

# 利用双折射滤光片技术获得瓦级单频绿光输出\*

王军营 郑 权 薛庆华 檀慧明

(中国科学院长春光学精密机械与物理所, 长春 130022)

**摘 要** 对两种双折射滤光片选频方案进行了理论分析, 给出合理的选频结构. 实验中采用简单驻波腔, 双 KTP/单 BP 的结构, 在 8 W 的泵浦功率下获得了 1.12 W 的单频绿光连续稳定输出, 并对单频激光器稳定运转与外界微扰之间的关系进行了初步的讨论.

**关键词** 单频; 绿光激光器; 驻波腔; KTP

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

## 0 引言

激光二极管(LD)泵浦掺钕基质激光器经过腔内倍频获得的 532 nm 绿光激光在许多领域中有着广泛的应用, 但一般这种激光器为多纵模自由运转, 由于各纵模之间在非线性晶体中的随机耦合<sup>[1]</sup>, 使得激光输出噪声很大, 功率不稳定, 这就是所谓的“绿光问题”, 从而限制了进一步的应用. 解决这一问题的手段就是迫使其单纵模运转. 现已发展出多种技术获得单纵模运转: 环行腔消除了空间烧孔<sup>[2]</sup>, 双折射滤光片<sup>[3,4]</sup>、标准具<sup>[5]</sup>引入了选择性损耗, 而短腔则增加了纵模间隔, 这些都能不同程度地实现单纵模运转. 通常几十毫瓦量级的全固态单频绿光激光可采用微片短双折射滤波腔<sup>[3,4]</sup>获得, 而数百毫瓦乃至瓦级单频绿光激光器则采用环行腔获得, 例如山西大学采用环行腔技术<sup>[2]</sup>获得了 1.5 W 的单频绿光. 但环行腔本身由于光学元件多, 存在着结构复杂、控制困难以及成本高等缺陷. 本文通过对双折射滤光片选频能力的分析, 发现采用双折射滤光片完全有能力获得较大功率的单频绿光输出. 实验中, 采用 LD 端面泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>, 双 KTP/单布氏片(BP)方案, 获得了稳定的 1.12 W 单频绿光连续输出.

## 1 理论分析

双折射滤光片选频可以通过琼斯矩阵求本征值<sup>[6]</sup>进行分析, 下面就双折射滤光片选频结构通常采用的单 KTP/单布氏片方案和本文所采用的双 KTP/单布氏片方案的选频能力进行理论分析及讨论.

### 1.1 琼斯矩阵运算

两种选频结构示意图如图 1, (a) 为单 KTP 选频结构示意图, Ⅱ类切割 KTP 置于布氏片(BP)右

侧, 起倍频和波片的双重作用, (b) 为双 KTP/单 BP 片选频方案, 两个 KTP 分别置于 BP 两侧.

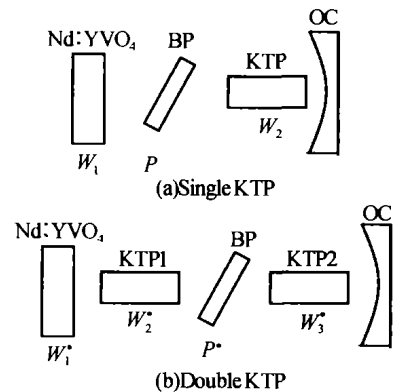


图 1 单 KTP 选频与双 KTP 选频结构  
Fig. 1 The sketch map of frequency selected structure of single KTP and double KTP structure

对于单 KTP 结构, 如图 1(a), 记 Nd:YVO<sub>4</sub> 的琼斯矩阵为  $W_1$ , KTP 的琼斯矩阵为  $W_2$ , BP 的琼斯矩阵为  $P$ , 则腔内基频光一次往返的琼斯矩阵为

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

$$W_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_1} \end{bmatrix}, W_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_2} \end{bmatrix}, \text{其中 } \delta_1, \delta_2 \text{ 分别}$$

