

高强度三次谐波转换对光束质量的影响*

张彬 李强 蔡邦维

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

摘要 分别利用光强对比度和功率谱密度作为激光束的振幅调制和位相畸变的定量描述参量, 研究了在高功率条件下, 三次谐波转换过程对激光光束质量的影响, 详细分析了基频光的光束质量与三倍频光光束质量的定量变化关系.

关键词 三次谐波转换; 光束质量; 振幅调制; 位相畸变; 光强对比度; 功率谱密度

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A

0 引言

在惯性约束聚变(ICF)研究中, 谐波转换效率及谐波光束质量这两个问题一直是谐波转换研究的核心. 随着ICF研究的进一步深入, 考虑影响谐波转换效率及谐波光束质量的因素逐渐增多, 谐波转换的物理模型也越来越全面. 在ICF驱动器中, 由于光泵浦产生的动态热畸变、光学元件材料的非均匀性、光学元件表面加工误差引起的面形畸变、安装应变、空气灰尘、衍射效应以及非线性光学效应等因素的影响, 入射基频光不可能是完全理想的光束, 而总是存在一定的振幅调制和位相畸变, 从而对谐波光束质量产生明显的影响. 以往的工作在小扰动近似下, 利用微扰理论讨论了基频光和三倍频光的位相畸变和振幅调制的近似变化关系^[1,2], 但这种近似的变化关系存在一定的适用条件. 本文在高功率条件下, 采用IL/II类偏振失配的KDP晶体倍频方案, 分别利用光强对比度和功率谱密度(PSD)作为激光束的振幅调制和位相畸变的定量描述参量, 较为详细地研究了三次谐波转换时, 基频光光束质量对三倍频光光束质量的影响, 并给出相应的定量变化规律.

1 物理模型

1.1 谐波转换方程组

采用IL/II类偏振失配的KDP晶体实现二、三次谐波转换, 相应的耦合波方程组为^[3]

$$\frac{\partial^2 F_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_o}{\partial y^2} + 2in_o(\omega) \frac{\omega}{c} \frac{\partial F_o}{\partial z} = -\frac{\omega^2}{c^2} \bar{\chi}_1 F_e^* H \cdot \exp(i\Delta k_1 z) - i \frac{n_o(\omega)\omega}{c} \alpha_{1o} F_o \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 F_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F_e}{\partial y^2} + 2in_e(\omega) \frac{\omega}{c} \left[\frac{\partial F_e}{\partial z} + \rho_\omega(\theta) \frac{\partial F_e}{\partial y} \right] = -\frac{\omega^2}{c^2} \bar{\chi}_1 F_o^* H \exp(i\Delta k_1 z) - i \frac{n_e(\omega)\omega}{c} \alpha_{1e} F_e \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + 2in_e(\omega) \frac{2\omega}{c} \left[\frac{\partial H}{\partial z} + \rho_{2\omega}(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = -\frac{(2\omega)^2}{c^2} \bar{\chi}_1 F_o F_e \exp(-i\Delta k_1 z) - i \frac{2n_e(2\omega)\omega}{c} \alpha_2 H \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2in_e(\omega) \frac{\omega}{c} \left[\frac{\partial F}{\partial z} + \rho_\omega(\theta) \frac{\partial F}{\partial y} \right] = -\frac{\omega^2}{c^2} \bar{\chi}_2 H^* G \exp(i\Delta k_2 z) - i \frac{n_e(\omega)\omega}{c} \alpha_1 F \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + 2in_o(2\omega) \frac{2\omega}{c} \frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{(2\omega)^2}{c^2} \bar{\chi}_2 F^* G \cdot \exp(i\Delta k_2 z) - i \frac{n_o(2\omega)\omega}{c} \alpha_2 H \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + 2in_e(3\omega) \frac{3\omega}{c} \left[\frac{\partial G}{\partial z} + \rho_{3\omega}(\theta) \frac{\partial G}{\partial y} \right] = -\frac{(3\omega)^2}{c^2} \bar{\chi}_2 F H \exp(-i\Delta k_2 z) - i \frac{3n_e(3\omega)\omega}{c} \alpha_3 G \quad (6)$$

