

文章编号: 0253-2239(2010)02-0508-05

用于 ICF 驱动器谐波分离的亚波长光栅优化设计

王 方 粟敬钦 王 芳 刘兰琴 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 针对惯性约束聚变(ICF)驱动器对谐波分离的苛刻要求,利用基于矢量衍射理论开发的商用软件 Gsolver,在布拉格(Bragg)入射角下,设计满足分光要求的光栅参数,并根据对影响谐波分离性能的亚波长光栅的各个参数进行了分析,研究了实现谐波分离的亚波长光栅的优化设计方法,并设计得到了满足谐波分离要求的亚波长光栅。研究结果为亚波长光栅用于谐波分离提供了理论支持。

关键词 衍射;亚波长光栅;矢量衍射理论;谐波分离

中图分类号 O436.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103002.0508

Optimization of Sub-Wavelength Grating for Separating Harmonic Waves in ICF Driver

Wang Fang Su Jingqin Wang Fang Liu Lanqin Wang Wenyi Mo Lei

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

Abstract The sub-wavelength grating was designed, which adapting the harsh requirement of harmonic waves separating in inertial confinement fusion (ICF) drivers. Using the commercial software Gsolver which was developed on the basis of vector diffraction theory, the parameters of sub-wavelength grating which would influence separate harmonic waves, were analysed. The design method of sub-wavelength grating for separating harmonic waves was studied. These results offer the supports for the sub-wavelength grating design.

Key words diffraction; sub-wavelength grating; vector diffraction theory; harmonic waves separating

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)领域,由于短波长激光有利于激光与等离子体的耦合,有利于提高打靶效率,因此通常采用 $0.351\ \mu\text{m}$ 的紫外激光来打靶^[1]。目前获得短波长激光最有效的方式是将钕玻璃激光器产生的 $1.053\ \mu\text{m}$ 的红外激光进行频率转换。在 ICF 驱动器^[2]中,钕玻璃固体激光器产生的 $1.053\ \mu\text{m}$ 的基频光经过频率转换器实际得到的光束中包含有基频(1ω) $1.053\ \mu\text{m}$,二倍频(2ω) $0.527\ \mu\text{m}$,三倍频(3ω) $0.351\ \mu\text{m}$ 三种波长的激光。而采用三倍频光打靶,必须在进入靶室之前将基频

和二倍频滤除,否则会造成黑洞靶腔入射孔的严重堵口^[3,4]。

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)^[3]、楔形透镜色分离、双光栅色分离等方法。^[5]

随着微加工技术的发展,二元光学元件^[5]加工精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^[6,7]。近年来,亚波长光栅

收稿日期: 2008-10-10; 收到修改稿日期: 2009-05-25

基金项目: 国家 863 计划和中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007B08005)资助课题。

作者简介: 王 方(1979—),男,硕士研究生,助理研究员,主要从事强激光技术和光学设计等方面的研究。

E-mail: wang.f.zju@gmail.com

导师简介: 粟敬钦(1973—),男,博士,副研究员,主要从事强激光技术和衍射光学等方面的研究。

E-mail: sujingqin@hotmail.com

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^[8~11]。

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,可以将基频光和二倍频光分离得更加彻底;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,针对 ICF 驱动器对谐波分离的要求,研究实现谐波分离的亚波长结构的光栅的优化设计方法,判断亚波长光栅实现谐波分离的可行性,对今后 ICF 驱动器的谐波分离技术提供新思路。

2 三波长谐波分离光栅参数设计

ICF 驱动器对谐波分离的技术要求主要有:实现谐波分离的器件应具有高的抗光损伤阈值;谐波分离后,三倍频光保持 95% 以上的能量利用率^[3];二倍频光和基频光极大部分能量偏离到靶腔光束入口之外,即具有足够大的谐波分离角等。

