

文章编号: 0253-2239(2009)02-0468-5

超短脉冲三倍频中特殊群速度组合的分析

杨义胜^{1,2} 韩 伟² 谭吉春¹ 郑万国² 曹丁象^{1,2} 向 勇²
李富全² 李恪宇² 贾怀庭² 王礼权² 冯 斌² 钟 伟²

(¹国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073
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 基于非线性耦合波理论, 对比分析了超短脉冲三倍频过程中不同的特殊群速度组合模式下的谐波转换特性(转换效率和带宽等)。利用分步傅里叶变换和四阶 Runge-Kutta 积分算法, 对脉宽 150 fs 左右的超短脉冲在 KDP 晶体中的 I 类混频过程进行数值模拟, 结果表明: 三波包“不等速匹配”模式下的综合谐波转换性能(转换效率达到 50% 和转换带宽达到 2 nm)整体要优于其他特殊群速度匹配模式; “三波包不等速”模式更有利于三波包间能量之间的耦合及转换。这一结论为进一步提高超短脉冲三倍频的转换效率及带宽具有理论指导意义。

关键词 非线性光学; 三次谐波转换; 群速度; 超短脉冲

中图分类号 O437.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0468

Special Group-Velocity Mode in Process of Third-Harmonic Generation of Ultrashort Pulses

Yang Yisheng^{1,2} Han Wei² Tan Jichun¹ Zheng Wanguo² Cao Dingxiang^{1,2} Xiang Yong²
Li Fuquan² Li Keyu² Jia Huaiting² Wang Liquan² Feng Bin² Zhong Wei²

(¹ College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)
² Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Based on the nonlinear coupling equations, conversion properties (i. e. efficiency and bandwidth) of third-harmonic generation (THG) of ultrashort pulses in different special group-velocity modes are analyzed. The THG mixing process of ultrashort pulses (FWHM~150 fs) in Type-I KDP crystals is simulated by using split-step Fourier transformation and fourth-order Runge-Kutta method. Obtained results show that THG conversion properties (conversion efficiency being 50% and frequency bandwidth up to 2 nm) in the “three-wave-packet unequal velocity-mode” are better than those in other group-velocity modes. The conclusion provides theoretical guiding for further improving the THG efficiency and bandwidth of ultrashort pulses.

Key words nonlinear optics; third-harmonic generation; group velocity; ultrashort pulses

1 引 言

高能量密度科学(强场物理、高亮度 X 射线以及高能粒子束等)对宽带紫外光源, 尤其是紫外超短光源有着迫切的应用需求。例如, 在激光聚变装置

(ICF)中, 要求使用宽带紫外激光脉冲照射靶丸, 提高能量吸收效率。由于近红外波段超短脉冲光源技术较为成熟, 现阶段大多采用“三倍频”等谐波转换技术以获得紫外超短脉冲^[1~11]。

收稿日期: 2008-01-17; 收到修改稿日期: 2008-09-19

基金项目: 国家自然科学基金(60708007)、高温高密度等离子体国防重点实验室基金(9140C6803010802)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2008B0401043)资助课题。

作者简介: 杨义胜(1982-), 男, 博士研究生, 主要从事非线性光学方面的研究。E-mail: ysyang@nudt.edu.cn

导师简介: 谭吉春(1947-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光技术、信息光学及图像处理等方面的研究。

E-mail: tan4573290@163.com

在三倍频转换过程(本文指二阶非线性效应)中,传统的“群速匹配”思想是让三波包(分别以基频光 1ω 、倍频光 2ω 和三倍频光 3ω 为中心波长)以相同的群速度(即 $V_{1\omega} = V_{2\omega} = V_{3\omega}$)在晶体中传播,但由于受非线性晶体固有色散特性的影响,这一理想的“群速匹配”思想无法实现。而如果让三波包以毫无特定关系的三个群速度在晶体中传播,谐波转换的效率和带宽又将显著下降^[12]。

文献[13]从非线性晶体的折返特性和最大转换带宽的角度出发,首次提出了“三波包不等速”的群速度匹配思想。该文从理论上指出,在 $V_{1\omega}$ 、 $V_{2\omega}$ 值既定的前提下,当 $V_{3\omega}$ 值与 $V_{1\omega}$ 、 $V_{2\omega}$ 之间满足关系式: $\frac{1}{V_{1\omega}} + \frac{2}{V_{2\omega}} = \frac{3}{V_{3\omega}}$ 时,三倍频的转换效率和带宽可达极大值。然而,由于该模式并未对 $V_{1\omega}$ 、 $V_{2\omega}$ 的值作出任何限制,因此,有必要对“三波包不等速”模式以及其他一些具有特殊群速度关系的匹配模式进行比较。

