

时间位相调制对高强度三次谐波转换的影响*

李强¹ 张彬¹ 蔡邦维¹ 粟敬钦² 马驰² 魏晓峰²

(1 四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要 在惯性约束聚变研究中,为了利用光谱色散进行光束匀滑以及抑制 KDP 晶体等大口径光学元件中的横向受激布里渊散射,通常需要对激光脉冲进行时间位相调制. 详细讨论了高功率条件下 KDP 晶体 I/II 角度失谐三倍频方案中,时间位相调制对三次谐波转换效率和脉冲频谱的影响. 研究表明,时间位相调制会导致三次谐波转换效率明显下降.

关键词 三次谐波转换;时间位相调制;群速度失配;转换效率

中图分类号 O437.1 **文献标识码** A

0 引言

在高功率钕玻璃激光器驱动的惯性约束聚变(ICF)研究中,由于靶对短波长激光的吸收比长波长激光的吸收更有效,因此,需要采用 KDP 晶体进行高功率高效率三次谐波转换. 在高强度三次谐波转换过程中影响转换效率和光束质量的因素有很多,以往的工作主要研究了位相匹配条件、晶体长度以及空间分布的位相畸变和振幅调制等因素的影响^[1-3]. 然而,在实际工作中,为了实现对靶丸的均匀辐照采用了光谱色散匀滑(SSD)的时间域光束匀滑技术,而 SSD 方案引入了时间位相调制使激光脉冲具有一定的频谱宽度^[4]. 同时,为了抑制 KDP 晶体等大口径光学元件中的横向受激布里渊散射(TSBS),也需要对激光脉冲进行时间位相调制使其具有适度的频谱宽度^[5]. 对于 ns 量级光脉冲来说,当入射基频光是窄带脉冲时,群速度失配对高强度三次谐波转换过程的影响是很小的,但是,当引入时间位相调制而使入射基频光具有一定的频谱宽度后,群速度失配的影响则不能忽略.

因此,本文详细研究了在高功率条件下采用大口径 KDP 晶体对 ns 量级光脉冲进行三次谐波转换时,入射基频光的时间位相调制引起的群速度失配对三次谐波转换效率和脉冲波形的影响. 论文有关结果对三倍频器的优化设计与应用有一定的参考价值,并进一步为宽频带倍频方案的研究打下了基础.

1 物理模型

1.1 频率转换模型

本文采用 I/II 角度失谐方案实现二、三次谐波转

换,倍频采用 I 类匹配的 KDP 晶体,混频选用 II 类匹配的 KDP 晶体,通过角度失谐影响二次谐波的转换效率控制三次谐波转换过程中的光子混合比,来实现较高的三次谐波转换效率,如图 1 所示. 除考虑了光场的近轴衍射、离散效应、吸收等因素外,还进一步考虑了时间脉冲波形对谐波转换过程的影响.

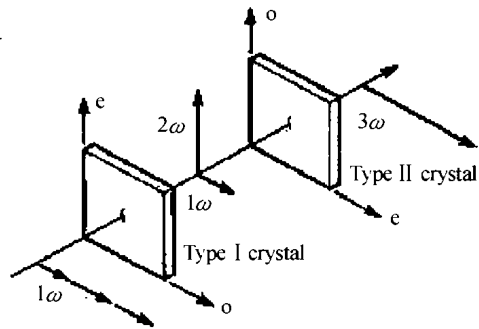


图 1 I/II 角度失谐三次谐波转换方案
Fig. 1 I/II type angle-detuning scheme of third harmonic generation

对于 I 类匹配二倍频,耦合波方程组为^[6,7]

$$\frac{\partial A_{1o}}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \frac{\partial A_{1o}}{\partial t} = \frac{i}{2k_1} \nabla^2 A_{1o} + \frac{i\omega}{2n_1 c} \chi A_{2e} A_{1o}^* e^{i\Delta k z} - \frac{1}{2} \alpha_1 A_{1o} \quad (1)$$

$$\frac{\partial A_{2e}}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \frac{\partial A_{2e}}{\partial t} = \frac{i}{2k_2} \nabla^2 A_{2e} - \rho_2 \frac{\partial A_{2e}}{\partial y} + \frac{i\omega}{2n_2 c} \chi A_{1o}^2 e^{-i\Delta k z} - \frac{1}{2} \alpha_2 A_{2e} \quad (2)$$

