

文章编号: 0253-2239(2010)06-1822-05

相干激光阵列的逆达曼光栅合束孔径装填实验研究

闫爱民 刘立人 戴恩文 孙建锋 周煜

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 中国科学院空间激光通信及检验技术重点实验室, 上海 201800)

摘要 提出一种相干激光阵列合束孔径装填的新方法, 采用逆达曼光栅及相位补偿原理将多束锁相相干的阵列激光合束装填为远场单一主瓣的光束, 给出了相应设计方案, 并进行了模拟相干激光阵列合束孔径装填的原理性演示实验。实验结果表明, 这是一种实现高功率和高亮度激光的有效技术方案。逆达曼光栅用于相干阵列激光合束是基于远场衍射原理, 阵列面和光栅面为严格的傅里叶变换关系, 具有原理简单、性能稳定可靠的特点, 能够控制输出光束尺寸及其远场光束宽度, 对于发展紧凑型、轻量化和高光束质量的高功率激光器系统具有重要意义。

关键词 相干光学; 相干激光阵列; 相干合束; 孔径装填; 逆达曼光栅

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1822

Experimental Study on Beam Combination and Aperture Filling of Coherent Laser Arrays Using Conjugate Dammann Grating

Yan Aimin Liu Liren Dai Enwen Sun Jianfeng Zhou Yu

(Key Laboratory of Space Laser Communication and Testing Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract A new beam combining and aperture filling technique using conjugate Dammann grating is introduced to direct all the energy of a mutually coherent laser array to the far-field main lobe in theor. The design scheme of beam combination for one-and two-dimensional coherent laser arrays is demonstrated. An experiment using an idealized simulated laser array with a mask is performed, which verifies the proposed concept. Experimental results show that such a beam combination scheme is efficient technique for the high-brightness and high-power laser systems. This technique is based on the far-field diffraction theory. The relation between grating plane and array plane is Fourier transformation. The aperture size and power density of the combined beam can be conveniently changed. It is very significant for the development of compact, light weight, and high-quality laser systems.

Key words coherence optics; coherent laser array; coherent beam combination; aperture filling; conjugate Dammann grating

1 引言

单一激光器输出功率的提高受到增益饱和、光学损伤及散热等各种因素的限制, 将激光器阵列输出光束进行相干合束是提高输出功率的一种非常有效的技术途径, 可以满足激光雷达、激光通信甚至激光武器等许多领域对高功率和高亮度激光的发展需求^[1~3], 因此具有广泛的应用前景。

鉴于军事及民用的广泛需求, 高功率激光的相干合成一直是国内外研究的热点, 人们提出了多种

相干合成的技术方案, 其中利用相位光栅进行相干合束的方法由于具有二元衍射光学元件的结构简单、体积小和效率高等优点受到密切关注。美国林肯实验室 Swanson 等^[4]用光学傅里叶滤波相位补偿法实现了激光阵列的孔径装填。Liu 等^[5]利用分数泰伯自成像效应在锁相阵列后一定距离放置相位补偿板的方法, 实现了相干激光阵列的孔径装填, 得到了远场单一主瓣。上述技术只适用于振幅两值分布而且可以连续周期排布的激光阵列, 但是不适用

收稿日期: 2009-12-10; 收到修改稿日期: 2010-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)和国防创新基金资助课题。

作者简介: 闫爱民(1976—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事激光技术、信息光学及激光雷达技术等方面的研究。

E-mail: yanaimin@siom.ac.cn

于振幅连续分布的激光光束如高斯分布光束,而且对于较大单个孔径尺度的阵列要求有较长的衍射距离。美国林肯实验室用一维结构相位光栅实现了6个AlGaAs二极管激光器阵列相干合成,随后提出用相位光栅进行“注入锁定”实现激光阵列相干合束的方案^[6]。国内对二元相位光栅实现激光束叠加进行了初步理论研究,并用二维正弦相位光栅、等腰三角形相位光栅进行了激光相干并束的理论分析^[7]。基于光波导自成像效应的多模干涉耦合器可以实现波导分束和合束,在一定条件下还可以进行多路光束的相干合成^[8],但是,由于波导条件的空间限制,激光阵列单元数在微小的空间内有限,因此对输出功率的提高有很大限制。

