

激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 和 KTP 倍频 产生单频绿光激光器

李瑞宁 来引娟 马小涛

(山西大学电子信息技术系, 太原 030006)

(2001 年 12 月 4 日收到; 2002 年 1 月 14 日收到修改稿)

报道了一种激光二极管抽运、KTP 倍频的 Nd:YVO₄ 激光器, 采用折叠腔, 实现了稳定的高输出单频倍频运转, 绿光输出功率达到 102 mW, 转换效率为 10.7 %.

关键词: 激光二极管抽运, 单频绿光, 薄膜偏振片

PACC: 4255

1. 引言

激光二极管(LD)抽运的单频绿光激光器具有高效率、长寿命、全固化、微型化等优点, 在喇曼光谱、激光全息等领域有着广泛的应用前景. 以往的单频绿光激光器采用以下几种工作方式: 环形腔内腔倍频; 外腔谐振倍频^[1]; 扭转模(twisted mode)腔技术^[2,3], 理论和实验证明, 在 Nd:YVO₄ 和 KTP 组成的驻波腔内插入布儒斯特片, 并与 KTP 的晶轴成 45°, 可强迫激光器工作在单纵模状态^[4,5], 但布儒斯特片的插入损耗和像散使倍频效率明显降低, 虽然布儒

斯特片的透过率 T_p 的理论值趋于零, 但其反射率 R_s 仅 10 % 左右(对 BK7 玻璃), 抑制多纵模的能力有限, 因此单频运转的稳定性欠佳.

我们考虑到布儒斯特片的缺点, 用薄膜偏振片、Nd:YVO₄ 和 KTP 的表面作为腔镜构成折叠腔, 绿光从偏振片输出, 消除了像散和插入损耗. 通过对 KTP 晶体精确控温, 从而实现了高效率单频运转.

2. 原理与实验装置

实验装置如图 1 所示.

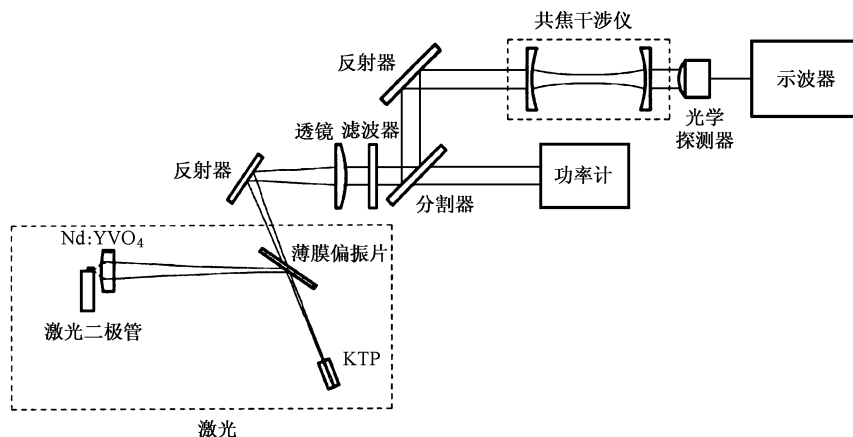


图 1 Nd:YVO₄ + KTP 倍频实验示意图

(1) 激光二极管发光面为 $1\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$, 环境温度为 25 °C 时波长为 806 nm, 标称输出功率为 1 W; 激

光二极管由低噪声电源驱动, 并由控温仪补偿由于外界环境温度和电流变化引起的波长漂移, 当抽运

电流为 1.28 A,输出功率为 950 mW,相对 Nd:YVO₄ 的吸收峰实际波长漂移 $\leq 0.01\text{nm}$.

(2) Nd:YVO₄ 晶体的 Nd 掺杂浓度为 2 %,横截面为 5 mm × 5 mm,其中一个表面磨成球面,作腔镜,曲率半径为 $R = 50\text{ mm}$,对波长为 1064 nm 高反, $R \geq 99.8\%$,对波长为 808 nm 增透, $T \geq 95\%$;另一个面磨成平面,对波长为 1064 nm 增透, $R \leq 0.1\%$. 晶体中心厚度为 1.2 mm.

(3) 薄膜偏振片入射角为 56.5°,对波长为 1064 nm 的不同偏振态的偏振光分别有 $R_s \geq 99.8\%$, $T_p \geq 97\%$. 对绿光的平均透过率约为 92%.

