

氩灯泵浦腔内倍频 Nd·YAG 激光器的 混沌观察与混沌消除

任建华*

(北京理工大学 北京 100081)

沈 柯

(长春光机学院 长春 130022)

提要 在分析了半导体激光泵浦与氩灯泵浦激光器各自特点的基础上,提出了在氩灯泵浦腔内倍频 Nd·YAG 激光器上进行不稳定性和混沌研究以及探索混沌消除方法的设想。给出了理论分析和实验装置,实验测量得到了混沌激光辐射和功率谱,数值分析给出相应的时间行为和相空间吸引子。当在腔内引入 Nd·YAG 色心调制晶体后,实验上得到了稳定的周期输出,从而实现了混沌的消除。

关键词 氩灯泵浦,腔内倍频,混沌,混沌消除

1 引 言

高灵敏度的光电检测需要高稳定性的激光光源,消除和控制激光器的混沌是近年来人们关注的焦点之一。“绿光问题”已在半导体激光泵浦的固体激光器中得到了广泛深入的研究^[1-3],相应地找到了消除和控制混沌的方法^[4]。半导体泵浦技术虽然克服了灯泵浦所带来的许多缺点^[5],但它的输出功率较低,导致了应用的局限性,特别在某些功率较高的光电检测中依然使用氩灯泵浦腔内倍频 Nd·YAG 激光器^[6,7],对这种灯泵激光器中的“绿光问题”至今尚未得到研究。我们试图把在半导体泵浦腔内倍频激光器中的研究手段移植于灯泵浦激光器上,以便找到相应的消除和控制混沌的方法。由于灯泵浦 Nd·YAG 激光器受许多随机因素的影响,其输出极不稳定,所以对其进行上述内容的研究就显得更有意义。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示, Nd·YAG 棒和 Nd·YAG 色心晶体的尺寸分别为 $\phi 6 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$ 和 $\phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 全反射镜 M_1 和输出反射镜 M_2 的反射率分别为 99.9%, 93%, 腔长 $L = 700 \text{ mm}$ 。可变光阑尺寸为 $\phi 1.5 \sim 6 \text{ mm}$, 尺寸分别为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 和 $\phi 20 \text{ mm} \times 0.45 \text{ mm}$ 的 KTP 晶体和 $\lambda/4$ 波片 ($1.064 \mu\text{m}$) 以及厚度 $d = 5 \text{ mm}$ 的标准具依次排列于光阑之后。由 M_2 输出的激光经截止滤光片 ($1.064 \mu\text{m}$) 分别送入 PIN 光电探测器 1 ($< 1 \text{ ns}$) 和热耦探测器 2, 以便观测信号的时间行为、频谱和输出功率。

* 通信地址: 长春光机学院光学混沌实验室, 邮政编码: 130022。

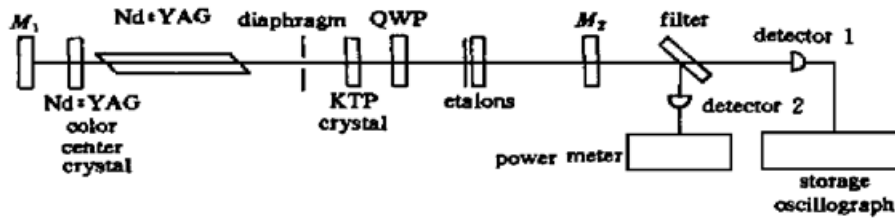


图 1 氪灯泵浦腔内倍频 Nd·YAG 激光器混沌消除实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus used to investigate the chaotic elimination of the intracavity frequency-doubled Nd·YAG laser pumped by krypton flashlamps

3 理论分析

对于 N 个纵模运转的腔内倍频激光器而言,系统的运动可采用速率方程近似下的光强 I 和反转粒子数 Δ 的 Baer 方程组来描述^[1],若将 $\lambda/4$ 波片(QWP)引入腔内,可将 Baer 方程写为^[3]

$$\tau_c \frac{dI_j}{dt} = [\Delta_j - \xi_j - g\eta I_j - 2\eta(1-g) \sum_{k=1, k \neq j}^N I_k] I_j \quad (1)$$

$$\tau_f \frac{d\Delta_j}{dt} = \Delta_j^0 - \Delta_j (1 + \beta_j I_j + \sum_{k=1, k \neq j}^N \beta_{jk} I_k) \quad (2)$$