由于亚波长光栅的基底材料和光栅结构都使用同种材料,这克服了传统元件薄膜对紫外损伤阈值低的缺点,使得亚波长光栅具有很高的抗光损伤阈值。

亚波长光栅的衍射效率依赖于光栅周期、占空比、光栅深度等^[12]。如图 1 所示,为了得到较大的谐波分离角,应要求三倍频光的最大衍射级与基频光、二倍频光的最大衍射级不同。可以通过改变光栅参数使得波长为 $0.351 \mu\text{m}$ 的三倍频光在 -1 级透射($T-1$ 级)的衍射效率最大,而基频光和二倍频光则在 0 级透射($T0$ 级)的衍射效率最大,从而使得

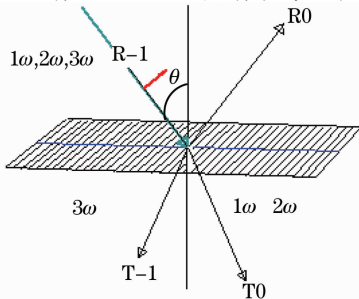


图 1 采用亚波长光栅谐波分离示意图

Fig. 1 Schematic of sub-wavelength grating for separating harmonic waves

三倍频光和基频光、二倍频光间的分离角足够大。在使得三倍频光在 $T-1$ 级衍射效率大于 95% 的同时,应尽量提高基频光和二倍频光在 $T0$ 级的衍射效率,方便放置吸收体吸收。因此用于 ICF 驱动器谐波分离的亚波长光栅的优化设计主要是针对三波长衍射效率的优化设计。

基于加工难易度的考虑,采用的亚波长周期型光栅结构图如图 2 所示。图中 D 为光栅深度, T 为光栅周期, Δ/T 定义为占空比。

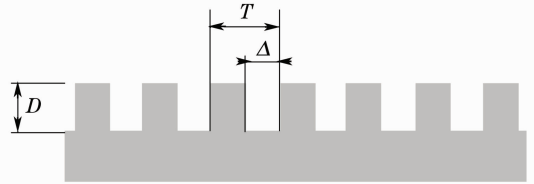


图 2 光栅结构示意图

Fig. 2 Schematic of the grating structure

由于亚波长光栅的特征尺寸小于光波波长,必须采用矢量衍射理论计算^[13],采用由美国 GSD 公司(Grating Solver Development Company)基于该理论开发的商用软件 Gsolver 进行模拟计算。下面通过分析光栅周期、光栅深度、占空比等方面对三波长 $T-1$, $T0$ 级衍射效率的影响,并根据谐波分离的技术要求得到亚波长光栅优化设计的结果。

2.1 布拉格(Bragg)条件

对于如图 3 所示衍射光栅,入射角与衍射角之间的关系满足光栅方程

$$\sin\theta_i + \sin\theta_d = -m\lambda/T, \quad (1)$$

其中 m 为衍射级次, θ_i 为入射角, θ_d 为 m 级衍射角, T 为光栅周期, λ 为入射光波长。

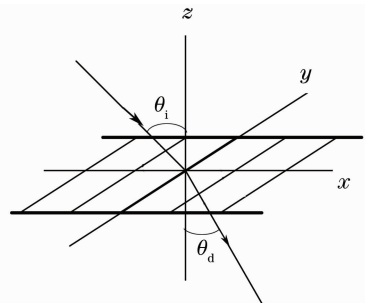


图 3 衍射光栅示意图

Fig. 3 Schematic of the grating diffraction

由 Bragg 条件^[14]可知,当入射角与衍射角相等时,该级衍射效率最大。因此要使 $T-1$ 级衍射效率最高,则要求入射角 $\theta_i = \theta_d$, $m = -1$, 此时(1)式简化为

$$2\sin\theta_i = \lambda/T. \quad (2)$$

入射角完全由波长和光栅周期决定。对于 ICF 驱动

器三倍频光, $\lambda = 0.351 \mu\text{m}$, 当光栅周期在 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 之间变化时, 入射角 θ_i 和光栅周期 T 的关系如图 4 所示(取入射光为 p 偏振)。

