

文章编号: 0253-2239(2010)06-1554-06

反射型体相位光栅对连续激光光束空间低通滤波

郑光威^{1,2} 谭吉春³ 何焰蓝³ 郑浩斌³ 王晓东⁴ 王 逍⁴

(¹ 国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; ² 空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)
(³ 国防科学技术大学理学院, 湖南 长沙 410073; ⁴ 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 选取 4 块反射型体相位光栅, 两两配对分为两组, 各组中的光栅条纹面相互垂直, 光栅矢量面正交放置, 构成反射型体相位光栅空间低通滤波装置, 被用来实现连续激光光束二维空间低通滤波的功能。利用 Kogelnik 耦合波理论, 分析了上述装置对连续激光光束的空间低通滤波性能, 并模拟了其对于畸变高斯光束的空间低通滤波效果。结果表明, 采用这种装置可使得畸变高频角谱成分具有极低的衍射效率, 而对有用低频角谱成分具有高达 98% 以上的衍射效率, 能够达到不须对入射光束聚焦就能实现高、低频角谱成分空间分离的目的, 从而使得滤波后的光束较未畸变光束的空间光强分布基本一致。

关键词 衍射与光栅; 空间低通滤波; 耦合波理论; 反射型体相位光栅(RVPG); 离散傅里叶变换

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1554

Low-Pass Spatial Filtering for Continuous-Wave Laser Beam by Reflection Volume Phase Gratings

Zheng Guangwei^{1,2} Tan Jichun³ He Yanlan³ Zheng Haobin¹
Wang Xiaodong⁴ Wang Xiao⁴

¹ College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology,
Changsha, Hunan 410073, China

² Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

³ College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

⁴ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Four pieces of reflection volume phase gratings are selected, and then divided into two groups, in which the fringes are orthogonal to each other. The planes of grating's vector of each group are perpendicular to each other. As a result, a two-dimensional low-pass spatial filtering for continuous-wave (CW) laser beam is achieved. Based on Kogelnik's coupled-wave theory, the performances of that configuration of filtering for CW laser beam are analyzed, and the filtering characteristics of the configuration for deformed Gaussian laser beam are simulated. The results show that the components with high angular frequency of the input laser beam have lower diffraction efficiency, while those with low angular frequency have higher diffraction efficiency up to 98% in this configuration. The high angular frequency can be filtered out from the laser beams without focusing. The spatial intensity distribution of filtered laser beam is similar to that of undeformed one.

Key words diffraction and grating; low-pass spatial filtering; coupled-wave theory; reflection volume phase grating (RVPG); discrete Fourier transform

收稿日期: 2009-06-12; 收到修改稿日期: 2009-08-10

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金 NSAF(10676038)资助课题。

作者简介: 郑光威(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率激光空间低通滤波方面的研究。

E-mail: zgw198196@126.com

导师简介: 谭吉春(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息获取、传输与处理等方面的研究。

E-mail: nudt2004@126.com

1 引 言

体相位光栅具有较好的布拉格选择特性,因此在光束合成、半导体或光纤激光器输出光束优化等众多领域有着广泛应用^[1~8]。其优良的角度选择性以及极高的衍射效率,可以实现非聚焦型连续激光光束空间低通滤波的功能^[9~13]。同时随着体光栅记录材料的不断发展,出现了在可见直至近中红外波段吸收系数小、散射少和光损伤阈值高的材料并已产业化^[14],以此材料记录的体相位光栅可用于高功率激光光束的空间低通滤波。与现阶段所广泛使用的聚焦型针孔滤波装置相比较:体光栅型装置不需要对入射光束聚焦,利用其优良的角度选择性,就能直接使得畸变光束中高、低频角谱成分空间分离,达到了非聚焦型激光光束空间低通滤波的主要目的。该方法能够有效避免在高功率激光领域针孔周边材料易致损伤等不利因素,同时排除由于针孔附近光强过高,空气被击穿而产生的等离子体反射待滤波光束,以致激光系统受损的可能性^[15]。另一方面,由于体光栅型滤波装置大约只为入射光斑直径的量级,结构紧凑,而针孔滤波装置可达数米甚至十多米,体积过于庞大,因而此种装置非常适于航天或机载环境中激光光束的空间整形。国外早在 20 世纪 90 年代就已提出透射型体相位光栅用于光束空

