

LD 抽运的 Nd:YAG 单频倍频激光器

曹红军 张学斌 孙一民 沈乃澂

(中国计量科学研究院计量测试高技术联合实验室 北京 100013)

提要 在 20 mm 激光腔内, Nd:YAG 一端切成布氏角, 与倍频晶体 KTP 组合构成双折射滤波片选择单纵模。用国产激光二极管(LD)纵向抽运, 在会聚抽运光功率为 500 mW 时, 获得 4 mW 单频连续运转的 532 nm 绿光输出, 同时获得约 50 mW 的单频连续 1064 nm 红外输出。

关键词 LD 抽运, 单频, 双折射滤波片

1 引言

用激光二极管(LD)作抽运源的 Nd:YAG 倍频激光器在许多领域中有广泛的应用。近年来对这种激光器的碘饱和吸收稳频研究已在计量领域内受到重视, 该激光有可能成为 532 nm 新的光学频率标准^[1~3]。

通常, Nd:YAG 激光器由于增益介质的空间烧孔效应而运行在多纵模状态, 腔内倍频时又引入了非线性耦合, 使输出的倍频绿光很不稳定^[4], 这在许多应用中都是不允许的。在计量研究中, 尤其要求单频连续稳定的激光输出。固体激光器的单纵模选模技术有多种, 在需要腔内倍频的情况下, 双折射滤波片法是一种方便而有效的方法^[5~7]。我们用这种方法获得了 Nd:YAG 倍频激光器的单频连续输出。与文献^{[5]~[7]}相比, 进一步优化了腔型设计, 采用单端布氏角切割的 Nd:YAG 棒作为起偏器, 减少了腔内元件及损耗, 缩短了腔长, 进一步提高了选模能力。

2 基本原理

LD 纵向抽运的固体激光器, 在抽运光束与激光腔基横模(TEM₀₀ 模)体积匹配较好时, 比较容易运行在基横模状态, 这类激光器实现单频工作的关键是单纵模的选模。

用双折射滤波片法选择单纵模对 Nd:YAG-KTP 腔内倍频激光器来说是方便的。Nd:YAG 棒的腔内一端切成布氏角(对 1064 nm 基频光)作为起偏元件, 基频光通过它时, 与起偏方向(设为 y 方向)相同的偏振分量可以完全透过, 与起偏方向相垂直的方向(x 方向)上的光强透过率设为 T 。由菲涅耳公式, $T = [2n/(n^2 + 1)]^2$, 其中 n 为折射率。对 YAG 晶体, $T = 0.71$ 。若不考虑 YAG 晶体对光的绝对相位延迟, 则布氏角正反方向的琼斯矩阵分别为

$$B_1 = \begin{bmatrix} t_1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} t_2 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 t_1, t_2 分别为由 YAG 沿布氏角折射出空气和从空气沿布氏角折射进 YAG 时的振幅透过率, $t_1 \neq t_2$, 但 $t_1 \cdot t_2 = T$ 。

双轴倍频晶体 KTP 同时用作双折射波片, 基频光通过它时分解为偏振方向相互垂直的两束偏振光 s 光(慢光)和 f 光(快光), 设 s 光和 f 光的相对相位延迟为 δ , 若不考虑绝对相位延迟, 则 KTP 的琼斯矩阵在 s - f 坐标系中为

$$W_0 = \begin{bmatrix} e^{-i\delta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\delta/2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

则腔内基频光一次往返的琼斯矩阵为

$$M = B_2 R(-\theta) W_0 W_0 R(\theta) B_1 \quad (3)$$

其中 θ 为 s - f 坐标系相对于 x - y 坐标系的旋转角, $R(\pm\theta)$ 为旋转变换矩阵。计算表明, 取 $\theta = 45^\circ$ 时有最强的选模能力。同时, 就倍频晶体 KTP 的 II 类相位匹配来说, 其倍频过程相当于每消灭一个基频慢光光子和一个基频快光光子就同时产生一个倍频快光光子。因此在 $\theta = 45^\circ$ 时因基频 s 光和 f 光光强相等, 最有利于倍频。这时 M 由(3)式算得

$$M = \begin{bmatrix} T \cos \delta & -it_2 \sin \delta \\ -it_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

