

激光二极管阵列泵浦的 Nd : BGO 腔内 倍频激光器稳定输出的研究*

李振华 邱文法 范琦康

周复正

(浙江大学光科系, 杭州 310027) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 首次报道激光二极管阵列泵浦的 Nd : BGO 腔内倍频激光器的实验研究结果. 在激光谐振腔内加布儒斯特片与倍频晶体 KTP 形成 Loya 双折射滤光片. 以此进行选模, 获得了 3.5 mW 连续、稳定的单模绿光输出.

关键词 Nd : BGO, 腔内倍频.

1 引 言

Nd : BGO ($\text{Bi}_{(4-x)}\text{Nd}_x\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) 晶体不仅是一种很好的激光材料, 而且也是一种优良的磁光和电光材料. 它的多功能特性可能构成更紧凑、更有效的光电子模块. 预期它在光信息存储、激光陀螺、光纤通信等重要领域中会获得广泛应用. 1992 年周复正等人首次成功地获得了激光二极管阵列泵浦的 Nd : BGO 激光器的激光输出, 并实现了磁光自调 Q^[1].

本文首次报道激光二极管阵列泵浦的腔内倍频激光器的实验研究结果. 对于激光二极管阵列泵浦的腔内倍频激光器, 目前的研究大多集中在 Nd : YAG 激光器上, 并已有大量的文献报道^[2,3]. 这类器件中的一个棘手问题就是由于腔内存在多模振荡, 从而倍频晶体中产生模间的和频, 使输出绿光产生大幅度的波动, 这就是所谓的“绿光问题”. 作者在以 Nd : BGO 为激光介质的 KTP 腔内倍频实验中也观察到这种起伏, 其输出呈混沌态. 腔内加标准具选模或加 $\lambda/4$ 波长实现偏振控制^[4], 在激光晶体 (Nd : YAG) 上加压力产生应力双折射以构成等价波片^[5]方法, 已被用解决这一问题, 但在效率和稳定性方向^[6]不令人满意, 本文采用腔内插入布儒斯特片与 KTP 晶体一起构成 Loya 双折射滤光片的方法, 成功地实现了单模振荡, 消除了绿光输出的波动. 在泵浦功率为 500 mW 时, 获得了稳定的 3.5 mW 的绿光输出.

2 Loya 滤色片选模机理及计算

Nd : BGO 腔内倍频激光器的结构如图 3 所示. 假设布儒斯特片的 p 偏振分量方向与 KTP 晶体的快轴夹角为 θ , 以 A 处作为参考面的位置, 则腔内往返的琼斯矩阵 M 可写为:

* 浙江省自然科学基金资助项目.

收稿日期: 1993 年 12 月 2 日; 收到修改稿日期: 1994 年 3 月 1 日

$$M = BR(\theta)c(\delta/2)c(\delta/2)R(-\theta)B, \quad (1)$$

式中 B 为布儒斯特片的琼斯矩阵:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q^2 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 $q = 2n/(n^2 + 1)$, n 为布儒斯特片的折射率。(1) 式中的 $R(\theta)$ 为旋转矩阵:

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (3)$$

$\theta = 2n/(n^2 + 1)$, n 为布儒斯特片的折射率。(1) 式中的 $R(\theta)$ 为旋转矩阵:

$$c(\delta/2) = \begin{pmatrix} e^{i\delta/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\delta/2} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

式中 δ 为基波光在 KTP 晶体中 o 光与 e 光的相对相位差:

$$\delta = 2\pi\Delta nL_{KTP}/\lambda, \quad (5)$$

式中 L_{KTP} 为 KTP 晶体在通光方向上的长度。 λ 为激光基波波长 ($1.06 \mu\text{m}$)。 Δn 为 o 光和 e 光的折射率差。对于 KTP 晶体, $\Delta n = 0.0865$ 。将 (2)~(4) 式代入 (1) 式可得:

$$M = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta e^{i\delta} + \sin^2 \theta e^{-i\delta} & q^2 \sin \theta \cos \theta (e^{i\delta} - e^{-i\delta}) \\ q^2 \sin \theta \cos \theta (e^{i\delta} - e^{-i\delta}) & q^4 (e^{i\delta} \sin^2 \theta + e^{-i\delta} \cos^2 \theta) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

当 $\theta = 45^\circ$ 时, 倍频效率最高, 此时:

$$M = \begin{pmatrix} \cos \delta & i\theta^2 \sin \delta \\ iq^2 \sin \delta & q^4 \cos \delta \end{pmatrix}, \quad (7)$$

