

高功率钕玻璃激光三倍频脉冲时间波形的研究^{*}

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, 上海 201800)

(2005 年 6 月 16 日收到, 2006 年 4 月 21 日收到修改稿)

基于目前国内规模最大的激光驱动器——“神光 II”八路基频光已经实现功率平衡运行, 通过改变其中若干路三倍频系统各调谐量的偏离, 对输出三倍频波形进行束与束之间的横向对比研究. 研究发现, 对于 II 类-II 类偏振失配三倍频系统, 在影响转换效率的三个调谐量中, 偏振分配角失配 $\Delta\theta_p$ 对三倍频波形影响最大, 在入射基频功率密度约为 1.0 GW/cm^2 情况下, 当三倍频系统三个调谐量都处在最佳匹配时, 三倍频波形半峰全宽 τ 最小. 研究工作作为最终实现“神光 II”八路光束三倍频功率平衡输出提供了晶体调试的方法.

关键词: 三倍频, 时间波形, 功率平衡

PACC: 4265M, 4225B, 4260

1. 引 言

在惯性约束聚变(ICF)实验中, 黑腔靶内靶球温度的均匀性、超热电子的产生与驱动激光的宏观参数(能量、束数、排布方式)及细致参数密切相关. 细致参数中最重要的一个指标是各路激光功率平衡. 功率平衡的内容包括各路光束的能量平衡、波形一致和光程一致三部分.

为了进行高精度的激光物理实验研究, 要求激光参数规范、精确, 实验结果可重复, 从而提高实验研究的效率. 从激光技术发展而言, 大型高功率激光装置路数越来越多, 也要求各路激光子系统输出特性均衡, 以充分利用各路增益介质的潜能, 降低工程造价, 同时提高系统的安全性和稳定性. 因此, 实现高功率激光驱动器的功率平衡就变得非常重要.

实现“神光 II”八路激光三倍频功率平衡输出是“神光 II”精密化项目中最重要的物理指标, 多年来精密化项目组为此做了大量的理论和实验研究工作^[1-3], 并在 2004 年初实现了八路基频功率平衡输出, 但三倍频脉冲时间波形一致性还不太理想.

20 世纪 80 年代, 人们认识到短波长激光打靶能极大提高靶对激光的吸收^[4], 高效稳定的三倍频技术成为驱动器研究的关键技术之一, 并得到了长足的发展, 国内“神光 II”装置也在 2001 年实现了八

路高效三倍频输出^[5]. 但以往三倍频技术的研究重点集中在如何提高转换效率和三倍频光的空间特性方面^[6-8], 对三倍频波形与三倍频调谐量失配之间的关系还未见报道.

本文针对“神光 II”功率平衡目标, 通过各路三倍频波形的横向对比, 研究得出三倍频波形与各调谐量之间的关系. 这对进一步提高三倍频系统的调整精度, 最终实现三倍频功率平衡输出具有指导意义.

2. 理论分析和计算

“神光 II”三倍频系统是采用两块 KDP 晶体装在同一二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.

“神光 II”三倍频系统的二倍频过程和三倍频过程均可通过下列稳态耦合波方程来描述:

$$\begin{aligned} \frac{dE_1'}{dz} &= -\frac{1}{2}\gamma_1 E_1' - iKE_3' E_2'^* \exp(-i\Delta k \cdot z), \\ \frac{dE_2'}{dz} &= -\frac{1}{2}\gamma_2 E_2' - (\omega_2/\omega_1)KE_3' E_1'^* \exp(-i\Delta k \cdot z), \\ \frac{dE_3'}{dz} &= -\frac{1}{2}\gamma_3 E_3' - (\omega_3/\omega_1)KE_1' E_2' \exp(i\Delta k \cdot z), \end{aligned} \quad (1)$$

式中, γ_j 表示晶体对光波 ω_j 的吸收系数, 波矢失配量

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号:2002AA842110)资助的课题.

$$\Delta k = k_3 - (k_1 + k_2),$$

$$E'_j = \sqrt{n_j} E_j \quad (j = 1, 2, 3),$$

其中 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. 对于 II 类倍频和 II 类三倍频过程, 有

$$K = \frac{\omega_1}{2c} (n_1 n_2 n_3)^{-1/2} \frac{d_{36}}{\epsilon_0} \sin 2\theta_m,$$

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.

