

文章编号: 1001-3806(2007)06-0561-04

## 用等腰三角形位相光栅进行相干光并束的研究

王景全, 罗铂靓, 张志友, 方 亮, 杜惊雷\*

(四川大学 物理科学与技术学院 纳光子技术研究所, 成都 610064)

**摘要:** 为了满足未来惯性约束激光核聚变 (ICF) 的快速点火装置对高能量激光束的要求, 提出并特殊设计了一种可用于 ICF 系统中相干并束的等腰三角形位相光栅。模拟计算和分析的结果表明, 这种等腰三角形位相光栅对 4 束相干激光并束的效率理论上可以达到 90%, 比普通的二元达曼型位相光栅的衍射效率高 22 个百分点。相对而言, 该光栅具有加工难度低、误差宽容度大等优点, 有较强的实用前景。

**关键词:** 衍射光栅; 相干并束; 等腰三角形位相光栅; 纵向随机误差; 高度误差; 横向误差

**中图分类号:** O436.1 **文献标识码:** A

### Study on laser beam combination by means of isosceles triangle phase grating

WANG Jing-quan, LUO Bo-liang, ZHANG Zhi-you, FANG Liang, DU Jing-lei

(Nanophotonics Laboratory, Institute of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

**Abstract** The technology of beam combination is an effective method to obtain high power and quality beams. In view of the demand of high power beams in the device of ICF in the future, an isosceles triangle phase grating was designed. Simulated and analyzed results indicated that the combination efficiency of four incident beams reached 90%, which was 22% higher than the efficiency of Damann phase grating. Besides, the processing of the isosceles triangle phase grating was not difficult. So it is important and practical perspective in the future.

**Key words** diffraction gratings; coherent combination; isosceles phase grating; lengthways random error; height error; transverse error

### 引 言

高能量激光束在医学、工业、军事、能源等许多领域有广泛的应用。近年来, 为满足人们对更强激光的需求, 大口径、超大功率、高质量的激光束的研究成为学术界热点。然而, 就单一激光器而言, 由于其自身内部物理因素以及结构的限制 (如存在热效应、增益饱和、介质的损伤等现象), 要提高它的输出功率十分困难。因此, 可有效提高激光功率的多光束并束技术 (或称光束叠加技术) 受到了人们的重视。目前, 实现激光并束的方法很多, 总体可分为两大类: 非相干并束和相干并束。由于很多领域对高峰值功率光束需求较多, 而通常相干激光并束可获得较高的峰值功率, 因此, 相干并束在应用中有着较大优势。如:  $N$  束功率为  $P_0$  的激光束进行非相干并束, 并束后的激光峰值功率

为  $NP_0$ ; 若是相干并束, 则并束后的峰值功率为  $N^2P_0$ , 不过这两种并束方式的平均功率是相同的, 因此, 人们应根据具体并束需求选择不同束叠加方式。光束的相干叠加的基本原理较简单, 通常可利用一些微光学器件可均匀分光特性, 在特定条件下让几乎等光强的若干相干光束沿分束时的逆方向照射到微光学器件上, 这些光通过元件后大部分能量便沿垂直于微光学器件表面的方向射出, 达到相干并束目的<sup>[1-9]</sup>。

在惯性约束核聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 激光驱动快点火装置中, 实现相干光束叠加的微光学元件尺寸较大, 且对并束光质量和衍射效率有较高要求。为使束叠加器件可方便加工和激光并束过程容易实现, 结构相对简单、加工误差和装调容限较宽的微光学器件的优化设计是一项关乎 ICF 快点火能否顺利开展的重要任务。与那些理论上并束效率较高但可用性差的复杂衍射光学结构相比, 二元达曼位相光栅较容易实现大面积加工, 但它的 4 束光并束的效率偏低, 降低了其在 ICF 快点火装置上实用的可能性。在本文中, 作者提出一种等腰三角形位相光栅用于 ICF 快点火激光束相干并束的设想。模拟分析表明, 优化设计的这类器件的 4 激光束相干耦合效率超过 90%,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60676024, 60376021)

