

可调谐窄线宽钛宝石激光脉冲的放大和频率展宽*

王 丽¹⁾ 杨 建²⁾ 黄 骝²⁾

(1), 河北师范大学物理系, 石家庄 050016)
(2), 北京工业大学物理系, 北京 100022)

摘要 : 在频域上进行了光参变激光器对钛宝石激光脉冲作选取放大并频率扩展的理论分析和数值模拟。实验上实现了用 BBO 光学参变振荡器作钛宝石激光脉冲选取、频率展宽为 120 nm 的连续可调谐窄线宽(小于 0.02 nm) 激光输出。

关键词 : 光参变激光器 ; 频率展宽 ; 钛宝石激光器

中图分类号 : TN248.1 文献标识码 : A

1 引 言

可调谐激光器具有高分辨率和宽调谐等优点, 一直受到极大重视^[1,2]。与此同时, 光参变激光器的稳定性、输出功率和波长覆盖范围一直在稳步发展。光参量激光器不仅在基础研究方面如高分辨激光光谱、生物医学和非线性光学中得到应用, 而且在空间激光通讯、光信息处理等方面有广阔的应用前景^[3,4]。对不同波长的激光脉冲选取、放大并频率展宽是当前研究的热点之一。传统的方法是用普克尔盒和检偏器组成光开关选取不同波长的激光脉冲, 但因加在普克尔盒上的电压随所选波长的变化而感到困难^[5,6]。我们建立了纳秒级光参量效应作钛宝石激光脉冲选取、放大并频率展宽的单纵模或多纵模运转的动力学方程和计算模拟。实验中整个系统使用一台美国光谱物理公司生产的 GCR-170 型调 Q Nd:YAG 激光器。钛宝石激光器的抽运光为 Nd:YAG 三倍频(光参变振荡器的抽运光, 线宽小于 0.001 nm, 稳定性为 0.1%) 用后剩余的二倍频光。在 BBO 光参变振荡器确定的匹配角下, 使钛宝石激光的不同频率的激光脉冲作为光参变振荡器信号光被选取放大, 采用天津光学仪器厂生产的 WDS-3 型多功能光栅光谱仪, 测得其的窄线宽调谐激光输出的频率展宽为 120 nm。

2 理论分析和数值模拟

光参变效应作钛宝石激光脉冲选取的纳秒级 BBO 光参变振荡器, 其输出特性如某一确定频率、线宽等都受限于作为信号光的钛宝石激光。利用参变放大时抽运光和信号光(钛宝石激光) 在相位匹配条件下, 通过 BBO 晶体的非线性效应, 使信号光、闲频光(来自自发辐射噪声信号) 和抽运光三波耦合, 将能量耦合给信号光, 使之选取放大。在不同相位匹配角下, 对不同波长的钛宝石激光脉冲进行选取放大和频率展宽。

由 Yariv 和 Louisell 的文章^[7], 在光参变振荡器中假设有 N 个模振荡, 用 a_p 、 a_{2n-1} 和 a_{2n} 分别代表抽运光模、第 n 个信号光模和第 n 个闲频光模的复振幅。其速率方程为 :

$$\left. \begin{aligned} \frac{da_p}{dt} &= -i\omega_p a_p - \frac{\omega_p}{2Q_p} a_p - \sum_{n=1}^N k_n a_{2n} a_{2n-1} + i\lambda_p \exp(-i\omega_p t), \\ \frac{da_{2n-1}}{dt} &= -i\omega_{2n-1} a_{2n-1} - \frac{\omega_{2n-1}}{2Q_s} a_{2n-1} + \sum_{n=1}^N k_n a_{2n}^* a_p, \\ \frac{da_{2n}}{dt} &= -i\omega_{2n} a_{2n} - \frac{\omega_{2n}}{2Q_i} a_{2n} + \sum_{n=1}^N k_n a_{2n-1}^* a_p, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 ω_{2n-1} 和 ω_n 分别代表第 n 个信号光和闲频光模的频率。 Q_s 和 Q_i 为信号光和闲频光的谐振腔品质因素, k_n 为耦合系数。(1) 式中包含了谐振腔内从一

