

不同皮秒非稳腔中的 KTP 晶体的 腔内倍频效应*

吴逢铁 张文珍

(华侨大学应用物理系, 泉州 362011)

摘 要 以 KTP 晶体作为 Nd·YAP 锁模激光器的内腔倍频元件, 在带非共振环(ARR)的对撞脉冲锁模(CPM)非稳腔和虚共焦非稳腔中实现高效倍频转换, 其倍频能量转换效率分别为 53.4% 和 60.2%。测定了两种腔型的基波脉宽分别为 8 ps 和 18 ps, 二次谐波输出的最大能量起伏分别为 10.6% 和 12.5%。理论分析了两种不同腔型及其实验结果的特点。

关键词 腔内倍频, 锁模激光, 非稳腔, KTP 晶体。

1 引 言

倍频技术是扩展激光输出波段最有效和应用最广泛的技术之一。由三波非线性耦合基本方程可导出小信号近似下的倍频转换效率为^[1]:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{p^{2\omega}}{p^{\omega}} = 8 \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/2} \frac{\omega^2 d_e^2 l^2}{n^3} \left(\frac{p^{\omega}}{A} \right) \left[\frac{\sin(\Delta k l / 2)}{\Delta k l / 2} \right]^2 \quad (1)$$

式中 ω 为基波光频, d_e 为倍频晶体的有效非线性系数(或称有效倍频系数), l 为晶体的通光长度, p^{ω} 和 $p^{2\omega}$ 分别为基波光和倍频光的光功率, Δk 为相位失配量。

对高效倍频转换, 小信号近似条件不再成立, 考虑粒子倒空效应, 可导出高效倍频转换效率公式为^[2]:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{p^{2\omega}}{p^{\omega}} = \tanh^2 \left[2\alpha d_e l \left(\frac{\mu_0}{\epsilon} \right)^{3/2} \left(\frac{p^{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(\Delta k l / 2)}{\Delta k l / 2} \right] \quad (2)$$

这里假设 $\epsilon^{\omega} \approx \epsilon^{2\omega} = \epsilon = \epsilon_0 n^2$ 。由(1)式和(2)式可知, 为了获得高效倍频转换, 对一定长度 l 的倍频晶体, 必须满足相位匹配条件 $\Delta k = 0$, 尽可能提高基波泵浦光功率密度 p^{ω}/A 和寻求大的有效倍频系数 d_e 的晶体。

本文采用磷酸钛氧钾(KTiOPO₄ 简称 KTP)晶体作为腔内倍频元件, 分别在带非共振环的对撞脉冲锁模非稳腔和虚共焦非稳腔 Nd·YAP 皮秒脉冲激光器中实现腔内倍频输出, 并对这两种腔型各自的特点和相应的实验结果进行分析讨论。

* 福建省自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-09-15; 收到修改稿日期: 1998-01-04

2 腔型的设计和元件的选择

2.1 腔型的设计

理论分析指出,提高基波光功率密度是获得高效倍频转换的重要因素之一。由于非稳腔具有大的可控模体积,易获得高能量输出。且该腔容易鉴别和控制横模,易得到单端输出和准直的平行光束,所以它是获得高能量皮秒光脉冲较为理想的激光腔型。对撞脉冲锁模能够非常有效地稳定激光输出,并使锁模脉冲宽度压缩 2.6~ 2.8 倍^[3],是 80 年代发展起来和广泛应用的锁模技术。作者采用非共振环的对撞脉冲锁模的非稳腔激光器结合了对撞脉冲锁模腔脉宽窄、非稳腔输出能量高的双重优点,大大提高了基波光功率。然而满足相位匹配条件是提高倍频转换的另一重要条件。由于实验中的对撞锁模非稳腔的激光束为球面波,具有一定的发散度,它通过倍频晶体不能实现完全相位匹配,影响了转换效率的进一步提高。实验中设计了正支虚共焦非稳腔,平行光束通过倍频晶体实现了更有效的相位匹配,进一步提高了二次谐波的转换效率。

为了进一步提高基波光功率,实验采用了腔内倍频方式。

2.2 元件的选择

KTP 晶体具有非线性系数大(约为 KDP 晶体的 15 倍)、光损伤阈值高、不潮解和化学稳定性好等特点,还具有大的许用角和许用温度及小的离散角等优点^[4],非常适合作为近红外皮秒固体激光器的倍频元件。YAP 晶体输出为线偏振光,可获得更有效的倍频转换。(这一点是 YAG 晶体不具有的)。另外,YAP 比 YAG 晶体的荧光谱线宽,在锁模过程中可获得较窄的激光脉宽,有利于进一步提高激光功率。

