

文章编号:1004-4213(2010)06-0988-6

# 用于谐波分离的三角形槽亚波长光栅设计\*

王方, 粟敬钦, 刘兰琴, 王芳, 王文义, 莫磊

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:**根据亚波长光栅的导模共振异常特性, 提出三角形槽亚波长光栅实现惯性约束聚变驱动器谐波分离的技术方案. 定义了用于描述谐波分离性能优劣的谐波分离品质函数, 对影响三角形槽亚波长光栅的谐波分离品质函数的光栅参量进行了详细的分析, 基于矢量衍射理论设计了能够实现谐波分离的三角形槽亚波长光栅, 确定了用于谐波分离的三角形槽亚波长光栅的设计思路和方法.

**关键词:**衍射光学; 亚波长光栅; 矢量衍射理论; 谐波分离

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103906.0988

## 0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)物理实验要求采用紫外光产生均匀辐照场以提高束靶耦合过程能量利用率, 目前 ICF 驱动器<sup>[1-2]</sup>采用红外激光(1.053 $\mu\text{m}$ )放大耦合谐波转换技术以产生紫外光(0.351 $\mu\text{m}$ )的技术路线. 如何干净有效的实现三种谐波的分离, 避免剩余无用的基频光和二倍频光对物理实验的影响, 是目前高功率固体激光驱动器一直面临的难点<sup>[3-4]</sup>.

目前, 国内外曾经使用过和正在使用的谐波分离方案主要包括空间纵向色分离、多色膜分离、色分离光栅(Color Separation Grating, CSG)<sup>[3]</sup>、楔形透镜色分离、双光栅色分离等方法<sup>[5]</sup>.

随着微加工技术的发展, 二元光学元件<sup>[5]</sup>加工准确度得到了很大的提高. 具有亚波长结构的光栅也因此发展起来. 亚波长光栅是一种光栅周期小于使用光波长的光栅, 当光入射到它的表面时, 它具有不发生高次衍射波的特点<sup>[6-7]</sup>. 近年来, 亚波长光栅以其高透射、消偏振等特性为人们所关注, 它可以用作抗反射面、相位板、窄带滤波器和偏振器件等<sup>[8-13]</sup>.

采用亚波长光栅进行谐波分离是一种全新的方法. 与 CSG 方法相比, 它的光栅结构简单, 易于增大色分离角, 可以将  $1\omega$  光和  $2\omega$  光分离得更加彻底; 与双光栅色分离方法相比, 亚波长光栅只承担色分离的任务, 光栅结构相对简单, 衍射效率可更高. 此外, 采用亚波长光栅进行谐波分离可以避免楔形透

镜的厚度所引入的 B 积分效应, 有利于提高光束质量和降低后续元件紫外损伤的风险.

本文基于矢量衍射理论, 通过分析 ICF 驱动器谐波分离的要求, 定义可以量化的优化设计的目标函数——谐波分离品质函数. 通过分析光栅周期、入射角、占空比、刻槽深度等光栅参量对三角形槽亚波长光栅谐波分析品质函数的影响, 根据品质函数值的变化选择最优参量作为用于谐波分离的亚波长光栅的设计参量.

## 1 优化设计的目标函数设计

亚波长光栅的优化目标是使得  $3\omega$  光的 T-1 级衍射效率最大, 而对于  $1\omega$  光和  $2\omega$  光则 T0 级衍射效率最大. 要满足  $1\omega$  光、 $2\omega$  光和  $3\omega$  光分离, 则光栅周期需选择在  $0.4\ \mu\text{m}$  以下. 结合实际加工能力, 设计光栅周期在  $0.2\ \mu\text{m}\sim 0.4\ \mu\text{m}$  之间.

影响  $3\omega$  光衍射效率的除了光栅周期外, 主要还有占空比、刻槽深度、刻槽形状和光栅基底材料等参量. 结合目前的加工技术, 在设计过程中, 刻槽形状选择三角形; 基底材料的选择 K9 玻璃. 占空比和刻槽深度则需要通过优化得到.

谐波分离的性能可以采用以下三个指标来衡量:

1) 三倍频光能量利用率

定义为三倍频光输出级能量与三倍频光输入总能量之比, 也就是三倍频光的输出级衍射效率. 其中输出级在本文中指亚波长光栅的 T-1 级, 三倍频光输入总能量指注入亚波长光栅的三倍频光能量.

$$\Gamma_{3\omega} = E_{\text{ef}} / E_{\text{total}} \quad (1)$$

$E_{\text{ef}}$  为三倍频光输出级能量,  $E_{\text{total}}$  为三倍频光输入总能量.

