

基于多层介质膜光栅的谱合成系统光束特性分析

吴真 钟哲强 杨磊 张彬

**Analysis of characteristics of combined beam in spectral beam combining system based on multilayer dielectric grating**

Wu Zhen Zhong Zhe-Qiang Yang Lei Zhang Bin

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 65, 054205 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.054205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054205>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

气雾化辅助激光诱导击穿光谱检测水中的痕量金属元素

Detection of metal element in water using laser-induced breakdown spectroscopy assisted by nebulizer

物理学报.2015, 64(2): 024212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024212>

连续波差分吸收激光雷达测量大气 CO<sub>2</sub>

Continuous-wave modulation differential absorption lidar system for CO<sub>2</sub> measurement

物理学报.2014, 63(10): 104214 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104214>

基于多元定标法的脐橙 Pb 元素激光诱导击穿光谱定量分析

Quantitative analysis of laser induced breakdown spectroscopy of Pb in navel orange based on multivariate calibration

物理学报.2014, 63(10): 104213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.104213>

基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究

Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报.2013, 62(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234204>

激光诱导 AIO 自由基 B<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>-X<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup> 跃迁光谱研究

Study on the emission spectrum of AIO radical B<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>-X<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup> transition using laser-induced breakdown spectroscopy

物理学报.2013, 62(22): 224211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.224211>

# 基于多层介质膜光栅的谱合成系统光束特性分析\*

吴真 钟哲强 杨磊 张彬†

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2015年9月11日收到; 2015年11月18日收到修改稿)

针对多层介质膜光栅在光束谱合成系统中的应用, 利用光线追迹方法, 建立了基于多层介质膜光栅的谱合成系统光传输模型. 多层介质膜光栅引入的相位调制包括浮雕表面上光程差与浮雕结构光程差两部分, 且受到光栅槽深、占空比和光束入射角等因素的影响. 利用衍射积分方法和光束非相干叠加原理, 计算模拟了基于多层介质膜光栅的谱合成系统的合成光束光强分布. 在此基础上, 利用强度二阶矩方法分析了合成光束的光束质量, 并讨论了多层介质膜光栅的槽深、占空比和制作误差等因素对合成光束特性的影响. 结果表明: 改变多层介质膜光栅的槽深和占空比以及中心光束入射角会影响合成光束能量, 但不会影响合成光束的光束质量, 合成光束的光束质量始终保持与单个子光束的光束质量相当; 多层介质膜光栅的制作误差对合成光束的光束质量和能量均存在明显影响.

**关键词:** 光束谱合成, 多层介质膜光栅, 激光阵列, 光束质量

**PACS:** 42.62.Fi, 78.47.jj, 42.60.-v

**DOI:** 10.7498/aps.65.054205

## 1 引言

光束合成是为了在保持高光束质量的同时获得远高于单台激光器输出功率的激光束. 作为非相干合成技术的典型代表, 光束谱合成技术无需控制阵列单元的偏振态、相位和振幅即可实现非相干合成, 且合成光束的光强分布在近场和远场能保持较好的重叠<sup>[1,2]</sup>. 这些优点使得光束谱合成技术不仅能在激光系统中用以提高输出功率和光束质量, 还可将高输出功率、高光束质量的合成光束作为抽运光源来抽运光纤激光器和固体激光器. 目前, 国内外研究人员对光束合成技术进行了诸多研究, 研究重点主要集中于增加激光单元数目、提高光束质量和合束效率, 其中使用体布拉格光栅<sup>[3-5]</sup>、闪耀光栅<sup>[6,7]</sup>的谱合成技术研究较多, 但由于这类光栅的衍射效率和损伤阈值低, 较难得到高亮度、高光束质量的合成光束. 多层介质膜光栅 (multilayer dielectric grating, MDG) 对光能的吸收较低, 且具

有较高的衍射效率, 介质膜损伤阈值高于金属膜数十倍, 再加上其制作工艺日趋成熟, 正逐步运用于光束谱合成系统中<sup>[8,9]</sup>. 目前, Kemme 和孟慧成等<sup>[9,10]</sup>采用了多层介质膜光栅进行半导体激光器光栅-外腔光谱合束的实验研究, 实现了合束单元的有效反馈锁定. 但目前对于基于多层介质膜光栅的谱合成技术的理论研究却较少, 光栅参数等对谱合成光束的影响尚不明确. 因此, 分析 MDG 在谱合成系统中的作用机理, 对于如何进一步提高谱合成效率和光束质量具有重要参考价值. 此外, 在实际制作过程中, 光栅槽形的控制是一个难点. 光刻胶掩膜槽形的好坏在很大程度上决定了离子刻蚀的结果, 在制备光栅过程中很容易出现加工误差, 因而有必要分析光栅槽形的加工误差对合成光束的影响. 以矩形多层介质膜光栅为例, 建立了基于多层介质膜光栅的谱合成系统光传输模型, 重点分析了 MDG 的占空比、槽深和制作误差, 以及光束入射角对谱合成光束特性的影响.

\* 中国工程物理研究院高能激光科学与技术实验室基金 (批准号: 2014HEL03) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

## 2 多层介质膜光栅模型

如图1所示, 多层介质膜光栅是由基底 (region4)、高反射率介质膜系 (region3) 和周期性浮雕结构 (region2) 组成的. 在光束谱合成系统中, 多层介质膜光栅实质是对从入射区 (region1) 入射的光束起到高反射和相位调制的作用, 充分利用了多层介质膜系的高反特性和浮雕光栅的衍射特性<sup>[11,12]</sup>. 利用光线追迹方法, 将浮雕光栅作为相位元件所引入的光程差分为两部分: 浮雕表面上光程差和浮雕内部引入的光程差.

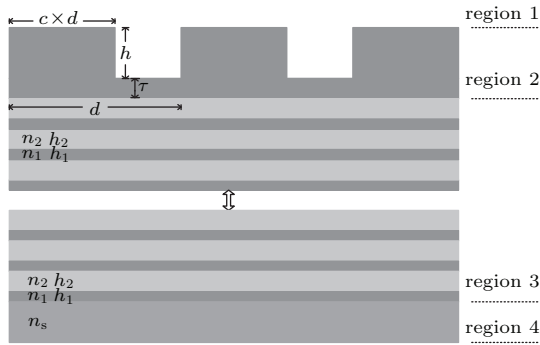


图1 多层介质膜光栅示意图

Fig. 1. Schematic illustration of multilayer dielectric grating.

