

# 透射型体相位光栅对连续激光束的空间低通滤波

郑光威<sup>1</sup> 何焰蓝<sup>2</sup> 黄水花<sup>2</sup> 谭吉春<sup>2</sup> 王 逍<sup>3</sup> 王晓东<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; <sup>2</sup>国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073; )  
<sup>3</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

**摘要** 利用 Kogelnik 一维耦合波理论, 以及离散傅里叶变换, 分析光栅矢量相互正交, 且串联级联放置的两透射型体相位光栅对空域任意分布的连续激光束的衍射特性; 讨论其对入射光束的空间低通滤波性能, 并具体模拟其对畸变高斯光束空间低通滤波的效果。结果表明, 利用体光栅优良的角度选择特性, 无须对畸变光束进行聚焦, 即可实现入射光束角谱域中的高频成分与低频成分的空间分离, 滤除畸变高斯光束中高频角谱成分, 使得衍射光束与未畸变光束在空域中的光强分布非常接近, 达到滤除畸变光束中杂散成分且保留有用成分的主要目的。这种方法有效地避免了聚焦型空间低通滤波, 如针孔滤波在针孔附近光强过高, 易致针孔周边材料损坏等不利因素, 有助于应用至高功率激光光束质量的优化。

**关键词** 衍射与光栅; 低通空间滤波; 耦合波理论; 透射型体相位光栅; 离散傅里叶变换

**中图分类号** O438.1      **文献标识码** A      **doi:** 10.3788/AOS20092904.0863

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

Zheng Guangwei<sup>1</sup> He Yanlan<sup>2</sup> Huang Shuihua<sup>2</sup>  
Tan Jichun<sup>2</sup> Wang Xiao<sup>3</sup> Wang Xiaodong<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> College of Science, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

<sup>3</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** Based on Kogelnik's one-dimensional coupled-wave theory and dispersed Fourier transform, the diffractive characteristic of two pieces of volume phase gratings, which are cascaded and having orthogonal grating vectors for the continuous-wave (CW) laser beam, is analyzed. The cascaded gratings' low-pass spatial filtering for CW laser beam is performed. And the performance of its filtering for deformed Gaussian laser beam is simulated. The results show that with the fine angular selectivity of volume grating, the component of the larger quantity in angular spectrum domain can be deleted directly without focusing the laser beam. The distribution of intensity of diffractive laser beam is similar to that of the undeformed one in spatial domain. So the low-pass spatial filtering for CW laser beam is realized. This novel method can eliminate the drawbacks of pin-hole filter, which focuses the laser beam, enhances its intensity in the focal plane, and probably damages the stuff vicinal to the pin hole. So it may take the role of the pin-hole filter, especially in the high-power laser field.

**Key words** diffraction and grating; low-pass spatial filtering; coupled-wave theory; transmission volume phase grating; dispersed Fourier transform

**收稿日期:** 2008-06-05; **收到修改稿日期:** 2008-09-26

**基金项目:** 国家自然科学基金(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研究。E-mail: zgw198196@126.com

**导师简介:** 谭吉春(1947—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为光信息获取、传输与处理。

# 1 引 言

体光栅具有较好的角度、波长选择特性,以及较高的衍射效率<sup>[1]</sup>,因此在光束合成<sup>[2, 3]</sup>、啁啾脉冲光放大<sup>[4]</sup>、半导体激光器输出光束质量的优化<sup>[5, 6]</sup>以及光谱滤波<sup>[7, 8]</sup>等众多领域得到广泛应用。在空间低通滤波领域由于其不需要将入射光束聚焦,就能直接选择出所需要的空间角谱成分,成功克服现阶段所广泛使用的针孔滤波方式在焦平面处光强过高,易击穿针孔周边材料等不利因素,因而受到各方青睐。国外早在上世纪 90 年代就提出利用体相位光栅来进行非聚焦式光束空间低通滤波的构想,并做了部分理论研究工作<sup>[9~11]</sup>;国内也做出部分定性分析研究<sup>[12]</sup>。但这些工作均未考虑待滤波光束的空域分布。因此,本文重点研究透射型体相位光栅对空域任意分布的连续激光光束的空间低通滤波特性,利用二维离散傅里叶变换将畸变激光光束展开为平面波的叠加,并利用 Kogelnik 一维耦合波理论<sup>[13]</sup>,分析体光栅对各展开平面波的衍射特性,再利用离散傅里叶反变换得出衍射光束的空间分布,通过比较衍射光与未畸变光束在空域中光强分布的相似程度来衡量体光栅对连续激光光束空间低通滤波的效果。

# 2 连续激光光束离散傅里叶展开

连续激光光束入射至两串联级联透射型体相位光栅如图 1 所示。

图 1 只是当光束中心波矢  $\mathbf{k}_0$  分别满足两透射型体相位光栅(VPG<sub>1</sub> 和 VPG<sub>2</sub>)的布拉格条件时(只有在布拉格条件下,光束的衍射效率才能达到最高),中心波矢成分通过串联级联型体相位光栅的光路图。 $t_1$  和  $t_2$  分别表示两光栅厚度, $\Lambda_1$  和  $\Lambda_2$  分别表示两光栅的周期。坐标系  $X'Y'Z'O'$  是由以  $Y$  轴为轴顺时针旋转  $\varphi_1$  所得到。其中入射光束的中心波矢方向为  $(-\sin \varphi_1, 0, \cos \varphi_1)$ ,VPG<sub>1</sub> 的光栅矢量  $\mathbf{K}_1$  平行于  $X$  轴, $\varphi_2$  表示 VPG<sub>2</sub> 的等折射率条纹面与  $Z$  轴的夹角,如图 1(b)所示。