作者简介: 王景全 (1979), 男, 硕士研究生, 现主要从事光学器件的设计和制作方面的工作。

\* 通讯联系人。E-mail: dujingle@tom.com

收稿日期: 2006-12-02 收到修改稿日期: 2007-03-23

且光栅结构简单易加工、误差宽容度大,为实现大口径、高耦合效率激光相干并束提供了一条有效途径。

### 1 等腰三角形位相光栅的设计

ICF激光驱动系统有上百路激光束,要实现核聚变的快点火,需要把多路激光的脉宽压缩至皮秒量级然后并束,图 1是通常 ICF 8路激光束的排布示意图。

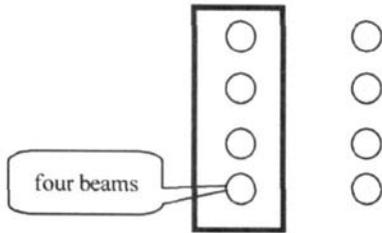


Fig 1 Layout of beams in ICF system

为简化快点火过程激光系统结构,人们可选择  $1 \times 4$  或  $2 \times 2$  或  $4 \times 4$  阵列激光并束。其中,能否很好地实现  $1 \times 4$  阵列激光相干并束对快点火装置来说有特殊意义,而可实现高耦合效率、低加工难度且并束后激光质量好的  $1 \times 4$  衍射光学分束元件的设计则是相干并束研究中的一个关键。先前,曾探讨一些二元达曼位相光栅分束元件<sup>[1,2]</sup>,但其用于相干并束耦合效率较低,这里设计了一种等腰三角形位相光栅,其不仅可有效提高相干并束耦合效率,且光栅加工难度不高。

光栅结构如图 2 所示(灰度表示表面起伏)。设

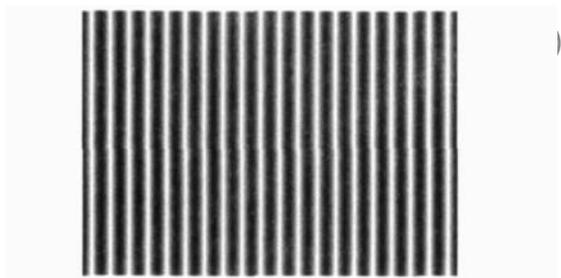


Fig 2 Surface structure of grating

Table 1 Design of the grating splitting four beams

wavelength/nm	diffractive angle/(°)	material refractive index	triangle height/nm	period/nm	total efficiency/%
351	$\pm 6$ ( $\pm 1$ order) $\pm 12$ ( $\pm 2$ order)	1.4715	685.64	3357.9	90.2

Table 2 Isosceles phase grating compared with Dammann phase grating

splitting beam s	Dammann phase grating			isosceles triangle phase grating		
	total efficiency/%	uneven degree/%	phase of break point/rad	total efficiency/%	uneven degree/%	$\varphi = kh(n-1)/\text{rad}$
2(±1 order)	81.1	0	$\pi$	59.6	0	4.295
3(0, ±1 order)	86.5	0.27	2.008	84.7	0.3	3.644
4(±1, ±2 order)	68.0	0.14	$\pi$	90.2	0.05	5.787

射光分为 2 束和 3 束时衍射效率较高,大于 80%,这时等腰三角形位相光栅没有优势。但对于分 4 束光的

光栅周期为  $T$ , 三角形高为  $h$ , 光栅材料的折射率为  $n$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ , 其中一个周期的透过率函数为:

$$t(x) = \begin{cases} \exp[2kh(n-1)(T/2+x)/T], & (-T/2 \leq x \leq 0) \\ \exp[2kh(n-1)(T/2-x)/T], & (0 \leq x \leq T/2) \end{cases} \quad (1)$$

若以振幅为  $A$  单色平面波垂直照射在周期数为  $M$  的等腰三角形位相光栅上,则远场衍射复振幅分布是该光栅透过率函数的傅里叶变换:

$$F\left\{\sum_m \delta(x-mT) * [A \cdot \text{rect}(x/T) t(x)]\right\} = 2A \exp(j_0 T/2) \sum_m \delta(f_x - \frac{m}{T}) \times \left\{ \frac{\exp\left[i\frac{T}{4}(2\pi f_x - f_0)\right] \sin\left[\frac{T}{4}(2\pi f_x - f_0)\right]}{T(2\pi f_x - f_0)} + \frac{\exp\left[-i\frac{T}{4}(2\pi f_x + f_0)\right] \sin\left[\frac{T}{4}(2\pi f_x + f_0)\right]}{T(2\pi f_x + f_0)} \right\} \quad (2)$$

