

# 激光二极管泵浦的 $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$ 内腔倍频激光器的稳态、反相态及混沌态输出研究\*

李振华\*\* 鲍国君 杨平勇\*\*\* 陆祖康

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027 \*\* 南京理工大学应用物理系, 南京 210014)

**提要** 报道了激光二极管泵浦、内腔倍频、各向异性晶体  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$  激光器的输出特性, 包括稳态、反相态以及混沌态研究结果, 并根据理论模型对这些运转状态进行数值分析, 理论计算与实验结果十分吻合。

**关键词** 内腔倍频,  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$ , 反相态

## 1 引言

内腔倍频是目前激光二极管泵浦的固体激光器产生蓝、绿光输出的最常用方法。由于腔内基波光的功率密度很高, 将倍频晶体置于腔内容易实现高的谐波转换效率, 因此尤其适合于连续运转中小功率激光器的倍频过程。在这类器件中有一个倍受人们关注的“绿光问题”<sup>[1]</sup>, 即激光器在多纵模连续运转时, 由于模间和频的产生和交叉饱和效应两种非线性过程的共同作用, 使其输出激光强度随时间发生大幅度无规波动, 表现出混沌运动的特征。1986年 T. Baer 根据激光二极管泵浦  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$  激光器内腔倍频的实验结果首先建立了一个简单的数学模型<sup>[1]</sup>, 表明输出波动是腔内倍频动力学过程的一个基本特征; 后来经 Oka 和 Kabota 引入“偏振模”概念, 使研究得到了进一步的发展<sup>[2]</sup>。1990年 James 和 Roy 等对多模振荡条件下的腔内二次谐波产生过程作了较详细的分析<sup>[3]</sup>, 指出了产生输出波动并进而形成混沌的原因。但他们对实验中的一些问题, 如强度概率分布的精细结构、波形形状等都未能得出结论, 需要进一步的理论和实验研究。

通过对基本动力学方程的数值模拟或直接实验观察, 还能得到一种很特别的激光输出状态, 即所谓的“反相态”。反相态首先被预言存在于 Josephson 结中<sup>[4]</sup>, 后来由 C. Bracicowski 等人在内腔倍频、多模振荡的  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$  激光器中观察到。但由于 YAG 是各向同性的晶体, 在这种激光器中同时存在两个互相垂直的本征偏振方向, 这给研究带来了额外复杂性<sup>[5]</sup>。

反相态是这样一种状态, 它在时域上是严格周期性的, 每个谐振子和它们的合成具有相同的周期, 但每个谐振子之间岔开  $1/N$  个周期, 这里假设有  $N$  个谐振子, 即

\* 浙江省自然科学基金和博士点基金资助项目。

\*\* \* 现工作在北大方正杭州分公司。

收稿日期: 1995年11月16日; 收到修改稿日期: 1996年1月25日

$$\varphi_k(t) = \varphi_0(t + Tk/N) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

其中  $\varphi_0$  是周期为  $T$  的函数。

所有上述研究都是集中在各向同性的激光介质中, 本文报道在二极管激光器泵浦的  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$  (偏振激发) 内腔倍频激光器中的稳态、反相态及混沌态输出的研究结果。  $\text{Nd} : \text{YVO}_4$  激光器是 DPL 研究领域继  $\text{Nd} : \text{YAG}$ ,  $\text{Nd} : \text{YLF}$  之后又一研究热点。相干光谱激光公司新近研制的  $\text{Nd} : \text{YVO}_4$  激光器, 在 532 nm 处输出 1.5 W 绿光, 通过基波和谐波的差频, 获得重复频率为 20 kHz、平均功率 650 mW、输出波长 355 nm 的调 Q 紫外脉冲输出<sup>[6]</sup>。  $\text{Nd} : \text{YVO}_4$  是高重复率、短调 Q 脉冲、高平均功率激光器的首选增益介质。

## 2 $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ 内腔倍频激光器的动力学理论模型

激光器在多纵模运转时, 腔内倍频晶体中产生的二次谐波, 包括每个振荡纵模的倍频光和不同纵模间的和频光, 对腔内振荡的基波而言, 相当于一个非线性损耗。根据多模运转的速率方程理论和描述腔内二次谐波转换过程的基本方程, 得到描述内腔倍频激光器的基本动力学模型<sup>[3]</sup>:

$$\tau_c \frac{dI_k}{dt} = (G_k - \delta_k - g f \varepsilon I_k - 2 f \varepsilon \sum_{j \neq k} \eta_{kj} I_j) I_k \quad (2)$$

$$\tau_f \frac{dG_k}{dt} = G_{0k} - (1 + \beta I_k + \sum_{j \neq k} \beta_{kj} I_j) G_k \quad (3)$$

