

BBO 晶体在 CPM 非稳腔 Nd : YAG 激光器中的腔内倍频效应

张文珍 吴逢铁 蒲继雄

(华侨大学应用物理系, 泉州 362011)

提 要

本文报道用 BBO 晶体作为腔内倍频元件, 在带抗共振环的对撞脉冲锁模非稳腔 Nd : YAG 激光器中实现腔内倍频激光输出, 获得倍频能量转换效率为 50.4%。理论和实验均证明了该激光器的 BBO 腔内倍频转换效率高于腔外倍频转换效率。

关键词 腔内倍频, β -BaB₂O₄ 晶体.

1 引 言

带抗共振环(ARR)的对撞脉冲锁模非稳腔 Nd : YAG 激光器可直接获得 10 ps 脉冲宽度及几十至上百毫焦能量的脉冲式超短光脉冲输出^[1]. 倍频光的产生可采用腔外和腔内两种形式. 腔外倍频的基频光源采用调 Q 或锁模激光器^[2]; 而腔内倍频的基频光源普遍采用连续或准连续激光器并已获得调 Q、锁模及 fs 激光的腔内倍频^[3~5]. 本文报道采用偏硼酸钡(β -BaB₂O₄, 简称 BBO)作为腔内倍频元件, 在带抗共振环结构的对撞脉冲锁模非稳腔 Nd : YAG 激光器实现腔内倍频激光输出, 并对实验结果进行分析.

2 倍频理论及 BBO 晶体的倍频特性

2.1 倍频的理论基础

对非线性介质中传播的耦合的基波和二次谐波的倍频转换效率为^[6]

$$\eta_{SHG} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[lK^{1/2} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(\Delta kl/2)}{\Delta kl/2} \right] \quad (1)$$

式中 $K = 2Z^3\omega^2d_e$, ω 为激光的基波频率, Z 为平面波阻抗, d_e 为有效非线性系数, l 为非线性晶体长度. 由(1)式可知: 对一定长度 l 的倍频晶体, 当满足相位匹配条件, 二次谐波的转换效率正比于晶体的有效非线性系数 d_e 和基频光功率密度 P_{ω}/A . 因而寻求具有大的有效非线性系数 d_e 的倍频晶体和提高基频光功率密度, 可有效提高倍频光的转换效率 η_{SHG} .

2.2 BBO 晶体的有关特性

BBO 晶体是近年来发展起来的一种新型非线性晶体^[7], 它具有大的非线性系数, 对基频 $\lambda = 1.06 \mu\text{m}$ 光的有效倍频系数为 KDP 晶体的 6 倍; BBO 晶体有很高的光损伤阈值, 可承受很高功率密度的基频光. 若采用 10 pps 的 Nd : YAP ($\lambda = 1.08 \mu\text{m}$) 激光器的输出作为光源, 其总

能量为 150 mJ,脉宽为 7.5 ns,晶体的损伤阈值为 2 GW/cm²;若采用红宝石锁模激光器作为光源(单次脉冲),总能量为 10 mJ,脉宽为 20 ps,晶体的损伤阈值为 10 GW/cm²。

用 BBO 晶体对 1.06 μm 光进行倍频,若采用 I 型匹配方式,根据折射率的色散方程

$$\left. \begin{aligned} n_o^2 &= 1.9595 + (0.7892\lambda^2)/(\lambda^2 - 0.02163) \\ n_e^2 &= 1.6932 + (0.6782\lambda^2)/(\lambda^2 - 0.01816) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