式(1)~(3)为二倍频耦合波方程组, 式(4)~(6)为三倍频耦合波方程组. 式中, F 、 H 、 G 分别是基频光、二倍频光和三倍频光的复振幅, $\rho_\omega(\theta)$ 、 $\rho_{2\omega}(\theta)$ 和 $\rho_{3\omega}(\theta)$ 是离散因子, $\bar{\chi}_1 = \bar{\chi}_2 = -\chi \sin 2\theta \cos 2\varphi$ 是二、三倍频过程的有效非线性系数, θ 是光传播方向 z 与光轴的夹角, φ 是方位角, Δk_1 和 Δk_2 是二、三倍频过程的位相失配量, $n_e(\omega)$ 、 $n_e(2\omega)$ 和 $n_e(3\omega)$ 是基频、二、三倍频 e 光的折射率, $n_o(\omega)$ 、 $n_o(2\omega)$ 和 $n_o(3\omega)$ 是基频、二、三倍频 o 光的折射率, α_1 、 α_2 、 α_3 分别是基频光、二、三倍频光的吸收系数, c 为真空中的光速.

方程组(1)~(6)式的初始条件为: $F_o = (2I_o/\epsilon_o c)^{1/2} \cos(\theta_p)$, $F_e = (2I_o/\epsilon_o c)^{1/2} \sin(\theta_p)$, $H_o = 0$, $G_o = 0$. 式中, 入射基频光线偏振方向与二倍频晶体 O 轴夹角 $\theta_p = 35.3^\circ$, ϵ_o 为介电常数, I_o 为入射基频

*国家863计划项目资助课题(2002AA845032); 四川省学术和技术带头人培养资金项目资助课题(2200306)
Tel: 028-85405363 Email: zhangbinff@sohu.com
收稿日期: 2003-06-13

光强度.

1.2 振幅调制和位相畸变的物理模型

在计算中,假设入射基频光为具有振幅调制和位相畸变的光束,即

$$A(x, y, 0) = A_0(x, y, 0) [1 + \Phi_a(x, y, 0)] \cdot \exp [i\Phi_p(x, y, 0)] \quad (7)$$

式中, $A(x, y, 0)$ 为入射基频光的复振幅, $A_0(x, y, 0)$ 为无振幅调制和位相畸变的理想光束场分布, $\Phi_a(x, y, 0)$ 和 $\Phi_p(x, y, 0)$ 分别为入射基频光的振幅调制和位相畸变函数. 本文中假设入射基频光的振幅调制和位相畸变函数分别为

$$\Phi_a(x, y, 0) = \sigma_a \text{Random}(-1, 1) \quad (8)$$

$$\Phi_p(x, y, 0) = \sigma_p \text{Random}(-1, 1) \quad (9)$$

式中, σ_a 和 σ_p 分别为振幅调制和位相畸变的幅度, $\text{Random}(-1, 1)$ 为随机函数.

1.3 评价光束质量的参量

目前,评价激光光束质量的标准很多,也很不统一. 在高功率激光驱动器中,对光束质量的要求与普通激光不同,衡量光束质量的参量也不相同. 本文采用以下两个参量来评价 1ω 光和 3ω 光的近场光束质量.

1.3.1 光强对比度

该参量可定量描述高强度激光束在传输过程中的小尺度自聚焦引起的中、高频强度调制,其定义为

$$C = \frac{1}{I_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{\sum_i (I_i - I_{\text{avg}})^2}{N}} \quad (10)$$

式中, I_{avg} 为平均光强, I_i 为第 i 个抽样点处的光强, N 为抽样点数. 理想光束的光强对比度 $C = 0$.

1.3.2 波前的功率谱密度描述

波前的功率谱密度 (PSD) 是一种基于傅里叶变换的描述波前信息的新方法,可对畸变波前的频域成分进行定量分析,其定义为波前 $\Phi(x, y)$ 各频率分量傅里叶频谱强度,即^[4]

$$\text{PSD}(v_x, v_y) = \frac{\phi(v_x, v_y) \phi^*(v_x, v_y)}{\Delta v_x \Delta v_y} \quad (11)$$

式中, v_x 和 v_y 为空间频率, Δv_x 和 Δv_y 为频率间隔, * 表示复共轭, $\phi(v_x, v_y)$ 为波前函数 $\Phi(x, y)$ 的傅里叶频谱形式,即

$$\phi(v_x, v_y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(x, y) \exp[-i2\pi(v_x x + v_y y)] \cdot dx dy \quad (12)$$

