

# 二维固体激光阵列逆达曼光栅相干合束技术模拟研究

李 兵 闫爱民 戴恩文\* 吕笑宇 职亚楠 孙建锋 刘立人

(中科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测技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 采用逆达曼光栅将二维锁相相干的激光阵列进行相干合束并进行孔径装填是获得远场单一主瓣大功率高光束质量激光输出的一种有效技术方案, 将其应用于大尺寸  $5 \times 5$  固体激光相干阵列相干合束中, 并进行了固体激光阵列合束孔径装填的理论分析和原理性验证实验, 测量了系统的实际合束效率, 同时进行了后焦面逆达曼光栅的加工和放置误差对合束效率影响的详细分析。实验结果表明, 逆达曼光栅用于固体激光阵列相干合束是一种有效的技术方案, 且可以通过调节光栅周期和傅里叶透镜焦距来适应系统对激光阵列占空比的要求。这对于开发基于逆达曼光栅相干合束的高功率高光质量的全固态激光系统具有重要的意义。

**关键词** 激光光学; 相干合束; 逆达曼光栅; 固体激光器; 实验分析

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.1128004

## Simulations of Conjugate Dammann Grating Based on Coherent Beam Combination of Two-Dimensional Solid State Laser Array

Li Bing Yan Aimin Dai Enwen Lü Xiaoyu Zhi Ya'nan Sun Jianfeng Liu Liren

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

**Abstract** Conjugate Dammann grating based on coherent beam combining technique that combines and aperture-fills a phase-locked two-dimensional laser array is an effective way to obtain high-power and high-beam-quality laser with single lobe in the far field. Here, this technique is applied to the coherent beam combining of two-dimensional phase-locked solid-state laser array. Theoretical analysis and experimental verification of a large aperture  $5 \times 5$  solid-state laser array beam combination are described in detail. The beam combining efficiency of the system is measured. The influence of the manufacturing and positioning error of the grating on the beam combining efficiency is also measured and compared with theoretical analysis. Results show that this technique is very suitable for large-aperture solid-state laser array combination. By adjusting the period of the conjugate Dammann grating and the focal length of the Fourier lens, this technique can be used in systems of different duty circles. It is of great significance to the development of high-power, high-beam-quality solid-state laser systems.

**Key words** laser optics; coherent beam combination; conjugate Dammann grating; solid-state laser; experimental analysis

**OCIS codes** 140.3298; 050.1950; 140.3580; 070.5040

## 1 引 言

大功率激光器在激光切割、激光焊接、激光雷达和激光武器等领域具有广泛的应用前景, 研制大功

率高光束质量的激光器系统成为世界各国研究的热点。固体激光器以其高效率、高可靠性、小型化、全固态化以及光束质量好等优点日益受到重视。多个

收稿日期: 2012-04-24; 收到修改稿日期: 2012-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(60907006, 61108069)资助课题。

作者简介: 李 兵(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事信息光学和相干合束等方面的研究。

E-mail: taijizongshi0@126.com

导师简介: 刘立人(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光技术和光学信息等方面的研究。

E-mail: lirenliu@mail.shcnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: enwendai@siom.ac.cn

中小功率固体激光器的相干合成是获得大功率高质量激光束的有效技术方案之一,从而避免单台大功率激光器产生的增益饱和、光学损伤及热损伤和光束质量变差等问题<sup>[1]</sup>。

Xu等<sup>[2]</sup>研究了固体激光器通过倏逝波耦合实现锁相运行的过程,两单元激光器通过倏逝波耦合实现了稳定的相位锁定。Ménard等<sup>[3]</sup>将自成像共焦腔的方法应用到两个Nd:YAG激光阵列的锁相中。美国Northrop Grumman Space Technology的研究人员进行了采用基于主振荡功率放大(MOPA)方案的7路固体激光器相干合束获得了105.5 kW的连续波激光输出。卢常勇等<sup>[4]</sup>提出了利用迈克耳孙干涉复合腔进行两路固体激光器相干合成的技术方案,获得了单脉冲能量300 mJ的激光输出。

然而,锁相激光阵列产生多旁瓣的远场衍射光斑,相当一部分的能量将分布在阵列远场的旁瓣中。为了把旁瓣能量集中到中心主瓣中,就要实现孔径装填以达到远场单瓣输出,提高激光亮度和光束质量<sup>[5]</sup>。

