

基于楔形 Nd:YVO₄/KTP 双折射滤波的 单频绿光激光器

高志红¹, 张文喜^{2,3}, 郭晓丽², 赵亚帅², 伍洲^{2,3}, 颜博霞², 亓岩², 冯其波^{1*}

¹北京交通大学理学院, 北京 100044;

²中国科学院光电研究院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 通过研究双折射晶体 Nd:YVO₄ 的偏振特性, 利用楔角为 10° 的 Nd:YVO₄ 激光晶体和倍频晶体 KTP (磷酸钛氧钾) 在绿光激光器中构造了一个新型双折射滤波器。理论分析了 KTP 晶体的长度、基频光在 KTP 中的入射角度和 KTP 的温度对双折射滤波器选频的影响。实验中使用长度为 4.4, 5, 7 mm 的 KTP, 采用 V 型腔结构, 最后分别获得了 90, 120, 104 mW 的单频绿光。实验结果表明, 由楔形 Nd:YVO₄ 和 KTP 构成的双折射滤波器成功实现了激光单纵模运转, 且方法简单易行。当 KTP 晶体长度为 5 mm 时, 测得楔形 Nd:YVO₄/KTP 激光器的单纵模运转温度范围约为 5 °C。

关键词 激光器; Nd:YVO₄ 晶体; 单纵模运转; 双折射滤波器; KTP 晶体

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0301011

Single-Frequency Green Laser Based on Birefringent Filter Comprising a Wedge Nd:YVO₄/KTP

Gao Zhihong¹, Zhang Wenxi^{2,3}, Guo Xiaoli², Zhao Yashuai²,
Wu Zhou^{2,3}, Yan Boxia², Qi Yan², Feng Qibo^{1*}

¹School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

²Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract By studying the polarization characteristics of the birefringent Nd:YVO₄ crystal, a novel birefringent filter comprising an Nd:YVO₄ laser crystal with a wedge angle of 10° and a frequency doubling KTP (potassium titanyl phosphate) crystal is constructed in a green laser. The influences of the KTP length, incident angle of the fundamental mode in the KTP, and KTP temperature on the electing-mode function of the birefringence filter are theoretically analyzed. In the experiment, KTP crystal with lengths of 4.4, 5, and 7 mm and containing V-cavity structures are used, and 90-, 120-, 104-mW single-frequency green light is obtained, respectively. Experimental results prove that the birefringence filter comprising a wedge Nd:YVO₄ and KTP can successfully realize laser single-longitudinal-mode operation. Further, the proposed method is simple and easy. For 5-mm KTP length, the single-longitudinal-mode operating temperature range of the wedge Nd:YVO₄/KTP laser is measured to be approximately 5 °C.

Key words lasers; Nd:YVO₄ crystal; single-longitudinal-mode (SLM) operation; birefringent filter; KTP crystal

OCIS codes 140.3515; 140.3570; 140.3480

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-10-28; 录用日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金(61605217)、中国科学院青年创新促进协会(2015127)

* E-mail: qbfeng@bjtu.edu.cn

1 引 言

全固态单纵模(SLM)绿光激光器因具有小型化、稳定性好、寿命长等优点,在精密测量、全息、相干雷达和光通信等领域有着广阔的应用前景。这些应用领域都要求激光器结构紧凑,频率和功率稳定,对环境温度、振动不敏感,输出功率在百毫瓦量级。目前,在腔内倍频绿光激光器中实现单纵模运转的方法主要有标准具法^[1]、环行腔法^[2-3]、耦合腔^[4]和双折射滤波。首先,激光器中使用的标准具大多为未镀膜的熔炉石英,且需要调整标准具的角度使谐振腔中增益最大的振荡模与标准具的透射峰重合,因此标准具的插入损耗很大,导致输出的功率较低。其次,对于消除驻波效应的环行腔法,由于泵浦功率很高、增益很大,故仍需要在激光器中插入标准具来进行选频。虽然单频输出功率很高,但腔内光学元件很多,结构复杂,成本高,不适合用于小功率的激光器中。再次,想要实现耦合腔输出的绿光为单频,需要严格调整两个腔的振荡模重合,目前相关的报道文献较少。

