

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0120-04

# 利用晶体串接实现高效宽带三倍频

季来林<sup>1</sup>, 朱 俭<sup>1</sup>, 马伟新<sup>1</sup>, 詹庭宇<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海激光等离子体研究所, 上海 201800  
(<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 从耦合波方程出发, 分别在小信号、高功率(1.5 GW/cm<sup>2</sup>)条件下研究 KDP 晶体串接三次谐波转换。当两块混频晶体的长度选择为 8 mm 和 6 mm, 晶体分别偏离原混频匹配角 0.35 mrad 和 -0.25 mrad 时可以有 0.3 nm 的谐波转换带宽, 同时系统的三次谐波转换效率与两块混频晶体之间的距离有密切关系, 当两块晶体之间的距离使从第一块混频晶体出射的光波之间的相位差改变  $\pi$  时, 会使第一块混频晶体产生的三次谐波大部分回流到基频和倍频光, 从而使转换效率大幅度下降, 最合适的距离应当使光波之间的相位差改变为  $2\pi$ 。

**关键词** 非线性光学; 三次谐波; 晶体串接; 带宽

**中图分类号** O437 **文献标识码** A

## The Dual-Tripler Scheme for Increased-Bandwidth of Third Harmonic Generation in High Power Laser System

Ji Lai-lin<sup>1</sup>, Zhu Jian<sup>1</sup>, Ma Wei-xin<sup>1</sup>, Zhan Ting-yu<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Institute of Plasma Laser, Shanghai 201800, China  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The dual-tripler scheme of KDP crystals for third harmonic generation (THG) is studied by the equations of three interacting waves under the small signal and the high power (1.5 GW/cm<sup>2</sup>) condition. The 8 mm type II KDP tripler with an detuning angle of 0.35 mrad whereby the addition of a 6 mm type II tripler with an detuning angle of -0.25 mrad can increase the bandwidth of third harmonic generation to 0.3 nm at 1.5 GW/cm<sup>2</sup>. Meanwhile, the conversion efficiency of the third harmonic generation is closely related to the distance between two triplers. If the relative phase among the three interacting waves changes  $\pi$  during the distance, the third harmonics from the first tripler can return to the second harmonics and the fundamental frequency and the conversion efficiency will drop by a wide margin. To ensure the optimum performance of the dual-tripler system, it is necessary to find the correct air gap during which the relative phase among the three interacting waves changes  $2\pi$ .

**Key words** nonlinear optics; third harmonic generation; dual-tripler; bandwidth

## 1 引 言

为进一步改善高功率钕玻璃激光聚变驱动器的光束近场和远场聚焦的均匀性, 需要发展带宽至少为 0.3~0.5 nm 的宽频带激光<sup>[1~3]</sup>。这类装置的主要技术困难是如何实现高效率谐波的转换, 并保持一定的谐波带宽。传统的三次谐波转换系统受 KDP(磷酸二氢钾)晶体色散特性的影响, 转换带宽  $< 0.1$  nm<sup>[4,5]</sup>。近年来, 国外发展了许多高功率宽频带激光三次谐波转换技术, 其中晶体串接方案比较具有吸引力, 它不需要对传统的光路做大的改动, 只需要在原来的晶体后面再串接一块 KDP 晶体就可

实现<sup>[6]</sup>。

罗切斯特大学的激光工程实验室报道了他们利用晶体串接实现宽带高效三次谐波转换的实验<sup>[7]</sup>, 根据实验结果, 他们很乐观地估计利用该方案后 OMEGA 激光系统的高效谐波转换带宽可达到 1 nm 以上。本文将基于耦合波方程给出该方案的一些优异特性及其具体光路要求。