间低通滤波^[9~11],并给出了一些定性的分析结果。国内也在同期提出了透射型体光栅的空间低通滤波原理^[12],并做了部分定量研究工作^[13]。然而,基于透射型的体相位光栅由于其衍射效率对入射光束的偏振态以及体光栅本身的厚度参量过于敏感,因此实际应用需要解决较多问题。反射型体相位光栅由于其到达一定厚度时,衍射效率不随光栅厚度的变化而变化^[16],且入射光束的偏振态与其衍射效率亦没有很强烈的依赖关系,因此将其作为实现连续激光光束空间低通滤波的主要技术手段。

本文提出了反射型体相位光栅对连续激光光束进行空间低通滤波的技术方案及其实现装置。该装置为:选择 4 块体相位光栅,两两配对分成两组,且各组的光栅矢量相互垂直,利用体光栅的布拉格衍射特性,使得各组分别完成对入射光束的在相互垂直的两个方向上实现一维低通滤波,以期实现整个反射型体相位光栅组对入射光束两维空间低通滤波的功能。

2 反射型体相位光栅空间低通滤波装置

反射型体相位光栅对连续激光光束空间低通滤波装置如图 1 所示。

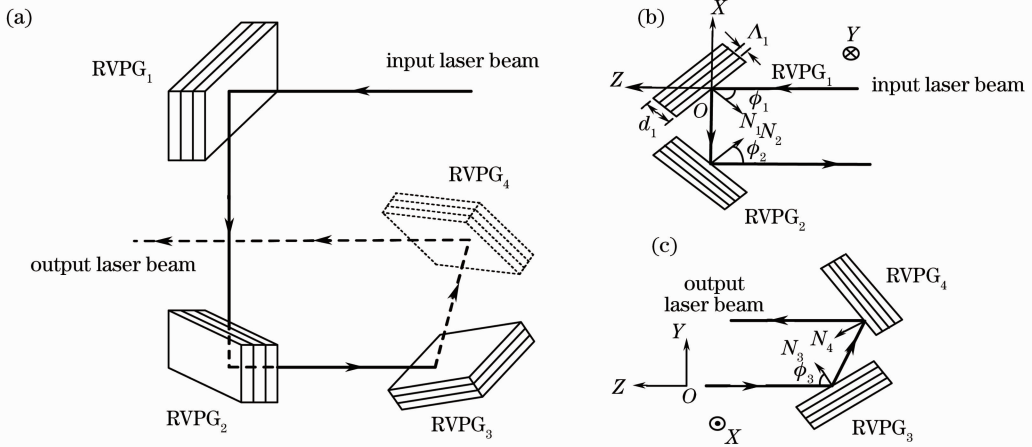


图 1 反射型体相位光栅对激光光束空间低通滤波装置

Fig. 1 Schematic of low-pass spatial filtering for CW laser beam by RVPGs

图 1 中 RVPG_{*i*} 下标 *i*=1,2,3,4 分别表示 4 块不同的非倾斜反射型体相位光栅(RVPG),即 4 块光栅的光栅条纹面均平行于各自的表面。建立如图 1(b),(c)所示的直角坐标系,其中 XOZ 在纸面内,且 Z 轴平行于入射光束的中心波矢 **k**₀(其大小 $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 表示入射光束在真空中的波长),Y 轴垂直于纸面且朝向纸面内。选取图 1(b)RVPG₁ 作为详细描述对象,给出光栅具体参

量的符号,其它三块光栅参量的符号除下标与其有区别之外,其它均一致,其中 d_1, Λ_1 分别为 RVPG₁ 的厚度以及光栅周期, ϕ_1 为 **k**₀ 与光栅前表面法向向量 **N**₁ 的夹角。为了使入射光束通过图 1(b)或图 1(c)时,衍射光束与入射光束相平行,通过简单的几何光学设计,选取了图 1(b),(c) 中的两组光栅前表面法向两两正交,即 **N**₁ ⊥ **N**₂,**N**₃ ⊥ **N**₄。综上,各光栅表面的单位法向向量