式中, A_{1o} 、 A_{2e} 基频光和二倍频光的复振幅, v_i ($i=1, 2$)

是基频光和二倍频光的群速度, $k_i = \frac{n_i \omega_i}{c}$ ($i=1, 2$)

$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, $\rho = \frac{1}{n_2(\omega, \theta)} \frac{\partial n_2(\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 是离散因子,

θ 是光传播方向 z 与光轴的夹角, $\bar{x} = -x \sin \theta \sin 2\phi$ 是有效非线性系数, $\phi = 45^\circ$ 是方位角, Δk 是位相失配量, n_1 是基频光的折射率, n_2 是二倍频光的折射率, α_1 、 α_2 是基频光和二倍频光的吸收系数, c 为真

* 国家高技术 863 惯性约束聚焦领域资助项目(2002AA845032)
Tel: 028-85405363 Email: lichenqiang@yeah.net
收稿日期: 2003-06-30

空中的光速.

对于 II 类匹配三倍频, 耦合波方程组为

$$\frac{\partial A_{1e}}{\partial z} + \frac{1}{v_1} \frac{\partial A_{1e}}{\partial t} = \frac{i}{2k_1} \nabla^2 A_{1e} - \rho_1 \frac{\partial A_{1e}}{\partial y} + \frac{i\omega}{2n_1c} \chi A_{3e} A_{2e}^* e^{i\Delta k z} - \frac{1}{2} \alpha_1 A_{1e} \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_{2e}}{\partial z} + \frac{1}{v_2} \frac{\partial A_{2e}}{\partial t} = \frac{i}{2k_2} \nabla^2 A_{2e} + \frac{i2\omega}{2n_2c} \chi A_{3e} A_{1e}^* e^{i\Delta k z} - \frac{1}{2} \alpha_2 A_{2e} \quad (4)$$

$$\frac{\partial A_{3e}}{\partial z} + \frac{1}{v_3} \frac{\partial A_{3e}}{\partial t} = \frac{i}{2k_3} \nabla^2 A_{3e} - \rho_3 \frac{\partial A_{3e}}{\partial y} + \frac{i3\omega}{2n_3c} \chi A_{1e} A_{2e} e^{i\Delta k z} - \frac{1}{2} \alpha_3 A_{3e} \quad (5)$$

式中, A_{1e} 、 A_{2e} 、 A_{3e} 分别是基频光、二倍频光和三倍频光的复振幅, v_i ($i=1, 2, 3$) 是基频光、二倍频光和三

倍频光的群速度, $k_i = \frac{n_i \omega_i}{c}$ ($i=1, 2, 3$), $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, $\rho_1 = \frac{1}{n_1(\omega, \theta)} \frac{\partial n_1(\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 和 $\rho_3 = \frac{1}{n_3(\omega, \theta)}$

$\frac{\partial n_3(\omega, \theta)}{\partial \theta}$ 是离散因子, θ 是光传播方向 z 与光轴的

夹角, $x = -x \sin 2\theta \cos 2\phi$ 是有效非线性系数, $\phi = 0^\circ$ 是方位角, Δk 是位相失配量, n_1 是基频光的折射率, n_2 是二倍频光的折射率, n_3 是三倍频频光的折射率, α_1 、 α_2 、 α_3 分别是基频光、二倍频光和三倍频光的吸收系数, c 为真空中的光速.

方程 (1) ~ (5) 的初始条件为: $A_{1e} = (2I/\epsilon_0 c)^{1/2}$, $A_{2e} = 0$. 式中, ϵ_0 为介电常数, I 为入射基频光功率密度.

表 1 KDP 晶体中 o 光和 e 光的群速度 ($\times 10^{10}$ cm/s)

| $\nu_{1o}(1.054\mu\text{m})$ | $\nu_{1e}(1.054\mu\text{m})$ | $\nu_{2o}(0.527\mu\text{m})$ | $\nu_{2e}(0.527\mu\text{m})$ | $\nu_{3o}(0.351\mu\text{m})$ | $\nu_{3e}(0.351\mu\text{m})$ |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 2.0067629 | 2.0536185 | 1.9819041 | 2.0385370 | 1.9571231 | 2.0169742 |

图 2(a)、2(b) 分别给出了入射基频光在无时间位相调制和有时间位相调制时的功率谱分布. 图 3 给出了入射基频光有时间位相调制时三倍频光的功率谱分布. 计算参数为: 入射基频光功率密度 $I_0 = 5 \text{ GW/cm}^2$, 调制深度 $\sigma = 1.0$, 调制频率 $f = 20 \text{ GHz}$. 入射基频光的频谱宽度 $\Delta\nu \cong 2\sigma f$, 可以通过改变调制深度和调制频率来控制频谱宽度. 图 4 和图 5 分别给出了不同频谱宽度下二倍频转换效率和三倍频转换效率随入射光功率密度变化的曲线. 图 6 给出了三倍频转换效率随入射基频光的频谱宽度变化的曲线, 入射光功率密度 $I_0 = 5 \text{ GW/cm}^2$, $f = 20 \text{ GHz}$.

