

文章编号: 0258-7025(2006)11-1457-04

偏振分配角 θ_p 对高功率激光三倍频波形的影响

赵书林, 朱宝强, 詹庭宇, 蔡希洁, 刘仁红, 杨 琳, 张志祥, 毕纪军

(中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘要 使用四阶龙格-库塔算法数值求解 II 类-II 类偏振失配方案的三倍频稳态耦合波方程组。针对“神光 II”激光驱动器的三倍频系统, 在二倍频匹配角 θ_d 和三倍频匹配角 θ_t 均处于最佳匹配情况下, 以 1° 为单位改变偏振分配角 θ_p 的偏离量, 得到对应的三倍频波形特性的变化。研究表明, 偏振分配角 θ_p 处于最佳理论匹配位时, 对应的三倍频波形半峰全宽最窄, 且波形上升沿抬起也最快; θ_p 从最佳匹配位增加比从最佳匹配位减小对应的半峰全宽变宽更快, 对应的上升沿抬起更慢。根据所得理论结果, 在实验中调节偏振分配角 θ_p , 达到了改变三倍频输出波形特性, 进而实现八路三倍频波形一致的目的。该研究结果对于更快地实现激光驱动器装置的功率平衡有一定的应用价值。

关键词 非线性光学; 三倍频波形; 偏振分配角; 功率平衡

中图分类号 O 437.1 文献标识码 A

Influences of Polarization Angle θ_p on Pulse Shape of High Power Laser Frequency Tripling

ZHAO Shu-lin, ZHU Bao-qiang, ZHAN Ting-yu, CAI Xi-jie,
LIU Ren-hong, YANG Lin, ZHANG Zhi-xiang, BI Ji-jun

(Joint Laboratory on High Power Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A theoretical calculation is presented for third-harmonic generation in KDP crystal for type II - type II polarization-mismatch scheme by using the four-stepped Runge-Kutta method. For the “Shenguang II” frequency tripling system, the doubling angle θ_d and the tripling angle θ_t are located at optimized situation, by changing detuned values of the polarization angle θ_p , the corresponding changes of pulse shape properties was gotten. The results show that when the polarization angle θ_p is located at optimized situation, the full width at half maximum (FWHM) τ is minimum and the pulse shape rises fastest. Increasing the θ_p from optimized situation causes the τ widens faster and the pulse shape rises slower than decreasing the θ_p from optimized situation. In the experiment, by changing the polarization angle θ_p , the pulse shapes consistency of the “Shenguang II” eight frequency tripling beams has been accomplished. This work offers a method for adjusting crystals and actualizing power balance.

Key words nonlinear optics; frequency tripling pulse shape; polarization angle; power balance

1 引言

在惯性约束聚变(ICF)实验中,短波长激光打靶能够提高靶等离子体对激光能量的吸收,提高 X 光的转换效率,并抑制超热电子的产生^[1],高效稳定

的三倍频技术成为固体激光驱动器研究的关键技术之一。其中如何提高三次谐波转换效率和动态范围,改善三次谐波光束质量,避免三次谐波对晶体及膜层的破坏是人们关心的主要问题,并取得了一系列进展^[2~8]。

收稿日期:2006-03-30; 收到修改稿日期:2006-06-20

基金项目:国家高技术研究发展计划(2002AA842110)资助项目。

作者简介:赵书林(1981—),男,河南省商丘市人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事高功率激光三倍频方面的研究。E-mail:zhaoshulin99@sohu.com

导师简介:朱宝强(1966—),男,浙江丽水人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,主要从事高功率激光三倍频方面的研究。E-mail:zhubaoqiang66@sohu.com

在惯性约束聚变物理实验中,为提高激光驱动器装置的稳定性、减少关键参数的误差,需要开展整个装置的精密化工作。精密化项目中最最重要的一个指标是功率平衡,它包括各路光束之间的能量平衡、波形一致和光程一致三部分。实现八路激光三倍频功率平衡是“神光 II”精密化项目中最最重要的物理指标,“神光 II”装置在 2004 年初实现了八路基频功率平衡输出,但三倍频输出波形一致性不理想。