Matsumoto等<sup>[6]</sup>在二极管激光阵列输出端面直接集成或端面附近放置移相器,可以把异相模转换成同相模,获得衍射极限限制下的单瓣远场输出。在阵列输出端的像面上放置相位补偿板也可以使得双瓣远场衍射光斑变为单瓣输出。Liu等<sup>[7]</sup>利用分数Talbot效应在锁相阵列后一定距离放置相位补偿板使得阵列激光实现孔径装填。Swanson等<sup>[8]</sup>用光学傅里叶滤波相位补偿实现了孔径装填,对阵列的傅里叶变换谱进行移相,把阵列的振幅分布场强转换成纯相位分布结构,然后用相位板补偿,最终得到等振幅等相位分布的波前,从而产生了单一主瓣。

采用逆达曼光栅(CDG)及相位补偿原理将多束锁相相干阵列激光合束同时进行孔径装填获得大功率高质量的激光束是一种有效的技术方案<sup>[9~11]</sup>。文献[9]进行了模拟小芯径激光阵列相干合束的实验,其振幅模板的周期为300 μm,光束口径为60 μm,验证了该技术可用于光纤激光相干阵列的合束,但没有涉及大口径的固体激光阵列。

本文提出了将逆达曼光栅相干合束技术应用于固体激光器的相干阵列合束。采用文献[9]和[11]中同一块逆达曼光栅,通过调整傅里叶透镜焦距,增大了阵列周期和光束口径,以适用于以晶体或者玻璃为工作物质的固体激光器阵列。进行了相应的模拟实验,验证了整个方案用于固体激光器相干阵列的可行性。同时,测量了逆达曼光栅轮廓,并分析了

加工误差对合束效率的影响,详细测量了逆达曼光栅垂直光轴平移、绕垂直水平面的轴旋转以及沿光轴移动对于合束效率的影响。

## 2 实验原理和实验方案

### 2.1 实验原理

图1为相干激光阵列逆达曼光栅合束的设计方案<sup>[9,10]</sup>。 $M \times N$ 个二维或 $N$ 个一维的锁相相干的固体激光阵列(CSSLA)光束入射到位于傅里叶透镜(FL)前焦面的相位板(PP)进行相位调制,经过傅里叶透镜变换,在傅里叶透镜的后焦面与CDG相位补偿后即可得到合束孔径装填的远场单一主瓣的激光输出<sup>[10,11]</sup>。其中相位板是根据逆达曼光栅等光强分束时,傅里叶谱面上各衍射级次等强度阵列光场的相位制作。相关理论的详细数学模型及推导过程,请参阅文献[9]和文献[11]。

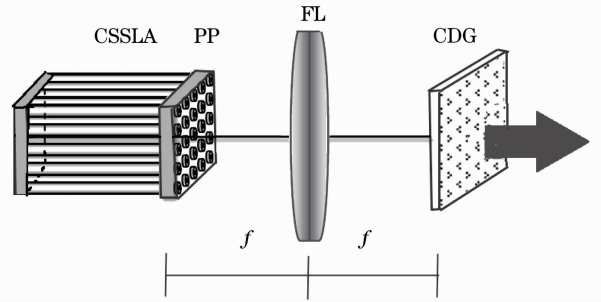


图1 基于逆达曼光栅的二维 $5 \times 5$ 锁相相干固体激光阵列相干合束原理图

Fig. 1 2D  $5 \times 5$  CSSLA coherent beam combination based on conjugate Dammann gratings