相干合束是把多通道的相干激光阵列组合成一个通道的技术,孔径装填是把相干激光阵列的每个激光输出波面全部填充充满整个激光阵列口径的技术,使得阵列填充因子提高。提出一种用逆达曼光栅进行相干激光阵列合束孔径装填的新技术,不仅可以实现阵列激光相干合束,而且可实现孔径装填获得远场单一主瓣的高亮度光束。该方法可以产生连续变化振幅(如高斯光束),其合束口径可以不同于单光束口径和阵列总口径,称为合束孔径装填技

术。合束光束口径根据实际需要可以变化控制,从而在大大提高了远场光束亮度的同时,具有很高的灵活控制性。基于相干阵列合束和孔径装填理论,给出了逆达曼光栅合束孔径装填的技术方案,并进行了原理验证性实验。

2 方案设计和理论模型

图1为相干激光阵列逆达曼光栅合束孔径装填的设计方案。将 $M \times N$ (或 N)个二维(或一维)的锁相相干的阵列激光光束入射到预先制作的相位板 $P(x, y)$ 上,而且激光阵列和相位板都位于傅里叶透镜的前焦面上。在傅里叶透镜的后焦面上放置逆达曼光栅进行相位补偿即可得到合束孔径装填的远场单一主瓣的激光输出。相位板 $P(x, y)$ 是根据达曼光栅等强度分束时,傅里叶谱面上各衍射级次等强度阵列光场的相位制作的。很多研究者只是关心达曼光栅有限数目等强度光点阵列的设计,而忽视了此处的相位分布,而此处相位板的设计正是创新特色之一。图1中的逆达曼光栅为达曼光栅相位分布的复数共轭。

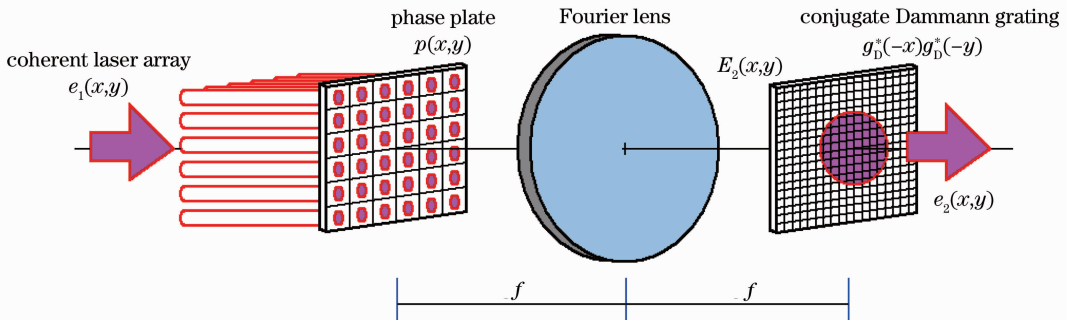


图1 逆达曼光栅相干激光阵列合束孔径装填设计方案

Fig. 1 Optical configuration for performing combined beam combining and aperture filling of coherent laser arrays with conjugate Dammann grating

达曼光栅分束原理和相位板^[9~11]的设计如下:

达曼光栅为纯相位光栅,其透射率函数可写为

$$g_D(x, y) = \sum_m \exp\{j[\Delta\varphi_D(x - mT_x - \Delta x)]\} \times \sum_n \exp\{j[\Delta\varphi_D(x - nT_y - \Delta y)]\}, \quad (1)$$

式中 T_x, T_y 和 $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向达曼光栅的周期和中心移位,在达曼光栅周期内具有亚周期相位结构 $\Delta\varphi_D$ 。

衍射 $M \times N$ 级光点的二维达曼光栅的谱即傅里叶变换为

$$G_D(f_x, f_y) = C_M C_N \left[\sum_m \delta\left(f_x - \frac{m}{T_x}\right) \exp(j\varphi_m) \exp(-j2\pi f_x \Delta x) \otimes \sum_n \delta\left(f_y - \frac{n}{T_y}\right) \exp(j\varphi_n) \exp(-j2\pi f_y \Delta y) \right] + H(f_x, f_y), \quad (2)$$