在工作中发现,对于“神光 II”的 II 类-II 类偏振失配三倍频系统,偏振分配角 θ_p 的调节对于功率平衡的实现起着重要的作用。偏振分配角 θ_p 对三倍频效率和三倍频波形特性影响很大,尤其是在高功率密度区,三倍频效率对偏振分配角失配很敏感。“神光 II”激光驱动器的终端基频输出平均功率密度在 1.0 GW/cm^2 左右,偏振分配角发生小量失配,总体三倍频效率变化很小,但三倍频波形特性可能变化很大。研究偏振分配角 θ_p 与三倍频输出波形之间的关系是十分必要的。

2 物理模型及理论分析

“神光 II”三倍频系统采用两块 KDP 晶体装在同一个二维高精度伺服调整架上的一体化结构,通过 II 类-II 类偏振失配方案实现三次谐波输出。针对“神光 II”装置的三倍频系统,可以不考虑谐波转换过程中的三阶非线性、横向衍射、离散等效效应,采用了如下简化形式的稳态耦合波方程组^[1]

$$\begin{cases} \frac{dE'_1}{dz} = -\frac{1}{2}\gamma_1 E'_1 - iKE'_3 E'^*_2 \exp(-i\Delta k \cdot z) \\ \frac{dE'_2}{dz} = -\frac{1}{2}\gamma_2 E'_2 - i(\omega_2/\omega_1)KE'_3 E'^*_1 \exp(-i\Delta k \cdot z), \\ \frac{dE'_3}{dz} = -\frac{1}{2}\gamma_3 E'_3 - i(\omega_3/\omega_1)KE'_1 E'_2 \exp(i\Delta k \cdot z) \end{cases}$$

式中 $E'_j = \sqrt{n_j}E_j$ ($j = 1, 2, 3$), E_j 表示光波 ω_j 的电场复振幅, n_j 为光波 ω_j 在晶体中的折射率, γ_j 表示晶体对光波 ω_j 的吸收系数。对于 II 类倍频和 II 类三倍频过程,有 $K = \frac{\omega_1}{2c}(n_1 n_2 n_3)^{-1/2} \frac{d_{36}}{\epsilon_0} \sin 2\theta_m$ 成立,其中 θ_m 为晶体的相位匹配角, c 为真空中的光速, ϵ_0 为真空中的介电常数, d_{36} 为 KDP 晶体的非线性系数。波矢失配量 $\Delta k = k_3 - (k_1 + k_2)$ 。

II 类-II 类偏振失配方式进行的三次谐波转换分为两步,首先是 II 类倍频过程,一个 1ω 的 o 光光子和一个 1ω 的 e 光光子耦合产生一个 2ω 的 e 光光子;再以 II 类方式进行和频,倍频得到的 2ω 光子与

剩下的 1ω 的 o 光光子耦合产生 3ω 的 e 光光子。II 类倍频过程的相位失配量表示为 $\Delta k = \frac{\omega}{c}[2n_e^{2\omega}(\theta) - n_e^{\omega}(\theta) - n_o^{\omega}(\theta)]$; II 类三倍频过程的相位失配量表示为 $\Delta k = \frac{\omega}{c}[3n_e^{3\omega}(\theta) - 2n_o^{2\omega} - n_e^{\omega}(\theta)]$ 。

3 数值计算及结果分析

使用四阶龙格-库塔法求解 II 类-II 类偏振失配方案的三倍频稳态耦合波方程组。设入射基频光束为 6 阶超高斯光束,峰值功率密度为 2 GW/cm^2 ,基频波形半峰全宽为 1 ns ,基频光束波长为 $1.054 \mu\text{m}$; II 类-II 类偏振失配方案的最佳理论偏振分配角 $\theta_p = 35.3^\circ$,相位匹配角 $\theta_d = 59.2^\circ, \theta_t = 59^\circ$;三倍频系统两块 KDP 晶体厚度均为 11 mm ,晶体对基频 o 光和 e 光的吸收系数分别为 $0.06/\text{cm}$ 和 $0.02/\text{cm}$,对高频成分吸收很小,可忽略不计。对于 II 类倍频和 II 类三倍频过程,采用 R. S. Craxton 所给的数据^[1],晶体常数 $K = 1.13 \times 10^{-6} \text{ V}^{-1}$; $\partial(\Delta k)/\partial\theta$ 采用 R. S. Craxton 等提供的数据^[9]。

