

全固态腔内和频单纵模 593.5 nm 黄光激光器

李萌萌, 杨飞, 赵上龙, 高兰兰*

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130000

摘要 设计了一种结构紧凑、性能稳定、成本低的腔内和频单纵模 593.5 nm 黄光激光器。采用线性平凹腔结构, LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体产生 1064 nm 和 1342 nm 双波长激光束;通过 KTP(KTiOPO₄) II 类临界相位匹配在腔内和频产生 593.5 nm 连续黄光激光输出。利用由单个布氏片(BP)与和频晶体 KTP 构成的双折射滤波片进行选频,在泵浦功率为 5.0 W 时,593.5 nm 和频光单纵模输出功率为 30 mW,方均根噪声为 0.8%,线宽为 150 MHz。此时,检测到 1064 nm 和 1342 nm 基频光均为单纵模状态。实验结果表明,在和频激光器中,利用双折射滤波片技术使得基频光次振荡纵模损耗 $\geq 1.5\%$,即可以实现单纵模和频激光输出。

关键词 激光器; LD 泵浦; KTiOPO₄ 晶体; 和频; 黄光激光器; 单纵模

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301003

All Solid-State Intracavity Sum-Frequency Single-Longitudinal-Mode 593.5 nm Yellow Lasers

Li Mengmeng, Yang Fei, Zhao Shanglong, Gao Lanlan*

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130000, China

Abstract Herein, an intracavity single-longitudinal-mode 593.5 nm yellow lasers with compact structure, stable performance, and low cost is designed. A laser diode end-pumped Nd:YVO₄ crystal is used to produce 1064 nm and 1342 nm dual-wavelength laser beams with a linear flat-cavity structure. The intracavity sum-frequency mixing of the 593.5 nm continuous yellow laser output is achieved via KTP II-type critical phase matching. The Brewster plate (BP) and sum-frequency crystal KTP are used as a birefringent filter for frequency selection. When the pump power is 5.0 W, the single-longitudinal-mode output power at 593.5 nm is 30 mW, root-mean-square noise is 0.8%, and line width is 150 MHz. For this condition, the fundamental light at 1064 and 1342 nm is detected to be in the single-longitudinal-mode state. Experimental results show that the single-longitudinal-mode sum-frequency laser is achieved using the birefringent filter technique for a loss of more than 1.5% for the adjacent fundamental mode.

Key words lasers; LD pump; KTiOPO₄ crystal; sum frequency; yellow lasers; single longitudinal mode

OCIS codes 140.5960; 140.3570; 140.3410; 140.7300

1 引 言

全固态小型激光器具有效率高、寿命长、结构紧凑、频率稳定等优点^[1-3]。近年来,连续的黄色激光光源因其在医学、检测、彩色显示等领域的独特优点受到了人们的广泛关注^[4-8]。但是由于固体激光介质的空间烧孔效应,固体激光器一般运转于多纵模状态,非线性频率变换过程中纵模之间的耦合会使激光器输出不规则波动,从而产生噪声。为了解决

模式竞争问题,迫使激光器单纵模运转是一种可行的方法^[9-13]。2007年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所利用法布里-珀罗(F-P)标准具选频实现了单纵模 593.5 nm 激光和频输出,输出功率为 34 mW,单纵模线宽为 600 MHz^[14]。但 F-P 标准具存在成本高、薄片尺寸难控制、稳定性差、受温度影响大,且选频出来的线宽较宽等缺陷。

Nd:YVO₄ 晶体是固体激光器中常用的、性能优良的激光增益介质,在 808 nm 激光泵浦下可以产

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-10-05; 录用日期: 2019-10-14

基金项目: 吉林省教育厅“十三五”科学技术研究规划项目(JJKH20190552KJ)