2) 色分离度

\* 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007B08005)资助

Tel: 0816-2491411

Email: wang.f.zju@gmail.com

收稿日期: 2009-08-25

修回日期: 2010-01-20

定义为基频光和二倍频光在三倍频光输出级(T-1级)上的能量与其各自输入总能量之比,即基频光和二倍频光在三倍频光输出级上的衍射效率<sup>3]</sup>.

$$\Gamma_{i\omega} = \frac{E_{i\text{ef}}}{E_{i\text{total}}} \quad (i=1,2) \quad (2)$$

$E_{i\text{ef}}$ 为基频光或二倍频光在三倍频输出级上的能量, $E_{i\text{total}}$ 为基频光或二倍频光的输入总能量.

色分离度主要用来衡量混入打靶光束中的基频光和二倍频光的能量大小, $\Gamma_{i\omega}$ 越小代表色分离效果越好,即输出三倍频光的干净度越好.当 $\Gamma_{i\omega}=0$ 时,说明输出级(T-1级)上只存在三倍频光.

### 3) 色分离角

定义为基频光或二倍频光最大输出级与三倍频光输出级的夹角.

$$\Lambda_{cs} = |\Lambda_i - \Lambda_{3\omega}| \quad (i=1,2) \quad (3)$$

$\Lambda_{cs}$ 为色分离角, $\Lambda_i$ 为基频光或二倍频光最大输出级衍射角, $\Lambda_{3\omega}$ 为三倍频光输出级衍射角.本文中,基频光或二倍频光最大输出级指亚波长光栅的 $T_0$ 级.

为方便评价不同参量下亚波长光栅的谐波分离性能,引入品质函数(MF)的概念,定义MF越高代表谐波分离性能越好.

$$MF = \varphi(\Gamma_{3\omega}) \cdot \varphi(\Gamma_{i\omega}) \cdot \psi(\Lambda_{cs}) \quad (4)$$

要得到品质函数的详细定义,就必须对 $\varphi(\Gamma_{3\omega})$ 、 $\varphi(\Gamma_{i\omega})$ 和 $\psi(\Lambda_{cs})$ 三个函数进行定义.本文中 $\Gamma_{3\omega} \in [0,1]$ .要求该函数值越高越好,区间内单调,且呈指数增长,定义该函数为

$$\varphi(\Gamma_{3\omega}) = \arcsin \Gamma_{3\omega} \quad (5)$$

$\Gamma_{i\omega} \in [0,1]$ .要求该函数值越高越好,区间内单调增,且呈指数增长,定义该函数为

$$\varphi(\Gamma_{i\omega}) = \gamma(\Gamma_{1\omega}) \cdot \gamma(\Gamma_{2\omega}) = \arcsin(1 - \Gamma_{1\omega}) \cdot \arcsin(1 - \Gamma_{2\omega}) \quad (6)$$

$\Lambda_{cs} \in [0,180]$ .要求该函数值越高越好,区间内单调增,且呈指数增长,定义该函数为

$$\psi(\Lambda_{cs}) = \sin\left(\frac{\Lambda_{cs}}{2}\right) \quad (7)$$

为使得品质函数的各个变量对函数值的影响权重相等,结合式(5)~(8),并将各个函数值归一化,得到品质函数的表达式

$$MF = [2\arcsin \Gamma_{3\omega} / \pi] [2\arcsin(1 - \Gamma_{1\omega}) / \pi] \cdot \left[ \frac{2\arcsin(1 - \Gamma_{2\omega})}{\pi} \right] \sin(\Lambda_{cs} / 2) \quad (8)$$

## 2 三角形槽亚波长光栅设计

三角形槽亚波长光栅结构图如图1.图中 $h_{\text{Depth}}$ 为光栅深度(单位:period), $T_{\text{period}}$ 为光栅周期(单位: $\mu\text{m}$ ), $\Delta/T_{\text{period}}$ 定义为占空比.基于加工能力,设计三角形为等腰三角形,光栅基底为BK7.