激光阵列函数与逆达曼光栅振幅透射率函数之间满足傅里叶变换关系,因此激光阵列周期 $t$ 与逆达曼光栅周期 $T$ 满足

$$t = \frac{\lambda f}{T}, \quad (1)$$

式中 $\lambda$ 、 $f$ 分别为入射光波长和傅里叶透镜焦距。傅里叶透镜变换前后焦面上的口径之比,对于高斯光束满足

$$\omega_{0,2} = \frac{\lambda f}{\omega_{0,1}}, \quad (2a)$$

式中 $\omega_{0,1}$ 、 $\omega_{0,2}$ 分别为前后焦面上的光束束腰半径。对于平面波,可按孔径的艾里斑计算,即

$$r_2 = 0.61 \frac{\lambda f}{r_1}, \quad (2b)$$

式中 $r_1$ 、 $r_2$ 分别为前后焦面上平面波的口径大小。

根据(1)、(2)式,通过灵活调节逆达曼光栅的周期 $T$ 和傅里叶透镜焦距 $f$ ,可适应不同周期和占空

比的激光阵列。光栅周期的选择受到光栅加工精度的限制,周期越小,光栅越难以加工,同时也必须考虑后焦面合束后光束的大小,以保证照射足够多的光栅周期以便能实现合束,而根据(2)式后焦面大小又与傅里叶透镜焦距和入射光束尺寸有关,因此必须综合考虑才能确定合适的透镜焦距和光栅周期。通过调节透镜焦距,将文献[9]中的光栅用于具有较大周期  $t$  的固体激光阵列中,较大的阵列周期可为抽运和散热提供足够空间。

基于以上理论模型,首先进行了  $5 \times 5$  二维方形光斑激光阵列的逆达曼光栅相干合束的数值模拟<sup>[11,12]</sup>,模拟时所用方孔的光斑尺寸为 1 mm,阵列周期为 3.47 mm,傅里叶变换透镜焦距为 1.8 m,波长为  $0.6328 \mu\text{m}$ 。此处采用方形光斑的原因在于方形孔径有较高的填充系数,且玻璃或者晶体的工作物质可以加工为方形的,从而可以提高功率密度。图2为模拟获得的近场合束光斑,即傅里叶透镜后

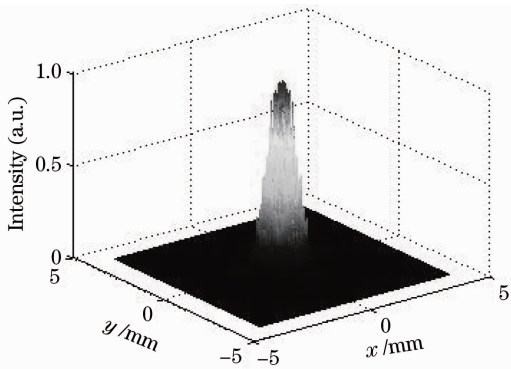


图2  $5 \times 5$  锁相相干固体激光阵列相干合束光束位于逆达曼光束后的近场分布

Fig. 2 Near-field pattern of the combined beam from the  $5 \times 5$  CSSLA directly after the conjugate Dammann gratings

焦面紧贴光栅后表面处的光场,从图2中可以看出,  $5 \times 5$  锁相固体激光阵列合成为单一光束。

图3为数值模拟所得的锁相相干固体激光阵列经逆达曼光栅合束后的远场衍射截面图( $y=0$ ),如图3所示,中心主瓣及旁瓣均为方形,且主瓣包含了入射光束绝大部分的能量,旁瓣得到了极大地抑制。

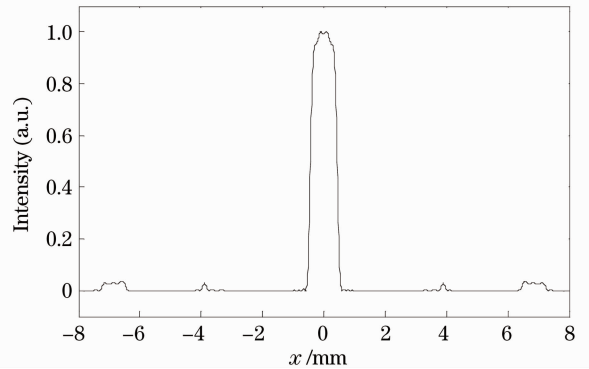


图3 基于逆达曼光栅的  $5 \times 5$  锁相相干固体激光阵列相干合束远场衍射截面图( $y=0$ )

Fig. 3 Sectional ( $y=0$ ) far field pattern of the  $5 \times 5$  CSSLA coherent-beam combination based on conjugate Dammann gratings

