

# 二维激光阵列逆达曼光栅相干合束理论研究

李 兵 闫爱民\* 吕笑宇 孙建锋 刘立人

(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测技术重点实验室,上海 201800)

**摘要** 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成为远场单一主瓣光束是一种实现高功率和高亮度相干合束的技术方案。以  $5 \times 5$  和  $32 \times 32$  二维相干激光阵列为例进行了理论模拟分析,同时分析了逆达曼光栅相干合束实验中相位板相位误差、逆达曼光栅对准误差和放置角度误差对合束效率的影响。理论分析及数值模拟计算结果表明,逆达曼光栅可用于相干激光阵列合束,但误差对相干激光阵列合束效率有较大的影响。因此,在实验中乃至发展基于逆达曼光栅的高功率激光器系统时,需要减小相位补偿板的相位加工误差,精密调节逆达曼光栅的位置,以减小误差对于合束效率的影响。

**关键词** 光栅;相干光学;相干合束;合束效率;逆达曼光栅;误差分析

中图分类号 O438 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.1205001

## Research on Two-Dimensional Coherent Laser Array Beam Combination Using Conjugate Dammann Grating

Li Bing Yan Aimin Lü Xiaoyu 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** Phase-locked coherent laser array beam combination using conjugate Dammann grating and phase compensation is used to achieve high power and high brightness coherent beam combination. Theoretical analysis of the beam combination of  $5 \times 5$  and  $32 \times 32$  two-dimensional laser arrays using conjugate Dammann grating is carried out through numerical simulation, and the influences of the errors in the phase values of the phase plate, the matching and positioning of the conjugate Dammann grating to the beam combination efficiency during the experiment are also studied. The results of theoretical analysis and numerical simulation show that this is an efficient beam combination technique, however, these errors have a great influence on the total beam combination efficiency. This means that the manufacturing of the phase plate and positioning of the conjugate Dammann grating should be taken great care of during the experiment and the development of high power laser system based on conjugate Dammann grating, which will benefit the development of the compact, light, high efficiency and high beam quality high-power laser system.

**Key words** gratings; coherent optics; coherent beam combination; beam combining efficiency; conjugate Dammann grating; error analysis

**OCIS codes** 050.1950; 140.3298; 070.5040

## 1 引 言

高能激光在医学、激光核聚变和高能激光武器等领域的应用越来越广,并且这些应用对激光束的

质量要求越来越高,因此如何得到高功率、高质量的激光束成为一项重要的研究课题。然而,单一激光器由于自身的缺陷,如增益饱和、热效应和非线性效

收稿日期: 2011-05-27; 收到修改稿日期: 2011-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(60907006)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@siom.ac.cn

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

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

\* 通信联系人。E-mail: yanaimin@siom.ac.cn

应等,其输出功率的提高受到了限制。因此,通过对激光阵列输出光束进行相干合束来获得高功率、高质量的激光束是一种非常有效的方法<sup>[1]</sup>。

研究人员提出了多种激光阵列的相干合束技术方案<sup>[2]</sup>,如 Anderegg 等<sup>[3]</sup>提出的主振荡功率放大(MOPA)方案,Morel 等<sup>[4]</sup>提出的外腔相干合束方案,Corcoran 等<sup>[5]</sup>提出的自傅里叶腔相干合束方案等。然而在这些合束方案中,锁相阵列的远场旁瓣中存在着很大一部分的能量,这不可避免地引起光束质量以及合束效率的下降。

利用二元衍射光学元件进行孔径填充的技术<sup>[2]</sup>是上述问题的一种有效解决方案。二元衍射光学元件具有结构简单、体积小、衍射效率高、成本低及易于大面积加工的优点<sup>[6]</sup>。例如,Liu 等<sup>[7]</sup>利用分数泰伯自成像效应,在锁相阵列后泰伯距离上放置相位补偿板,实现了相干激光阵列的孔径装填,得到了远场单一主瓣。Leger 等<sup>[8]</sup>用一维结构相位光栅实现了 6 个 AlGaAs 二极管激光器的阵列相干合成。上述技术只适用于振幅二值分布而且可以连续周期排布的激光阵列,但对于振幅连续分布的激光光束(如高斯光束)并不适用,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。

