometric parameters.

$$\text{Loss}_{\text{CCW}} = 1 - |\lambda_{\text{CCW}_i}|^2, \quad (5)$$

$$\text{Loss}_{\text{CW}} = 1 - |\lambda_{\text{CW}_i}|^2, \quad (6)$$

其中 $i = s, p$, 分别代表 s 偏振态和 p 偏振态.

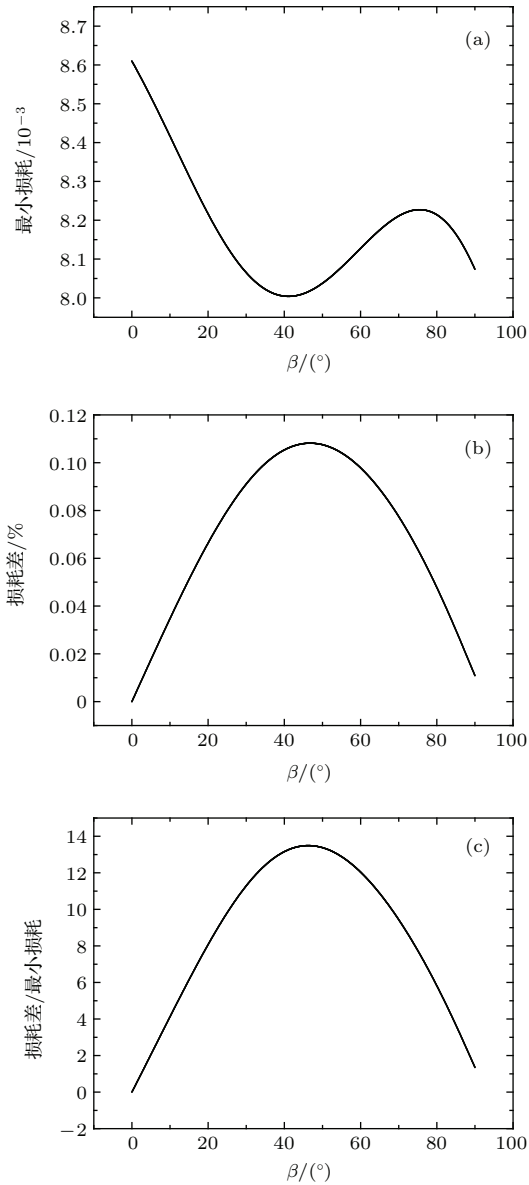


图2 (a) 最小损耗随 β 变化曲线; (b) 损耗差随 β 变化曲线; (c) 损耗差与最小损耗比值随 β 变化曲线

Fig. 2. (a) Variation curve of minimum loss with β ; (b) variation curve of loss difference with β ; (c) variation curve of the ratio of loss difference to minimum loss with β .

在设计 SBNPRC 时, 通过计算最小损耗求得谐振腔的阈值, 而谐振腔的单向性能则由两个传输方向上损耗差来决定. 根据上述要点编制了相应的 MATLAB 程序对激光介质的各项参数进行了优化设计. 以角 β 为例, 计算了最小损耗及损耗差随 β 变化情况, 如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 最小损耗越小越好, 而损耗差越大越好. 不妨将损耗差除以最

小损耗, 得到的比值越大则综合性能越好, 其变化曲线如图 2(c) 所示. 当 $\beta \approx 45^\circ$ 时损耗差与最小损耗都处于比较理想的位置, 因此选择 $\beta = 45^\circ$.

此外, 还对磁场强度 B 、角度 θ_A 的大小及 AE, CE 的长度进行了优化设计, 选择了 $B = 0.5 \text{ T}$, $\theta_A = 23^\circ$, $AE = 15 \text{ mm}$, $CE = 2.5 \text{ mm}$, 这种情况下计算得最小损耗 0.0136, 损耗差为 0.2191%, 有较大的损耗差与较小的最小损耗, 满足 SBNPRC 的设计要求.