“神光 II”终端输出基频光束和三倍频光束均为超高斯光束。直观描述超高斯光束波形特性的物理量一般为:上升前沿、半峰全宽和下降沿,物理实验中关心的主要是上升前沿和半峰全宽。

在二倍频匹配角 θ_d 和三倍频匹配角 θ_t 均处于最佳匹配的情况下,以理论最佳偏振分配角 $\theta_p = 35.3^\circ$ 为中心,以 1° 为单位改变偏振分配角 θ_p 的偏离量 $\Delta\theta_p$, $\Delta\theta_p$ 取正值时,表示角 θ_p 增大,反之表示角 θ_p 减小。通过数值计算,得到对应的三倍频输出波形特性的变化。

从图 1 可以得到,偏振分配角 θ_p 处于理论最佳值时,三倍频波形半峰全宽最窄,偏振分配角 θ_p 偏离理论最佳值越大,对应的三倍频波形半峰全宽越宽;偏振分配角 θ_p 从理论最佳值增加比从理论最佳值减小对应的三倍频波形半峰全宽变宽更快。

偏振分配角 θ_p 决定基频输入的 o 光和 e 光比例,偏振分配角发生失配时,在基频输入低功率密度区,三倍频效率对偏振分配角失配不敏感,主要影响基频输入高功率密度区域,使三倍频效率降低,三倍频波形峰值降低,导致三倍频脉冲波形半峰全宽 τ 变宽。计算结果与该理论一致。

图 2 是三倍频波形上升沿光功率密度与时间的关系曲线。由于偏振分配角 θ_p 不同的偏离量对应的三倍频波形峰值不同,不能采用从峰值 10% 到峰

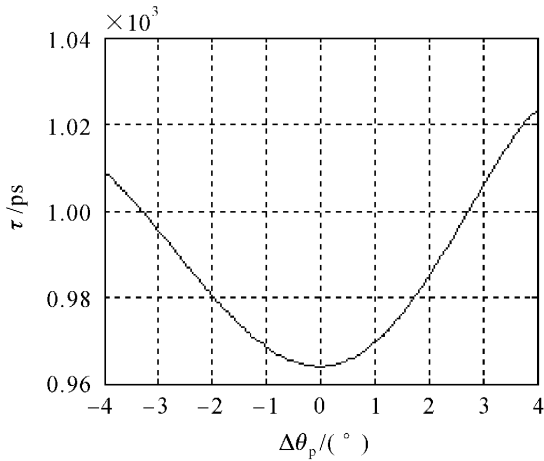


图 1 半峰全宽 τ 随偏振分配角偏离量 $\Delta\theta_p$ 的变化曲线

Fig. 1 Relation between FWHM τ and polarization detuning angles $\Delta\theta_p$

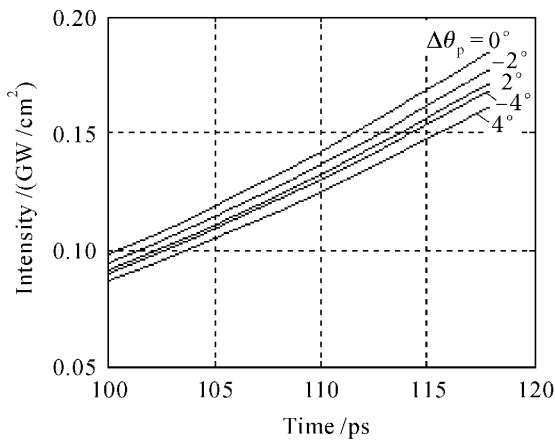


图 2 功率密度与时间的关系曲线

Fig. 2 Relation between intensity and time

值 90% 所用的时间来衡量三倍频波形上升沿的快慢, 我们选取偏振分配角偏离量 $\Delta\theta_p = 0^\circ$ 时, 三倍频波形上升沿从 0 上升到峰值 20% 对应的时间段为基准, 研究该段时间偏振分配角不同偏离量对应的三倍频波形。