式中,  $\varphi = kh(n-1)$ ,  $f_0 = 2kh(n-1)/T = 2\varphi/T$ ,  $\delta$  为函数。则第  $m$  级振幅为:

$$a_m = 2A \exp(j\varphi) \left\{ \frac{\exp[i(\pi m - \varphi)/2] \sin[(\pi m - \varphi)/2]}{2(\pi m - \varphi)} + \frac{\exp[-i(\pi m + \varphi)/2] \sin[(\pi m + \varphi)/2]}{2(\pi m + \varphi)} \right\} \quad (3)$$

作为分束元件,其第  $m$  级衍射效率<sup>[10]</sup>:

$$\eta_m = \frac{|a_m|^2}{A^2} \quad (4)$$

针对 ICF 激光驱动系统的三倍频光相干并束,作者设计并优化了三角形分束光栅的结构参数,见表 1 和表 2。该位相光栅可将入射的一平面波均匀分成 4 束,每束光的衍射效率均约为 23%,4 束光的总衍射效率超过 90%。表 2 中也给出了这类三角形光栅分束效果与二元达曼光栅的比较,可以看到达曼光栅将入

情形,优化过的达曼光栅的分束衍射效率也不到 68%,比等腰三角形位相光栅 ( $\pm 1, \pm 2$  级)的总衍射

效率低 22%，显然，后者用于 ICF 快点火装置相干并束会有较大耦合效率。图 3 是用等腰三角形位相光栅进行 4 束分光的计算获得的远场光强分布。

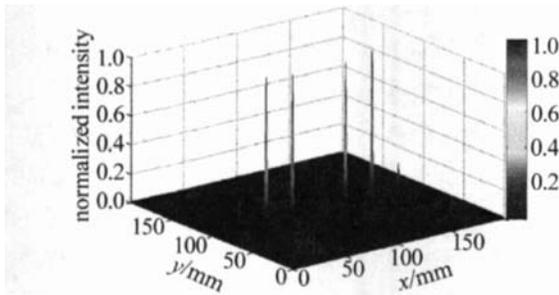


Fig 3 Splitting four beams

## 2 相干并束耦合效率的计算分析

从上述分析中，可以知道等腰三角形位相光栅的 4 分束衍射效率较高，下面将分析其做为并束器件的耦合效率，探讨它在 ICF 系统的相干并束中的应用效果。如图 4 所示，根据光的可逆性原理，实际上一个分

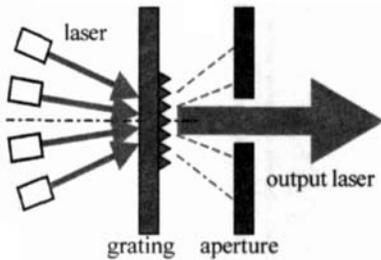


Fig 4 Combination system of four incident beams

束元件也可作为一个并束元件，只是分束光与并束光应满足严格的位相和角度共轭关系。针对 ICF 系统中的需求，用可分光为 4 束的等腰三角形位相光栅作为并束元件，设单位振幅的 4 束入射相干光束与光栅的法线分别成  $\theta_1 = \pm 6^\circ$  和  $\theta_2 = \pm 12^\circ$  入射，即与该元件分束时的分束角度相同。根据文献[3]中推导的结果，可得分束时的初位相  $\varphi_0$  关系为： $\varphi_0(+1) = \varphi_0(-1)$ ， $\varphi_0(+2) = \varphi_0(-2)$ ，并且  $\varphi_0(+2) - \varphi_0(+1) = \pi/2$ 。因此，可设 4 束入射光初位相依次为  $-\pi/2, 0, 0, -\pi/2$ 。并设光栅长度为  $2l$ ，其它参数与表 1 相同。

入射光在光栅前表面形成的相干叠加光场为：

$$E(x) = \exp(ik \sin \theta_1 x) + \exp(-ik \sin \theta_1 x) + \left[ \exp(ik \sin \theta_2 x) + \exp(-ik \sin \theta_2 x) \right] \exp\left[-i\frac{\pi}{2}\right] = 2\cos\left(\frac{2\pi x}{T}\right) + 2\exp\left[-i\frac{\pi}{2}\right] \cos\left(\frac{4\pi x}{T}\right) \quad (7)$$