## 2 小信号、平面波近似条件下的耦合波求解

晶体串接的基本布局如图 1 所示。图中左边第

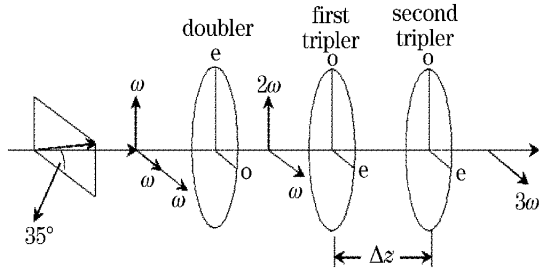


图1 II类/II类相位匹配晶体串接三次谐波转换系统

Fig.1 Type II/Type II dual-tripler scheme for third harmonic generation

一块晶体为倍频晶体,第二块为混频晶体,设该混频晶体的长度为  $l_1$ , 相位匹配失谐量为  $\Delta k_1$ , 在其后方串接第二块混频晶体(也即图中右边第一块晶体), 设其长度为  $l_2$ , 相位匹配失谐量为  $\Delta k_2$ 。

倍频、混频过程都采用II类相位匹配类型,假设从倍频晶体出射的激光为沿混频晶体e轴的  $\omega$  和沿o轴的  $2\omega$ , 设振幅分别为  $E_1, E_2$ , 产生的三次谐波振幅为  $E_3$ , 用  $A_j = \sqrt{n_j} E_j (j=1, 2, 3)$  代替, 得到混频晶体中的耦合波方程<sup>[4]</sup>

$$\frac{d}{dz} A_1 = -iKA_3 A_2^* \exp(i\Delta k z), \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} A_2 = -i2KA_2 A_1^* \exp(i\Delta k z), \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} A_3 = -i3KA_1 A_2 \exp(-i\Delta k z), \quad (3)$$

其中  $K = \frac{\omega_1}{2c} (n_1 n_2 n_3)^{-1/2} d_{36} / \epsilon_0 \sin 2\theta$ ,  $\omega_1$  为基频光的频率。上述方程采用了平面波近似, 忽略了晶体的吸收。

在小信号近似条件下积分方程(3), 可很明显地看出这种光路放置的优点和具体光路的要求

$$A_3 = 3KA_1 A_2 \left[ \frac{1 - \exp(-i\Delta k_1 l_1)}{\Delta k_1} + \exp[-i(\Delta k_1 l_1 + \Delta k_0 d)] \frac{1 - \exp(-i\Delta k_2 l_2)}{\Delta k_2} \right], \quad (4)$$

(4) 式中的  $\Delta k_0 d$  为从第一块混频晶体出射的激光进入第二块混频晶体在空气中通过距离  $d$  产生的相对相位差,  $\Delta k_0$  是三波在空气中波矢之差, 定义与晶体中完全相同。

如果  $\Delta k_1 l_1 + \Delta k_2 l_2 = 0$ , 计算可得到出射的  $3\omega$  的光强

$$I_{3\omega} \propto |3KA_1 A_2|^2 \sin^2 \left( \frac{\Delta k_1 l_1}{2} \right) \times \left[ \frac{1}{\Delta k_1^2} + \frac{1}{\Delta k_2^2} - 2 \frac{1}{\Delta k_1 \Delta k_2} \cos(\Delta k_0 d) \right], \quad (5)$$

要求出射的光最强, 必须使  $\Delta k_0 d = 2n\pi$ , 它的物理作用是防止从第一块混频晶体产生的三次谐波回流, 取  $\Delta k_1 + \Delta k_2 = 0$ , 出射的  $3\omega$  的光强

$$I_{3\omega} \propto |3KA_1 A_2|^2 \text{sinc}^2 \left( \frac{\Delta k_1 l_1}{2} \right) \times (2l_1)^2, \quad (6)$$

与单块长度为  $2l_1$  晶体小信号条件下出射的  $3\omega$  光相比较,

$$I_{3\omega} \propto |3KA_1 A_2|^2 \text{sinc}^2(\Delta k_1 l_1) \times (2l_1)^2, \quad (7)$$

比较(6)式和(7)式, 在较大的失配范围内, 第一块晶体的波矢失配量被第二块晶体最佳地补偿, 两块晶体串接结果是: 三倍频转换效率大致与晶体的总长度  $(l_1 + l_2)$  成正比, 而由波矢失配  $\Delta k$  所引起的转换效率下降只与单块长度为  $l_1$  的晶体相当, 从而增大了接收角宽和带宽。

由上面的表达式可看出具体光路至少有两个要求:

1) 两块混频晶体之间的距离  $d$ , 必须满足  $\Delta k_0 d = 2n\pi$ 。

2) 第一块混频晶体的波矢匹配失谐量必须与第二块混频晶体波矢匹配失谐量符号相反, 当不同长度晶体组合时, 满足  $\Delta k_1 l_1 + \Delta k_2 l_2 = 0$  条件时, 其结果大致相当。

### 3 数值求解耦合波方程

在 A. Babushkin 等<sup>[7]</sup>报道的实验中, 检验了串接混频系统晶体接收角宽。基本方法是在一定的强度下通过改变入射窄带激光 ( $< 0.01 \text{ nm}$ ) 的角度, 测量转换效率随入射角度的改变, 来测得串接系统的接收角宽, 从而得到系统的接收带宽。

依照这种方案, 做数值模拟, 比较单块晶体与串接晶体的接收角宽特性, 以选择合适的晶体布置。模拟过程中的耦合波方程仍采用单色平面波近似, 忽略吸收、衍射、离散等效应, 模拟结果见图2。

图2(a)是12 mm II类KDP倍频晶体与12 mm II类KDP混频晶体在  $1.5 \text{ GW/cm}^2$  输入功率密度下, 三次谐波转换效率随混频晶体失谐角变化的情况, 模拟时假设输入的为窄带的激光, 激光的时间和空间波形均为平顶, 图2(b)倍频晶体仍为12 mm II类KDP, 混频晶体是由两块8 mm和6 mm II类KDP组成, 8 mm的KDP晶体偏离相位匹配方向  $0.35 \text{ mrad}$ , 6 mm KDP晶体偏离其相位匹配方向  $-0.25 \text{ mrad}$ , 输入的激光条件都不变, 由图2(b)可看出串接晶体的接收角宽有了很明显的增加, 图2(a)的接收角宽  $\theta_{\text{FWHM}}$  为  $0.3 \text{ mrad}$ , 而图2(b)

接近 2 mrad 角宽,接收角宽增加了 5 倍以上,由文献[5],接收角宽的增加等价于接收带宽的增加,两者近似成正比关系,因此在平面波近似条件下,忽略离散和衍射等影响,串接三倍频系统的接收带宽要

远大于现有的系统。

在上面的模拟过程中没有考虑因两块晶体之间的距离引起的附加相位差,如果考虑该影响,模拟结果如图 3 所示。

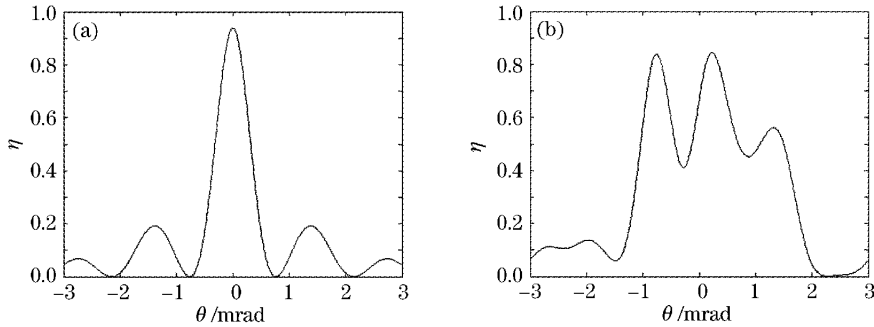


图 2 三次谐波转换效率随入射激光( $1.5 \text{ GW/cm}^2$ )倾斜的变化曲线。(a)传统单块混频晶体;(b)两块晶体串接  
Fig. 2 Predict third-harmonic conversion as function of the laser beam's tilt angle at  $1.5 \text{ GW/cm}^2$ .