3 实验条件与结果

实验装置如图 1 所示,其主要参数列于表 1。表中负号表示凸面反射镜。

Table 1. Main parameters of two different unstable resonators

cavity configuration	YAP size /mm	KTP size /mm	cavity length /mm	aperture /mm	radius of M_1 /mm	radius of M_2 /mm
CPM resonator	6.6×80	3×7×7	1350	φ3	- 3000	∞
confocal resonator	6.6×80	3×7×7	1000		- 900	3000

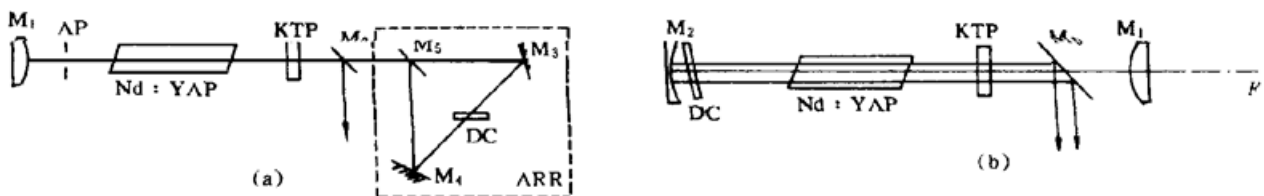


Fig. 1 Schematic diagram of laser cavity. (a) CPM unstable resonator with ARR, (b) Confocal unstable resonator

对撞脉冲锁模腔中的非共振环(ARR)由镜 M_5 、 M_3 和 M_4 组成,其中 M_3 和 M_4 为对 $1.08 \mu\text{m}$ 和 $0.54 \mu\text{m}$ 的 22° 平面全反镜,当分束镜 M_5 满足对反射和透射能量均分时(50/50)非共振环可完全等效为一个平面全反镜,因而该腔等效为平凸非稳腔。锁模染料盒 DC 置于 ARR 中心附近以求获得最佳对撞效果。而在虚共焦腔中,染料盒 DC 紧贴于凹面全反镜 M_2 前并倾斜一小角度以避免形式子腔,提高输出稳定性。

实验所用的 KTP 晶体采用 II 类相位匹配, 切割方式为 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 25^\circ$, 晶体长度为 3 mm, 同时对晶体在 $1.08 \mu\text{m}$ 和 $0.54 \mu\text{m}$ 两波长处镀增透膜。实验中所用的锁模染料为溶于 1, 2-二氯乙烷的五甲川溶液, 液层厚度为 1 mm, 采用腔内侧面反射耦合输出激光。测定 $1.08 \mu\text{m}$ 基波光时, 输出耦合镜 M_0 选择对 $1.08 \mu\text{m}$ 半透半反, 进行倍频实验时, 激光器保持相同的泵浦能量, 将 M_0 换成对 $1.08 \mu\text{m}$ 高透而对 $0.54 \mu\text{m}$ 高反的输出镜, KTP 晶体置于如图 1、2 所示位置并进行精细调节, 同时在输出光路加上对 $1.08 \mu\text{m}$ 的滤光片, 以吸收未转换的基波光。由测得的基波和二次谐波能量值(每一实验数据均为 10 次测定的平均值), 根据腔内倍频能量转换效率的定义^[5], 直接算出倍频能量转换效率。实验中, 输出能量由 PT-1 型能量计测定, 脉宽利用非共线二次谐波自相关测定。主要实验结果列于表 2。

Table 2. Main experimental results

cavity configurations	wavelength / μm	pulse duration /ps	output energy /mJ	max. energy fluctuation	conversion efficiency
CPM resonator	1.08	8	49.8	10.6%	53.4%
	0.54		26.2		
confocal resonator	1.08	18	66.5	12.5%	60.2%
	0.54		40.0		

用 Tex 7834 型 500 MHz 存储示波器对锁模脉冲波形进行观察。图 2 给出了对撞脉冲锁模腔锁模激光输出的基波和二次谐波的示波器照片, 时标(横坐标)为 5 ns/div。