ICF 物理实验客观上要求大功率激光器尽可能实现方波输出, 但在实际运行中输出的基频和三倍频波形均为高阶高斯光束. 直观描述超高斯光束波形特性的物理量为上升沿、半峰全宽和下降沿, 物理实验中主要关心的是半峰全宽和上升沿.

影响 II 类-II 类偏振失配三倍频过程的三个调谐量为偏振分配角 θ_p 、二倍频匹配角 θ_d 和三倍频匹配角 θ_t . 对于“神光 II”三倍频系统, θ_d 和 θ_t 的伺服调整分辨率为 $10 \mu\text{rad}$, 调整控制精度优于 $100 \mu\text{rad}$; θ_p 的伺服调整分辨率为 $5'$, 调整控制精度为 $\pm 1^\circ$.

使用四阶龙格-库塔法理论求解 II 类-II 类偏振失配情况下的稳态耦合波方程组. 针对“神光 II”激光驱动器, 设入射基频光束为 6 阶超高斯光束, 其光强与时间的关系可表示为

$$I(t) = I_{\max} \exp[-\chi(t/\tau_0)^6],$$

其中 τ_0 为超高斯光束的束腰宽度. 理论计算时取峰值光强密度为 $2 \text{ GW}/\text{cm}^2$, 基频波形半峰全宽为 1 ns , 基频光束波长为 $1.054 \mu\text{m}$; 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 $0.02/\text{cm}$, 对高频成分无吸收. 以 $50 \mu\text{rad}$ 为单位改变 θ_d 和 θ_t 的偏离量, 以 1° 为单位改变 θ_p 的偏离量, 通过理论计算得到对应的三倍频波形特性的变化.

理论研究表明, θ_d 失配时 ($\Delta\theta_d < 300 \mu\text{rad}$), 对三倍频效率和三倍频波形影响均较小; θ_t 失配时 ($\Delta\theta_t < 300 \mu\text{rad}$), 对三倍频效率影响较大, 对三倍频波形也有影响; θ_p 失配时, 对三倍频效率影响很小, 但对三倍频波形影响较大.

图 1 示出了偏振分配角 θ_p 对三倍频波形半峰全宽的影响规律. 由图 1 可见, 偏振分配角 θ_p 失配

对三倍频脉冲时间波形影响较大.

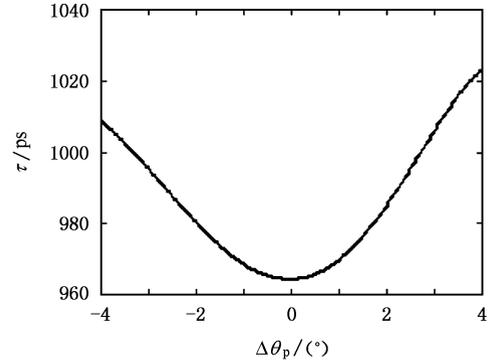


图 1 三倍频波形半峰全宽 τ 随偏振分配角偏离量 $\Delta\theta_p$ 的关系曲线

通过对三倍频效率的监测, 可以实时调整三倍频匹配角 θ_t 的匹配状态, 但是不能够通过对三倍频波形的监测来调整偏振分配角 θ_p 的匹配状态, 以达到各路三倍频脉冲时间波形一致. 因此, 有必要开展偏振分配角 θ_p 与三倍频脉冲时间波形关系的研究工作.