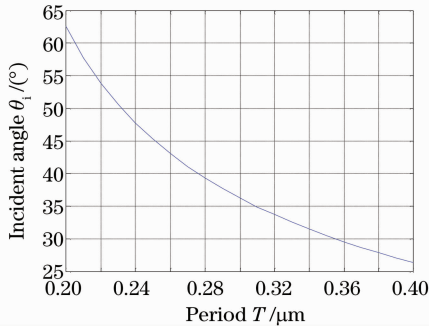


图 4 入射光角度随光栅周期变化

Fig. 4 Change curve between incident angle and grating period

2.2 亚波长光栅设计

亚波长光栅的优化目标是使得三倍频光的 T-1 级衍射效率最大, 而对于基频光和二倍频光则 T0 级衍射效率最大。要满足基频光、二倍频光和三倍频光分离, 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 $0.2 \sim 0.4 \mu\text{m}$ 之间。

影响三倍频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数。结合目前的加工技术, 在设计过程中, 刻槽形状选择矩形; 基底材料的选择与槽型相关, 矩形槽一般选择石英基底; 占空比和刻槽深度则需要通过优化得到。

优化过程中主要以提高三倍频光 T-1 级衍射

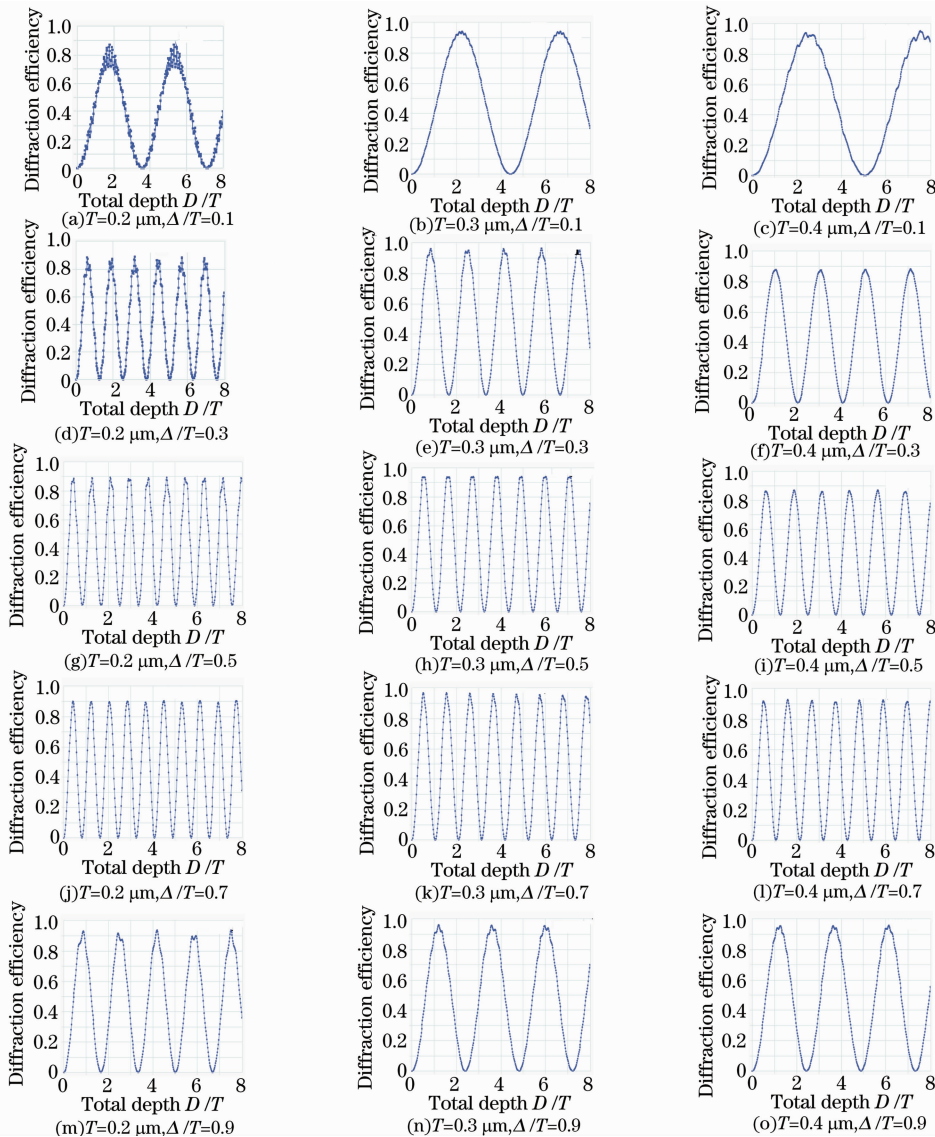


图 5 亚波长光栅三倍频光 T-1 级衍射效率变化情况

Fig. 5 Diffraction efficiency change of T-1 diffraction order of 3ω wave

效率为目标,首先在不同的光栅周期、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。其中光栅周期取 0.2, 0.3 和 0.4 μm , $\Delta/T \in [0.1, 0.9]$, 得到三倍频光 T-1 级衍射效率随刻槽深度的变化情况如图 5 所示,其中刻槽深度的单位为微米。

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,可以得出结论:

1) 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) 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) 占空比相同,当光栅周期为 0.3 μm 时三倍频光的 T-1 级最大衍射效率最高;