式中 f_x, f_y 为空间频率, C_M, C_N 为常数, φ_m, φ_n 为傅里叶谱面各级光场的相位, $H(f_x, f_y)$ 为高阶衍射项, $\delta(\cdot)$ 为 δ 函数, \otimes 为二维卷积。对于奇数 M, N , 有 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(M-1)/2, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)/2$, 对于偶数 M, N , 有 $m = 0, \pm 1, \pm 3, \dots, \pm(M-1), n = 0, \pm 1, \pm 3, \dots, \pm(N-1)$ 。

达曼光栅在傅里叶谱面上可产生特定 $M \times N$ 衍射级次的光强相等、相位一定光点阵列, 而且把不同衍射级次对应光场的相位分布制作成图 1 中的相位板 $P(x, y)$ 。

相干激光阵列逆达曼光栅合束孔径装填原理过程如下:

假设锁相的相干激光阵列的光场分布为

$$e_1(x, y) = e_s(x, y) \otimes \sum_m^M \sum_n^N \delta(x - mT_\alpha) \delta(y - nT_\beta), \quad (3)$$

式中 $e_s(x, y)$ 为单元激光束光场分布, T_α, T_β 为激光阵列在 x, y 方向的排列周期。达曼光栅分束时傅里叶谱面上等光强光点的相位制作的相位板为

$$P(x, y) = \sum_m^M \sum_n^N \delta(x - mT_\alpha) \delta(y - nT_\beta) \exp[j\varphi(m, n)].$$

于是相干激光阵列光场附加上述相位板 $P(x, y)$ 后的光场, 经焦距为 f 的傅里叶变换透镜, 在透镜后焦面上的光场分布为 $e_1(x, y)P(x, y)$ 的夫朗禾费远场衍射, 即:

$$E_2(x, y) = \frac{1}{j\lambda f} \frac{\mathcal{F}\{e_s(x, y)\}}{C_M C_N} \times [g_D(-x)g_D(-y) - \mathcal{F}\{H(f_x, f_y)\}], \quad (4)$$

式中 $\mathcal{F}\{\}$ 为傅里叶变换算符。

在傅里叶变换透镜的后焦面处加入逆达曼光栅进行相位补偿后可得到相干阵列合束孔径装填后的

输出光场为

$$e_2(x, y) = g_D^*(-x)g_D^*(-y)E_2(x, y), \quad (5)$$

式中 $g_D^*(-x)g_D^*(-y)$ 为逆达曼光栅的透射率函数, 为达曼光栅 $g_D(x, y)$ 的相位取复共轭, “*” 为复数共轭。

从(4)式可以看出, 优化设计出高效率的具有分束功能的达曼光栅, 消除高阶衍射项的产生是很关键的。在理想设计条件下, 达曼光栅分束效率为 100%, 其高阶衍射项 $H(f_x, f_y)$ 为 0, 则(5)式可简化为

$$e_2(x, y) = \frac{\sqrt{M}\sqrt{N}}{j\lambda f} \mathcal{F}\{e_s(x, y)\}, \quad (6)$$

由(6)式可知, 该方案不仅实现了相干合束, 同时逆达曼光栅消除了合束光场的相位不均匀性, 实现了相干激光阵列的合束孔径装填, 得到高功率和高亮度的单一光束输出。

提出的基于逆达曼光栅相位补偿原理的合束孔径装填技术, 对于相干激光阵列不仅能够产生一个连续波前, 其口径可以不同于单光束口径和阵列光束总口径, 近场输出面功率密度可以变化控制, 容易达到单个器件的水平。而且由于光学傅里叶变换适应于所有尺度, 该合束孔径装填技术适用于各种直径激光阵列, 具有一定的通用性和灵活性。

3 原理验证性实验

对图 1 所示的相干合束孔径装填方案进行了原理验证性的模拟实验, 实验光路图如图 2 所示。模拟实验中考虑到产生相位锁定的相干激光阵列比较困难, 采用主振激光器发射的细光束经望远镜扩束后, 照射到预先设定孔径形状和周期排布的孔径模板的方法模拟产生相干激光阵列光束。

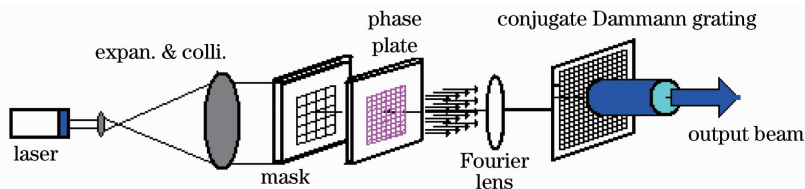


图 2 逆达曼光栅合束孔径装填原理验证实验方案

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for beam combination and aperture filling with conjugate Damman grating