3. 实验条件与实验方法

由于晶体的切割和加工精度所限, 不能保证每块晶体的切割角度、厚度、表面特性等参数一致, 导致“神光 II”八路三倍频系统的工作特性并不相同, 难以实现八路三倍频波形一致, 而且由于前端和放大链本身不稳定造成不同发次之间波形重复性不好, 高功率激光三倍频波形特性一直无法开展研究.

目前, 一个非常有利的条件是“神光 II”八路基频光实现了大能量功率平衡运行, 虽然相邻发次的基频光束特性不同, 但是在同一发次的八路基频光束输出能量接近, 波形一致性好, 可以通过改变某几路三倍频系统的状态, 横向对比研究三倍频波形特性与各调谐量之间的关系.

“神光 II”八路基频光中的第一路和第六路、第三路和第八路、第五路和第七路基频波形一致性很好. 在本次实验研究中, 选择三倍频效率稳定、三倍频波形一致性较好的第一路、第三路、第五路三倍频系统为基准, 在同一发次分别改变第六路、第七路、第八路三倍频系统的调谐量 θ_t , θ_d , θ_p , 横向对比三倍频波形与各调谐量之间的关系, 得出实验结果和规律.

4. 实验结果及分析

根据三倍频系统改变的调谐量不同,把实验结果分成三部分进行讨论.

4.1. 三倍频匹配角

以第一路三倍频系统为基准,调节第六路三倍频系统的三倍频匹配角 θ_1 ,由所得实验数据绘制的曲线如图 2、图 3 所示.

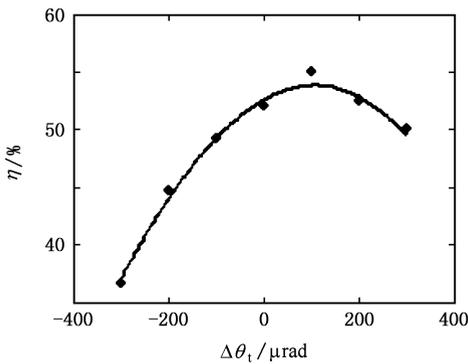


图 2 三倍频效率 η 随三倍频匹配角偏离量 $\Delta\theta_1$ 的变化曲线

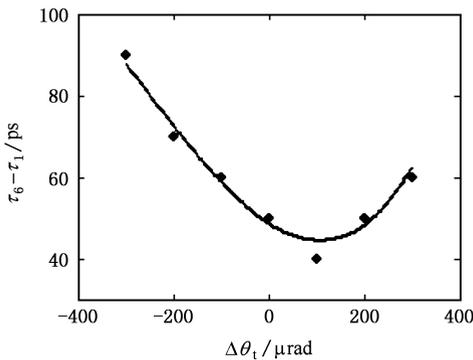


图 3 半峰全宽差值 $\tau_6 - \tau_1$ 随三倍频匹配角偏离量 $\Delta\theta_1$ 的变化曲线

$\Delta\theta_1 = 0$ 表示三倍频匹配角 θ_1 处于原实验调整匹配位, $\Delta\theta_1$ 取正值时,表示三倍频匹配角 θ_1 偏离晶体准直位的角度增大, $\Delta\theta_d$ 的表述与 $\Delta\theta_1$ 一致. $\tau_6 - \tau_1$ 表示第六路三倍频波形半峰全宽 τ_6 与第一路三倍频波形半峰全宽 τ_1 的差值, $\tau_7 - \tau_5$, $\tau_8 - \tau_3$ 的表述与 $\tau_6 - \tau_1$ 一致. 本文的三倍频效率指入靶的三倍频能量与基频终端输入能量之比,包括靶镜导光系统和三倍频系统本身的损耗,这就会低于实际的

三倍频系统转换效率.

