

文章编号: 0258-7025(2008)01-0039-05

用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束

王景全 方 亮 张志友 杜惊雷 郭永康

(四川大学物理科学与技术学院 纳光子技术研究所, 四川 成都 610064)

摘要 相干并束是获得高功率激光束的一种有效方法,特殊设计的二维正弦相位光栅是一种较好的并束元件。介绍了二维正弦相位光栅并束的设计方案,计算表明,在 3×3 和 4×4 分束时分束效率分别为81.1%和73.1%,与常用的达曼光栅相比分别提高37%和26.9%。对正弦相位光栅的制作和误差分析表明,并束效率存在极大值,给光栅的制作带来较大的误差宽容度,分束与并束在光栅表面的光场存在一定差别。如果仅用于并束,并束效率还有提高的可能。

关键词 激光技术;相干并束;正弦相位光栅;误差分析

中图分类号 O 436.1 文献标识码 A

Implementation of Coherent Array Beam Combination Using Two-Dimensional Sine Phase Grating

Wang Jingquan Fang Liang Zhang Zhiyou Du Jinglei Guo Yongkang

(Nano Photonics Research Technology Institute, School of Physical Science and Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract Coherent beam combination is an effective method to get a high power beam. Two-dimensional (2D) sine phase grating of special design is a perfectly combining element. The design of 2D sine phase grating is introduced, and computational results indicate that the high splitting efficiencies are 81.1% and 73.1%, which increase 37% and 26.9% compared with conventional Dammann gratings respectively in the case of 3×3 and 4×4 beam-splitting. The fabrication of 2D sine phase grating and errors are analyzed, and the results show that coupling efficiency of combination has a maximal value leading to greater error latitude for the fabrication of sine phase grating. Splitting and combination light field are different on phase grating surface. The coupling efficiency can be improved, if the phase grating is only used for combination.

Key words laser technique; coherent combination; sine phase grating; error analysis

1 引 言

随着高能激光束的应用领域越来越大,如医学、激光聚变、军事等领域,并且对激光束的质量要求越来越高,如何得到高质量、高能量的激光束成为一项重要的课题。就单一的激光器而言,由于其自身缺陷(热效应、非线性效应等)难以克服,其激光束的功率提高受到限制。激光束相干并束是获得高质量、高功率激光束的一种有效方法。相干并束的基本原

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沿垂直于微光学器件表面的方向射出,达到相干并束的目的。相干并束的优点是可以得到峰值功率较高、光束质量较好的光束^[1~6],设计和制作出合格的微光学并束元件是实现相干并束的重要环节。

收稿日期:2007-04-10;收到修改稿日期:2007-08-31

基金项目:国家自然科学基金(60676024)和教育部博士点基金资助项目。

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

E-mail:jingquanwang1212@163.com

导师简介:杜惊雷(1964—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要从事信息光学、微光学、微电子光学、微光刻方面的研究。E-mail:dujinglei@tom.com(通信作者)

与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(Dammann)相位光栅较容易实现大面积加工,但并束效率偏低,降低了其在惯性约束聚变(ICF)快点火装置上实用的可能性^[7]。我们对惯性约束聚变快点火激光相干并束设计过等腰三角形相位光栅,得到并束效率较高的一维等腰三角形相位光栅,并且此光栅加工难度不高,加工的宽容度较大,具有较强的实用性。但是二维等腰三角形相位光栅设计方面得不到衍射效率较高且分束时各级次强度相等的二维光栅。本文设计的一维正弦相位光栅与等腰三角形相位光栅在衍射效率上相差不大,二维正弦相位光栅可克服二维等腰三角形相位光栅衍射效率低和强度不均匀的局限。进行了模拟分析,从误差分析的过程中可以看到此光栅的合束效率还有进一步提高的可能,可满足惯性约束聚变快点火系统相干光并束元件的尺寸较大、并束光质量和衍射效率较高的要求。而且这种光栅结构简单易加工、误差宽容度大,用一般的干涉光刻方法就可以加工,是实现大口径、高耦合效率激光相干并束的一条有效途径。

2 设计方案

设二维正弦相位光栅透射率函数为

$$t(x, y) = \exp\left\{i \frac{a}{4} [\cos(2\pi x) + \cos(2\pi y)]\right\} = t(x)t(y), \quad (1)$$

