

文章编号: 1001-3806(2014)06-0794-04

大口径高通量验证实验平台的三倍频能量测量

梁 越, 韩 伟, 张 崑, 李富全, 曹华保, 夏彦文, 孙志红, 郑奎兴
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

摘要: 为了完成大口径高通量验证实验平台建造初期的三倍频能量测量, 采用凹面镜缩束方式取样的方法, 利用新型玻璃吸收元件完成光束的滤波, 实验测试了新型玻璃吸收元件对测试结果的影响。结果表明, 采用新型玻璃吸收元件可以获得干净的三倍频光, 剩余基频、二倍频光的影响在 0.4% 左右, 整个三倍频能量测量的测量不确定度可以控制在 5% 以内, 保证了激光装置能量测量的可靠性。

关键词: 测量与计量; 高功率激光; 脉冲能量; 卡计; 激光脉冲

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.06.015

Measurement of the third harmonic energy of a large-aperture high power laser

LIANG Yue, HAN Wei, ZHANG Kun, LI Fuquan, CAO Huabao, XIA Yanwen, SUN Zhihong, ZHENG Kuixin
(Research center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to measure energy of the third harmonic (TH) of a large aperture high power laser experiment platform, with a concave mirror sampling the beam, with a novel absorbing glass element filtering the beam, the influence of the absorbing glass element on the measurement result was experimentally tested. According to the data analysis, by using such a novel absorbing glass element, pure TH laser can be obtained and the influence of the residual fundamental and the second harmonic light is about 0.4%. The uncertainty of energy measurement of the entire TH laser energy can be controlled within 5%, which guarantees the reliability of energy measurement for the laser facility.

Key words: measurement and metrology; high power laser; pulse energy; calorimeter; laser pulse

引 言

激光自问世以来, 其参量的测试一直紧跟激光技术的发展而发展, 而激光能量是激光装置最基本的参量之一, 直接关系到激光装置的输出能力、靶面功率密度等与物理实验密切相关的参量。回顾高功率固体激光装置的发展历程不难发现, 为满足物理实验对输出能力不断提高的需求, 装置的激光束数在不断地增加, 光束口径也在不断地增大, 工程规模越来越庞大。目前最具代表性的装置是美国劳伦斯里弗莫尔实验室的国家点火装置^[1], 其激光束数达到 192 路, 单束通光口径达到 400mm × 400mm, 单束输出能量达到了 18kJ 左右; 我国在建的神光 III 主机

装置也达到 48 路, 单束通光口径达到 360mm × 360mm, 单束输出能量 8kJ 左右。能量的提高对元器件的激光抗损伤阈值的要求也进一步提高, 通常大型脉冲激光装置^[2-5]的最大输出性能受限于高通量下光学元件的损伤, 紫外波段的光学元件压力更大。为了全面研究高通量水平下光学元器件、组件或系统的负载能力^[6-8], 必须具有精密的能量测量方法和手段。

大口径高通量验证实验平台是一台具有较高激光控制能力以及完整的激光参量诊断能力、具备开展装置负载能力相关因素(光束质量、光学元件使用环境、光学元件使用寿命等)综合实验验证的激光实验平台^[9]。该平台不仅具有激光参量精密诊断能力、光学元件在线损伤检测能力, 还具有完整的能量监测能力, 它们位于激光参量综合诊断系统内。然而, 在激光参量综合诊断系统未建造之前, 为了研究抑制三倍频 KDP 晶体在高通量运行时的横向受激喇曼散射 (transverse stimulated Raman scattering,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61377102)

作者简介: 梁 越 (1966-), 男, 工程师, 主要从事高功率激光技术方面的研究。

E-mail: liangyue1966@qq.com

收稿日期: 2013-11-08; 收到修改稿日期: 2013-12-03

TSRS) 损伤, 需要在大口径高通量验证实验平台上开展切割晶体和烧蚀晶体 TSRS 实验, 因此要求准确测量三倍频的能量和效率。由于该验证实验平台采用开放式频率转换组件, 不存在聚焦打靶透镜来实现谐波分离, 无法采用大型激光打靶装置的能量标定技术^[10-11], 因此, 如何获得纯净的三倍频光是需解决的首要问题。

本文中介绍了采用凹面镜缩束方式取样, 利用新型玻璃吸收元件完成光束的滤波, 通过监测取样光束的剩余基频、二倍频能量的方法保证取样三倍频光的纯洁性, 从而完成三倍频能量测量的方法。