(4) KTP 晶体的尺寸为 3mm × 3mm × 5mm,其中一个表面对波长为 1064 和 532 nm 双波长增透, $R_{1064} \leq 0.1\%$, $R_{532} \leq 1\%$;另一个表面对波长为 1064 和 532 nm 双波长高反,其中 $R_{1064} \geq 99.8\%$, $R_{532} \geq 99\%$. 为保证得到稳定的高效单频绿光输出,晶体装在精度为 ± 0.01 的微型控温炉中.

激光二极管和 Nd:YVO₄ 晶体之间的耦合采用面对面的方式,发光面和球面之间的距离约为 10 μm,偏振方向与 Nd:YVO₄ 的 π 偏振方向平行时,耦合效率约为 90%. 平凹腔中基模光斑半径公式为

$$\begin{aligned}\omega_{s1} &= \sqrt{\frac{\lambda}{\pi}} [L(R-L)]^{1/4}, \\ \omega_{s2} &= \sqrt{\frac{\lambda R}{\pi}} \left(\frac{L}{R-L} \right)^{1/4},\end{aligned}\quad (1)$$

式中 ω_{s1} 表示 KTP 一个面上的光斑半径, ω_{s2} 表示 Nd

YVO₄ 球面上的光斑半径,显然,我们选择合适的曲率半径和腔长,就可以使抽运光的模体积和基模的模体积在 Nd:YVO₄ 晶体中实现最大限度的模匹配,从而保证 TEM₀₀ 模运转,并在共焦长度大于或等于 KTP 长度的条件下适当减小 ω_{s1} ,达到较高的倍频效率.

薄膜偏振片的入射面要严格与 Nd:YVO₄ 的偏振轴平行,并与 KTP 的晶轴方向成 45° 角,前者的调整误差会增加腔的偏振损耗,后者偏离 45° 将引起绿光功率起伏和效率的降低.

从谐振腔的结构我们不难理解它的单纵模运转机理,偏振片和 KTP 晶体构成双折射滤波器,线偏振光入射到类匹配的 KTP 中分解成两个相互垂直的偏振态 E_{e1} 和 E_{e2} ,经过一个往返后他们之间的位相差为

$$\Phi(\lambda, d, T) = \frac{4\pi d}{\lambda} (n_{e1} - n_{e2}), \quad (2)$$

式中 λ 为波长, T 为 KTP 的温度, d 为 KTP 的长度, n_{e1} 和 n_{e2} 分别为两个正交偏振光在 KTP 中的折射率. 仅有等于 2 的整倍数的那些波长往返经过 KTP 晶体后,仍保持原来的 S 偏振态不变,在“无偏振损耗”的情况下在腔内继续振荡. 其他波长的光经过一个往返通过 KTP 后将变成椭圆偏振光,再次通过薄膜偏振片时被分解成两个相互垂直的线偏振光,其中 S 偏振分量在腔内继续振荡,而 P 偏振分量几乎全部逸出腔外,因此仔细调整 KTP 的温度,使 KTP 成为全波片,就可保证激光器实现稳定的单纵模运转.

以 Nd:YVO₄ 表面作为腔镜、激光二极管端面抽运的激光器还隐含有一个所谓“短程吸收”的单纵模运转机理: Nd:YVO₄ 对抽运光有非常大的吸收系数,对波长为 808 nm 的吸收程仅为 300 μm,抽运吸收区又紧靠谐振腔面,难以形成明显的空间烧孔效应,因此通过均匀加宽工作物质中的模竞争和双折射滤波器的共同作用可强迫激光器工作在单纵模状态.

在普通的内腔倍频驻波激光器中,反方向的绿光被 Nd:YVO₄ 吸收后会产生再抽运,由于倍频过程中的非线性效应,虽然基频光很稳定,绿光的噪声和功率起伏却很大,所以绿光再抽运会进一步增加倍频光和基频光的噪声和功率起伏. 在折叠腔中绿光若从偏振片输出,不仅可增加近一倍的绿光输出,还可基本消除再抽运效应,使激光器工作在单频低噪声状态.