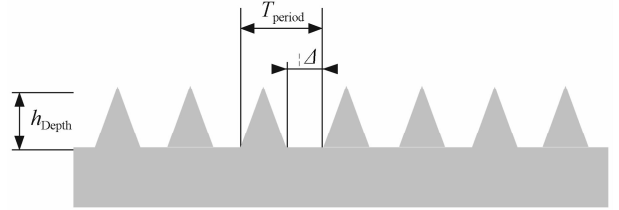
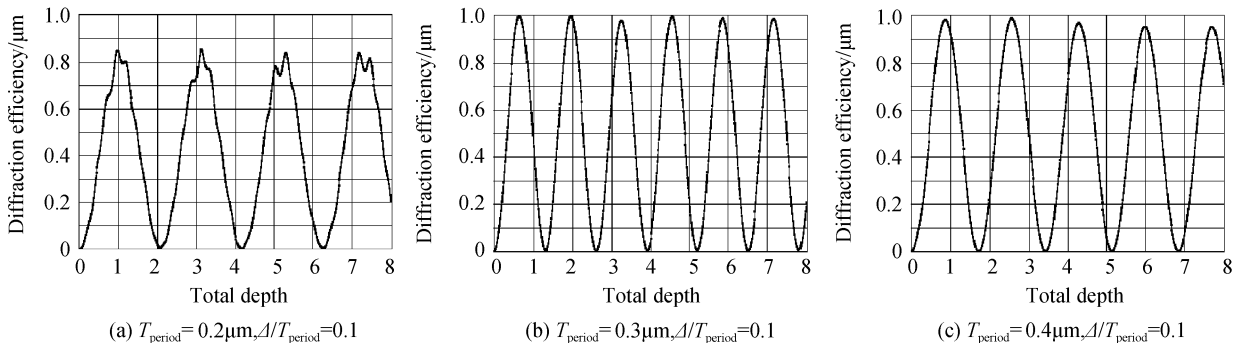