分别为 $[-\sin \phi_1, 0, -\cos \phi_1]$, $[\cos \phi_1, 0, -\sin \phi_1]$, $[0, \sin \phi_3, \cos \phi_3]$ 以及 $[0, -\cos \phi_3, \sin \phi_3]$, 且由于光栅矢量 \mathbf{K}_1 垂直于光栅条纹面, 因而 \mathbf{K}_1 平行于 \mathbf{N}_1 , 其方向矢量为 $2\pi/\Lambda_1[-\sin \phi_1, 0, -\cos \phi_1]$. 选择 RVPG₁ 的折射率表达式为

$$n_1 = n_{10} + n_{11} \cos(\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 n_{10} 为 RVPG₁ 的平均折射率, 而 n_{11} 为 RVPG₁ 的折射率调制度.

采用图 1 装置的主要特点是: 充分利用反射型体光栅的角度选择性, 以及高衍射效率, 实现入射激光光束中的低频角谱分量(有用成分)与高频角谱分量(畸变成分)的空间分离, 以期达到激光光束空间低通滤波的效果. 其中 RVPG₁ 和 RVPG₂, 以及 RVPG₃ 和 RVPG₄ 分别实现相互垂直方向上的一维空间低通滤波, 对应图 1, 即实现 X 方向与 Y 方向的激光光束空间低通滤波的效果. 实际上, 利用 2 片 RVPG 就能实现光束二维低通滤波, 然而只采用 2 片 RVPG 会造成滤波后的光束较入射光束有一较大角度的偏转, 不利于后续系统的使用, 而采用 4 片 RVPG 可以实现滤波后的光束和入射光束平行, 使得后续光学或其它应用系统只通过简单的平移调整就能使用滤波后的光束.

3 反射型体相位光栅空间低通滤波原理

对入射光束的复振幅在空域作二维离散傅里叶变换, 将光束展开为单色平面波的线型叠加, 光束的

复振幅大小及其傅里叶变换量的表达式如下^[17]:

$$E(x_{l_1}, y_{l_2}, z=0) = \sum_{m_1=-M_1/2}^{M_1/2-1} \sum_{m_2=-M_2/2}^{M_2/2-1} U(k_{x,m_1}, k_{y,m_2}) \times \exp[-i(k_{x,m_1} x_{l_1} + k_{y,m_2} y_{l_2})], \quad (2)$$

$$U(k_{x,m_1}, k_{y,m_2}) = \frac{1}{M_1 M_2} \sum_{l_1=-M_1/2}^{M_1/2-1} \sum_{l_2=-M_2/2}^{M_2/2-1} \times E(x_{l_1}, y_{l_2}, z=0) \exp[i(k_{x,m_1} x_{l_1} + k_{y,m_2} y_{l_2})], \quad (3)$$

式中 M_1, M_2 分别为 $x \in [-D_1, D_1]/2, y \in [-D_2, D_2]/2$ 内的等间隔取样点数; $x_{l_1} = l_1 D_1/M_1, y_{l_2} = l_2 D_2/M_2$ ($l_{1,2} = -M_{1,2}/2, \dots, 0, \dots, M_{1,2}/2 - 1$) 分别表示空域抽样点在 X 轴与 Y 轴的坐标; $k_{x,m_1} = m_1(2\pi/D_1), k_{y,m_2} = m_2(2\pi/D_2)$ ($m_{1,2} = -M_{1,2}/2, \dots, 0, \dots, M_{1,2}/2 - 1$) 分别为角谱为 (k_{x,m_1}, k_{y,m_2}) 的单色平面波在 X, Y 方向的角空间频率.