假设有  $M$  个纵模同时起振, 腔内总的基波和谐波归一化强度  $I_f$  和  $I_d$  分别为:

$$I_f = \sum_{k=1}^M I_k \quad (4)$$

$$I_d = f \varepsilon (g \sum_{k=1}^M I_k^2 + 4 \sum_{j,k=1, j>k}^M \eta_{kj} I_k I_j) \quad (5)$$

其中,  $\tau_f$  和  $\tau_c$  分别为增益介质的荧光寿命和光子在腔内往返一周的渡越时间,  $I_k(t)$  和  $I_j(t)$  分别为第  $k, j$  个纵模经  $S$  归一化后的光强,  $G_{0k}$  为第  $k$  个纵模的小信号增益系数,  $G_k$  为相应纵模的瞬态增益系数,  $\delta_k$  为第  $k$  个纵模的往返损耗,  $g$  为一个纯几何参量, 它取决于  $\text{Nd} : \text{YVO}_4$  晶体的快轴和 KTP 快轴的夹角及其各自  $o, e$  光的相位延迟, 且  $0 \leq g \leq 1$ 。若第  $k$  个纵模的偏振方向与第  $j$  个纵模平行, 系数  $\eta_{kj} = g$ , 若垂直, 则  $\eta_{kj} = 1 - g$ , 这意味着两平行纵模间的和频系数一般不等于两互相垂直纵模间的情况;  $S_k = h\nu_s / \sigma_s \tau_f$ , 为饱和光强,  $\beta$  为自饱和系数,  $\beta_{kj}$  为第  $k$  个纵模和第  $j$  个纵模的交叉饱和系数, 它是在一定反转粒子数密度条件下模竞争强弱程度的度量, 两个模在激光介质中的重叠区域越大,  $\beta_{kj}$  越大, 交叉饱和作用也越强。  $f$  是激光介质内的基波光斑尺寸与倍频晶体中光斑尺寸之比,  $f = w_s^2 / w_c^2$ , 其中  $w_s$  和  $w_c$  分别为激活介质和倍频晶体内的场模半径, 通过适当的腔形设计, 以增大  $f$  可提高非线性耦合效率。参量  $\varepsilon$  和有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  有关系<sup>[7]</sup>:

$$\varepsilon = \frac{8\pi^2 L_{\text{eff}}^2 d_{\text{eff}}^2}{n_1 n_2 n_3 \lambda_1^2 \varepsilon_0 C} \quad (6)$$

对于  $\text{Nd} : \text{YVO}_4$ , 所有振荡模的本征偏振方向皆为  $\pi$  偏振, 都是互相平行的, 即在所有理论模拟过程中, 系数  $\eta_{kj} = g$ 。