双折射滤波选频技术引入的损耗小,成本低,且构成方法有很多种,是中低功率全固态激光器中实现单纵模运转的优选方案。在倍频绿光激光器中,研究得比较多的双折射滤波器为布氏片+KTP;中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的郑权等^[5-7]采用 Nd:YVO₄/K9 布氏片/KTP 的直腔结构,获得了从 38 mW 到 650 mW 的单频绿光;印度的 George 等^[8]和德国的 Friel 等^[9]采用 Nd:YVO₄/BK7 布氏片/KTP 的结构,并将 KTP 的一面作为输出镜,分别获得了 207 mW 和 250 mW 的单频绿光。此外,山西大学的李瑞宁等^[10]采用由 Nd:YVO₄/偏振片/KTP 构成的 V 型腔获得了 102 mW 的单频绿光;波兰的 Sotor 等^[11-13]采用 Nd:YVO₄/YVO₄/KTP 一体式直腔结构,将未掺杂的离轴切割的 YVO₄ 晶体作为选偏元件,通过缩小晶体横截面面积,将 532 nm 单频激光的功率从 90 mW 提高至 160 mW。以上研究通过双折射滤波法获得单纵模运转的激光器时,除了需要激光晶体和倍频晶体外,还必须额外插入布氏片、偏振片或 YVO₄ 分束器,这会增加激光调节的难度和激光器成本。鉴于这些原因,Fan^[14]利用布氏角切割的 Nd:YAG/KTP 构成双折射滤波,获得了 4 mW 的单频绿光;Suzuki 等^[15]采用离轴切割的 Nd:YVO₄/KTP 式直腔结构获得了 20 mW 的单频绿

光。这两种方法都是直接利用激光晶体达到选偏的目的,但布氏角切割只适用于长晶体,且离轴切割的 Nd:YVO₄ 受激发射截面小,不利用提高单频功率。

本文选用楔角为 10° 的 *a* 轴切割 Nd:YVO₄ 作为增益介质和选偏器,与倍频晶体 KTP 构成双折射滤波器,减少了光学元件的数量,且这种由楔形 Nd:YVO₄ 和 KTP 构成的双折射滤波器至今未被报道过。首先,根据激光晶体 Nd:YVO₄ 的双折射特性,将 *a* 轴切割 Nd:YVO₄ 的 S2 端面加工成楔角,通过调整输出镜的角度,抑制 σ 偏振光振荡,获得了 π 偏振光^[16-18];其次,理论分析 KTP 晶体的长度,研究角度和温度对滤波器透射谱的影响,并且通过实验比较谐振腔内放入 KTP 晶体前后,腔内基频光的光谱变化,成功地证明了该滤波器的选频功能。此外,通过实验研究 KTP 晶体长度对选频特性和单纵模输出功率的影响,最高单纵模输出功率为 120 mW。最后,选定 KTP 长度为 5 mm,在温度分别为 17.0, 22.5, 28.0 °C 时对楔形 Nd:YVO₄/KTP 激光器进行定温调试,在确保单纵模输出的前提下,测量得到激光单纵模运转的温度范围基本相同,均为 4.5~5.0 °C,这说明激光器单纵模输出对温度不敏感。

2 楔形 Nd:YVO₄/KTP 单频激光器实验装置

楔形 Nd:YVO₄/KTP 单频激光器示意图如图 1 所示。泵浦源为波长 808 nm 的宽发射面激光二极管(LD),发光面尺寸为 1 μm × 150 μm (快轴 × 慢轴),发散角为 40° × 10°,最大输出功率为 2 W。首先通过焦距 $f_1 = 4.05$ mm 的非球面透镜对 LD 发射光束进行快轴准直,再通过变形棱镜对 (P1 和 P2) 对激光二极管慢轴光束进行扩束,扩束倍数 $M = 2.8$,最后通过焦距 $f_2 = 11$ mm 的非球面透镜进行光束聚焦,聚焦光斑尺寸约为 60 μm × 80 μm ,LD 光束整形系统的耦合效率约为 85%。激光谐振腔由激光晶体端面 M1(S1)、平凹输出镜 M2 和平面反射镜 M3 构成。V 型腔两腔长分别为 $L_1 \approx 16$ mm (M1 面到输出镜 M2 凹面的距离) 和 $L_2 \approx 15$ mm (输出镜 M2 凹面到反射镜 M3 的距离),腔折叠角为 22.08°。激光晶体 Nd:YVO₄ 的楔角为 10°,尺寸为 3 mm × 3 mm × 1 mm,掺杂原子数分数为 2%,中心通光长度为 0.73 mm, S1 面镀有 808 nm 高透膜和 1064 nm 高反膜, S2 面镀有 1064 nm 增透膜,利用导热胶将晶体粘接在紫铜底