从图 2 可以看出, 偏振分配角 θ_p 处于理论最佳值时, 三倍频波形上升沿抬起最快, 偏振分配角偏离理论最佳值越大, 三倍频波形上升沿抬起越慢; 偏振分配角 θ_p 从理论最佳值增加比从理论最佳值减小对应的三倍频波形上升沿抬起更慢。

4 实验研究

利用所得的理论结果, 在“神光 II”装置上, 通过调节三倍频系统的偏振分配角 θ_p , 达到改变三倍频波形特性, 进而实现八路三倍频波形一致的目的。

以“神光 II”第 1 路三倍频系统为例, 取 2 发实验数据进行比较 (数据编号分别为 05041404,

05041501), 同一发次的基频和三倍频波形经能量归一化后显示于同一图形。

图 3 为偏振分配角调节前的基频和三倍频波形, 基频能量为 506.725 J, 基频波形为图中高功率处对应的曲线, 三倍频能量 (不包括靶镜的损耗) 为 263.497 J, 三倍频波形为图中低功率处对应的曲线。从图 3 可以看出, 基频波形峰值功率处对应的三倍频波形功率值较低, 基频波形和三倍频波形一致性较差。可见, 偏振分配角失配对三倍频波形影响较大。

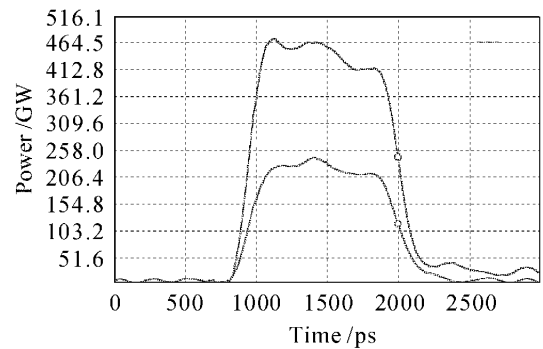


图 3 偏振分配角调节前的基频和三倍频波形

Fig. 3 Fundamental and tripling pulse shapes before polarization angle changed

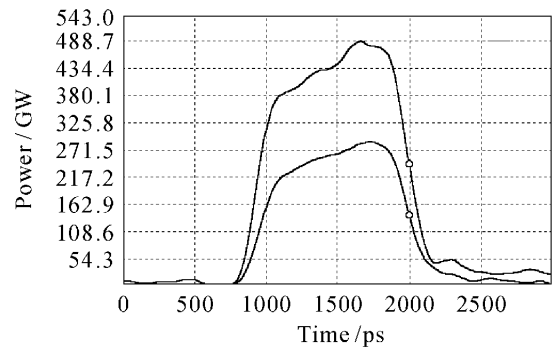


图 4 偏振分配角调节后的基频和三倍频波形

Fig. 4 Fundamental and tripling pulse shapes after polarization angle changed

根据所得的理论结果, 将偏振分配角减小 1° , 得到图 4 所示的基频和三倍频波形, 基频能量为 503.104 J, 三倍频能量 (不包括靶镜的损耗) 为 291.8 J。从图 4 可以看出, 基频波形和三倍频波形一致性较好, 偏振分配角已基本调节至匹配状态。

实验中, 在保证三倍频效率高效稳定的同时, 通过调节三倍频系统的偏振分配角 θ_p , 达到八路三倍频波形特性一致的目的。“神光 II”激光驱动器于 2005 年上半年实现了八路三倍频光束的功率平衡, 八路三倍频波形示于图 5, 其中图形左侧纵坐标表示三倍频脉冲输出功率, 图形右侧纵坐标用八路三

倍频波形的均方根值(RMS)表示波形一致性,示于图中三倍频波形下方的曲线。八路三倍频波形达到了“神光II”功率平衡的指标:峰值功率不平衡度 $\leq 10\%$ (RMS),前沿功率不平衡度 $\leq 20\%$ (RMS)。