### 2.1 浮雕表面上光程差

图2为浮雕表面上光程差示意图, 图中光束入射角为 $\alpha$ , 衍射角为 $\beta$ ,  $N$ 表示光栅法线, 以出射光束的传输方向为 $z'$ 轴,  $x'$ 轴垂直于出射光束的传输方向 $z'$ 轴, 接收屏 $x$ 与 $x'$ 轴平行. 浮雕表面上光程差 $\Delta_o$ 在 $x'o'z'$ 坐标中表示为

$$\begin{aligned} \Delta_o &= (R' - R) + (I' - I) \\ &= -x' \tan \beta + \frac{x'}{\cos \beta} \sin \alpha. \end{aligned} \quad (1)$$

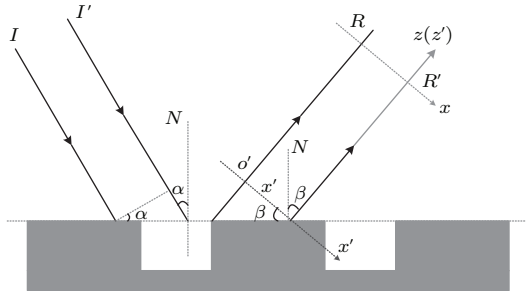


图2 光栅表面上光程差

Fig. 2. Optical path difference on the top surface of grating.

另外, 要使具有不同入射角度、不同波长的各子光束在接收屏上相同位置接收到其最大峰值, 则入射角 $\alpha$ 和衍射角 $\beta$ 需要满足光栅方程:

$$d(\sin \alpha - \sin \beta) = m\lambda, \quad (2)$$

当 $m = 1$ 时, 入射波长满足:  $\lambda = d(\sin \alpha - \sin \beta)$ .

### 2.2 浮雕内部引入的光程差

浮雕内部引入的光程差如图3所示, 光束入射角为 $\alpha$ , 浮雕材料的折射率为 $n$ , 浮雕占空比为 $c$ , 槽深为 $h$ , 浮雕光栅周期为 $d$ , 浮雕内折射角为 $\varepsilon$ , 剩余厚度为 $\tau$ , 多层介质膜光栅中 $h + \tau$ 为一个定值, 在光栅制备过程中由衍射效率严格确定.  $\mu$ 为浮雕光栅的脊背序号, 当 $\mu = 0$ 时代表浮雕结构的中心脊背. 由于多层介质膜光栅的多层膜系对具有某波长范围并以某角度范围入射的光束为高反射 (反射率可达到99%)<sup>[11-13]</sup>, 则光束的反射传输过程 (从浮雕结构上表面入射  $\rightarrow$  多层介质膜系反射  $\rightarrow$  浮雕结构上表面出射) 可近似等效为如图3所示的透射传输过程 (以介质膜系的顶层膜上表面为对称面, 得到浮雕光栅的对称结构, 入射光束从一侧入射, 从另一侧透射).

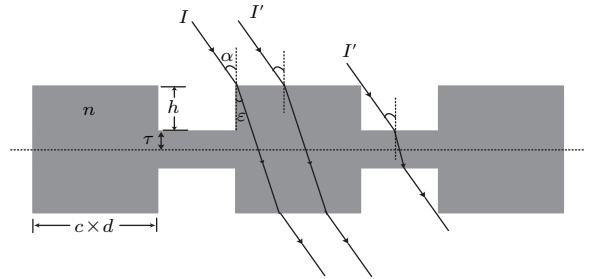


图3 光栅内部引入的光程差

Fig. 3. Optical path difference inside grating.

根据折射定律 $\sin \alpha = n \sin \varepsilon$ , 光束在浮雕内部传输引入的光程差 $\Delta_g$ 可表示为

$$\Delta_g = \begin{cases} 0, & ud < \frac{x'}{\cos \beta} < (\mu + c)d, \\ \frac{2h}{\cos \alpha} - \frac{2nh}{\cos \varepsilon}, & \\ (\mu + c)d < \frac{x'}{\cos \beta} < (\mu + 1)d, & \end{cases} \quad (3)$$

则由(1)式和(3)式, 可得到多层介质膜光栅引入的总光程差 $\Delta_{total}$ 为

$$\Delta_{total} = \Delta_o + \Delta_g. \quad (4)$$

### 2.3 考虑制作误差时MDG引入的光程差

光栅在制备过程中存在加工误差, 假设光栅槽深的最大误差为  $\Delta h$ , 光栅槽深误差可采用均匀随机分布模型, 则第  $\mu$  个槽的误差为

$$\Delta h_\mu = \Delta h \cdot \text{random}(-1, 1), \quad (5)$$

则第  $\mu$  个槽深可表示为

$$h_\mu = h_0 + \Delta h_\mu, \quad (6)$$

其中  $h_0$  为无误差时的槽深.

类似地, 假设占空比的最大误差为  $\Delta c$ , 光栅占空比误差采用均匀随机分布模型, 则第  $\mu$  个槽的占空比误差为

$$\Delta c_\mu = \Delta c \cdot \text{random}(-1, 1), \quad (7)$$

则第  $\mu$  个槽的占空比可表示为

$$c_\mu = c_0 + \Delta c_\mu, \quad (8)$$

其中  $c_0$  为无误差时的占空比.