定义波矢 \mathbf{k}_{m_1, m_2} 在 XOZ 平面内的投影以及在 YOZ 平面内的投影与 Z 轴的夹角分别为 α_{1, m_1, m_2} 和 β_{1, m_1, m_2} , 表达式为 $\alpha_{1, m_1, m_2} = \arctan(k_{x, m_1} / k_{z, m_1, m_2})$, $\beta_{1, m_1, m_2} = \arctan(k_{y, m_1} / k_{z, m_1, m_2})$. 式中 $k_{z, m_1, m_2} = (n_1^2 k^2 - k_{x, m_1}^2 - k_{y, m_2}^2)^{1/2}$. 将 α_{1, m_1, m_2} 和 β_{1, m_1, m_2} 代入 $U(k_{x, m_1}, k_{y, m_2})$ 式即可得出 $U(\alpha_{1, m_1, m_2}, \beta_{1, m_1, m_2})$ 的表达式.

利用与 Kogelnik 一维耦合波理论相类似的方法可以得出光束通过 RVPG₁ 后的衍射光波复振幅的表达式如下^[18]:

$$S_1(\alpha'_{1, m_1, m_2}, \beta'_{1, m_1, m_2}) = U(\alpha_{1, m_1, m_2}, \beta_{1, m_1, m_2}) [\xi_{1, m_1, m_2} / \nu_{1, m_1, m_2} - i(1 - \xi_{1, m_1, m_2}^2 / \nu_{1, m_1, m_2}^2)^{1/2} \cdot \coth(\nu_{1, m_1, m_2}^2 - \xi_{1, m_1, m_2}^2)^{1/2}]^{-1}, \quad (4)$$

式中

$$\nu_{1, m_1, m_2} = \frac{i\pi n_{1,1} d_1 (\mathbf{e}_{11} \cdot \mathbf{e}_{10})}{\left\{ \lambda \left[\cos \alpha_{1, m_1, m_2} \left(\cos \alpha_{1, m_1, m_2} - \frac{K \lambda}{2\pi n_{1,0}} \right) \right]^{-1/2} \right\}}, \quad (5)$$

$$\xi_{1, m_1, m_2} = -4\pi d n_{1,0} \sin \alpha_{1,0,0} (\alpha_{1, m_1, m_2} - \alpha_{1,0,0}) / \lambda, \quad (6)$$

\mathbf{e}_{11} 和 \mathbf{e}_{10} 分别为 RVPG₁ 上入射光束和衍射光束的偏振方向, α'_{1, m_1, m_2} 和 β'_{1, m_1, m_2} 分别表示入射光束经 RVPG₁ 的衍射光束在 XOZ 平面内的投影以及在 YOZ 平面内的投影与 Z 轴的夹角.

采用与上述类似的方法, 可得出光束分别通过双光栅、三光栅以及四光栅时的衍射光波的复振幅 $S_p(\alpha'_{p, m_1, m_2}, \beta'_{p, m_1, m_2})$ ($p=2, 3$ or 4).

综上, 入射光束通过如图 1 所示光路后的光强分布为

$$I(x'_{l_1}, y'_{l_2}) = |E(x'_{l_1}, y'_{l_2})|^2 = \left| \sum_{m_1=-M_1/2}^{M_1/2-1} \sum_{m_2=-M_2/2}^{M_2/2-1} S_1(\alpha'_{4, m_1, m_2}, \beta'_{4, m_1, m_2}) \exp\{-i[m_1(2\pi/L_1)x'_{l_1} + m_2(2\pi/L_2)y'_{l_2}]\} \right|^2, \quad (7)$$

x'_{l_1} 和 y'_{l_2} 与 x_{l_1} 和 y_{l_2} 的数值分别相等, 不过它们所在的坐标系略有不同, 它是由 $XYZO$ 平移一定量所得的坐标系 $X'Y'Z'O'$ 下的坐标大小.

定义如图 1(a) 所示装置的总衍射效率为经 RVPG₄ 后的衍射光与入射光的功率比值, 可得出总衍射效率的表达式如下:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{\sum_{m_1=-M_1/2}^{M_1/2-1} \sum_{m_2=-M_2/2}^{M_2/2-1} |S_4(\alpha'_{4,m_1,m_2}, \beta'_{4,m_1,m_2})|^2}{\sum_{m_1=-M_1/2}^{M_1/2-1} \sum_{m_2=-M_2/2}^{M_2/2-1} |U(\alpha_{1,m_1,m_2}, \beta_{1,m_1,m_2})|^2}, \quad (8)$$

