

文章编号: 0258-7025(2006)10-1345-04

# 利用晶体串接实现宽带三次谐波转换

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、高功率密度(1.5 GW/cm<sup>2</sup>)条件下研究了晶体串接三次谐波(THG)转换方案, 并利用实验验证了该方案。实验观察到这种方案可以有效提高宽带激光三次谐波转换效率, 但混频晶体之间的距离对宽带三次谐波转换效率影响明显。在1.5 GW/cm<sup>2</sup>平均功率密度下, 实验中最佳距离25 mm处, 对带宽3.5 nm的啁啾脉冲取得了19.75%的三倍频效率, 这对于高功率激光宽带三次谐波转换的解决很有意义。

**关键词** 非线性光学; 三次谐波; 晶体串接; 带宽

**中图分类号** O 437 **文献标识码** A

## Dual-Tripler Scheme for Third Harmonic Generation of Broad Bandwidth

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 Laser and Plasma, 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 for third harmonic generation (THG) is studied by the coupled equations under the small signal and high power condition (1.5 GW/cm<sup>2</sup>). The design has been proved in the experiment. It found that this design can increase the third harmonic conversion efficiency of broad bandwidth, but the distance between two triplers has an important impact on the third harmonic conversion efficiency in the experiment. 19.75% THG efficiency with chirp pulse of 3.5 nm bandwidth at average power of 1.5 GW/cm<sup>2</sup> was achieved at 25 mm optimum distance between two triples in the experiment. It will be useful to solving the problem of the large bandwidth of the THG in the high power laser system.

**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以及抑制大口径光学元件的受激布里渊散射破坏, 需要发展带宽至少为0.3~0.5 nm的宽频带激光谐波转换技术<sup>[1~3]</sup>。传统的三次谐波(THG)转换系统受磷酸二氢钾(KDP)晶体色散特性的影响, 高效三次谐波转换接收带宽<0.1 nm<sup>[4,5]</sup>。近年来, 国外发展了许多高功率宽带激光三次谐波转换技术, 其中晶体串接方案不需要对传统的光路作大的改动, 只需在原来的晶体后面再串接一块 KDP 晶体就可实现高效宽带谐

波转换<sup>[6~8]</sup>, 从经济和技术角度考虑都是最佳选择。

罗切斯特大学的激光工程实验室报道了他们利用窄带激光光源验证晶体串接三次谐波转换的接收角宽的实验<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<sup>[7]</sup>。本文根据国内高功率激光系统的实际需要, 对这种技术进行了跟踪研究。基于耦合波方程, 分别在小信号和高功率条件下分析了该方案, 并用宽带啁啾激光光源验证这一方案, 实验结果表明混频晶体之间的距离对宽带三次谐波转换效率有明显影响, 在最佳距离25 mm处可以有效地提高三次谐波转换效率。

**收稿日期:** 2006-01-15; **收到修改稿日期:** 2006-05-10

**作者简介:** 季来林(1980—), 男, 江苏盐城人, 上海激光等离子体研究所硕士研究生, 研究方向为高功率激光器和非线性频率转换。E-mail: jsycjll@eyou.com

**导师简介:** 朱俭(1961—), 男, 上海人, 上海激光等离子体研究所研究员, 研究方向为高功率激光技术。E-mail: zhujian@mail.shnc.ac.cn

## 2 混频晶体距离对三次谐波转换效率的影响

### 2.1 小信号分析

对于晶体串接三次谐波转换系统,首先基于单色平面波小信号模型,给出一个简单的结果。虽然简单,但是直观、易懂,并能解释和明确这种设计的优点以及所需要关心的技术点。

II类晶体串接三次谐波转换基本方案的晶体布局如图1所示。图1中左边第一块晶体为倍频晶体,第二块为混频晶体,设厚度为 $l_1$ ,相位匹配失谐量为 $\Delta k_1$ ,在其后方串接第二块混频晶体,设厚度为 $l_2$ ,相位匹配失谐量为 $\Delta k_2$ ,两块混频晶体之间的距离为 $d$ 。