达曼光栅是一种二值相位型光栅,在入射光照射下可以产生一定数目的等光强光斑阵列<sup>[6,9]</sup>。由光束可逆原理,利用达曼光栅的分束作用,将相干激光阵列视为等光强光斑阵列,经傅里叶变换后(即透过一傅里叶变换透镜),经逆达曼光栅对光场进行相位调制,消除其相位分布的不均匀性,即可实现激光阵列相干合束,得到远场单一主瓣的高亮度光束。

理论分析和实验结果表明<sup>[10,11]</sup>,逆达曼光栅可以有效地实现阵列激光的相干合束。

合束效率是评价合束方案最终效果的一个非常重要的参数,其定义一般为合束后远场中心主瓣功率与入射激光阵列总功率的比值。理论分析表明,理想情况下逆达曼光栅的合束效率与达曼光栅的分束效率是一致的。逆达曼光栅需要对透镜之后的光进行相位调制,消除其光场相位的不均匀性,在达曼光栅分束效率 100%的理想情况下即逆达曼光栅的合束效率也为 100%时,逆达曼光栅与合束后的光场相位分布完全匹配,从而将完全消除透镜后光场的不均匀性。然而在实际的合束实验中,逆达曼光栅放置位置的偏移误差会影响其与光场相位分布的匹配,从而对光场不均匀性的消除,最终对合束效率产生影响。本文采用数值模拟方法,对光栅放置位置误差对于合束效率的影响进行了分析,这对实际实验及开发基于逆达曼光栅阵列合束的高功率激光系统具有一定的实际意义。

## 2 理论模型与实验验证

### 2.1 理论模型及数值模拟

#### 2.1.1 理论模型

应用逆达曼光栅合束的设计方案如图 1 所示。相位板和逆达曼光栅分别放在傅里叶透镜的前后焦面。锁相相干激光阵列经相位板后,相位进行了预调制,然后经过傅里叶变换透镜进行傅里叶变换,由在后焦面的逆达曼光栅进行相位补偿,最终可在远处获得单一主瓣的光束。

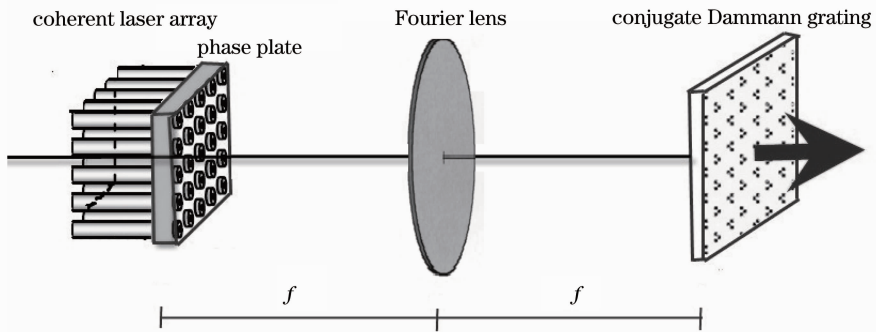


图 1 逆达曼光栅相干激光阵列合束示意图

Fig. 1 Optical configuration for coherent beam combination using conjugate Dammann grating

达曼光栅可以用来产生一维或者二维的等光强光斑阵列。通过优化设计达曼光栅一个周期内的亚周期相位结构,可以得到高分束效率、高光强以及高均匀度的光斑阵列。考虑到光栅的周期性,达曼光

栅的透射率函数可以表示为

$$T_{DG}(x, y) = \exp\left[j \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Delta\phi(x - mT_x, y - nT_y)\right], \quad (1)$$

式中  $T_x, T_y$  分别为  $x, y$  方向上的周期,  $\Delta\phi(x, y)$  为单一周期内的相位分布。为方便起见, 设定达曼光栅的傅里叶谱  $\tilde{T}_{\text{DG}}(f_x, f_y)$  包含有  $M \times N$  个等光强的

衍射级次和仅包少量能量的其他高阶衍射级次  $H(f_x, f_y)$ ,

$$\tilde{T}_{\text{DG}}(f_x, f_y) = \sum_m^M \sum_n^N \delta(f_x - m/T_x, f_y - n/T_y) C_{mn} \exp(j\varphi_{mn}) + H(f_x, f_y), \quad (2)$$