## 2.2 模拟实验方案

图4为逆达曼光束相干合束技术用于二维固体激光阵列相干合束的模拟实验方案图<sup>[11,12]</sup>,其中AM代表孔径模板。准直扩束的激光(平面波)通过一有  $5 \times 5$  个尺寸为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$  方孔的孔径板,用来模拟锁相相干的  $5 \times 5$  固体激光阵列,经过相位板进行相位调制后,在焦距为 1.8 m 的傅里叶透镜后焦面形成与达曼光束振幅透射率函数(相位分布)相同的光场分布,最后经过后焦面上的逆达曼光栅相位补偿相消,成一相位均匀光束输出,最后得到远场单一主瓣。

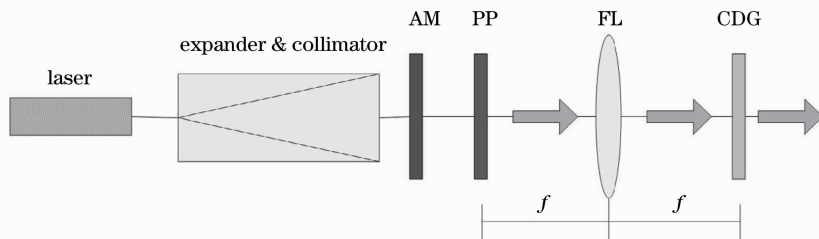


图4 基于逆达曼光栅的  $5 \times 5$  锁相相干固体激光相干合束验证性实验装置图

Fig. 4 Experimental setup of the simulated  $5 \times 5$  phase-locked CSSLA coherent-beam combination based on conjugate Dammann gratings

## 3 实验结果及其分析

采用前述模拟实验方案,进行了逆达曼光栅用

于  $5 \times 5$  阵列 CSSLA 相干合束的验证性实验研究,测量了实际的合束效率和光栅结构,进行了逆达曼

光栅平移和旋转对合束效率影响的实验研究,并与数值计算结果进行了对比。

### 3.1 合束效率以及实验结果图

图 5 为模拟实验所得到的实验结果图,图 5(a)为合束光场的近场衍射图,从图中可以看出,主瓣光强明显强于旁瓣,旁瓣产生的原因是逆达曼光栅分

束的效率为 59.88%,当光栅衍射效率为 100%时,旁瓣将完全消失,关于提高光栅分束效率的相关工作正在进行中。图 5(b)为合束光束的远场衍射主瓣图,从图中可以看出,合束光束远场主瓣同样为矩形光束,这与模拟结果相一致。

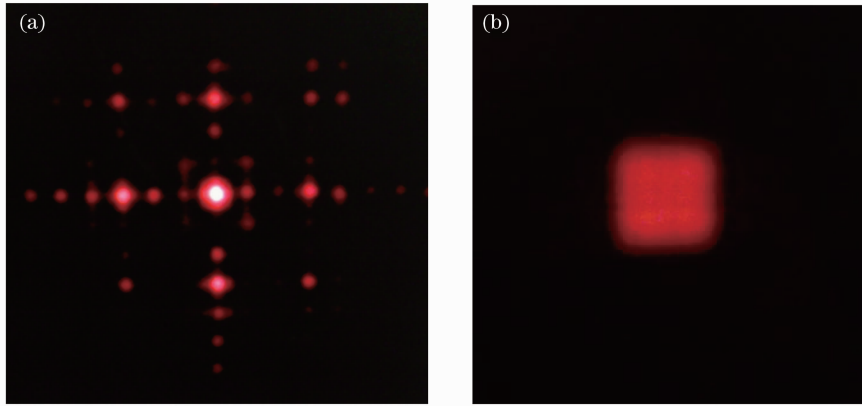


图 5  $5 \times 5$  固体激光相干合束实验结果图。(a)近场图;(b)远场主瓣

Fig. 5 Experimental results of the simulated  $5 \times 5$  CSSLA coherent-beam combination. (a) Near-field pattern; (b) main lobe of far-field pattern

### 3.2 实验结果分析

实验中,对于  $5 \times 5$  激光合束,表 1 中的理论相位值被化为只有一个台阶的  $0-\pi$  二值相位板,即表 1 中的实验加工值,这极大地降低了相位板的加工难度。然而,从表 1 对比可以看出,两者的相位值的差别必将导致合束光场的相位起伏无法被完全消除,进而导致主瓣能量下降,旁瓣能量增加,最终导致合束效率的下降。计算结果表明,相位的简化使合束效率下降了 4%。同时,限于加工设备的精度以及加工人员操作熟练程度,光栅和相位板的加工

