

# BBO 晶体相位匹配允许角对倍频效率的影响<sup>\*</sup>

吴逢铁 张文珍

(华侨大学电气技术系, 泉州 362011)

**摘要** 根据实验参数, 理论计算了 BBO 晶体相位匹配允许角  $\Delta\theta$ , 其值为毫弧度量级. 因此, 发散角为毫弧度的激光束通过 BBO 晶体会引起一定的相位失配, 降低了倍频转换效率. 为此设计了共焦非稳腔 Nd:YAP 锁模激光器, 近似理想的平面波在 BBO 晶体中实现完全相位匹配, 获得了 81% 的高效倍频能量转换效率.

**关键词** 相位匹配, 倍频, 转换效率

**分类号** O 734. 1

倍频技术又称二次谐波产生(Second Harmonic Generation, 简称 SHG) 技术是通过非线性光学作用, 将频率为  $\omega$  的激光变换为  $2\omega$  的相干光, 它是目前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<sup>[1]</sup>为

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

其中  $\omega$  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),  $l$  为非线性晶体的通光长度,  $P^{\omega}$  和  $P^{2\omega}$  分别为基波和二次谐波光功率,  $n^{\omega}$  和  $n^{2\omega}$  分别为倍频晶体对基波光和倍频光的折射率,  $\Delta k$  为相位失配量.

对高效倍频转换, 小信号近似条件不成立, 考虑粒子倒空效应, 可导出高效倍频转换效率公式<sup>[2]</sup>为

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{P^{2\omega}}{P^{\omega}} = \tanh^2 \left[ 2\omega l e l \left( \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \right)^{3/4} \left( \frac{P^{\omega}}{A} \right)^{1/2} \frac{\sin(\frac{\Delta k l}{2})}{(\frac{\Delta k l}{2})} \right]. \quad (2)$$

由式(1), (2) 可见, 为了获得高效倍频转换, 除了提高基波泵浦光功率密度  $P^{\omega}/A$  和寻求大的有效非线性系数  $d_e$  的晶体外, 满足相位匹配条件  $\Delta k = 0$  ( $\sin(\frac{\Delta k l}{2}) / (\frac{\Delta k l}{2}) \rightarrow 1$ ) 是非常重要的. 但在实际中, 由于光波的发散角等多种因素, 很难做到完全相位匹配, 即便是基模高斯光束, 也不是理想的平面波, 而是高斯球面波, 如果高斯光束的中心光线符合相位匹配条件, 则其余光束就偏离匹配方向, 即存在失配  $\Delta k$ , 从而降低了倍频转换效率. 通常规定一个确定的相位失配

量  $\Delta k = \pm \frac{\pi}{l}$ , 这样可以由最大允许失配量  $\Delta k$  来求得相位匹配的允许角  $\Delta\theta$ <sup>[6]</sup>. 由式(1)可知, 在最大允许失配处, 效率下降至最大值的  $4/\pi^2$ , 大约为40%.

本文将结合我们的实验参数, 首先从理论上计算 BBO 晶体对 Nd:YAP 激光  $1.08 \mu\text{m}$   $0.54 \mu\text{m}$  倍频时相位匹配允许角  $\Delta\theta$ . 计算结果表明, BBO 晶体具有很小的允许角(为毫弧度量级), 它同一般固体激光器光束的发散角相当, 直接影响倍频效率的进一步提高. 由此可见, 若以 BBO 作为倍频晶体, 要进一步提高倍频转换效率, 需进一步提高光束质量. 实验设计了共焦非稳腔, 使通过 BBO 晶体的光束为平行光, 进一步地提高了倍频转换效率.

## 1 BBO 晶体相位匹配允许角 $\Delta\theta$ 的计算

以下将计算通光长度  $l = 4 \text{ mm}$  的 BBO 晶体对 Nd:YAP 激光  $1.08 \mu\text{m}$   $0.54 \mu\text{m}$  倍频转换相位匹配的允许角  $\Delta\theta$ . 设 BBO 晶体三波的波矢入射方向为  $\theta_m$  (相位匹配角), 三个波频率为  $\omega, \omega, \omega$ , 因我们考虑的是倍频(SHG)情形, 可令  $\omega = \omega = \omega, \omega = 2\omega$  其中  $\omega$  为基波频率. 当三个波矢方向为  $\theta = \theta_m + \Delta\theta$  时, 相位失配量  $\Delta k$  为  $\Delta k = k_3 - k_2 - k_1 = \frac{\omega}{c} n_3(\omega, \theta) - \frac{\omega}{c} n_2(\omega, \theta) - \frac{\omega}{c} n_1(\omega, \theta) = \frac{2\omega}{c} n^{2\omega}(\theta) - \frac{2\omega}{c} n^{\omega}(\theta)$ . 将相位失配  $\Delta k$  对  $\theta$  在  $\theta_m$  附近展成泰勒级数得

$$\Delta k = \Delta k|_{\theta=\theta_m} + \frac{d(\Delta k)}{d\theta}|_{\theta=\theta_m} \Delta\theta + \frac{1}{2} \frac{d^2(\Delta k)}{d\theta^2}|_{\theta=\theta_m} (\Delta\theta)^2 + \dots, \quad (3)$$