上述干涉光场经过光栅调制后，其后表面光场为：

$$E'(x) = E(x) \cdot \sum_m \delta(x - mT) * \{ \text{rect}(x/T) t(x) \} \quad (8)$$

在不考虑吸收、散射等因素导致的能量损失的情况下，上述 4 束光经光栅调制在远场分布如图 5 所示，计算可得零级衍射光占入射光能量的 90%，即 4 束光相干

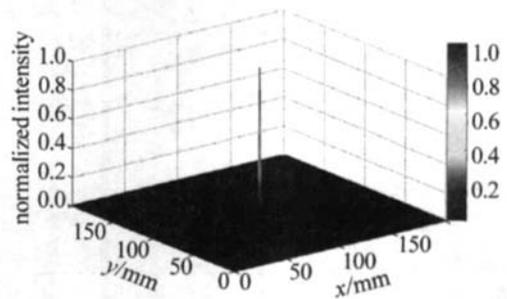


Fig 5 Combination result of four plane beams

耦合效率约为 90%。

ICF 系统中的激光束通常为高斯光束或超高斯光束，而不是平面波，使用该光栅进行相干并束，效果会受到一定影响。但只要把位相光栅放在各激光光束叠加的束腰附近，其它条件不变，其并束效率仍大于 84%，如图 6 所示。

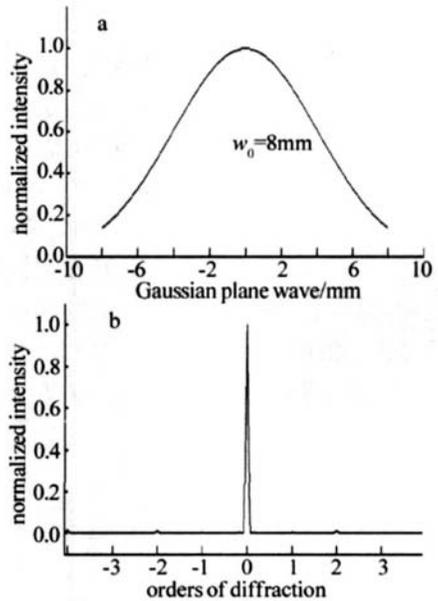


Fig 6 Combination of four Gaussian beams

## 3 光栅的加工误差对并束效率的影响

光栅加工偏差直接影响光栅质量和并束的效果。对于等腰三角形位相光栅，其加工误差主要为三角形表面的起伏、横向加工偏差和高度加工偏差。下面分析这 3 种误差造成的影响。

(1) 等腰三角形两斜面的起伏对并束效率的影响。图 7 中自下而上 5 条曲线分别是随机起伏的最大值为三角形高度  $h$  的 1/10, 1/15, 1/20, 1/30, 1/50 时经 30 次计算而得的耦合效率结果。可以看出，三角形表面随机误差对并束效果影响不大，这种加工所造成的随机偏差只要控制在 20nm 范围以内，并束效率便在 88% 以上。

(2) 三角形不对称（即三角形顶点横向偏移）对并束效率的影响。由图 8 可以看出，并束效率与横向偏

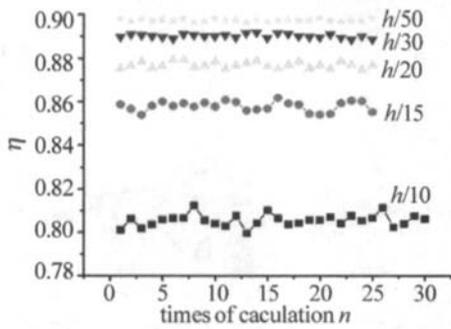


Fig 7 Effect of disturbing grating surface to efficiency

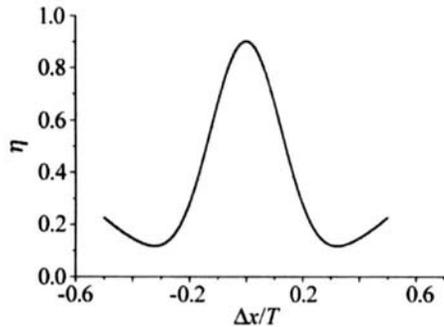


Fig 8 Effect of transverse error to efficiency

差间的关系曲线变化较剧烈,当偏移量在  $\pm 0.03T$  ( $T$  为一个周期的长度) 范围内,并束的耦合效率可保持在 87.7% 以上,而当偏移量为  $\pm 0.3T$  时,零级光能量仅有 10%。但从目前光栅制作工艺角度看,控制横向偏差小于  $0.03T$  (约 100nm) 还是很容易做到的。