1 三倍频能量测量光路

大型激光装置的一个重要性能指标是三倍频转换效率, 定义为频率转换模块后的三倍频激光能量与该模块前的基频激光能量之比。大口径高通量验证实验平台频率转换模块前的基频激光能量通过主放测量包内的卡计获取^[8,10]。三倍频能量测量光路如图 1 所示, 它通过一台通光孔径为 80mm 的卡计 (简称 $\varnothing 80$ 卡计) 测量, 采用凹面镜反射取样。为了抑制三倍频晶体的 TSRS, 三倍频晶体沿 O 轴方向一分为二, 所以频率转换模块包括一块二倍频晶体和其后的前后各半块三倍频晶体, 在二倍频晶体前竖直中间位置安装 2.6cm 宽的条状吸收玻璃遮挡三倍频晶体间的缝隙, 确保该缝隙不透光。由于凹面镜 (通光口径 330mm \times 330mm, 焦距 2500mm) 口径的限制, 在频率转换模块后通过古牌号为 AB5 的吸收玻璃制成的光阑将光束口径从 360mm \times 360mm 变为 290mm \times 290mm, 其它实验测量结果证明不同口径的三倍频转换效率基本相同, 即适当变口径不会影响能量的测量。然后该光束大部分能量经牌号为 B33 的玻璃制成的取样镜 (前表面不镀膜, 后表面镀减反膜) 透射进入吸收体吸收, 少部分能量经反射后入射到凹面镜 (不镀膜), 利用凹面镜将光束缩束至约 45mm \times 45mm, 经劈板 (用作时间、近场等其它参量的取样) 透射后进入 $\varnothing 80$ 卡计, 卡

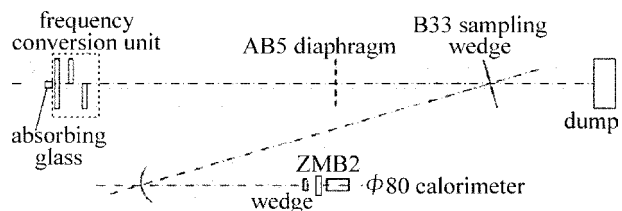


Fig. 1 Measurement layout of the third harmonic energy of a large aperture high power laser experiment platform

计前 3mm 厚的牌号为 ZWB2 的吸收玻璃保证了三倍频光的纯洁性。

2 三倍频卡计标定光路

如上所述, 三倍频能量测量的 $\varnothing 80$ 卡计需要标定。标定光路见图 2, 在 B33 取样镜后放置通光口径为 420mm \times 420mm 的卡计 (简称 420 卡计) 进行三倍频能量的绝对测量, 在光阑后插入新型吸收玻璃元件吸收剩余基频 (1ω)、二倍频光 (2ω), 用于提供干净的三倍频光 (3ω)。为了保证三倍频光的绝对干净, 基于三倍频过程剩余基频光较多的特点, 新型吸收玻璃元件包括两块 1ω 吸收元件和一块 2ω 吸收元件, 保证透射的剩余基频、二倍频杂散光的影响只有 0.4%, 它对测量结果的影响可以忽略不计; 为了验证三倍频光是否干净, 在凹面镜后漏光位置并放两个通光孔径为 100mm 的卡计 (简称 $\varnothing 100$ 卡计), 在卡计前分别装 3mm 厚牌号为 HWB4 (只透基频) 和 6mm 厚牌号为 QB26 (只透二倍频) 的吸收玻璃监测剩余 1ω 和 2ω 光。

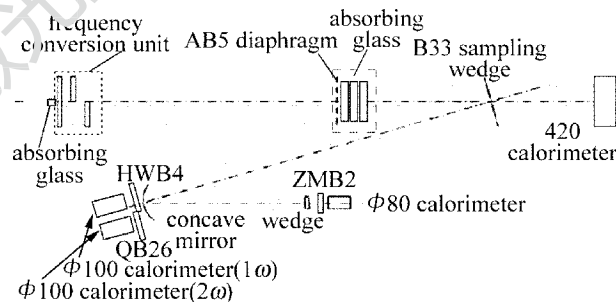


Fig. 2 Third harmonic calorimeter scaling layout of large aperture high power laser experiment platform