* 北京市自然科学基金(4942005) 和河北省教委博士基金资助课题。

E-mail : lwang.1@yeah.net

收稿日期 2000-10-13 ; 收到修改稿日期 2001-02-19

个光参变模到 N 个模的振荡,故有 $2N + 1$ 个方程描述腔内任意模的振荡。在归一化和绝热条件下,令 $a_j = A_j(t) \exp(-i\omega_j t) (j = p, 2n - 1, 2n), T = 2/\gamma_p = 2Q/\omega \approx nL/c\delta_L$, 则(1)式改写为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dA_p}{dT} &= -A_p - \sum_{n=1}^N \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} A_{2n} A_{2n-1} + i\beta, \\ \frac{dA_{2n-1}}{dT} &= -\alpha_s A_{2n-1} + \sum_{n=1}^N \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} A_{2n}^* A_p, \\ \frac{dA_{2n}}{dT} &= -\alpha_i A_{2n} + \sum_{n=1}^N \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} A_{2n-1}^* A_p, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 $\beta = \lambda_p/\lambda_{\text{pth}}$ 代表抽运光激励项的归一化振幅与阈值幅值的比。在文献[6]中 $\lambda_{\text{pth}} = \sqrt{\gamma_p \gamma_i} \lambda_p (4k_{\text{max}})$ 则(2)式代表了在光参变振荡器中多模运转的数学方程。采用定步长龙格-库塔方法对(2)式进行数值计算。由于在(2)式中 $A_j (A_p, A_{2n}$ 和 $A_{2n-1})$ 为复数,令

$$\left. \begin{aligned} A_p &= B_p + iC_p \\ A_{2n-1} &= B_{2n-1} + iC_{2n-1}, \\ A_{2n} &= B_{2n} + iC_{2n}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则(2)式变为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dB_p}{dT} &= -B_p - \sum_{n=1}^N \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} (B_{2n-1} B_{2n} - C_{2n-1} C_{2n}), \\ \frac{dC_p}{dT} &= -C_p - \sum_{n=1}^N \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} (B_{2n-1} C_{2n} + B_{2n-1} C_{2n}) + \beta, \\ \frac{dB_{2n-1}}{dT} &= -\alpha_s B_{2n-1} + \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} (B_{2n} B_p + C_{2n} C_p), \\ \frac{dC_{2n-1}}{dT} &= -\alpha_s C_{2n-1} + \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} (B_{2n} C_p - B_p C_{2n}), \\ \frac{dB_{2n}}{dT} &= -\alpha_i B_{2n} + \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} (B_{2n-1} B_p + C_{2n-1} C_p), \\ \frac{dC_{2n}}{dT} &= -\alpha_i C_{2n} + \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} (B_{2n-1} C_p - B_p C_{2n-1}). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $\eta_n = k_n/k_{\text{max}}$ 代表第 n 个信号光模的归一化耦合系数。在光参变振荡器中假定有 N 个纵模时(4)式就有 $(2N + 1)$ 个方程式进行数值模拟计算。当光参变效应选取钛宝石激光为闲频光时,参变光以选取的这种模式振荡,另两种模式振幅几乎不振荡。本文在抽运光强为高斯波型下,对参变光阈值和输出能量受选取的激光频率的影响进行了数值计算。脉冲抽运光强度在时域上呈高斯型分布

$$\beta(T) = \beta_0 \exp[-\alpha(T - T_0)^2]. \quad (5)$$

在(5)式中取归一化时间 $T_0 = 100, \alpha = 2 \times 10^{-4}, \beta_0 = 7, N = 3$ 个模在光参变振荡器中振荡时,钛宝石激光以信号光 $A_3 = 1.4 \times 10^{-5}$ 归一化强度入射, $\eta_1 = \eta_5 = 0.8, \eta_2 = 1, \alpha_s = 0.06$ 和 $\alpha_i = 1.0$ 其余噪声初值为 1.4×10^{-9} 时代入(4)式进行数值计算模拟,得到光参变振荡器实现了单纵模运转 A_3 输出与 T 的关系曲线,如图1所示。光参变效应作钛宝石激光脉冲选取放大时,将光参变振荡器中信号光归一化振幅随归一化时间因子的变化进行了比较。选取参数: $\eta_1 = 0.99, \eta_3 = 0.98, \eta_2 = 1, \alpha_s = 0.1$