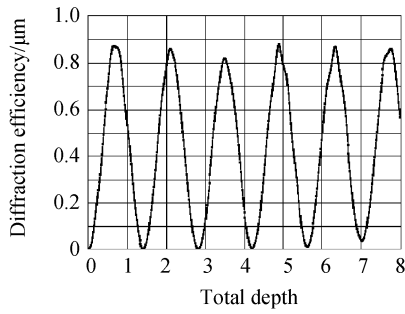
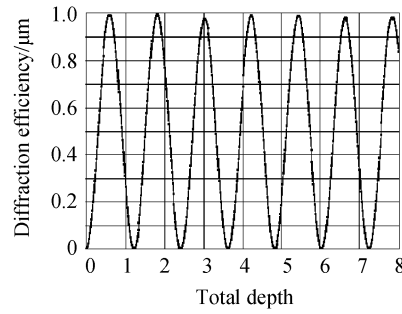
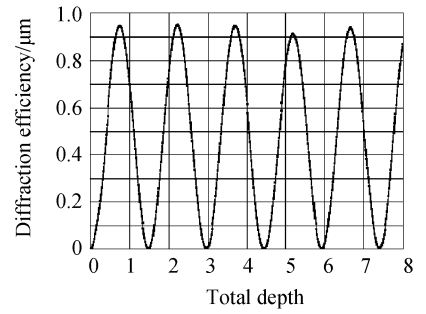
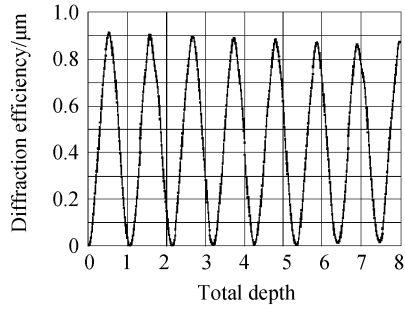
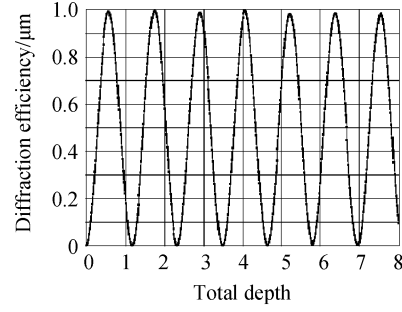
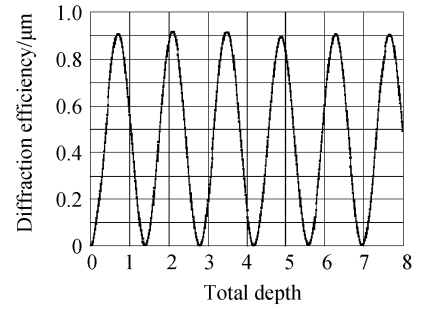
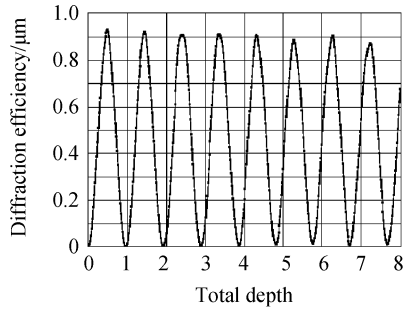
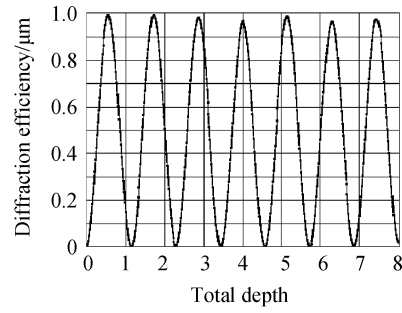
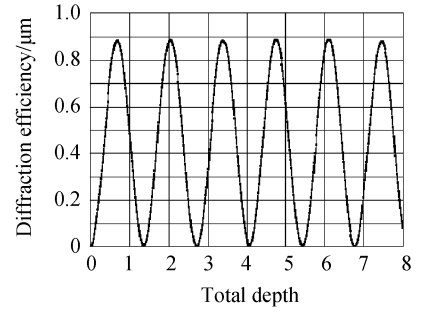
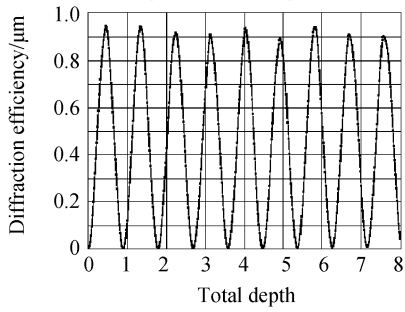
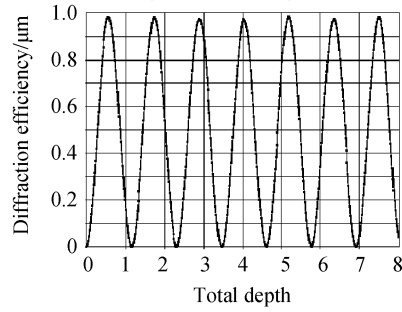
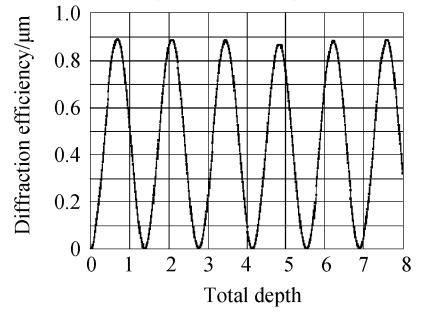
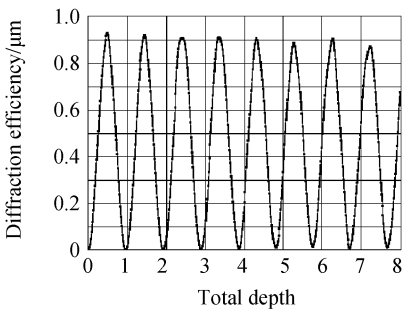
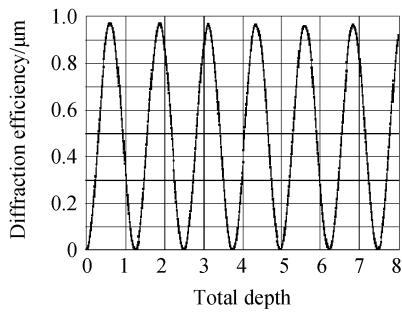
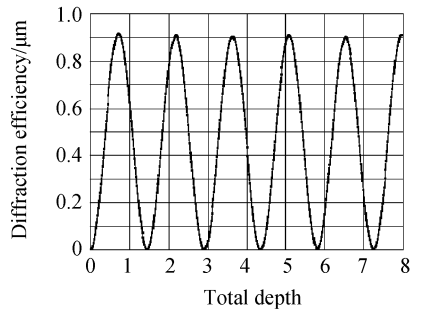
图1 三角形槽亚波长光栅结构

Fig. 1 Schematic of the grating structure with triangle curve

由Bragg条件<sup>[14]</sup>可知,当入射角与衍射角相等时,该级衍射效率最大.由于使用波长确定,因此使得T-1级衍射效率最高的最佳入射角由光栅周期唯一确定.