式中  $C_{mn}$  和  $\varphi_{mn}$  分别为衍射级次  $(m, n)$  的振幅和相位。图 1 中的相位板基于相位值  $\varphi_{mn}$  制造。逆达曼光栅的相位分布  $T_{\text{DG}}^*(x, y)$  是达曼光栅的复共轭。

假定相干激光阵列是锁相并且完全相干的。则相位板后的相干激光阵列的光场分布为

$$E_1(f_x, f_y) = e_s(f_x, f_y) * * \sum_m^M \sum_n^N \delta(f_x - m/T_x) \delta(f_y - n/T_y) \exp(j\varphi_{mn}), \quad (3)$$

式中  $e_s(f_x, f_y)$  表示单个发射单元的光场分布, “\* \*” 代表二维卷积。(3) 式表示  $M \times N$  相干激光阵列在傅里叶频域的分布。傅里叶变换透镜后焦面上的光场分布为

$$\tilde{E}_1(x, y) = \frac{1}{j\lambda f} \mathcal{F}[E_1(f_x, f_y)],$$

式中  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换,  $\lambda$  是入射光波长。代入(2)式和(3)式,  $\tilde{E}_1(x, y)$  可以写为

$$\tilde{E}_1(x, y) = \frac{1}{j\lambda f} \frac{\mathcal{F}[e_s(f_x, f_y)]}{C_{mn}} \{ T_{\text{DG}}(-x, -y) - \mathcal{F}[H(f_x, f_y)] \}, \quad (4)$$

因此逆达曼光栅后的光场分布为  $E_2(x, y) = \tilde{E}_1(x, y) T_{\text{DG}}^*(-x, -y)$ ,

$$E_2(x, y) = \frac{1}{j\lambda f} \frac{\mathcal{F}[e_s(f_x, f_y)]}{C_{mn}} \{ 1 - \mathcal{F}[H(f_x, f_y)] T_{\text{DG}}^*(-x, -y) \}. \quad (5)$$

如果达曼光栅的分束效率为 100%, 则高阶衍射

$H(f_x, f_y) = 0$ , 同时,  $\tilde{T}_{\text{DG}}(f_x, f_y) = \sum_m^M \sum_n^N \delta(f_x - m/T_x, f_y - n/T_y) C_{mn} \exp(j\varphi_{mn})$ , 则合束之后的光束可以简单地写为  $E_2(x, y) \propto \mathcal{F}[e_s(f_x, f_y)]$ 。可以看出, 逆达曼光栅很大程度上消除了合束光束的相位起伏, 由此可以得到一个均匀的波面并消除了合束光束的远场旁瓣。

### 2.1.2 数值模拟

基于 2.1.1 节的理论模型, 进行了  $5 \times 5$  和  $32 \times$

$32$  相干激光阵列合束的数值模拟, 得到了近场和远场的光场能量分布。其中所用的达曼光栅的数据来自文献[9]。为简化计算, 二维的达曼光栅是通过两个可以产生  $1 \times 5$  等光强点阵列的一维光栅交叉而得。通过理论计算, 二维达曼光栅可将入射光束分成  $5 \times 5$  等光强光斑阵列。得到的这个等光强阵列的相位值如表 1 所示。二维  $5 \times 5$  达曼光栅的分束效率为 59.88%, 这是一维  $1 \times 5$  达曼光栅分束效率 (77.38%) 的平方。

表 1 孔径掩模板后相位板  $5 \times 5$  理论相位值

Table 1 Calculated  $5 \times 5$  phase values of the phase plate placed directly after the aperture mask

Diffraction order	Calculated $5 \times 5$ phase values of the phase plate				
	-2	-1	0	1	2
-2	-1.8206 $\pi$	-0.8624 $\pi$	-0.9103 $\pi$	-0.9582 $\pi$	0
-1	-0.8624 $\pi$	0.0957 $\pi$	0.0479 $\pi$	0	0.9582 $\pi$
0	-0.9103 $\pi$	0.0479 $\pi$	0	-0.0479 $\pi$	0.9103 $\pi$
1	-0.9582 $\pi$	0	-0.0479 $\pi$	-0.0957 $\pi$	0.8624 $\pi$
2	0	0.9582 $\pi$	0.9103 $\pi$	0.8624 $\pi$	1.8206 $\pi$