座上。输出镜 M2 的曲率半径 $R=200\text{ mm}$ ，凹面镀有 1064 nm 高反膜和 532 nm 增透膜，平面镀有 532 nm 增透膜。平面反射镜 M3 的反射面镀有 1064 nm 和 532 nm 高反膜。倍频晶体 KTP 采用 II 类相位匹配角切割 ($90^\circ, 23.5^\circ$)，放在靠近平面镜 M3 的光路上。分别控制泵浦源 LD 和谐振腔的温度，LD 温度约为 $33\text{ }^\circ\text{C}$ ，谐振腔温度约为 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 。

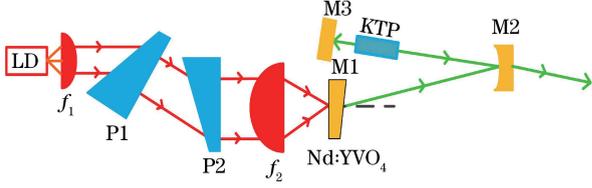


图 1 532 nm 激光器示意图
Fig. 1 Schematic of 532 nm laser

3 双折射滤波原理分析

Nd:YVO₄ 双折射晶体对 π 和 σ 两正交偏振光有不同的折射率 ($n_\pi=2.1652, n_\sigma=1.9573$)，根据折射定律，入射角为 10° 时， π 光 (偏振方向垂直 aob 平面) 和 σ 光 (偏振方向平行 aob 平面) 在 S2 面的折射角分别为 $\theta_{1064\pi}=22.08^\circ$ 和 $\theta_{1064\sigma}=19.87^\circ$ ，如图 2 所示。对于 a 轴切割的 Nd:YVO₄ 晶体， π 光与 σ 光的发射截面比约为 4:1，因此将输出镜的方向调整至 π 光折射光方向，可获得最大增益。 π 光与 σ 光在谐振腔中经过一次往返后，在激光晶体 Nd:YVO₄ 的 S1 面上，会产生间距 Δx 。 Δx 越大，表明 σ 偏振光损耗越多，从而 π 偏振光输出就越容易获得。采用 V 型腔的设计主要是因为 Nd:YVO₄ 楔角色散的缘故，倍频光 532 nm 与基频光 1064 nm 在楔面处 (S2) 会分开，但不会影响到 L2 光路上倍频光的输出。根据 ABCD 矩阵分析，振荡光在 M1 和 M3 处的光斑半径随两臂腔长度 L_1 和 L_2 缓慢变化，两臂束腰比约为 1:1。通过计算得：当 $L_1=16\text{ mm}$ ， $L_2=15\text{ mm}$ 时，S1 面处振荡光在子午和弧矢方向的束腰半径分别为 $\omega_{1m}=135.2\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\omega_{1s}=133.8\text{ }\mu\text{m}$ ，M3 处的束腰半径分别为 $\omega_{3m}=136.3\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\omega_{3s}=135.1\text{ }\mu\text{m}$ 。此时，S1 面处 π 光与 σ 光间的间隔 $\Delta x=1.98\text{ mm}$ 。实验中激光晶体处的通光孔半径为 0.9 mm ，因此很容易实现选偏的目的。

由于 KTP 晶体的快轴与 Nd:YVO₄ 晶体的光轴成 45° ，因此在 π 偏振光往返通过 KTP 倍频晶体时，只有偏振方向保持不变的纵模才能无损地通过，而偏振面发射旋转的纵模，在再次返回到 Nd:YVO₄ 晶体中时，会有一部分光分解到 σ 偏振方向，

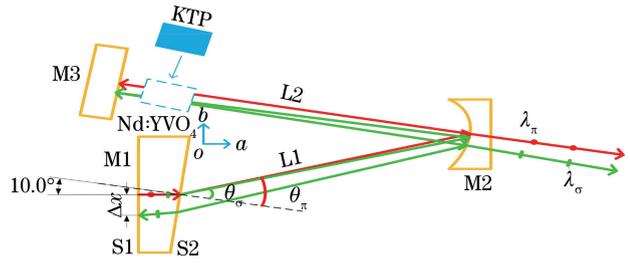


图 2 V 型腔中 π 光与 σ 光光路示意图
Fig. 2 Schematic of π light and σ light paths in V-type oscillator