* E-mail: 865781943@qq.com

生 0.9, 1.0, 1.3 μm 等多条发射谱线。本文通过对谐振腔镀膜参数进行选择, 使谐振腔内只存在 1342 nm 和 1064 nm 两个基频光振荡, 其他波长的光被抑制。本文利用一个简单线性平凹腔结构, 通过对由单个布氏片 (BP) 与双折射晶体 KTP (KTiOPO₄) 组成的双折射滤波片的选频能力进行分析, 并采用单个双折射滤波片对双波长振荡的和频过程进行选频, 实现了稳定的单纵模 593.5 nm 黄光输出。实验中, 当谐振腔内只放置 KTP 晶体时, 在抽运功率为 5 W 的条件下, 获得了 245 mW、波长为 593.5 nm 的橙黄色激光输出, 输出光的均方根 (RMS) 噪声为 8.0%, 此时激光器为多纵模运转状态。然后往谐振腔内放置厚度为 2 mm 的未镀膜的 BP, 精确调节 BP 放置位置, 获得了 30 mW 的单纵模 593.5 nm 激光输出, 输出光的 RMS 噪声为 0.8%。该和频激光器可在较宽的温度范围内稳定工作, 且光束质量好。

2 理论分析

可以通过对琼斯矩阵求本征值来实现对双折射滤波片选频的分析, 本文对由 BP 和 KTP 组成的双折射滤波片的选频能力进行了分析^[15]。

2.1 琼斯矩阵运算

利用双折射滤波片技术实现单纵模激光输出, 所设计的双折射滤波片如图 1 所示, 该器件由激光晶体 Nd:YVO₄、BP、非线性晶体 KTP 组成, II 类切割 KTP 置于 BP 右侧, 起到和频与滤波的双重作用, 再在其后放置一个输出镜 M。

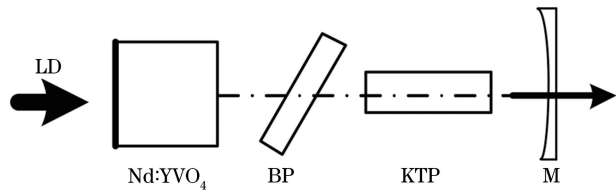


图 1 双折射滤波片原理示意图

Fig. 1 Schematic of birefringent filter

设 Nd:YVO₄ 的琼斯矩阵为 W_1 , KTP 的琼斯矩阵为 W_2 , BP 的琼斯矩阵为 P , 则腔内基频光往返一次对应的琼斯矩阵为

$$M = W_1 \times P \times R(-\theta) \times W_2 \times W_2 \times R(\theta) \times P \times W_1, \quad (1)$$

式中: $W_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\delta_1 \end{pmatrix}$, $W_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\delta_2 \end{pmatrix}$, δ_1 、 δ_2 分别为 Nd:YVO₄ 与 KTP 的相对位相延迟, $\delta_i =$

$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_i d$, λ 为基频光波长 1064 nm 和 1342 nm, Δn_i 为基频光在双折射晶体中的折射率差 (Nd:YVO₄ 与 KTP 分别对应 0.20、0.08), d 为晶体长度; $P = \begin{pmatrix} q & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$, $q = [2n / (1 + n^2)]^2$, n 为 BP 相对基频光的折射率, $n_{1064} = 1.449$, $n_{1342} = 1.446$; $R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$, 为 Nd:YVO₄ 与 KTP 之间的坐标转换矩阵 (Nd:YVO₄ 为 $s-p$ 坐标系, KTP 为 $o-e$ 坐标系), θ 为 $s-p$ 坐标系与 $o-e$ 坐标系夹角。工作物质 Nd:YVO₄ 是自然双折射晶体, 输出光为线偏振状态。实验中, 基频光的偏振方向为竖直方向, 当输出光的偏振方向和 BP 的 p 偏振面重合时, 激光零损耗通过 BP。KTP 可实现 II 类临界相位匹配, 将其与水平面呈 45° 放置, 其光轴与晶面平行且与基频光偏振方向的夹角为 45°, 即 θ 为 45°。解本征方程 $MA = \zeta A$ (A 为入射基频光的光线矩阵), 可以得到 M 的本征值 $\zeta_{1,2}$, 其模的平方即为基频光在两个偏振方向上的往返透过率。

