

文章编号:1001-4322(2002)05-0731-04

# 高强度三倍频近场测量实验与模拟计算的误差分析\*

李恪宇<sup>1,2</sup>, 向 勇<sup>2</sup>, 冯 斌<sup>2</sup>, 张 彬<sup>1</sup>, 蔡邦维<sup>1</sup>, 马 驰<sup>2</sup>, 魏晓峰<sup>2</sup>, 程晓锋<sup>2</sup>, 师智全<sup>2</sup>

(1. 四川大学 光电科学系, 四川 成都 610064; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 测量了高强度三倍频实验的 1 光和 3 光的近场光束质量, 将测量和模拟计算所得到的 3 光近场光束质量作了对比, 重点对模拟计算得到的 3 光近场光束质量所存在的误差进行了探讨, 分析了现有的模拟计算程序中还未考虑到的影响 3 光光束质量的主要因素, 建议在以后的模拟计算程序中再进行优化设计, 并讨论了改善 3 光光束质量应采取的必要措施。

关键词: 高强度激光; 三倍频; 光束质量; 转换效率

中图分类号: O437.1 文献标识码: A

在 ICF 的三倍频实验中, 以往的研究多注重于高强度和高转换效率, 而有关高强度光束质量的研究在国内还未见实验报道。然而, ICF 的物理实验不但要求高的转换效率, 而且还应保持一定的三倍频光束质量。因为三倍频光束质量直接影响聚焦焦斑的尺寸大小以及由旁瓣造成的等离子体堵孔效应, 因此改善三倍频光束质量的研究已成为 ICF 驱动器研究的重要课题之一。本文将测量得到的 3 光近场光束质量与模拟理论计算得到的 3 光近场光束质量作了对比, 对高强度三倍频近场光束质量的模拟计算程序进行了校核, 重点分析了实验与模拟计算中存在的误差。分析结果表明, 入射基频光的光束质量及倍频晶体的光学质量是影响 3 光光束质量的主要因素, 也是模拟计算存在误差的主要原因, 从而讨论了改善 3 光光束质量的必要方法, 对三倍频器的进一步设计与应用有一定的指导意义。

## 1 实验原理

### 1.1 实验装置

根据高强度大口径高效率三次谐波的转换特性, 实验选用 KDP 晶体 type I / type II 角度失谐的三倍频方案如图 1 所示。该方案采用倍频和混频两个非线性过程来实现三倍频。经优化设计的 KDP 晶体参数为<sup>[1]</sup>: type I 类倍频晶体尺寸为 80mm × 80mm × 11mm, type II 混频晶体尺寸为 80mm × 80mm × 8.8mm。并采用目前最先进的技术, 在晶体的双表面直接镀膜溶胶-凝胶(sol-gel) 增透膜和防潮膜。使倍频晶体的 o 轴与混频晶体的 e 轴平行, 成水平放置, 并与主激光的偏振方向一致。实验装置示意图如图 2 所示。

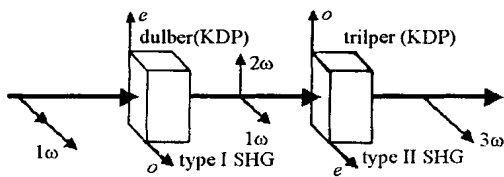


Fig. 1 Type I / type II angle-detuning third harmonic generation scheme

图 1 type I / type II 角度失谐的三倍频方案

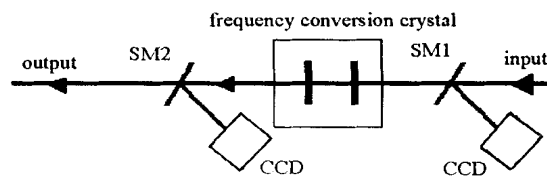


Fig. 2 Optical layout for measuring the high-intensity 3 near field beam quality

图 2 测量高强度三倍频近场光束质量的光路排布图

### 1.2 评价光束质量的参数

目前评价光束质量的标准很多, 也很不统一, 但由于我们所测量到的高强度 1 光和 3 光近场强度分布为平面波式高阶超高斯平顶脉冲, 为了能够采用现有的, 或即将开发出来的光束测量技术, 比较容易地精确测量光束横截面强度变化, 我们用光强对比度和光束强度调制度两个参数来评价 1 光与 3 光的近场光束质量。