导致该纵模产生损耗。当损耗足够大时，该纵模的振荡被抑制。利用琼斯矩阵对谐振腔中的纵模往返传播一周的相位和强度进行计算^[19]，第 i 个振荡模的透射率为

$$T_i = \cos^2\left(\frac{2\pi\Delta n l_{\text{KTP}}}{\lambda_i \cos \theta_{2i}}\right), \quad (1)$$

$$\theta_{2i} = \frac{\theta_{2ie} + \theta_{2io}}{2}, \quad (i=1, 2, \dots, m), \quad (2)$$

$$\Delta n = n_o - n_e(\theta_{2ie}), \quad (3)$$

式中： θ_{2ie} 和 θ_{2io} 分别为 e 光和 o 光在倍频晶体中的折射角； Δn 为倍频晶体中 o 光和 e 光的折射率差； l_{KTP} 为 KTP 晶体的长度。当基频光正入射 ($\theta_{2i}=0^\circ$) 到 KTP 晶体中时，(1) 式就与文献 [20] 中的 (9.16) 式相同。KTP 的温度变化会使 KTP 折射率发生变化，使晶体发生热膨胀，从而使 KTP 晶体的光学长度发生变化，即有

$$\Delta n(\Delta T) \cdot l_{\text{KTP}}(\Delta T) = l_{\text{KTP}} \left[\left(\frac{dn_z}{dT} - \frac{dn_y}{dT} + \Delta n \alpha_T \right) \Delta T + \Delta n \right], \quad (4)$$

式中： $dn_z/dT=1.6 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ 和 $dn_y/dT=1.3 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ 分别为 KTP 晶体在 z 和 y 方向上的热光系数； $\alpha_T=2.8 \times 10^{-5}\text{ K}^{-1}$ 为沿光轴的热膨胀系数。将 (4) 式代入 (1) 式中，易知透射率 T_i 与晶体长度 l_{KTP} 、温度 T 和 KTP 的调谐角度 θ_2 有关，即为了使某一纵模无损地通过晶体，可以通过调节角度 θ_2 、温度 T 或晶体长度 l_{KTP} 来实现。而对于由不同长度的 KTP 晶体与楔形 Nd:YVO₄ 激光晶体构成的双折射滤波器，自由光谱范围 (FSR) 可表示为

$$\Delta\nu_{\text{FSR}} = \frac{c}{2\Delta n \cdot l_{\text{KTP}} \times \cos \theta_2}, \quad (5)$$

式中： c 为光在真空中的速度。角度 θ_2 很小，对自由光谱范围的影响为 10^{-3} nm ，可忽略不计。在温度为定值时，假设基频光波长为 1064.8 nm ，根据 (1) 式，双折射滤波器的透射峰会随光在 KTP 晶体中的折射角 θ_2 的变化而变化，如图 3(a) 所示。晶体长度越短，角

度 θ_2 的调谐范围就越大。图 3(b)为在基频光正入射到 KTP 时,不同长度的 KTP 晶体构成的滤波器对不同纵模的透射率。由图 3(b)可知:晶体长度越长,其自由光谱范围就越小,相邻纵模之间透射率的差值就越大,反之则反。当激光器为多纵模运转时,如果振荡模之间的频差很大,那么长度短 of KTP 的滤波能

力既不会受影响,还会有大的自由光谱范围。总之,自由光谱范围决定了选频的范围,大自由光谱范围的滤波器能抑制更多的纵模起振;相邻纵模之间透射率的差值代表了滤波器的选频能力,如滤波器对中心模的透射率 $T_0=1$,此时若其对邻近模的损耗很大,则很容易实现中心模的单频运转。

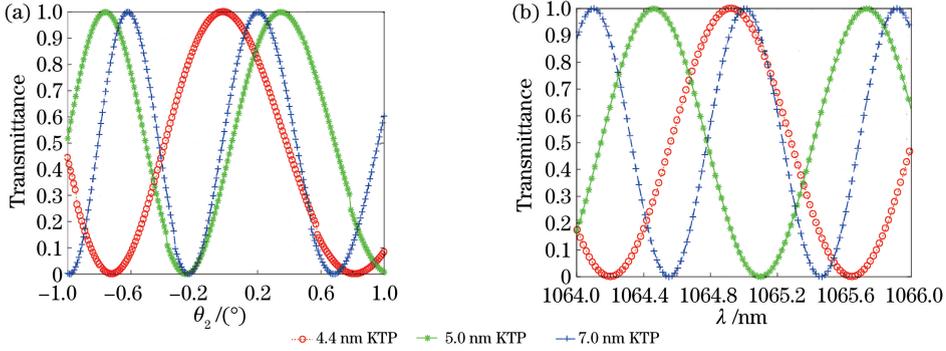


图 3 双折射滤波器的透射率曲线。(a)透射率随角度 θ_2 的变化;(b)透射率随波长 λ 的变化

Fig. 3 Transmittance curves of birefringence filter. (a) Transmittance versus θ_2 ; (b) transmittance versus λ