对以上设计的 SBNPRC Nd:YAG 晶体进行了实验研究. 实验中采用的抽运源为 LIMO 公司生产的光纤耦合半导体激光器, 中心波长 808 nm, 光纤芯径为 100 μm , 数值孔径 $NA = 0.22$, 其输出激光通过传输比为 1 : 1 的耦合透镜系统抽运 SBNPRC Nd:YAG 晶体, 1064 nm Nd:YAG 单块晶体的抽运面镀 808 nm 增透膜及对 1064 nm 的 s 光与 p 光反射比不同的部分反射膜; 而 1319 nm 晶体抽运面镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜以及对 1319 nm 的 s 光与 p 光反射比不同的部分反射膜. 为了获得稳定的单频激光输出, 采用 TEC 控温仪对晶体进行精确温控, 控温精度 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$.

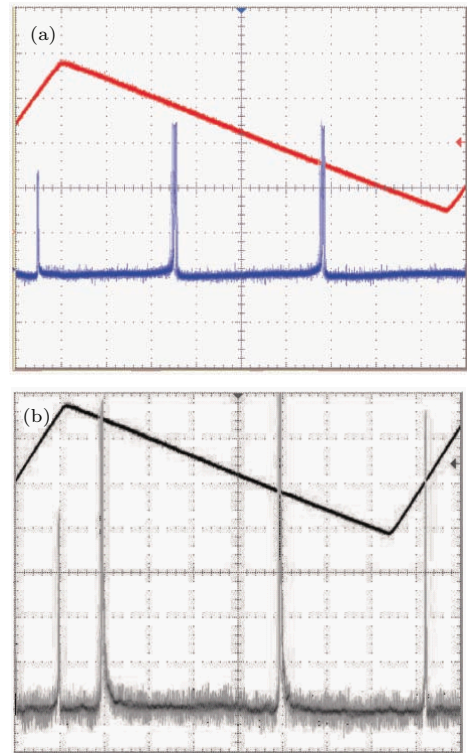


图3 (a) 1064 nm 激光器纵模模式; (b) 1319 nm 激光器纵模模式

Fig. 3. (a) Longitudinal mode of 1064 nm laser; (b) longitudinal mode of 1319 nm laser.

在抽运功率为2640 mW时, 1064 nm激光功率输出1080 mW, 相应的光-光转换效率为41%, 此时光束质量因子 $M_x^2 = 1.15$ 和 $M_y^2 = 1.13$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.14$; 抽运功率为4060 mW时, 1319 nm激光功率输出580 mW, 相应的光光转换效率为14%, 此时光束质量因子 $M_x^2 = 1.17$ 和 $M_y^2 = 1.14$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.16$. 采用共焦球面扫描干涉仪(自由光谱区为7.5 GHz, 精细度为200)测量了激光器的纵模模式, 如图3(a)和图3(b)所示, 1064 nm与1319 nm激光在自由光谱扫描范围内只有一个纵模振荡, 由此说明为单纵模运转. 图中两个峰之间即为一个自由光谱区, 通过比较每个峰的

宽度与两个峰之间的宽度, 可以得出1064 nm激光与1319 nm种子源激光的线宽分别为41 MHz和150 MHz.

3 PPKTP和频产生589 nm黄光

周期极化晶体的准相位匹配是通过晶体非线性极化率的周期性调制来补偿光频转换过程中由于折射率色散造成的基频光与变频光之间的位相失配, 实现非线性光频转换的相干输出, 因而可以根据晶体的折射率色散设计调制周期, 不仅可以避免空间走离效应, 大大提高非线性转换效率.

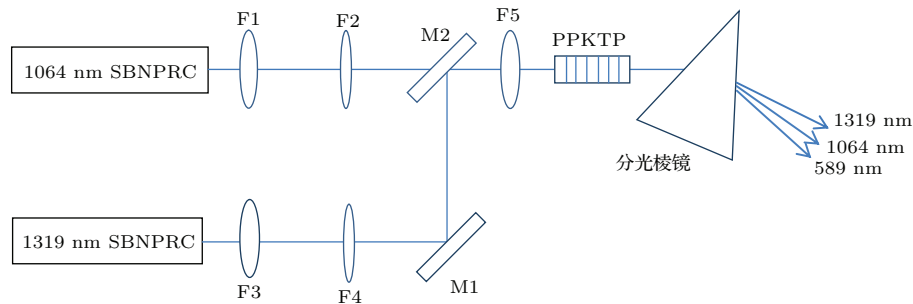


图4 PPKTP和频产生589 nm黄光光路示意图

Fig. 4. Diagram of sum frequency generation of 589 nm yellow light by PPKTP.