解本征方程 $MA = \zeta A$, 可以得到 M 的两个本征值 $\zeta_{1,2}$, 其平方就是基频光在腔内往返一周时两个偏振方向上的光强透过率(设为 T^*), 可解得

$$T^* = \zeta_{1,2}^2 = \left[\frac{(1+T)\cos\delta \pm \sqrt{(1+T)^2\cos^2\delta - 4T}}{2} \right]^2 \quad (5)$$

相应的损耗(设为 L^*)为

$$L^* = 1 - T^* \quad (6)$$

这一损耗是在不考虑腔内其它损耗而仅由“双折射滤波片”的作用而引入的一种选择性附加损耗。

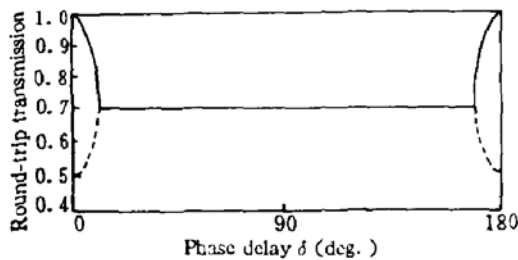


图1 $\theta = 45^\circ, T = 0.71$ 时, 往返透过率关于相位延迟角 δ 的函数曲线。图中实线和虚线分别代表沿 y 和沿 x 方向偏振的基频光的透过率

Fig. 1 Round-trip transmission as a function of phase delay angle while $\theta = 45^\circ$, and $T = 0.71$. Solid line: y polarizing direction; Dashed line: x polarizing direction

由(5)式, 当 δ 为 π 的整数倍时, $T^* = 1$ 或 0.5 , 这分别对应于沿 y 和沿 x 方向偏振的基频光的往返透过率; 随着 δ 相对于 π 整数倍的偏离, 两个偏振方向的 T^* 值趋于一致, 在 $\delta = j\pi \pm 9.76^\circ$ (j 为整数) 时, $T^* = T = 0.71$, 即两个偏振方向上的往返透过率相等且都等于 x 方向上布氏面的光强透过率 T 。从数学上看, (5) 式只有在根号下的值为非零时才是有意义的, 即 δ 取值只有在 $j\pi - 9.76^\circ \leq \delta \leq j\pi + 9.76^\circ$ 时 T^* 才有意义; 当 δ 值在此范围之外时, T^* 实际上保持一恒定值 $T^{[5]}$ 。图1给出了(5)式在一个周期内的函数曲线示意图, δ 中已略去了 π 的整数倍, 实线和虚线分别代表沿 y 和沿 x 方向偏振光的透过率(在 $9.76^\circ \sim 80.24^\circ$ 之间 T^* 对两个偏振方向上的值都是 0.71)。由

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d = \frac{2\pi\nu}{c} \Delta n d = j\pi \quad (j = 0, 1, 2, \dots) \quad (7)$$

可以得到滤波片透过峰(对 y 偏振)的中心频率及两中心频率的间隔分别为

$$\nu_j = \frac{jc}{2\Delta n d} \quad (8)$$

$$\Delta\nu_j = \frac{c}{2\Delta n d} \quad (9)$$

其中 $\Delta n = n_s - n_f = 0.0857$, 是 1064 nm 基频光在 KTP 中 s 和 f 偏振分量的折射率差; $d = 5$ mm 为 KTP 的长度。由(9)式, $\Delta\nu_j = 350$ GHz 已大于 Nd:YAG 的有效增益线宽(约 200 GHz), 因而在此线宽内只可能有一个透过峰, 一般要把此透过峰调到增益中心附近。