对比图 2(a)、(b) 可以看出, 当入射基频光有位相调制时其频谱被展宽了, 这是因为位相调制使入射基频光的位相瞬时变化, 表现在频谱上就是在

1.2 时间位相调制模型

假设入射基频光为在时间上具有位相调制的光束, 即

$$A_1(x, y, t) = A_{1o}(x, y, t) \exp[i\varphi(t)] \quad (6)$$

式中, $A_1(x, y, t)$ 为入射基频光复振幅, $A_{1o}(x, y, t)$ 为无位相调制的理想光束光场分布, $\varphi(t)$ 为时间上的位相调制. 为了讨论方便, 假设入射基频光在时间上的位相调制函数为^[5]

$$\varphi(t) = \sigma \sin 2\pi ft \quad (7)$$

式中, σ 是调制深度, f 为调制频率.

根据式 (7) 可以得到入射基频光的频谱宽度为

$$\Delta\nu \cong 2\sigma f \quad (8)$$

因此, 我们在以后的讨论中将利用频谱宽度这个参数来研究时间位相调制对三次谐波转换过程的影响.

2 数值计算和结果分析

数值计算采用离散傅里叶变换和四阶 R-K 积分为基础的分步方法对式 (1) ~ (5) 进行数值求解, 计算中假设入射基频光空间分布为 12 阶超高斯光束, 时间分布为高斯光束, 光束口径 $D = 20 \text{ cm}$, 脉冲宽度 $T = 1 \text{ ns}$, 波长 $\lambda = 1.054 \mu\text{m}$. 计算所用参数为: 假设二倍频 KDP 晶体厚度 $L_1 = 1.10 \text{ cm}$, 失谐角 $\Delta\theta_1 = 220 \mu\text{rad}$, 三倍频 KDP 晶体厚度 $L_2 = 0.90 \text{ cm}$, 失谐角 $\Delta\theta_2 = 0 \mu\text{rad}$, 非线性系数 $\chi = 0.78 \text{ pm}^2/\text{V}^{[8]}$, 基频光、二倍频光和三倍频光的吸收系数分别为 $\alpha_1 = 0.043 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha_2 = 0.005 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha_3 = 0.005 \text{ cm}^{-1}$. 根据 KDP 晶体的 Sellmeier 公式^[9], 可以计算出不同波长的光在 KDP 晶体中的群速度, 如表 1.

中心频率附近存在不同的瞬时频率而形成一定的频谱宽度. 对比图 2(b) 和图 3 可以看出, 经过三次谐波转换过程后, 三倍频光的频谱宽度近似等于基频光频谱宽度的三倍. 分析图 4、5 可知, 当入射基频光存在一定的时间位相调制时, 随着频谱宽度的增加二倍频转换效率没有明显变化, 而三倍频转换效率明显下降. 这是因为当入射基频光由于时间位相调制具有一定频谱宽度时, 二倍频和三倍频过程不能满足群速度匹配条件, 群速度失配造成的位相失配量对谐波转换过程有一定的影响. 同时, 由于我们采用角度失谐的三倍频方案时, 是通过调整失谐角使二倍频过程不满足完全位相匹配条件, 控制入射到混频晶体的基频光和二倍频光的光子混合比为 2:1, 从而使三倍频转换效率达到最大. 因此, 在二