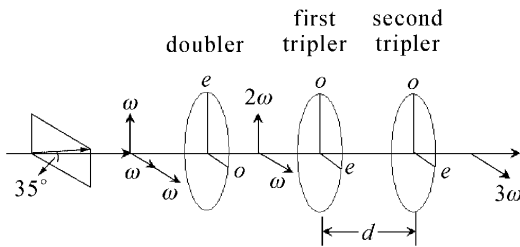


图1 II类相位匹配晶体串接三次谐波转换

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

假设从倍频晶体出射的单色平面波为沿混频晶体 $e$ 轴偏振的 $\omega$ 和沿 $o$ 轴偏振的 $2\omega$ ,设振幅分别为 $E_1, E_2$ ,产生的三次谐波振幅为 $E_3$ ,在小信号近似条件下输出的三次谐波振幅为

$$E_3 \propto 3E_1 E_2 \left[ \frac{1 - \exp(-i\Delta k_1 l_1)}{\Delta k_1} + e^{-i(\Delta k_1 l_1 + \Delta k_0 d)} \frac{1 - \exp(-i\Delta k_2 l_2)}{\Delta k_2} \right], \quad (1)$$

式中的 $\Delta k_0 d = \Phi_3 - \Phi_2 - \Phi_1$ , $\Phi_3, \Phi_2, \Phi_1$ 分别为从第一块混频晶体出射的基频、倍频、三倍频光在进入第二块混频晶体前在空气中通过距离 $d$ 产生的相位变化, $\Delta k_0 = k_3 - k_2 - k_1$ 是三波在空气中的波矢之差,定义与晶体中完全相同。

计算可得到输出 $3\omega$ 的光强

$$I_{3\omega} \propto |6E_1 E_2|^2 \left[ \frac{\sin^2(\Delta k_1 l_1 / 2)}{\Delta k_1^2} + \frac{\sin^2(\Delta k_2 l_2 / 2)}{\Delta k_2^2} + 2 \frac{\sin(\Delta k_1 l_1 / 2) \sin(\Delta k_2 l_2 / 2)}{\Delta k_1 \Delta k_2} \cos\psi \right],$$

$$\psi = \Delta k_1 l_1 / 2 + \Delta k_2 l_2 / 2 - \Delta k_0 d, \quad (2)$$

(2)式表明晶体串接方案必须通过调节混频晶体之间的距离 $d$ 使 $\psi = 2m\pi$ ( $m$ 为整数),以补偿晶体中产

生的相位失配量,才能使输出的三次谐波光强最大。

例如最简单的情况: $l_1 = l_2, \Delta k_1 = -\Delta k_2$ 。当 $\Delta k_0 d = 2m\pi$ 时( $m$ 为整数),输出三次谐波的光强

$$I_{3\omega} \propto |6E_1 E_2|^2 \text{sinc}^2(\Delta k_1 l_1 / 2) \times (2l_1)^2, \quad (3)$$

(3)式表明晶体中的相位失配量已被有效地补偿,三次谐波转换效率与混频晶体的总长度 $2l_1$ 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厚度为 $l_1$ 的晶体相当。谐波转换过程的接收带宽与引起相位失配的晶体厚度成反比关系,因此晶体串接系统可以有效地提高三次谐波转换过程的接收带宽。

从(2)式可看出晶体串接三次谐波转换方案光路的两个特点:

1) 两块混频晶体之间的距离 $d$ 对三倍频转换效率影响很大,必须仔细控制。根据空气中正常色散折射率公式: $(n-1)10^7 = 2726.43 + 12.288/\lambda_2 + 0.3555/\lambda^4$ ( $n$ 为空气中的折射率,波长的单位为 $\mu\text{m}$ ),当混频晶体之间的距离 $d$ 为40 mm时, $\Delta k_0 d = 2\pi$ ,这表明无论晶体中相位失配量有多大,都可以通过改变混频晶体之间的距离而得到补偿。

