

文章编号: 0258-7025(2007)05-0637-04

# 基于棱镜实现三倍频谐波分离

赵东峰<sup>1</sup>, 顾震<sup>1</sup>, 邵平<sup>1</sup>, 华能<sup>1</sup>, 乔战峰<sup>1</sup>, 戴亚平<sup>2</sup>, 朱健强<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800; <sup>2</sup> 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

**摘要** 基于棱镜的色散特性, 提出一种楔形窗口与聚焦透镜组合的方式, 解决了高功率激光装置三倍频谐波分离所存在的问题, 即三倍频的高通量传输和靶面辐照。结合“神光 II”装置多功能高能激光系统有关参数进行系统设计, 确定了楔形窗口参数, 并对其所引起的 B 积分和间距误差进行了分析。通过实验测试, 三倍频传输通量由  $0.7 \sim 1 \text{ J/cm}^2$  提高到  $2.8 \text{ J/cm}^2$ , 同时靶面三倍频和二倍频分离间距达到  $2.85 \text{ mm}$ , 实现了高功率激光装置高通量传输的三倍频谐波分离。

**关键词** 激光技术; 高功率激光装置; 三倍频谐波分离; 棱镜

**中图分类号** TN 243 **文献标识码** A

## Prism Based Third Harmonic Splitter

ZHAO Dong-feng<sup>1</sup>, GU Zhen<sup>1</sup>, SHAO Ping<sup>1</sup>, HUA Neng<sup>1</sup>,  
QIAO Zhan-feng<sup>1</sup>, DAI Ya-ping<sup>2</sup>, ZHU Jian-qiang<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In order to realize the third harmonic propagating at high-power and irradiating target, a method based on the combination of wedge window and focus lens has been proposed to serve the important function of angularly dispersing the unconverted the fundamental and second harmonic away from the third harmonic target in high power laser facility. Based on the multifunctional and high-power laser system of “Shenguang-II” facility, the wedge window is designed. And resulted from the wedge window, the B-integral and the space error between the second harmonic and third harmonic are analyzed. In experiment, the third harmonic propagating at high-power has been improved from  $0.7 \sim 1 \text{ J/cm}^2$  to  $2.8 \text{ J/cm}^2$ , and the space is up to  $2.85 \text{ mm}$  at the third harmonic target. The method can be used to achieve the third harmonic splitter in high power laser facility.

**Key words** laser technique; high power laser facility; third harmonic splitter; prism

## 1 引言

自激光问世以来, 惯性约束聚变(ICF)研究取得了举世瞩目的进展。在过去 20 年中, 为实现激光在靶面高聚焦功率和高经典吸收效率, 不断提高激光输出功率并发展高效谐波转换技术, 成为高功率激光装置发展所追求的目标之一, 如国际上已经建成和在建的激光驱动器能量密度覆盖了  $0.5 \sim$

$8 \text{ J/cm}^2$ , 同时实现了三倍频转换效率达到 60% 以上<sup>[1~3]</sup>。

目前受到高效谐波转换技术工程实施的限制, 主要用大口径 KDP 晶体共线谐波转换技术获得三倍频光, 但谐波转换后存在三倍频光 ( $3\omega_0$ ,  $351 \text{ nm}$ ) 与所剩余的基频光 ( $1\omega_0$ ,  $1053 \text{ nm}$ ) 和两倍频光 ( $2\omega_0$ ,  $527 \text{ nm}$ ) 共线传输, 为实现  $3\omega_0$  辐照靶面, 就需要解决三倍频谐波分离的问题。目前所采

**收稿日期**: 2006-08-28; 收到修改稿日期: 2006-12-26

**基金项目**: 国家 863 计划(2005AA842120)资助项目。

**作者简介**: 赵东峰(1976—), 男, 江西人, 硕士研究生, 主要从事高功率激光装置靶场光学技术的研究。

E-mail: dfzhao@siom.ac.cn

**导师简介**: 朱健强(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为高功率激光驱动器总体光学设计、结构设计以及相关检测与测控技术。E-mail: jqzhu@mail.shenc.ac.cn