M 的特征值可写为:

$$K_{1,2} = \frac{(1 + q^4)\cos \delta \pm \sqrt{(1 + q^4)^2 \cos^2 \delta - 4q^4}}{2}. \quad (8)$$

对于特征值 $K_{1,2}$ 相对应的本征偏振态, 由布儒斯特片新引入的损耗为:

$$\alpha_{1,2} = 1 - |K_{1,2}|^2. \quad (9)$$

因此, 同一纵模分裂为两个偏振态: 其中一个偏振方向接近布儒斯特片的 p 方向, 另一偏振方向接近 s 方向; 前者损耗低, 后者损耗高。当 (8) 式中根号内的数值为零时, $K_1 = K_2$, 即 $\alpha_1 = \alpha_2 = 1 - q^4$ 。此后随 δ 增大, 损耗 $\alpha_{1,2}$ 保持不变, 如图 1 所示。

通常激光器振荡在接近 p 方向的本征偏振态, 这是因为此偏振态的损耗低于近 s 方向的本征态 (见图 1)。当 δ 为 π 的整数倍时, 对于 p 方本征偏振态, Lott 双折射滤光片引入的损耗为零。因此, 满足 δ 为 π 整数的腔模最优先振荡。相邻腔模不能满足此条件, 从而抑制了其振荡。这就是 Lott 滤光片的选模作用。激光谐振腔的纵模间隔 $\Delta\nu = c/2L$ (L 为腔长), 因此两相邻纵

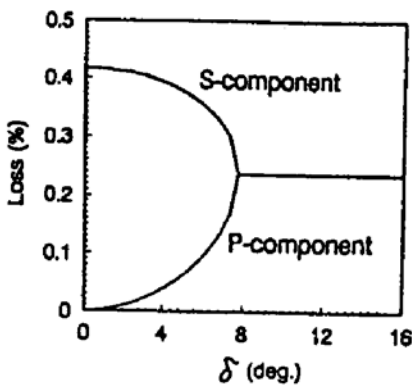


Fig. 1 Roundtrip losses of s and p eigenstates plotted as functions of the retardation angle δ

模 δ_i 的差 $\Delta\delta_i$ 为:

$$\Delta\delta_i = \pi\Delta nL_{KTP}/L. \quad (10)$$

由 $\Delta\delta_1$ 可计算相邻纵模的损耗差 $\delta\alpha_1$ 。图 2 给出了在一定 $\Delta\delta_1$ 值下, $\Delta\alpha_1$ 随布儒斯特片折射率 n 的变化关系曲线。计算时取实验值 $L_{KTP} = 5 \text{ mm}$, $L = 34 \text{ mm}$, 对应的 $\Delta\delta_1 = 2.29^\circ$ 。当 $n = 1.2222$ 时, $\delta\alpha_1$ 取得最大值, 选模效果最佳。在实验中选折射率较低 ($n = 1.45$) 熔石英作布儒斯特片。 $\Delta\alpha_1 \approx 1.2\%$ 。在一定增益下可以达到单模运转。

Loyt 滤光片引入损耗为零的两个相邻纵模的频率间隔 $\Delta\nu_F$ 可由条件 $\Delta\delta = \pi$ 得到:

$$\Delta\nu_F = \frac{c}{2\Delta n L_{KTP}} \quad (11)$$

当 $L_{KTP} = 5 \text{ mm}$ 时, $\Delta\nu_F = 347 \text{ GHz}$, 远大于 Nd : BGO 的增益线宽。

3 实验结果

激光二极管阵列端面泵浦的 Nd : BGO 激光器腔内倍频实验装置如图 3 所示。

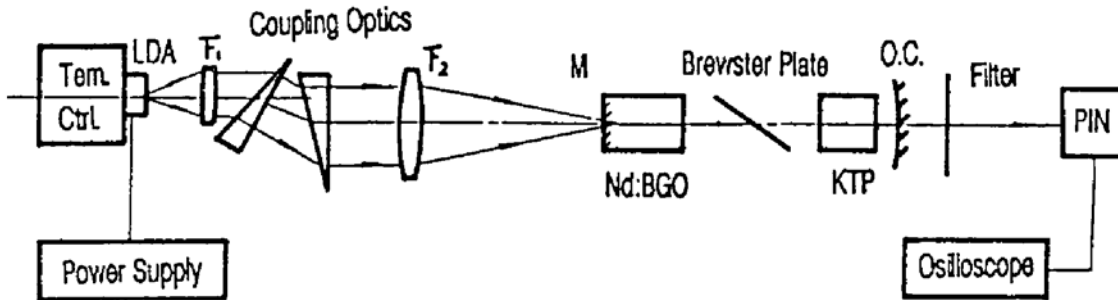


Fig. 3 Experimental set up of LDA pumped intracavity doubled Nd : BGO laser with Loyt filter

