

文章编号: 0258-7025(2001)09-0789-04

位相扰动对三次谐波转换的影响*

何钰娟 蔡邦维**
(四川大学光电系 成都 610064)

魏晓峰 马驰 袁静
(中国工程物理研究院八所激光技术工程部 绵阳 621900)

摘要 采用 I/II 角度失谐的三倍频方案,以超高斯光束作为入射基频光场,建立了位相扰动光束三次谐波转换的理论模型,并作数值模拟计算。结果表明,位相扰动不仅影响二、三倍频光的转换效率,还对各谐波光束质量产生影响。

关键词 位相扰动,六阶超高斯光束,三次谐波转换

中图分类号 O 437.1 **文献标识码** A

Effect of Phase Ripples on the Third Harmonic Generation

HE Yu-juan¹ CAI Bang-wei¹ WEI Xiao-feng² MA Chi² YUAN Jing²

¹Optoelectronics Department, Sichuan University, Chengdu 610064
²Institute of Nuclear Physics & Chemistry, CAEP, Mianyang 621900

Abstract Using type I/type II angle-detuning scheme for third harmonic generation, the effect of phase ripple on the characteristic of third harmonic conversion is considered and calculated when the input fundamental field is super-Gaussian beam. The results show that phase ripple affects both doubling and tripling efficiency and beam quality of harmonic waves.

Key words phase ripple, super-Gaussian beam, third harmonic conversion

1 引言

现今的谐波转换理论大都限于平面波和高斯分布的理想光束,不适用于位相扰动的激光束。而在实际谐波转换过程中,一方面,因为高功率钕玻璃泵变激光系统驱动器前端预放和主放光程很长,含有几百个光学元件,这些元件的材料缺陷、制造误差、安装应变等因素致使入射基频光不可能是完全理想的光束,总会存在一定的位相畸变;另一方面,即使入射抽运光具有非常好的光束质量,由于晶体内部不均匀性、抛光表面粗糙度及加工波纹度等因素的存在,也会引起入射抽运光场波前的位相扰动^[1]。为了模拟这种情况,本文对具有位相扰动超高斯光束三次谐波转换特性的走向进行了计算,其结果对高功率激光器倍频系统的工程设计具有一定的参考价值。

2 物理模型

本文采用 I/II 类匹配的 KDP 晶体进行二、三次谐波转换,对具有位相扰动的超高斯光束作数值模拟计算。

2.1 耦合波方程组

对于 I 类匹配二倍频,耦合波方程组为

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + 2in_e(2\omega) \frac{2\omega}{c} \left[\frac{\partial H}{\partial z} + \rho_{2\omega}(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right] = -\frac{(2\omega)^2}{2c^2} \bar{\chi} F^2 \exp(-i\Delta kz) - i \frac{2n_e(2\omega)\omega}{c} a_2 H \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2in_o(\omega) \frac{\omega}{c} \frac{\partial F}{\partial z} = -\frac{\omega^2}{c^2} \bar{\chi} F^* H \exp(i\Delta kz) - i \frac{n_o(\omega)\omega}{c} a_1 F \quad (2)$$

其中, F, H 分别为 1ω 和 2ω 的复振幅, $\rho_{2\omega}(\theta) =$

$\frac{1}{n_e(2\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(2\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 为离散因子; $\bar{\chi} = -\chi \sin\theta \sin 2\phi$ 为非线性系数; $\Delta k = (2\omega/c)[n_e(2\omega, \theta) - n_o(\omega)]$ 为位相失配置;以上三式中, θ 为光传播

* 国家 863 惯性约束泵变领域资助课题。

** 通信联系人。

收稿日期:2000-07-10; 收到修改稿日期:2000-09-06

方向 x 与光轴的夹角, $\phi = 45^\circ$ 为方位角, $n_e(2\omega, \theta)$ 为二倍频 e 光的折射率, $n_o(\omega)$ 为基频 o 光的折射率, α_1, α_2 分别为 1ω 光和 2ω 光的吸收系数。