3 能量标定

为了获得晶体转换后的三倍频能量, 必须预先对卡计进行标定, 三倍频卡计标定步骤如下: (1) 将频率转换模块中的二倍频晶体调偏, 保证不产生谐波转换 (即产生的二倍频光占总能量的份额不超过 0.1%, 利用二倍频 $\varnothing 100$ 卡计监测), 进行激光主发射, 用 420 卡计给出的能量比上频率转换模块前获得的主放能量得到频率转换模块的满口径的基频透过率 k_1 (包括三倍频晶体缝隙遮挡吸收玻璃、口径变换光阑、晶体透过率、B33 透过率), 同时监测 $\varnothing 80$ 卡计 (3ω) 是否有读数判断该卡计是否将基频过滤干净; (2) 继续将二倍频晶体调偏, 不产生谐波转换, 主放限制口径 (小于光阑口径, 实际标定口径为 220mm \times 220mm) 发射, 用 420 卡计给出的能量比上

频率转换模块前主放能量得到限制口径 1ω 透过率 k_2 (包括三倍频晶体缝隙遮挡吸收玻璃、晶体透过率、B33 透过率), 同时监测 $\varnothing 80$ 卡计 (3ω) 是否有读数判断该卡计是否将基频过滤干净; (3) 计算口径变换系数 (包括三倍频晶体缝隙遮挡吸收玻璃、口径变换光阑): $m = (1 - \alpha) \frac{k_1}{k_2}$, 其中 α 为第 (2) 步光阑的挡光率, 可通过理论计算得到; (4) 将频率转换模块调试到最佳匹配位置, 主放满口径发射 ($360\text{mm} \times 360\text{mm}$), 记录下第 i 发次 420 卡计给出的能量 $E_{1,i}$ (单位为 J) 和 $\varnothing 80$ 卡计 (3ω) 示值 $A_{2,i}$ (单位为 mV), 同时监测 $\varnothing 100$ 卡计 (1ω) 和 $\varnothing 100$ 卡计 (2ω) 是否有读数, 判断该测试结果是否有效; (5) 计算第 i 发次 $\varnothing 80$ 卡计 (3ω) 三倍频能量的标定系数: $\alpha_i = \frac{E_{1,i}}{(A_{2,i} T_1)}$, 其中 T_1 为 B33 取样镜的 3ω 透过率, 该透过率预先通过离线标定获得; (6) 多发次求平均得到 $\varnothing 80$ 卡计 (3ω) 三倍频能量的标定系数: $k_{3\omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha_i$; (7) 完成卡计系数标定后, 在正式实验过程中去掉 420 卡计, 直接利用能量取样测量光路进行三倍频能量的取样测量, 同时去掉三块吸收玻璃, 频率转换模块调试到最佳匹配位置, 主放满口径发射, 计算频率转换模块后的三倍频能量。光阑后的三倍频能量 E_3 与 $\varnothing 80$ 卡计示值 A_2 之间满足如下关系:

$$E_3 = \frac{k_{3\omega} A_2}{r_i} \quad (1)$$

为了计算三倍频转换效率, 因此需要得出频率转换模块前基频光能量和频率转换模块后的三倍频

激光能量。其中频率转换模块前的基频光能量 $E_{1\omega}$ 为主放诊断包测量的基频光能量 E 乘以从主放取样到频率转换模块这段光路的传输效率 T , 即:

$$E_{1\omega} = E \cdot T \quad (2)$$

频率转换模块后三倍频激光能量 $E_{3\omega}$ 为光阑后的三倍频激光能量 E_3 除以光阑系数 M , 即:

$$E_{3\omega} = \frac{E_3}{M} \quad (3)$$

式中, 光阑系数 M 为光阑后三倍频光束能量与光阑前三倍频光束能量的比例, 通过计算和实验, 光阑系数 $M = 0.664$ 。

故三倍频能量外转换效率为:

$$\eta = \frac{E_{3\omega}}{E_{1\omega}} \quad (4)$$

4 实验结果

新型吸收玻璃元件的透射性能离线测试结果如表 1 所示, 在大口径高通量验证实验平台上的在线测试结果如表 2 所示, 其中括号内的数值为相应波长激光的通量。可见不同平台测量结果有一定偏差, 但是固定平台结果比较稳定, 可用于提供干净的三倍频光。为了保证三倍频光的绝对干净, 基于三倍频过程剩余 1ω 光较多的特点, 本方案计划使用两块 1ω 吸收元件加一块 2ω 吸收元件, 它们的综合透射性能见表 1 的总透过率数据。理论计算在大口径高通量验证实验平台输出 5500J 情况下, 不同位置的三波长能量如表 3 所示, 可见剩余杂散光的影响只有 0.4% 左右, 它对测量结果的影响是可以接受的。