实验中用 He-Ne 激光器作为主振激光器, 扩束后照射到 5×5 二维方阵排列的孔径模板和相位板上。孔径模板为周期 $t = 300 \mu\text{m}$, 直径 $d = 60 \mu\text{m}$ 的圆孔阵列, 相位板紧贴孔径模板上, 其相位值根据 5×5 等强度分束达曼光栅^[12] 傅里叶谱面的相位来

制作, 一维相位分布如表 1 所示, 将其分别应用于 x, y 轴, 可得到 5×5 点阵的相位分布。为了使得相位板的制作简单, 实验中用近似值来制作相位板。模拟激光阵列和相位板位于傅里叶变换透镜的前焦面上, 透镜焦距为 155.4 mm, 逆达曼光栅为 0 和 π

二值相位光栅,放置在傅里叶透镜后焦面上,其相位分布如图 3 所示,光栅周期为 0.3278 mm,最细线宽为 12.66 μm 。

表 1 相位板 x 轴向(或 y 轴)相位的理论值和近似值

Table 1 Theoretical and approximate phases of the phase plate in the direction of x (or y) axis

Diffraction orders	Theoretical values	Approximate values	Transition points	T_x
-2	-0.91029π	π	x_0	0
-1	0.04787π	0	x_1	0.03863
0	0	0	x_2	0.39084
1	-0.04787π	0	x_3	0.65552
2	0.91029π	π	x_4	1

实验中所采用的二维达曼光栅 5×5 分束的各衍射级次光场如图 4(a)所示。利用图 2 所示的逆达曼光栅合束孔径装填实验方案,经逆达曼光栅相位补偿后出射的合束光场分布如图 4(b)所示,图 4(c)为合束光束传输 10 m 后的光场分布图。从图中可以看出合束孔径装填后光场的中心主瓣能量最强,虽然有低强度的边缘光场存在,但传输一定距离后边缘光场随传输距离的增加而消失,只有中心

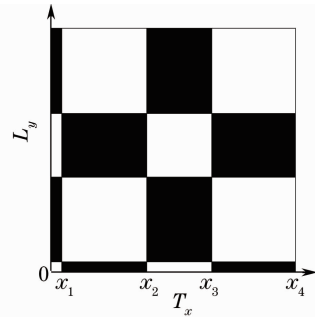


图 3 一个周期内二值相位逆达曼光栅的相位分布
Fig. 3 Phase distribution of binary conjugate Dammann grating in one period

主瓣的光场由于逆达曼光栅相位补偿后相位恒定而保持单光束不变。模拟实验结果表明,逆达曼光栅相位补偿法是实现相干阵列激光合束孔径装填的有效手段,在原理上成功验证了该设计方案的可行性,具有重要的突破性意义。该实验方案是原理验证性实验,观察到了相干合束孔径装填的实验现象,将进一步对逆达曼光栅合束孔径装填的理论分析、误差分析、达曼光栅、相位板的优化设计和制作,以及减少整体系统吸收提高合束效率等多个方面进行优化研究。

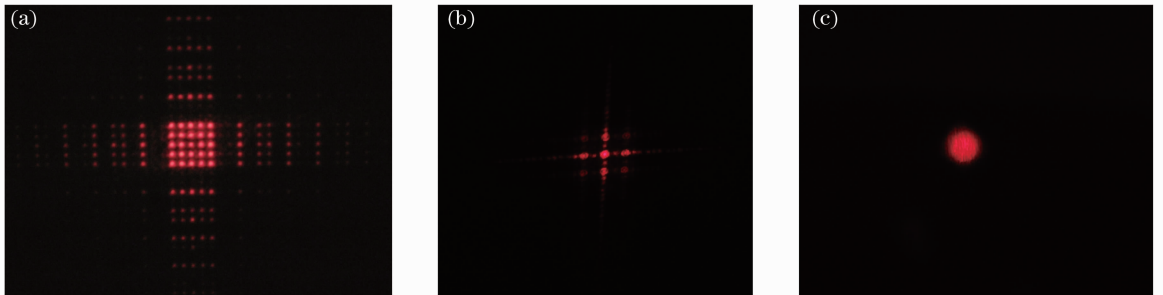


图 4 (a)达曼光栅 5×5 分束;(b)逆达曼光栅合束装填;(c)单光束远距离传输

Fig. 4 (a) Dammann grating 5×5 array spots; (b) near-field; (c) far-field pattern of beam combination and aperture filling