利用上述的动力学方程, 再结合实验中的具体条件, 就可以通过数值解法从理论上分析内

腔倍频的动力学过程,并给出一定实验条件下的数值模拟结果。

图 1 示出了在不同非线性耦合系数条件下,激光腔内有两个纵模起振时,利用四阶龙格-库塔法解方程(1)和(2)的数值计算结果。

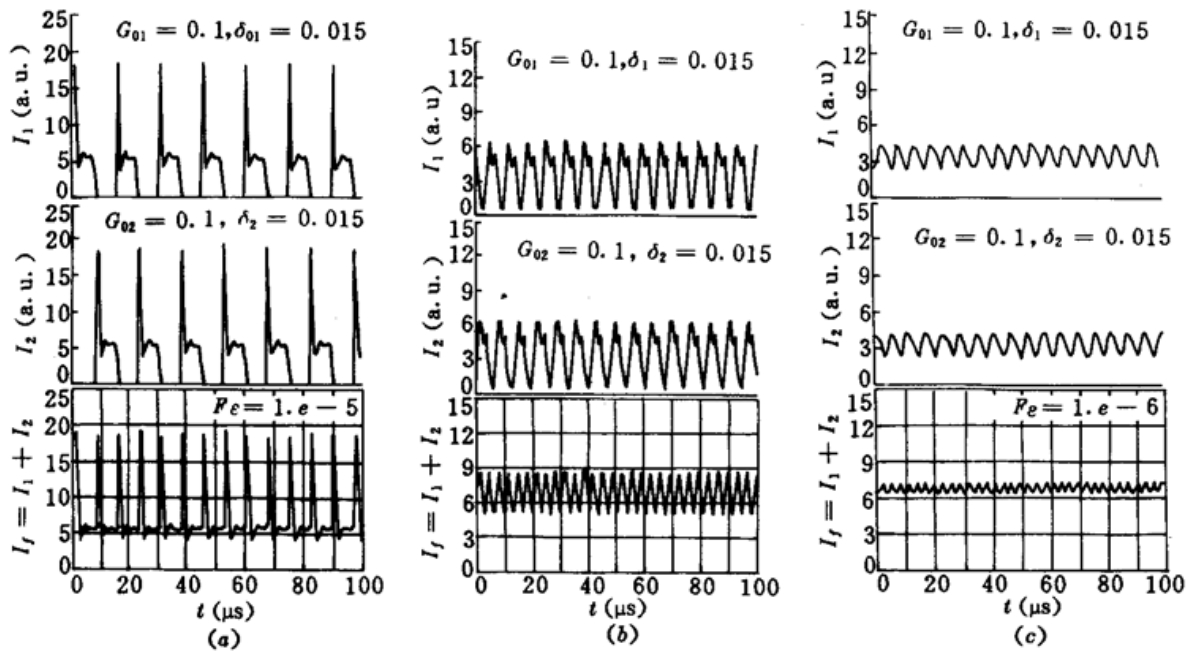


Fig. 1 Simulated time traces of the fundamental waves under the assumption of two axial modes oscillating simultaneously

计算时,已将方程中两纵模光强  $I_1, I_2$  对饱和光强  $S$  归一化。方程中各参量的取值,  $G_{01} = G_{02} = 0.1, \delta_1 = \delta_2 = 0.015$ ; 其各起振纵模具有相同的偏振方向,  $\eta_{12} = \eta_{21} = g = 1$ , 自饱和系数  $\beta = 1$ , 针对实验中半外腔结构的情况,交叉饱和系数  $\beta_{12} = \beta_{21} = 0.6667$ , 光子在腔内往返的渡越时间  $\tau_c = 2 \times 10^{-4} \mu\text{s}$ ;  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$  荧光寿命  $\tau_f = 90 \mu\text{s}$ 。

由图 1 的三幅数值模拟图可以看出,在其他条件一定时,非线性耦合系数的大小对激光器的运转状态影响十分显著。当  $f_e = 5 \times 10^{-5}$  时,两偏振模间的非线性耦合作用较强,腔内光强随时间呈现出大幅度周期性起伏,对每一个纵模而言,由于阻尼较强,在出现强度极大值后,有一相对较长的平台。当非线性耦合系数减小到  $f_e = 1 \times 10^{-5}$  时,起伏幅度较小,周期变短。进一步减小非线性耦合系数到  $1 \times 10^{-6}$ ,腔内光强的起伏变得十分微弱,当非线性耦合系数等于零时,在连续泵浦下,理论模型给出了多模运转状态下的稳态解,对应于实验中在不加倍频晶体时,激光器得到十分稳定的输出。

由上述结果可知,在内腔倍频激光器中,振荡模间的非线性耦合作用包括交叉饱和效应和二次谐波产生两个过程。值得指出的是,当理论模型中仅包含交叉饱和作用项时,并不会导致腔内光强的起伏。内腔倍频激光器各振荡纵模和频产生和由空间烧孔效应引起的各纵模交叉饱和两个非线性过程的联合作用,是导致光能在各个纵模间不断转换,产生输出波动并进而形成光学混沌的根本原因。

### 3 实验研究

LDA 端面泵浦  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$  内腔倍频激光器的实验中所用泵浦源为国产的连续输出 500

mW 的量子阱二极管激光器,采用端面泵浦方式,增益介质为 1 mm 厚的  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$  晶体,两端面均为平面,其泵浦光入射面对 808 nm 高透,对 1064 nm 及 532 nm 均为高反;另一端面对基波和二次谐波均增透。输出腔镜对 1064 nm 全反,同时对 532 nm 高透,其曲率半径为 50 mm;倍频晶体 KTP 的厚度为 5 mm,两端面镀基波和谐波的增透膜,插入损耗小于 0.5%,谐振腔的几何长度为 20 mm。输出激光用 PIN 管接收,并用 Tektronix 485 示波器监视其变化过程。调节泵浦光焦点在介质中的位置和 KTP 晶体在腔内的位置及其  $\theta$  角,此外还可以调节输出腔镜的倾角及倍频晶体绕光轴的转角,我们分别观察到稳态、周期性波动及混沌态的激光输出波形。图 2 ~ 5 示出了记录到的实验波形及根据相应实验条件进行的数值模拟结果。其中,图 3 的理论模拟曲线见图 1(b)。