为 Nd:YVO<sub>4</sub> 与 KTP 的相对位相延迟,  $\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d$ ,  $\lambda$  是基频光波长 1064 nm,  $\Delta n$  是基频光在双折射晶体中的折射率差 (Nd:YVO<sub>4</sub> 与 KTP 分别对应 0.2, 0.08),  $d$  为晶体长度.

$$P = \begin{bmatrix} q & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, q = (2n/(1+n^2))^2, n \text{ 为 BP 相对}$$

基频光的折射率 1.52.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \text{是 Nd:YVO}_4 \text{ 与 KTP}$$

之间的坐标转换矩阵 (Nd:YVO<sub>4</sub> 为  $s-p$  坐标系, KTP 为  $o-e$  坐标系),  $\theta$  是  $s-p$  坐标系与  $o-e$  坐标系夹角.

解本征方程  $MA = \zeta A$ , 可以得到  $M$  的本征值  $\zeta_{1,2}$ , 其模的平方是基频光在两个偏振方向上的往返透射率.

对于双 KTP 结构, 如图 1(b), 记 Nd:YVO<sub>4</sub> 的琼

\* 国家高技术研究发展计划 (No. 2002AA311141) 资助项目

Email: wangjunying1978@sina.com

收稿日期: 2003-12-01

斯矩阵为  $W_1^*$ , KTP1 的琼斯矩阵为  $W_2^*$ , KTP2 的琼斯矩阵为  $W_3^*$ , BP 的琼斯矩阵为  $P^*$ . 则腔内基频光往返的琼斯矩阵为

$$M^* = W_1^* \times R(-\theta_1^*) \times W_2^* \times R(\theta_1^*) \times P^* \times R(-\theta_2^*) \times W_3^* \times W_3^* \times R(\theta_2^*) \times P^* \times R(-\theta_1^*) \times W_2^* \times R(\theta_1^*) \times W_1^* \quad (2)$$

$W_1^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_1^*} \end{bmatrix}$ ,  $W_2^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_2^*} \end{bmatrix}$ ,  $W_3^* = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{i\delta_3^*} \end{bmatrix}$ , 其中  $\delta_1^*$ ,  $\delta_2^*$  与  $\delta_3^*$  分别为 Nd:YVO<sub>4</sub>、KTP1 与 KTP2 的相对位相延迟,

$$P^* = \begin{bmatrix} q & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(\theta_1^*) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1^*) & \sin(\theta_1^*) \\ -\sin(\theta_1^*) & \cos(\theta_1^*) \end{bmatrix}, R(\theta_2^*) =$$

$\begin{bmatrix} \cos(\theta_2^*) & \sin(\theta_2^*) \\ -\sin(\theta_2^*) & \cos(\theta_2^*) \end{bmatrix}$ , 分别为 Nd:YVO<sub>4</sub> 与

KTP1、KTP2 之间的坐标转换矩阵,  $\theta_1^*$ 、 $\theta_2^*$  分别是 Nd:YVO<sub>4</sub> 坐标系与 KTP1、KTP2 坐标系夹角.

解本征方程  $M^* A^* = \zeta^* A^*$ , 可以得到  $M^*$  的本征值  $\zeta_{1,2}^*$ , 其模的平方为基频光在两个偏振方向上的往返透过率.