作泵浦源的半导体激光器是中国科学院北京半导体所提供的, 其发光结面为 $280 \times 1 \mu\text{m}^2$ 。发射波长通过温控使之落在 Nd : BGO 晶体吸收峰 805 nm 附近。用焦长 $f_1 = 8 \text{ mm}$ 的非球面透镜将半导体激光束准直为近平行光束。然后用焦长 $f_2 = 32 \text{ mm}$ 的透镜将此光束聚焦到 Nd : BGO 晶体前端面上。为了使此聚焦光斑接近圆形, 在两透镜之间加一对扩束棱镜, 扩束比为 4。整个泵浦光光学耦合系统的效率大于 80% 。Nd : BGO 晶体两端面皆为平面。其前端面镀 $1.06 \mu\text{m}$ 的全反膜, 对 805 nm 的泵浦光透过率大于 70% ; 后端面镀 $1.064 \mu\text{m}$ 的增透膜。Nd : BGO 晶体的尺寸为 $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}^3$ 倍频晶体 KTP 的长度为 5 mm 。两面都镀 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $0.532 \mu\text{m}$ 的增透膜, 插入损耗小于 0.5% 。布儒斯特片的材料为熔石英, 厚度为 0.5 mm 。激光器的输出耦合镜镀 $1.064 \mu\text{m}$ 的全反膜, 对 $0.532 \mu\text{m}$ 的透过率 $T = 90\%$ 。其曲率半径 $R = 100 \text{ mm}$ 。输出 $0.532 \mu\text{m}$ 波长的绿光经滤色片后由 PIN 管接收, 用示波器监视。整个激光器的几何长度为 25 mm , 相应的光学长度 $L = 34 \text{ mm}$ 。经计算, 激光器基模的束腰半径为 $116 \mu\text{m}$ 。根据实验中实际所用的谐振腔参数可以算得振荡模与相邻纵模由于 Loyt 滤光片所引入的损耗差 $\Delta\alpha_1 = 1.2\%$, 再下一级的纵模与振荡模的损耗差 $\Delta\alpha_2 = 5.1\%$, 获得了稳定的

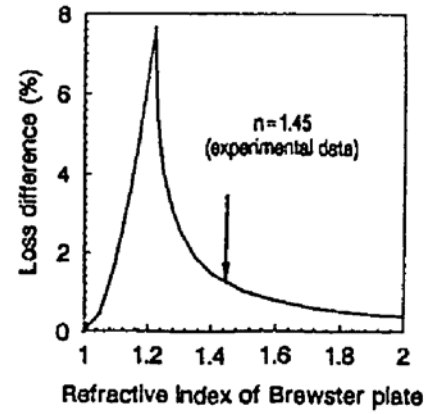


Fig. 2 Loss difference $\Delta\alpha_1$ ($\Delta\delta = 2.29^\circ$) plotted as a function of the Brewster plate refractive index n

单模运转。

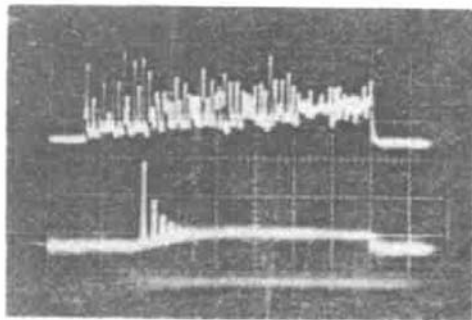


Fig. 4 Output waveforms of LDA pumped Nd : BGO laser with pulsed operation; Upper-without Brewster plate in the laser cavity; Lower- A Brewster plate inserted in the laser cavity

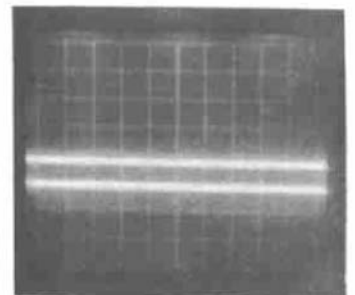
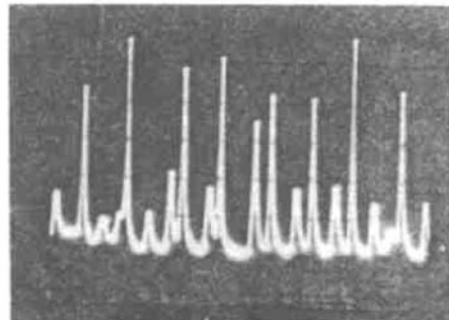