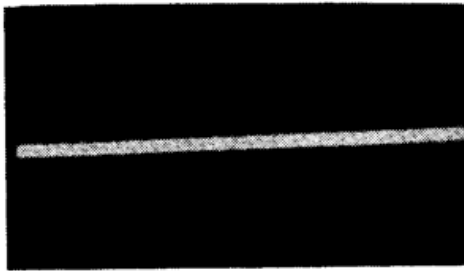


Fig. 2 Oscilloscope of stable laser output

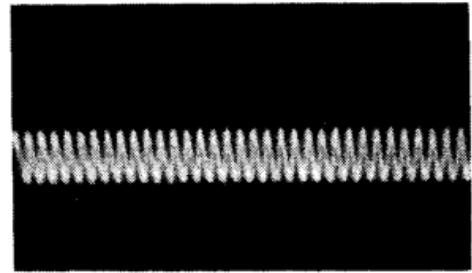


Fig. 3 Photograph of antiphase state laser output and its theoretical simulation

考虑到  $\text{Nd}^{3+} : \text{YVO}_4$  晶体是偏振吸收及偏振激发的,在我们的数值模拟中,设有两个互相平行的纵模同时起振,而当该偏振方向和 KTP 晶体的快轴成  $45^\circ$  时,二次谐波的转换效率最高,而改变这个角度,就可以方便地改变谐波转换系数。

图 2 为激光器的稳态输出波形。在基本动力学方程(1), (2)中,若第  $j$  和  $k$  个纵模的偏振方向平行,如前所述,  $\eta_{kj} = g$ , 对于参数  $g$  的特定取值范围,可以从多模振荡方程组得到稳态解。James<sup>[4]</sup> 在  $\text{Nd}^{3+} : \text{YAG}$  内腔倍频激光器中消除输出波动的方法就是基于这个原理。

图 3, 4(a) 和 5(a) 分别为在不同实验条件下得到的反相态输出波形(所有照片均为  $10 \mu\text{s}/\text{div}$ ), 图 1(b) 及图 4, 5 的 (b) 图分别为它们相应的数值模拟曲线。

在数值计算时,设腔内有两个纵模起振,它们各自的输出光强的时域特性曲线分别是  $I_1$  和  $I_2$ , 而探测器接收到的信号是这两个光强的叠加,即  $I_f = I_1 + I_2$ 。

图 4 中理论计算的参数取值: 两纵模的往返腔耗  $\delta_1 = 0.015$ ,  $\delta_2 = 0.0165$ ; 小信号增益系数  $G_{01} = G_{02} = 0.1$ , 相当于实验中超阈值倍数约为 7 倍的泵浦条件; 非线性耦合系数  $f_\varepsilon = 1 \times 10^{-5}$ 。通过适当调节倍频晶体 KTP 的方位及输出耦合腔镜,即获得如图 5 的激光波形,相应的计算参数为  $f_\varepsilon = 2 \times 10^{-5}$ ,  $\delta_1 = 0.015$  和  $\delta_2 = 0.017$ ,  $G_{01} = G_{02} = 0.04$ 。在图 4, 5 的计算中,方程其他参数的取值同前述理论分析部分。

从这三幅反相态的波形中可以清楚地看出输出波动频率与非线性耦合系数及泵浦功率间的内在关系: 即波动频率随泵浦功率的增加而增大,随非线性耦合系数的增大而减小,相应于图 3, 4(a) 的波动频率要大于图 5(a) 的情况。

进一步提高泵浦功率,则腔内将会有多于两个纵模起振。在所有的数值模拟中,都假设几何参量  $g = 1$ , 实际上这是一个非常特殊的情况,如前所述,  $g$  取决于激光在两块晶体中的位相延迟及其相对角度取向,可能取 0 至 1 中的任意一个值,所以在一定条件下,其输出呈混沌态。