### 1.2 讨论

由于  $M$  与  $M^*$  的形式复杂, 求解  $\zeta_{1,2}^*$ ,  $\zeta_{1,2}^*$  的解析式很困难, 因此我们通过计算机进行数值计算来比较两种结构的选频能力. 取工作物质长 2 mm (选频能力与工作物质的长度有关, 下面将对此进行讨论), 单 KTP 结构中倍频晶体长度为 10 mm, 而双 KTP 结构中取左侧倍频晶体长度为 10 mm, 右侧为 5 mm (之所以取右侧 KTP 长度为 5 mm, 是因为当左右两侧的倍频晶体都为 10 mm 时, 选频能力过强, 单频运转对外界扰动敏感, 不利于激光器的稳定工作, 后面的实验验证了此观点), 两个 KTP 与水平面呈 45° 且相互平行放置, 即:  $\theta_1^*$ ,  $\theta_2^*$  均为 45°. 则计算机绘制的两种结构在  $s, p$  偏振方向上的透过率曲线如图 2 所示 (下方凹型曲线为  $s$  偏振模式对应的透过率曲线, 与之对称分布的上方凸型曲线为  $p$  偏振模式对应的透过率曲线, 后面各图均如此, 不再另述). 由于  $s$  偏振方向上所有模式损耗都很大, 且 Nd:YVO<sub>4</sub> 存在偏振发射性质, 所以在实际的激光器中, 只有  $p$  偏振方向上的模式才有可能起振, 因此本文主要关心  $p$  偏振模式对应的透过率曲线. 从图中很明显可以看出, 双 KTP 结构在  $p$  偏振方向上的透过率曲线宽度更窄, 对紧邻中心无损纵模的那个

纵模 (下面简称次纵模) 相对损耗更大, 也即选频能力更强. 以 30 mm 长无源腔为例, 对应波长间隔  $\Delta\lambda$  约 0.02 nm, 则单 KTP 结构中次纵模的相对损耗是 4.68%, 而双 KTP 结构中次纵模的相对损耗则是 10.64%. 所以采用双 KTP/单 BP 结构选频, 有望获得更高功率的单频绿光输出.

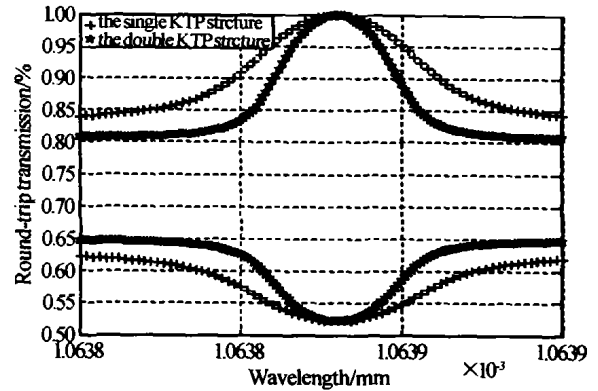


图 2 两种选频结构的透过率曲线  
Fig. 2 The curve of round-trip transmission with different structure

经分析, 我们发现, 选频能力与工作物质的长度有关. 图 3 为双 KTP/单 BP 结构中两个 KTP 平行放置, Nd:YVO<sub>4</sub> 取不同厚度时基频光在两个偏振方向上对应的往返透过率曲线. 可以看出, 工作物质越短, 选频能力越强. 当工作物质取 2 mm 长时, 次纵模的相对损耗为 10.64%, 而工作物质取 5 mm 长时, 次纵模相对损耗为 6.69%.

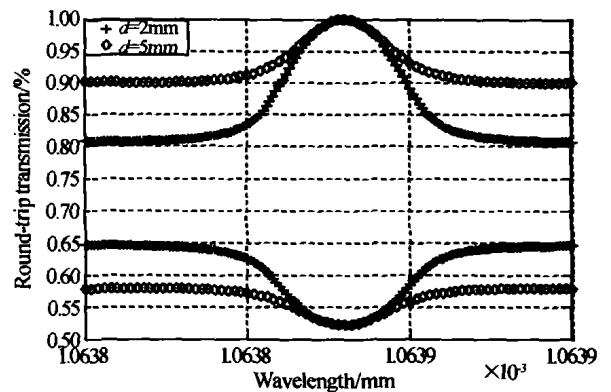


图 3 工作物质取不同长度时的透过率曲线  
Fig. 3 The curve of round-trip transmission with different length of Nd:YVO<sub>4</sub>

此外, 分析也发现当两个 KTP 相互垂直放置时, 选频能力将大大降低. 图 4 为工作物质长 2 mm, 两个 KTP 分别平行放置, 垂直放置时两个偏振方向上基频光往返透过率曲线. 数值计算得到平行放置时的次纵模相对损耗为 10.64%. 垂直放置时的次纵模损耗仅为 1.21%, 可见两者选频能力相差悬殊, 这是因为基频光在两个双折射晶体中引起的位相延迟有一部分抵消了.