\* 收稿日期: 2002-02-01; 修订日期: 2002-05-24

基金项目: 国家 863 惯性约束聚变基金资助课题(863-416-2)

作者简介: 李恪宇(1976-), 男, 湖南永州人, 硕士研究生, 主要研究方向强激光技术; 绵阳 919-988 信箱。

光强对比度:该参数可定量描述高强度激光束在传输过程中的小尺度自聚焦效应所引起的中、高频强度调制,其定义式为

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_i (I_i - I_{\text{avg}})^2}{N}} \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{avg}}$  为平均光强;  $I_i$  为测量点第  $i$  处的实测光强;  $N$  为取样点数;  $C$  是强激光光束质量的评价因子之一,理想光束的  $C=0$ 。

光束强度调制度:可以直观地描述入射激光束平均能量和最大能量之间的差异,其定义式为

$$M = I_{\text{max}} / I_{\text{avg}} \quad (2)$$

式中:  $I_{\text{max}}$  为最大光强。  $M$  将用于描述激光束宏观的近场分布均匀性,理想光束的  $M=1$ 。

## 2 实验结果与模拟计算结果比较分析

### 2.1 1 光和 3 光的近场光强分布测量

在 CCD 相机的监视下,先进行倍频和混频晶体匹配角的调整,使二倍频光和三倍频光达到最大,此时的倍频和混频晶体已调整至最佳状态,然后用 CCD 系统测量 1 光和 3 光的近场光强分布,得到两组典型近场光强分布的二维及三维图(图 3,图 4 为第一组;图 5,图 6 为第二组)如图 3~6 所示。将二维近场图去本底后,我们就可测量到真实的  $C$  和  $M$  值。相应的光束质量参数见表 1。

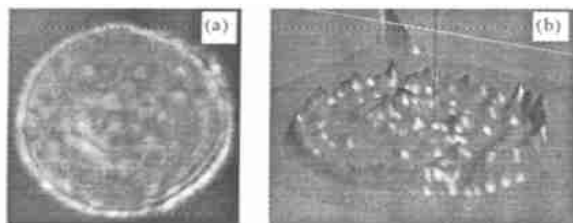


Fig. 3 1 near field intensity distribution in two (a) and three dimensions (b) when  $I_1 = 0.906 \text{ GJ/cm}^2$

图 3 当  $I_1 = 0.906 \text{ GJ/cm}^2$  时,1 光的近场光强二维(a)和三维(b)图

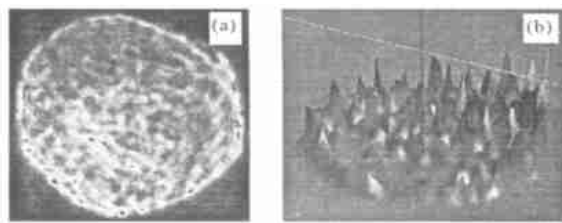


Fig. 4 3 near field intensity distribution in two (a) and three dimensions (b) when  $I_1 = 0.934 \text{ J/cm}^2$

图 4 当  $I_1 = 0.934 \text{ J/cm}^2$  时,3 光的近场光强二维(a)和三维(b)图

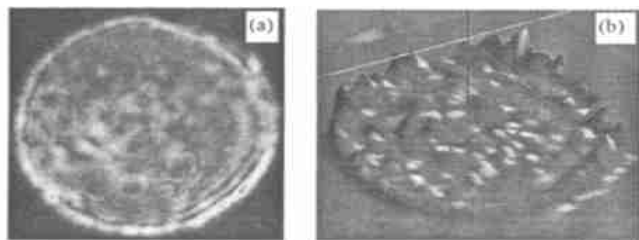


Fig. 5 1 near field intensity distribution in two (a) and three dimensions (b) when  $I_1 = 0.934 \text{ J/cm}^2$