Fig. 5 Output waveforms of LDA pumped CW intracavity doubled Nd : BGO laser; (a) without Brewster plate in the laser cavity; (b) A Brewster plate inserted in the laser cavity (20 $\mu\text{s}/\text{div}$)

图 4 为泵浦功率 300 mW、泵浦脉冲宽度 400 μs 、重复率 100 Hz 工作条件下, Nd : BGO 腔内倍频激光器 0.532 μm 的输出波形,上部为腔内不加布儒斯特片时的波形,由于多模振荡及各模间的混频产生和频,使得输出呈现不规则的弛豫振荡;下部的波形是在插入布儒斯特片,与 KTP 晶体一起构成 Loya 滤光片的情况下得到的。这是典型的单纵模运转状态的波形:矩形泵浦脉冲加上后,开始呈指数衰减的振荡,然后达到稳态,输出功率保持不变。图 5(a)和(b)分别为连续泵浦时不加布儒斯特片及加布儒斯特片的输出倍频光波形。图 5 的波形可看出,无选模措施时,倍频光输出随时间有大幅度的起伏。起伏频率约几十千赫呈现出混沌态的特征,这与先前文献[2,5]报道的 Nd : YAG 腔内倍频激光器结果一样。当腔内加入布儒斯特片后,激光器单模运转,获得稳定的倍频光输出(见图 5)。图 6 为激光器连续运转时,单模倍频光输出功率随泵浦功率变化的关系曲线。阈值功率约为 80 mW。在泵浦功率 500 mW 时,得到 3.5 mW 左右的倍频光输出。

总 结 本文首次报道了激光二极管泵浦的 Nd : BGO 腔内倍频激光器的实验结果。给出了利用腔内加布儒斯特片与 KTP 倍频晶体组合形成 Loya 滤光片进行选模的理论分析与计算结果,实验获得了 3.5 mW 稳定的单模倍频光(0.532 μm)输出,器件结构简单、紧凑,选模元件引入的损耗低预期在光信息存储、相干光通信等领域中得到应用。

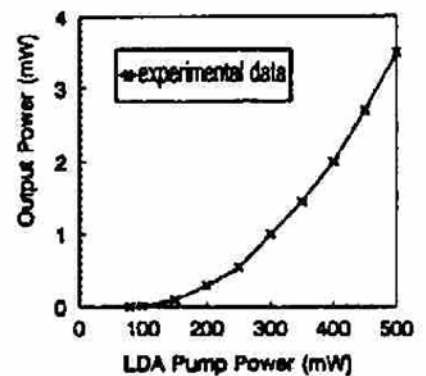


Fig. 6 Output power at 0.53 μm against the LDA incident pumping power

参 考 文 献

- [1] Fuzheng Zhou, Xiqi Feng, Jianwei Ma *et al.*, Diode laser pumped Nd : BGO laser. *CLEO' 93, Paper CPE7* : 592
- [2] T. Baer, Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd : YAG lasers. *J. Opt. Soc. Amer. (B)* . , 1986, 3(9) : 1175~1180
- [3] J. T. Lin, Progress report: diode pumping and frequency conversion. *Lasers & Optronics* , 1989, 8(7) : 61~66
- [4] M. Oka, S. Kubota, Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd : YAG laser. *Opt. Lett.* . , 1988, 13(13) : 805~807
- [5] G. E. James, E. M. Harrell I, C. Bracikowski *et al.* , Elimination of chaos in an intracavity-doubled Nd : YAG laser. *Opt. Lett.* . , 1990, 15(20) : 1141~1143
- [6] D. W. Anthon, D. L. Sipes, T. J. Pier *et al.* , Intracavity doubling of cw diode-pumped Nd : YAG lasers with KTP. *IEEE J. Quant. Electron.* . , 1992, QE-28(4) : 1148~1157
- [7] 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. Electron.* . , 1992, QE-28(4) : 1164~1168

A LDA-Pumped Intracavity Doubled Nd : BGO Laser with Stable Output

Li Zhenhua Qiu Wenfa Fan Qikang

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Zhou Fuzheng Hu Wentao

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 2 December 1993; revised 1 March 1994)

Abstract Experimental results of a laser diode array (LDA)-pumped intracavity doubled Nd : BGO laser are reported in this paper for the first time. By use of a intracavity Lopt filter formed with a Brewster plate and a birefringent KTP crystal, we obtained 3.5 mW stable, single-longitudinal-mode green output at 500 mW LDA pumping power.

Key words Nd : BGO, intracavity doubling.