

# “神光 II”装置三倍频离线调试系统设计与测试精度分析

孔晨晖 季来林 朱 俭

(中国物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要** 在惯性约束聚变(ICF)实验研究中,三次谐波转换单元是 ICF 驱动器重要的组成部分,为了缩短晶体的在线调试发次与时间,需先对单元进行离线调试。其基本原理是,通过扫描、测量倍频和三倍频晶体在不同倾斜角度下的谐波转换效率,然后利用多项式函数拟合数据,绘制谐波转换效率随倾斜角度变化的调谐曲线,确定最佳匹配位。基于理论分析,设计了一套高精度、自动化的三倍频离线调试系统。通过对现有系统的改进实验,以及对结果的分析表明,系统自动工作性能良好,单点测试的重复精度为 $\pm 30 \mu\text{rad}$ ,能量测量精度达到 4%。

**关键词** 非线性光学;晶体离线调试;谐波转换;KDP 晶体;相位匹配

中图分类号 O437

OCIS 140.3460 190.0190 190.4223

文献标识码 A

## Design and Precision Analysis of Offline Crystal Frequency Tripling Alignment Adjusting System for SG-II

Kong Chenhui Ji Lailin Zhu Jian

(Shanghai Institute of Laser Plasma, Chinese Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The third harmonic generator is an important part of the ICF laser facility. It is necessary to adjust the KDP crystal alignment offline before it works efficiently online. The basic process of the adjusting is to measure the harmonic generation efficiency at different detuned angles by scanning the crystal, then fit the dates with multinomial function, and draw a rocking curve and decide the best angle for the harmonic generation. In this paper, a precision and automatic crystal alignment adjusting system is designed base on the theory analysis. In the experiment, the system can adjust the crystal alignment automatically, and it has an accuracy of  $30 \mu\text{rad}$  in phase matching angle measurement, and 4% in conversion energy measurement.

**Key words** nonlinear optics; crystal alignment adjust; harmonic generation; KDP crystal; phase matching

### 1 引言

高功率激光驱动器谐波转换单元的核心是两块 KDP 晶体,第一块晶体将基频光倍频,第二块将倍频光和剩余的基频光混频,产生三倍频光,理论上第一块晶体的倍频效率应为 66.7%,以保证高效的三倍频转换<sup>[1]</sup>。实际应用中,需要严格控制晶体光轴与入射光的夹角,才能实现高效输出。晶体离线调试技术是指在离线情况下精确定位谐波转换晶体的最佳匹配位。

美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)在 1998 年为国家点火装置(NIF)<sup>[2,3]</sup>研制了一套多功能晶体离线调试系统,名为 Crystal Alignment Verification Equipment (CAVE)<sup>[4-6]</sup>。它绘制的谐波转换效率随倾斜角度变化的调谐曲线,角度定位精度达到  $10 \mu\text{rad}$ ,能量测量精度为 2%。“神光 II”装置升级工程中,谐波转换单元的设计指标为输入基频 5000 J/3 ns,带宽 30 GHz,三倍频转换效率达到 60%。由于在实际工作中的光束质量、环境等因素都会使转换效率下降,因此在设计中要求该单元在理想条件下的三倍频转换效率

收稿日期: 2010-05-20; 收到修改稿日期: 2010-06-02

作者简介: 孔晨晖(1985—),男,硕士研究生,主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: jackiekong1985@126.com

导师简介: 朱 俭(1961—),男,研究员,主要从事高功率激光技术方面的研究。

E-mail: 83848384@sina.com.cn(通信联系人)

达到 80% 以上。单元采用 I / II 类角度失谐方案,三次谐波转换效率对倍频晶体的匹配角失配量非常敏感,整个系统的匹配角控制设计要求非常高,对晶体离线调试的精度也有较高的要求。

## 2 系统设计方案

“神光 II”装置升级工程的谐波转换单元采用的是 12.5 mm I 类倍频 KDP 晶体和 10.5 mm II 类混频 KDP 晶体,对于  $2 \text{ GW/cm}^2$  的基频功率密度,80% 转换效率条件下,倍频晶体允许的角度范围为  $\pm 53 \mu\text{rad}$ ,三倍频晶体允许的角度范围为  $\pm 100 \mu\text{rad}$ ,如图 1 所示。计算采用理想平面波模型,基频光时间与空间均为 20 阶超高斯分布,不考虑衍射和走离效应的影响。图中标示的角度均指晶体内部<sup>[7~9]</sup>。