总是会带有一定的误差,这同样会给合束效率带来影响。图 6 和图 7 分别为采用 Taylor Hobson 轮廓仪得到用于  $5 \times 5$  CSSLA 合束的光栅和相位板的轮廓图。所用材料在 633 nm 处的折射率为 1.52, $\pi$  值相位板刻蚀深度应为 608.5 nm。由图 6 和图 7 可以看出, $5 \times 5$  逆达曼光栅加工误差极小,刻蚀深度基本为 608 nm。而对于相位板,刻蚀深度为 704 nm,误差为 15.7%,数值模拟计算结果表明,这将使合束效率降低 5%。

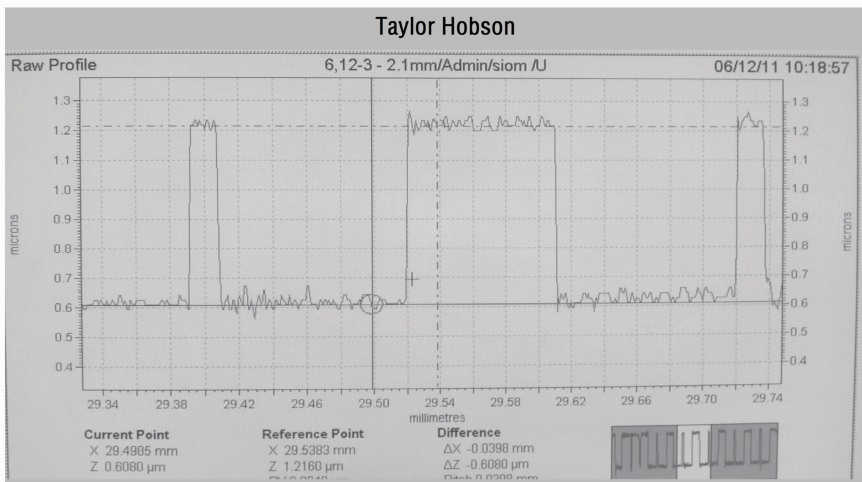
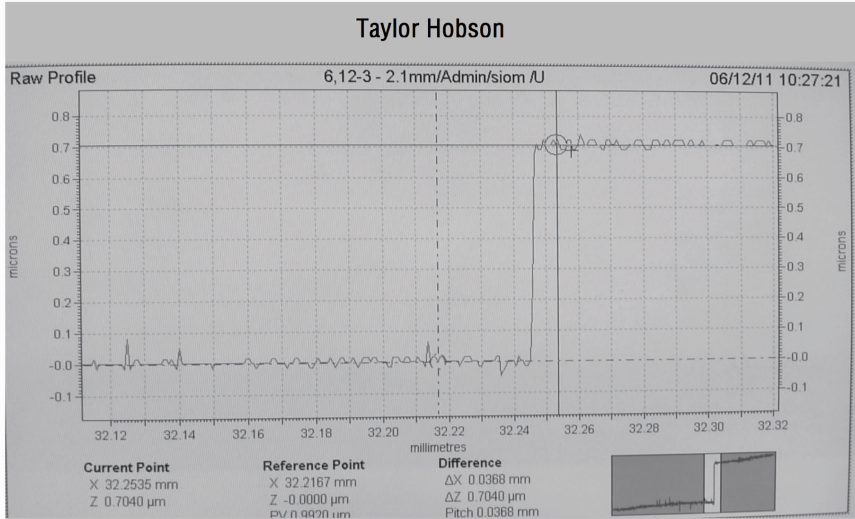


图 6 实验中使用的  $5 \times 5$  逆达曼光栅轮廓

Fig. 6 Measured surface profile of the fabricated  $5 \times 5$  conjugate Damman gratings

表 1  $5 \times 5$  相位板一维相位的理论值和实际加工值Table 1 One-dimensional calculated and experimental phase values of the  $5 \times 5$  phase plate

Phase value	Diffraction order				
	-2	-1	0	1	2
Calculated	$-0.91\pi$	$0.05\pi$	0	$-0.05\pi$	$0.91\pi$
Experimental	$\pi$	0	0	0	$\pi$