2 数值计算和结果分析

利用离散傅立叶变换和四阶 R-K 积分为基础的分步方法对耦合波方程进行了数值求解,编制了计算模拟程序,并利用美国 LLNL 的计算模拟结果^[3] 和 Beamlet 的实验结果^[5] 对所编制程序的正确性和有效性进行了校核,结果表明,我们的计算结果与 LLNL 的计算模拟和实验结果均相差不到 1%. 本文在计算中假设入射基频光为有振幅调制和位相畸变的超高斯光束,光束口径 $D = 20$ cm, 波长 $\lambda = 1054$ nm. 计算所用参量为:假设二倍频 KDP 晶体厚度 $L_1 = 0.72$ cm,失谐角 $\Delta\theta_s = 300$ μrad ,三倍频 KDP 晶体厚度 $L_2 = 0.78$ cm,失谐角 $\Delta\theta_t = 0$ μrad ,非线性系数 $\chi = 0.78$ pmV^{-1} ,基频光、二倍频光和三倍频光的吸收系数分别为 $\alpha_1 = 0.043$ cm^{-1} 、 $\alpha_2 = 0.005$ cm^{-1} 、 $\alpha_3 = 0.005$ cm^{-1} ,其它参量见文献[6].

图 1,2 分别给出了不同的振幅调制和位相畸变幅度情况下,在 $x = 0$ 处的基频光和三倍频光的位相分布和功率谱密度分布,入射基频光强度 $I_0 = 6.0$ GW/cm^2 , (a) $\sigma_a = 0, \sigma_p = 0.05$; (b) $\sigma_a = 0, \sigma_p = 0.2$; (c) $\sigma_a = 0.2, \sigma_p = 0.2$. 在图 1,2 中,实线对应于入射基频光,虚线对应于三倍频光. 图 3 给出了三倍频光的光强对比度 $C_{3\omega}$ 随基频光光强对比度 $C_{1\omega}$ 的变化曲线,图中实线对应于 $\sigma_p = 0$ 的情况,虚线对应于 $\sigma_p = 0.2$.

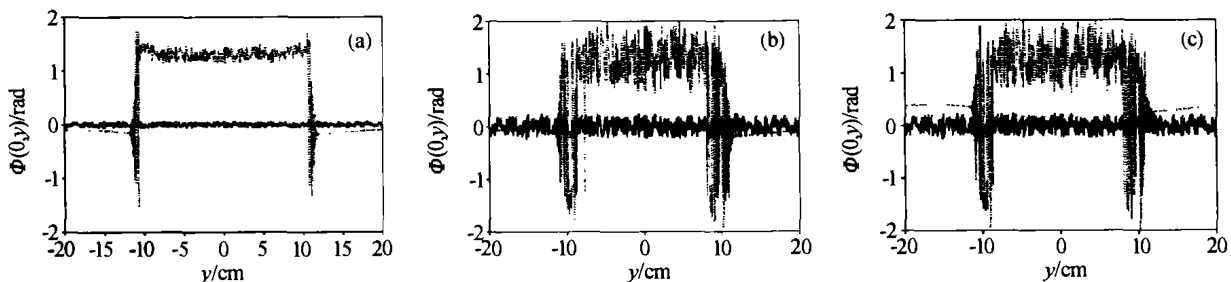


图 1 不同的振幅调制和位相畸变幅度情况下,在 $x = 0$ 处的基频光和三倍频光的位相分布

Fig. 1 The phase distributions at $x = 0$ of 1ω and 3ω fields for different amplitude modulations and phase perturbations

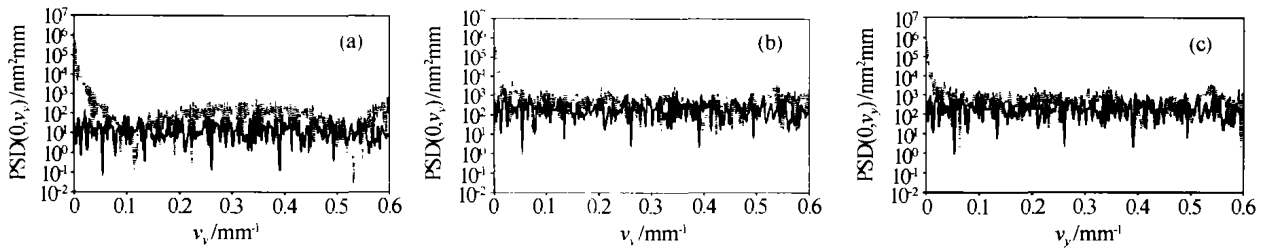


图 2 不同的振幅调制和位相畸变幅度情况下,在 $x=0$ 处的基频光和三倍频光的功率谱密度分布

Fig. 2 The power spectral density distributions of 1ω and 3ω fields for different amplitude modulations and phase perturbations