利用 MATLAB 进行数值计算, 求解波长不同时双折射滤波器对通过的基频光的选频能力。工作物质 Nd:YVO₄ 长度为 3 mm, 和频晶体 KTP 长度为 5 mm。用计算机绘制基频波在 $s-p$ 偏振方向上的透过率曲线, 图 2 是 BP 放置角度为 55.389° 时 1064 nm 基频光的透过曲线图, 图 3 是 BP 放置角度为 55.334° 时 1342 nm 基频光的透过曲线图。从图 2 和图 3 可以看出: s 偏振方向上模式损耗大 (损耗范围为 0.46~0.49), p 偏振方向上模式损耗小 (损耗范围为 0~0.06); 当激光波长为 1063.83 nm 及 1342.30 nm 时, p 偏振光损耗为 0。因此只有 p 偏振方向的光才会起振。

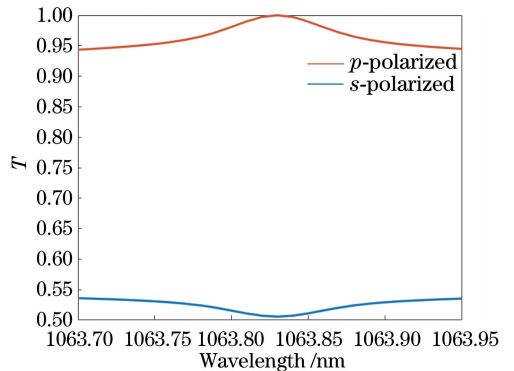


图 2 1064 nm 激光的透过率曲线

Fig. 2 Transmittance curve of 1064 nm laser

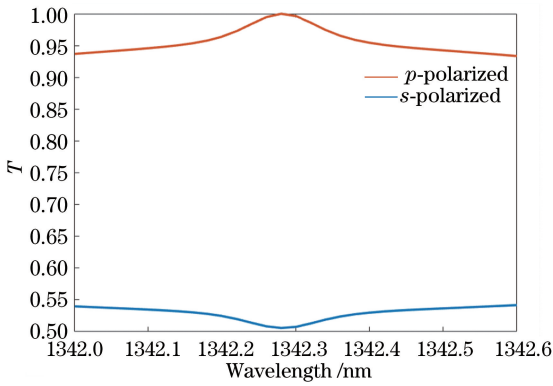


图3 1342 nm 激光的透过率曲线

Fig. 3 Transmittance curves of 1342 nm laser

根据本实验的谐振腔长计算,基频光波长间隔 $\Delta\lambda_{1064}$ 约为 0.010 nm, $\Delta\lambda_{1342}$ 约为 0.015 nm。由图 2 和 3 可以明显看出次纵模的相对损耗分别为 1.5% 和 2.0%,说明光次振荡纵模损耗 $\geq 1.5\%$ 足够抑制该纵模的振荡。当 Nd:YVO₄ 出射光的偏振方向与 BP 的 *p* 偏振面重合时,微调谐振腔腔长,可以实现损耗为零。对于双波长振荡,两个基频光在腔内都会经过 BP。根据菲涅尔公式^[16],石英晶体 BP 对于两基频光的折射率分别为 $n_{1064} = 1.449$ 、 $n_{1342} = 1.446$,BP 的放置角度分别为两基频波的布儒斯特角: $\theta_{B1064} = 55.389^\circ$ 、 $\theta_{B1342} = 55.334^\circ$,相差 0.055°。

分析可知,在双波长振荡直腔中加入 BP,BP 对波长为 1064 nm 和 1342 nm 激光的布儒斯特角差异不大,所以可以使用同一 BP 对两基频光进行选频,在实际的实验中 BP 放置角度为基频光 1342 nm 的布儒斯特角 55.334°。利用该 BP 晶体实现了双波长的选频,实验结果也证明了上述观点。