这里 $j = 1, 2, \dots, N$, τ_c 和 τ_f 分别为光子寿命和荧光寿命, Δ_j^0 和 ξ_j 分别为第 j 个模的小信号增益和损耗, β_j 和 β_{jk} 分别为自饱和与互饱和参数, η 为非线性耦合常数。 g 为倍频系数,当 KTP 晶体中的非寻常光偏振方向与 $\lambda/4$ 波片快轴方向的夹角 $\Psi = \pi/4$ 时, $g = 1$, 只有倍频作用;而 $\Psi = 0$ 或 $\pi/2$ 时, $g = 0$, 偏振模以和频过程实现耦合,这种耦合实际上增大了模式相互间的损耗,进而构成了系统的不稳定性导致混沌的出现^[1]。

当加入 Nd·YAG 色心调制晶体后,系统在色心晶体的饱和吸收调制作用下,对于能够振荡的模式而言应满足 $I_k/I_j = \alpha_{kj}$, 由吸收体方程

$$\alpha_j = \alpha_0 / (1 + I_j/I_s) \quad (3)$$

可将(1)和(2)式改写为

$$\tau_c \frac{dI_j}{dt} = (\Delta_j - \bar{\xi}_j - \alpha_j - \eta I_j) I_j \quad (4)$$

$$\tau_f \frac{d\Delta_j}{dt} = \bar{\Delta}_j^0 - \Delta_j (1 + \bar{\beta}_j I_j) \quad (5)$$

其中 α_0 和 I_s 分别为色心晶体的初始吸收系数和饱和光强, $\alpha_0 = \alpha_0 / \sqrt{A}$, $A = [g(1 - 2 \sum_{k, k \neq j} \alpha_{kj}) + 2 \sum_{k, k \neq j} \alpha_{kj}]$, $\bar{\beta}_j = (\beta_j + \sum_{k, k \neq j} \beta_{jk} \alpha_{kj}) / \sqrt{A}$, $\bar{\Delta}_j^0$ 为 Δ_j^0 与 \sqrt{A} 的比值。所得到的(4)和(5)式在形式上与不含 QWP 的腔内倍频激光器单模方程相类似^[1],各模具有相对独立性和共同的动力学特征。因此,系统的状态从单模的行为就可表现出来,它相当于一个二维空间上的运动,最多只能有不动点或极限环,不可能出现混沌。

4 结果分析与讨论

为了简单起见,令 $\xi_j = \xi$, $\Delta_j^0 = \gamma$, $\beta_{jk} = \beta$, $\beta_j = 1$, $j, k = 1, 2, 3$ ^[3]。取参数 $\tau_f = 0.24 \text{ ms}$, τ_c

$= 0.007 \text{ ns}$, $\gamma = 0.5$, $\xi = 0.05 \text{ s}^{-1}$, $\eta = 5.0 \times 10^{-5}$, 根据(1)和(2)式, 对 $0 \leq g \leq 1$, $0 < \beta < 0.3$ 进行了数值求解(如图 2)。在无 Nd·YAG 色心调制晶体情况下, 当氩灯两端电压、电流分别为 115 V 和 9.0 A 时, 转动 $\lambda/4$ 波片使其在 $\Psi 0 \sim 90^\circ$ 变化, 得到 TEM₀₀ 模的信号波形如图 3 (a), (b) 所示。 $\Psi = 45^\circ$ 的极小值功率为 0.01 W, 可观察到弛豫振荡, 而在 $\Psi = 0^\circ$ 或 $\Psi = 90^\circ$

图 2 根据方程(1)和(2), 取 $\beta = 0.26$, 数值计算 (时间单位为微秒) 得到

(a) 一个模的时间行为和混沌吸引子(其它两个模混沌特性与此类似); (b) $g = 0$ 时, 三模总强度 $I_1 + I_2 + I_3$ 输出为混沌态, 而 $g = 1$ 时, 总强度稳定在不动点

Fig. 2 According to the equations (1) and (2), calculated mode-coupling oscillations for three-mode laser are attained by letting the cross saturation term $\beta = 0.26$ (time in μs units)

(a) the output of the individual mode intensity for the mode parameters $j = 1$ and $g = 0$ (that of the other modes is analogous to this); (b) the total fundamental intensity ($I = I_1 + I_2 + I_3$) is chaotic for $g = 0$ and the total fundamental intensity keeps stable at the fixed point for $g = 1$