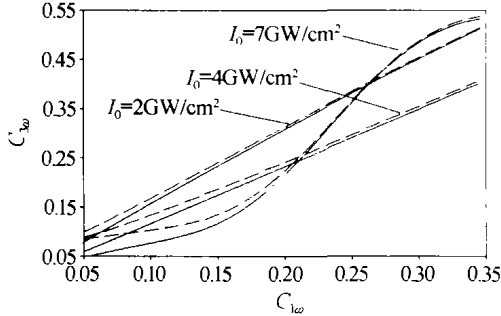


图 3 三倍频光的光强对比度 $C_{3\omega}$ 随基频光光强对比度 $C_{1\omega}$ 的变化曲线

Fig. 3 The intensity contrast ratio $C_{3\omega}$ of 3ω field versus the intensity contrast ratio $C_{1\omega}$ of 1ω field

分析图 1 可知,入射基频光的位相畸变经过三次谐波转换后得到明显地放大,光束质量明显变差.总的来说,三倍频光位相畸变的幅度近似为基频光位相畸变幅度的三倍左右,这一结论与文献[1]和[2]在小扰动条件下得到的结论是一致的.进一步比较图 1(b)和图 1(c)可以看出,入射基频光的振幅调制对三倍频光位相畸变存在一定的影响,但是相对于位相畸变的影响来说小得多.需要说明的是,图 1 中三倍频光的位相分布在光束边缘存在很大的起伏,这主要是由于衍射效应引起光束边缘处位相变化剧烈的缘故.根据图 2 给出的 PSD 曲线可知,在三次谐波转换过程中,基频光位相畸变的低频成分对三倍频光的位相畸变影响较大,相应的功率谱密度明显增大,而基频光位相畸变高频成分的影响相对较小,相应的功率谱密度变化不大,从而表明了三次谐波转换过程中,三倍频光的低频成分的增长幅度明显高于高频成分,这也是引起三倍频光的聚焦光斑尺寸比基频光焦斑尺寸明显增大的根本原因,该结论与文献[7]称作的“(mode-mixing)模式混合”效应也是一致的.由图 3 可知,一般来说,三倍频光的光强对比度将随着入射基频光的光强对比度的增大而明显增大.在 KDP 晶体厚度给定的情况下,对于入射基频光振幅调制较小时(例如, $C_{1\omega} < 0.1$),入射基频光与三倍频光的光强对比度之间几乎成线性关系,且入射基频光的光功率密度越大,经过三次谐波转换后,相应的线性关系曲线的斜率越小,振幅调制的增长倍数越小.为了说明产生上述结果的原因,图 4 给出了理想情况下($\sigma_A = \sigma_p =$

0)的三倍频光转换效率曲线.可以看出,当入射基频光振幅调制较小时,转换效率将随着入射基频光功率密度的增大而单调变化,且入射基频光功率密度越大,转换效率曲线的斜率越小,从而使相应的振幅调制的增长倍数越小.同时,从图 3 还可以看出,当入射基频光振幅调制较大时(例如, $C_{1\omega} > 0.1$),对于入射基频光功率密度较小情况(例如, $I_0 < 5 \text{ GW/cm}^2$),入射基频光与三倍频光的光强对比度之间仍然成线性关系,且相应的振幅调制放大倍数保持不变.然而,当入射基频光功率密度较高时(例如, $I_0 > 5 \text{ GW/cm}^2$),三倍频光的光强对比度与基频光的线性关系不再成立,此时,三倍频光振幅调制的增长倍数 $C_{3\omega}/C_{1\omega}$ 将随着入射基频光光强调度 $C_{1\omega}$ 的增大而明显增大.其原因在于:当入射基频光振幅调制较大时,对于入射基频光功率密度较高情况,入射基频光功率密度的变化幅度较大,相应的转换效率曲线的斜率将经历从正值到负值再到正值的变化(如图 4 所示),从而导致三倍频光的光强对比度与基频光的线性关系不再成立,且三倍频光的光强对比度明显增大.进一步由图 3 还可以看出,在三次谐波转换过程中,当 $C_{1\omega}$ 较小,即入射基频光光束质量较好时,位相畸变对三倍频光的光强对比度的影响较大,且入射基频光功率密度越高,影响越大,然而,随着入射基频光的振幅调制增大,位相畸变的影响明显减小,特别是对于 $C_{1\omega}$ 较大的情况,位相畸变的影响几乎可以忽略.