和 $\alpha_i = 1.0, \beta = 3$, 各波的噪声初值为 1.4×10^{-43} 。抽运光为高斯型 $\beta(T) = 10 \exp[-1.4 \times 10^{-4}(T - 50)^2]$ 情况下,图2模拟了无信号光被光参变振荡器选取时,参变光刚过阈值时运转的理论曲线。在 $\beta(T) = 3 \exp[-1.4 \times 10^{-4}(T - 50)^2]$ 抽运光波型情况下,其它参数同图2一样,在光参变效应作钛宝石激光频率选取的信号波 A_3 被选取时,参变光刚过阈值时实现了单纵模振荡运转曲线,如图3所示。由图2和图3比较可以看出,光参变效应作钛宝石

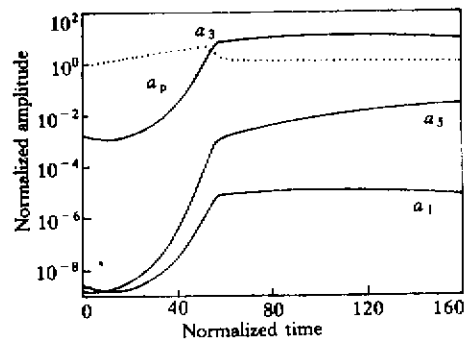


Fig. 1 Theoretical curve of A and T with Gaussian pump pulsed ($N = 3$)

激光脉冲选取放大时的阈值降为无频率选取注入时阈值的 1/3。

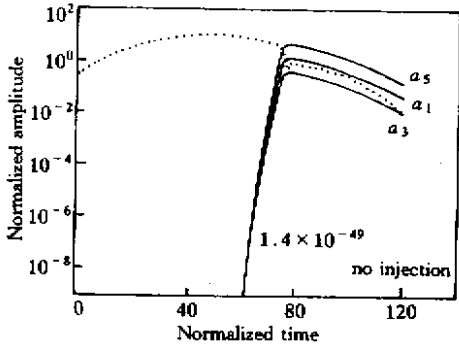


Fig.2 OPO dynamics with Gaussian pump pulsed ($N = 3$, unsuccessful sliced). $\beta(T) = 10\exp[-1.4 \times 10^{-4} \times (T - 50)^2]$

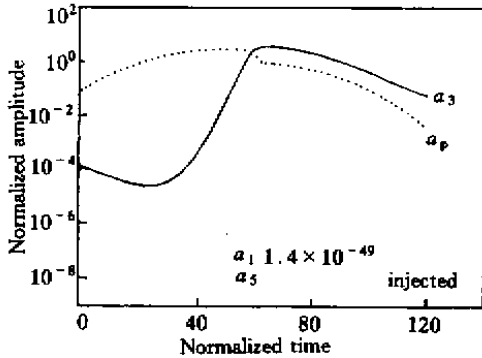


Fig.3 OPO dynamics with Gaussian pump pulsed ($N = 3$, successful sliced). $\beta(T) = 3\exp[-1.4 \times 10^{-4} (T - 50)^2]$

3 实验结果

在纳秒级脉冲钛宝石激光被 BBO 光参变振荡器选取放大和频率展宽实验光路中,使用纳秒级光电探头和美国 Tektronic 公司的 7904A 型 (500 MHz) 示波器观察到钛宝石激光最小脉宽 (小于 10 ns) 相对抽运光的延迟时间为 20 ns。那么三倍频光作 BBO 光参变振荡器泵光的延时光路要为 9 m ~ 12 m, 才能使钛宝石激光同时或略前于 355 nm 光共线进入光参变振荡器谐振腔内。透镜组调至适当的缩束比 (1:1.7), 以提高抽运光的能量密度。二倍频光通过 $\lambda/2$ 波片、光阑、分光镜和透镜入射到钛宝石晶体 (4 mm × 5 mm × 10 mm, 品质因素 FOM 为 200, $\alpha_{532} = 4 \text{ cm}^{-1}$, 由中科院上海光学精密机械研究所提供) 上, 光栅和输出镜组成钛宝石激光器, 其中 ZF_6 为进一步压窄线宽的色散棱镜。实验中使用中科院物理研究所的 LPE 型激光能量计测量钛宝石激光输出能量, 3 mm 隔环法布里-珀罗