3 实验装置

激光实验装置如图 4 所示,激光二极管(LD)的最大输出功率为 5 W、中心波长为 808 nm,利用聚焦透镜(OC)对泵浦光进行光束整形和准直后,光束入射到 Nd:YVO₄ 晶体中。用铝箔包裹 Nd:YVO₄ (3 mm×3 mm×3 mm,掺杂原子数分数为 0.7%),并将其固定在一个铜槽中,左端镀膜:HT@808 nm,HR@1064 nm/1342 nm,作为一个腔镜,右端镀膜:AR@1064 nm/1342 nm。输出镜 M1 是曲率半径为 100 mm 的平凹镜,凹面镀膜:HR@1342 nm/1064 nm 以及 HT@593.5 nm,平面镀膜:HT@593.5 nm。采用 II 类临界相位匹配和频晶体 KTP(3 mm×3 mm×5 mm),晶体两端面均镀膜:HT@1342 nm/1064 nm/593.5 nm。用半导体致冷

器(TEC1/TEC2)分别控制 LD 和谐振腔的温度,确保激光器稳定运行。实验选用的 BP(未镀膜)为石英晶体,厚度为 2 mm,呈布儒斯特角放置。

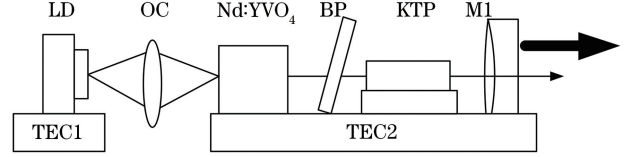


图4 激光实验装置图

Fig. 4 Laser experimental device diagram

4 实验结果以及讨论

实验开始,在未加入 BP 的情况下,通过调节谐振腔中输出镜以及和频晶体的放置位置获得 593.5 nm 的黄光输出,谐振腔腔长为 55 mm,激光阈值为 1.6 W。当泵浦功率为 5.0 W 时,使用精度为 10 nW 的功率计测量 593.5 nm 激光器的输出功率,获得最大功率为 245 mW 的 593.5 nm 的激光输出,如图 5 所示。然后,在谐振腔内放置 BP,微调谐振腔腔长及 BP 的放置角度,通过 F-P 扫描干涉仪观察到实验利用黄光激光器获得了单纵模输出。实验过程中,也可以通过调整和频晶体 KTP 的温度,使激光器实现单纵模输出,且在较大温度范围内激光器稳定工作。这主要是因为 KTP 晶体的温度接受范围比较宽^[17-18]。输出功率随泵浦功率的变化曲线如图 6 所示。激光器工作阈值为 2.8 W,当泵浦功率为 5.0 W 时,输出的黄光功率为 30 mW。单纵模 593.5 nm 激光输出功率较低的原因如下:一是 BP 有插入损耗;二是布儒斯特角抑制了其他纵模的振荡,降低了激光输出功率。