综合考虑制作误差时 MDG 浮雕内部引入的光程差变为

$$\Delta_{g\mu} = \begin{cases} 0, & \mu d < \frac{x'}{\cos \beta} < (\mu + c_\mu) d, \\ \frac{2h_\mu}{\cos \alpha} - \frac{2nh_\mu}{\cos \varepsilon}, & \\ (\mu + c_\mu) d < \frac{x'}{\cos \beta} < (\mu + 1)d, \end{cases} \quad (9)$$

则由 (1) 式和 (9) 式, 可得到考虑制作误差时 MDG 引入的总光程差  $\Delta'_{\text{total}}$  为

$$\Delta_{\text{total}} = \Delta_o + \Delta_{g\mu}. \quad (10)$$

### 3 光束谱合成系统的光传输模型

光束谱合成原理<sup>[14,15]</sup>如图 4 所示, 为使得各子光束经过变换透镜后在光栅入射面上的光斑尺寸较小, 激光阵列 (laser array, LA) 和介质膜光栅分别位于变换透镜的前后焦点. 从激光阵列不同单元发出的子光束具有不同的波长, 不同位置的各子光源发出的子光束经过透镜变换为具有不同倾角的光束, 再入射到多层介质膜光栅上. 介质膜光栅将这些具有不同波长、不同入射角的子光束合为以相同角度输出的一束光, 经过输出耦合镜后输出, 继而实现功率合成且保持较好的光束质量, 其中各

子光束的波长由光栅方程和对应的子光源所在位置严格确定.

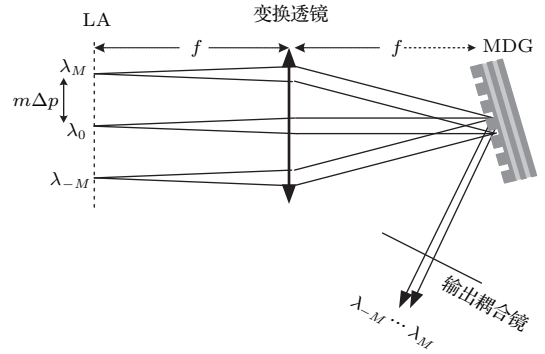


图 4 光束谱合成系统示意图

Fig. 4. Schematic illustration of spectral beam combining system.

介质膜光栅的入射光场如图 5 所示, 以透镜的前焦点为  $x''$  轴, 透镜的主光轴为  $z''$  轴, 建立坐标系  $x''o''z''$ .  $x''$  轴上分布着  $2M + 1$  个子光源,  $x''$  轴原点上的子光源编号 0, 沿  $x''$  轴的负方向到正方向的子光源编号分别为  $-M, \dots, -2, 1, 0, 1, 2, \dots, M$ , 各子光源的波长分别为  $\lambda_{-M}, \dots, \lambda_0, \dots, \lambda_M$ ; 相邻两个子光源的间隔为  $\Delta p$ , 即编号为  $m$  的子光源距离原点的距离为  $p_m = m\Delta p$ . 假设每个子光源可近似为基模高斯光束, 且束腰位于  $z'' = 0$  的平面, 束腰宽度为  $w_0$ , 振幅为  $E_0$ , 子光源  $m$  在  $z'' = 0$  面上的光场分布为

$$E(x_0, 0) = E_0 \exp \left[ -\frac{(x_0 - p_m)^2}{w_0^2} \right]. \quad (11)$$

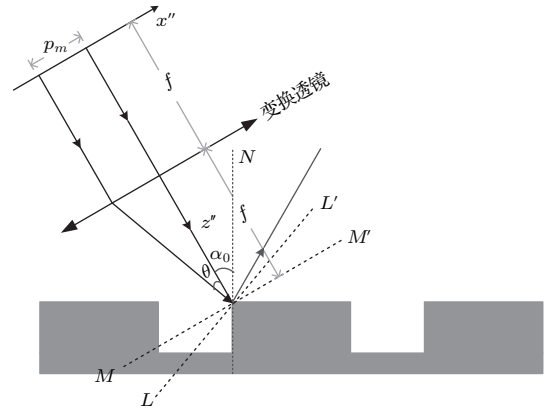


图 5 光栅前入射光波模型

Fig. 5. Model of incident light wave before propagating through grating.

将浮雕结构中心脊背的左端点置于透镜焦点上, 从光源到浮雕结构入射面之间光学系统  $ABCD$  矩阵为

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z'' - f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (12)$$

式中  $f$  为变换透镜的焦距. 将 (11) 式代入柯林斯衍射积分公式, 激光阵列发出的子光束经过  $ABCD$  系统后, 可得到浮雕结构入射面上的光场分布:

$$\begin{aligned} & E(x'', z'') \\ &= \sqrt{\frac{1}{i\lambda B}} \exp(ikz'') \int_{-\infty}^{+\infty} E(x_0, 0) \\ & \quad \times \exp\left[\frac{ik}{2B}(Ax_0^2 - 2x_0x'' + Dx''^2) dx_0\right] \\ &= \sqrt{\frac{kw_0^2}{i(2B - ikAw_0^2)}} E_0 \exp(ikz'') \\ & \quad \times \exp\left\{\frac{ik}{2B}\left[\frac{1}{2B - ikAw_0^2}[2ABp_m^2 - 4Bp_mx'' \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + 2BDx''^2 + ikx''^2w_0^2(1 - AD)]\right]\right\}, \quad (13) \end{aligned}$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$ .

在图 5 中,  $MM'$  为透镜的后焦面,  $LL'$  经过  $ABCD$  系统后子光束的中心光线在透镜像方焦点的垂线, 在该面上  $x''$  和  $z''$  存在如下几何关系:

$$z'' = 2f - x'' \tan \theta = 2f + x''m\Delta p/f, \quad (14)$$

假设每个浮雕周期内的光波复振幅相等<sup>[6]</sup>, 则有

$$x'' = \mu d \cos \alpha_0, \quad (15)$$

式中,  $\mu$  为浮雕脊背序号,  $d$  为浮雕光栅周期,  $\alpha_0$  为中心光束入射角. 假设浮雕光栅每个周期内的入射光波复振幅相等, 则浮雕光栅入射面上的光波复振幅仅与浮雕脊背序号  $\mu$  有关, 记为  $E(\mu)$ . 将 (11), (12), (14) 和 (15) 式代入 (13) 式, 即可得到浮雕光栅入射面上的光场分布.