图 5 当  $I_1 = 0.934 \text{ J/cm}^2$  时,1 光的近场光强二维(a)和三维(b)图

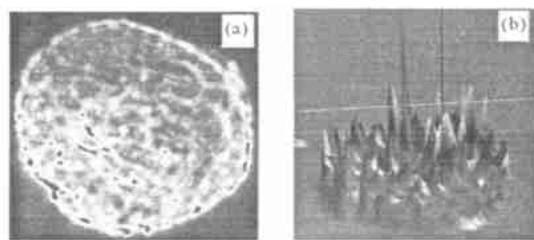


Fig. 6 3 near field intensity distribution in two (a) and three dimensions (b) when  $I_1 = 0.934 \text{ J/cm}^2$

图 5 当  $I_1 = 0.934 \text{ J/cm}^2$  时,3 光的近场光强二维(a)和三维(b)图

表 1 实验和计算得到的相应光束质量参数

Table 1 Measured result, by experiment and the calculated ones

	fluence / ( $\text{J cm}^{-2}$ )	$M$	$C$
I 1 (measured value)	0.906 6	2.975	0.285
I 3 (measured value)	0.339 6	6.392	0.554
3 (calculated value)	0.380 4	5.694	0.483
II 1 (measured value)	0.934 3	4.279	0.284
II 3 (measured value)	0.351 6	7.998	0.629
3 (calculated value)	0.391 7	6.805	0.580

实验结果表明,1 光经过谐波转换器后,光强调制明显加大,光束质量变差。经分析后我们认为,这主要是由于转换效率的空间非均匀性所导致的。具体来说,由于谐波转换效率是随着入射基频光能量密度的增加

而上升的,对于有强度调制的 1 光来说,其光强分布存在起伏,入射基频光能量密度高的区域三倍频转换效率高,反之则低,这就导致了 1 光的光强起伏在频率转换过程中被放大了。

## 2.2 模拟计算结果误差分析

将图 3(a)与图 5(a)中去本底后的 1 光近场图作为入射光,我们假设其位相均匀分布,模拟计算后得到 3 光的近场图如图 7 所示,相应的三倍频光束质量参数见表 1。在模拟计算中,我们考虑了如下的物理过程和参量:三波混频(二倍频及三倍频);傍轴衍射;走离效应(空间变化场);晶体体损耗及表面反射。分析表 1 的数据,将测量得到的 3 光近场光束质量(见图 4(a)与 5(a))与模拟计算得到的 3 光近场光束质量(见图 7)进行对比,考虑实验误差与计算误差,可见在误差允许的范围(15%)内,模拟计算结果与实验测量结果是相似的,这就证明了模拟计算程序的正确性。

但是,模拟计算结果比实验测得结果要好,两者还存在一定的差异,这主要是由于模拟计算结果是在假设入射波前无畸变、晶体质量和实验条件十分理想的情况下所得到的。通过分析,我们认为导致模拟计算结果与实验测量结果存在偏差,以及影响 3 光光束质量的主要因素有以下两个方面。

### 2.2.1 入射光的位相畸变

在模拟计算中,我们假设倍频晶体前的入射基频光的位相是均匀分布的。然而,基频光的振荡、放大及长程传输的非线性效应得到的位相畸变最后都集中到倍频晶体的入射光场波前上来,使得入射光波不再是理想的平面波或高斯波<sup>[2]</sup>,并最终对三次谐波转换产生较大的影响,这也是模拟计算结果与实验测量结果存在偏差的主要来源。随着基波畸变程度的加剧,原理想情况下的倍频条件已无法满足,转换效率随之下降,同时 3 光光强的横向分布出现严重的形变,光束质量变差<sup>[3]</sup>。具体来说,由于光的传播方向是垂直于波面进行传播的,当入射 1 光的波面因位相畸变而发生形变时,某些小区域的光束将会偏离预定的传播方向,则不满足 I, II 类匹配波矢量  $k$  与晶体光轴的夹角等于某一定值这一条件(即角度失谐),结果这一区域的三倍频转换效率大为降低,因此成为 3 光近场的弱区。从整个近场图来看,3 光光强分布的强弱对比则比 1 光更为明显了。