在图 1 中的合束阶段, 相干合束阵列对应  $5 \times 5$  光斑阵列, 相位板的值按照表 1 制造。傅里叶变换透镜后面的逆达曼光栅的透射率函数为所用达曼光栅的复共轭。逆达曼光栅后面的近场光强分布如图

2 所示。其入射光波长为  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ,  $T_x = T_y = 327.8 \mu\text{m}$ ,  $f = 155.4 \text{ mm}$ 。从图中可以看出,  $5 \times 5$  光束阵列合成为一个单一的高斯光束。逆达曼光栅的合束效率等于达曼光栅的分束效率, 理论上均为 59.88%。

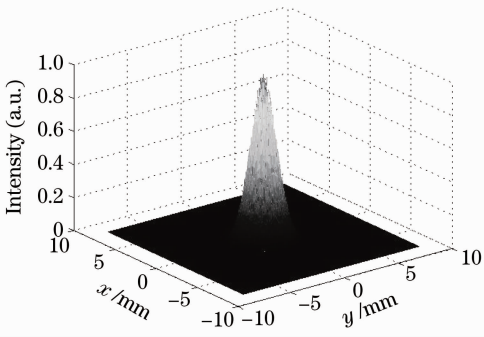


图 2 5×5 激光阵列合束光束经逆达曼光栅后的相位近场

Fig. 2 Near-field intensity distribution of the combined beam with 5×5 beamlets directly after the conjugate Dammann grating

图 3 为 5×5 相干锁相激光阵列经逆达曼光栅合束后的远场衍射分布的截面图 ( $y=0$ )。单个中心主瓣中包含了入射光束绝大部分的能量,旁瓣被极大地限制了。

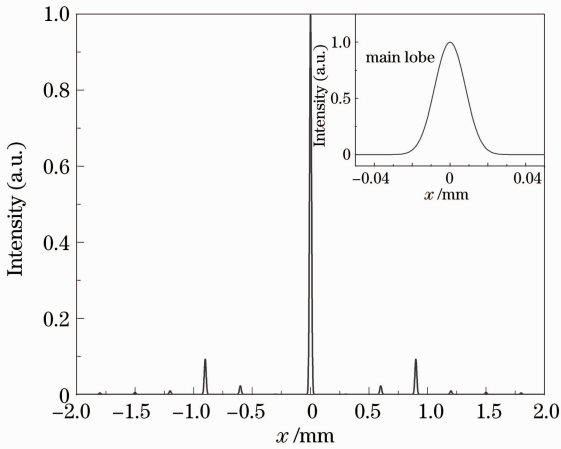


图 3 5×5 激光阵列合束光束远场能量分布截面图 ( $y=0$ )

Fig. 3 Sectional ( $y=0$ ) far-field intensity distribution of the combined beam with 5×5 beamlets

根据上述理论模型,通过增加输入激光阵列的数量,输出光束的功率可以得到极大的提高。这尤其适用于大数目光纤激光阵列的合束,因为光纤激光器具有半径小、功率高的优点。图 4 为 32×32 相干激光阵列合束远场光强分布的截面图 ( $y=0$ ),图中的主瓣与旁瓣均为高斯型。输入激光阵列的相位由傅里叶变换透镜前焦面的相位板决定,合束光束的相位起伏由傅里叶变换透镜后焦面的逆达曼光栅消除。32×32 合束系统的合束效率为 68.93%,这是一维 1×32 达曼光栅分束效率的平方。

理论模拟结果表明,这种合束技术对大型光束

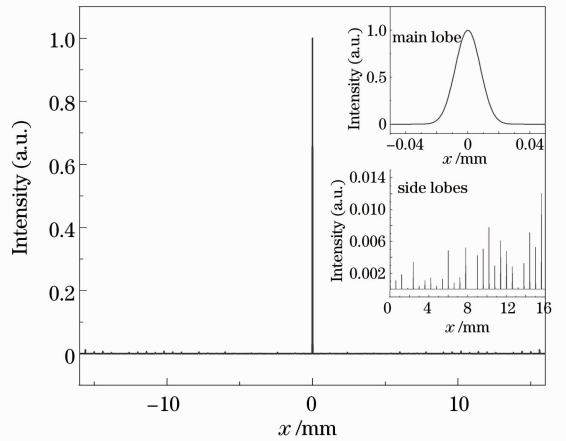


图 4 32×32 激光阵列合束光束远场能量分布截面图 ( $y=0$ )