(a) Only one sum-frequency mixer; (b) dual-tripler scheme

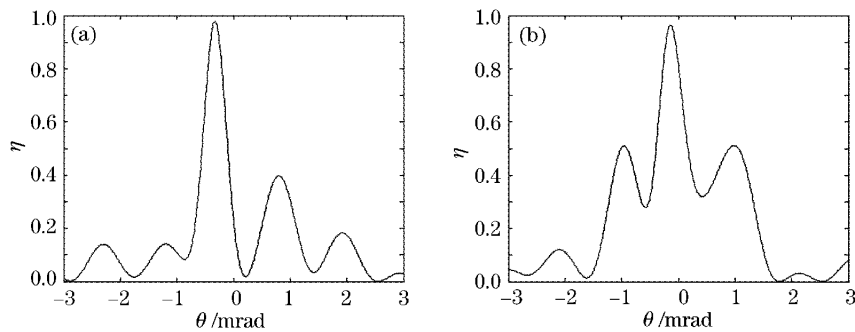


图 3 在两块混频晶体之间的距离不同时,三次谐波转换效率随入射激光( $1.5 \text{ GW/cm}^2$ )倾斜的变化

(a)  $d=20 \text{ mm}$ , (b)  $d=30 \text{ mm}$

Fig. 3 Predict third-harmonic conversion as function of the laser beam's tilt angle at  $1.5 \text{ GW/cm}^2$  of dual-tripler scheme at different distance between two sum-frequency crystals. (a)  $d=20 \text{ mm}$ ; (b)  $d=30 \text{ mm}$

图 3 中的晶体串接条件与图 2(b)相同,只是考虑了两块串接混频晶体之间的距离引起的附加相位差的影响。图 3(a)中两块晶体之间的距离为 20 mm,附加相位差为  $\pi$ ,图 3(b)中两块晶体之间的距离为 30 mm,附加相位差为  $3\pi/2$ ,而图 2(b)中,没有考虑附加相位的影响相当于处于最佳距离,由此距离引起的附加相位差为  $2\pi$  的整数倍。

由图 3 可看出,串接三倍频过程对由混频晶体之间的间隙引起的附加相位差影响比较敏感,当附加的相位差达到  $\pi$  时,接收角宽与单块晶体大致相当。

基于上面的计算结果,可以确定一组合适的晶体长度以及失配角组合(8 mm KDP 失配 0.35 mrad 与 6 mm KDP 失配  $-0.25 \text{ mrad}$ ),利用该组晶体串接三次谐波转换方案,可有效增加高功率激光系统中三次

谐波的转换带宽。

## 4 结 论

从平面波耦合波方程出发,分别在小信号和高功率条件下讨论了晶体串接三次谐波转换方案。从中可以看出,晶体串接可有效增加三次谐波转换过程的接收角宽,等价于提高了系统的接收带宽,在忽略离散、衍射等影响的情况下,其高效谐波转换带宽可以大于 0.3 nm,对于解决高功率激光宽带三倍频问题将是非常有意义的。另外本文还对具体的光路的要求给出了说明,两块混频晶体的波矢失配符号必须相反,两块混频晶体之间的距离必须合适,使从第一块混频晶体出射的激光到进入第二块混频晶体的三波相位差没有改变,同时给出一组可行晶体长度和角度失配组合。

## 参 考 文 献

- 1 Qian Lijia, Zhu Baoqiang, Fan Dianyuan *et al.*. Efficiency harmonic generation of broad-band high power laser and its new developments [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(4): 577~582  
钱列加, 朱宝强, 范滇元 等. 高功率宽频带激光的高效谐波转换及其新进展 [J]. *强激光与粒子束*, 1995, 7(4): 577~582
- 2 D. M. Pennington, M. A. Hennesian, S. N. Dixit *et al.*. Effect of bandwidth on beam smoothing and frequency conversion at the third harmonic of the Nova laser [C]. *SPIE*, 1993, 1870: 175~185
- 3 Murray J R, Smith J R, Ehrich R B *et al.*. Experimental observation and suppression of transverse stimulated Brillouin scattering in large optical components [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, 6(12): 2402~2411
- 4 R. S. Craxton. High efficiency frequency tripling schemes for high power Nd<sup>3+</sup> glass lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, QE-17(9): 1771~1782
- 5 R. S. Craxton, S. D. Jacobs, J. E. Rizzo *et al.*. Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1  $\mu\text{m}$  laser radiation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, QE-17(9): 1782~1786
- 6 D. Eimerl, J. M. Auerbach, C. E. Baker *et al.*. Multicrystal designs for efficient third-harmonic generation [J]. *Opt. Lett.*, 1997, 22(16): 1208~1210
- 7 A. Babushkin, R. S. Craxton, S. Oskoui *et al.*. Demonstration of the dual-tripler scheme for increased-bandwidth third-harmonic generation [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(12): 927~929