用的三倍频谐波分离技术主要为:楔形透镜分离和反射镜薄膜分离。楔形透镜对光产生色散又消像差,即其非轴对称系统需要满足赛德尔系数而使设计难度增大,并且加工技术要求很高,特别在线调整要保证楔形透镜光轴和  $3\omega_0$  主光线的同轴度小于  $400 \mu\text{rad}$ <sup>[4]</sup>;  $3\omega_0$  色分离薄膜就是对  $3\omega_0$  光高反,  $1\omega_0$  和  $2\omega_0$  光增透。由于处于紫外区,材料的本征吸收较大,要获得低的吸收和散射损失,以及高的激光损伤阈值和较好的光学稳定性成为技术难题。目前  $3\omega_0$  色分离薄膜抗激光损伤阈值为  $2.5 \text{ J/cm}^2$  左右<sup>[5, 6]</sup>, 与“神光 II”多功能高能激光系统输出的  $3\omega_0$  平均能量密度相近,导致薄膜局部易受破坏。

为解决这个问题,提高装置传输通量,本文利用棱镜的色散特性,提出以楔形窗口与聚焦透镜组合的方式进行三倍频谐波分离。经过实验测试,在三倍频靶面上  $3\omega_0$  和  $2\omega_0$  光斑分离间距达到  $2.85 \text{ mm}$ , 同时三倍频传输通量为  $2.8 \text{ J/cm}^2$ , 是  $3\omega_0$  色分离薄膜传输通量  $0.7 \sim 1 \text{ J/cm}^2$  的  $3 \sim 4$  倍。

## 2 系统设计

### 2.1 楔形窗口参数设计

现设一波矢量为  $k$  的平面波射在楔形窗口上,如图 1 所示,其入射角为  $\alpha$ ,楔形窗口的折射率和棱角分别为  $n$  和  $\theta$ ,顶部和底部厚度分别为  $a$  和  $b$ ,  $k_1$  和  $k_2$  分别代表输入和输出波矢量,利用折射定律,  $k_1$  和  $k_2$  间的偏折角  $\delta$  可表示为<sup>[7]</sup>

$$\delta = \alpha + \arcsin\{n \sin[\theta - \arcsin(\sin\alpha/n)]\} - \theta, \quad (1)$$

这样,两波长光  $\lambda_1, \lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ ) 以同一方向入射上述楔形窗口,其偏折角  $\delta_1, \delta_2$  之差  $\Delta\delta = \delta_2 - \delta_1$ , 将(1)式代入得

$$\Delta\delta = \arcsin\{n_2 \sin[\theta - \arcsin(\sin\alpha/n_2)]\} - \arcsin\{n_1 \sin[\theta - \arcsin(\sin\alpha/n_1)]\}, \quad (2)$$

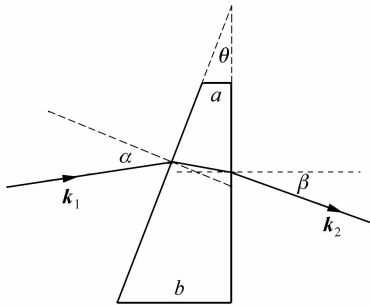


图 1 楔形窗口示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the wedge window

其中  $n_1$  为楔形窗口对  $\lambda_1$  的折射率,  $n_2$  为楔形窗口对  $\lambda_2$  的折射率。

在楔形窗口后相距  $l$  处放置一聚焦透镜,同时聚焦透镜的光轴与楔形窗口输出面垂直,如图 2 所示。设聚焦透镜对波长  $\lambda_1$  焦距为  $f_1$ , 对波长  $\lambda_2$  焦距为  $f_2$ , 这样,  $\lambda_1$  在  $\lambda_2$  焦平面位置的光束外径与  $\lambda_2$  焦点偏差  $d$  可表示为

$$d = (f_2 + l) \tan\Delta\delta - r - h + (f_2/f_1)(r - h - l \tan\Delta\delta)(1 + \tan\Delta\delta \tan\Delta\delta/2), \quad (3)$$

这里,  $r$  表示输入光束口径半径,  $h$  表示  $\lambda_1$  在楔形窗口出射面偏折距离。

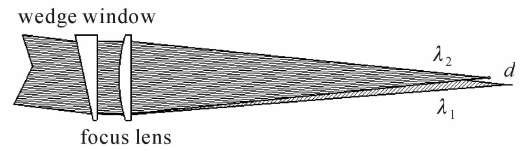


图 2 楔形窗口和聚焦透镜组合产生色散示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the assembly on wedge window and focus lens to perform color separation