4 实验结果分析

4.1 基频光谱特性

为了研究由楔形 Nd:YVO₄ 激光晶体和 KTP 晶体构成的双折射滤波器的选频作用,实验中首先测量了谐振腔中未放入 KTP 晶体时,即没有构成滤波器之前,在不同泵浦功率水平下,腔内基频振荡的光谱图,如图 4 所示($\Delta\lambda_{\text{inter}}$ 表示振荡模频差)。Nd:YVO₄ 激光晶体的受激发射中心波长 $\lambda_0 = 1064.8 \text{ nm}$,光谱范围为 $1064.5 \sim 1065.2 \text{ nm}$,每个尖

峰的半峰全宽约为 0.025 nm ,估计纵模间隔 $\Delta\lambda_s = 0.0176 \text{ nm}$ (4.84 GHz)。在泵浦功率为 1 W 时,中心模 λ_0 起振后,大约在距其 0.176 nm 和 0.142 nm 波长处,才会有纵模起振。在泵浦功率为 2 W 时,主要有 4 个纵模起振,波长差从左至右依次为 $0.112, 0.176, 0.176 \text{ nm}$ 。通过对双折射滤波器进行理论分析后可知,振荡模之间的大频差间隔有利于滤波器选频。此外,泵浦功率为 2 W 时,在两个光谱峰之间,会有邻近的次纵模起振,但强度很弱,不会影响滤波器选频。

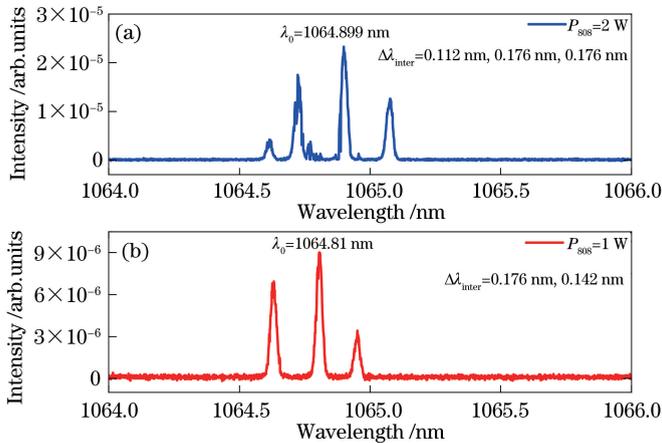


图 4 在放入 KTP 前,不同泵浦功率下谐振腔内的基频光谱图

Fig. 4 Output spectra of fundamental modes in resonator without KTP under different pump power

4.2 滤波特性比较

在谐振腔中放入不同长度的 KTP 晶体,调节基频光在 KTP 晶体中的入射角度,观察到的透射

光谱如图 5 所示。因为实际实验中无法定量基频光在 KTP 晶体中的入射角度,即无法给出光谱与 KTP 晶体调谐角度一一对应的关系图,所以本文

只给出了将 KTP 晶体放入谐振腔后观察到的实验现象。将 KTP 晶体调整到适当角度 θ_2 时,会出现如图 5(a)、(c)、(e) 所示的光谱输出,且此时输出功率最大。因为光谱仪 (MS 9740A) 的最小分辨率为 0.03 nm (8.24 GHz), 谐振腔中放入 KTP 晶体前纵模间隔为 0.0176 nm (4.84 GHz), 从光谱图 [5(a)、(c)、(e)] 上测得光谱的半峰全宽均约为 0.025 nm (6.87 GHz), 所以为了更加准确地测量谐振腔中纵模的个数, 采用自由光谱范围为 10 GHz、分辨率为 67 MHz 的 Fabry-Perot 扫描干涉仪精细测量激光光谱。结果显示, 当激光光谱监测到的输出为图 5(a)、(c)、(e) 时, Fabry-Perot 扫描干涉仪 (Thorlabs SA210-5B) 记录的激光为单纵模。图 6 为将 5 mm 长的 KTP 放入谐振腔中

后, Fabry-Perot 扫描干涉仪记录的绿光单纵模频谱图。调整 KTP 晶体偏离适当角度时, 会观察到图 5(b)、(d)、(f) 所示的光谱现象, 可测量出 4.4、5、7 mm 长的 KTP 晶体对应的自由光谱范围分别为 1.356、1.092、0.792 nm, 均分别小于理论值 1.4417、1.2687、0.9062 nm。该误差一方面是由 KTP 晶体的调谐角度导致的, 另一方面是由 KTP 晶体不精确的长度导致的。尤其对于 5 mm 长的 KTP, 其实测长度约为 5.3 mm。尽管在放入 KTP 前, 基频光谱范围为 1064.5~1065.2 nm, 但如果滤波器对此光谱范围内的纵模损耗太大, 就会使远离此范围且处于滤波器透射峰处的纵模, 即边模, 获得足够的上能级反转粒子数, 从而开始振荡, 但此时绿光输出光功率很小。