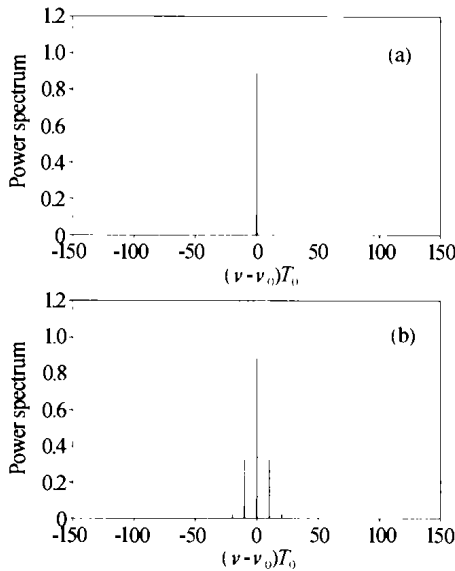


图2 (a)基频光无时间位相调制时的功率谱分布,(b)基频光有时间位相调制时的功率谱分布

Fig. 2 (a)The power spectrum of 1ω field without temporal phase modulation, (b)The power spectrum of 1ω field with temporal phase modulation

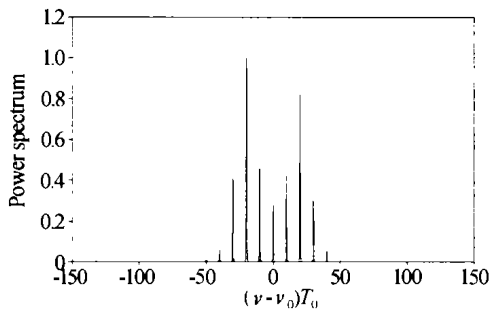


图3 基频光有位相调制时三倍频光的功率谱分布

Fig. 3 The power spectrum of 3ω field as 1ω field with temporal phase modulation

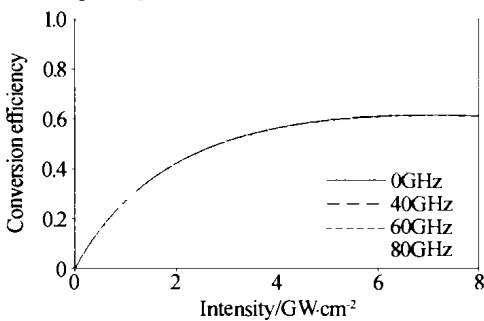


图4 在不同带宽情况下二倍频转换效率随入射基频光功率密度变化的曲线

Fig. 4 The doubling conversion efficiency versus the incident 1ω field for different bandwidth

倍频过程中群速度失配造成的位相失配量远小于由于角度失谐造成的位相失配量,因此,群速度失配对二倍频转换效率的影响比较小;而三倍频过程则需要满足位相匹配条件以实现较高的转换效率,此时,即使是群速度失配造成较小的位相失配量也会使转换效率明显降低,从而使群速度失配对三倍频的转换效率影响更加明显.从图6可以看出,在一定入射基频光功率密度的情况下,随着入射基频光频谱宽度的增加,三倍频转换效率下降明显,其原因在于

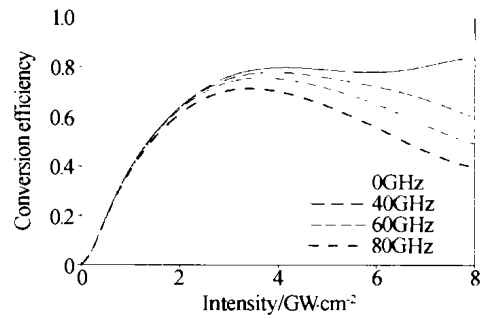


图5 在不同带宽情况下三倍频转换效率随入射基频光功率密度变化的曲线

Fig. 5 The tripling conversion efficiency versus the incident 1ω field for different bandwidth

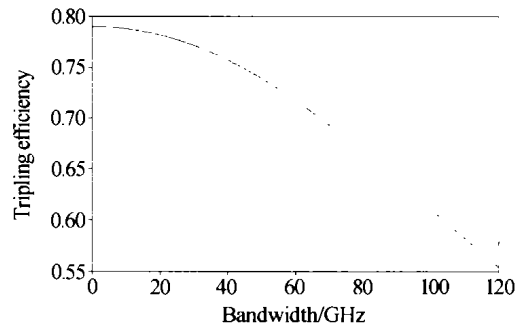


图6 三倍频转换效率随入射基频光带宽变化的曲线

Fig. 6 The tripling conversion efficiency versus the bandwidth of the incident 1ω field

宽频带情况下三次谐波转换过程无法同时满足位相匹配条件和群速度匹配条件,随着频谱宽度的增加,群速度失配造成的位相失配量也随之增加,导致了三倍频转换效率明显下降.因此,为了实现高效率宽带倍频就必须有效地补偿群速度失配对三次谐波转换过程的影响.