优化过程中主要以提高三倍频光T-1级衍射效率为目标,首先给出在不同的光栅周期、占空比下得到三倍频光T-1级衍射效率随刻槽深度的变化情况.其中 $T_{\text{period}} \in [0.2, 0.4]$ , $\Delta/T_{\text{period}} \in [0.1, 0.9]$ ,得到三倍频光T-1级衍射效率随刻槽深度(单位: $\mu\text{m}$ )的变化情况如图2.



(d)  $T_{\text{period}}=0.2\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.2$ (e)  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.2$ (f)  $T_{\text{period}}=0.4\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.2$ (g)  $T_{\text{period}}=0.2\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.3$ (h)  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.3$ (i)  $T_{\text{period}}=0.4\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.3$ (j)  $T_{\text{period}}=0.2\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.4$ (k)  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.5$ (l)  $T_{\text{period}}=0.4\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.5$ (m)  $T_{\text{period}}=0.2\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.5$ (n)  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.6$ (o)  $T_{\text{period}}=0.4\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.6$ (p)  $T_{\text{period}}=0.2\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.6$ (q)  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.6$ (r)  $T_{\text{period}}=0.4\mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.6$

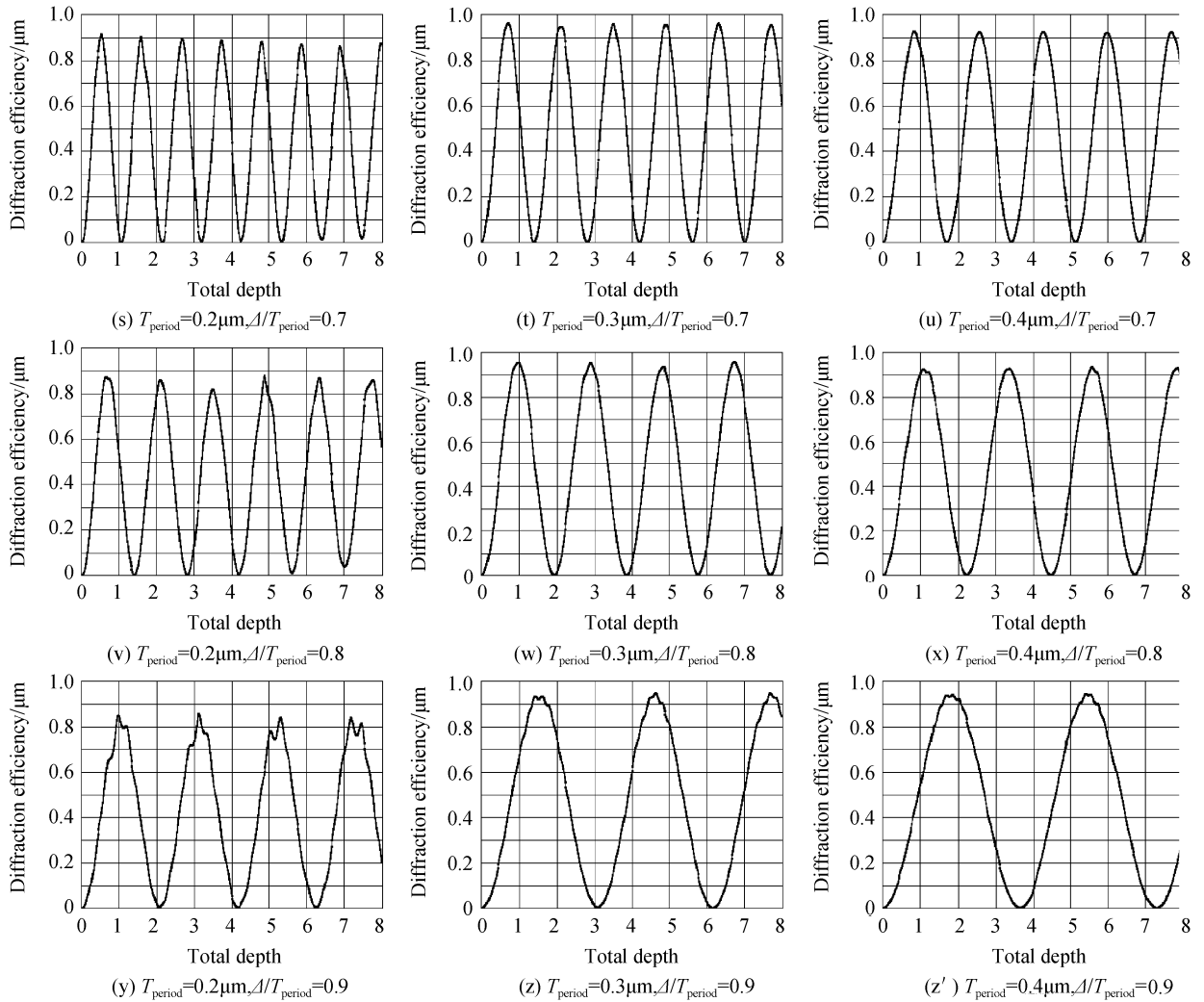


图2 三角形槽光栅三倍频光 T-1 级衍射效率变化情况

Fig. 2 The diffraction efficiency change of T-1 diffraction order of  $3\omega$  wave

根据三倍频光 T-1 级衍射效率随光栅周期、占空比和刻槽深度的变化情况,可以得出以下结论:

1) 与矩形槽亚波长类似,光栅周期、占空比和刻槽深度对衍射效率的影响都比较大,其中光栅周期对最大衍射效率影响明显,衍射效率随刻槽深度的变化呈周期性变化,而占空比则主要影响变化周期的大小;