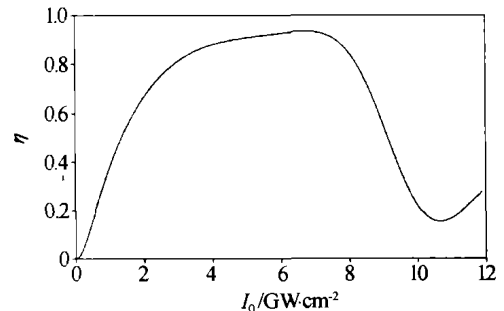


图 4 三倍频光转换效率随基频光强的变化曲线

Fig. 4 The conversion efficiency of 3ω field versus the intensity of 1ω field

3 结论

本文在高功率条件下,以 II/II 类偏振失配的

KDP 晶体倍频方案为例,较为详细地研究了三次谐波转换过程中激光光束质量的变化.通过数值计算模拟,分析讨论了基频光的光束质量(包括振幅调制和位相畸变)与三倍频光光束质量的定量变化关系.研究表明,入射基频光的位相畸变经过三次谐波转换后得到明显地放大,并且,三倍频光位相畸变的幅度近似为基频光位相畸变幅度的三倍左右.在三次谐波转换过程中,基频光位相畸变的低频成分对三倍频光的位相畸变影响更大,而高频成分的影响相对较小.三倍频光的光强对比度将随着入射基频光光强对比度的增大而明显增大.当入射基频光功率密度较小时,入射基频光的光强对比度与三倍频光的光强对比度几乎成线性关系,且相应的放大倍数随着入射基频光功率密度的增大而减小.然而,当入射基频光功率密度较高时,三倍频光光强对比度与基频光的线性关系不再成立.在三次谐波转换过程中,当入射基频光的振幅调制较小时,位相畸变对三倍频光的光强对比度的影响较大,而当入射基频光的振幅调制较大时,位相畸变的影响相对较小.

参考文献

1 Auerbach J M, Eimerl D, Milam D, *et al.* Perturbation theory

- for electric-field amplitude and phase ripple transfer in frequency doubling and tripling. *Appl Opt*, 1997, **36**(3): 606 ~ 612
- 2 钱列加, 邓锡铭. 三倍频激光束特性传输变换的近似模型. *光学学报*, 1996, **16**(9): 1223 ~ 1226
Qian L J, Deng X M. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(9): 1223 ~ 1226
- 3 Eimerl D, Auerbach J M, *et al.* Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystals. I. Narrowband pump fields. *J of Mod Opt*, 1995, **42**(5): 1037 ~ 1067
- 4 Elson J M, Bennett J M. Calculation of the power spectral density from surface profile data. *Appl Opt*, 1995, **34**(1): 201 ~ 208
- 5 Wegner P J, Auerbach J M, Barker C E, *et al.* Frequency converter development for the national ignition facility. *Proc SPIE*, 1998, **3492**: 392 ~ 405
- 6 Craxton R S, Jacobs S D, Rizzo J E, *et al.* Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1 μm laser radiation. *IEEE J QE*, 1981, **QE-17**(9): 1782 ~ 1785
- 7 Williams W H, Auerbach J M, Henesian M A, *et al.* Modeling Characterization of the National Ignition Facility Focal Spot. *Proc SPIE*, 1999, **3264**: 93 ~ 104

Influence of High-power Third Harmonics Conversion on Laser Beam Quality

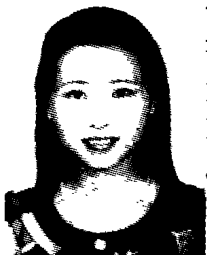
Zhang Bin, Li Qiang, Cai Bangwei

College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064, China

Received date: 2003-06-13

Abstract By using the intensity contrast ratio and the power spectral density (PSD) as the quantitatively describing parameters of amplitude modulation and phase perturbation, respectively, the effect of third harmonics conversion on laser beam quality under high power condition has been studied. The transformation relation between the beam quality of fundamental field and tripling field has been discussed quantitatively.

Keywords Third harmonics conversion; Beam quality; Amplitude modulation; Phase perturbation; Intensity contrast ratio; Power spectral density (PSD)



Zhang Bin was born in September, 1969. She received the B. S., M. S., and Ph. D. degrees from Sichuan University, Chengdu, China, in 1990, 1993, and 1998, respectively. She is now a professor in the College of Electronic Information, Sichuan University. Her research area includes laser physics and laser technology, laser beam propagation and transformation, laser beam quality control, nonlinear optics.