在一个周期内  $x'$  满足  $\mu d \cos \beta \leq x' \leq (\mu + 1)d \cos \beta$ . 根据菲涅耳衍射积分公式, 第  $j$  个子光束在接收屏上的光场分布可表示为

$$\begin{aligned} E_j(x, z) &= \sum_{\mu=-N}^N \sqrt{-\frac{ik}{2\pi z}} \exp(ikz) \\ & \quad \times \int_{\mu d \cos \beta}^{(\mu+1)d \cos \beta} E(\mu) \exp(ik\Delta_{\text{total}}) \\ & \quad \times \exp\left[ik\frac{(x-x')^2}{2z}\right] dx', \quad (16) \end{aligned}$$

其中,  $2N + 1$  为光栅周期总数. 根据非相干叠加原理, 可得到合成光束的光强分布为

$$I(x, z) = \sum_{j=-M}^M |E_j(x, z)|^2. \quad (17)$$

## 4 光束谱合成光束特性的计算模拟和分析

依据建立的基于多层介质膜光栅的光束谱合成系统光传输模型, 以 5 个子光源为例进行模拟分析. 为方便而不失一般性, 以 +1 级衍射为例, 模拟所用参数如下: 激光阵列各子光束束宽  $w_0 = 100 \mu\text{m}$ , 相邻子光源的中心间距  $\Delta p = 500 \mu\text{m}$ , 透镜焦距  $f = 10 \text{ cm}$ , 中心光束相对光栅法线的入射角  $\alpha_0 = 50^\circ$ , 中心单元波长  $\lambda_0 = 808 \text{ nm}$ , 浮雕光栅线密度  $l = 1000 \text{ mm}^{-1}$ , 光栅占空比  $c = 0.55$ , 槽深  $h = 450 \text{ nm}$ , 本文的浮雕结构材料为  $\text{HfO}_2$ , 其折射率  $n = 1.9$ .

利用强度二阶矩的多点拟合法对合成光束束宽进行拟合, 可得到  $M^2$  因子:

$$D^2(z) = Az^2 + Bz + C, \quad (18)$$

$$M^2 = \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{AC - \frac{B^2}{4}}. \quad (19)$$

图 6 给出了经谱合成前后不同传输距离处光束的光强分布. 从图 6(a) 可以看出, 未经光束谱合成时, 光源阵列的近场光强呈锯齿状分布, 而在远场区域因衍射效应致使各子光束发生交替, 光斑尺寸迅速增大, 光强峰值急剧降低. 从图 6(b) 可以看出, 经过谱合成后, 起初呈锯齿状各子光束合为一个光斑, 合成光束的峰值光强较大, 随着传输距离的增加, 光斑尺寸虽然有所增加, 但是比谱合成前光斑尺寸的增加速度更为缓慢. 经过谱合成后, 合成光束在近场和远场均能保持较好的重叠.

图 7 进一步给出了谱合成前后光束直径平方  $D^2$  随传输距离  $z$  的变化. 从图 7 可以看出, 经谱合成后, 合成光束的光斑尺寸明显减小, 光束发散角也明显减小.

利用强度二阶矩计算得到谱合成前拟合曲线系数:  $A = 2.23 \times 10^{-5}$ ,  $B = -5.77 \times 10^{-20}$ ,  $C = 5.95 \times 10^{-7}$ , 求得谱合成前列阵光源输出光束的  $M^2 = 14.27$ ; 经谱合成后, 由拟合曲线求出系数  $A = 1.82 \times 10^{-6}$ ,  $B = -8.28 \times 10^{-8}$ ,  $C = 3.73 \times 10^{-8}$ , 计算出合成光束的  $M^2 = 1.00$ , 即保持与单个子光束的光束质量相当.



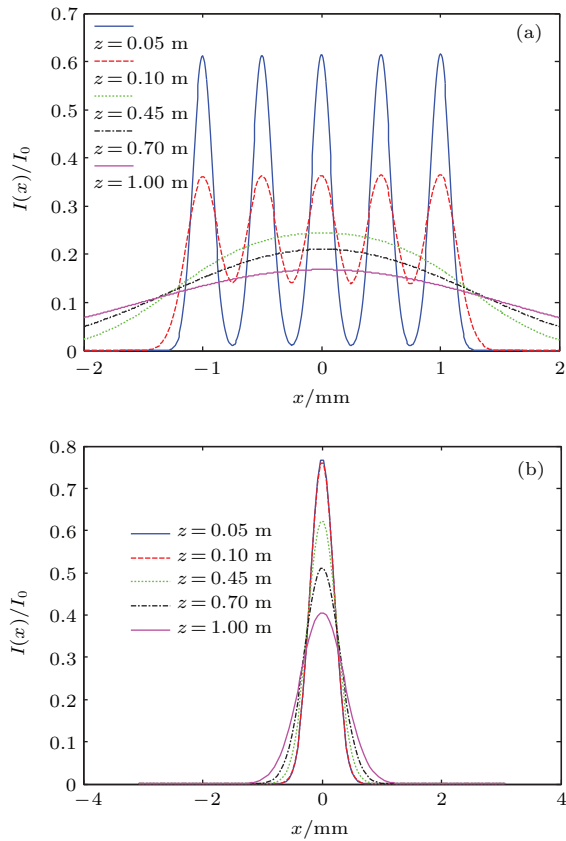


图6 (网刊彩色) 不同传输距离处的光束光强分布 (a) 未经谱合成; (b) 谱合成后  
 Fig. 6. (color online) Intensity distribution at different propagation distance: (a) Without combining system; (b) with combining system.

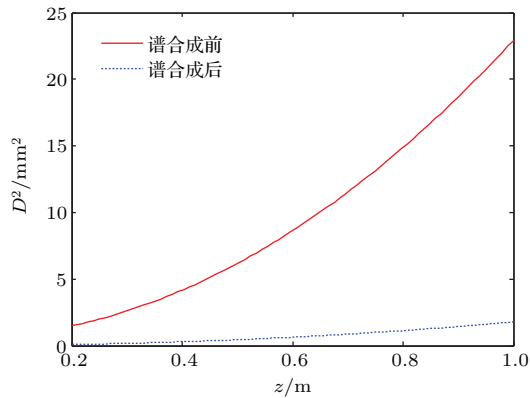


图7 (网刊彩色) 光束直径平方随传输距离的变化  
 Fig. 7. (color online) Variations of square of diameters with propagation distance.

