

实现惯性约束聚变驱动器谐波分离的 二元光学元件研究*

栗敬钦 杜惊雷 姚 军 高福华 郭永康
(四川大学物理系, 成都 610064)
魏晓峰 袁晓东 袁 静
(西南核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

摘 要 针对惯性约束聚变驱动器的要求, 基于二元光学深蚀刻的思想, 设计并制作成功二元光学谐波分离器。测量表明, 三倍频光的能量利用率达 75.73%。

关键词 二元光学元件, 谐波分离, 惯性约束聚变驱动器。

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)^[1]驱动器中, 激光经两块 KDP 晶体后, 光路中除了 $1.06 \mu\text{m}$ 的基频光外, 还将有波长分别为 $0.53 \mu\text{m}$ 和 $0.35 \mu\text{m}$ 的二倍频光和三倍频光。惯性压缩聚变的谐波分离技术是指将这三种光波分离开, 只让三倍频光进入靶室驱动靶丸而将无用的基频光和二倍频光滤除。能否实现三谐波的分离, 是惯性约束聚变实验中的一项关键技术。

惯性约束聚变驱动器对谐波分离的技术要求主要有: 谐波分离后, 三倍频光在零级位置保持 95% 以上的能量利用率; 色分离小于 2%; 实现谐波分离的器件应具有高的抗光损伤阈值等。传统的分光元件无法满足这些要求。

1995 年, 杨国桢、顾本源^[2]采用杨-顾算法提出一种用衍射光学元件(DOE)实现多波长分离的方法; Pawlowski^[3]在同年提出在同一基片的两面集成两衍射光学元件的方法实现分光的技术, 其设计的元件主要用于光纤之间的耦合; Bett^[4]提出用二元光学元件实现高功率激光系统中的谐波分离, 但未见详细报道。

本文针对惯性约束聚变系统对谐波分离的苛刻要求, 基于二元光学深蚀刻的思想, 设计了二元光学谐波分离器, 计算了衍射场的分布, 对器件的浮雕结构进行了优化, 采用反应离子刻蚀技术制作成功该器件, 并对其浮雕结构和衍射效率进行了测量。

2 原 理

1991 年, Veldkamp 提出二元光学元件深蚀刻的思想^[5]。所谓深蚀刻, 就是将原来二元

* 中国科学院微细加工光学技术国家重点实验室和中国工程物理研究院资助。

收稿日期: 1998-09-07; 收到修改稿日期: 1998-11-30

光学元件制作的 2π 相位深度加深到 2π 的整数倍。蚀刻的深度加大赋予了元件一些新的特性，如焦距缩短效应、高相对孔径、高色散率、高深宽比、可做快速透镜、可降低对制作系统的精度要求^[6]等。

当二元光学元件的浮雕深度加深 2π 相位深度时，不影响原元件设计光波长的衍射场的分布，但会改变其它不同波长成分光波的衍射场分布。找出深蚀刻调制其它成分波长的规律，通过叠加 2π 相位深度，在不改变原光波衍射场分布的条件下，同时对另一波长成分的入射光波产生所希望的调制，实现元件的多功能集成，此即二元光学多波长分离元件设计思想。其设计过程描述如下：

假定：材料折射率 n 为一定值，入射光波长成分为 $\lambda_i (i = 1, 2, \dots, N)$ ，已知元件对 λ_1 的相位延迟为 φ 。

- 1) 将 λ_1 的相位 φ 量化为 M 个台阶；
- 2) 针对 λ_1 对每个台阶叠加不同 2π 整数倍的相位深度；
- 3) 由关系式 $\varphi_m = \frac{\lambda_{1m}}{\lambda_i} \varphi$ 计算其余波长的相位延迟 φ_m (式中 i 表示不同波长， m 表示不同台阶)；
- 4) 计算各光波经 φ_m 调制后的光场分布；
- 5) 改变 2π 相位的叠加方式或量化台阶数 M ，重复 2) 至 4) 步骤直至各波长的输出光强分布均符合分离要求为止。