3. 实验结果

我们把温度可以连续调节的 KTP 晶体炉放在一个正交偏光系统中, KTP 的晶轴方向与偏光系统成 45° 夹角,用一束波长为 1064 nm 的单频激光作为模拟光,可以看到透射功率随 KTP 的温度严格按正弦规律变化,我们从一批尺寸为 3mm × 3mm × 5 mm 的晶体中随机抽测了 18 块晶体,全波片的周期为 $(21.2 \pm 0.3)\text{ K}$,虽然全波片的周期一致性很好,但每个 KTP 的全波片温度却随机分布,因此我们不能期望象加工真正波片那样精确控制厚度和匹配角,使它在 25 °C 时正好是全波片,这在生产中是不可取的,况且 KTP 晶体对基频光和倍频光的吸收所引起的自加热也会引起位相变化,因此只能靠精密控温

的方法控制和补偿晶体温度使位相精确等于 2π 的整数倍。

在等效腔长为 28 mm、抽运功率为 1 W 的条件下,我们首先调整激光二极管的温度使抽运波长稳定在 808 nm,然后缓慢调节 KTP 的温度,并分别用功率计监测从薄膜偏振片输出的绿光功率和泄漏出的基频功率,同时用自由光谱区为 750 MHz 的共焦扫描干涉仪监测模式。当 KTP 的温度调节到 23.68

时,绿光达到最大值,基频光减小到最小值,这时从共焦扫描干涉仪观察到稳定的单纵模输出,如图 2 所示。单频绿光的输出功率达到 102 mW,从偏振片泄漏出的基频光功率仅 10 mW,光-光转换效率达 10.7%,单纵模的温度稳定区约为 2.5 $^{\circ}$ C,功率起伏(10s)小于 1%(峰-峰值),频率稳定性(10s)优于 250 kHz(RMS),长期频率漂移量约为 0.17 MHz/min。连续监视 4h,激光器稳定地工作在单纵模状态,功率起伏小于 3%(峰-峰值)。

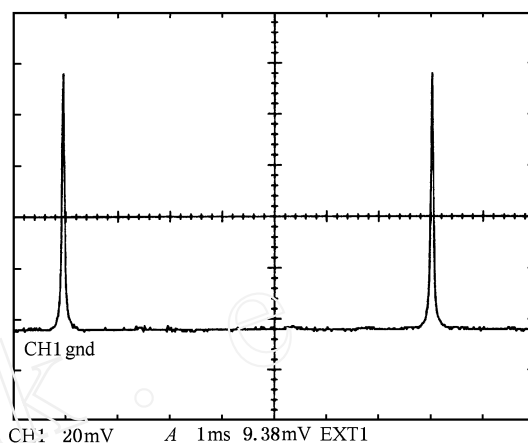


图 2 共焦扫描干涉仪监测模式 自由光谱范围为 750MHz

中国科学院半导体研究所肖建伟博士为本试验提供了激光器,谨此致谢。

- | | |
|--|--|
| <p>[1] Kozlovsky W J, Nabors C D and Byer R L 1988 <i>IEEE J. Quantum Elect.</i> 24 913</p> <p>[2] Anthon D W, Sipes D L and Ressler M R 1992 <i>IEEE J. Quantum Elect.</i> 28 1148</p> <p>[3] Evtuhov V and Siegman A E 1965 <i>Appl. Opt.</i> 4 142</p> | <p>[4] Hideo Nagai, Masahiro Kume, Issey Ohta, Hirokazu Shimizu and Masaru Kazumura 1992 <i>IEEE J. Quantum Elect.</i> 28 1164</p> <p>[5] Zhao S H, Chen G F, Zhao W, Wang Y S, Yu L J and Chang L 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 1273 (in Chinese) [赵尚弘、陈国夫、赵卫、王屹山、于连君、常琳 2000 物理学报 49 1273]</p> |
|--|--|

Single-frequency green laser produced by diode-pumped Nd:YVO₄ laser frequency doubling with KTP

Li Rui-Ning Lai Yin-Juan Ma Xiao-Tao

(Department of Electronics and Information Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 4 December 2001; revised manuscript received 14 January 2002)

Abstract

A laser diode-pumped Nd:YVO₄ + KTP frequency-doubled laser, with folded semi-monolithic cavity, achieves single-frequency and frequency-doubled operation with stable high-power output. The output power of the green laser is approximately 102 mW with conversion efficiency of 10.7%.

Keywords: diode laser-pumping, single-frequency green laser, film-polarizer

PACC: 4255