2) 与矩形槽亚波长类似,光栅周期相同,当占空比为 0.1 或 0.9 时,三倍频光 T-1 级衍射效率随刻槽深度变化较缓,即衍射效率对刻槽深度变化相对不敏感;

3) 与矩形槽亚波长类似,占空比相同,当光栅周期为  $0.3\mu\text{m}$  时三倍频光的 T-1 级最大衍射效率最高;

4) 对于三角形槽光栅,为使三倍频光 T-1 级衍射效率较高,应取  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}$ ,对应入射角为  $35.8^\circ$ ;

5) 由于图 2 中有几种情况的三倍频光理论衍射效率已经达到或接近了 100%,因此后面的设计过程中主要考虑这几种情况。

为获得在三角形槽情况下,亚波长光栅的最优设计结果,对满足基本要求的几种情况的谐波分离性能进行计算,即通过对评价谐波分离性能的几个参量进行计算,得到各种情况的品质函数值。满足谐波分离基本要求的几种情况的谐波分离性能参量如表 1。

表 1 中第一组和第二组光栅参量的品质函数 MF 值高于其他组,因此选取品质函数 MF 值最高的,即谐波分离性能最好的光栅参量作为最后的优化结果,设计的三角形槽亚波长光栅参量如下:

- 光栅周期:  $T_{\text{period}}=0.3\mu\text{m}$ ;
- 占空比:  $\Delta/T_{\text{period}}=0.1$ ;
- 刻槽深度:  $h_{\text{depth}}=0.6\mu\text{m}$ 。

表 1 不同参量的三角形槽亚波长光栅谐波分离性能

Table 1 Harmony waves separate performance with grating parameters changing

		$\Gamma_{3\omega}$	$\Gamma_{1\omega}$	$\Gamma_{2\omega}$	$\Lambda_{cs}$	MF
1	$T_{\text{period}}=0.3 \mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.1, h_{\text{depth}}=0.64 \mu\text{m}$	99%	0	10.0%	$71.6^\circ$	0.380
2	$T_{\text{period}}=0.3 \mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.2, h_{\text{depth}}=0.6 \mu\text{m}$	99%	0	9.5%	$71.6^\circ$	0.383
3	$T_{\text{period}}=0.3 \mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.3, h_{\text{depth}}=0.6 \mu\text{m}$	99%	0	10.7%	$71.6^\circ$	0.374
4	$T_{\text{period}}=0.3 \mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.4, h_{\text{depth}}=0.58 \mu\text{m}$	99%	0	23.5%	$71.6^\circ$	0.295
5	$T_{\text{period}}=0.3 \mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.5, h_{\text{depth}}=0.6 \mu\text{m}$	99%	0	24.3%	$71.6^\circ$	0.291
6	$T_{\text{period}}=0.3 \mu\text{m}, \Delta/T_{\text{period}}=0.6, h_{\text{depth}}=0.64 \mu\text{m}$	99%	0	21.2%	$71.6^\circ$	0.308