本文在文献[13]的基础上,继续对“三波包不等速”这一群速匹配理论进行探讨,以超短脉冲在 KDP 晶体中的 I 类三倍频混频过程($1\omega_0 + 2\omega_0 \rightarrow 3\omega_0$)为例,对在“三波包不等速”模式下与其他特殊群速组合模式下的谐波转换特性(转换带宽与转换效率)进行比较和分析,并得出相关结论。

2 群速度及特殊群速度组合模式

2.1 群速度

群速度指波包的传播速度,数学表达式为

$$\frac{1}{V} = \frac{\partial k(\omega)}{\partial \omega} \quad (1)$$

波包 ω_i 和 ω_j 之间的群速度失配量 $GVM_{i,j}$ 定义为 $\left(\frac{1}{V_g(\omega_i)} - \frac{1}{V_g(\omega_j)}\right)$ 。如果共线传播的两波包之间的群速失配量不为零($GVM_{i,j} \neq 0$),则原来重叠的两波包必然逐渐分离,而脉冲脉宽越短,这一时间走离效应(Temporal walk-off)便会越严重,严重影响转换的效率和带宽。

2.2 特殊群速度组合模式

三倍频混频过程中,三波包群速度 $V_{1\omega}$ 、 $V_{2\omega}$ 和 $V_{3\omega}$ 之间的组合关系,具体可分为如下六种情况:

$$\textcircled{1} V_{1\omega} = V_{2\omega} = V_{3\omega}, \textcircled{2} V_{1\omega} = V_{2\omega} \neq V_{3\omega},$$

$$\textcircled{3} V_{1\omega} = V_{3\omega} \neq V_{2\omega}, \textcircled{4} V_{2\omega} = V_{3\omega} \neq V_{1\omega},$$

$$\textcircled{5} V_{1\omega} \neq V_{2\omega} \neq V_{3\omega}, \text{但满足 } \frac{1}{V_{1\omega}} + \frac{2}{V_{2\omega}} = \frac{3}{V_{3\omega}},$$

$$\textcircled{6} V_{1\omega} \neq V_{2\omega} \neq V_{3\omega}, \text{三者无特定关系。}$$

其中,第①种组合作为理想的群速匹配模式——“三波包等速”,在三倍频转换过程中可获得最大的转换效率及带宽。然而,在具体的实验和工程应用中,受非线性晶体色散特性的影响,“三波包等速”模式基本无法实现;第⑥种组合为最普通的情形,此时各谐波之间的耦合将受到群速度失配带来的严重影响,转换效率和带宽将不能满足要求,这两种群速组合关系将不作重点考虑。重点论述和比较“三波包不等速”模式⑤与具有一定特殊性的群速度组合②、③、④之间的谐波转换特性。

以 I 类混频 KDP 晶体为例,其三波包群速度曲线如图 1 所示。

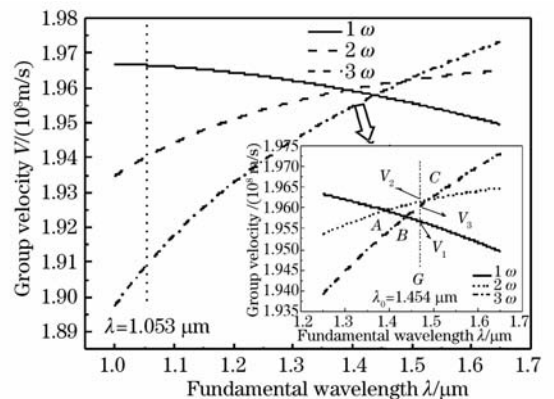


图 1 KDP 晶体中三波包群速度曲线

(I 类三倍频混频过程)

Fig. 1 Curves of group velocities of three waves (type-I frequency mixing of THG)

图中插图为局部放大的曲线。A、B 和 C 三点分别对应于上述第②、③和④种群速度组合,即 $V_{1\omega} = V_{2\omega} \neq V_{3\omega}$ 、 $V_{1\omega} = V_{3\omega} \neq V_{2\omega}$ 及 $V_{2\omega} = V_{3\omega} \neq V_{1\omega}$; 竖直虚线 G 对应于第⑤种群速度组合, G 线与三条群速度曲线交点的群速度值分别为 $V_1 = 1.9572 \times 10^8$ m/s, $V_2 = 1.9611 \times 10^8$ m/s, $V_3 = 1.9592 \times 10^8$ m/s, 满足倒数关系式 $\frac{1}{V_1} + \frac{2}{V_2} = \frac{3}{V_3}$ 。