因此,三次谐波转换单元的匹配角控制精度必须在  $\pm 50 \mu\text{rad}$  以内。晶体离线调试的目的是减少在线调整的工作量,给在线调整一个比较准确的参考位置,为使在线时仅需 2~3 发次的大能量激光用于修正,离线调试的精度需达到  $\pm 30 \mu\text{rad}$  以内。

基于“神光 II”装置升级工程的晶体离线调试系统的设计,主要包括能量测量、高精度光束角度监测、自动准直控制和晶体自动扫描控制、环境控制等方面,其基本结构框图如图 2 所示。

使用百皮秒或纳秒脉冲激光器,基频波长 1053 nm (与主激光相同),单横模。重复频率 1~10 Hz,以防止晶体吸收导致局部的温度变化,同时也保证离线调试的工作效率。光束口径  $\Phi$  为 5 mm 左右,以减小晶体局部缺陷带来的误差。由于在  $1 \text{ GW/cm}^2$  功率密度以上时,三倍频转换效率最高时对应的倍频晶体偏离了最佳匹配位,如图 1 中倍频晶体曲线,并且偏离量与基频功率密度有关,因此,离线调试的激光功率密度需达到  $1\sim 2 \text{ GW/cm}^2$ ,与在线调试的相一致。

使用通用热释电激光能量计,配合干涉滤光片可测量基频和倍频(三倍频)取样能量,测量范围  $10 \mu\text{J}\sim 10 \text{ J}$ ,精度为 3%。电荷耦合器件(CCD)配合聚焦透镜、显微物镜和角锥等使用,CCD1 用于激光角漂监测,CCD2 用于光路准直和晶体位置监测。底座上搭载部分光路元件、CCD 和晶体架等以保证系统的稳定,并可控制晶体架平移和转动。环境温度控制在  $(20 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ ,洁净度为 1000 级,与在线一致。

系统工作主要包括光路准直,谐波探测和数据处理三个过程:1)将角锥置于能量计前方作为准直基准,CCD2 监测角锥和晶体表面反射光斑位置,通过底座和马达调整晶体,使其表面法线方向与光束方向一致,在 CCD1 上记录基频光出射的基准位置。2)计算机自动控制电动机调整晶体倾斜角,记录不同位置上对应的两路能量和坐标数据,每个位置可记录多组。3)对同一测量位置上的能量和坐标取平均值,将两组能量换算成相对转换效率,将 CCD1 和 CCD2 上光斑坐标换算成基准位的相对坐标,并对电动机位置进行修正。绘制相对转换效率随相对倾斜角度变化的调谐曲线,对曲线进行多项式拟合后,曲线最高点即离线调试的结果。

对于大口径晶体,应选取晶体表面多个位置进行离线调试,再取平均,可减小晶体折射率不均匀性和加工面形不一致的影响。

## 3 实验结果及分析

根据设计方案,对原“神光 II”离线调试系统进行部分改进。原系统激光器基频脉冲脉宽 10 ns,能量 35 mJ,光束口径  $\Phi$  为 25 mm,能量抖动约 3%。仅使用 CCD2 监视反射光斑,精度为  $\pm 30 \mu\text{rad}$ ,人工调整光