已有研究表明,焦斑特性几乎完全由光束传输过程中引入的位相噪声决定。1 光的位相噪声经过三倍频器后,在 3 光上将会被放大若干倍<sup>[4,5]</sup>。因此,应尽量地减小 1 光的位相噪声,否则会在 3 光放大若干倍后,使聚焦焦斑的尺寸及旁瓣急剧增大,从而造成等离子体堵孔。另外,位相噪声还会加剧激光强度分布不均匀性,最终降低靶面对激光能量的有效吸收,形成灾难性的后果。

### 2.2.2 KDP 晶体的非均匀性

转换效率的空间非均匀性源于倍频晶体折射率和透过率的非均匀性,这也会造成一定的模拟计算结果与实验测量结果误差。在模拟计算中,我们假设晶体的折射率和透过率为理想均匀体,然而,晶体的生长、加工及镀膜等过程都会导致晶体的折射率和透过率均匀性变差。这主要表现在以下几方面:(1)在晶体的生长中,可溶性杂质(如金属离子)进入晶体会降低晶体的透过率均匀性和光学均匀性<sup>[6]</sup>,从而在全光束口径内降低激光透过率的均匀性和转换效率的均匀性,最终加大 3 光的强度调制与光强对比;(2)过饱和度的大小、生长速度的快慢及生长的温度范围,都会对晶体的性能产生影响;(3)经抛光加工的晶体双表面的面形误差及纹波,是高频位相噪声的来源之一,它也会加大 3 光的光束调制;(4)三倍频器出射面上一些很微小的缺陷(比如由材料、加工、镀膜或灰尘所造成的),有可能形成 3 光光束中的热斑<sup>[7]</sup>;(5)晶体内的残余应力,会产生应力退偏以及应力双折射等,从而改变激光的偏振态和晶体折射率的均匀性,结果会降低转换效率和使光束质量变差。

所以,对于进一步的理论和实验研究来说,当进行优化设计高强度三倍频模拟计算程序时,要以上述分析为指导,充分考虑入射光的位相畸变和 KDP 晶体的非均匀性,并建立相应的物理模型来模拟它们,从而减小误差,使得模拟计算结果和实验测量结果尽量吻合。

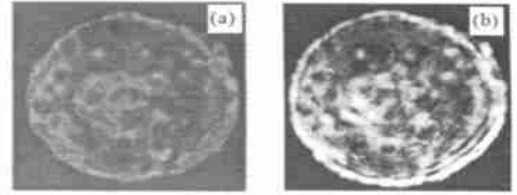


Fig. 7 3 intensity distribution in near field by simulating and calculating respectively when  $I_1 = 0.906 \text{ GJ/cm}^2$  (a) and  $I_1 = 0.934 \text{ GJ/cm}^2$  (b)

图 7 当  $I_1 = 0.906 \text{ GJ/cm}^2$  (a) 与  $I_1 = 0.934 \text{ GJ/cm}^2$  (b) 时,分别模拟计算得到的 3 光的近场图

### 3 改善 3 光束质量的必要方法

#### 3.1 改善入射基频光的光束质量

只有降低入射基频光的空间调制以及位相畸变程度,才能在全光束口径内保证转换效率的空间均匀性,从而有效地提高三倍频光束质量。通过对高功率激光系统的前端、预放大级及主放大器进行分析可知,入射基频光的空间调制和位相畸变噪声主要来源于入射前的光学元件质量、泵浦噪声和  $B$  积分效应等,我们可采取如下必要措施来改善入射基频光的光束质量:(1)提高光学加工的精度;(2)采用自适应光学技术,对静态像差和泵浦热畸变进行波前补偿,同时探索其它波前校正技术。