由图 1 所示的光路可得出 $\alpha'_{4,m_1,m_2} = \alpha_{1,m_1,m_2}$, $\beta'_{4,m_1,m_2} = \beta_{1,m_1,m_2}$ 。

4 模拟结果

为了更好地评价此装置对连续激光光束空间低通滤波的效果, 选取畸变高斯光束作为输入光束, 模拟其通过此装置后的光强分布, 并与未畸变高斯光束进行对比, 评价此装置的滤波效果。未畸变高斯光束的复振幅表达式如下:

$$\mathbf{E}(x, y, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{\omega^2(z)}\right] \times \exp[i(\omega t + \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r})] \cdot \mathbf{e}, \quad (9)$$

式中 $\omega_0, \omega(z) = \omega_0[1 + (z/f)^2]^{1/2}$ 分别表示此高斯光束束腰处的腰斑和距束腰为 z 处的腰斑半径, f 为共焦腔镜的焦距, \mathbf{e} 为偏振方向。

在整个模拟计算中, 做如下 4 点假设:

1) 中心波矢 \mathbf{k}_0 分别满足图 1 中 RVPG_{*i*} ($i=1, 2, 3, 4$) 的布拉格条件。(主要在布拉格条件下, 光束的衍射效率才能达到最高);

2) 反射型体光栅的横向尺寸足够大, 防止入射光束从其边缘出射;

3) 忽略体光栅前后表面的反射以及材料的吸收;

4) \mathbf{e} 平行于 Y 轴, 即在图 1(b) 中入射光束为 s 偏振, 而在图 1(c) 中为 p 偏振。具体模拟参量数值如表 1 所示。

表 1 参量数值

Table 1 Parameter used in the simulation

Parameters	Value
λ / nm	1053
$\omega_0 / \mu\text{m}$	400
M_1, M_2	100
$D_1, D_2 / \text{mm}$	4
f / m	0.5
$\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \Lambda_4 / \mu\text{m}$	0.40, 0.40, 0.37, 0.45
$d_1, d_2, d_3, d_4 / \text{mm}$	3.00, 3.00, 3.00, 3.00
$n_{10}, n_{20}, n_{30}, n_{40}$	1.48, 1.48, 1.48, 1.48
$n_{11}, n_{21}, n_{31}, n_{41} / 10^{-3}$	2.6, 10, 2.6, 15
$\phi_1, \phi_3 / (^{\circ})$	45, 66

对于光栅周期的选择, 必须分别考虑到 RVPG₁ 和 RVPG₂ 以及 RVPG₃ 和 RVPG₄ 的表面法向相互垂直以及假设 1) 这些因素, 它们之间的周期有相互依赖关系, 具体推导如下。

由斯涅耳定理可得

$$\sin \phi_1 = n_{10} \sin \phi'_1, \quad (10)$$

$$\sin \phi_2 = n_{20} \sin \phi'_2. \quad (11)$$

由布拉格条件可得

$$2n_{10}\Lambda_1 \cos \phi'_1 = \lambda, \quad (12)$$

$$2n_{20}\Lambda_2 \cos \phi'_2 = \lambda. \quad (13)$$

式中 ϕ'_1 和 ϕ'_2 分别为在 RVPG₁ 和 RVPG₂ 中的光束与各自表面法向的夹角。由 $\phi_1 + \phi_2 = \pi/2$ 以及上述 4 式可推导出

$$n_{10}^2 + n_{20}^2 - 1 = \left(\frac{\lambda}{2\Lambda_1}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\Lambda_2}\right)^2, \quad (14)$$

同理可得

$$n_{30}^2 + n_{40}^2 - 1 = \left(\frac{\lambda}{2\Lambda_3}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2\Lambda_4}\right)^2. \quad (15)$$