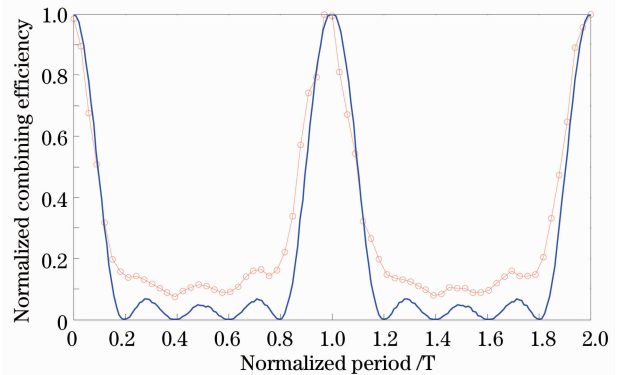
图 7  $5 \times 5$  CSSLA 逆达曼光栅合束用相位板轮廓图Fig. 7 Measured surface profile of the fabricated phase plate for  $5 \times 5$  CSSLA conjugate Dammann grating combination

### 3.3 光栅放置误差分析

当光束阵列经傅里叶透镜变换,在傅里叶变换透镜后焦平面上形成相位分布与逆达曼光栅振幅透射率函数一致的光场分布,此时的光场分布可视为虚拟光栅,通过与其匹配的逆达曼光栅相乘,两者相位相消得到均分布的光场。然而,由于后焦面上的光场相位分布并不可见,虚拟光栅与逆达曼光栅之间必须严格对准<sup>[12]</sup>,才能有效消除合束光场的相位起伏,因此测量了光栅垂直光轴沿光栅周期方向平移、转动以及沿光轴前后移动时,合束效率的变化情况。

由于该虚拟光栅和与其相匹配的逆达曼光栅具有相同的亚周期精密结构,最细宽度为  $12.7 \mu\text{m}$ ,当逆达曼光栅与虚拟光栅沿光栅  $x$  方向相互错开时,合束光场的相位起伏就无法有效地得到消除,这会影响到合束光束的光束质量,最终影响系统的合束效率。图 8 中连续实线为数值计算模拟得到的二维  $5 \times 5$  固体激光阵列合束系统归一化合束效率随光栅偏移两个光栅周期(垂直光传播方向,沿光栅周期  $x$  方向)的变化曲线。圆圈离散点为实际测量的归一化合束效率随偏移距离的曲线图。

从图 8 中可以看出,两者变化趋势基本相同,当光栅左右平移 0.2 个周期,合束效率下降至几乎为

图 8 共轭逆达曼光栅平移对二维  $5 \times 5$  CSSLA 逆达曼光栅合束系统合束效率影响的数值模拟结果Fig. 8 Numerical results of the influence of the grating translation on the beam combining efficiency of the  $5 \times 5$  conjugate Dammann grating beam based 2D CSSLA coherent combining system

零,这说明数值分析理论和实验测量结果是相吻合的。图 8 中的数值计算结果较为平滑,数据起伏较小,中间合束效率最低可为零。而图 8 中的实验测量结果则有较高的最低效率,这是由测量环境的背景光和系统的杂散光引起的,同时实验测得的最高合束效率为 37%,低于理论效率,这是由包括前面分析的光栅、相位板加工误差等各种实验误差引起的。图 8 中,实验测量值和数值理论值的变化趋势

的一致性验证了关于逆达曼光栅用于大口径固体激光阵列合束的理论分析。

同样,逆达曼光栅与虚拟光栅之间有一定夹角的时候,其投影到虚拟光栅面上的光栅与实际逆达曼光栅相比有所缩小,同时,光束不是垂直入射到逆光栅上,这些都会降低共轭逆达曼光栅对合束光场相位起伏的消除,最终对合束效率产生影响<sup>[12]</sup>。图9为实际测量的二维 $5 \times 5$ 固体激光阵列合束实验模拟实验,光栅分别从平行位置向两侧转动 $0.06 \text{ rad}$ 情况下,合束效率的变化情况。从图9可以看出,当逆达曼光栅转过 $0.01 \text{ rad}$ 情况下,合束效率已急剧下降至最低,随着转动角度的增大合束效率发生振荡且逐渐下降。