2) 不同的晶体长度和相位失配量组合,在满足 $\Delta k_1 l_1 + \Delta k_2 l_2 = 0$ 条件时,其对混频晶体之间距离的要求大致相同。

### 2.2 高功率条件下的数值解分析

实际应用并不像小信号假设的那么简单,必须在高功率情况下对耦合波方程求数值解,以分析晶体之间的距离对实际混频过程的影响。

针对后面一组实验晶体组合作数值解分析,研究晶体之间距离与系统转换效率和接收带宽的关系。实验中采用的倍频晶体长度为10.3 mm,第一块混频晶体长度为9.5 mm,失配角为0.28 mrad(对应于匹配中心波长为-0.178 nm),第二块混频晶体厚度为5.5 mm,失配角为-0.38 mrad(对应于匹配中心波长为0.229 nm)。

图2表示的是在 $1.5 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 条件下,串接系统三次谐波转换效率随基频波长和混频晶体之间距离的变化,可以清晰地看到串接系统的转换效率和接收带宽随距离改变而发生明显的改变。

图3表示的是在混频晶体之间距离为20 mm和40 mm时的接收带宽对比。40 mm时系统接收半峰全宽为1.5 nm,而距离为20 mm时,由于回流效应导致系统接收带宽明显减小,只有0.4 nm。

图4是传统10.3 mm II类倍频/9.5 mm II类混频的偏振失配方案三次谐波转换效率随基频中心波

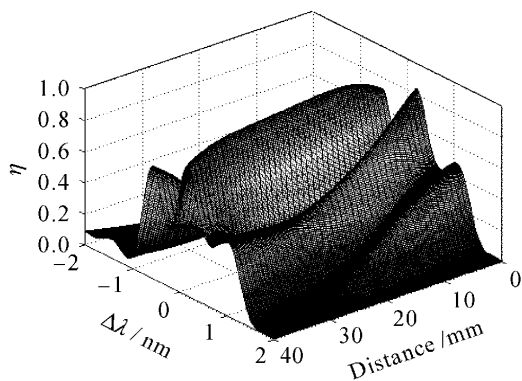


图2 三次谐波转换效率随晶体之间距离和光束中心波长的变化(1.5 GW/cm<sup>2</sup>)

Fig. 2 Third harmonic generation conversion versus the wavelength and the distance between two triples (1.5 GW/cm<sup>2</sup>)

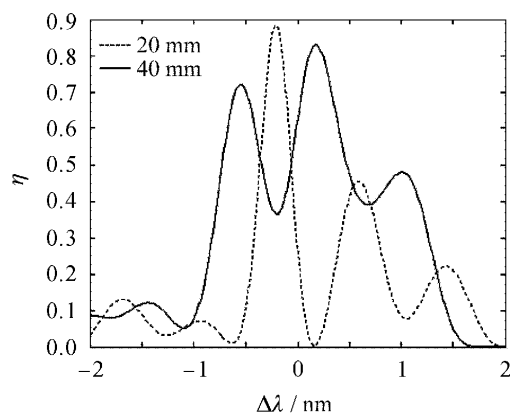


图3 在混频晶体之间距离不同时三次谐波转换效率随波长的变化(1.5 GW/cm<sup>2</sup>)

Fig. 3 Performance of the experimental scheme as a function of bandwidth at different distance between two triples (1.5 GW/cm<sup>2</sup>)