根据物理实验要求,三倍频靶面上  $2\omega_0$  和  $3\omega_0$  分离的间距为  $2.00 \text{ mm}$ , 即  $d = 2 \text{ mm}$ 。现以“神光 II”装置多功能高能激光系统的有关参数进行设计,即激光输入半径  $r = 175 \text{ mm}$ ,  $3\omega_0$  聚焦透镜焦距  $f_{3\omega} = 1575 \text{ mm}$  和楔形窗口与聚焦透镜间距  $l = 250 \text{ mm}$ 。同时楔形窗口采用石英玻璃,并作为真空密封。将以上参数分别代入(1)~(3)式,计算得楔形窗口的设计参数为:棱角  $\theta = 17.31^\circ$ , 主激光入射角  $\alpha = 26.06^\circ$ , 顶边  $a = 40 \text{ mm}$  和底边  $b = 165 \text{ mm}$ 。

### 2.2 B 积分计算

石英玻璃对  $3\omega_0$  光透射率和破坏阈值高,但其非线性折射率系数较大,达到  $1.5 \times 10^{-13} \text{ esu}$ , 所以需分析楔形窗口的 B 积分,以避免非线性效应引起的损伤。B 积分是用来度量传输激光束自相位调制,进而产生小尺度自聚焦严重程度的关键参数,其表达式为

$$B(L) = \frac{8\pi^2}{\lambda_0 C} \times 10^7 \int_0^L \frac{n_2}{n_0} P(z) dz, \quad (4)$$

式中非线性折射率  $n_2 = 1.5 \times 10^{-13} \text{ esu}$ , 线性折射率  $n_0 = 1.4767$ 。

取能量密度为  $5 \text{ J/cm}^2$ , 高于目前“神光 II”装置多功能高能激光系统的平均输出能量密度,针对楔形窗口的不同厚度,计算得 B 积分如图 3 所示。楔形窗口厚度为  $40 \sim 200 \text{ mm}$  所引起的 B 积分均小

于 2, 因此楔形窗口的设计参数厚度从 40 ~ 165 mm, 不会产生破坏的小尺度自聚焦丝。

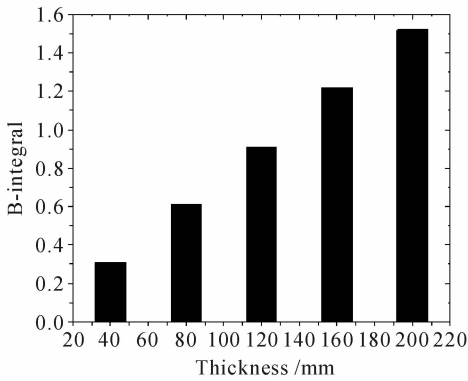


图 3 楔形窗口玻璃厚度与 B 积分增量的关系

Fig. 3 Correlation between different thickness of wedge window and B-integral

### 2.3 间距 $d$ 误差分析

根据系统设计, 影响三倍频谐波分离的  $2\omega_0$  和  $3\omega_0$  光在靶面上间距  $d$  的误差主要有: 主激光角漂、聚焦透镜焦距误差、主激光光束口径偏差和楔形窗口棱角加工误差, 以及楔形窗口与聚焦透镜间光轴偏差。主激光角漂是由于高功率激光装置主激光在传输过程中受到机械件稳定性和环境气流等因素影响而发生的漂移<sup>[8]</sup>。聚焦透镜焦距误差为透镜在设计加工时所产生的误差。主激光输出口径可以在装置中利用光阑进行改变。楔形窗口棱角的加工由于受到加工工艺的限制, 而产生一定的误差。楔形窗口与聚焦透镜间光轴偏差, 是在线调整时利用平行光管对两者的光轴定位, 由平行光管的定位精度直接带来的偏差。

利用式(3), 即间距  $d$  与各参数的关系式进行数值模拟, 分析以上存在的误差因素。如图 4 所示的

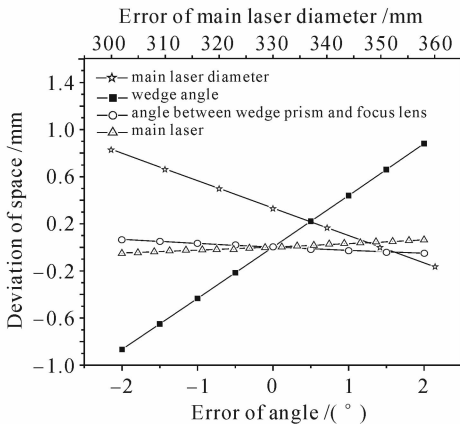


图 4  $2\omega_0$  和  $3\omega_0$  光间距  $d$  与各误差的关系

Fig. 4 Correlation of space  $d$  between  $2\omega_0$  and  $3\omega_0$  with errors