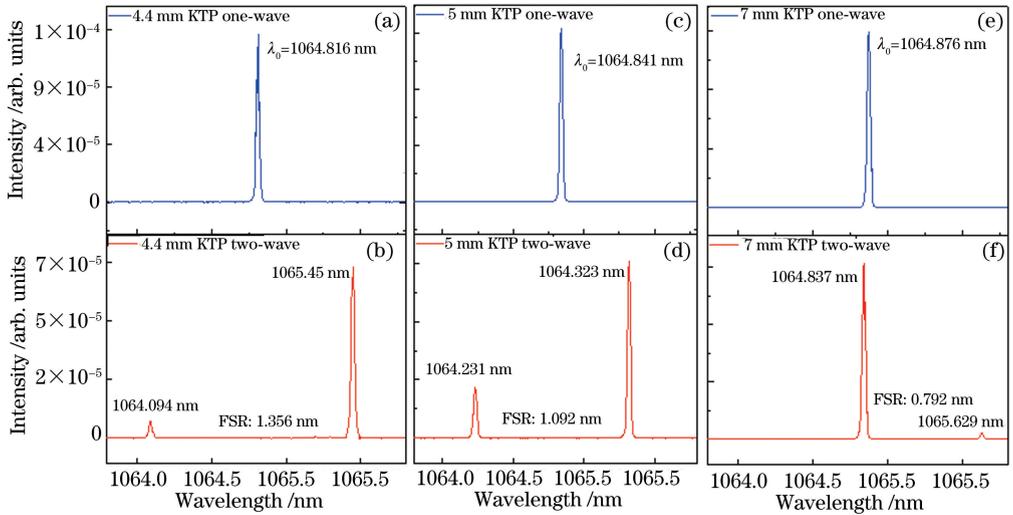


图 5 不同长度的 KTP 构成的双折射滤波器的选频特性

Fig. 5 Electing-frequency characteristics of birefringence filter with different lengths of KTP

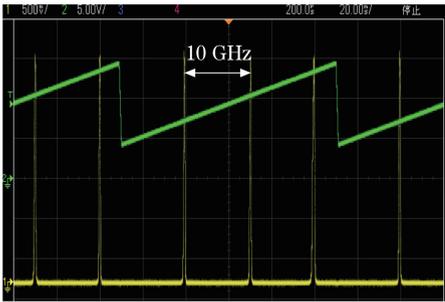


图 6 Fabry-Perot 干涉仪测量的激光单纵模频谱图

Fig. 6 Output spectrum of SLM operation measured by Fabry-Perot scanning interferometer

4.3 单频输出功率

如图 7 所示, 当泵浦功率相同时, KTP 晶体长度越长, 532 nm 倍频功率就越高, 4.4 mm 和 5 mm 长的 KTP 在整个泵浦范围内都为单纵模输出, 最

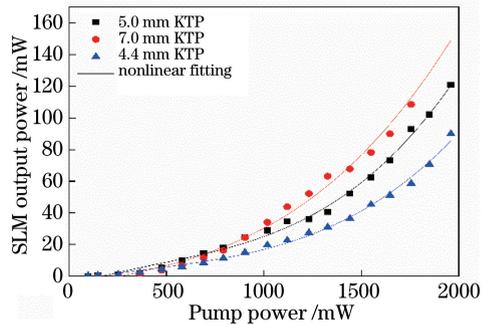


图 7 单纵模输出功率随泵浦功率的变化

Fig. 7 SLM output power versus pump power

大单纵模输出功率分别为 90 mW 和 120 mW。但对于 7 mm 长的 KTP, 其最大单频功率为 104 mW, 这是因为当泵浦功率升高至 1.8 W 时, 腔内基频光输出光谱呈现类似图 5(f) 中的双峰结构。原因如