本文所述激光器几何腔长约为 20 mm, 相应光学腔长约为 30 mm, 即腔内纵模间隔约为 5 GHz。均匀加宽的激光介质有自选模作用, 但由于空间烧孔效应, 在不加任何选模措施时, 腔内仍有近十个振荡纵模。在引入双折射滤波片的附加损耗后, x 方向的偏振光因附加了较大的损耗而被抑制; 在 y 方向偏振的基频光中, 不同的纵模对应于不同的 δ 。通过调控 KTP 的温度使某一纵模所对应的 δ 为 π 的整数倍时, 由(6)式, 其附加损耗为零, 这就是所要选出的单纵模; 而其它纵模的 δ 都不是 π 的整数倍, 这就引入了一定的附加损耗, 损耗大到一定程度时, 该纵模就被抑制。与中心无损纵模紧邻的纵模是除中心纵模外附加损耗最小的纵模(设与其对应的相位延迟角为 δ_* , 相应的附加损耗为 L_*), 一般以这一纵模与中心透过纵模的附加损耗之差(设为 ΔL^* , 因中心透过纵模的理想附加损耗为零, 故 $\Delta L^* = L_*$) 来描述器件的单纵模选模能力。在前述参数下, 易求得本文激光器的相位延迟 δ 为 $\pi/70$, 将其代入(5)式和(6)式, 得到往返附加损耗 $L_* = 1.2\%$, 这一结果已优于文献[5]~[7]的设计([5], [6]的设计结果分别是 0.38% 和 0.4%; [7]中用 KTP 作波片时最大为 0.69%, 但未报道倍频输出), 这一损耗在中小功率时足以保证激光器的单纵模工作。

以上单纵模的选模都是针对 1064 nm 基频光的, 基频光运行在单纵模的同时, 倍频输出也是单纵模。

3 实验及结果

实验装置如图 2 所示。抽运源为国产连续输出为 1 W 的 LD, 通过控温使其波长稳定在 809 nm 附近。抽运光经 5.6 mm 焦距透镜准直, 棱镜对整形(沿 PN 结方向 4 倍扩束), 再经 22 mm 焦距透镜聚焦后, 最大功率约为 500 mW, 采用纵向抽运方式, 将其会聚到光腔的 TEM_{00} 模体积, 经微调输出镜得到 TEM_{00} 模。

激光谐振腔由 Nd:YAG, KTP 及输出镜组成, 它们均固定在同一钢支架上, 并且 YAG 和 KTP 可由控温系统精密控温。7 mm 长的 YAG 棒一端镀 1064 nm/809 nm 的 HR/AR 介质膜作为平面腔镜; KTP 两面均镀 1064 nm/532 nm 的 AR 膜; 曲率半径为 100 mm 的输出镜镀 1064 nm/532 nm 的 HR/AR 膜。

用自由光谱范围为 4 GHz 的共焦扫描干涉仪观测 532 nm 激光输出的模式, 可以看到 KTP 的温度调控对单纵模的选模极为重要, 只有在腔纵模落在滤波片的透过峰上时, 才能得到稳定的单模运转。另外较大幅度增大或减小功率时, 会出现短期很不稳定的多模工作状态, 这是由腔内温度变化引起的, 随着腔内温度的稳定, 激光输出又会回到稳定的单模状态。图 3

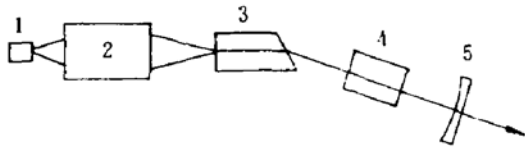


图 2 激光器装置示意图。KTP 的 *s* 轴和 *f* 轴分别与布氏面的偏振方向成 45°角
1; 激光二极管; 2; 光学耦合系统; 3; Nd:YAG; 4; KTP;
5; 输出镜

Fig. 2 Schematic illustration of the experimental setup. The *s* and *f* axes of KTP are oriented at 45° to the polarizing direction of the Brewster surface
1; laser diode; 2; coupling optics; 3; Nd:YAG; 4; KTP;
5; output mirror