3 谐波分离器的设计

按惯性约束聚变实验要求，谐波分离的理想情况是：谐波通过分离器后，基频光和二倍频光分别衍射到正负一级，三倍频光仍在零级。

根据以上要求，设计的谐波分离器为三台阶的周期结构如图 1 所示，其一周期内的结构

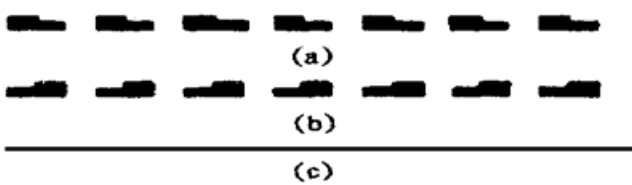


Fig. 1 Schematic diagram of the separator

如图 2 所示，三台阶对三倍频光的相位延迟分别为 4π 、 2π 和 0 。

假设波长为 λ 的单色平面波入射，谐波分离器的台阶宽度为 a ，台阶深度分别为 d 和 $d/2$ ，周期数为 N 。可推导得三种波长经谐波分离器后在远场的分布分别是

$$U_1(f_x) = U_0[\exp(i4\pi/3) + \exp(i2\pi/3) \exp(i2\pi a f_x) + \exp(i4\pi a f_x)], \quad (1)$$

$$U_2(f_x) = U_0[\exp(i2\pi/3) + \exp(i4\pi/3) \exp(i2\pi a f_x) + \exp(i4\pi a f_x)], \quad (2)$$

$$U_3(f_x) = U_0[1 + \exp(i2\pi a f_x) + \exp(i4\pi a f_x)], \quad (3)$$

其中 f_x 为 x 方向空间频率， $U_0 = a \sin c(a f_x) \frac{\sin(3N a f_x \pi)}{\sin(34 a f_x \pi)}$ 。

根据以上三式分别作出的三种波长远场分布曲线，如图 3 所示。由图可见，对于基频光和二倍频光，谐波分离器分别相当于图 1(a) 和图 1(b) 所示的闪耀光栅。计算表明，基频光和二倍频光透过该光栅后，分别有近 70% 的能量被闪

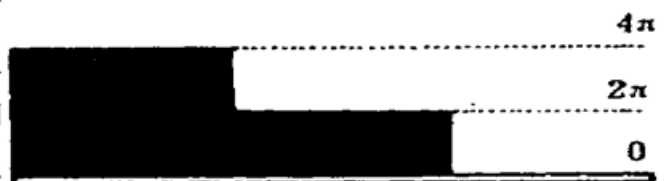


Fig. 2 Structure of the separator in one period

耀到正一级和负一级上, 其余能量被闪耀到更高的衍射级次上。而对于三倍频光而言, 其相当于通过一片无任何浮雕结构的基片, 如图 1(c) 所示, 继续沿光轴方向传播。

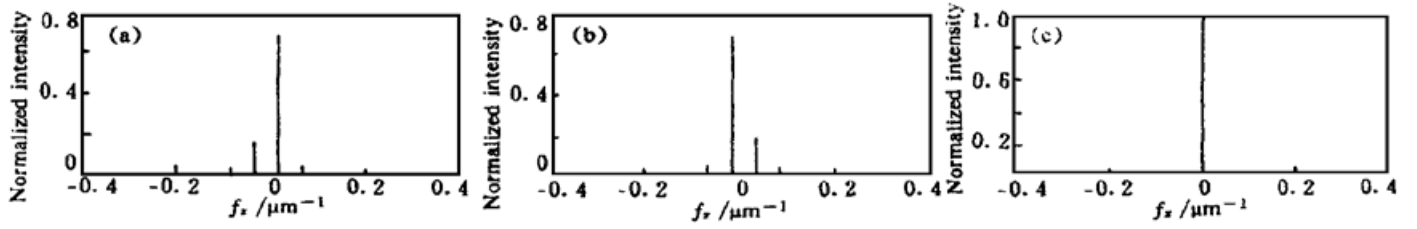


Fig. 3 Distributions of harmonic waves in far field. (a) Fundamental wave, (b) SHG wave, (c) THG wave

在前面的推导中, 假定了谐波分离器的折射率 n 对三种波长为一定值。然而实际上, 波长不同, 材料的折射率将各不相同。因此, 必须对浮雕深度进行优化。

三种波长的衍射效率定义为

$$\eta_i = \frac{I_i}{I_{\text{total}}}, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

其中 I_i 表示某一波长在三倍频光焦斑范围内的能量, I_{total} 表示该波长的总能量。由定义可见, 基频光、二倍频光的衍射效率 η_1 、 η_2 愈低, 输出三倍频光的干净度愈好。