式中 a 为正弦相位光栅最高点与最低点的相位差,即 $a = 2\pi h(n-1)/\lambda$, h 为光栅最高点与最低点的高度差, n 为光栅材料的折射率。由(1)式可知,二维正弦相位光栅实际上是一维正弦相位光栅的二维延拓。二维正弦相位光栅结构如图 1 所示,灰度表示表面高度变化。设入射光为单位振幅的平面波 $U(x, y) = 1$, 则经过光栅调制后,其光栅后表面光场为

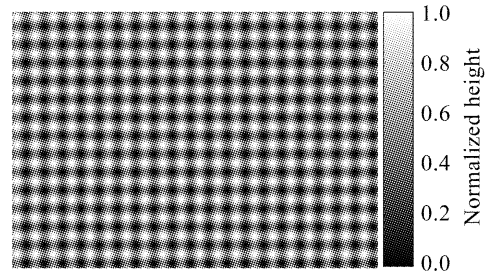


图 1 正弦相位光栅表面结构

Fig. 1 Surface shape of 2D sine phase grating

$$U'(x, y) = U(x, y)t(x, y), \quad (2)$$

对(2)式进行傅里叶级数展开可得

$$U'(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} \exp[i2\pi(mx + ny)], \quad (3)$$

其中

$$A_{mn} = i^{(m+n)} J_m\left(\frac{a}{4}\right) = i^{(m+n)} \int_0^1 \int_0^1 t(x) \exp[-i2\pi(mx + ny)] dx dy = i^{(m+n)} J_m\left(\frac{a}{4}\right) J_n\left(\frac{a}{4}\right), \quad (4)$$

$J_m\left(\frac{a}{4}\right)$ 为贝塞耳函数。

入射光经光栅衍射后,任一级次的衍射效率为

$$\eta_{mn} = \left| J_m\left(\frac{a}{4}\right) \right|^2, \quad (5)$$

由于二维正弦相位光栅中只有一个参数 a , 只要对参数 a 进行优化计算, 就可以得到符合要求的正弦相位光栅。表 1 列出三种正弦相位光栅并与达曼光栅进行比较。由表 1 可以看出, 正弦相位光栅在 2×2 分束时不占优势, 分束效率比达曼相位光栅低 20.8%, 而在 3×3 和 4×4 分束时却占有很大优势, 分束效率分别比达曼相位光栅高 37% 和 26.9%。这对实现 9 路和 16 路相干光并束意义重大。对 3×3 和 4×4 分束模拟结果如图 2 所示。

表 1 正弦相位光栅不同分束及与达曼光栅比较

Table 1 Different splitting sine phase gratings and Dammann phase gratings

Grating splitting beams	Dammann phase grating			Sine phase grating		
	Total efficiency /%	Uneven of splitting intensity /%	Phase of break spot	Total efficiency /%	Uneven of splitting intensity /%	$a/4$ /rad
2×2	65.7	0	π	45.9	0	1.842
3×3	44.1	0.24	π	81.1	0.37	1.435
4×4	46.2	0.39	π	73.1	0.06	2.629

3 相干并束

若单位振幅平面波沿光栅轴向入射, 由傅里叶

光学可知, 在光栅后表面的光场可看作 n 个平面波的叠加^[7,8]

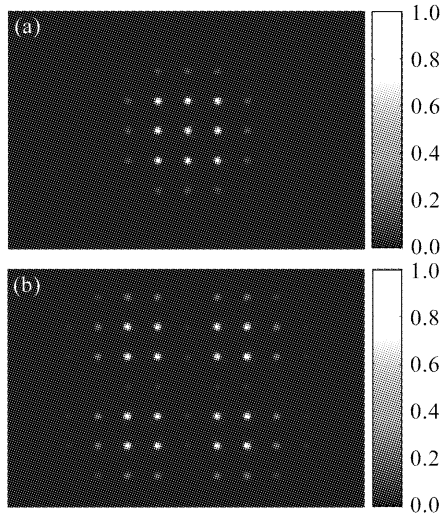


图2 3×3分束(a)和4×4分束(b)的强度分布
Fig. 2 Intensity distribution of 3×3 splitter (a) and 4×4 splitter (b)

$$t(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{mn} \exp(j\varphi_{mn}) \times \exp[j(m\alpha x + n\beta y)], \quad (6)$$