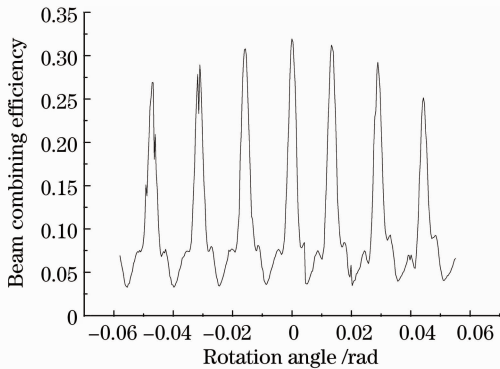


图9 逆达曼光栅转动对二维 $5 \times 5$  CSSLA 逆达曼光栅合束系统合束效率影响

Fig.9 Influence of the grating rotation on the beam combining efficiency of the simulated  $5 \times 5$  conjugate Dammann grating beam based on 2D CSSLA coherent combining system

最后,测量了逆达曼光栅沿光轴前后平动对合束效率的影响。由于系统景深较大,光栅在焦平面前后移动 $2 \text{ cm}$ ,合束效率变化不大。

上述实验误差分析以及与理论模拟分析对比表明,逆达曼光栅相干合束技术用于锁相固体激光阵列合束是可行的,光栅和相位板加工误差以及光栅的放置误差对于合束效率是有影响的,尤其是转动误差影响很大,然而现有的精密机械技术完全可以将误差控制到很小的范围。

## 4 结 论

理论研究和实验结果表明,采用逆达曼光栅对固体激光阵列进行相干合束是获得高光束质量的高功率激光的有效技术途径之一。逆达曼光栅相干合束技术可以通过灵活地调节逆达曼光栅的周期和傅

里叶透镜的焦距来适应不同系统对阵列周期和占空比的要求。同时,现有精密机械技术可以有效消除逆达曼光栅的加工和放置对合束效率的影响。这对于开发基于逆达曼光栅合束的高功率高光束质量的固体激光相干合束系统的设计和实验具有重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 J. Xu, S. Li, K. K. Lee *et al.*. Phase locking in a two-element laser array: a test of the coupled-oscillator model[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(7): 513~515
- 3 S. Ménard, M. Vampouille, B. Colombeau *et al.*. Highly efficient phase locking and extracavity coherent combination of two diode-pumped Nd:YAG laser beams[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(24): 1996~1998
- 4 Lu Changyong, Li Li, Liu Xu *et al.*. Coherent combining of two pulsed solid state lasers [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1757~1762  
卢常勇, 李莉, 刘旭等. 两路脉冲固体激光器的相干合成[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(8): 1757~1762
- 5 Yan Aimin, Liu Liren, Liu Dean *et al.*. Recent progress in phase-locking and aperture filling of fiber laser arrays[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 33~39  
闫爱民, 刘立人, 刘德安等. 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
- 6 M. Matsumoto, M. Taneya, S. Matsui *et al.*. Single-lobed far-field pattern operation in a phased-array with an integrated phase-shifter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(22): 1541~1543
- 7 L. Liu, L. Zhao. Aperture filling of a phase-locked laser array by phase correction with self-imaging [J]. *Chin. Phys.*, 1986, **9**(7): 810~814
- 8 G. J. Swanson, J. R. Leger, M. Holz. Aperture filling of phase-locked laser arrays [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(4): 245~247
- 9 A. Yan, L. Liu, E. Dai *et al.*. Simultaneous beam combination and aperture filling of coherent laser arrays by conjugate Dammann gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(8): 1251~1253
- 10 Yan Aimin, Liu Liren, Dai Enwen *et al.*. Experimental study on beam combination and aperture filling of coherent laser arrays using conjugate Dammann grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1822~1826  
闫爱民, 刘立人, 戴恩文等. 相干激光阵列的逆达曼光栅合束孔径装填实验研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1822~1826
- 11 B. Li, A. Yan, L. Liu *et al.*. Efficient coherent beam combination of two-dimensional phase-locked laser arrays[J]. *J. Opt.*, 2011, **13**(5): 055706
- 12 Li Bing, Yan Aimin, Lü Xiaoyu *et al.*. Research on two-dimensional coherent laser array beam combination using conjugate Dammann grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1205001  
李兵, 闫爱民, 吕笑宇等. 二维激光阵列逆达曼光栅相干合束理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1205001

栏目编辑: 宋梅梅