由于 BBO 为负单轴晶体, I 类相位匹配条件为  $n_o^{\omega} = n_e^{2\omega}(\theta_m)$ , 所以,  $n_1(\omega, \theta) = n_2(\omega, \theta) = n_o^{\omega}$ , 以及

$$n_3(\omega, \theta) = n_e^{2\omega}(\theta) = \left[ \frac{(n_o^{\omega})^2 (n_e^{\omega})^2}{(n_o^{2\omega} \sin^2 \theta)^2 + (n_e^{2\omega} \cos^2 \theta)^2} \right]^{1/2}, \quad (4)$$

相位失配  $\Delta k$  对  $\theta$  的求导为

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta k)}{d\theta} &= \frac{dk_3}{d\theta} - \frac{dk_2}{d\theta} - \frac{dk_1}{d\theta} = \frac{dk_3}{d\theta} = \frac{\omega}{c} \frac{dn_e^{2\omega}(\theta)}{d\theta} \\ &= \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \left[ \frac{(n_o^{\omega} \sin \theta)^2 + (n_e^{\omega} \cos \theta)^2}{(n_o^{2\omega})^2 (n_e^{2\omega})^2} \right]^{-3/2} \left[ \frac{(n_o^{\omega})^2}{(n_o^{2\omega})^2 (n_e^{2\omega})^2} - \frac{(n_e^{\omega})^2}{(n_o^{2\omega})^2 (n_e^{2\omega})^2} \right] \sin 2\theta \\ &= \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} [n_e^{2\omega}(\theta)]^3 [(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}] \sin 2\theta. \end{aligned}$$

将  $\omega = 2\omega$ , 且  $\omega = 2\pi c/\lambda$  代入上式得

$$\frac{d(\Delta k)}{d\theta} = \frac{2\pi}{\lambda} [n_e^{2\omega}(\theta)]^3 [(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}] \sin 2\theta. \quad (5)$$

式(3)取一级近似, 即  $\Delta k = \Delta k|_{\theta=\theta_m} + \frac{d(\Delta k)}{d\theta}|_{\theta=\theta_m} \Delta\theta$ , 且注意到单轴晶体中, 当光波沿  $\theta_m$  方向入射, 将满足  $\Delta k|_{\theta=\theta_m} = 0$ , 实现完全相位匹配. 另一方面取最大的相位失配  $\Delta k = \pm \pi/l$ , 此处  $\sin(\frac{\Delta k l}{2}) = \sin \frac{\pi}{2} = \pm 1$ , 因此,  $\frac{\pi}{l} = \frac{d(\Delta k)}{d\theta}|_{\theta=\theta_m} \Delta\theta$  将式(5)代入得到相位匹配的允许角为

$$\Delta\theta = \frac{\pi}{l} \frac{\lambda}{2\pi} \frac{1}{[n_e^{2\omega}(\theta_m)]^3 [(n_e^{2\omega})^{-2} - (n_o^{2\omega})^{-2}] \sin 2\theta_m}. \quad (6)$$

根据 BBO 晶体折射的色散方程<sup>[7]</sup> 为  $n_o = 1.9595 + 0.7892\lambda/(\lambda + 0.02163)$ ,  $n_e = 1.6932 +$

$0.678 \lambda^2/(\lambda^2 - 0.01816)$ , 容易计算出 BBO 晶体 Nd:YAP 的倍频光  $\lambda = 0.54 \mu\text{m}$  的折射率为  $(n_0^{2\omega})^2 = 2.812$   $n_0^{2\omega} = 1.677$ ,  $(n_e^{2\omega})^2 = 2.416$   $n_e^{2\omega} = 1.554$ . 另一方面, 利用负单轴晶体 I 类相位匹配角公式

$$\theta_m^I = \sin^{-1} \left[ \frac{(n_0^{\omega})^{-2} - (n_0^{2\omega})^{-2}}{(n_e^{\omega})^{-2} - (n_0^{2\omega})^{-2}} \right]^{1/2},$$

可求得  $1.08 \mu\text{m}$   $0.54 \mu\text{m}$  的相位匹配角约为  $\theta_m = 22^\circ$  这样由式(4)可求得  $n_e^{2\omega}(\theta_m) = 1.657$ , 将以上参数代入式(6), 取晶体通光长度  $l = 4 \text{ mm}$ , 最后求得相位匹配的允许角  $\Delta\theta = 0.735 \times 10^{-3} \text{ rad}$ . 计算结果表明 BBO 晶体具有很小的相位匹配允许角.

## 2 腔型设计与改进

由于 BBO 晶体具有大的有效非线性系数和高的光损伤阈值, 它很适合作为高功率倍频转换的非线性晶体. 另一方面, Nd:YAP 激光器输出的线偏振光非常有利倍频转换. 先前的实验我们设计了带抗共振环 (ARR) 的对撞脉冲锁模 (CMP) 非稳腔 Nd:YAP 激光器对 BBO 晶体进行腔内倍频, 获得了 70% 的高效倍频能量转换<sup>[6,61]</sup>, 实验装置简图如图1所示.