利用PPKTP晶体和频SBNPRC Nd:YAG 1064 nm与1319 nm激光产生连续单频589 nm黄光光路示意如图4所示. 1064 nm与1319 nm激光分别通过透镜F1, F2与F3, F4进行扩束整形, 由双色镜M2(镀膜为45° 1064 nm高透、1319 nm高反)实现两束激光合束, 合束后经消色差透镜F5聚焦到和频晶体PPKTP中的光斑半径约为60 μm, 实现高效和频589 nm黄激光输出. 实验中用到的PPKTP晶体尺寸为1 mm × 2 mm × 20 mm, 采用I类相位匹配, 匹配温度为55 °C, 极化周期12.35 μm, 前后通光面均镀有589 nm, 1064 nm与1319 nm的增透膜.

Inc.) 测量了单频黄光的光束质量, 如图5所示, 测量到的589 nm激光的光束质量因子 $M_x^2 = 1.15$ 和 $M_y^2 = 1.12$, 对应的光束质量 $M^2 = 1.14$.

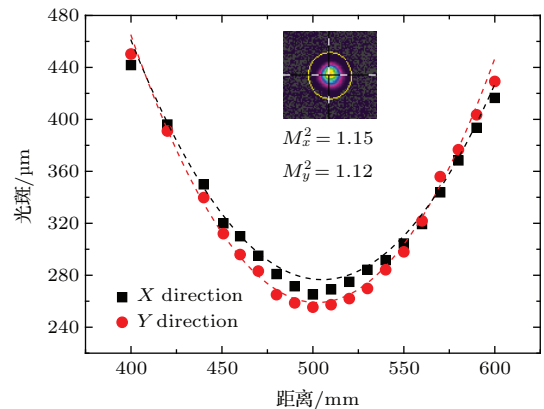


图5 (网刊彩色) 单频589 nm激光的光束质量测量结果
Fig. 5. (color online) Measurement of beam quality of single frequency 589 nm laser.

测量产生的589 nm黄光功率时, 通过PPKTP后的三波长激光经分光棱镜将1064 nm和1319 nm两束基频光滤除, 从而实现精确测量. 在PPKTP的最佳匹配温度下, 当输入的单频1064 nm和1319 nm激光功率分别为1080 mW和580 mW时, 获得14.8 mW的589 nm黄光, 相应的和频效率为0.9%. 利用光束质量分析仪 (M^2 -200, Spiricon

由于PPKTP晶体采用的是准相位匹配, 和频效率对晶体温度较敏感, 在实验中需要优化晶体温度, 以达到最高和频效率. 单频589 nm激光功率随

PPKTP 晶体温度变化曲线如图 6 所示, 在 PPKTP 温度为 55.0 °C 时, 589 nm 黄光的输出功率最高. 根据半高全宽 (FWHM) 定义可得 PPKTP 和频的温度接收带宽约为 1.5 °C, 因此需要对 PPKTP 进行精确控温. 本实验采用自行研制的 TEC 控温仪对 PPKTP 进行精确温控, 控温精度为 ± 0.1 °C.

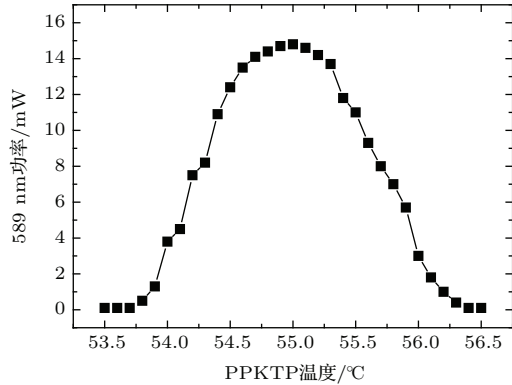


图 6 单频 589 nm 激光功率随 PPKTP 温度变化曲线
Fig. 6. Variation curve of power of single frequency 589 nm laser with PPKTP temperature.

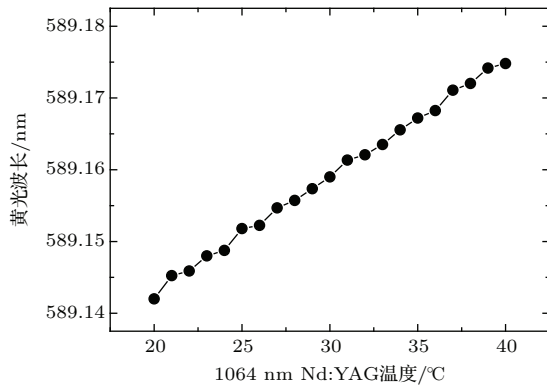


图 7 黄光波长随 1064 nm Nd:YAG 温度变化曲线
Fig. 7. Variation curve of wavelength of yellow light with 1064 nm Nd:YAG temperature.