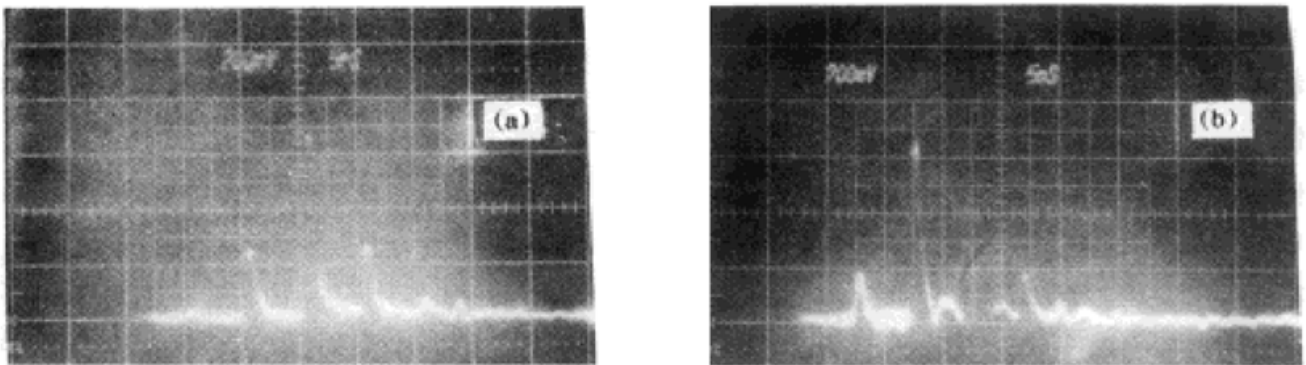


Fig. 2 Oscillograms of CPM laser pulse train (time scale 5 ns/div). (a) Fundamental wave pulse train, (b) SHG pulse train

4 分析与讨论

实验结果显示, 虚共焦非稳腔的倍频能量转换效率(60.2%) 高于对撞脉冲锁模非稳腔(53.4%), 这是由于在虚共焦非稳腔中[如图 1(b)所示], 由镜 M_1 右边虚共焦点 F 发出的光经全反镜 M_2 反射成为向左传播的平行光束, 该平行光束通过 KTP 晶体实现完全相位匹配, 大大提高了倍频转换效率。而在对撞脉冲锁模非稳腔中, 由于传播光束为高斯球面波, 具有一定发散度, 光束在晶体中难以实现完全相位匹配, 限制了倍频转换效率的进一步提高。另一方面实验结果指出对撞脉冲锁模腔基波输出脉宽(8 ps) 小于共焦非稳腔的基波输出脉宽(18 ps), 前者的稳定性也优于后者, 这主要是由于对撞脉冲锁模腔瞬态光栅效应的结果。由此可见, 两种不同腔型各有优点, 在实验应用中可根据不同的要求对不同腔型进行选择, 以满足所需要的输出参数。此外, 如果对对撞脉冲锁模非稳腔中的非共振环的镜参数进行计算

和选择,使其等效为具有一定曲率半径的凹面全反镜,这样对撞脉冲锁模腔可改进成带非共振环的对撞脉冲锁模共焦非稳腔,该腔将兼顾和结合以上两种腔型的优点。

参 考 文 献

- [1] A. Yariv. *Quantum Electronic*. 3rd ed. New York: John Willey & Son, 1989 : 393
- [2] Wu Fengtie. Unstable resonator CPM laser and the nonlinear effects of pico-second pulse. *Ph. D. dissertation*, Univ. of the Philippines, 1994, 31
- [3] M. S. Stix, E. P. Ippen. Pulse shaping in passively mode-locked ring dye laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1983, **QE-19**(4) : 520~ 525
- [4] 姚建铨著. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995, 第一章
- [5] Y. B. Band, D. E. Grosjean, J. S. Krasinski. Dynamic of Q-switched and mode locked intracavity second harmonic generation in a ring laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE-28**(5) : 1400~ 1410

Intracavity Frequency Doubling Effects in Different Picosecond Unstable Resonators with KTP Crystal

Wu Fengtie Zhang Wenzhen

(Department of Applied Physics, Huaqiao University, Quanzhou 362011)

(Received 15 September 1997; revised 4 January 1998)

Abstract By using KTP crystal as intracavity frequency doubling generator of a mode-locked Nd:YAP laser, efficient SHG in colliding pulse mode-locked (CPM) unstable resonator with antiresonant ring (ARR) and confocal unstable resonator has been demonstrated. The energy conversion efficiencies are 53.4% and 60.2%, pulse durations in fundamental wave are 8 ps and 18 ps, and the maximum energy fluctuation in second harmonic wave are 10.6% and 12.5%, respectively. The characteristics in both resonators and their experimental results are theoretically analyzed.

Key words intracavity frequency doubling, mode-locked laser, unstable resonator, KTP crystal.