实验结果表明,当三倍频效率达到最高时,三倍频匹配角 θ_1 为最佳匹配,此时对应的三倍频波形半峰全宽也最窄.通过解耦合波方程也可以得到这个结论.“神光 II”物理实验中入射基频功率密度在 $1.0 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 左右,对于晶体厚度均为 11mm 的三倍频系统远未达到饱和工作区域,转换效率与入射功率密度存在密切的关系.当基频光束为超高斯光束时,相位匹配角若发生小量失配(小于 $100 \mu\text{rad}$),对波形低功率密度部分影响很小,主要影响高功率密度部分,波形峰值降低,则半峰全宽变宽,同时三倍频效率下降.当相位匹配角为最佳匹配时,三倍频效率最高,三倍频波形半峰全宽也最窄.实验结果与该理论符合良好.

4.2. 二倍频匹配角

以第五路三倍频系统为基准,调节第七路三倍频系统的二倍频匹配角 θ_d ,由所得实验数据绘制的曲线如图 4、图 5 所示.

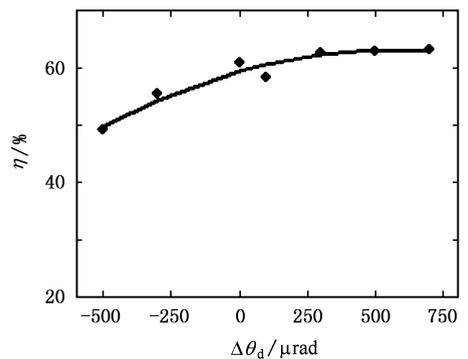


图 4 三倍频效率 η 随二倍频匹配角偏离量 $\Delta\theta_d$ 的变化曲线

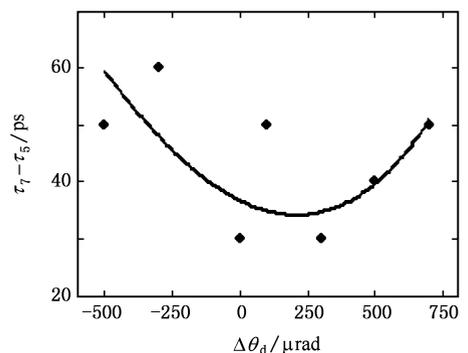


图 5 半峰全宽差值 $\tau_7 - \tau_5$ 随二倍频匹配角偏离量 $\Delta\theta_d$ 的变化曲线

实验结果表明,对于 II 类- II 类偏振失配三倍频系统,在低功率密度区,三倍频效率和三倍频波形半峰全宽对二倍频匹配角偏离量 $\Delta\theta_d$ 的敏感性远远低于对三倍频匹配角偏离量 $\Delta\theta_l$ 的敏感性.三倍频匹配角偏离得到的规律同样适用于二倍频匹配角偏离,当二倍频匹配角 θ_d 为最佳匹配时,对应的三倍频波形半峰全宽也最窄.

4.3. 偏振分配角

以第三路三倍频系统为基准,调节第八路三倍频系统的偏振分配角 θ_p ,由所得实验数据绘制的曲线如图 6 所示. $\Delta\theta_p = 0$ 表示 θ_p 处于原实验调整分配位, $\Delta\theta_p$ 取正值表示偏振分配角 θ_p 增大.