Table 1 Offline measurement of transmission performance of novel absorbing glass

item	photometer			picosecond laser			nanosecond laser	
	1ω	2ω	3ω	1ω	2ω	3ω	3ω	
1ω -absorbing glass	7.63%	88.89%	91.85%	8.10%	—	90.25%	82.87%	
2ω -absorbing glass	75.02%	3.20%	87.70%	77.10%	3.58%	88.98%	84.35%	
transmission efficiency (two 1ω -absorbing glass and one 2ω -absorbing glass)	0.44%	2.5%	74.0%	0.50%	—	72.5%	57.9%	

Table 2 Online measurement of transmission performance of novel absorbing glass

item	1ω	2ω	3ω
1ω -absorbing glass	7.79% (6J/cm ²)	—	84.5% (1.6J/cm ²)
2ω -absorbing glass	—	3.86%	87.1% (0.8J/cm ²)

实验中共进行 4 个发次的 $\varnothing 80$ 卡计系数标定, 如表 4 所示。计算结果表明, $\varnothing 80$ 卡计的平均系数为 0.7488J/mV, 标准偏差为 0.48%。考虑到 420 卡计的测量精度, 整个三倍频能量测量的测量不确定度在 5% 以内。

Table 3 Theoretical energy at three wavelengths at various locations

wavelength	before frequency conversion unit	after frequency conversion unit		after absorbing glass		remark
	energy/J	energy/J	scale	energy/J	scale	transmission efficiency/%
1ω	5500	744	0.172	2.1	0.00158	0.46
2ω	0	148	0.0342	2.8	0.00211	3.1
3ω	0	3432	0.794	1327.3	0.996	62.2

Table 4 Results of calorimeter coefficient scaling

shot number	main amplifier energy/J	420 calorimeter energy/J	Ø80 calorimeter reading/mV	Ø80 calorimeter coefficient/(J · mV ⁻¹)
2012060703	5442	1203	1683	0.7524
2012060704	5848	1065	1500	0.7474
2012060801	5584	939	1331	0.7426
2012060803	5642	996	1393	0.7526

5 结 论

介绍了大口径高通量验证实验平台建造初期验证晶体切割和晶体烧蚀抑制 TSRS 的效果的三倍频能量测量方法及其标定过程。采用凹面镜缩束方式取样,利用新型玻璃吸收元件完成光束的滤波,通过监测取样光束的剩余基频、二倍频能量的方法保证取样三倍频光的纯洁性。通过对数据的分析表明,采用新型玻璃吸收元件可以获得干净的三倍频光,剩余基频、二倍频光的影响在 0.4% 左右,整个三倍频能量测量的测量不确定度可以控制在 5% 以内,这为三倍频晶体的定型设计提供了可靠数据。

参 考 文 献

[1] HAYNAM C A, WEGNER F I, ABERBACH J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16):3276-3303.

[2] JIANG S E, DING Y Y, MIAO W Y, *et al.* Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. *Scientia Sinica*, 2009, G39(11):1571-1583 (in Chinese).

[3] ANDRE M L. The french megajoule laser project (LMJ) [J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44(1):43-49.

[4] WARD H, LAFOND E, JULIEN X. Computation of thermally distorted wave-fronts in high-power lasers: comparison with LIL ex-

periments [J]. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 2006, 133:687-689.

[5] FLEURBAEY N, CAVAILLER C, BOURGADE J L. The laser megajoule (LMJ) project dedicated to inertial confinement fusion. Development and construction status [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2005, 74(1/4):147-154.

[6] PENG Z T, WEI X F, YUAN H Y, *et al.* Signal noise ratio of total internal reflection edge illumination for optics damage inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6):1111-1114 (in Chinese).

[7] XU L B, PENG Z T, SUN Z H, *et al.* Gamage online inspection technology of driver terminal optical elements [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(4):721-724 (in Chinese).

[8] ZHAO D F, WANG L, LIN Z Q, *et al.* Experimental study of 351nm propagation with high fluence on No.9 system of SG II laser facility [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7):0702001 (in Chinese).

[9] XIA Y W, SUN Z H, DA Z S, *et al.* Measurement systems of a large-aperture high power laser experiment platform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(F06):s112003 (in Chinese).

[10] LEEPER R J, CHANDLER G A, COOPOER G W, *et al.* Target diagnostic system for the national ignition facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1):868-879.

[11] LI X T, CEN Z F, DENG S T, *et al.* Ghost analysis of the terminal optical system in high power laser set [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5):809-812 (in Chinese).