模拟计算得三种波长的衍射效率随台阶深度 d 变化曲线如图 4 所示。由图可见在 $d_i = 1.544 \mu\text{m}$ 处, η_1 和 η_2 同时达到最小值 0.04%, 而 η_3 仍然保持了大于 95% 的衍射效率, 为 97.41%, 此即优化深度。

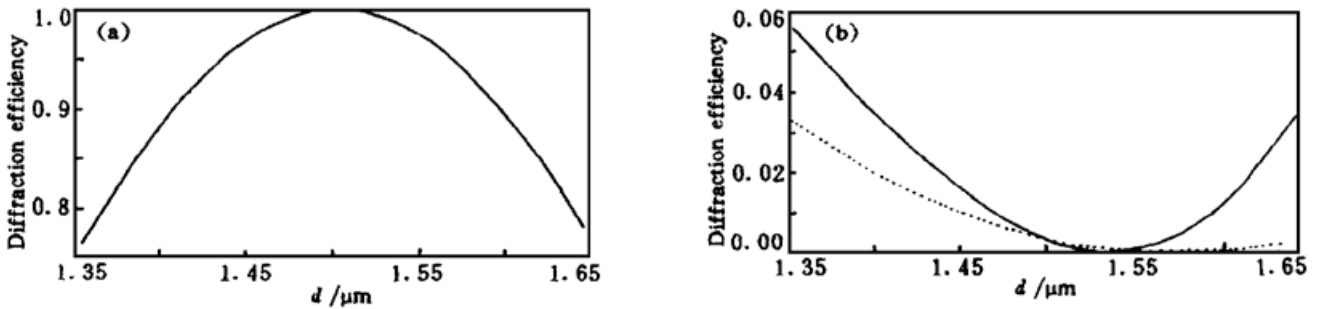


Fig. 4 Diffraction efficiencies of harmonic waves in dependence of the depth of step. (a) THG wave, (b) fundamental wave, — SHG wave

谐波分离器的设计参数如下: 材料为熔石英, 元件直径 40 mm, 刻线区尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$, 厚度为 4 mm, 台阶宽度为 $25 \mu\text{m}$ 。

4 结果和分析

4.1 元件制作

选用反应离子刻蚀技术制作谐波分离器, 实验在中科院光电所微细加工国家重点实验室完成。图 5 为用 ALPHA STEP-500 型台阶轮廓仪测得的二元光学谐波分离器浮雕轮廓图。由图可见, 台阶的陡面较为理想, 没有明显的对位误差。刻蚀的总深度为 $1.44 \mu\text{m}$, 与设计值 $1.54 \mu\text{m}$ 相比有 $0.1 \mu\text{m}$ 的偏差。

4.2 实验结果

根据 3 中衍射效率的定义, 设计了如图 6 所示的衍射效率测量系统。从钕玻璃激光器出来的 $1.06 \mu\text{m}$ 脉冲激光经两块 KDP 晶体后, 入射到一半反半透镜上。反射光的能量用能量