Fig. 4 Sectional ( $y=0$ ) far-field intensity distribution of the combined beam with 32×32 beamlets 阵列合束是可行的,并且会在光纤激光和固体激光阵列的阵列合束中有进一步的应用。

## 2.2 实验验证

为检验逆达曼光栅用于相干激光阵列合束的可行性,已经开展了 5×5 激光阵列合束的原理验证实验。详情参见文献[11]。实验中使用的相位板的相位值为(2)式中的  $\varphi_{mn}$ ,并在表 2 中列出。

表 2 实验中孔径掩模板后相位板 5×5 相位值

Table 2 Experimental 5×5 phase values of the phase plate placed directly after the aperture mask

Diffraction order	Experimental 5×5 phase values of the phase plate				
	-2	-1	0	1	2
-2	0	$\pi$	$\pi$	$\pi$	0
-1	$\pi$	0	0	0	$\pi$
0	$\pi$	0	0	0	$\pi$
1	$\pi$	0	0	0	$\pi$
2	0	$\pi$	$\pi$	$\pi$	0

对比表 1 和表 2,相位板的理论相位值与实际实验中加工的相位板相位值不同,这不可避免地引入误差,影响后续逆达曼光栅对合束光束相位不均匀性的补偿,进而影响系统的合束效率。这些将在误差分析中进一步详细讨论。

## 3 误差分析

以上理论分析结果表明,采用逆达曼光栅进行相干激光阵列的合束是可行的。为了在实验中尽可能地使合束效率接近理论值,有必要对可能影响合束效率的各种因素进行分析。为了简化计算,仅对 1×5 和 1×32 逆达曼光栅相干阵列合束进行了几

种典型误差的分析。

### 3.1 相位板相位值误差分析

在进行的实验中,为减小相位板的加工难度,表1所代表的多相位值相位板被简化为表2所示的只有一个台阶的 $0\sim\pi$ 二值相位板。然而,从表1和表2的对比可以看出,两者的相位值有不小的差别,这将不可避免地影响到逆达曼光栅后波面的相位分布,进而影响到远场的光场分布,从而对整个系统的合束效率产生影响。

在数值模拟中,相位板的相位值,即(2)式中的 $\varphi_{nm}$ ,被加入了取值范围为 $0\sim\alpha\pi$ 的随机相位误差,其中 $0<\alpha<0.5$ 。图5和图6分别为 $1\times 5$ 和 $1\times 32$ 逆达曼光栅合束的合束效率与 $\alpha$ 的关系图。从图中可以看出,随着相位值误差的加大,合束效率逐渐降低,当误差有 $0.2\pi$ 的时候,合束效率平均降低5%

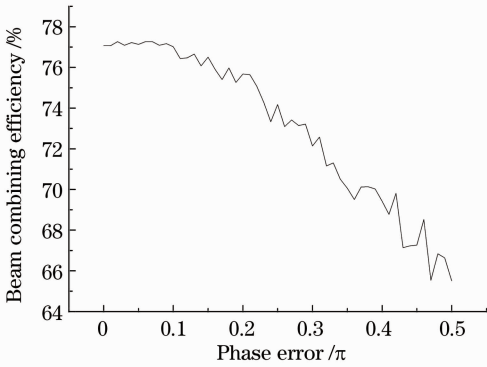


图5 相位板相位值误差对 $1\times 5$ 逆达曼光栅合束系统合束效率的影响

Fig. 5 Influence of the phase value error to the beam combining efficiency of the  $1\times 5$  conjugate Damann grating beam combining system

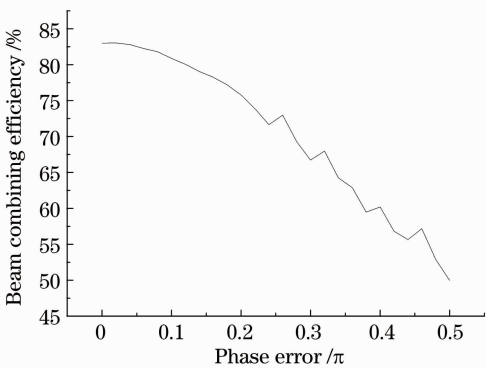


图6 相位板相位值误差对 $1\times 32$ 逆达曼光栅合束系统合束效率的影响

Fig. 6 Influence of the phase value error to the beam combining efficiency of the  $1\times 32$  conjugate Damann grating beam combining system