当光栅参量取表 1 中第一组数据时,虽然二倍频光的 T-1 级衍射效率较高,即色分离度较大,但由于三倍频光的 T-1 级与二倍频光的 T-1 级的衍射角有较大区别,因此可以接受.实际上,当三种频率的光的 T-1 级衍射角区别较大时,谐波分离的性能仅与三倍频光的 T-1 级衍射效率有关,因此表 1 中的各组参量均可作为用于谐波分离的三角形槽亚波长光栅参量.取第一组参量作为优化结果,此时,三种频率的光的衍射参量如表 2.

表 2 入射角为  $35.8^\circ$  时三种频率的光的衍射参量  
Table 2 Diffraction parameters of incident angle  $35.8^\circ$

	T-1		$T_0$	
	Diffraction angle	Diffraction efficiency	Diffraction angle	Diffraction efficiency
$3\omega$	$-35.8$	99.4%	$35.8^\circ$	0.4%
$2\omega$	Total internal reflection	10.0%	$35.8^\circ$	90.0%
$1\omega$	—	0	$35.8^\circ$	99.2%

根据表 2 的计算结果,设计谐波分离方案光路如图 3.由主放注入终端光学系统的基频光,经过 KDP 晶体倍频后,成为混合有基频光、二倍频光和三倍频光的混合光束.通过亚波长光栅进行谐波分离后,三倍频光被单独分离,再通过聚焦透镜(Focus Lens)聚焦到靶点.剩余的基频光、二倍频光和三倍频光被分离到亚波长光栅的  $T_0$  级,被光束陷阱

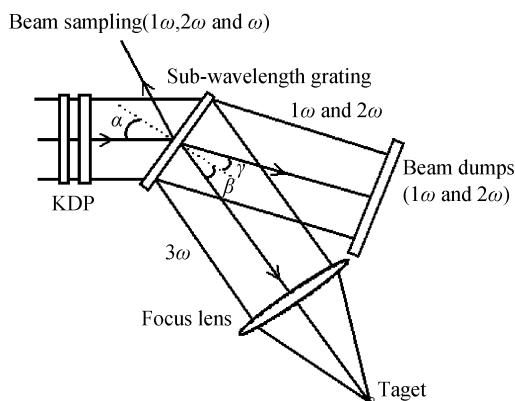


图 3 三角形槽光栅谐波分离方案  
Fig. 3 Scheme of separating harmonic waves using sub-wavelength grating with triangle carve

(Beam Dumps)吸收.还有一部分混合光束被分离到 R1 级,作为诊断用光束.其中入射角  $\alpha=35.8^\circ$ ,三倍频光分离角  $\beta=35.8^\circ$ ,基频光分离角  $\gamma_{1\omega}=35.8^\circ$ ,二倍频光分离角  $\gamma_{2\omega}=35.8^\circ$ ,剩余三倍频光出射角  $\gamma_{3\omega}=35.8^\circ$ .

### 3 结论

本文给出了能够表征谐波分离性能的品质函数定义,并利用基于矢量衍射理论编写的商用软件 Gsolver,在 Bragg 入射角下,对满足三倍频光 T-1 级衍射效率最大的三角形槽亚波长光栅参量进行了优化,根据品质函数的大小,设计得到了满足 ICF 驱动器谐波分离要求的亚波长光栅的设计参量.并根据亚波长光栅的设计参量设计了用于驱动器的谐波分离方案.

通过设计用于谐波分离的三角形槽亚波长光栅,研究了此类亚波长光栅的设计方法,为亚波长光栅应用于 ICF 驱动器谐波分离提供了理论支持.