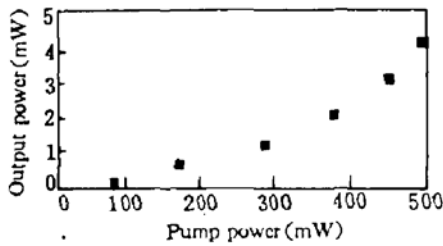


图 4 不同抽运功率下的 532 nm 单频绿光输出功率
Fig. 4 532 nm single-frequency output power versus pump power

mW 的单频绿光输出。

4 结 论

对 LD 抽运单频连续运转的 Nd:YAG 倍频激光器进行了理论和实验研究。Nd:YAG 和 KTP 除用作激光晶体和倍频晶体外,它们的组合又构成了双折射滤波片。用这种简洁有效的方法得到了稳定的 4 mW 单频绿光和约 50 mW 单频红外激光。

致谢 感谢清华大学霍玉晶教授对本工作给予的热情帮助。

参 考 文 献

- 1 A. Arie, S. Schiller, E. K. Gustafson *et al.*, Absolute frequency stabilization of diode-laser-pumped Nd:YAG lasers to hyperfine transitions in molecular iodine. *Opt. Lett.*, 1992, 17(17): 1024~1026
- 2 A. Arie, R. L. Byer, Laser heterodyne spectroscopy of ¹²⁷I₂ hyperfine structure near 532 nm. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, 10(11): 1990~1997
- 3 M. I. Fiekhoff, J. L. Hall, Optical frequency standard at 532 nm. *IEEE Tran. Instrum. Meas.*, 1995, 44(2):

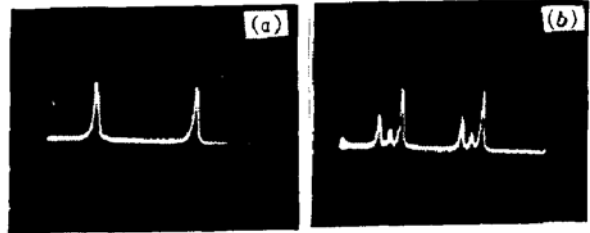


图 3 用自由光谱范围为 4GHz 的扫描共焦干涉仪所测 LD 抽运 Nd:YAG 腔内倍频激光器的光谱照片
(a) 单模; (b) 多模
Fig. 3 Optical spectra of the diode laser-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG laser measured by a scanning confocal interferometer with a 4 GHz free spectral range
(a) single-mode; (b) multi-mode

(a) 和 (b) 分别为单模和多模工作时扫描干涉仪在示波器上的输出照片。

图 4 给出了在不同的抽运光功率下得到的单频连续绿光的输出功率。阈值抽运功率为 90 mW, 在抽运功率最大约为 500 mW 时, 得到 4 mW 单频绿光, 由于镀膜尚不够理想, 同时还得到了约 50 mW 的单频连续红外激光。在消除外界不稳因素使器件保持单模运转时, 其输出的基频和倍频的功率稳定性优于 ±4%。

本激光器所设计的选模能力还有很大潜力没有发挥, 在改善镀膜和提高抽运效率后, 有望达到 10

155~158

- 4 T. Baer. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9): 1175~1180
- 5 T. Y. Fan. Single-axial mode, intracavity doubled Nd:YAG laser. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1991, **QE-27**(9): 2091~2093
- 6 H. Nagai, M. Kume, I. Ohta *et al.*. Low-noise operation of a diode-pumped intracavity doubled Nd:YAG laser using a Brewster plate. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1992, **QE-28**(4): 1164~1168
- 7 沈小华,陈绍和,林尊琪等. 用双折射晶体相位延迟法选纵模的理论分析和实验研究. *光学学报*, 1996, **16**(1): 7~15

Diode Laser-pumped Intracavity Frequency-doubled Nd:YAG Laser of Single-frequency Operation

Cao Hongjun Zhang Xuebin Sun Yimin Shen Naicheng

(National Institute of Metrology Joint Laboratory of Advanced Technology in Measurements, Beijing 100013)

Abstract A diode-pumped, single-frequency, intracavity frequency-doubled CW laser has been demonstrated using a 20 mm cavity consisting of a novel birefringent filter formed by a Brewster angle cut piece of Nd:YAG and a KTP doubling crystal. 4 mW at 532 nm and about 50 mW at 1064 nm single-frequency output powers have been obtained for a 500 mW incident power.

Key words diode laser-pumping, single-frequency, birefringent filter