#### 4.1 光栅参数及入射角对合成光束的影响

##### 4.1.1 槽深对合成光束的影响

图8给出了在衍射距离  $z = 1 \text{ m}$  时合成光束的光强分布和光强峰值(光强分布曲线的峰值)随光栅槽深的变化. 由图8(a)可以看出, 随着光栅

槽深的增加, 光强峰值和光能量先增大后减小. 结合图8(b)可见, 在本文前述参数下, 在衍射距离  $z = 1 \text{ m}$  处, 当光栅槽深  $h = 464 \text{ nm}$  时, 得到最大的光强峰值为  $I_{\text{max}} = 0.406$ . 对于槽深变化引起衍射光能量的变化, 这是由于当光栅占空比、线密度和波长都确定时, 各衍射级次的效率(各级衍射光能量与入射光能量的比值)会随槽深而变化<sup>[16]</sup>.

当槽深  $h$  分别为 300, 400, 500, 600 和 700 nm 时, 经谱合成后, 由强度二阶矩方法计算出合成光束的  $M^2 = 1.00$ . 这说明其他参数不变时, 改变槽深不会影响合成光束的光束质量, 而只会改变合成光束的光能量.

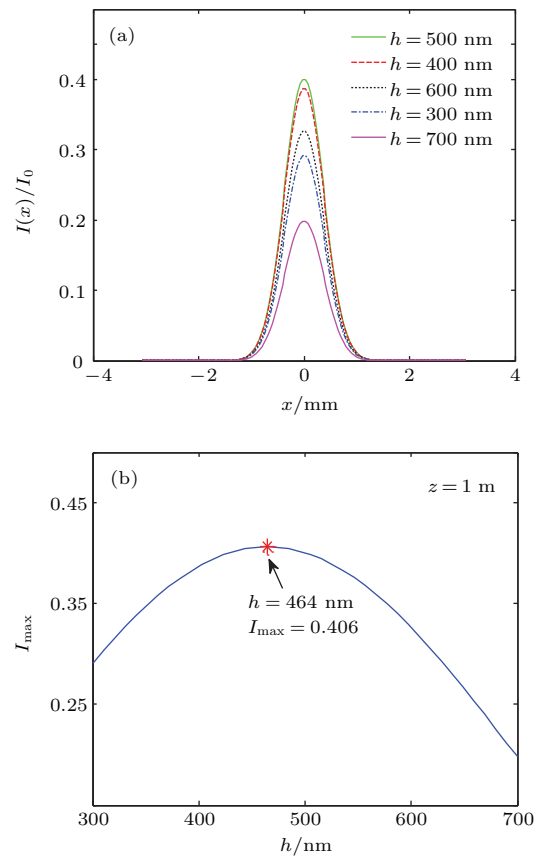


图8 (网刊彩色) 槽深对合成光束的影响 (a) 光强分布随槽深的变化; (b) 光强峰值随槽深的变化  
 Fig. 8. (color online) Effect of groove depth on combined beam: (a) Variation of intensity distribution with groove depth; (b) variation of intensity maximum with groove depth.

##### 4.1.2 占空比对合成光束的影响

图9给出了在衍射距离  $z = 1 \text{ m}$  时合成光束的光强分布和光强峰值随光栅占空比的变化. 由图9(a)可以看出, 随着占空比的增加, 光强峰值和光能量先增大后减小. 结合图9(b)发现, 在其他参

数确定时, 当占空比为0.5时, 获得最大光强峰值为0.414. +1级衍射光的光强峰值随着占空比的变化曲线对  $c = 0.5$  呈偶对称形. 当  $c < 0.5$  时, +1级衍射光的光强峰值和光能量随占空比的增加而增加; 当  $c > 0.5$  时, +1级衍射光的光强峰值和光能量随占空比的增加而减小. 可以这样认为, 当  $c = 0$  或1时, 光栅浮雕结构退化为平板, 光线全部透射形成零级斑, 在这两种极端情况下均没有高级衍射.

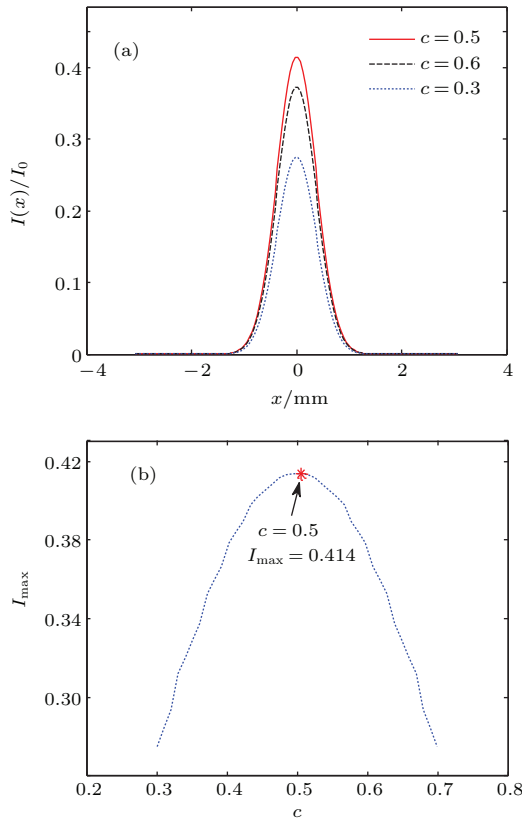


图9 (网刊彩色) 占空比对合成光束的影响 (a) 光强分布随占空比的变化; (b) 光强峰值随占空比的变化

Fig. 9. (color online) Effect of duty cycle on combined beam: (a) Variation of intensity distribution with duty cycle; (b) variation of intensity maximum with duty cycle.

当占空比  $c$  分别为0.3, 0.5和0.6时, 经谱合成后, 由强度二阶矩方法拟合曲线计算出合成光束的  $M^2 = 1.00$ . 这说明其他参数不变时, 改变占空比只会改变合成光束的光能量, 不会对光束质量造成明显影响.

#### 4.1.3 中心光束入射角对合成光束的影响

图10给出了在衍射距离  $z = 0.1$  m时合成光束的光强分布和光强峰值随中心光束入射角的变化. 由图10(a)可以看出, 随着中心光束入射角增

加, 光强峰值和光能量先增大后减小. 由Schnopper公式<sup>[16]</sup>可知, 衍射效率是由入射角、光栅线密度、槽深、占空比和浮雕介质折射率共同决定的. 结合图10(b)发现, 在本文前述参数下, 当中心光束入射角为  $49.83^\circ$  时, 获得最大的光强峰值0.77.