实验中采用 F-P 扫描干涉仪(SA 210-5B,

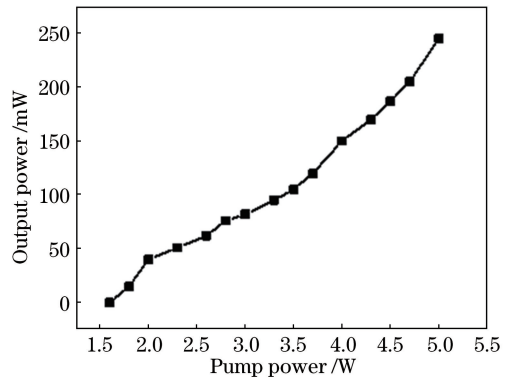


图5 未添加 BP 时,593.5 nm 激光输出功率与泵浦功率的变化曲线

Fig. 5 593.5 nm laser output power versus pump power without BP

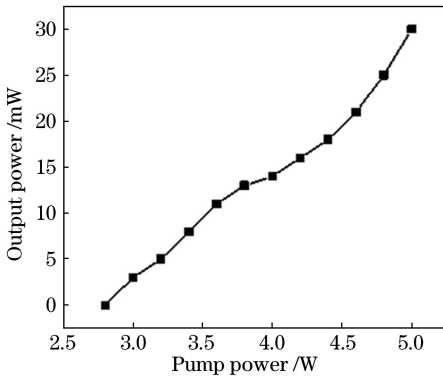


图 6 添加 BP 后,593.5 nm 激光输出功率与泵浦功率的关系曲线

Fig. 6 593.5 nm laser output power versus pump power with BP

Thorlabs)实时监测和频光的输出状态,该干涉仪的工作波长在 535 nm 到 820 nm 之间,自由光谱范围(FSR)为 10 GHz,最小测量精度为 150 MHz,分辨率为 67 MHz。使用控制器(SA201-EC, Thorlabs)提供频率为 50 Hz 的锯齿波。在谐振腔内没有放置 BP 时,测试得和频光纵模输出状态如图 7(a)所示,激光器处于多纵模状态。当谐振腔内放置 BP 后,微调 BP 角度,和频光的测试结果如图 7(b)所示,在 F-P 扫描干涉仪的每个 FSR 内都可以清楚地观测到单纵模振荡,无其他侧模出现。此时,用 FSR 为 1.5 GHz 的 F-P 扫描干涉仪(SA200-5B, Thorlabs)来测量 593.5 nm 黄光的光谱线宽,其最小精度为 200 MHz,分辨率为 7.5 MHz。如图 7(c)所示,在最大输出电平处测量到的光谱线宽为 150 MHz,此时单纵模 593.5 nm 激光的输出噪声为 0.8%。

为了检测谐振腔内两个基频光的纵模状态,当 F-P 扫描干涉仪测量到 593.5 nm 激光处于单纵模的状态时,分别对基频光 1064 nm 和 1342 nm 的纵模状态进行了测量。图 8 为基频光 1064 nm 的纵模情况,经过多次测量可以发现,在经过双折射滤波片选频后,1064 nm 呈单纵模输出状态,计算分析数据得光谱线宽为 262 MHz。图 9 为基频光 1342 nm 的纵模情况,可以看出 1342 nm 基频光也实现了稳定的单纵模输出,分析计算数据得光谱线宽为 240 MHz。

从图 8 和 9 的实验结果可以看出:对于双波长振荡的激光器,如果两个基频光处于单纵模状态,则和频光的输出状态也为单纵模;且 1064 nm 和 1342 nm 对应的布儒斯特角相差极小,BP 的介入有效地限制了基频光的模式数,降低了纵模之间的模式竞争,有利于单纵模的实现,提高了功率稳定性。

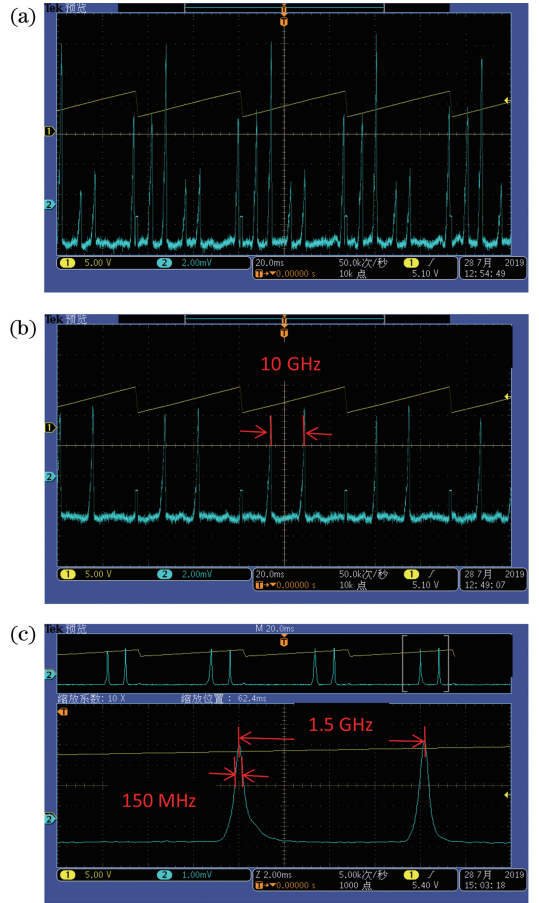


图 7 和频光纵模输出曲线。(a)未添加 BP 时,10 GHz 扫描干涉仪测得的 589.5 nm 激光多纵模输出;(b)添加 BP 后,10 GHz 扫描干涉仪测得的 589.5 nm 激光单纵模输出曲线;(c)添加 BP 后,1.5 GHz 扫描干涉仪测得的 589.5 nm 激光单纵模输出曲线