下:7 mm长KTP的自由光谱范围为0.792 nm,稍小于Nd:YVO₄激光晶体的增益线宽(0.9 nm),在泵浦功率较小时,因为腔内纵模数少,可以滤波,但随着功率增大,边模获得的增益也就增大,处于滤波透射峰位置的边模很容易就开始振荡。在确保激光单纵模运转的前提下,考虑到晶体的倍频效率,长度为5 mm的KTP是最优选择。因此在泵浦功率约为2 W,KTP晶体为5 mm的条件下,进一步测量激光器单频运转对温度的敏感性,实验结果如图8所示。首先,在谐振腔温度为17.0℃时,调整基频光在KTP晶体中的入射角度,获得单纵模激光。然后,在17.0℃附近改变谐振腔温度,发现降低0.40℃和升高4.49℃时滤波器仍能保持单纵模振荡,但超过这个范围后就容易出现双波长输出,因此可确定激光单频运转范围 $\Delta T=4.89$ ℃。再次在谐振腔温度为22.5℃和28.0℃时,重复之前的过程,分别测得激光单频运转范围 $\Delta T=4.92$ ℃和 $\Delta T=4.55$ ℃。选用5 mm长的KTP,设定温度为20℃时,温度变化 ± 2 ℃时,滤波器透射谱的变化如图9所示。从图9可以看出:随着温度降低,双折射滤波器的透射谱向短波方向移动(蓝移)。结合图4(a)中基频光谱不对称的特点可知:透射谱的蓝移会使中心模旁两个边模的损耗都降低,中心模损耗增大,滤波器中易出现多纵模振荡;随着温度升高,双折射滤波器的透射谱向长波方向移动(红移),只要保持中心模的净增益大于边模的净增益,激光器就可以一直处于单纵模运转。而温度偏离调试温度越远,腔内损耗就越大,从而功率就越低。以上所述是单纵模运转温度和输出功率不对称的原因。

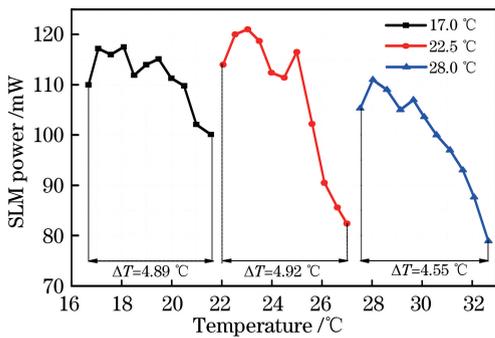


图8 单频运转温度特性

Fig. 8 Temperature characteristic of single-frequency operation

5 结 论

本文研究了LD泵浦的楔形Nd:YVO₄/KTP

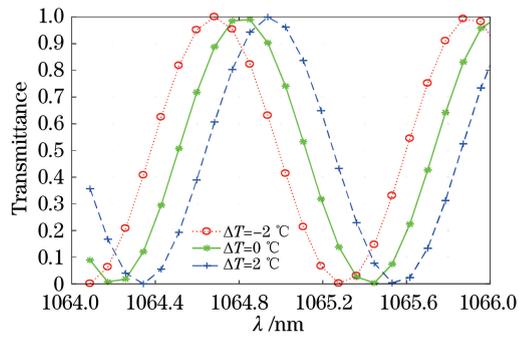


图9 温度变化 ΔT 对5 mm长KTP构成的双折射滤波器透射谱的影响

Fig. 9 Influence of temperature change ΔT on transmittance of birefringent filter with a 5-mm-long KTP

激光器的单频性能,除了将楔形Nd:YVO₄和KTP用作激光晶体和倍频晶体外,又将它们组合成了双折射滤波器。通过调节基频光在KTP中的入射角度以及KTP的温度,获得了100 mW以上稳定的单频绿光输出,且激光单频运转对温度不敏感。通过实验比较不同长度的KTP对单频绿光输出的影响,发现在泵浦功率较大时,5 mm长的KTP是最佳选择。这种基于楔形Nd:YVO₄/KTP双折射滤波的选频方法,不仅减少了激光谐振腔中光学元件的数量,而且构成的滤波器简单易调节,为单频绿光激光器提供了一种新的设计思路。后期将通过优化V型腔腔长和输出镜参数进一步提高单频输出功率。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Lei H X, Wang S K, et al. All-solid-state single-frequency and intracavity-frequency-doubled Nd:YVO₄ laser with fold-cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(11): 971-973.
张靖, 雷宏香, 王少凯, 等. 可调谐全固化折叠腔单频倍频Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2001, 28(11): 971-973.
- [2] Lu H D, Su J, Zheng Y H, et al. Physical conditions of single-longitudinal-mode operation for high-power all-solid-state lasers[J]. Optics Letters, 2014, 39(5): 1117-1120.
- [3] Radnatarov D, Kobtsev S, Khripunov S, et al. 240-GHz continuously frequency-tuneable Nd:YVO₄/LBO laser with two intra-cavity locked etalons[J]. Optics Express, 2015, 23(21): 27322-27327.
- [4] Jin T F, Reinhard F, Kecke R. Diode-pumped single-frequency coupled cavity Nd:YVO₄ laser at 532-nm wavelength[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3613: 16-22.