各曲线, 同样在角度变化为  $\pm 2^\circ$  范围内, 对于间距  $d$  的偏差, 主激光角漂和楔形窗口与聚焦透镜间光轴偏差的影响较小, 分别为  $\pm 0.05$  mm 和  $\pm 0.07$  mm, 而楔形窗口棱角加工误差产生的偏差量最大, 达到  $\pm 0.9$  mm。主激光光束口径偏差在  $\phi 300 \sim 360$  mm 范围内间距  $d$  的偏差达到  $-0.16 \sim 0.83$  mm, 而聚焦透镜焦距误差在  $\pm 3$  mm 内引起间距  $d$  的偏差仅为  $\pm 0.015$  mm。这就需要在系统实施中, 主要注重楔形窗口棱角加工误差和主激光光束口径偏差对间距  $d$  的影响。

### 3 实验及结果分析

实验在“神光 II”装置多功能高能激光系统 X 射线激光真空靶室进行, 各器件分布如图 5 所示。系统输出的主激光通过两块高精度伺服反射镜 TM1, TM2 传输到终端光学组件 FOA, 再入射到 X 射线激光靶室内的靶面, 其中 FOA 中的倍频器将  $1\omega_0$  光转换成  $3\omega_0$  光, 由楔形窗口和聚焦透镜组合实现三倍频谐波分离, 同时楔形窗口作为真空密封窗口。另外, 两台靶对准传感器 TAS1, TAS2 分别处于光轴偏下  $45^\circ$  和水平位置构成正交观测系统, 实现靶的定位, 同时与 TM1, TM2 配合实现  $3\omega_0$  光的精确瞄准。实验所用楔形窗口的参数为: 棱角  $\theta = 17.3^\circ$ , 顶边  $a = 40$  mm 和底边  $b = 165$  mm, 主激光入射角  $\alpha = 26^\circ$ 。

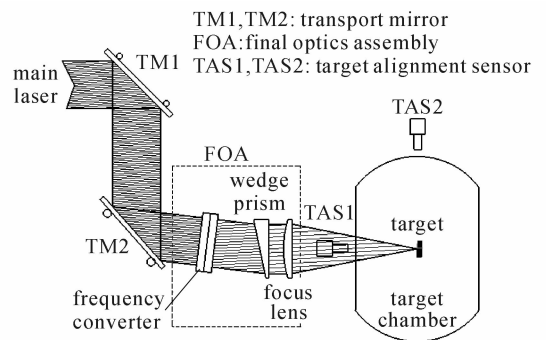


图 5 三倍频谐波分离实验平台

Fig. 5 Equipment of third harmonic splitter

实验结果如图 6 所示, 从上到下依次分布  $3\omega_0$ ,  $2\omega_0$  和  $1\omega_0$  光,  $3\omega_0$  焦点为  $\phi 250 \mu\text{m}$  圆,  $2\omega_0$  光斑为长轴 9.5 mm, 短轴 9.3 mm 椭圆,  $1\omega_0$  光斑为长轴 1.83 mm, 短轴 1.78 mm 的椭圆, 其中  $2\omega_0$  光斑与  $1\omega_0$  光斑相互叠加, 并且  $2\omega_0$  光斑的边缘和  $3\omega_0$  光焦点的间距  $d_{2,3} = 2.85$  mm,  $1\omega_0$  光斑的边缘和  $3\omega_0$  光焦点的间距  $d_{1,3} = 3.8$  mm。其中焦斑为靶面上的烧

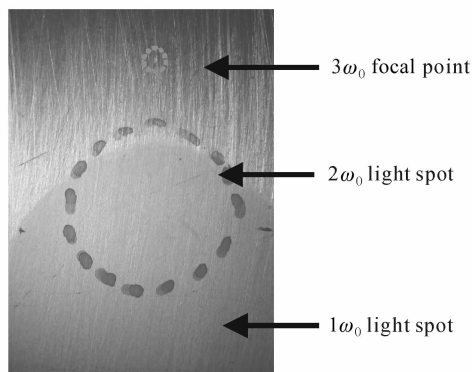


图 6  $1\omega_0$ ,  $2\omega_0$  和  $3\omega_0$  光在靶面的分布

Fig. 6 Location of  $1\omega_0$ ,  $2\omega_0$  and  $3\omega_0$  focused at the target