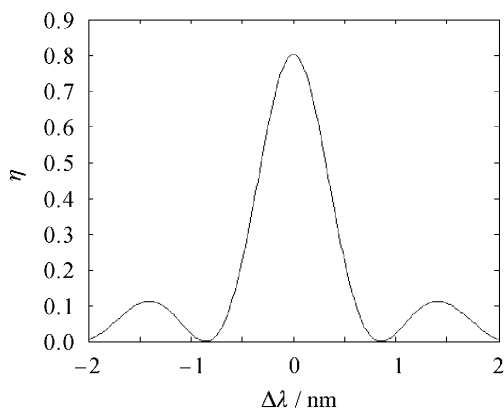


图4 传统 10.3 mm II 类倍频和 9.5 mm II 类混频偏振失配方案转换效率随波长的变化(1.5 GW/cm<sup>2</sup>)

Fig. 4 THG efficiency with 10.3 mm type II doublers/9.5 mm type II tripler versus the wavelength changes (1.5 GW/cm<sup>2</sup>)

长的变化,它的半峰全宽为0.7 nm。比较图3与图4可知串接系统确实有效地提高了三次谐波转换过程的接收带宽,但是晶体之间的距离对接收带宽影响很大。

图5是系统中心波长在±2 nm范围内,三倍频平均转换效率随晶体之间距离的变化,为了更清晰地表现规律性,晶体之间的距离变化范围为80 mm,相当于三波之间的相位差改变了两个周期。由图5可以看到晶体之间距离对宽带三次谐波转换效率影响巨大,其最高点处效率为32.5%,而最低点处只有17%。图4采用单块9.5 mm的混频晶体的平均转换效率只有18.8%。

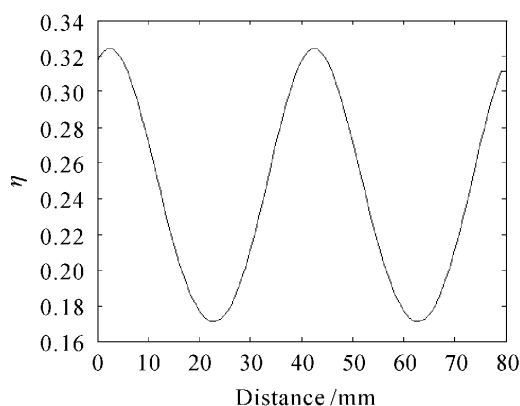


图5 系统的平均转换效率随混频晶体之间距离的变化  
Fig. 5 Average efficiency versus the distance between two triples

由上面的分析结果可知,晶体串接三次谐波转换系统可以有效地提高宽带三次谐波转换效率,但是晶体之间的距离必须控制好。

### 3 实验与结果分析

为了得到更可靠的数据,给高功率激光驱动器宽带三倍频系统设计作准备,在中国科学院上海光学精密机械研究所联合实验室的皮秒装置上做了实验,证实了串接系统对宽带三次谐波转换效率的提高以及混频晶体之间距离对三次谐波转换效率的影响。

图6为实验光路排布。实验中使用的啁啾激光脉冲,中心波长为1.054 μm,脉宽为350 ps,能量为4.5 J,谱线半峰全宽为3.5 nm,光束口径为62 mm,不同发次输出能量和脉宽有微小变化,输出的平均功率密度起伏控制在10%以内。输入的光束首先经过一个望远镜系统经过束腰和波面校正,输出光束口径为40 mm,再经过一个起偏器,使光束入射