Fig. 7 Output curves of longitudinal mode of sum frequency light. (a) 589.5 nm multi-longitudinal-mode output curves measured by 10 GHz scanning interferometer without BP; (b) 589.5 nm single-longitudinal-mode output curves measured by 10 GHz scanning interferometer with BP; (c) 589.5 nm single-longitudinal-mode output curves measured by 1.5 GHz scanning interferometer with BP

利用光束分析仪记录的 593.5 nm 激光远光点的光斑如图 10 所示,光斑在 2 h 内的不稳定性 $\leq 1\%$ 。

5 结 论

本文在 LD 泵浦腔内和频激光器中,采用单一 BP 与和频晶体 KTP 构成的双折射滤波片实现了单纵模 593.5 nm 激光输出。以 Nd:YVO₄ 为增益介质,在泵浦功率为 5.0 W 时,593.5 nm 单纵模线

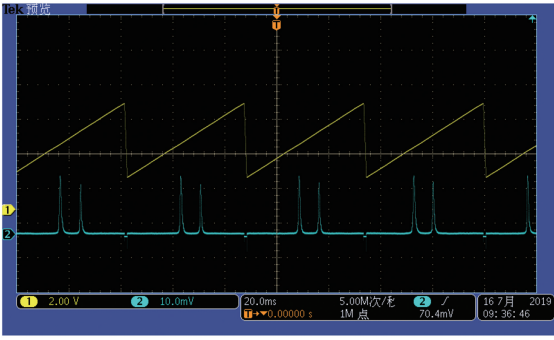


图 8 593.5 nm 单纵模输出时基频光 1064 nm 的输出状态图
Fig. 8 Output state diagram of 1064 nm fundamental frequency light in a single-longitudinal-mode output of 593.5 nm

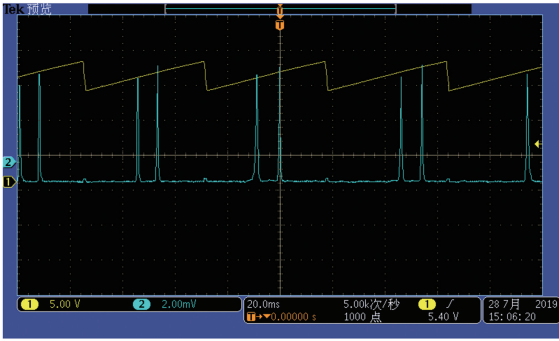


图 9 593.5 nm 单纵模输出时基频光 1342 nm 的输出状态图
Fig. 9 Output state diagram of 1342 nm fundamental frequency light in a single-longitudinal-mode output of 593.5 nm

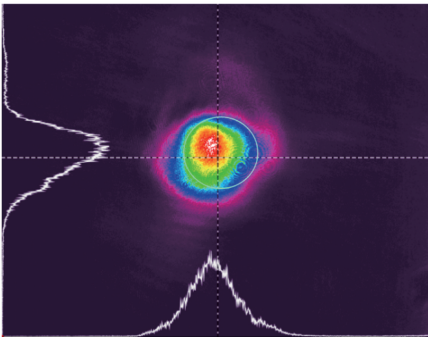


图 10 593.5 nm 激光光斑图

Fig. 10 Diagram of 593.5 nm laser spot

宽为 150 MHz, 输出功率达到了 30 mW, 功率稳定性优于 1%。实验结果表明, 对于双波长激光器, 可以采用与倍频激光器同样的选频方法实现对基频光模式的选择, 从而实现单纵模输出。该装置结构简单、紧凑、稳定性较强、易于产品化, 对于实现单纵模和频或差频激光器有重要意义。

参 考 文 献

[1] Jeys T H, Brailove A A, Mooradian A. Sum frequency generation of sodium resonance radiation [J]. Applied Optics, 1989, 28(13): 2588-2591.