标准具测试钛宝石激光的线宽为 0.01 nm。作为信号光的钛宝石激光和光参变振荡器抽运光同时进入光参变振荡器谐振腔。BBO 晶体为 7 mm × 8 mm × 15 mm, I 类相位匹配切割 ($\theta = 30^\circ, \varphi = 0^\circ$) (由中科院福建物构所提供)。调节 BBO 晶体的匹配角, 以达到 BBO 光参变振荡器在频域上, 作钛宝石激光脉冲的选取放大和频率展宽。在抽运光 355 nm 平均功率为 4.5 W (延时之前) 情况下, 调节钛宝石激光器中的调谐元件, 获取不同单纵模 (680 nm ~ 980 nm) 作为光参变振荡器的信号光, 使其与泵光 355 nm 共线匹配入射到 BBO 光参变振荡器中。获得参变效应作钛宝石激光选取放大的输出能量曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知, 钛宝石激光被 BBO 光参变振荡器选取放大的能量是无选取时的 6 倍。使用天津光学仪器厂生产的 WDS-3 型多功能光栅光谱仪, 得到频率展宽为 560 nm ~ 680 nm 的输出调谐曲线, 如图 5 所示。由图 5 可知, 钛宝石激光波长调谐范围约为 120 nm。

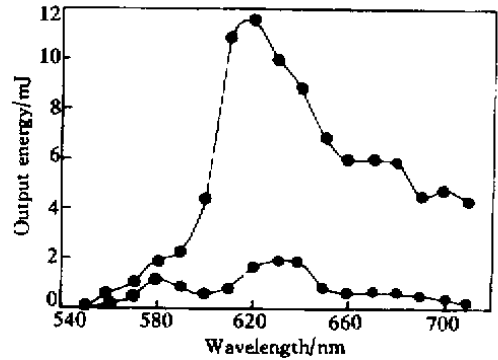


Fig.4 Output energy curves of Ti:sapphire laser sliced and amplified by BBO-OPO

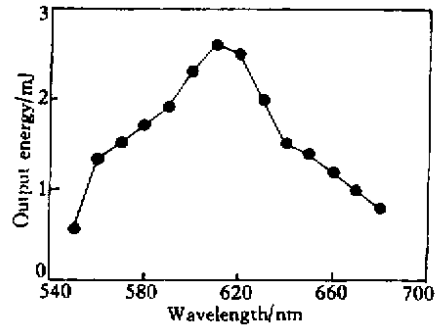


Fig.5 The tunable curve of frequency expansion in experiment

参 考 文 献

[1] Brosnan S J, Byer R L. Optical parametric oscillator threshold and linewidth studies. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1979, **QE-15**(6):415 ~ 431

- [2] Zhang J Y, Huang J Y, Shen Y R *et al.*. Optical parametric generation and amplification in barium borate and lithium triborate crystals. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(9):1758 ~ 1764
- [3] Xu Zuyan, Kong Yufei, Zhou Yi *et al.*. Narrow linewidth, nanosecond pulsed optical parametric oscillator with a compound cavity. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(2):112 ~ 115
- [4] Laenen R, Wolfrum K, Scilmerier A *et al.*. Parametric generation of femtosecond and picosecond pulses for spectroscopic applications. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(11):2151 ~ 2161
- [5] Huang Liu, Zhao Yu, Wang Li. Study on square wave pulsewidth variable solid state laser. *Chin. J. Lasers (B)*, 1999, **8**(2):116 ~ 120
- [6] Guo Xiaodong, Wang Shiji, Gu Yuan *et al.*. Temporal shaping of pulses in a Q-switched Nd:YLF laser. *Acta Optica Sinica*(光学学报), 1995, **15**(8):995 ~ 998(in Chinese)
- [7] Yariv A, Louisell W H. theory of the optical parametric oscillator. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1966, **QE-2**(9):418 ~ 424

Pulse Amplifying and Frequency Expanding of a Narrow Linewidth and Tunable Ti:Sapphire Laser

Wang Li¹⁾ Yang Jian²⁾ Huang Liu²⁾

(1), Physics Department, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016

(2), Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

(Received 13 October 2000; revised 19 February 2001)

Abstract: A mathematical formulae for a sliced, amplified and frequency expanded Ti:sapphire laser is setup and computed, by using optical parametric effect in time and frequency domain. Tunable and narrow linewidth (< 0.02 nm) laser output with the frequency expansion of 120 nm (560 nm ~ 680 nm) is obtained from Ti:sapphire laser using BBO-OPO in the experiment.

Key words: optical parametric resonator; frequency expansion; Ti:sapphire laser