式中 a_{mn} 和 φ_{mn} 分别为第 (m, n) 个平面波的振幅和初相位, α, β 与 x 轴和 y 轴方向余弦成正比。设光栅把入射平面波分成 $(M+1) \times (N+1)$ (M, N 为偶数) 个衍射效率近似相等的平面波, 则分束效率

$$\eta = \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} a_{mn}^2 \approx (M+1)(N+1)a_{00}^2, \quad (7)$$

设 $(M+1) \times (N+1)$ 束单位振幅相干平面波沿分束光路逆向入射到光栅上, 并且初相位与分束光束共轭, 则在光栅表面振幅分布为

$$E'(x, y) = \sum_{m'=-M/2}^{M/2} \sum_{n'=-N/2}^{N/2} \exp(-j\varphi_{m'n'}) \times \exp[-j(m'\alpha x + n'\beta y)], \quad (8)$$

由(6),(8)式可知, 只有满足 $m' = m, n' = n$ 的条件, 才可以使衍射光沿光栅轴向输出, 达到并束目的。耦合输出的强度为

$$I_0 = \left| \sum_{m=-M/2}^{M/2} \sum_{n=-N/2}^{N/2} E'(x, y)t(x, y) \right|^2 \approx \left| (M+1)(N+1)a_{00} \right|^2, \quad (9)$$

式中 $a_{mn} \approx a_{00}, -M/2 \leq m \leq M/2, -N/2 \leq n \leq N/2$ 。则并束效率为

$$\eta' = \frac{I_0}{(M+1)(N+1)} = (M+1)(N+1)a_{00}^2, \quad (10)$$

由(7),(10)式可知, 在理论上, 相干并束与分束的效率相等。

相干并束与分束存在严格的共轭关系。实现相干并束关键在于参与并束的各路相干光沿着与分束光路逆向入射到光栅上; 各路并束光束在光栅表面的初相位差与分束时的初相位差共轭。经计算可设 3×3 和 4×4 路相干光并束时各路光的初相位如表 2 所示。两种情况下相干并束的结果如图 3 所示。

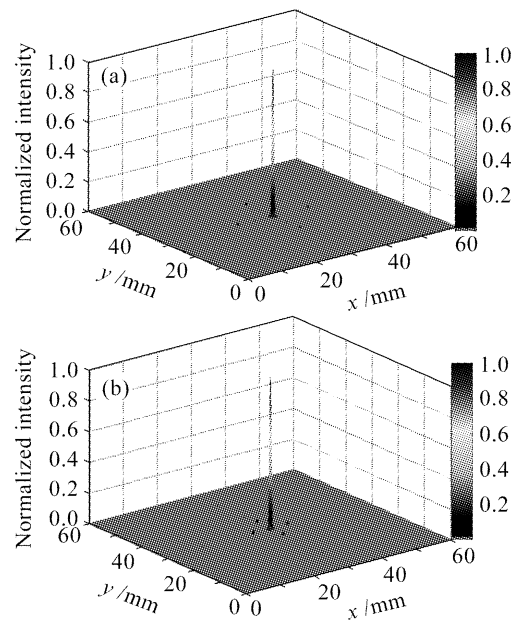


图3 3×3(a)和4×4(b)相干并束

Fig. 3 3×3 (a) and 4×4 (b) coherent combination

表2 相干并束时各路入射光的初相位

Table 2 Initial phases of coherent combination beams

Combining beams	Initial phase / rad			
	0	$\pi/2$	π	$3\pi/2$
3×3 beams	$\varphi(0,0)$		$\varphi(1,1), \varphi(-1,1),$ $\varphi(-1,-1), \varphi(1,-1)$	$\varphi(0,1), \varphi(0,-1),$ $\varphi(1,0), \varphi(-1,0)$
4×4 beams	$\varphi(2,2),$ $\varphi(-2,2),$ $\varphi(-2,-2),$ $\varphi(2,-2)$	$\varphi(2,1), \varphi(1,2),$ $\varphi(-1,2), \varphi(-2,1),$ $\varphi(-2,-1), \varphi(-1,-2),$ $\varphi(1,-2), \varphi(2,-1)$	$\varphi(1,1),$ $\varphi(-1,1),$ $\varphi(-1,-1),$ $\varphi(1,-1)$	