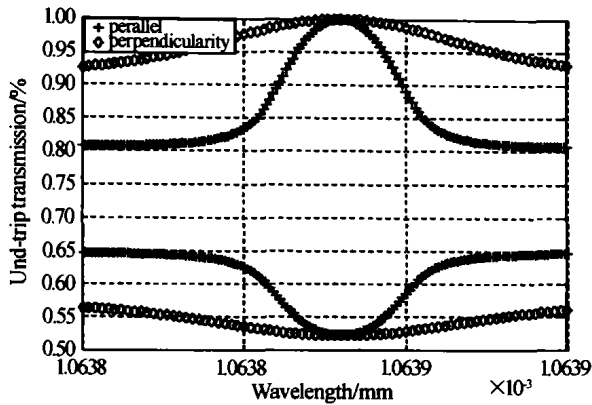


图4 双KTP分别平行、垂直放置时的透过率曲线  
Fig. 4 The curve of round-trip transmission with different mutual location

## 2 实验装置与结果分析

实验中采用光纤耦合端面泵浦方式,简单线性驻波腔,双KTP/单BP片选频结构.采用端面泵浦方式,泵浦光与基频光之间模式空间交叠好,可充分利用泵浦能量,装置如图5.

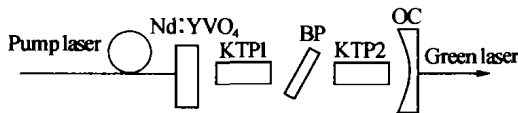


图5 单频绿光激光器装置  
Fig. 5 The setup of single frequency green laser

泵浦源为最大输出功率10 W的光纤耦合半导体激光器,在室温下,发射中心波长806.6 nm.泵浦光经过准直聚焦系统后会聚成直径为400  $\mu\text{m}$ 的聚焦光斑注入到工作物质内部,工作物质Nd:YVO<sub>4</sub>晶体左端镀808 nm抗反(AR)/1064 nm高反(HR)膜作为一个端镜使用,另一端镀1064 nm AR膜.考虑到选频能力与泵浦光的吸收两个因素,实验中选择工作物质长度为2 mm.输出镜(OC)的曲率半径为400 mm,凹面镀1064 nm HR/532 nm AR双色膜,其中,对1064 nm的反射率大于99.8%,对532 nm的透过率大于95%.倍频晶体KTP1, KTP2与水平面呈45°角,相互平行放置,长度分别为10 mm, 5 mm,两个端面均镀1064/532 nm AR膜,布氏片(BP)为未镀膜的K9玻璃片,厚度1 mm,呈布氏角放置.整个系统采用半导体致冷,空气冷却.

通过温度调谐,使LD发射波长与Nd:YVO<sub>4</sub>的中心吸收波长808.5 nm重合,调节谐振腔及晶体温控,使无损耗主纵模与激光介质增益曲线的中心频率重合.精细调节各元件至最佳状态.在8 W泵浦功率下,获得了1.12 W的绿光单频连续输出,且单频运转稳定,图6为F-P共焦干涉仪观察的单纵模情况.

实验中,将两个KTP相互垂直放置时,在8 W的泵浦功率下无论如何调节各元件,均不能获得单

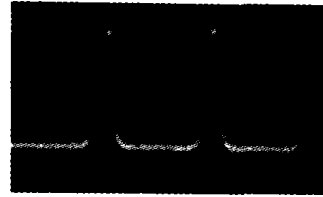


图6 利用F-P共焦干涉仪观察的单纵模图

Fig. 6 Single longitudinal mode for the green laser  
频输出.实验结果与上面的分析相吻合.