通过激光波长计 (WS-7, HighFinesse GmbH) 对黄光波长进行了监测, 并无出现波长的跳变现象, 从而证明和频产生的 589 nm 激光没有跳模. 在保证激光器单频运转的情况下, 研究了 589 nm 激光的波长调谐特性. 对于 SBNPRC Nd:YAG 激光器, 当改变单块激光晶体的温度时, 激光晶体的折射率与尺寸会发生变化, 从而实现激光输出波长的调谐, 调谐精度与控温精度成正比. 本实验中单频黄光的波长调谐是通过固定 1319 nm Nd:YAG 晶体温度而改变 1064 nm Nd:YAG 晶体的温度实现的. 对于输出黄光波长, 使用激光波长计 (WS-7, HighFinesse GmbH) 进行测量, 黄光的

波长调谐结果如图 7 所示, 当 1064 nm Nd:YAG 晶体的温度以 0.1 °C 间隔从 20 °C 到 40 °C 变化时, 589 nm 激光的波长可以从 589.1420 nm 精细调谐到 589.1748 nm, 调谐范围为 32.8 pm, 相应的调谐精度约为 0.164 pm. 在 1064 nm Nd:YAG 晶体温度调至 30 °C 时, 产生的黄光波长为 589.159 nm, 对应钠原子 D_{2a} 吸收谱线. 同时对功率进行了检测, 发现波长调谐过程中黄光输出功率无明显变化.

4 结 论

利用琼斯矩阵对 SBNPRC 晶体进行了优化设计, 获得 1080 mW, $M^2 = 1.14$ 的连续单频 1064 nm 激光输出和 580 mW, $M^2 = 1.16$ 的连续单频 1319 nm 激光输出. 单次通过 PPKTP 晶体对两束激光和频产生 14.8 mW, $M^2 = 1.14$ 的 589 nm 黄光, 相应的和频效率为 0.9%. 研究了 PPKTP 温度对和频效率的影响, 得到其温度接收带宽为 1.5 °C. 通过改变 1064 nm Nd:YAG 晶体的温度实现 589 nm 黄光波长的精确调谐, 调谐精度达到 0.164 pm 整个系统稳定可靠, 而且相对简单, 较易实现, 为获得单频 589 nm 激光提供了实用有效的技术手段.

参考文献

- [1] Lin Z F, Zhang Y S, Gao C Q, Gao M W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1690 (in Chinese) [林志峰, 张云山, 高春清, 高明伟 2009 物理学报 **58** 1690]
- [2] Stothard D J M, Lindsay I D, Dunn M H 2004 *Opt. Express* **12** 502
- [3] Brandi F, Velchev I, Neshev D, Hogervorst W, Ubachs W 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 32
- [4] Okhapkin M V, Skvortson M N, Belkin A M, Kvashnin N L, Bagayev S N 2002 *Opt. Commun.* **203** 359
- [5] Xie S Y, Lu Y F, Bo Y, Cui Q J, Xu Y T, Xu J L, Peng Q J, Cui D F, Xu Z Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4660 (in Chinese) [谢仕永, 鲁远甫, 薄勇, 崔前进, 徐一汀, 许家林, 彭钦军, 崔大复, 许祖彦 2009 物理学报 **58** 4660]
- [6] Phillips D W 1998 *Rev. Modern Phys.* **70** 721
- [7] Zhang S P 2013 *M. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [张绍鹏 2013 硕士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [8] Wang P Y, Xie S Y, Bo Y, Wang B S, Zuo J W, Wang Z C, Shen Y, Zhang F F, Wei K, Jin K, Xu Y T, Xu J L, Peng Q J, Zhang J Y, Lei W Q, Cui D F, Zhang Y D, Xu Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 94208
- [9] Zheng J K, Bo Y, Xie S Y, Zuo J W, Wang P Y, Guo Y D, Liu B L, Peng Q J, Cui D F, Lei W Q, Xu Z Y 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 074202