在相干并束过程中, 还有许多其他因素要考虑^[9~11], 如待并束光的相位控制、入射角控制、实验

装调环节的影响等。这些困难将会通过以后研究逐一突破和解决。

4 制作及误差分析

正弦相位光栅作为并束器件,要达到较高的耦合效率,对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、干涉光刻等都可作为这类光栅的加工手段,其中干涉光刻是目前较为常见的制作正弦光栅的方法^[12,13],干涉光刻具有大面积、长焦深、低成本、高效率、方法简单等优点。图4是用干涉光刻制作的一维正弦相位光栅。在制作过程中,只要控制少量的参数,就可得到符合要求的正弦相位光栅。其参数主要是相干光束的入射角和曝光深度。角度的控制在现有的工艺中不存在问题,而曝光深度(等效于正弦光栅的高度)在制作中却需一定的经验积累,其与曝光时间、光束强度、光刻胶的性质等有很大的关系。在惯性约束聚变系统中,入射光波前为超高斯型,波长为 $0.351\ \mu\text{m}$,为简化分析将其作为平面波处理。图5是 3×3 和 4×4 并束的两种正弦相位光栅并束效率

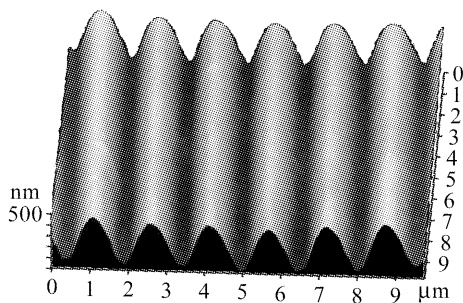


图4 一维正弦相位光栅轮廓

Fig. 4 Profile of one-dimensional sine phase grating

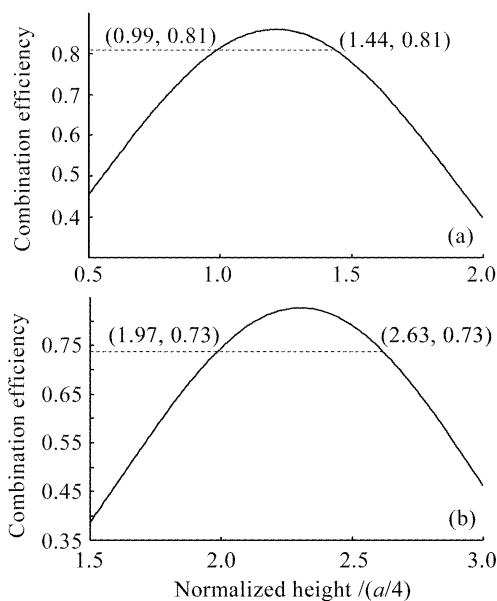


图5 并束效率与归一化高度曲线

Fig. 5 Combination efficiency versus normalized height. (a) 3×3 ; (b) 4×4

与相对高度(实际高度为 $h = a\lambda/[2\pi(n-1)]$)的关系曲线。从图5中可看出,并束效率存在极大值,两边的并束效率呈对称递减,给光栅的制作带来很大的容忍度。值得注意的是,并束效率的极大值并非理论上的分束效率最大值,而是存在一定的偏移。这说明分束与并束时在光栅表面的光场存在一定差别,如果仅用于并束,其耦合效率还有进一步提高的可能。分别以最高并束效率对应参数值($a/4 = 1.22$ 和 $a/4 = 2.31$)再次对 3×3 和 4×4 并束进行模拟,其结果如图6所示。从图6可以看到,除 $(0,0)$ 级次外,其他级次的强度进一步减小。

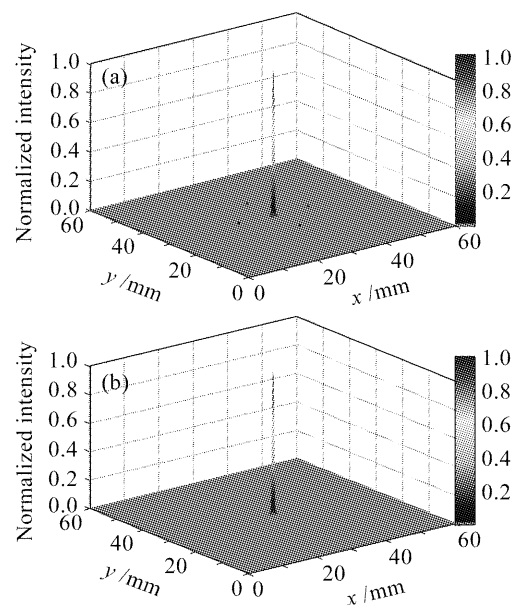


图6 最高并束效率对应的归一化强度分布

Fig. 6 Normalized intensity corresponding to maximal combination efficiency. (a) 3×3 ; (b) 4×4