由(9)式所表示的归一化未畸变高斯光束在空域以及角谱域的强度分布分别如图 2(a), 2(b) 所示。

图 2(b) 中的横坐标 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 分别为偏离中心

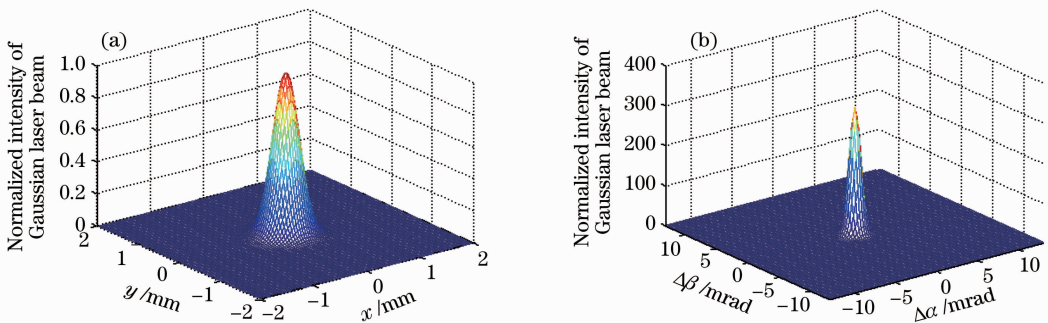


图 2 归一化高斯光束在(a)空域以及(b)角谱域的强度分布

Fig. 2 Normalized distribution of Gaussian laser beam intensity in (a) spatial domain, and (b) angular spectrum domain, respectively

波矢的角度偏移量(本文后面各图中 $\Delta\alpha$ 和 $\Delta\beta$ 的定义与图 2 类似),其表达式为

$$\Delta\alpha = \alpha_{1,m_1,m_2} - \alpha_{1,0,0}, \quad (16)$$

$$\Delta\beta = \beta_{1,m_1,m_2} - \beta_{1,0,0}. \quad (17)$$

从图 2(b)可看出:对于此种高斯光束,其能量

大部分均集中于中心角谱附近。为了观察此反射型体相位光栅装置空间低通滤波的效果,先假定此高斯光束在入射至此装置前已发生了波形畸变,在角谱域中混杂了一偏离中心波矢 $(\phi_1, 0)$ 的角谱成分 (ϕ_d, ϕ_d) ,其复振幅 $U(\phi_d, \phi_d)$ 的表达式为

$$U(\phi_d, \phi_d) = \begin{cases} U(\phi_1, 0)/20, & 7.4 \leq |\phi_d - \phi_1| \leq 10.3, \text{ and } |\phi_d| \leq 0.26; \text{ or } |\phi_d - \phi_1| \leq 0.26, \text{ and } 7.4 \leq |\phi_d| \leq 10.3 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (18)$$

式中的角度单位均为 mrad。

畸变高斯光束在空域以及角谱域中的分布分别如图 3(a),3(b)所示。

从图 3(a)可看出:光束在空域中发生了较大的畸变,光强分布不再具有理想高斯分布的特性,在某

些区域光强出现了高低起伏的情况。为了获得高质量的光束,可采用滤除角谱域中数值较大成分的方法。选择表 1 所示参量,经计算:当此畸变光束通过此体光栅装置后,其光束在空域以及角谱域中的分布分别如图 4(a),4(b)所示。

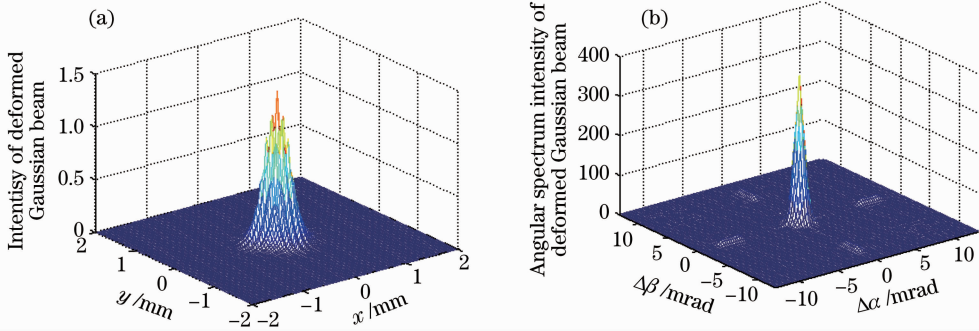


图 3 畸变高斯光束在(a)空域以及(b)角谱域中的强度分布

Fig. 3 Distribution of deformed Gaussian laser beam intensity in (a) spatial, and (b) angular spectrum domain, respectively