卡计 1 接收。透射光经谐波分离器后被一透镜聚焦。能量卡计 2 在透镜后焦面上接收三倍频光焦斑范围内的光能量。

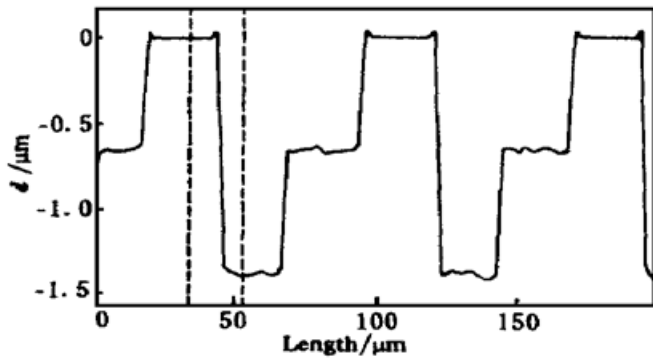


Fig. 5 Measured relief structure of the separator

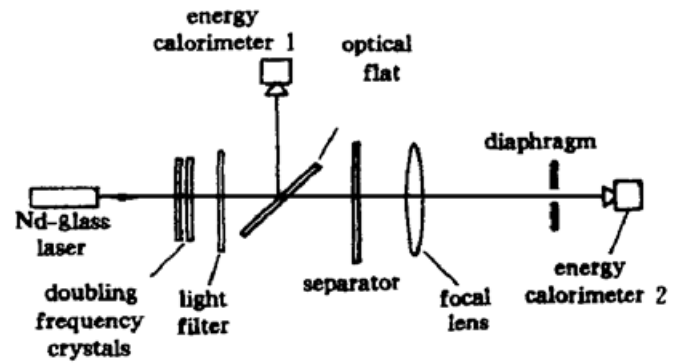


Fig. 6 Schematics of diffraction efficiency measuring system

在每测一种波长的衍射效率前，须将其余二种波长滤掉，因此在一脉冲入射到半反半透镜之前，须加上滤光片。实验中所加的滤光片对三种波长透过率见表 1。

Table 1. Transmissivities of the light filters

	$T_{1.06} / \%$	$T_{0.53} / \%$	$T_{0.35} / \%$
AB ₅ (5)-3	6.2	23.9	1.9
ZWB ₂ (5)-1	0	0	62.6
filter glass	100	0	0
QB26-(2, 4)	0	66.3 65.5	5.7

根据表 1，测基频光的能量时用玻璃滤光片；测二次谐波能量时用 QB26-(2, 4) 加 AB₅(5)-3；测三次谐波时用 ZWB₂(5)-1。

由于激光脉冲的能量不稳定，测量中采取多次平均的方法。

最后测得三种波长的衍射效率分别为 $\eta_1 = 2.99\%$ ， $\eta_2 = 2.90\%$ ， $\eta_3 = 75.73\%$ 。

4.3 误差分析

实测结果与模拟计算结果有一定偏差，分析其主要原因有：

1) 台阶深度误差将引起对三种波长相位调制偏差从而改变三种波长经分离器后的光场分布，这将直接导致谐波分离器衍射效率和分波效果的下降。

2) 台阶表面粗糙度也是导致元件衍射效率下降的主要原因，粗糙表面相当于一无规光栅，对三倍频光散射作用显著，使得谐波分离器的透过率下降，从而导致三倍频光衍射效率下降。

3) 由于激光模式不稳定，光波经透镜聚焦后不是一圆形光斑而呈多模分布。

结 论 按照本文所述方法设计的二元光学谐波分离器实现了高功率钕玻璃激光系统三种波长的分离，元件结构简单，设计制作检测较方便，这种器件所具有的一系列优点，完全可能满足惯性约束聚变驱动器的要求。为多波长分离元件设计特别是实现波长成分相差较大的多色光的分离提供一新的设计思路。

参 考 文 献

- [1] Lindl J D, McCrory R L, Campbell E M. Progress toward ignition and burn propagation in inertial confinement fusion. *Physics Today*, 1992, **45**(32) : 32~ 40
- [2] Chang M P, Ersoy O K, Dong B *et al.*. Iterative optimization of diffractive phase elements simultaneously implementing several optical functions. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(17) : 3069~ 3076
- [3] Pawlowki E. Diffractive optical elements: Fabrication and measurement of wavelength division demultiplexer. *Proc. SPIE*, 1995, **2577** : 158~ 164
- [4] Bett T H, Stevenson R M. Diffractive optics for application on high power solid lasers. *Proc. SPIE*, 1995, **2633** : 129~ 140
- [5] Veldkamp W B, Leger J R, Swanson G J. Overview of microoptics past, present and future. *Proc. SPIE*, 1991. **1544** : 287~ 299
- [6] 徐 平, 唐继跃, 郭履容等. 深蚀刻二元光学元件. *光学学报*, 1996, **16**(12) : 1796~ 1801

Binary Optical Element for Separating Harmonic Waves in ICF Driver

Su Jingqin Du Jinglei Yao Jun Gao Fuhua Guo Yongkang

(*Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064*)

Wei Xiaofeng Yuan Xiaodong Yuan Jing

(*Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900*)

(Received 7 September 1998; revised 30 November 1998)

Abstract According to the request of harmonic wave separation in inertial confinement fusion (ICF) driver and based on the idea of deep etching in binary optics, the binary optical element for separating harmonic waves is designed and fabricated. The measuring results show that the energy utilization ratio of the third harmonic wave at zero order is up to 75.73%.

Key words binary optics element, harmonic waves separation, inertial confinement fusion driver.