4) 对于矩形槽光栅,为使三倍频光 T-1 级衍射效率较高,应取 $T=0.3 \mu\text{m}$,对应入射角为 35.8° 。

选取三倍频光 T-1 级衍射效率最高,即谐波分离性能最好的光栅参数作为最后的优化结果,设计的矩形槽亚波长光栅参数为,光栅周期: $T = 0.3 \mu\text{m}$; 占空比: $\Delta/T = 0.3$; 刻槽深度: $D = (2.5/3) \mu\text{m}$ 。

2.3 亚波长光栅加工误差影响

光栅加工误差主要包括光栅周期误差、占空比误差、刻槽深度误差、槽型误差和表面粗糙度等。利用光刻的方法最容易产生槽型误差,主要影响三倍频光 T-1 级衍射效率。图 6 中 α 角为实际底角,则 $\beta=90^\circ-\alpha$ 即为垂直度误差。三倍频光 T-1 级衍射效率随垂直度误差的计算结果如图 7 所示,三倍频光 T-1 级衍射效率随垂直度误差的增大而迅速下降,如果要求衍射效率大于 95%,则垂直度误差不能超过 1° 。



图 6 槽型误差示意图

Fig. 6 Schematic of grating structure error

2.4 亚波长光栅谐波分离设计结果

表 1 是三种频率光各衍射级的衍射效率和衍射角。根据表 1 的计算结果,设计谐波分离方案如图 8 所示。由主注入终端光学组件的基频光,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

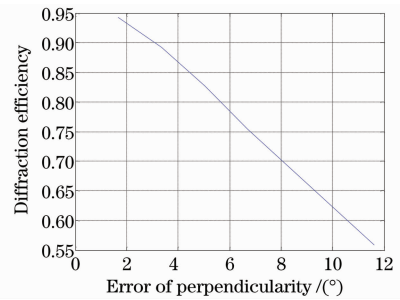


图 7 三倍频光 T-1 级衍射效率随垂直度误差的变化
Fig. 7 Diffraction efficiency change of T-1 diffraction

order following grating structure error change
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 T0 级,被光束陷阱(Beam dumps)吸收。还有一部分混合光束被分离到 1 级反射(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 $\gamma_{3\omega}=35.8^\circ$ 。