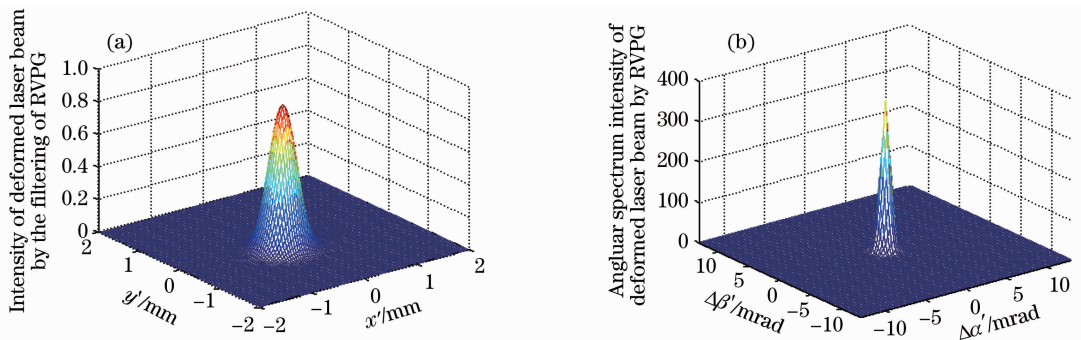


图 4 畸变高斯光束通过此装置后在(a)空域以及(b)角谱域中的分布

Fig. 4 Distribution of deformed laser intensity after propagating through the RVPG in (a) spatial domain, and (b) angular spectrum domain, respectively

对比图 4(b)与图 2(b)可看出,两者在角谱域中的强度分布基本一致。当畸变光束通过此装置时,高频角谱成分被有效滤除,而低频角谱成分具有较高的衍射效率,大部分均衍射至出射光束中。对比

图 4(a)与图 2(a)可看出,出射光束与入射光束在空域的光强分布基本一致,由(8)式以及表 1 所选的参量可计算出经滤波后的光束与未畸变光束的功率比值为 98%,基本达到了使滤除高频畸变角谱以及保

存信号角谱成分的主要目的,实现了畸变入射光束空间低通滤波的效果。

如图1所示的装置中RVPG₁和RVPG₃分别实现窄角谱高衍射效率的功能,即使得畸变光束中的高频角谱成分具有极低的衍射效率,而有用低频角谱成分具有极高的衍射效率;而RVPG₂和RVPG₄的折射率调制度分别比RVPG₁和RVPG₃高一个量级(如表1所示,如此选择参量的主要原因可参见文献[16]),这样可以弱化RVPG₂和RVPG₄的角谱选择性,使得光束发生高衍射效率的偏转,实现滤波后的光束与入射光束平行的目的。因此RVPG₁与RVPG₂,以及RVPG₃与RVPG₄分别组成在相互垂直方向上的一维空间低通滤波且滤波后的光束与各自入射光束相平行,最终达到非聚焦型激光光束的二维空间低通滤波目的,并且由于所组成的装置能够有效避免高功率下激光针孔滤波易致针孔周边材料热致损伤,同时兼具滤波后光束与入射光束相平行的优势,因此非常适合于强激光的空间低通滤波应用。

5 结 论

提出利用反射型体相位光栅来实现连续激光光束空间低通滤波的方案,并给出了具体实现的装置。该装置为选择4块反射型体相位光栅,通过两两配对组合,且两组光栅的光栅矢量面相互垂直,分别实现对入射光束在相互正交方向上的一维空间低通滤波,来完成整个装置对入射光束空间低通滤波的功能。这种装置既有效利用了反射型体相位光栅所具备的良好的角度选择性以及非常高的布拉格衍射效率,来完成光束空间低通滤波的功能,还实现滤波后的光束与入射光束在同一方向,使其有可能集成为单元模块,便于实际的应用。同时由于其不需要对入射光束进行聚焦,就实现了入射畸变光栅中的低频角谱与高频角谱的空间分离,避免了针孔滤波方法可能由于入射光束光强过高而导致针孔被烧坏的劣势,使得该方案可应用于高功率激光领域。由于针孔滤波所占的体积较大,不适合与机载或星载激光器光束质量的优化。该滤波装置,其占用体积与待滤波光束直径的量级相当,有效解决了机载或星载激光系统光束的优化和使用。