蚀痕迹。

在实验结果中  $d_{2,3} = 2.85$  mm 大于理论分析所要求的 2.00 mm, 两者偏差  $\Delta d = 0.85$  mm。根据误差分析, 实验过程中多功能高能激光系统输出主激光光束口径仅为  $\phi 310$  mm, 对间距  $d$  的偏差为 0.68 mm, 而主激光角漂  $\pm 15.74 \mu\text{rad}$  时偏差仅为  $\pm 25 \mu\text{m}$ , 楔形窗口与聚焦透镜间光轴偏差  $\pm 15''$  时偏差为  $\pm 0.12$  mm, 楔形窗口棱角的加工误差  $\pm 0.3^\circ$  (厚度约  $\pm 2$  mm) 产生的偏差为  $\pm 0.13$  mm, 设计焦距为 1575 mm 的聚焦透镜加工误差为  $\pm 2$  mm 产生的偏差为  $\pm 0.01$  mm。这样, 对  $2\omega_0$  光斑的边缘和  $3\omega_0$  光焦点的间距  $d$  出现的偏差现象, 主要是主激光光束口径偏差所带来的, 而其余误差因素产生的误差量  $\Delta d = 0.18$  mm。

同时对系统进行了连续多发的实验测试, 基频能量和三倍频能量分别达到 3.55 kJ 和 2.13 kJ, 即三倍频输出能量密度达到  $2.8 \text{ J/cm}^2$ 。而楔形窗口未产生破坏的小尺度自聚焦丝, 即三倍频谐波分离实现高通量传输。

## 4 结 论

对基于棱镜色散特性进行三倍频谐波分离的技术进行了系统设计, 分析了楔形窗口所引起的  $B$  积

分和间距误差, 并进行了实验测试。实验结果中  $2\omega_0$  光斑的边缘和  $3\omega_0$  光焦点间距达到 2.85 mm, 三倍频传输通量提高到  $2.8 \text{ J/cm}^2$ 。实验验证了由楔形窗口和聚焦透镜组合方式实现三倍频谐波分离方法的可行性, 即具有三倍频激光传输通量高, 同时较楔形透镜方式具有工程工艺上易设计加工和在线调整等优点, 但相对增加一块光学元件而提高终端光学组件激光损耗和增多其“鬼像”分布。该技术的研究对高功率激光装置三倍频谐波分离的改进具有重要的意义。

**致谢** 感谢徐光博士和蒋敏华高级工程师有益的讨论。

## 参 考 文 献

- 1 Geirge H. Miller. The national ignition facility [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:1~12
- 2 Edward I. Moses. National ignition facility: 1.8 MJ, 750 TW ultraviolet laser [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:13~24
- 3 Lin Zunqi, Wang Shiji, Fan Dianyuan *et al.*. Successful operation of 8 beam SG-II laser facility for both  $1\omega_0$  and  $3\omega_0$  output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3):403~407  
林尊琪, 王世绩, 范滇元 等. 8 路神光 II 装置在基频和三倍频条件下工作研究进展[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3):403~407
- 4 Paul J. Wegner, Jerome M. Auerbach, Thomas A. Biesiada *et al.*. NIF final optics system: frequency conversion and beam conditioning [C]. *SPIE*, 2004, **5341**:180~189
- 5 Shang Guangqiang, Zhan Meiqiong, He Hongbo *et al.*. Fabrication and properties of third harmonic beam splitter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4):580~582  
尚光强, 占美琼, 贺洪波 等. 1053, 527, 351 nm 倍频分离膜的制备与性能研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4):580~582
- 6 Liu Qiang, Lin Libin, Jiang Xiaodong *et al.*. Study on improving damage threshold of dielectric films [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):637~641  
刘 强, 林理彬, 蒋晓东 等. 提高氧化物介质膜层损伤阈值的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):637~641
- 7 Dagmar Senderakova, Anton Strba. Analysis of a wedge prism to perform small-angle beam deviation [C]. *SPIE*, 2003, **5036**:148~151
- 8 Zhao Dongfeng, Dai Yaping, Yin Xianhua *et al.*. Error analysis for the optical system of target area on high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(12):1425~1428  
赵东峰, 戴亚平, 尹宪华 等. 高功率激光装置靶场光学系统的误差分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(12):1425~1428