5 结论

设计了用正弦相位光栅进行光束并束的方案, 3×3 和 4×4 路激光束分束耦合效率分别为81.1%和73.1%。分析了正弦相位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大的加工误差宽容度,通过合理的工艺优化,利用现有干涉光刻技术是可以制作出符合要求的正弦相位光栅的。正弦相位光栅并束的优点为惯性约束聚变快点火的实现带来更大的可能性。

参 考 文 献

- 1 Luo Boliang, Wang Chengcheng, Du Jinglei *et al.*. Design and analysis of phase gratings for laser beams coherent combination [J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, **83**(4-9): 1368~1371
- 2 James R. Leger, Gary J. Swanson, Wilfrid B. Veldkamp. Coherent laser addition using binary phase gratings [J]. *Appl.*

- Opt.*, 1987, **26**(20):688~696
- 3 Wilfrid B. Veldkamp, James R. Leger, Gray J. Swanson. Coherent summation of laser beams using binary phase gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1986, **11**(5):303~305
 - 4 James R. Leger, Gray J. Swanson, Wilfrid B. Veldkamp. Coherent beam addition of GaAlAs lasers by binary phase gratings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **48**(14):888~890
 - 5 James R. Leger, Miles L. Scott, Wilfrid B. Veldkamp. Coherent addition of AlGaAs lasers using microlenses and diffractive coupling [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **52**(21):1771~1773
 - 6 Li Binzhong, Lü Baida. Beam combination characteristics of general astigmatic Gaussian beams [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(4):321~326
李宾中,吕百达. 复杂像散高斯光束的并合光束特性[J]. 中国激光, 2002, **A29**(4):321~326
 - 7 Luo Boliang, Wang Chengcheng, Du Jinglei *et al.*. Study on laser beam combination by binary phase grating [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4):381~384
罗铂靓,王成程,杜惊雷等. 用二元位相光栅进行激光束叠加的研究[J]. 激光技术, 2006, **30**(4):381~384
 - 8 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. Binary Optics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 20~25
金国藩,严瑛白,邬敏贤. 二元光学[M]. 北京:国防工业出版社, 1998. 20~25
 - 9 Yu Yongai, Zhang Lingling, Tang Qianjin *et al.*. Real-time laser beam quality measurement technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2):255~258
于永爱,张玲玲,唐前进等. 激光束质量实时测量技术[J]. 中国激光, 2007, **34**(2):255~258
 - 10 Zhang Rui, Zhang Xiaomin, Su Jingqin *et al.*. Static phase control elements for inertial confinement fusion drivers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3):311~315
张锐,张小民,粟敬钦等. 用于惯性约束聚变驱动器的静态相位控制元件[J]. 中国激光, 2006, **33**(3):311~315
 - 11 Zuo Fen, Chen Lei, Xu Chunsheng. Simultaneous phase-shifting interferometry based on two-dimension grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):663~667
左芬,陈磊,徐春生. 基于二维光栅分光的同步移相干涉测量技术[J]. 光学学报, 2007, **27**(4):663~667
 - 12 Zhang Jin, Feng Boru, Guo Yongkang *et al.*. Laser interference photolithography for fabricating periodic patterns in large area [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2001, **28**(6):20~23
张锦,冯伯儒,郭永康等. 用于大面积周期性图形制造的激光干涉光刻[J]. 光电工程, 2001, **28**(6):20~23
 - 13 Zhang Jin, Feng Boru, Guo Yongkang *et al.*. Comparison between double exposure with two laser beams interference and single exposure with four laser beams [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, **32**(12):21~24
张锦,冯伯儒,郭永康等. 双光束双曝光与四光束单曝光干涉光刻方法的比较[J]. 光电工程, 2005, **32**(12):21~24