由图 1 中可知, A、B、C 三点和竖直虚线 G 所对应的三波包群速度值十分相近。为了更直观地凸显群速度的作用,分析、比较不同群速度组合模式下的谐波转换特性,选取三波包群速度值相差较大的 $1.053 \mu\text{m}$ 波长处。

3 数值模拟分析

3.1 基本参数

本文采用分步傅里叶变换和四阶 Runge-Kutta 积分法对三波耦合方程进行数值模拟,入射基频光

采用脉宽 $T_p = 150$ fs, 强度为 $I_{10} = 15$ GW/cm² 的理想高斯超短脉冲, 表达式如下:

$$E_1 = E_{10} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{t^2}{T^2}\right), \quad (2)$$

其中 $T = T_p / (2 \sqrt{\ln 2})$, $E_{10} = \sqrt{2I_{10} / (\pi \epsilon C)}$ 。

二次谐波脉冲采用相同脉宽, 强度 $I_{20} = 2I_{10}$ 的高斯超短脉冲, 以获得尽可能完全的三次谐波转换。在模拟过程中, 为突出群速度失配的影响, 忽略了衍射、吸收等其他因素。

表 1 不同群速度组合模式下的三波包群速度值

Table 1 Values of group velocities of three waves packet at different group-velocity mode

Mode	Group velocity $V_{1\omega} / (10^8 \text{ m/s})$	Group velocity $V_{2\omega} / (10^8 \text{ m/s})$	Group velocity $V_{3\omega} / (10^8 \text{ m/s})$
A	1.9664	1.9664	1.9090
B	1.9090	1.9402	1.9090
C	1.9664	1.9402	1.9402
G	1.9664	1.9402	1.9488

3.3 不同群速模式下的谐波转换特性比较

3.3.1 相同晶体厚度条件下转换效率的比较

通过改变 $1.053 \mu\text{m}$ 波长处某一个群速度的值, 模拟不同群速匹配模式下的三倍频混频过程。图 2 给出了三次谐波转换效率在厚度为 5 mm 的 KDP 晶体中的变化规律 [3ω 转换效率由输出 3ω 脉冲光强与输入 1ω 、 2ω 光强和之比, $\eta = I_{3\omega} / (I_{1\omega} + I_{2\omega})$]。

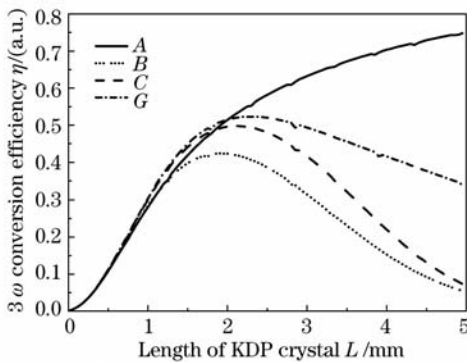


图 2 不同群速匹配模式下谐波转换效率与晶体厚度的关系

Fig. 2 THG conversion efficiency along with crystal length at different group-velocity mode

从图 2 中可以看出, B 点、C 点和 G 线模式都在晶体厚度增大到一定程度时达到最大值, 之后有不同程度的下降; 而 A 点模式则呈现一直增大的趋势。理由是显而易见的, 因为三次谐波转换过程是基频光与倍频光相互耦合产生三倍频光, 在 B、C、G

3.2 模拟不同群速模式的方法

具体模拟方法为: 改变某一个群速度的值, 使其满足某一种群速度组合模式。例如: 模拟 A 点模式 $V_{1\omega} = V_{2\omega} \neq V_{3\omega}$ 时, 改变 $V_{2\omega}$ 的值使其等于 $V_{1\omega}$, 依此类推。

表 1 具体给出了在模拟不同群速匹配模式 (A、B、C 三点及竖线 G) 时三波包群速度 $V_{1\omega}$ 、 $V_{2\omega}$ 及 $V_{3\omega}$ 的数值。

三个模式下, 基频光与倍频光的群速度不相等, 存在时间走离, 当两脉冲彻底分开时将无法产生有效的三倍频光; 而 A 模式中 $V_{1\omega} = V_{2\omega}$, 只要同时存在基频及倍频光, 就能产生三倍频光, 所以效率呈一直增加趋势。