可求得匹配角 $\theta = 21.57^\circ$ 。

此外 BBO 晶体还有透光波段宽,良好的光学机械性能等优点。

3 实验及分析

3.1 实验装置和条件

实验装置如图 1 所示.基频光由带抗共振环的对撞脉冲锁模非稳腔 Nd:YAG 激光器产生,输出脉宽 10 ps,能量为几十 mJ 的超短光脉冲串.实验装置中各元件的参数为: M_1 为 1.06 μm 凸面全反射镜($R_1 = -4000$ mm);Nd:YAG 棒的尺寸为 $\phi 4.5 \times 80$ mm, M_3 为 1.06 μm 半反半透介质膜片, M_4, M_5 为 1.06 μm、22.5°全反介质膜片.(其中 M_3, M_4, M_5 构成抗共振环.进一步分析可知,它等效于一个平面全反射镜,此特性与入射波频率和环的长度无关).厚度 1 mm 的染料盒置于抗共振环中心. M_2 为激光输出耦合镜(以 45°置于光路中),实验采用透射耦合输出以提高输出能量和光束质量.做腔内倍频实验时,BBO 晶体置于输出耦合镜 M_2 和激光棒之间(如图 1 中的 A 处);进行腔外倍频实验时,BBO 晶体置于图 1 中的 B 处. M_f 为滤光片,滤去 1.06 μm 光而对 0.53 μm 光透过率为 $T = 85\%$;E 为能量计。

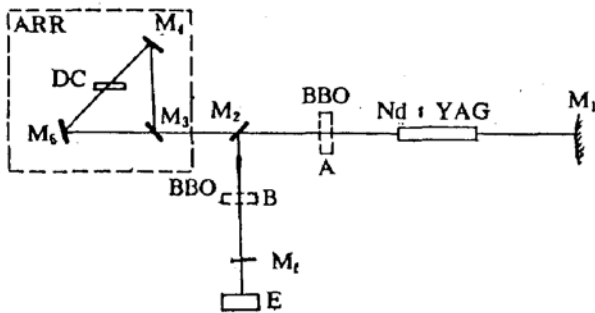


Fig. 1 Experimental setup of SHG

M_1 — HR mirror at 1.06 μm. $R_1 = -4$ m. M_2 — beam splitter (Output Mirror). M_3 — beam splitter. M_4, M_5 — HR mirrors at 1.06 μm (22.5°). DC — dye cell. A, B — BBO crystal. M_f — filter plate. E — energy meter

所用的 BBO 晶体为福建物构所生长的,晶体的尺寸为 $5 \times 6 \times 6$ mm³,倍频长度为 5 mm,晶体采用 I 型位相匹配方式.由于晶体通光面没有镀增透膜,所以计算腔外倍频转换效率需要进行反射损耗修正,定义

$$\eta_{SHG} = (0.95)^{-2} E^{2\omega} / E^\omega \quad (3)$$

式中 E^ω 和 $E^{2\omega}$ 为直接测到的基频光和倍频光的能量值,系数表示扣除不镀膜晶体表面的菲涅耳反射损耗,因为这种反射损耗可通过在晶体表面镀增透膜来消除。

3.2 实验结果及分析

进行腔内倍频实验时,取输出耦合镜 M_2 对 0.53 μm 光全反、对 1.06 μm 光透过率 $T = 75\%$,将 BBO 晶体置于光路 A 处,先让 BBO 晶体失调(考虑 BBO 晶体的吸收损耗)测得 M_2 输出的基波能量为 $E^\omega = 12.38$ mJ*,然后对 BBO 晶体进行精细调节,以获得最佳倍频输出,在输

* 数值为 10 次实测的平均值,以下均同

出光路上加滤光片去除 $1.06 \mu\text{m}$ 及其它杂光,最后从能量计读出的倍频光能量为 5.3 mJ ,扣除滤光片对 $0.53 \mu\text{m}$ 的损耗,实际倍频能量为 $E^{2\omega} = 5.3/0.85 = 6.24 \text{ mJ}$,由此可直接算得腔内倍频能量转换效率 $\eta_{\text{SHG}} = 50.4\%$ 。

同时我们进行了 BBO 的腔外倍频实验,晶体置于图 1 中的 B 处,考虑了晶体通光面没镀膜透膜的反射损耗,最后测得腔外倍频能量转换效率为 32.1% 。

实验结果说明,对脉冲式 ps 激光器,BBO 晶体的腔内倍频转换效率明显高于腔外倍频转换效率. 本文的激光器采用透射耦合输出,输出镜 M_2 对 $1.06 \mu\text{m}$ 光的反射率为 R ,因而这一腔型的腔内基频功率是腔外基频功率的 $1/R$ 倍. 另一方面: 由于对撞脉冲锁模非稳腔 Nd:YAG 激光器的输出光束有一定发散度(实验测得该激光器远场发散角为 $\theta = 0.95 \times 10^{-3} \text{ rad}$),因而腔内的光斑面积比腔外小. 前面的理论分析已知二次谐波转换率正比于基频光的功率密度 P_0/A ,因而 BBO 的腔内倍频转换效率可高于腔外倍频转换效率。