当中心光束入射角  $\alpha_0$  分别为  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$  和  $55^\circ$  时, 由强度二阶矩方法拟合曲线计算出合成光束的  $M^2 = 1.00$ . 这说明其他参数不变时, 改变中心光束的入射角不会改变合成光束的光束质量, 但会改变谱合成后合成光束的光能量.

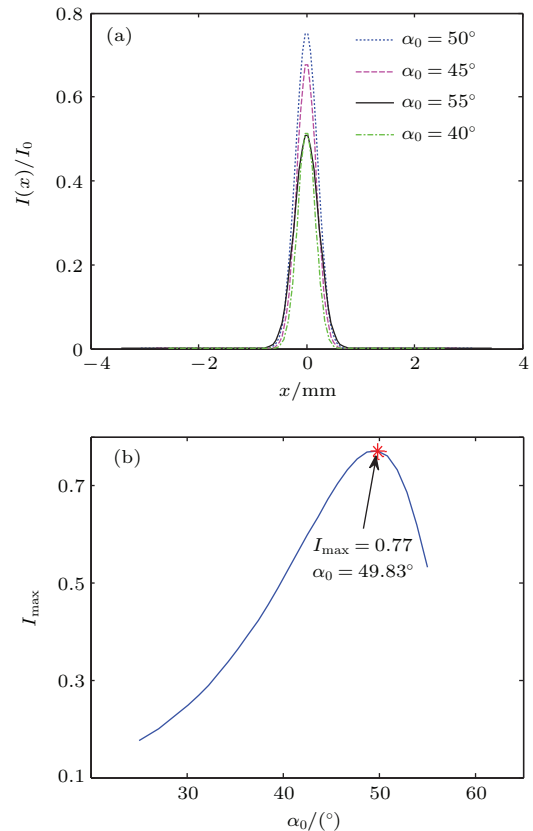


图10 (网刊彩色) 入射角对合成光束的影响 (a) 光强分布随入射角的变化; (b) 光强峰值随入射角的变化

Fig. 10. (color online) Effect of incidence angle on combined beam: (a) Variation of intensity distribution with incidence angle; (b) variation of intensity maximum with incidence angle.

## 4.2 光栅加工误差对合成光束的影响

考虑到光栅在制备过程中存在的加工误差, 图11给出了槽深误差对合成光束的影响. 图11(a)给出了光栅槽深的最大误差范围分别为  $\pm 30$ ,  $\pm 60$ ,  $\pm 80$  nm时, 在衍射距离  $z = 1$  m处的合成光束的光强分布. 由图可以看出, 随着槽深误差增加, 合成光束的光强峰值和所需级次的衍射光能量均有

所减小. 图 11(b) 给出了槽深误差对光束直径平方的影响, 可以看出, 随着槽深误差增大, 合成光束的光斑尺寸和发散角均有所增大. 由强度二阶矩方法计算光栅存在不同的槽深误差时合成光束的光束质量如表 1 所列. 结合图 11 和表 1 可见, 随着槽深误差增加, 不仅会导致合成光束的光能量减小, 还会致使合成光束的光束质量明显变差.

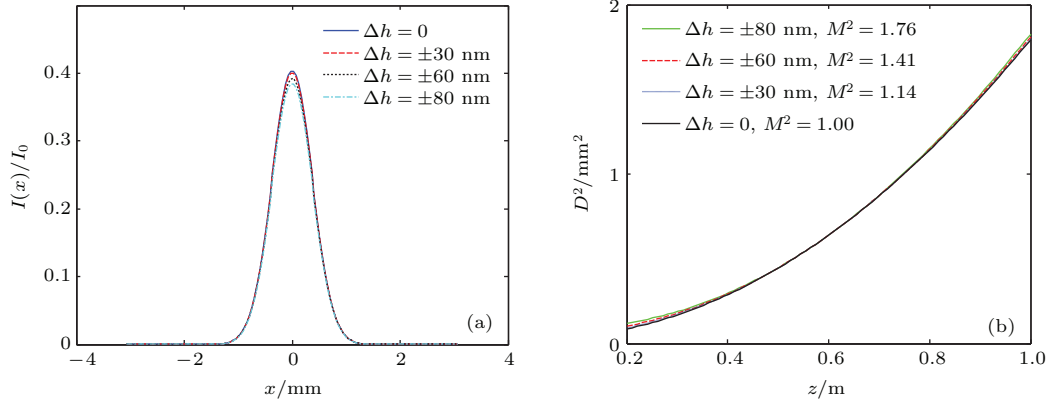


图 11 (网刊彩色) 槽深误差对合成光束的影响 (a) 光强分布随槽深误差的变化; (b) 光束直径平方随槽深误差的变化

Fig. 11. (color online) Effect of groove depth error on combined beam: (a) Variation of intensity distribution with groove depth error; (b) variation of square of diameters with groove depth error.

考虑到光栅在加工过程中可能产生的占空比误差, 图 12 给出了占空比误差对合成光束的影响. 图 12(a) 给出了占空比误差范围分别为  $\pm 0.04$ ,  $\pm 0.08$ ,  $\pm 0.12$  时在衍射距离  $z = 1$  m 处的光强分布. 随着占空比误差增加, 合成光束的光强峰值和光能量均有所减小. 图 12(b) 给出了占空比误差对光束直径平方的影响, 可以看出, 随着占空比误差的增大, 合成光束光斑尺寸和发散角均有所增大. 用

表 1 不同槽深误差时光束质量的比较

Table 1. Comparison of beam qualities for different groove depth error.

$h_0 = 450 \text{ nm}, c_0 = 0.55, \Delta c = 0$							
$\Delta h/\text{nm}$	0	$\pm 10$	$\pm 30$	$\pm 60$	$\pm 70$	$\pm 80$	$\pm 100$
$M^2$	1.00	1.02	1.14	1.41	1.45	1.76	1.97

强度二阶矩方法计算合成光束的光束质量, 表 2 即为光栅存在不同的占空比误差时合成光束的光束质量的计算结果. 结合图 12 和表 2 可见, 随着占空比误差的增大, 既会导致合成光束的光能量降低, 又会导致合成光束的光束质量变差. 进一步比较表 1 和表 2 可知, 多层介质膜光栅占空比误差对合成光束的光束质量的影响较槽深误差的影响更为明显.