3 结论

本文在高功率条件下,以KDP晶体I/II类角度失谐三倍频方案为例,较为详细地研究了三次谐波转换过程中时间相位调制对三次谐波效率和脉冲频谱的影响,研究表明,在入射基频光存在时间相位调制的情况下,三倍频光的频谱宽度近似为基频光频谱宽度的三倍,并且,随着入射基频光带宽的增加二倍频转换效率没有明显变化,而三倍频转换效率将明显下降,因此,为了实现高效率宽带三倍频就必须有效地补偿群速度失配对三次谐波转换过程的影响,例如采用光谱角色散^[10]、晶体级联^[11]等方式.在短脉冲激光情况下,还需要进一步考虑群速度色散的影响.

参考文献

- 1 Wegner P J, Hennesian M A, Speck D R, et al. Harmonic conversion of large-aperture 1.05μm laser beams for inertial-confinement fusion research. *App Opt*, 1992, 3(30): 6414 ~ 6426
- 2 秘国江,魏晓峰,袁晓东,等.高通量条件下KDP晶体三

- 倍频参数的优化. 强激光与粒子束, 1999, **11**(3): 313 ~ 316
- Bi G J, Wei X F, Yuan X D, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(3): 313 ~ 316
- 3 何钰娟, 蔡邦维, 魏晓峰, 等. 位相扰动对三次谐波转换的影响. 中国激光, 2001, **A28**(9): 789 ~ 792
- He Y J, Cai B W, Wei X F, *et al.* *Chinese Journal of Lasers*, 2001, **A28**(9): 789 ~ 792
- 4 Skupsky S, Short R W, Kessler T, *et al.* Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light. *J Appl Phys*, **66**(8): 3456 ~ 3462
- 5 Novikov V N, Belkov S A, Buiko S A, *et al.* Transverse SRS in KDP, and KD^*P Crystal. *SPIE*, 1998, **3492**: 1009 ~ 1018
- 6 Milonni P W, Auerbach J M, Eimerl D. Frequency conversion modeling with spatially and temporally varying beams. *SPIE*, 1997, **2622**: 230 ~ 241
- 7 Auerbach J M, Milam D, Barker C E, *et al.* Frequency-Conversion Modeling. UCRL -LR-105821-96-4: 199 ~ 206
- 8 Zernike F. Refractive indices of ammonium dihydrogen phosphate and potassium dihydrogen phosphate between 2000Å and 1.5 microns. *J OPT Soc Am*, 1964, (54): 1215
- 9 Craxton R S, Jacobs S D, Rizzo J E, *et al.* Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1 μ m laser radiation. *IEEE J QE*, 1981, **QE-17**(9): 1782 ~ 1785
- 10 Short R W, Skupsky S. Frequency Conversion of Broad-Bandwidth Laser Light. *IEEE J QE*, 1990, **QE-26**(3): 580 ~ 588
- 11 Pronko M S, Lehmborg R H, Obenschain S, *et al.* Efficient second harmonic conversion of broad-band high-peak-power Nd: glass laser radiation using large-aperture KDP crystal in quadrature. *IEEE J QE*, 1990, **QE-26**(2): 337 ~ 347

The Effect of Temporal Phase Modulation on High-power Third Harmonics Conversion

Li Qiang¹, Zhang Bin¹, Cai Bangwei¹, Su Jingqin², Ma Chi², Wei Xiaofeng²

¹ College of Electronic Information, Sichuan University, Chengdu 610064

² Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900

Received date: 2003-06-30

Abstract In the research of inertial confinement fusion, the temporal phase modulation has been applied on the pulse in order to smooth beam by spectral dispersion and suppress transverse stimulated Brillouin scattering in the large optics such as KDP crystal etc. In this paper, using type I / II angle-detuning KDP crystal scheme for third harmonics generation, the effects of temporal phase modulation on conversion efficiency and spectrum under high-power condition have been discussed in details. As a result, the temporal phase modulation of fundamental wave decreases the tripling efficiency evidently.

Keywords Third harmonics conversion; Temporal phase modulation; Group-velocity-mismatch; Conversion efficiency



Li Qiang was born in Xinjiang Province in 1978. He received B. S. degree in physics from Sichuan University in 2001. He presently is a graduate student of College of Electronic Information of Sichuan University, Chengdu. His areas of research include the laser physics and nonlinear optics.