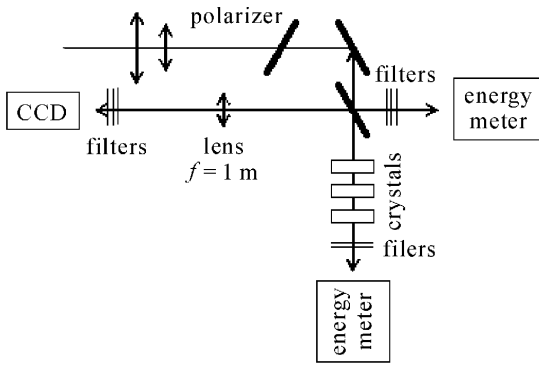


图 6 实验排布

Fig. 6 Experimental layout

到倍频晶体时,光束的线偏振方向与倍频晶体  $o$  轴成  $35^\circ$ , 激光在经过一块分光镜后,背向的反射光进入能量卡计,用来监视入射基频激光的能量,而晶体背向反射光经过一个 1 m 焦距的透镜收集进入 CCD,用来监视晶体的准直。晶体的通光口径为 45 mm,第一块为倍频 KDP 晶体,厚度为 10.3 mm,第二块为混频 KDP 晶体,厚度为 9.5 mm,偏离匹配位  $0.28 \text{ mrad}$ ,第三块为串接的混频 KDP 晶体,厚度为 5.5 mm,偏离匹配位  $-0.38 \text{ mrad}$ ,输出的三倍频光经过滤光片进入能量卡计,测量输出的能量。

在入射到倍频晶体表面激光的平均功率密度  $1.5 \text{ GW/cm}^2$  条件下,首先利用厚度为 9.5 mm 的 KDP 晶体混频,测量了 10.3 mm II 类倍频/9.5 mm II 类混频的传统设计三次谐波转换效率,测得最大的转换效率为 10%。随后采用双混频晶体方案,测量了转换效率随两块混频晶体之间距离的变化关系,如图 7,折线为实验数据点连线,光滑曲线为二次曲线拟合结果。图 7 显示,晶体之间的距离  $d$  对转换效率影响的变化趋势与理论结果很相似,当晶体之间距离为 45 mm 时转换效率只有 10%,与

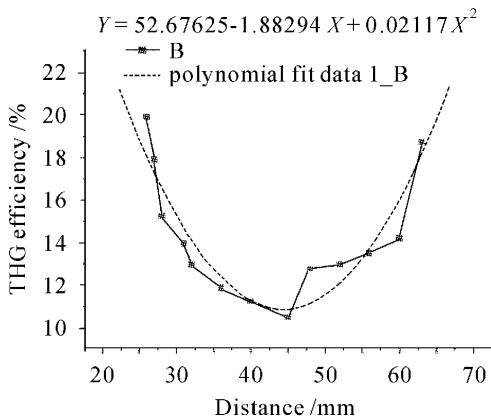


图 7 三倍频转换效率随两块混频晶体之间距离的变化

Fig. 7 THG conversion efficiency versus the distance

between the two mixers

25 mm处19.75%的效率相比,几乎下降了一半

理论研究表明三次谐波转换效率最低点应该在  $d = 23 \text{ mm}$ 或  $d = 63 \text{ mm}$ 处,而根据测量数据拟合,三次谐波转换效率最低点在  $d = 44.5 \text{ mm}$ 处,出现这种差别的原因是理论计算没有考虑晶体表面膜层引起的光束相位移动。根据实验结果可以计算出光束在晶体表面膜层传输过程中引起的附加相位移量为  $0.925\pi$ 。

### 4 结 论

利用耦合波方程,分别在小信号和高功率条件下研究了晶体串接三次谐波转换方案,并在实验上验证了该方案对混频晶体之间的距离要求。虽然实验中的三次谐波转换效率比较低,但实验结果有力地证实了前面有关晶体串接三次谐波转换系统的理论研究,为下一步设计优化工作的展开提供了重要的依据。实验中得到的另一个重要数据是光束在晶体表面传输过程中的附加相移量  $0.925\pi$ ,对高功率激光驱动器的晶体串接三次谐波转换方案的设计具有参考价值。

### 参 考 文 献

- 1 Qian Liejia, 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):577~581  
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):577~581
- 2 D. M. Pennington, M. A. Henesian, 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 J. R. Murray, J. R. Smith, R. B. Ehrich *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 scheme for high power Nd: glass laser [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. Barker *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
- 8 Peter W. Milonni, Jerome M. Auerbach, David Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams [C]. *SPIE*, 1997, 2633:230~241