#### 参考文献

- [1] XIAO Chen. The briefing of national ignition facility[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2002, **39**(4): 1-7.  
晓晨.“国家点火装置”建造简况[J]. *激光与光电子学进展*, 2002, **39**(4): 1-7.
- [2] ZHOU Hai, JIANG Xue-jun, ZHU Qi-hua, et al. Optimization of spatial filter matrix[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(3): 407-441.  
周海,蒋学军,朱启华,等.空间滤波器阵列结构优化设计[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(3): 407-441.
- [3] WEN Sheng-lin, GAO Fu-hua, GUO Yong-kang, et al. Study on the near field diffraction of color separation gratings applied in ICF system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(8): 1068-1072.  
温圣林,高福华,郭永康,等.用于惯性约束聚变系统中的色分离光栅近场衍射研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(8): 1068-1072.
- [4] SU Jing-qin, DU Jing-lei, YAO Jun, et al. Binary optical element for separating harmonic waves in ICF driver[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(3): 405-409.  
粟敬钦,杜惊雷,姚军,等.实现惯性约束聚变驱动器谐波分离的二元光学元件研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(3): 405-409.
- [5] WANG Cheng-cheng, YUAN Jing, MA Chi, et al. The beam's color separation technique in the field of inertial confinement fusion[J]. *Optical Technique*, 200, **33**(2): 241-244.  
王成程,袁静,马驰,等. ICF 驱动器中光束谐波分离技术[J]. *光学技术*, 200, **33**(2): 241-244.

- [6] WANG Fang, ZHU Qi-hua, WANG Xiao, *et al.* Study of dispersive and phasic compensation using composite binary optical elements[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, **33**(10): 1334-1338.  
王方,朱启华,王逍,等.复合型二元光学器件补偿色散和相位畸变研究[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1334-1338.
- [7] GRANN Eric B, MOHARAM M G, POMMET Drew A. Optimal design for antireflective tapered two dimensional subwavelength grating structures [J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, **12**(2): 333-339.
- [8] GRANN Eric B, MOHARAM M G, POMMET Drew A. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two dimensional subwavelength binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2695-2703.
- [9] YUAN Hui, ZHOU JIN, WANG Xiao-wei, *et al.* Rigorous coupled-wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, **29**(9): 795-800.  
袁惠,周进,王晓伟,等.一维深亚波长光栅的耦合波分析及偏振特性的研究[J]. *中国激光*, 2002, **29**(9): 795-800.
- [10] YI De-er, YAN Ying-bai, TAN Xiao-feng, *et al.* Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(5): 405-408.  
伊德尔,严瑛白,谭峭峰,等.亚波长光栅用于实现宽光谱消色散 1/4 波片的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(5): 405-408.
- [11] ZHAO Hua-jun, YUAN Dai-rong, WU Zheng-mao. Research development of subwavelength polarization gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(3): 38-43.  
赵华君,袁代蓉,吴正茂.亚波长偏振光栅的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(3): 38-43.
- [12] MENG Fan-tao, CHU Jin-kui, HAN Zhi-tao, *et al.* Effect of profile error on performance of sub-wavelength wire-wrid polarizer [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 951-955.  
孟凡涛,褚金奎,韩志涛,等.面形误差对亚波长金属光栅偏振器性能的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 951-955.
- [13] CAO Zhao-liang, LU Zhen-wu, LI Feng-you, *et al.* Analysis of fabrication error of subwavelength dielectric gratings [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1): 76-80.  
曹召良,卢振武,李凤有,等.亚波长介质光栅的制作误差分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1): 76-80.
- [14] JIN Guo-fan, YAN Ying-bai, WU Min-xian. Binary optics [M]. Beijing: Defense Industries Press, 1998, 26-27.  
金国藩,严瑛白,邬敏贤,等.二元光学[M].北京:国防工业出版社,1998,26-27.

## Design of Sub-wavelength Grating with Triangle Carve for Separating Harmonic Waves

WANG Fang, SU Jing-qin, LIU Lan-qin, WANG Fang, WANG Wen-yi, MO Lei

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** A new harmonic waves separation technological scheme is proposed based on sub-wavelength grating technology. Then, the merit function is defined to estimate the performance of harmonic waves separation. Grating with triangle carve parameters are design on the basis of vector diffraction theory, of which affecting the merit function are analyzed in details. At last, the grating design methods for harmonic waves separation are proposed.

**Key words:** Diffraction optics; Sub-wavelength grating; Vector diffraction theory; Harmonic waves separating



**WANG Fang** was born in 1979. He received his M. S. degree in 2009, and his research interests focus on high power solid-state laser and optical design.