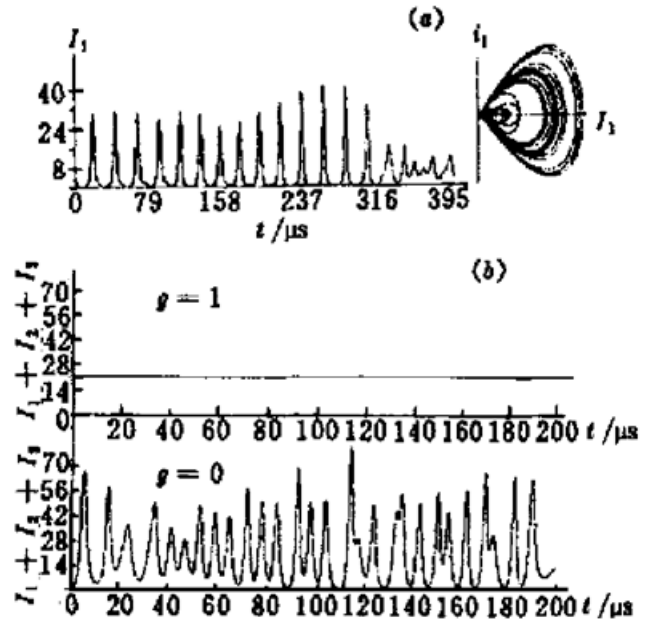


图 3 实验记录的激光波形

(a) QWP 处在 $\Psi = 0^\circ$ 时, 二次谐波为混沌态, 有极大值 $\sim 0.25 \text{ W}$ ($\Psi = 90^\circ$ 时的混沌特性与此相同); (b) $\Psi = 45^\circ$ 时, 趋向不动点的弛豫振荡表现出随机性, 极小值功率 $\sim 0.01 \text{ W}$; (c) $\Psi = 0^\circ$ 的功率谱

Fig. 3 Oscilloscope traces of the laser output measured

(a) the second harmonic generation is chaotic for the QWP angle $\Psi = 0^\circ$ and the maximum power output reaches about 0.25 W (the chaotic characteristic of the laser output with $\Psi = 90^\circ$ is the same as this); (b) the relaxation oscillation tending to the fixed point in the system shows a random behaviour and has a minimal power about 0.01 W; (c) the power spectrum corresponding to the waveform with $\Psi = 0^\circ$

时的极大值功率约为 0.25 W, 激光表现出较大的振幅波动, 图 3 (c) 的功率谱表明输出激光是混沌的。比较图 2 和图 3 可以看出, 对于 $g = 0$ 的情况, 理论与实验符合得非常好, 并与半导体泵浦的实验结果相同^[1,2,4]; $g = 1$ 时, 理论计算和半导体泵浦实验的结果均为稳定的不动点, 而在我们的实验中, 弛豫振荡趋向不动点后又被一些无规起伏的信号所取代, 即表现出随机行为。这使我们无法得到倍周期分叉通向混沌的道路的证据, 不过, 此点已在理论上得到证明^[3]。在详细分析了上述实验结果和对比两种激光器不同点后, 我们看到, 实验结果的差异主要来源于噪声干扰和位相无关性。由于灯泵浦激光器噪声比半导体泵浦的大得多, 在泵浦较强时, 其

表现就更为明显, 电源和水流引起的随机噪声都可能使某些纵模随机地振荡或猝灭, 并且所有振荡纵模的位相都是无规的, 从而导致了倍频项的随机涨落。

由方程(4)和(5), 取参数 $\bar{\Delta}_1^0 = 1.2$, $\bar{\beta}_j = 0.31$, $\alpha_0 = 0.03$, $I_s = 1.2 \times 10^4$, $\bar{\xi}_j = 0.051 \text{ s}^{-1}$ 的计算结果如图 4(a) 所示。在腔内放置了 Nd·YAG 色心晶体后, 当转动 QWP 时, 所观察到的结果相同, 是稳定的周期振荡, 其频率为 185 MHz(见图 4(b)), 从而消除了由于基波偏振模的和频作用所产生的混沌。此时, 灯两端电压、电流分别为 128 V 和 15.7 A。可以看出上述理论分析与实验结果符合得很好。