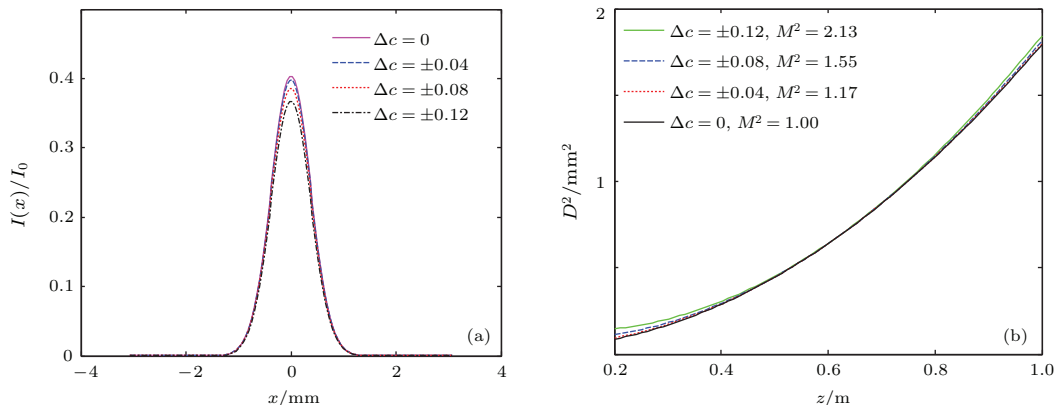


图 12 (网刊彩色) 占空比误差对合成光束的影响 (a) 光强分布随占空比误差的变化; (b) 光束直径平方随占空比误差的变化

Fig. 12. (color online) Effect of duty cycle error on combined beam: (a) Variation of intensity distribution with duty cycle error; (b) variation of square of diameters with duty cycle error.

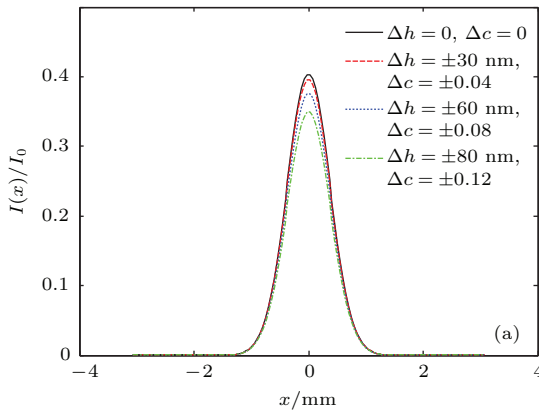


表2 不同占空比误差时光束质量比较

Table 2. Comparison of beam qualities for different duty cycle error.

$h_0 = 450 \text{ nm}, c_0 = 0.55, \Delta h = 0$							
$\Delta c$	0	$\pm 0.02$	$\pm 0.04$	$\pm 0.08$	$\pm 0.10$	$\pm 0.12$	$\pm 0.14$
$M^2$	1.00	1.05	1.17	1.55	1.92	2.13	2.65

图13给出了占空比误差和槽深误差共同对合成光束的影响. 图13(a)给出了槽深误差和占空比误差共同对光强分布的影响, 可以看出, 随着槽深误差和占空比误差的增加, 合成光束的光能量和光强峰值均明显减小; 由图13(b)可以看出, 随着槽深误差和占空比误差的增加, 合成光束的光斑尺寸



和发散角明显增大. 表3为利用强度二阶矩方法计算合成光束的光束质量的计算结果.

表3 不同槽深误差和不同占空比误差时光束质量比较

Table 3. Comparison of beam qualities for different groove depth error and different duty cycle error.

$h_0 = 450 \text{ nm}, c_0 = 0.55$							
$\Delta h/\text{nm}$	0	$\pm 10$	$\pm 30$	$\pm 60$	$\pm 70$	$\pm 80$	$\pm 100$
$\Delta c$	0	$\pm 0.02$	$\pm 0.04$	$\pm 0.08$	$\pm 0.10$	$\pm 0.12$	$\pm 0.14$
$M^2$	1.00	1.06	1.30	1.78	2.16	2.57	2.89

结合图13和表3可见, 随着光栅的槽深误差和占空比误差增大, 合成光束的光能量明显下降, 光束质量也明显变差.

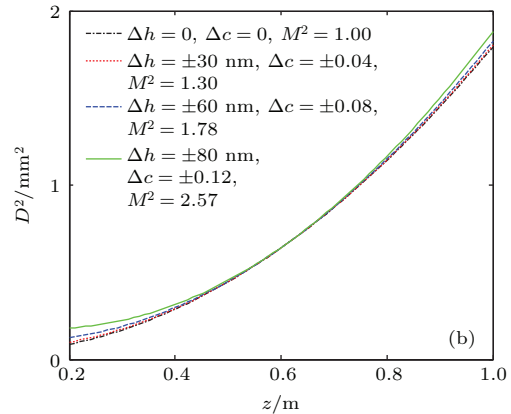


图13 (网刊彩色) 占空比误差和槽深误差共同对合成光束的影响 (a) 光强分布随占空比误差和槽深误差的变化; (b) 光束直径平方随占空比误差和槽深误差的变化

Fig. 13. (color online) combined effects of groove depth error and duty cycle error on combined beam: (a) Variation of intensity distribution with groove depth error and duty cycle error; (b) variation of square of diameters with groove depth error and duty cycle error.