当基频光脉冲与倍频光脉冲在晶体中走离到一定程度时, 转换效率将开始降低, 通常这一距离由有效长度 $L_D = T_p / \text{GVM} = T_p / |1/V_{1\omega} - 1/V_{2\omega}|$ 决定。B、C、G 三模式下 L_D 值分别为 1.8 mm、2.2 mm、2.2 mm, 这与图 2 所示的结果完全吻合。在 A 点模式下, 由于基频光脉冲与倍频光脉冲传播的群速度一致, $L_D \rightarrow \infty$, 因此在传播过程中能够持续产生三倍频光, 转换效率一直上升。

单就效率方面而言, 在晶体有效长度 L_D 范围之内, G 线模式下 (“不等速匹配”) 所能获得的谐波转换效率明显高于 B、C 两种模式; 而 A 模式下, 当晶体厚度小于 $L_D \approx 2$ mm 时, 转换效率也不及 G 模式。这说明在晶体厚度 L_D 范围之内, 三波包群速度满足不等速匹配模式时, 比单纯使某两个群速度值相等更加有利于三波包之间能量的转换。

3.3.2 有效长度 L_D 内脉冲波形与带宽的比较

在图 2 中我们看到, 在 A 点模式下, 谐波转换效率单调增大, 尤其在晶体厚度很大的情况下 ($L > L_D$), 效率要明显高于其他几种模式。然而, 这一看似优势在三次谐波脉冲的波形与带宽的显著变化下显得毫无用处。

图 3 给出了不同群速匹配模式下,晶体厚度取为 2 mm 时,出射三次谐波脉冲的归一化波形。

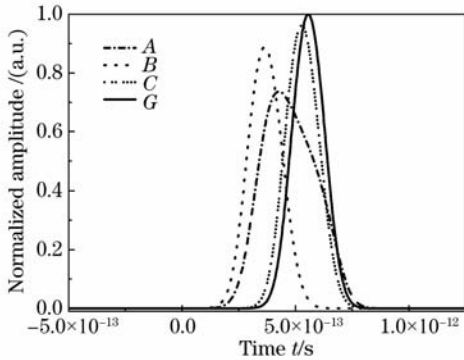


图 3 不同群速匹配模式下 L_D 处三次谐波脉冲波形的比较

Fig. 3 Pulse shapes of TH pulses at different group-velocity mode at length L_D

从四个波形中可以看出, B、C、G 三种模式下的三次谐波脉冲波形仍然呈现为高斯形;而 A 点模式下的三次谐波脉冲则发生了严重的畸变,脉宽也严重加宽。这是由于晶体厚度取为 2 mm,与 B、C、G 三种模式下的有效长度 L_D 基本相当(1.8 mm 或 2.2 mm),因此,基频光与倍频光之间能够有效地耦合产生三次谐波,基本无畸变。而在 A 点模式下,虽然基频光脉冲与倍频光脉冲同步传播,并源源不断地产生出三次谐波(并无 L_D 的限制),但由于三次谐波脉冲传播的速度(群速度)小于前两者的传播速度,因此将三倍频脉冲拉宽。可以预见,在 A 点模式下,随着晶体厚度的不断增加,三倍频脉冲将拖着长长的尾巴,波形发生严重畸变,此时效率虽然一直在增加,但已无实际意义。

图 4 为四种不同群速匹配模式下,晶体厚度取为 2 mm 时,出射三次谐波带宽的比较。结果显示,

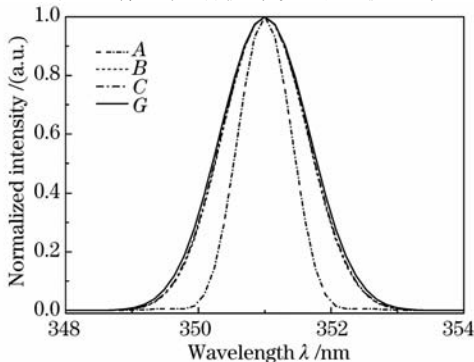


图 4 不同群速匹配模式下 L_D 处三次谐波脉冲带宽的比较

Fig. 4 Bandwidth of output TH pulses at different group-velocity mode at length L_D