表 1 入射角为 35.8° 时三种频率的光的衍射参数

Table 1 Diffraction parameters of incident angle 35.8°

	T-1		T0	
	Diffraction angle/($^\circ$)	Diffraction efficiency/%	Diffraction angle/($^\circ$)	Diffraction efficiency/%
3ω	-35.8	96.7	35.8	1.4
2ω	total internal reflection	0.1	35.8	94.0
1ω	—	—	35.8	94.3

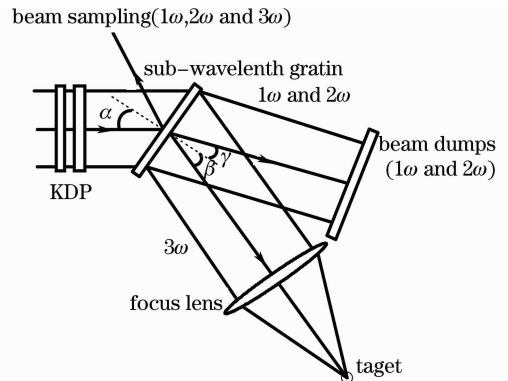


图 8 亚波长光栅谐波分离方案

Fig. 8 Scheme of separating harmonic waves using sub-wavelength grating

3 结 论

本文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

级衍射效率最大的亚波长光栅参数进行了优化、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数及谐波分离参数。对加工误差对亚波长光栅谐波分离性能的影响进行了分析,并根据亚波长光栅的设计参数设计了用于驱动器的谐波分离方案。

通过对用于谐波分离的亚波长光栅设计方法的研究,为亚波长光栅用于谐波分离提供了理论支持;拓展了亚波长光栅在 ICF 驱动器领域的应用,并为 ICF 驱动器谐波分离技术的发展提供了新的思路。

参 考 文 献

- Xiao Chen. [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
- Zhou Hai, Jiang Xuejun, Zhu Qihua *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
- Wen Shenglin, Gao Fuhua, Guo Yongkang *et al.*. Study on the near field diffraction of color separation gratings applied in ICF system[J]. *Chinese J. 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
- Su Jingqin, Du Jinglei, 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
- Wang Chengcheng, Yuan Jing, Ma Chi *et al.*. The beam's color separation technique in the field of inertial confinement fusion [J]. *Optical Technique*, 2007, **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, 2007, **33**(2): 241~244
- Wang Fang, Zhu Qihua, Wang Xiao *et al.*. Study of dispersive and phasic compensation using composite binary optical elements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1334~1338
王 方, 朱启华, 王 道等. 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
- B. Grann Eric, M. G. Moharam, A. Pommet Drew. Optimal design for antireflective tapered two dimensional subwavelength grating structures [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(2): 333~339
- B. Grann Eric, M. G. Moharam, A. Pommet Drew. Artificial uniaxial and biaxial dielectrics with use of two dimensional subwavelength binary gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1994, **11**(10): 2695~2703
- Yuan Hui, Zhou Jin, Wang Xiaowei *et al.*. Rigorous coupled-wave analysis of a new one-dimensional deep sub-wavelength grating[J]. *Chinese J. 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
- Yi Deer, Yan Yingbai, Tan Xiaofeng *et al.*. Study on broadband achromatic quarter-wave plate by subwavelength gratings [J]. *Chinese J. 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
- Zhao Huajun, Yuan Dairong, Wu Zhengmao. 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
- Chen Sihai, Cheng Zhijun, Huang Guang *et al.*. Design and fabrication of subwavelength antireflection gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(11): 1359~1361
陈四海, 程志军, 黄 光等. 亚波长消反射光栅[J]. 光学学报, 2003, **23**(11): 1359~1361
- Qin Tao, Shi Jianping, Chen Xunan. Research on guided-mode resonance for sub-wavelength waveguide grating [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(2): 25~27
秦 涛, 石建平, 陈旭南. 亚波长波导光栅导模共振研究[J]. 光电工程, 2004, **31**(2): 25~27
- Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. 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