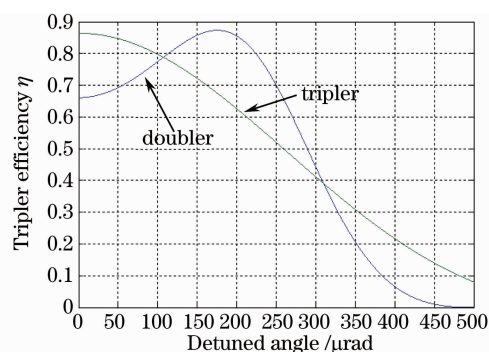


图 1 三倍频转换效率随晶体失谐角变化

Fig. 1 Frequency tripling conversion efficiency versus detuned angle

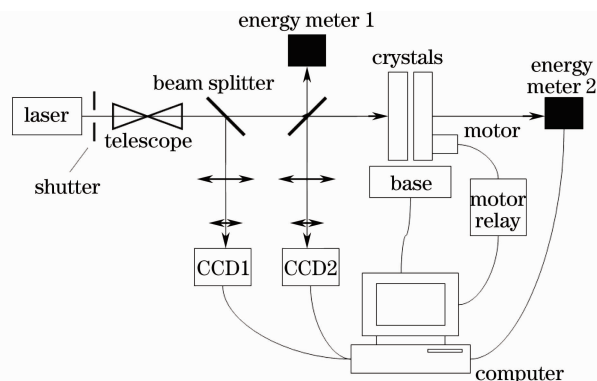


图 2 离线调试系统结构图

Fig. 2 Design of the crystal alignment adjusting system

路准直。手动控制电动机,电动机步长  $10 \mu\text{rad}$ ,人眼观察谐波光强变化。系统调试精度为  $\pm 100 \mu\text{rad}$ 。

改进系统中,激光器不变,为提高能量密度,光束口径  $\Phi$  调整为  $8 \text{ mm}$ 。增加了两路能量探测器,使用计算机自动控制电动机。使用两路网络 CCD,分别监视晶体的入射和反射光斑,精度为  $\pm 30 \mu\text{rad}$ 。人工调整光路准直,数据处理由计算机自动实现。

对一块倍频晶体进行调试,准直时电动机位于  $+297$ ,记为零位。电动机每走 10 步测量一次,每次 10 发脉冲,共测量了 20 个位置。数据处理后,得到相对转换效率随电动机位置变化的曲线,可转换为相对转换效率随相对倾斜角度变化的调谐曲线,如图 3 所示,星形为 10 发脉冲数据平均,实线为拟合后曲线,曲线最高点位于  $-4560 \mu\text{rad}$ ,相对准直位,最佳匹配位在  $-7530 \mu\text{rad}$ 。已知晶体实际在线工作点为  $-7500 \mu\text{rad}$ ,离线调试结果与之非常接近。

重复以上实验 10 次,调试结果分布如图 4 所示。可见系统精度基本控制在  $\pm 5$  步 ( $\pm 50 \mu\text{rad}$ ) 以内,并且调试结果比较集中地分布在平均值  $-7530 \mu\text{rad}$  附近。实验结果与设计目标有一定差距,主要原因是晶体准直和激光角漂监测精度不够。

系统的设计与实验误差具体分析如表 1 所示。对于该表的说明有以下几点:1)角度定位和能量测量分别对应每个测量点的横坐标和纵坐标的误差;2)标记 \* 的误差值需实验进一步确定;3)CCD 光斑矩心误差是指经计算机处理后的光斑中心坐标与实际激光能量中心之间的偏差;4)晶体扫描误差是晶体架电动机步长的一半;5)激光能量起伏是指激光器输出能量抖动  $3\%$  时,倍频或三倍频平均转换效率的变化。