腔内倍频实验中观察到 M_4, M_5 镜有部分绿光输出,作者认为: 若输出耦合镜对 $0.53 \mu\text{m}$ 光全反,所有绿光将全部从 M_2 输出,但这里的全反是要求光垂直入射,而实验中 M_2 在光路中以 45° 角放置,这样它对 $0.53 \mu\text{m}$ 光的反射率将不是百分之百,因而有部分绿光从 M_2 透过并从 M_4, M_5 镜漏出,降低了腔内倍频光的输出,若对它进行改进寻找最佳耦合,将会进一步提高输出倍频转换效率. 此外若对非稳腔输出的球面波进行补偿校正为平行光再通过倍频晶体,可望提高激光的腔外倍频转换效率。

最近的研究还证明了脉冲激光器的腔内倍频可提高激光功率输出的稳定性^[8],同时在锁模激光腔内使用倍频非线性镜可大大压缩输出激光脉宽^[9],因而脉冲锁模激光器腔内倍频这一课题的研究将是很有意义的。

参 考 文 献

- [1] Lin Xing, Zhang Wenzhen, Wang Jiexian *et al.*, Investigation of a new type of CPM unstable resonator solid laser. *Opt. Commun.*, 1989, 71(6): 367~369
- [2] 郭晶华, 赵庆春, 陆雨田等. KNbO₃ 和 KTP 晶体对微微秒 YAG 激光的倍频效率的比较. *光学学报*, 1991, 11(3): 224~249
- [3] 姚建铨, 李昱, 薛彬等. 准连续泵浦 KTP 内腔倍频 YAG 激光器及其热效应分析. *光学学报*, 1986, 6(4): 326~331
- [4] Jintao Bai, Nuo Wang, Jinxing Cai *et al.*, 200 MHz CW mode-locked KTP intracavity frequency-doubled Nd:YAG laser. *Chinese J. Laser (in English)*, 1992, 1(2): 101~104
- [5] Glenn focht, M. C. Downer. Generation of synchronized ultraviolet and red femtosecond pulses by intracavity frequency doubling. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1988, QE-24(2): 431~433
- [6] W. Koechner. *Solid-state laser engineering*, 1st edition Springer-Verlag New York Inc. 1976, 492
- [7] 陈创天, 吴柏昌, 江爱栋等. 新型紫外倍频晶体 $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ 的光学性能和生长. *中国科学 B 辑*, 1984(7): 598~604
- [8] S. Di FONZO, P. MATALONI, S. BOLLANTI, Laser power stabitization by measn of interal second harmonic generation. *Opt. Commun.*, 1989, 71(5): 295~298
- [9] I. Ch. Buchvarov. K. A. stankov, S. M. Saltiel, Pulse shortening in an actively mode-locked laser with a frequency-doubling nonlinear mirror. *Opt. Commun.*, 1991, 83(3/4): 214~245

**Intracavity frequency doubling effect of BBO crystal in CPM
unstable resonator Nd : YAG laser**

ZHANG Wenzhen WU Fengtie PU Jixiong

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

(Received 14 August 1992; revised 2 Noember 1992)

Abstract

The SHG from a colliding pulse mode-locked (CPM) unstable resonator Nd : YAG laser with a antiresonant ring structure is obtained by using intracavity frequency doubling of BBO crystal. The SHG energy conversion efficiency of 50.4% is measured . We demonstrate theoretically and experimentally that the conversion efficiency of intracavity frequency doubling is higher than that of extracavity one in this kind of laser using BBO crystal.

Key words intracavity frequency doubling, BBO crystal.