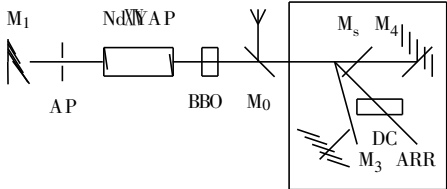


图1 CPM非稳腔激光器

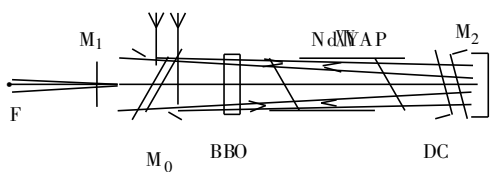


图2 共焦非稳腔激光器

由于这种腔型和元件所具备的各种优点, 如非稳腔有大的模体积, 因而有大的能量输出. 此外采用腔内倍频及 CPM 腔可得到较短的脉冲宽度, 因而, 可进一步提高基波功率密度, 另一方面 BBO 晶体有大的有效倍频系数和高的光损伤阈值等. 因此实验已获得 70% 的高效倍频转换, 然而由于该非稳腔的激光束为球面波, 具有一定的发散度, 其发散角约为  $1 \text{ mrad}$ <sup>[7]</sup>, 这同 BBO 晶体相位匹配的允许角相当, 它将影响倍频转换效率的进一步提高. 为了进一步提高转换效率, 对光路进行设计或对光束进行补偿, 使通过 BBO 晶体的光束为平行光 (理想平面波), 这种光束将在 BBO 晶体晶体中实现完全相位匹配, 有利进一步提高二次谐波的转换效率.

根据以上分析, 我们设计了共焦非稳腔 Nd:YAP 锁模激光器, 实验装置简图如图2所示. 在光路中, 以虚焦点 F 发出的光经全反镜 M<sub>2</sub> 的反射成为平行光束, 经过 BBO 晶体倍频及输出的激光均为平行光束, 平行光在 BBO 晶体中实验了完全相位匹配, 大大提高了倍频能量转换效率. 实验中我们获得了 81% 的高效倍频转换.

## 3 结束语

理论计算了 BBO 晶体中相位匹配的允许角  $\Delta\theta$  其值为毫弧度量级, 由于小的允许角, 当发散光束通过晶体时, 光束不能实现完全相位匹配, 影响了倍频转换效率. 为了进一步提高转换效率, 设计了共焦非稳腔内腔倍频 Nd:YAP 锁模激光器, 由于近似理想平面波通过 BBO 晶体, 大大提高了倍频转换效率, 获得了 81% 的能量转换. 从倍频转换效率考虑, 这种腔型优于 CPM 非稳腔. 然而, 它的基波输出脉宽为 18 ps 大于 CPM 非稳腔的 8 ps, 其输出稳定性也略差

于 CPM 腔. 因此, 在实际应用中我们可根据不同要求对腔型进行选择, 以满足我们所需要的输出参数. 此外, 如果对 CPM 非稳腔的腔参数作进一步的选择和计算, 将其改进为与图2等效的共焦非稳腔, 将可以兼顾两种腔型的优点.

### 参 考 文 献

- 1 Yariv A. Quantum electronics. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1989. 393
- 2 Wu Fengtie. Unstable resonator CPM laser and the nonlinear effects of picosecond pulse: [dissertation]. Quezon: Univ. of the Philippines, 1994
- 3 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术(第1章). 北京: 科学出版社, 1995. 25
- 4 陈创天, 吴柏昌, 江爱栋等. 新型紫外倍频晶体  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 的光学性能和生长. 中国科学(B 辑), 1984, (7): 598 ~ 604
- 5 Wu Fengtie, Yang Xiangchun, Zhu Xiaolei et al. High energy and efficient SHG by using convex-antiresonant ring unstable resonator Nd:YAP pulsed laser. Opt. Commun., 1994, (108): 329 ~ 332
- 6 吴逢铁. BBO 晶体对皮秒 YAP 和 YAG 激光的腔内倍频. 华侨大学学报(自然科学版), 1996, 17(2): 127 ~ 130
- 7 王家贤, 张文珍, 林 星. 非稳腔对撞脉冲锁模 YAG 激光器输出耦合的研究. 光电子 激光, 1990, 1(2): 66 ~ 70

## Effect of Phase Matching Acceptance Angle in BBO Crystal on the Efficiency of Frequency Doubling

Wu Fengtie      Zhang Wenzhen

(Dept. of Electric Technique, Huaqiao Univ., 362011, Quanzhou)

**Abstract** The phase matching acceptance Angle  $\Delta\theta$  in BBO crystal is theoretically calculated in milli radian magnitude. When a laser beam with divergence angle in milli radian passes through BBO crystal, it will cause a fixed phase mismatch and will reduce the conversion efficiency of frequency doubling. A Nd:YAP mode-locked laser with confocal and unstable optical resonator is designed by the authors. Thus a fully phase matching of an approximately ideal plane wave can be realized in BBO crystal and a high efficient, as high as 81%, energy conversion of frequency doubling can be obtained.

**Keywords** phase matching, frequency doubling, conversion efficiency