(3) 等腰三角形位相光栅的高度偏差对并束效率的影响。由图 9 可以分析出,当高度偏差在  $\pm 50\text{nm}$  范

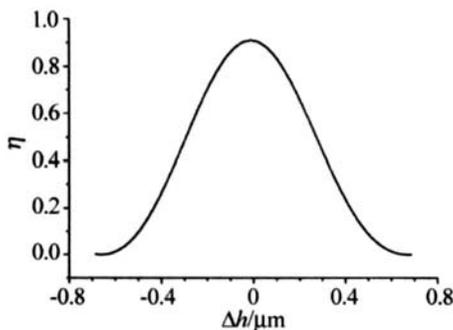


Fig 9 Effect of height error to efficiency

围内,并束效率可保持在 88.5% 以上,而通常纵向加工误差控制在 10nm 是不困难的。

总之,作为并束器件,要达到较高的耦合效率,对等腰三角形位相光栅加工误差有一定指标要求,但并不很高,是目前微加工精度所能达到的。电子束直写、

金刚石切削、干涉光刻等都可作为这类光栅的加工手段。

#### 4 结束语

针对 ICF 装置光束排布特点,为提高激光并束的耦合效率和减轻束叠加元件的加工难度,设计了用等腰三角形位相光栅进行 4 束激光并束的方案,其耦合效率为 90.2%。作者分析了光栅加工误差可能对并束效率的影响,发现该器件用于激光并束有较好的加工误差宽容度,通过合理的工艺优化,利用现有微加工技术是可以制作出符合要求的这类器件的。当然,在 ICF 快点火相干并束过程中,还有许多其它因素要考虑,如:各待并束光的位相控制、入射角控制、实验调节环节的影响等。这些困难将会通过以后的理论和实验深入研究逐一突破和解决。

#### 参 考 文 献

- [1] LUO B L, WANG Ch Ch DU J L *et al* Design and analysis of phase grating for laser beams coherent combination [J]. *Microelectronic Engineering* 2006 83 1368~1371
- [2] LUO B L, WANG Ch Ch DU J L *et al* Study on laser beam combination by binary phase grating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 381~384 (in Chinese).
- [3] LEGER JR, SWANSON G J, VELDKAM PW B. Coherent laser addition using binary phase gratings [J]. *Appl Opt* 1987, 26(20): 4391~4399
- [4] VELDKAM PW B, LEGER JR, SWANSON G J. Coherent summation of laser beams using binary phase gratings [J]. *Opt Lett* 1986, 11(5): 303~305
- [5] LEGER JR, SWANSON G J, VELDKAM PW B. Coherent beam addition of GaAlAs lasers by binary phase gratings [J]. *A P L*, 1986 48(14): 888~890
- [6] LEGER JR, SCOTT M L, VELDKAM PW B. Coherent addition of AlGaAs lasers using micro lenses and diffractive couple [J]. *A P L*, 1998 52(21): 1771~1773
- [7] LU J Y, SHEN Z Ch DONG Y H *et al* Theoretical study on laser beams coherent combination [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(4): 297~302 (in Chinese).
- [8] LU J Y, YUAN P, DONG Y H *et al*. The strength combination of laser beams by binary optical method [J]. *Acta Photonica Sinica* 2001, 30(5): 598~602 (in Chinese).
- [9] SHEN T Zh LU H B, CAO J L *et al* Phase-compensation design of irisosceles blazed grating [J]. *Acta Optica Sinica* 2004 24(2): 235~238 (in Chinese).
- [10] JIN G F, YAN Y B, WU M X. *Binary optics* [M]. Beijing National Defence Industry Press 1998. 20~25 (in Chinese).