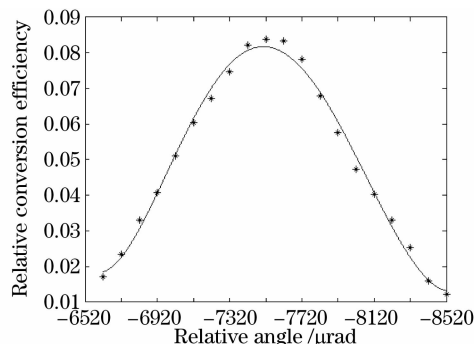


图 3 相对转换效率随相对倾斜角度的变化曲线

Fig. 3 Relative conversion efficiency versus relative angle

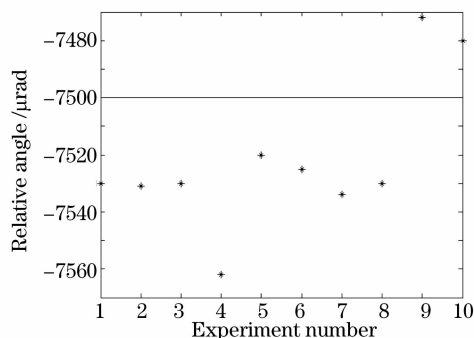


图 4 10 次离线调试的相对倾斜角度

Fig. 4 Relative angles of 10 experiments

表 1 晶体离线调试系统误差分析

Table 1 Error budget of offline crystal alignment adjusting system

Error component	Design	Experiment(SHG)
Collimation error / $\mu\text{rad}$	Pyramid	10
	CCD2 centroid	5
	CCD2 resolution	15
	Stability	10
	Root-mean-square / $\mu\text{rad}$	21.2
Scanning and measure error / $\mu\text{rad}$	CCD1 centroid	5
	CCD1 resolution	15
	Scanning crystal	1
	Temperature	10
	Root-mean-square / $\mu\text{rad}$	18.7
Angle error / $\mu\text{rad}$	28.3	45~50
Energy error /%	Energy meter	3, 3
	Fluctuation	1~2
	Root-mean-square /%	4~5

另外,由于实验用激光器输出功率密度较低,光束质量不够好,三倍频能量测量的误差超过  $10\%$ ,离线调试的误差很大,并且无法实现功率密度超过  $1 \text{ GW}/\text{cm}^2$  时的三倍频调试。由于三倍频与倍频晶体调试相互独立,并且过程基本相同,可预计在激光器功率密度和光束质量提高后,三倍频调试也能达到与倍频调试

相同的精度。

## 4 结 论

一系列对倍频和三倍频晶体调试实验的结果表明,本系统的自动化程度较高,节省了时间和人力,倍频晶体调试精度也较以前提高了2倍以上,基本实现了系统的设计目标。多次实验结果的统计误差与设计中的误差分析数据基本吻合,说明系统误差分析比较合理。但是,由于目前条件限制,实验中所采用的激光器功率较低,光束质量不够好以及 CCD 精度不够等,所以离线调试精度偏低。可预期在各项设备的性能达到指标,环境条件和机械精度都有很好控制的时候,系统精度能有进一步的提高。

## 参 考 文 献

- 1 R. S. Craxton. High efficiency frequency tripling schemes for high power Nd:glass lasers[J]. *IEEE J. Quantum Electron*, 1981, **QE-17**(9): 1771~1781
- 2 C. E. Barker, J. M. Auerbach, C. H. Adame *et al.*. National ignition facility frequency converter development[C]. 2nd Annual International Conference on Solid-State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, SPIE, 1996, **3047**: 197~202
- 3 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 4 R. L. Hibbard, L. W. Liou, R. B. Michie *et al.*. Development of a metrology instrument for mapping the crystallographic axis in large optics[C]. American Society for Precision Engineering 13th Annual Meeting, October 21, 1998
- 5 M. D. Summers, R. L. Hibbard, L. W. Liou *et al.*. CAVE: the design of a precision metrolog instrument for studying performance of KDP crystals[C]. Optical Society of America 1998 Summer Topical Meeting, March 30, 1998
- 6 R. L. Hibbard, M. A. Northon, P. J. Wegner. The design of precision mounts for optimizing the conversion efficiency of KDP crystals for the national ignition facility[C]. 1998 diffractive optic and micro optics conference, Kailua, HI(United States), Jun 8~12, 1998
- 7 P. W. Milonni, J. M. Auerbach, D. Eimerl. Frequency-conversion modeling with spatially and temporally varying beam [C]. *SPIE*, 1997, **2633**: 230~241
- 8 D. Eimerl, J. M. Auerbach, P. W. Milonni. Paraxial wave theory of second and third harmonic generation in uniaxial crystal I. narrowband pump field[J]. *J. Mod. Opt.*, 1995, **42**(5): 1037~1067
- 9 Shen Yuanrang. The Principles of Nonlinear Optics[M]. Gu Shijie Transl. Beijing: Science Press, 1987. 9  
沈元壤. 非线性光学原理[M]. 顾世杰译. 北京: 科学出版社, 1987. 9