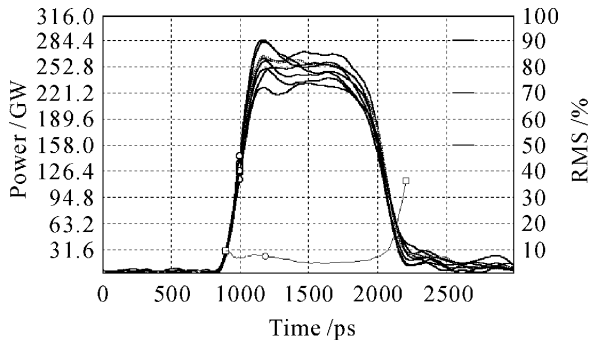


图5 八路三倍频波形一致性

Fig. 5 Consistency of pulse shapes of eight frequency tripling beams

5 结 论

针对“神光II”装置II类-II类偏振失配方案三倍频系统,研究了偏振分配角 θ_p 对三倍频波形特性的影响规律。结果表明,偏振分配角 θ_p 处于最佳理论匹配位时,对应的波形半峰全宽最窄,且波形上升沿抬起也最快; θ_p 从最佳匹配位增加比从最佳匹配位减小对应的半峰全宽变宽更快,对应的波形上升沿抬起更慢。实验中,通过调节三倍频系统的偏振分配角 θ_p ,达到了改变三倍频输出波形特性,进而实现八路三倍频波形一致的目的。该研究结果能更好地指导三倍频系统晶体的调试,对更快地实现激光驱动器装置的功率平衡有一定的应用价值。

参 考 文 献

- 1 R. Stephen Craxton. High efficiency frequency tripling schemes for high-power Nd : glass lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9):1771~1781
- 2 Baoqiang Zhu, Tingyu Zhan, Zhen Gu *et al.*. Third harmonic generation of high-energy large-aperture one micro laser and its spatial beam property investigation [C]. *SPIE*, 2001, **4268**:36~42
- 3 Gu Zhen, Zhan Tingyu, Zhu Baoqiang *et al.*. Diffraction model on focusing properties of phase-modulated third harmonic beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(11):988~990
顾震,詹庭宇,朱宝强等.位相调制三倍频激光束聚焦特性的衍射模型[J].*中国激光*, 2001, **A28**(11):988~990
- 4 Wei Xiaofeng, Ma Chi, Yuan Jing *et al.*. Effect of phase ripples on the third harmonic generation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(9):789~792
魏晓峰,马驰,袁静等.位相扰动对三次谐波转换的影响[J].*中国激光*, 2001, **A28**(9):789~792
- 5 Tao Wang, Tingyu Zhan, Heyuan Zhu *et al.*. Analysis of beam-quality degradation in nonlinear frequency conversion [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(5):1101~1106
- 6 Hou Jing, Ling Ning. Third harmonic conversion of aberrated laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):525~529
侯静,凌宁.位相畸变三次谐波转换[J].*中国激光*, 2002, **A29**(6):525~529
- 7 Li Keyu, Wei Xiaofeng, Ma Chi *et al.*. Calculation of stimulated Raman scattering of high-power laser driver for ICF in harmonic conversion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(2):164~168
李恪宇,魏晓峰,马驰等.ICF驱动器谐波转换晶体中受激拉曼散射的数值计算[J].*中国激光*, 2004, **31**(2):164~168
- 8 Zhao Huajun, Yang Liming, Feng Guoying *et al.*. The effect of third-order nonlinear interaction on high-efficiency third harmonic generation conversion [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3):387~391
赵华君,杨李茗,冯国英等.三阶非线性效应对三次谐波振荡转换的影响[J].*光学学报*, 2005, **25**(3):387~391
- 9 R. Stephen Craxton, Stephen D. Jacobs, Joseph E. Rizzo *et al.*. Basic properties of KDP related to the frequency conversion of 1 μm laser radiation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1981, **QE-17**(9):1782~1785