对于 II 类匹配三倍频, 耦合波方程为

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} + 2in_o(\omega) \frac{\omega}{c} \left[\frac{\partial F}{\partial x} + \rho_{1o}(\theta) \frac{\partial F}{\partial y} \right] = -\frac{(\omega)^2}{c^2} \bar{\chi} H^* G \exp(i\Delta kz) - i \frac{n_e(\omega)\omega}{c} \alpha_1 F \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + 2in_o(2\omega) \frac{2\omega}{c} \frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{(2\omega)^2}{c^2} \bar{\chi} F^* G \exp(i\Delta kz) - i \frac{2n_e(2\omega)\omega}{c} \alpha_2 H \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + 2in_o(3\omega) \frac{3\omega}{c} \left[\frac{\partial G}{\partial x} + \rho_{3o}(\theta) \frac{\partial G}{\partial y} \right] = -\frac{(3\omega)^2}{c^2} \bar{\chi} FH \exp(-i\Delta kz) - i \frac{3n_e(3\omega)\omega}{c} \alpha_3 G \quad (5)$$

其中, F, H 和 G 分别为 $1\omega, 2\omega$ 和 3ω 的复振幅,

$$\rho_{1o}(\theta) = \frac{1}{n_o(\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(\omega, \theta)}{\partial \theta} \quad \text{和} \quad \rho_{3o}(\theta) =$$

$$\frac{1}{n_o(3\omega, \theta)} \frac{\partial n_e(3\omega, \theta)}{\partial \theta} \quad \text{为离散因子; } \bar{\chi} = -$$

$\chi \sin 2\theta \cos 2\phi$ 为非线性系数; $\Delta k = (\omega/c)[3n_e(3\omega, \theta) - n_e(\omega, \theta) - 2n_e(2\omega)]$ 为位相失配量; 以上三式中, θ 为光传播方向 x 与光轴的夹角, $\phi = 0^\circ$ 为方位角, $n_e(\omega, \theta)$ 和 $n_e(3\omega, \theta)$ 分别为基频 e 光和三倍频 e 光的折射率, $n_o(2\omega)$ 为二倍频 o 光的折射率, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 分别为 1ω 光, 2ω 光和 3ω 光的吸收系数。

在以上的方程中, 初始条件为: $F_0 = (2I_0/\epsilon_0 C)^{1/2}$; $H_0 = 0$; $G_0 = 0$ 。

2.2 位相扰动

在计算中, 假设入射基频光场为六阶超高斯光束

$$A(x, y, 0) = A_0 \exp\left[-\left(\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right)^3\right]$$

对此光场所加位相扰动为正弦位相扰动, 即

$$\Phi(x, y) = 2\pi\sigma[\sin(2\pi x/l) + \sin(2\pi y/l)]$$

其中, σ 为调制深度, l 为调制周期; 在计算中 $l = 2$ mm。

以上方程采用以离散傅里叶变换和四阶龙格-库塔方法为基础的分步法来求解。具体步骤见参考文献[2]。

3 计算结果及分析

位相扰动的存在不仅降低了二、三倍频转换效率,

还降低了转换后各谐波的光束质量。

3.1 位相扰动对倍频转换效率的影响

位相扰动对二、三倍频转换效率有一定的影响。当调制周期一定时, 就表现为位相调制深度的影响。位相扰动量是一个小量, 参照美国 LLNL 发表的理论数据和实验数据^[3], 我们对 σ 在 0.01 至 0.1 范围内的变化进行计算。所得结果如下:

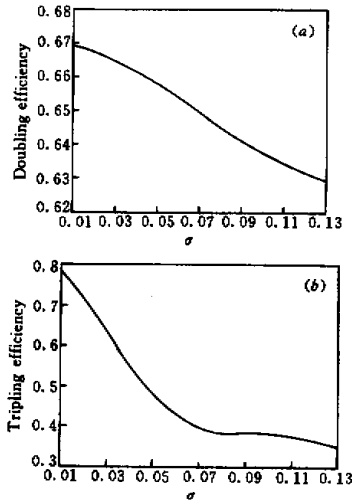


图1 转换效率随位相调制深度 σ 的变化
(a) 二倍频; (b) 三倍频

Fig.1 Conversion efficiency as a function of phase modulation strength σ

(a) second harmonic; (b) third harmonic

图1(a), (b) 分别是二、三倍频转换效率随调制深度 σ 的变化曲线。从图上可以看出, 随着 σ 的增大, 二、三倍频转换效率均相应减小。在图1(a)中, 当 σ 从 0.01 增大到 0.13, 二倍频效率降低了大约 4%。同样, 在图1(b)中, $\sigma = 0.01$ 时, 效率为 78.4%; σ 增至 0.07, 相应的转换效率下降为 40%; 当 σ 再增至 0.13, 效率再次下降到 35%。当 σ 在 0.01 到 0.13 范围内变化时, 三倍频转换效率总共下降了 43.4%。由以上分析可知, 位相扰动对三倍频转换效率的影响比对二倍频的影响更大。

3.2 位相扰动对三倍频光束质量的影响

在三次谐波转换中, 位相扰动不仅影响倍频效率, 同时也影响谐波光强分布从而影响其光束质量。

图2(a)~(e) 分别为入射基频光空间功率密

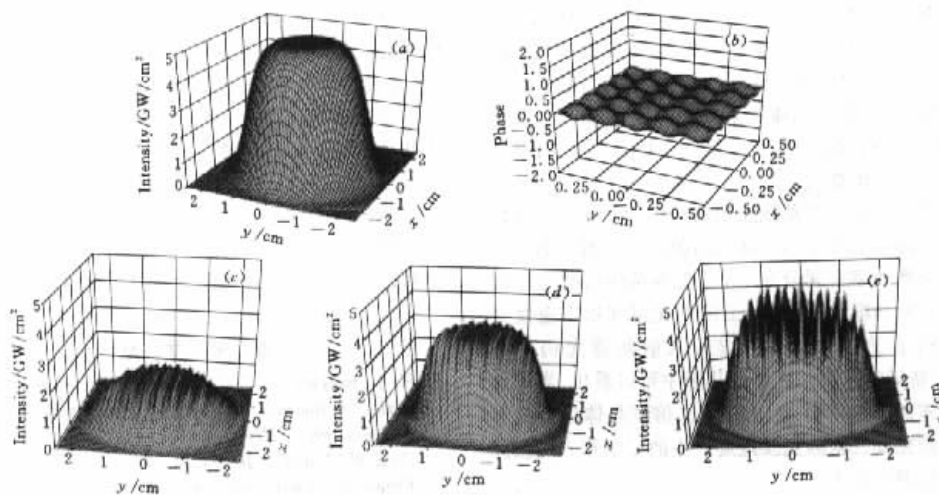


图2 (a) 入射基频光空间功率密度分布; (b) $\sigma = 0.01$ 的位相分布图; (c) $\sigma = 0.01$ 时, 从二倍频晶体出射的剩余基频光空间功率密度分布; (d) $\sigma = 0.01$ 时, 从二倍频晶体出射的二倍频光空间功率密度分布; (e) $\sigma = 0.01$ 时, 三倍频光空间功率密度分布

Fig. 2 (a) Intensity profile of input fundamental field; (b) Phase profile with $\sigma = 0.01$; (c) Intensity profile of fundamental field emerging from the doubling crystal with $\sigma = 0.01$; (d) Intensity profile of second harmonic field emerging from the doubling crystal with $\sigma = 0.01$; (e) Intensity profile of third harmonic field emerging with $\sigma = 0.01$