- [10] Liu J, Wang J L, Lü T Y, Sun J W, Dong L 2014 *Opt. Prec. Engineer.* **22** 3199 (in Chinese) [刘杰, 王建立, 吕天宇, 孙敬伟, 董磊 2014 光学精密工程 **22** 3199]
- [11] Bienfang J C, Denman C A, Grime B W, Hillman P D, Moore G T, Telle J M 2003 *Opt. Lett.* **28** 2219
- [12] Denman C A, Hillman P D, Moore G T, Telle J M, Preston J E, Drummond J D, Fugate R Q 2005 *Proc. SPIE* **5707** 46
- [13] Feng Y, Taylor L R, Calia D B 2009 *Opt. Express* **17** 19021
- [14] Taylor L R, Feng Y, Calia D B 2010 *Opt. Express* **18** 8540
- [15] Kane T J, Byer R L 1985 *Opt. Lett.* **10** 65
- [16] Kane T J, Cheng E A P 1988 *Opt. Lett.* **13** 970
- [17] Gao C Q, Gao M W, Lin Z F, Zhang Y S, Zhang X Y, Zhu L N 2009 *Chin. J. Lasers* **36** 1704 (in Chinese) [高春清, 高明伟, 林志锋, 张云山, 张秀勇, 朱凌妮 2009 中国激光 **36** 1704]
- [18] Fang D 2007 *M. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [方丹 2007 硕士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [19] Gong K, Wu K Y, He S F 2009 *Acta Photon. Sin.* **38** 3049 (in Chinese) [巩轲, 吴克瑛, 何淑芳 2009 光子学报 **38** 3049]

Continuous-wave single-frequency 589 nm yellow laser generated from sum frequency of single-block non-planar ring cavity laser in periodically poled KTiOPO₄ crystal*

Xie Shi-Yong¹⁾²⁾ Zhang Xiao-Fu^{1)†} Yang Cheng-Liang²⁾ Le Xiao-Yun¹⁾
Bo Yong³⁾ Cui Da-Fu³⁾ Xu Zu-Yan³⁾

1) (School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

3) (Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 16 December 2015; revised manuscript received 18 January 2016)

Abstract

Continuous-wave single-frequency 589 nm yellow laser can be used in laser cooling of sodium atoms. Besides, the interaction between 589 nm laser and sodium atoms can be studied by resonance fluorescence, which provides an important basis for the sodium guide star in the adaptive optics. In this paper, single frequency 589 nm yellow light is generated by sum frequency of single-block non-planar ring cavity 1064 nm and 1319 nm laser in periodically poled KTiOPO₄ crystal. The geometric parameters of single-block non-planar Nd:YAG crystal and magnetic field intensity are optimally designed by simulation calculation through using Jones matrix. The output powers 1080 mW and 580 mW are obtained for continuous-wave single-frequency 1064 nm and 1319 nm laser in the experiment, respectively. The two fundamental beams are expanded to be the same as perfectly as possible in size and are focused into a spot with a size of about 60 μm by an achromatic lens. The sum-frequency generation takes place in a 1 mm × 2 mm × 20 mm phase-matched type-I periodically poled KTiOPO₄ crystal with a matching temperature of 55 °C and polarization period of 12.35 μm. The crystal is anti-reflection coated for all three wavelengths (1064 nm, 1319 nm and 589 nm). A 14.8 mW output of 589 nm laser is obtained with beam quality factor $M^2 = 1.14$ and the corresponding sum-frequency efficiency is 0.9%. The influence of periodically poled KTiOPO₄ temperature on the sum-frequency efficiency is studied and the temperature acceptance bandwidth is measured to be 1.5 degrees. The wavelength of 589 nm yellow light can be tuned to the sodium atom D_{2a} absorption line by changing the temperature of 1064 nm Nd:YAG crystal and 0.164 pm of tuning accuracy is reached. The whole laser system is stable and reliable, so it provides a practical and effective technical means to obtain the continuous-wave single-frequency 589 nm laser, for it is relatively simple and easy to implement.

Keywords: single-frequency yellow laser, single-block non-planar ring cavity, sum frequency

PACS: 42.55.-f, 42.60.Da, 42.65.-k

DOI: 10.7498/aps.65.094203

* Project supported by the State Key Laboratory of Applied Optics.

† Corresponding author. E-mail: xfzhang@buaa.edu.cn