实验中,将KTP2去掉,换成长度也为10 mm的KTP后(选频能力得到了加强),获得了930 mW的单频绿光输出,但不稳定,容易发生跳模现象.然后将腔内仅留一个10 mm长的KTP进行选频(选频能力减弱了),精细调节各元件,仍能获得650 mW单频输出,但运转时紧邻中心主纵模的次纵模仍容易起振.这是因为双折射滤光片的选频能力与单频运转激光器抗外界扰动的能力密切相关,如果选频能力过强,透过率曲线过于尖锐,外界微扰(由于晶体温控精度有限,外界温度的变化会导致晶体折射率及腔长的变化)引起的频率漂移会使主纵模与次纵模之间的相对损耗变的很小,从而使单频运转不稳定.如果选频能力过弱(但仍能单频运转),透过率曲线顶部过于平缓,外界微扰引起的频率漂移同样会使主纵模与次纵模之间的相对损耗变的很小,最终导致次纵模起振,单频运转失败.也就是说,选频能力过弱或过强,单频运转对外界扰动都会很敏感.只有选取合适的选频能力,激光器才有较强的抗干扰能力.

## 3 结论

本文首先对两种双折射滤光片选频方案进行了理论分析,然后分析了影响选频能力的因素,讨论了单频运转的稳定性问题,以此为指导,设计出合理的选频结构.在实验中采用LD端面泵浦Nd:YVO<sub>4</sub>,简单驻波腔,双KTP/单BP片的结构,8 W的泵浦功率下获得了1.12 W的单频绿光连续稳定输出.实验证明,这是一种获得高稳定、高功率单频激光的行之有效的办法.

### 参考文献

- Baer T. Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG laser. *J Opt Soc Am(B)*, 1986, 3(9): 1175 ~ 1180
- 王海波, 马艳, 翟泽辉. LD端面抽运1.5 W单频稳频绿光激光器. *中国激光*, 2002, 29(2): 119 ~ 122  
Wang H B, Ma Y, Zhai Z H. *Chinese J of Lasers*, 2002, 29(2): 119 ~ 122
- 郑权, 檀慧明. LD泵浦全固态Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP单频绿光激光器研究. *激光与红外*, 2001, 31(4): 208 ~ 209  
Zheng Q, Tan H M. *Laser & Infrared*, 2001, 31(4): 208 ~

- 209
- 4 郑权, 檀慧明, 钱龙生. 用布氏片实现有效连续和脉冲单频绿光输出. *中国激光*, 2002, **29**(A9):769~772  
Zheng Q, Tan H M, Qian L S. *Chinese J of Lasers*, 2002, **29**(A9):769~772
- 5 William Culshaw, Kannelaud J. Two-component-mode filters for optimum single frequency operation of Nd:YAG laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1971, **QE-7**(8):381~387
- 6 Junghans J, Keler M, Weber H. Laser resonators with polarizing elements-eigenstates and eigenvalues of polarization. *Applied Optics*, 1974, **13**(12):2793~2798

## 1. 12W Single-frequency Green Laser Adopting Birefringent Filter Technique

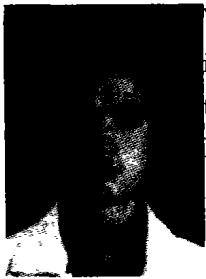
Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qinghua, Tan Huiming

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130022*

Received date:2003-12-01

**Abstract** Two schemes of frequency selectivity utilized birefringent filter are analyzed theoretically, and the appropriate structure of frequency selectivity was chosen. In experiment, by using the stationary wave cavity and the structure of double KTP/single BP, 1.12 W single-frequency green steady output was obtained with 8 W pump power, moreover, the relation of stability of single-frequency laser and outside disturb was discussed simply.

**Keywords** Single-frequency; Green laser; Stationary wave cavity; Birefringent filter



**Wang Junying** was born in Henan, China, on October 27 1978. He received the B. S. degree in 2001 from Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, China. He is presently pursuing the M. S. degree in optical engineering at Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS. He is interested in all solid-state laser, nonlinear frequency conversion.