- [5] Zheng Q, Tan H M, Zhao L. Study of LD-pumped YVO_4/KTP single-frequency green laser [J]. *Laser & Infrared*, 2001, 31(4): 208-209.
郑权, 檀慧明, 赵岭. LD泵浦全固体单频 YVO_4/KTP 绿光激光器研究 [J]. *激光与红外*, 2001, 31(4): 208-209.
- [6] Zhou C, Ye Z Q, Zheng Q, et al. Diode-pumped single-frequency Nd : YVO_4 green laser [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2002, 23(4): 250-252.
周城, 叶子青, 郑权, 等. LD泵浦单频 Nd: YVO_4 绿光激光器 [J]. *半导体光电*, 2002, 23(4): 250-252.
- [7] Wang J Y, Zheng Q, Xue Q H, et al. 1.12 W single-frequency green laser adopting birefringent filter technique [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(3): 321-324.
王军营, 郑权, 薛庆华, 等. 利用双折射滤光片技术获得瓦级单频绿光输出 [J]. *光子学报*, 2005, 34(3): 321-324.
- [8] George J, Agnihotri V K, Ranganathan K, et al. A study of KTP temperature on efficient SLM generation in diode pumped intracavity frequency doubled Nd: YVO_4/KTP green laser [C/OL]. [S.l.: s. n.], [2019-09-21]. <https://www.researchgate.net/publication/230563566>.
- [9] Friel G J, Kemp A J, Lake T K, et al. Compact and efficient Nd : YVO_4 laser that generates a tunable single-frequency green output [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(24): 4333-4337.
- [10] Li R N, Lai Y J, Ma X T. Single-frequency green laser produced by diode-pumped Nd : YVO_4 laser frequency doubling with KTP [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(8): 1736-1738.
李瑞宁, 来引娟, 马小涛. 激光二极管抽运 Nd: YVO_4 和 KTP 倍频产生单频绿光激光器 [J]. *物理学报*, 2002, 51(8): 1736-1738.
- [11] Sotor J Z, Dudzik G, Antonczak A J, et al. Single-longitudinal mode, monolithic, green solid-state laser [J]. *Applied Physics B*, 2011, 103(1): 67-74.
- [12] Sotor J Z, Dudzik G, Abramski K M. Single frequency, monolithic Nd: $\text{YVO}_4/\text{YVO}_4/\text{KTP}$ diode pumped solid state laser optimization by parasitic oscillations elimination [J]. *Optics Communications*, 2013, 291: 279-284.
- [13] Dudzik G, Sotor J, Krzempek K, et al. Single-frequency, fully integrated, miniature DPSS laser based on monolithic resonator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8959: 89591F.
- [14] Fan T Y. Single-axial mode, intracavity doubled Nd: YAG laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1991, 27(9): 2091-2093.
- [15] Suzuki K, Shimomura K, Eda A, et al. Low-noise diode-pumped intracavity-doubled laser with off-axially cut Nd: YVO_4 [J]. *Optics Letters*, 1994, 19(20): 1624-1626.
- [16] Zhang Y K, Chen M, Pang Q S, et al. Study of electro-optic Q-switched Nd : YVO_4 laser with a wedge angle [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(10): 2456-2459.
张贇坤, 陈檬, 庞庆生, 等. 楔角 Nd: YVO_4 晶体电光调 Q 激光器性能研究 [J]. *中国激光*, 2010, 37(10): 2456-2459.
- [17] Zheng Y, Li F, Wang Y, et al. High-stability single-frequency green laser with a wedge Nd: YVO_4 as a polarizing beam splitter [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(2): 309-312.
- [18] Liang H C, Wu T W, Tsou C H, et al. High-power self-mode-locked Nd: YVO_4 laser at wavelength of 1342 nm with simultaneously orthogonal polarizations [C] // *Advanced Solid State Lasers*, October 4-9, 2015, Berlin, Germany. Washington, D.C.: OSA, 2015: ATh2A.42.
- [19] Born M, Wolf E. Principles of optics [M]. 7th ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2005: 824-827.
- [20] Yao J Q, Xu D G. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007: 610-620.
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 610-620.