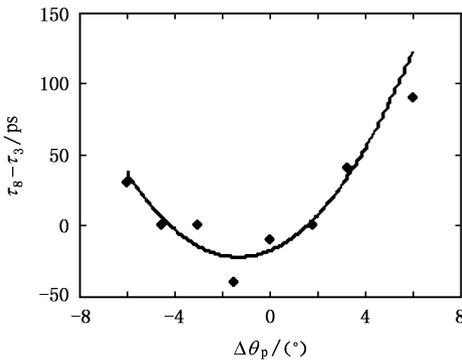


图 6 半峰全宽差值 $\tau_8 - \tau_3$ 随偏振分配角偏离量 $\Delta\theta_p$ 的变化曲线

实验调节偏振分配角 θ_p ,三倍频效率变化很小,但三倍频波形半峰全宽变化很快,偏振分配角 θ_p 处于某一角度时,三倍频波形半峰全宽最窄.偏振分配角 θ_p 决定基频输入的 o 光和 e 光比例,对耦合波方程进行理论计算表明,偏振分配角 θ_p 处于最佳匹配位时,三倍频波形高功率密度部分抬起最快,三倍频波形半峰全宽达到最窄,实验结果与该理论符合较好.偏振分配角 θ_p 处于最佳匹配时, $\tau_8 - \tau_3$ 为负值,表明第八路三倍频波形比第三路基准波形半峰全宽还要窄,需要通过调节第三路三倍频系统的调谐量,进一步改变波形特性,实现两路三倍频波形基本一致.

图 5 表明二倍频匹配角为最佳匹配时,第七路三倍频波形仍比第五路基准波形半峰全宽要宽.在 θ_l, θ_d 均调节至最佳匹配,三倍频效率保持高效稳定时,我们通过调节偏振分配角 θ_p ,也可以改变第七路三倍频波形特性.由所得实验数据绘制的曲线

如图 7 所示.

调整偏振分配角 θ_p 至最佳匹配时,三倍频波形半峰全宽最窄,两路三倍频波形特性达到基本一致.可见,在保持高转换效率的同时,通过调节偏振分配角 θ_p 可以改变三倍频波形特性.

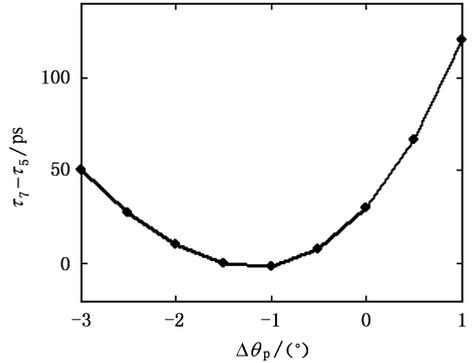


图 7 半峰全宽差值 $\tau_7 - \tau_5$ 随偏振分配角偏离量 $\Delta\theta_p$ 的变化曲线

图 8、图 9 分别为偏振分配角 θ_p 调节前后的“神光 II”北四路三倍频脉冲时间波形图,四路三倍频波形分别以曲线 5、曲线 6、曲线 7、曲线 8 标注,图形左