[2] Danailov M B, Apai P. 589 nm light generation by intracavity mixing in a Nd:YAG laser[J]. Journal of Applied Physics, 1994, 75(12): 8240-8242.

[3] Bi Y, Sun Z P, Zhang Y, et al. All-solid-state 589 nm Nd:YAG laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(5): 440.
毕勇, 孙志培, 张瑛, 等. 全固态和频 589 nm Nd:YAG 激光器[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 440.

[4] Zheng Q, Tan H M. Study of LD-pumped YVO₄/KTP single-frequency green laser [J]. Laser & Infrared, 2001, 31(4): 208-209.
郑权, 檀慧明. LD 泵浦全固态 YVO₄/KTP 单频绿光激光器研究[J]. 激光与红外, 2001, 31(4): 208-209.

[5] Wang H B, Ma Y, Zhai Z H, et al. 1.5 W CW frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(2): 119-122.
王海波, 马艳, 翟泽辉, 等. LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿光激光器[J]. 中国激光, 2002, 29(2): 119-122.

[6] Abramovici A. Minimal Nd:YAP laser configuration with single frequency output [J]. Optics Communications, 1987, 61(6): 401-404.

[7] Tan H M, Gao L L, Lü Y F. Noise characteristics of laser diode pumped solid-state laser by intracavity sum-frequency of KTP phase matching II [J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(5): 459-464.
檀慧明, 高兰兰, 吕彦飞. 激光二级管泵浦 KTP 腔内和频激光器及噪声特性的分析[J]. 光学精密工程, 2004, 12(5): 459-464.

[8] Zheng Q, Zhao L, Tan H M, et al. Single-frequency CW and pulse operation of diode-pumped green lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, 29(9): 769-772.
郑权, 赵岭, 檀慧明, 等. 用布氏片实现有效连续和脉冲单频绿光输出[J]. 中国激光, 2002, 29(9): 769-772.

[9] Liu X J, Fu R L, Zhuo R R, et al. Pulse LDA-pumped single-frequency Nd:YVO₄-KTP green laser using Brewster plate [J]. Optics Communications, 2007, 274(1): 159-162.

[10] Tucker A W, Birnbaum M, Fincher C L, et al. Stimulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd:YVO₄ [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 48(12): 4907-4911.

[11] Baer T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1986, 3(9): 1175-1180.

- [12] Lan X J. Laser technology [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2005.
蓝信钜. 激光技术 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2005.
- [13] Fu X H, Tan H M, Li Y M, et al. All-solid-state single-longitudinal-mode 593.5 nm sum-frequency laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1469-1473.
付喜宏, 檀慧明, 李义民, 等. 全固态单纵模 593.5 nm 和频激光器[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1469-1473.
- [14] Song G C, Quan W, Wang X. Physical optics theory and application [M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2010.
宋贵才, 全薇, 王新. 物理光学理论与应用 [M]. 2 版. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- [15] Junghans J, Keller M, Weber H. Laser resonators with polarizing elements: eigenstates and eigenvalues of polarization[J]. Applied Optics, 1974, 13(12): 2793-2798.
- [16] Cong Z H, Liu Z J, Qin Z G, et al. RTP Q-switched single-longitudinal-mode Nd : YAG laser with a twisted-mode cavity[J]. Applied Optics, 2015, 54(16): 5143-5146.
- [17] Chen H W, Huang H T, Wang S Q, et al. Multi-wavelength laser at waveband of 0.63 μm based on cascaded intracavity frequency conversion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(8): 0801003.
陈海伟, 黄海涛, 王石强, 等. 基于腔内级联变频的 0.63 μm 波段多波长激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(8): 0801003.
- [18] Liu X, Shen X J, Diao D M, et al. Phase mismatch generated in walk-off compensation and its compensation method[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0108001.
刘恂, 沈学举, 刁冬梅, 等. 补偿走离角时产生的相位失配及其补偿方法[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0108001.