## 5 结 论

本文依据光束谱合成原理, 将多层介质膜光栅引入的相位变化用浮雕表面上光程差和浮雕内部引入的光程差两部分表示, 将光束在浮雕光栅中的反射传输过程转换为透射传输过程加以处理, 建立了基于激光阵列光束倾斜入射到多层介质膜光栅时相位变化的谱合成系统光传输模型. 利用衍射积分方法推导出各子光束经过谱合成系统后的光强分布, 进而依据光束非相干叠加原理获得了合成光束的光强分布, 并讨论了多层介质膜光栅参数和制作误差对合成光束特性的影响. 研究表明: 经过谱合成系统后, 光束质量较谱合成之前有显著

提高; 中心光束入射角和光栅槽深、占空比对合成光束的光强分布存在明显影响; 光栅的槽深误差和占空比误差均会造成谱合成光束的光束质量变差和光能量降低, 因而必须使用加工质量较高的多层介质膜光栅, 以减少加工误差对合成光束特性的影响. 值得指出的是, 由于多层介质膜光栅比镀金光栅具有很高的抗损伤阈值, 本文建立的多层介质膜光栅模型可以推广应用于多种高功率激光系统.

## 参考文献

[1] Drachenberg D R, Andrusyak O, Venus G, Smirnov V, Glebov L B 2014 *Appl. Opt.* **53** 1242  
 [2] Lu C A, Newell T C, Glebov L, Balakrishnan G 2015 *Electron. Lett.* **51** 508

- [3] Bousselet P, Simonneau C, Bayart D, Salet P, Lucas-Leclin G, Roger G, Georges P, Auzanneau S, Michel N, Calligaro M, Parillaud O, Lecomte M, Krakowski M 2005 *Optical Fiber Communication Conference* Anaheim, California United States, 6 March, 2005 OThL2
- [4] Zhan S B, Zhao S H, Chu X C, Wu Z L, Shi L 2010 *Opt. Laser Technol.* **42** 308
- [5] Shen B J, Tan J C, Zheng G W, He Y L 2011 *High Power Laser and Particle Beams* **23** 593 (in Chinese) [沈本剑, 谭吉春, 郑光威, 何焰蓝 2011 强激光与粒子束 **23** 593]
- [6] Zhang Y, Zhang B, Zhu S J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 4590 (in Chinese) [张艳, 张彬, 祝颂军 2007 物理学报 **56** 4590]
- [7] Pan L L, Zhang B, Yin S Q, Zhang Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8289 (in Chinese) [潘雷雷, 张彬, 阴素琴, 张艳 2009 物理学报 **58** 8289]
- [8] Boyd R D, Britten J A, Decker D E, Shore B W, Stuart B C, Perry M D, Li L F 1995 *Appl. Opt.* **34** 1697
- [9] Kemme S A, Scrymgeour D A, Peters D W 2012 *SPIE, Laser Technology for Defense and Security* Baltimore, Maryland, April 23, 2012 p83810Q
- [10] Meng H C, Wu D Y, Tan H, Li J M, Yu J H, Gao S X 2015 *Chinese J. Lasers* **42** 0302003 (in Chinese) [孟慧成, 武德勇, 谭昊, 李建民, 余俊宏, 高松信 2015 中国激光 **42** 0302003]
- [11] Neauport J, Lavastre E, Razé G, Dupuy G, Bonod N, Balas M, Villele G, Flamand J, Kaladgew S, Desserouer F 2007 *Opt. Express* **15** 12508
- [12] Wang J P, Jin Y X, Shao J D, Fan Z X 2010 *Opt. Lett.* **35** 187
- [13] Guan H Y, Jin Y X, Liu S J, Kong F Y, Du Y, He K, Yi K, Shao J D 2014 *Appl. Phys. B* **114** 557
- [14] Daneu V, Sanchez A, Fan T Y, Choi H K, Turner G W, Cook C C 2000 *Opt. Lett.* **25** 405
- [15] Bochove E J 2001 *Proc. SPIE* **4270** 95
- [16] Schnopper H W, van Speybroeck L P, Delvaile J P, Epstein A, Källne E, Bachrach R Z, Dijkstra J, Lantward L 1977 *Appl. Opt.* **16** 1088

# Analysis of characteristics of combined beam in spectral beam combining system based on multilayer dielectric grating\*

Wu Zhen   Zhong Zhe-Qiang   Yang Lei   Zhang Bin<sup>†</sup>

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

( Received 11 September 2015; revised manuscript received 18 November 2015 )

## Abstract

Aiming at the application of multilayer dielectric gratings (MDGs) in spectral beam combining (SBC) systems, a theoretical model of rectangular MDGs is built up and a beam propagation model of SBC systems based on the rectangular MDGs is further developed. The phase modulation introduced by the rectangular MDG is composed of the optical path difference on the top surface of reliefs and that of the relief structure itself, and is affected by the MDG parameters such as the grating groove depth, the grating duty cycle, the incidence angle of the central beam, etc. By the diffraction integral method and the principle of incoherent superposition, the intensity distribution of the combined beam of the SBC system based on the rectangular MDGs is numerically calculated and analyzed. Additionally, the beam quality of the combined beam is also obtained by the intensity second-order moments method, and the effects of the MDG parameters such as the groove depth, the duty cycle, the incidence angle of the central beam, and the fabrication errors of the MDG on the characteristics of the combined beam of the SBC systems are simulated and discussed in detail. The simulation results show that the beam quality of the combined beam after passing through the SBC systems is significantly better than that of the laser array. Since the quality of the combined beam is almost the same as that of an individual laser beam, for a SBC system without fabrication error, changing the groove depth, the duty cycle of the rectangular MDG or the incidence angle of the central beam does not affect the beam quality while it has obvious influence on the energy of the combined beam. This is mainly because the diffraction efficiency of the rectangular MDG depends on both the parameters of the MDG and the incidence angle of the central beam. However, fabrication error of MDG is unavoidable, and the fabrication error has a significant effect on both the beam quality and the energy of the combined beam. Compared with the effect generated by the groove depth error on beam quality, the influence introduced by the duty cycle error is more obvious. It is worth mentioning that the theoretical model of the SBC system based on the rectangular MDG can be applied to some other high-power laser systems due to its advantages such as low absorption and high damage threshold.

**Keywords:** spectral beam combining, multilayer dielectric grating, laser array, beam quality

**PACS:** 42.62.Fi, 78.47.jj, 42.60.-v

**DOI:** 10.7498/aps.65.054205

---

\* Project supported by the Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, CAEP Research Program (Grant No. 2014HEL03).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zhangbinff@sohu.com](mailto:zhangbinff@sohu.com)