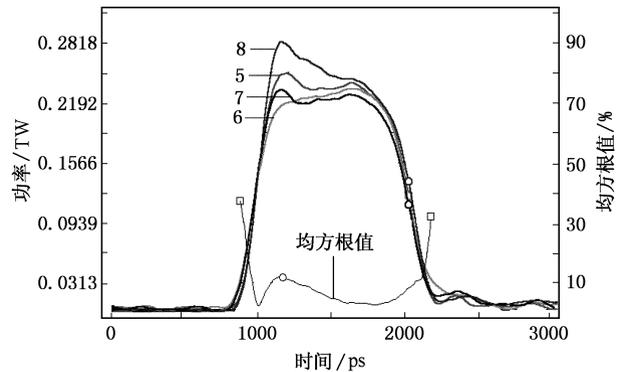


图 8 偏振分配角 θ_p 调节前北四路三倍频脉冲时间波形

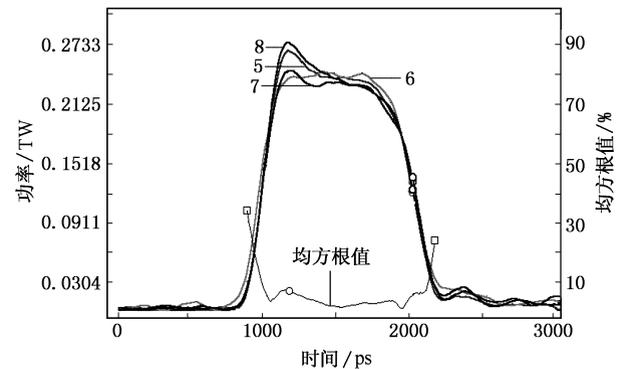


图 9 偏振分配角 θ_p 调节后北四路三倍频脉冲时间波形

侧纵坐标表示三倍频脉冲输出功率,单位为 TW,图形右侧纵坐标用四路三倍频波形的均方根值表示波形一致性,示于图 8、图 9 中三倍频波形下方的曲线.从图 8 可知,第八路与其他三路三倍频波形偏差较大,四路三倍频波形一致性较差.通过调节第八路三倍频系统的偏振分配角 1° 左右,得到图 9 所示的三倍频波形图.由图 9 可见,四路三倍频脉冲时间波形达到基本一致.实验研究结果与理论分析符合较好.

5. 结 论

通过横向对比研究三倍频波形与各调谐量之间的关系,得到以下结论:对于 II 类- II 类偏振失配三

倍频系统,当三个调谐量都处在最佳匹配时三倍频波形半峰全宽 τ 最小.在影响转换效率的三个调谐量中,偏振分配角失配 $\Delta\theta_p$ 对三倍频波形影响最大.在保证高效稳定的三倍频转换效率的同时,可以通过调节偏振分配角 θ_p 达到改变三倍频波形特性的目的.

三倍频波形特性除了受三倍频系统匹配状态影响外,还与基频光束的填充因子、近场分布、波面、光束发散角等参数存在密切的关系,所以实现三倍频波形一致进而实现功率平衡需要各环节协同攻关.本文的研究结果为最终实现“神光 II”八路三倍频功率平衡输出提供了三倍频系统晶体调试的方法,对于最终实现功率平衡具有指导意义.

[1] Tang L J , Cai X J , Lin Z Q 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1075 (in Chinese) 唐立家、蔡希洁、林尊琪 2001 物理学报 **50** 1075]
 [2] Liu R H , Cai X J , Yang L *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4189 (in Chinese) 刘仁红、蔡希洁、杨琳等 2004 物理学报 **53** 4189]
 [3] Yu T Y , Cai X J , Liu R H *et al* 2002 *Chin. J. Lasers A* **29** 267 (in Chinese) 于天燕、蔡希洁、刘仁红等 2002 中国激光 **A 29** 267]

[4] Craxton R S 1981 *IEEE J. Quantum Electron.* **17** 1771
 [5] Zhu B Q , Zhan T Y , Gu Z *et al* 2001 *Proc. SPIE* **4268** 36
 [6] Eimerl D , Auerbach J M , Milonni P W 1995 *J. Mod. Opt.* **42** 1037
 [7] Milonni P W , Auerbach J M , Eimerl D 1997 *Proc. SPIE* **2633** 230
 [8] Auerbach J M , Eimerl D , Milam D *et al* 1997 *Appl. Opt.* **36** 606

Research on pulse shape properties of high-power Nd :glass 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

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics , Chinese Academy of Sciences , Shanghai 201800 , China)

(Received 16 June 2005 ; revised manuscript received 21 April 2006)

Abstract

On the laser driver " Shengguang II " , eight fundamental beams have realized power balance . By changing detuning values of parameters of the frequency tripling systems , the output pulse shapes of the output beams are mutually compared . The experiment results indicate that for the type II -type II polarization-mismatch frequency tripling system , when the input intensity is about 1 GW/cm^2 , of the three parameters that influence the frequency tripling efficiency , polarization detuning angle $\Delta\theta_p$ has the most important effect on the pulse shape . When all three parameters of tripling system are at the optimized values , the full width at half maximum of pulse shape τ reaches minimum . This work describes the method of crystal adjustment to actualize the power balance of the eight frequency tripling beams .

Keywords : frequency tripling , temporal pulse shape , power balance

PACC : 4265M , 4225B , 4260

* Project supported by the National High Technology Development Program of China (Grant No. 2002AA842110).