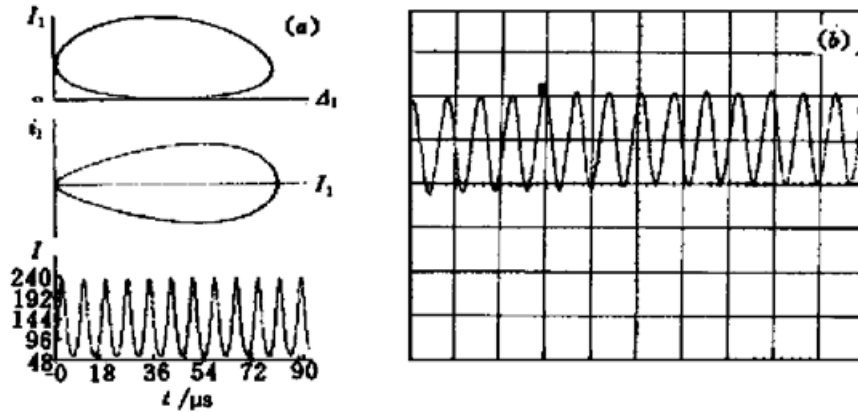


图 4 加入 Nd·YAG 色心调制晶体后, 混沌被消除

- (a) 根据方程(4)和(5), 理论计算给出相空间 $I_1 \sim \Delta_1$ 和 $I_1 \sim I_1$ 所对应的极限环以及在时域上二次谐波的周期行为;
 (b) 实验得到的激光输出是与 QWP 角度值无关的稳定的周期振荡

Fig. 4 After a Nd·YAG color center crystal is inseted into the laser cavity, the chaos is eliminated
 (a) by equations (4) and (5), calculated limit circles in the phase space of $I_1 \sim \Delta_1$ and $I_1 \sim I_1$, respectively, and the periodical behaviours of the second harmornic in the time domain are given; (b) the laser output measured in the experiment is the stable periodical oscillation independent on the QWP angle Ψ

致谢 衷心感谢华北光电所于连山高级工程师提供的实验条件和对实验提出的宝贵意见。

参 考 文 献

- 1 T. Baer. Large-amplitude fluctuation due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd·YAG lasers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9): 1175~ 1180
- 2 Michio Oka, Shigeo Kubota. Stable intracavity doubling of orthogonal linearly polarized modes in diode-pumped Nd·YAG lasers. *Opt. Lett.*, 1988, **13**(10): 805~ 807
- 3 Glenn E. James, Evans M. Harell II, Rajarshi Roy. Intermittency of chaos in intracavity doubled lasers II. *Phys. Rev. A*, 1990, **41**(5): 2778~ 2790
- 4 Glenn E. James, Evans M. Harell II, Christopher Bracikowski *et al.*. Elimination of chaos in an intracavity-doubled Nd·YAG laser. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(20): 1141~ 1143
- 5 W. Kochner. Solid-state Laser Engineering. Springer-Verlag New York Heidelberg Berlin, 1976. 245~ 249
- 6 C. Bracikowski, R. F. Fox, Rajarshi Roy. Amplification of intrinsic noise in a chaotic multimode laser system. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(1): 403~ 408
- 7 V. V. Azarova, N. M. Galaktionova, A. A. Mak *et al.*. Solid-state laser radiation noise. *Sov. J. Quantum Electr.*, 1979, **9**(11): 1378~ 1383

Observation and Elimination of Chaos in an Intracavity Frequency-doubled Nd·YAG Laser Pumped by Krypton Flashlamp

Ren Jianhua

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

Shen Ke

(Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Abstract In this paper, base on analysing the characters between the diode-pumped and krypton flashlamp-pumped lasers, we put forward a study of instability and chaos and of the elimination of chaos in krypton flashlamp-pumped intracavity frequency-doubled Nd·YAG lasers. Theoretical analyses and experimental apparatus are given, the results of chaotic laser radiation and its power spectra obtained through numerical calculation and experimental measurement are presented. By putting a Nd·YAG color center crystal in the resonator, the stable periodic laser radiation is attained and the elimination of chaos is realized.

Key words krypton flashlamp-pumped, Nd·YAG lasers, chaos, chaos eliminated

更 正 启 事

本刊 1998 年第 6 期第 533 页刊登的“光子-玻色子元激发耦合激光模型的准周期自脉冲和混沌状态”一文中,图 2 和图 3 的位置应对换,图的说明文字不变,特此更正,并向作者、读者致歉。

《中国激光》编辑部

1998-07-17