同时,这又不影响前面的所有讨论,因为  $g$  总是和  $f$  同时出现的, $g$  的变化可以归结到非线性耦合系数中去。

对照图 3 ~ 5 的实验照片和相应的理论模拟曲线,可见两者极为相似,说明理论模型很好地解释了所观察到的实验现象。

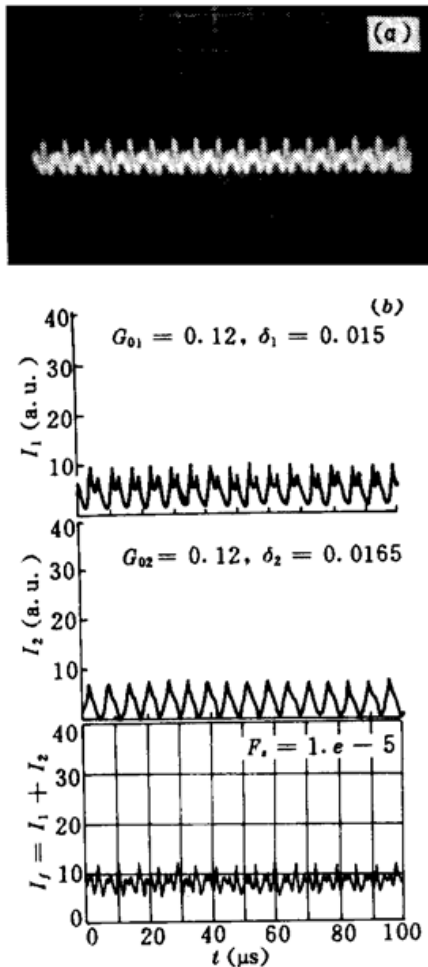


Fig. 4 Experimental waveform of antiphase state and the calculated results

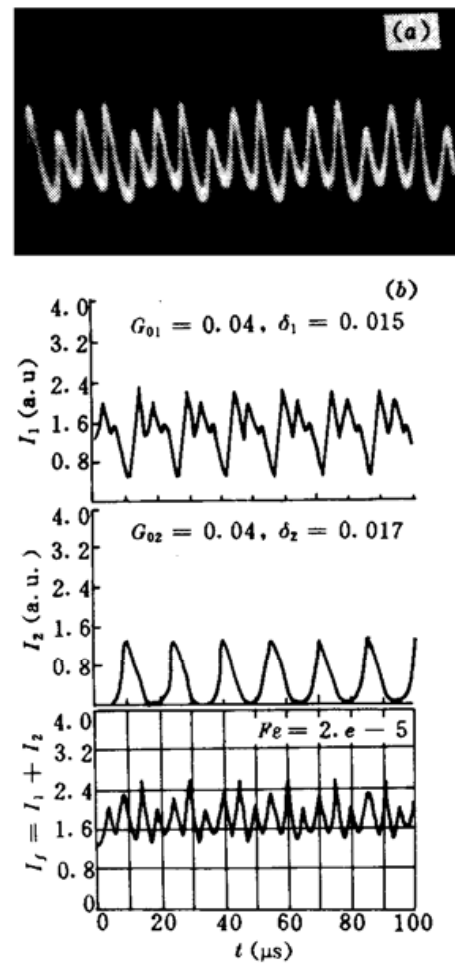


Fig. 5 Antiphase laser output and its theoretical prediction

由于 LD 做泵浦源所特有的稳定性,使得各种复杂现象的观察和研究变得相当便利,因此腔内倍频的 DPL 器件将在激光的非线性过程研究中发挥很大作用。

在反相态激光中,由于每个模式的频率都不同,因此反相态犹如各振荡频率间的一个同步开关。假如激光的动力学过程可以控制,使得各独立反相态可以切换,那么反相态激光就能成为一种十分有用且方便的波长和时间耦合的信号源。

致谢 中国科学院上海光机所的胡文涛博士和李传东博士提供了相应的实验设备,并进行了有效的探讨,作者在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 T. M. Baer. Large amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd : YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, 3 : 1175
- 2 M. Oka, S. Kubota. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd : YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1988, 13 : 805

- 3 G. E. James, *et al.*. Intermittency and chaos in intracavity-doubled lasers, I. *Phys. Rev. A*, 1990, 41 : 2778
- 4 P. Hadley, M. R. Beasley. Dynamical states and stability of linear arrays of Josephson junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, 50 : 621
- 5 C. Bracikowski, R. Roy. Chaos in a multimode solid-state laser system. *CHIAOS*, 1991, 1 : 49
- 6 W. L. Nighan Jr.. Diode bar pump solid-state crystal to high power. *Laser Focus World*, 1995, (5) : 97
- 7 范琦康, 吴存恺, 毛少卿. 非线性光学. 南京: 江苏科学技术出版社, 1989. 68

## The Stable, Antiphase and Chaotic Laser Output of a Diode-pumped Intracavity-frequency-doubled Nd : YVO<sub>4</sub> Laser

Li Zhenhua\* Bao Guojun Yang Pingyong Lu Zukang

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210014;  
State Key Lab. of Modern Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

**Abstract** The operation characteristics of a diode-pumped intracavity-frequency-doubled Nd : YVO<sub>4</sub> laser are reported. The stable, antiphase and chaotic laser output is observed. The results of theoretical simulation agree very well with the observed phenomena.

**Key words** intracavity-frequency-doubling, Nd : YVO<sub>4</sub> laser, antiphase state