参 考 文 献

1 G. B. Venus, Armen Sevia. Stable coherent coupling of laser diodes by a volume Bragg grating in photothermorefractive glass [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1453~1455

2 A. Sevia, O. Andrusyas, I. Ciapurin *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 384~386

3 Chu Xingchun, Zhao Shanghong, Zhan Shengbao *et al.*. Spectral beam combination of fiber lasers based on cascaded volume gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(8): 1538~1542

楚兴春, 赵尚弘, 占生宝等. 基于级联体光栅的光纤激光阵列谱组束[J]. *光学学报*, 2008, **28**(8): 1538~1542

4 A. Gourevitch, G. Venus, V. Smirnov *et al.*. Efficient pumping of Rb vapor by high-power volume Bragg diode laser [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(17): 2611~2613

5 Xin Guofeng, Cheng Can, Qu Ronghui *et al.*. Study of spectral characteristics of external-cavity semiconductor laser a volume Bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1821~1826

辛国锋, 程 灿, 翟荣辉等. 体布拉格光栅外腔半导体激光器光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1821~1826

6 Cheng Can, Xin Guofeng, Feng Huizhong *et al.*. Temperature characteristics of volume Bragg grating external cavity semiconductor laser working at continuous wave [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 27~30

程 灿, 辛国锋, 封惠忠等. 连续工作的体布拉格光栅外腔半导体激光器的温度特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 27~30

7 Bo Baoxue, Gao Xin, Qiao Zhongliang *et al.*. Characteristics of high power volume-Bragg-grating external cavity semiconductor lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 501~504

薄报学, 高 欣, 乔忠良等. 大功率体光栅外腔半导体激光器的输出特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4): 501~504

8 Pär Jelger, Fredrik Laurell. Efficient narrow-linewidth volume-Bragg grating-locked Nd: fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(18): 11336~11340

9 Y. L. Korzinin, I. V. Semenova, N. O. Reinhand *et al.*. Holographic nonspatial filter for laser beams: 2D selection [C]. *SPIE*, 1996, **2778**: 25~26

10 J. E. Ludman, J. R. Riccobono, N. O. Reinhand *et al.*. Very thick holographic nonspatial filtering of laser beams [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1700~1705

11 Michele Henrioc, Jacques Ludman, Gennadi Sobolev *et al.*. Two-dimensional holographic nonspatial filtering for laser beams [C]. *SPIE*, 1998, **3417**: 195~206

12 Zhang Guangyong, Zhang Heling. Holographic filter with spatial filtering action [J]. *J. Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 1997, **18**(3): 41~44

张光勇, 章鹤龄. 具有空间滤波性能的全息滤波器[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 1997, **18**(3): 41~44

13 Zheng Guangwei, He Yanlan, Huang Shuihua *et al.*. Low-pass spatial filtering for continuous-wave laser beam by transmission volume phase gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 863~868

郑光威, 何焰蓝, 黄水花等. 透射型体相位光栅对连续激光光束空间低通滤波 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 863~868

14 G. B. Venus, A. Sevia, V. I. Smirnov *et al.*. High-brightness narrow-line laser diode source with volume Bragg-grating feedback [C]. *SPIE*, 2005, **5711**: 166~176

15 J. E. Murry, D. Milam, C. D. Boley *et al.*. Spatial filter pinhole development for the national ignition facility [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(9): 1405~1420

16 Zheng Guangwei, Tan Jichun, He Yanlan *et al.*. Diffraction characteristics of ultra-short pulsed Gaussian laser beam by reflection volume grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(12): 3260~3266

郑光威, 谭吉春, 何焰蓝等. 反射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性分析 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(12): 3260~3266

17 S. D. Wu, T. K. Gaylord, E. N. Glytsis *et al.*. Three-dimensional converging-diverging Gaussian beam diffraction by a volume grating [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(7): 1293~1303

18 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Technol. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947