#### 3.2 改进倍频晶体的材料和加工质量

通过改善晶体质量,将会有助于激光通过倍频晶体后,出射的 3 光保持与 1 光相同的调制水平。特别要求晶体本身要纯,由于晶体的性能主要由其生长工艺决定,因此在生长过程中,要尽量地减少晶体内的杂质,提高晶体的透过率均匀性和光学均匀性,从而保证全光束口径内谐波转换效率的空间均匀性,最终提高 3 光的光束质量。除此之外,在晶体生长完成以后,退火是提高晶体性能的有效手段之一。K. Fujioka 等人也发现可以用退火的方法消除晶体内的残余应力,将快速生长的晶体的折射率均匀性大大提高<sup>[8]</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 秘国江,魏晓峰,蔡邦维,等.高通量条件下 KDP 晶体三倍频参数的优化[J].强激光与粒子束,1999,11(3):313—316. (Bi G J, Wei X F, Cai B W, et al. Optimizing of third harmonic generation parameters in KDP crystal under the high fluence. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, 11(3):313—316)
- [2] 何玉娟,蔡邦维,魏晓峰,等.位相扰动对三次谐波转换的影响[J].中国激光,2001,28(9):789—792. (He Y J, Cai B W, Wei X F, et al. Effect of phase ripples on the third harmonic generation. *Chinese Journal of Laser*, 2001, 28(9):789—792)
- [3] 高艳霞,范滇元.用统计光学方法分析位相畸变光束的倍频转换[J].强激光与粒子束,2000,12(6):677—680. (Gao Y X, Fan D Y. Statistical optical method applied to second harmonic generation of phase aberrated beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6):677—680)
- [4] Auerbach J M, Eimerl D, et al. Perturbation theory for frequency doubling and tripling of electric field amplitude and phase ripple[A]. *SPIE[C]*, 2633:655—660.
- [5] Auerbach J M, Barker C, Wenger P J, et al. Frequency tripling of beam noise[A]. *SPIE[C]*, 3047:381—386.
- [6] Zaitseva N, Carman L, Smolsky I, et al. The effect of impurities and supersaturation on the rapid growth of KDP crystal[J]. *J Crystal Growth*, 1998, 204:512.
- [7] Wenger P J, Barker C E, Caird J A, et al. Third-harmonic performance of the beamlet prototype laser[A]. *SPIE[C]*, 3047:370—380.
- [8] Fujioka K, Matsuo S, Kanabe T, et al. Optical properties of rapidly grown KDP crystal improved by thermal conditioning[J]. *J Crystal Growth*, 1997, 181:265.

## Analysis of the errors between measurement and simulation of near field for high-intensity THG

LI Ke-yu<sup>1,2</sup>, XIANG Yong<sup>2</sup>, FENG Bin<sup>2</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, CAI Bang-wei<sup>1</sup>,  
MA Chi<sup>2</sup>, WEI Xiao-feng<sup>2</sup>, CHENG Xiao-feng<sup>2</sup>, SHI Zhi-quan<sup>1</sup>

(1. Department of Optoelectronics of Sichuan University, Chengdu 610064, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** 1 and 3 near field beam quality for high-intensity THG have been measured, and 3 near field beam quality measured in experiments is compared with that simulated and calculated. Especially, the errors produced in simulation and calculation of near field beam quality for high-intensity THG are investigated. By analyzing major factors not being considered that affect 3 near field beam quality in simulation and calculation, it is suggested that the simulating code be improved. Indispensable methods are discussed to improve 3 near field beam quality. The article is of reference value for further study on theories and experiments.

**Key words:** high-intensity laser; third harmonic generation; beam quality; conversion efficiency.