4 结 论

对逆达曼光栅进行相干激光阵列合束孔径装填的新技术方案,进行了原理验证性实验。理论和实验结果表明,逆达曼光栅相位补偿法是一种能实现相干阵列激光合束孔径装填的有效技术方案。考虑到建立真实的相干激光阵列系统涉及复杂的光学和电子学技术,本文采取的模拟激光阵列是非常有效的,模拟实验得到的结论能直接推广到真实相干激光阵列合束系统中。研究结果也将为今后开展新型相干合束孔径装填技术的理论设计和实验研究提供重要参考依据,对于发展紧凑型、轻量化和高亮度的高功率激光器系统具有实际意义。

参 考 文 献

- Liu Liren. Synthetic aperture imaging lader (V): imaging resolution and antenna aperture function [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1408~1415
刘立人. 合成孔径激光成像雷达(V):成像分辨率和天线孔径函数[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1408~1415
- Liu Liren. Laser communications in space I optical link and terminal technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 3~20
刘立人. 卫星激光通信 I 链路和终端技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1): 3~20
- Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean. Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays [J]. *Laser & Optoelec. Progress*, 2008, **45**(8): 33~39
闫爱民, 刘立人, 刘德安. 光纤激光阵列锁相和孔径装填技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 33~39
- G. J. Swanson, J. R. Leger, M. Holz, Aperture filling of phase-locked laser arrays [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 245~247

- 5 L. Liu, L. Zhao. Aperture filling of a phase-locked laser array by phase correction with self-imaging [J]. *Chinese Physics*, 1989, **9**(7): 810~814
- 6 J. R. Leger, G. J. Swanson, W. B. Veldkamp. Coherent laser addition using binary phase gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20): 4391~4398
- 7 Wang Jiangquan, Fang Liang, Zhang Zhiyou *et al.*. Implementation of coherent array beam combination using two-dimensional sine phase grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 39~43
王景全, 方亮, 张志友等. 用二维正弦相位光栅实现阵列激光相干并束[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 39~43
- 8 R. M. Jenkins, R. W. J. Devereux, J. M. Heaton. Waveguide beam splitters and recombiners based on multimode propagation phenomena[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(14): 991~993
- 9 H. Dammann, K. Cortler. High-efficiency in-line multiple imaging by means of multiple phase holograms[J]. *Opt. Comm.*, 1971, **3**(5): 312~315
- 10 H. P. Herzig. *Micro-Optics Elements. Systems and Applications* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 257~298
赫尔齐克. 微光学元件、系统和应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 257~298
- 11 Jin Guofan, Yan Yingbai, Wu Minxian. *Binary Optics* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. 55~87
金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 55~87
- 12 C. Zhou, L. Liu. Numerical study of Dammann array illuminator [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26): 5961~5969

实验室推介及人才招聘

还在为实验室招不到合适的学生与员工发愁?

还在为继续深造和就业寻找出路?

中国激光杂志社推出“实验室推介和人才招聘”服务

五千名专家数据库, 三万名作者数据库

为您搭建沟通的桥梁

为满足广大光学专家和学生的交流和沟通的需求, 帮助专家招收优秀的学生、招聘合适的研究人员, 也给光学研究生提供更好的深造和就业机会, 中国激光杂志社将在每次“光学前沿”会议上现场推出“实验室推介及人才招聘”服务, 该服务自“光学前沿——第三届全国信息光学与光子器件学术会议”开始向所有参会代表免费提供。

参与推介的单位可以向中国激光杂志社提交 15 分钟 ppt 材料(视频资料)、实验室简介及人员招收、招聘材料, 中国激光杂志社将提供单独时段与场地供代表交流。有意求职或深造的代表可将个人简历提交给中国激光杂志社, 中国激光杂志社将把您的信息推荐给相关单位。

联系人: 段家喜 编辑

电 话: 02169918426

E-mail: duanjiaxi@siom.ac.cn

《中国激光》杂志社有限公司

2010-05-11