B、C、G 三种模式下三次谐波脉冲的带宽要远大于 A 点模式下的带宽,这也是由于 A 点模式下脉冲波形畸变的缘故。而在 B、C、G 三种模式中,G 线模式下的带宽又为最大,(注: B、C、G 三种模式下的带宽相差不大,其原因主要是晶体的厚度被控制在有效长度 L_D 范围之内,此时波形的失真、畸变基本可以忽略。)结合图 2 的效率曲线也充分证明了在三波包传播不能实现“三波包等速”的前提下,“倒数匹配关系式”可使效率和带宽最大化。

综上所述,对于超短脉冲的三倍频过程而言,晶体厚度一般要求控制在有效长度 L_D 范围之内;在 A、B、C 和 G 四种特殊模式中,当三波包群速度满足 G 线模式——三波包“不等速匹配”模式时,所获得的谐波转换效率和带宽均最大。这说明三波包“不等速匹配”模式最有利于三波包之间能量的耦合、转换。

4 总 结

在文献[13]的基础上,对超短脉冲三倍频混频过程中存在的特殊群速度组合进行了深入的分析。模拟结果显示,在无法实现理想群速匹配模式——“三波包群速相等”的前提下,当三波包群速度之间的关系满足“倒数匹配关系式”这一“三波包不等速匹配”模式时,可以获得最佳的谐波转换效率和带宽。这一结果充分证明“三波包不等速”模式的优越性。这为进一步提高超短脉冲三倍频的转换效率及带宽提供了理论基础和指导意义。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 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
- 3 P. J. Wegner, J. M. Auerbach. Frequency converter development for National Ignition Facility[J]. *SPIE*, **3492**: 392
- 4 K. Osvay, I. N. Ross. Broadband sum-frequency generation by chirp-assisted group-velocity matching[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1996, **13**(7): 1431~1438
- 5 Li Keyu, Jia Huaiting, Wang Chengcheng *et al.*. Outputability analysis of high-intensity third harmonic generation system for ICF driver[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 903~909
李恪宇, 贾怀庭, 王成程等. 惯性约束核聚变驱动器高强度三倍频系统输出能力分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(7): 903~909
- 6 Han Wei, Zheng Wanguo, Yang Yisheng *et al.*. Second harmonic Generation at retracing point of phase matching with

- pre-chirp Compensation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 133~137
- 韩 伟, 郑万国, 杨义胜 等. 啁啾补偿的折返点匹配二倍频[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 133~137
- 7 D. M. Pennington, M. A. Hennesian, S. N. Dixit *et al.*. Effect of bandwidth on beam smoothing and frequency conversion at the third harmonic of the Nova laser[J]. *SPIE*, **1870**: 175
- 8 Paul R. Bolton, Cecile Limborg-Deprey. Incident IR bandwidth effects on efficiency and shaping for third harmonic generation of quasi-rectangular UV longitudinal profiles. 2005, LCLS-TN-05-29
- 9 Tan Tianya, Huang Jianbin, Zhan Meiqiong *et al.*. Design of 1064 nm, 532 nm, 355 nm frequency-tripled antireflection coating for LBO [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1327~1332
- 谭天亚, 黄建兵, 占美琼 等. 三硼酸锂晶体上 1064 nm, 532 nm, 355 nm 三倍频增透膜的设计[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1327~1332
- 10 Li Kun, Zhang Bin, Li Keyu *et al.*. Third Harmonic generation of super intense femtosecond laser pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1506~1511
- 李 琨, 张 彬, 李格宇 等. 超高强度飞秒脉冲的三次谐波转换[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1506~1511
- 11 Lü Yanfei, Zhang Xihe, Yao Zhihai *et al.*. Laser-diode pumped all-solid-state continuous-wave ultraviolet laser at 355 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1048~1050
- 吕彦飞, 张喜和, 姚治海 等. 激光二极管抽运全固 355nm 连续波紫外激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1048~1050
- 12 Liu Yunquan, Zhang Jie, Liang Wenxi *et al.*. Theoretical and experimental studies on third harmonic generation of femto second Ti : sapphire laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(4): 1593~1598
- 刘运全, 张 杰, 梁文锡 等. 飞秒掺钛蓝宝石激光三倍频理论和实验研究[J]. *物理学报*, 2005, **54**(4): 1593~1598
- 13 Yang Yisheng, Zheng Wanguo, Han Wei *et al.*. Group-velocity-matching relation in the mixing process of broadband Third-Harmonic Generation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(11): 6468~6472
- 杨义胜, 郑万国, 韩 伟 等. 宽带三倍频混频过程的群速匹配关系[J]. *物理学报*, 2007, **56**(11): 6468~6472