左右。所以,实验中为减小相位板加工难度而采取的相位值取整降低了系统的合束效率。

### 3.2 逆达曼光栅匹配误差分析

等相相位干激光阵列的激光输出经相位板后,相位被调制为特定值,然后通过傅里叶变换透镜的变换,在逆达曼光栅前形成一定的光场分布,理想情况下经过逆达曼光栅后,消除了合束光场的不均匀性,从而实现单一光束的输出。当光束经傅里叶透镜变换,到达逆达曼光栅时,光场分布可视为一虚拟光栅,且其相位分布与逆达曼光栅的相位分布相匹配,两者相消得到均匀分布的光场。然而,由于逆达曼光栅前光场的分布并不可见,同时所用的逆达曼光栅亚周期结构精密,虚拟光栅与逆达曼光栅之间稍微错开即会导致其后光场均匀性下降,从而无法得到单一光束输出,进而影响了系统的合束效率。

图7和图8是数值模拟的逆达曼光栅水平(垂直于光传播方向,沿光栅周期方向)偏移一个周期时合束效率的变化情况。可以看出,两图均以0.5个周期为中心,两边对称,说明光栅偏移方向对合束效率的影响是相同的。对于 $1\times 5$ 逆达曼光栅合束系统来说,当光栅偏移0.1个周期时,衍射效率即从77.38%下降到50%左右,而当偏移0.2个周期左右至时,合束效率几乎下降至零。对于 $1\times 32$ 逆达曼光栅合束系统来说,由于单一周期内光栅相位突变点增多,光栅结构更加精密,最细小结构为0.008个周期,远小于 $1\times 5$ 逆达曼光栅的0.039个周期,因此逆达曼光栅的合束效率对光栅的偏移误差更为敏感,随着偏移的增大,合束效率急剧下降,当偏移0.01个周期左右的时候,合束效率即由83.03%降

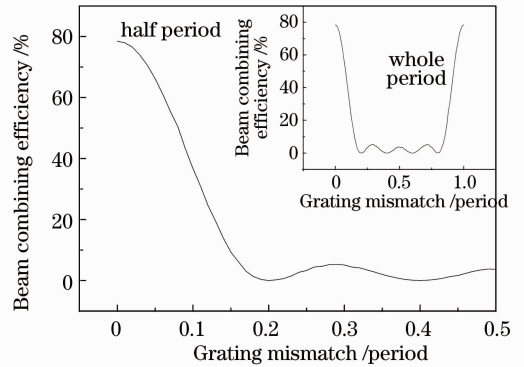


图7 逆达曼光栅偏移误差对 $1\times 5$ 逆达曼光栅合束系统合束效率的影响

Fig. 7 Influence of the grating mismatch error to the beam combining efficiency of the  $1\times 5$  conjugate Damann grating beam combining system

至 50% 左右, 而当偏移 0.03 个周期时, 合束效率就已经几乎降为 0。

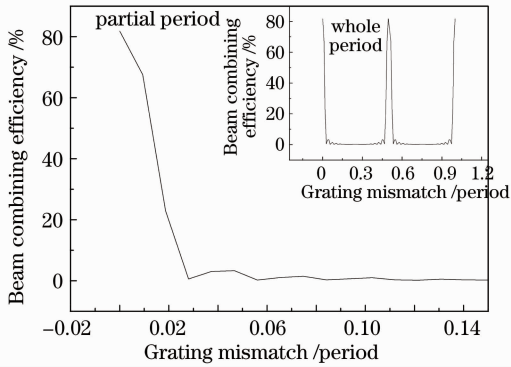


图 8 逆达曼光栅偏移误差对  $1 \times 32$  逆达曼光栅合束系统合束效率的影响

Fig. 8 Influence of the grating mismatch error to the beam combining efficiency of the  $1 \times 32$  conjugate Dammann grating beam combining system