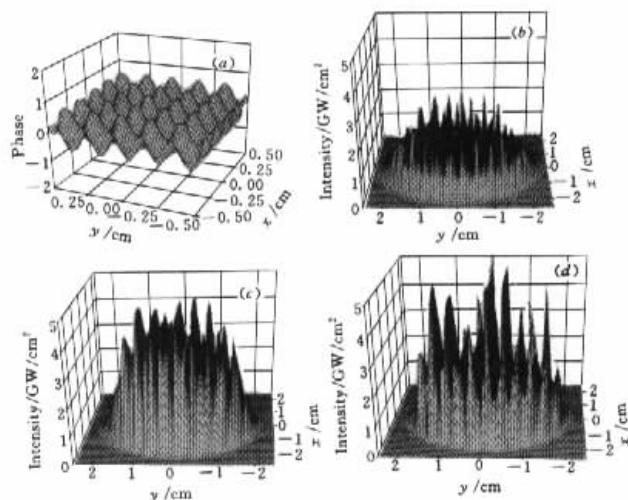


图3 (a) $\sigma = 0.05$ 的位相分布; (b) $\sigma = 0.05$ 时, 从二倍频晶体出射的剩余基频光空间功率密度分布; (c) $\sigma = 0.05$ 时, 从二倍频晶体出射的二倍频光空间功率密度分布; (d) $\sigma = 0.05$ 时, 三倍频光空间功率密度分布

Fig. 3 (a) Phase profile with $\sigma = 0.05$; (b) Intensity profile of fundamental field emerging from the doubling crystal with $\sigma = 0.05$; (c) Intensity profile of second harmonic field emerging from the doubling crystal with $\sigma = 0.05$; (d) Intensity profile of third harmonic field with $\sigma = 0.05$

度分布, $\sigma = 0.01$ 时的位相分布、从二倍频晶体出射的剩余基频光空间功率密度分布和三倍频光空间功率密度分布。从图中可以看出, 对入射光施加如图 2(b) 所示的位相调制后, 这种位相调制引起了光强的调制。从二倍频晶体出射的剩余基频光及二倍频光均有微小的强度调制, 三倍频光也有调制, 且比二倍频调制深度加大。

当继续将入射基频光场的位相调制深度增加到 $\sigma = 0.05$ 时(图 3(a)), 从二倍频晶体出射的剩余基频光空间功率密度分布、从二倍频晶体出射的二倍频光空间功率密度分布、三倍频光空间功率密度分布分别示于图 3(b)~(d)。入射基频光仍为图 2(a) 所示的超高斯光场。从图中可以看出, 当对入射光施加位相调制加大后, 从二倍频晶体出射的剩余基频光及二倍频光及最终产生的三倍频光的强度调制皆随之加大。

4 结 论

通过以上的分析可以得到, 入射光场波前上的

位相调制对三次谐波转换的影响很大。随着调制深度的增大, 不仅引起三倍频转换效率下降, 而且从三倍频器出射的三倍频光功率密度的空间调制也加大, 光束质量也更差。因此, 为了保持三次谐波转换效率及光束质量, 要尽可能减小入射光波前上的位相扰动。这就对晶体及其他光学元件的加工提出了严格的精度要求。在文献[3]中, 理论计算分析结果与实验数据曲线相一致。而在本文的计算中, 设调制周期一定, 但其所得结果已能证明位相扰动对三倍频转换效率及相应的谐波光束质量的影响趋势。

参 考 文 献

- 1 H. J. Bakker, P. C. M. Planken, L. Kuipers *et al.*. Phase modulation in second-order nonlinear-optical processes. *Phys. Rev. A*, 1990, 42(7):4085~4101
- 2 Peter W. Milonni, Jerome M. Auerbach, David Eimerl. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams. *SPIE*, 1997, 2633:230~241
- 3 D. Eimerl, J. M. Auerbach, P. W. Milonni. Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystals I. Narrowband pump fields. *J. Modern Optics*, 1995, 42(5):1037~1067