因此, 在逆达曼光栅合束实验中, 对光栅要进行精密调节, 使其合束效率尽量接近理论值。

### 3.3 逆达曼光栅倾斜误差分析

逆达曼光栅要与其前面所形成的虚拟光栅相匹配, 当逆达曼光栅有一定倾斜时, 其投影到虚拟光栅面上的光栅为实际逆达曼光栅的  $\cos \beta$  倍, 其中  $\beta$  为逆达曼光栅与垂直于光束传播方向的平面的夹角。因此, 投影光栅比实际的光栅要小, 这会造成其与虚拟光栅的不匹配, 影响逆达曼光栅后面的光场的相位均匀性, 进而影响系统的合束效率。图 9 和图 10 分别为  $1 \times 5$  和  $1 \times 32$  逆达曼光栅合束系统的合束效率与逆达曼光栅倾角误差的关系图。

从图中可见, 开始时光栅的倾角并没有对合束效率产生影响, 而当倾角增大到一定程度时, 合束效率急剧下降至几乎为 0。因此, 系统对于逆达曼光

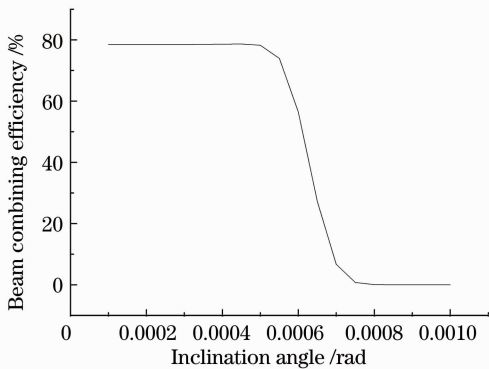


图 9 光栅倾斜角度对  $1 \times 5$  合束系统效率的影响

Fig. 9 Influence of grating inclination error to beam combining efficiency of  $1 \times 5$  beam combining system

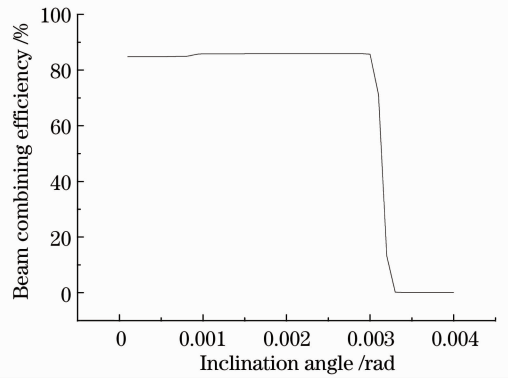


图 10 光栅倾斜角度对  $1 \times 32$  合束系统效率的影响  
Fig. 10 Influence of grating inclination error to beam combining efficiency of  $1 \times 32$  beam combining system  
栅的倾角有比较严格的限制。

## 4 结 论

采用逆达曼光栅的合束系统能有效地进行相干激光阵列合束, 并具有结构简单、效率高等优点。理论研究和实验结果表明该合束系统能获得高光束质量的高功率激光。在此基础上, 重点分析了相位板相位值误差、逆达曼光栅对准误差和倾斜误差对于  $1 \times 5$  和  $1 \times 32$  逆达曼光栅相干合束系统的合束效率的影响。结果表明, 系统合束效率对对准和倾斜误差极为敏感, 随着误差的增大, 合束效率急剧下降直至几乎为 0。这就要求在实验中要设计精密导轨、精密调节逆达曼光栅的放置位置, 以使系统合束效率尽量接近理论值。

## 参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2005, **11**(3): 567~577
- 2 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
- 3 J. Anderegg, S. Brosnan, E. Cheung *et al.*. Coherently coupled high-power fiber arrays [C]. *SPIE*, 2006, **6102**: 61020U
- 4 J. Morel, A. Woodtli, R. Dändliker. Coherent coupling of an array of  $\text{Nd}^{3+}$ -doped single-mode fiber lasers by use of an intracavity phase grating [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 1520~1522
- 5 C. J. Corcoran, F. Durville. Experimental demonstration of a phase-locked laser array using a self-Fourier cavity [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(20): 201118
- 6 Di Caihui, Zhou Changhe. Dammann grating-based dynamic optical coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1275~1278  
底彩慧, 周常河. 基于达曼光栅的动态光耦合器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1275~1278
- 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 J. R. Leger, G. J. Swanson, W. B. Veldkamp. Coherent laser addition using binary phase gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(20): 4391~4399
- 9 C. Zhou, L. Liu. Numerical study of Dammann array illuminators [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(26): 5961~5969
- 10 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
- 11 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

栏目编辑: 宋梅梅