因此 VPG<sub>2</sub> 的光栅矢量  $\mathbf{K}_2$  的单位方向矢量为  $(0, -\cos \varphi_2, -\sin \varphi_2)$ 。 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$  分别在 VPG<sub>1</sub> 以及 VPG<sub>2</sub> 的入射面内,且  $\mathbf{K}_1$  与  $\mathbf{K}_2$  相互正交。

由离散傅里叶变换,可得,此光束在  $z'=0$  处,复振幅  $E(x', y', z')$  的均匀取样值  $E(x'_n, y'_n, 0)$  及其傅里叶分量  $U(k'_{x,m_x}, k'_{y,m_y})$  的变换关系如下:

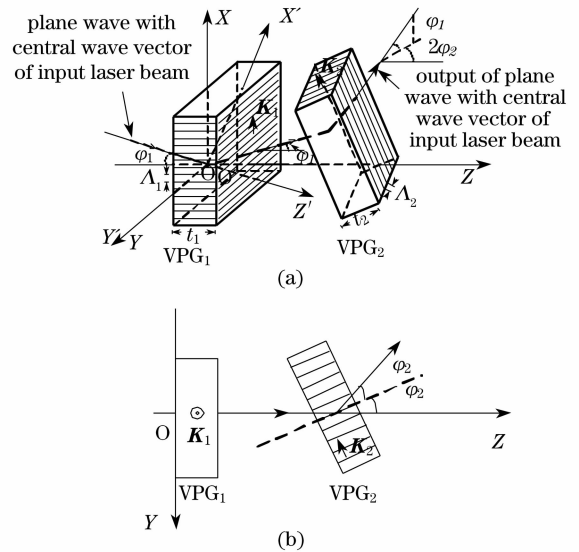


图 1 连续激光光束入射至串联级联透射型体相位光栅示意图(a)俯视图(b)

Fig. 1 Schematic of CW laser beam propagating into two pieces of cascaded volume phase gratings (VPG) (a) and VPGs from the top view (b)

$$E(x'_n, y'_n, 0) = \sum_{m_x=-M_x/2}^{M_x/2} \sum_{m_y=-M_y/2}^{M_y/2} U(k'_{x,m_x}, k'_{y,m_y}) \cdot \exp[-i(k'_{x,m_x}x'_n + k'_{y,m_y}y'_n)] \quad (1)$$

$$U(k'_{x,m_x}, k'_{y,m_y}) = \frac{1}{M_x M_y} \cdot \sum_{n_x=-M_x/2}^{M_x/2} \sum_{n_y=-M_y/2}^{M_y/2} E(x'_n, y'_n, 0) \cdot \exp[i(k'_{x,m_x}x'_n + k'_{y,m_y}y'_n)], \quad (2)$$

其中  $L_x, L_y$  表示取样范围,  $M_x, M_y$  表示取样点数,  $x'_n = n_x L_x / M_x, y'_n = n_y L_y / M_y, k'_{x,m_x} = m_x (2\pi / L_x), k'_{y,m_y} = m_y (2\pi / L_y)$

由坐标系  $XYZO$  与坐标系  $X'Y'Z'O'$  的对应关系,可得

$$\begin{bmatrix} k'_{x,m_x} \\ k'_{y,m_y} \\ k'_{z,m_x,m_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_1 & 0 & \sin \varphi_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_1 & 0 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{x,m_x} \\ k_{y,m_y} \\ k_{z,m_x,m_y} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $k_{x,m_x}, k_{y,m_y}, k_{z,m_x,m_y}$  分别表示波矢  $\mathbf{k}_{m_x,m_y}$  在  $XYZO$  坐标系中的  $X$  轴、 $Y$  轴以及  $Z$  轴投影的大小,将(3)式代入(2)式,即可得出  $U(k_{x,m_x}, k_{y,m_y})$  的表达式。

因此,此光束在空间任意位置的复振幅分布可表示为

$$E(x, y, z) = \sum_{m_x=-M_x/2}^{M_x/2} \sum_{m_y=-M_y/2}^{M_y/2} U(k_{x,m_x}, k_{y,m_y}) \times$$

$$\exp[-i(k_{x,m_x}x + k_{y,m_y}y + k_{z,m_x,m_y}z)], \quad (4)$$

其中  $k_{z,m_x,m_y} = (n^2k^2 - k_{x,m_x}^2 - k_{y,m_y}^2)^{1/2}$ ,  $k$  表示此光束的波数, 其值为  $2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  表示光束的波长;  $n$  表示所处空间位置的材料的折射率。

定义波矢  $k_{m_x}, k_{m_y}$  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  $\alpha_{m_x,m_y}$  和  $\beta_{m_x,m_y}$ , 其表达式为:  $\alpha_{m_x,m_y} = \arctan(k_{x,m_x}/k_{z,m_x,m_y}), \beta_{m_x,m_y} = \arctan(k_{y,m_y}/k_{z,m_x,m_y})$ 。将  $\alpha_{m_x,m_y}$  和  $\beta_{m_x,m_y}$  代入  $U(k_{x,m_x}, k_{y,m_y})$  式即可得出  $U(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})$  的表达式。

### 3 透射型体光栅对输入光束的空间滤波特性

由于体光栅具有良好的角度选择性, 因此利用畸变光束中信号光成分和杂散光成分具有不同角谱的特点(信号光偏离中心波矢角度较小, 而杂散光偏离中心波矢角度较大), 使得中心波矢满足体光栅布拉格条件, 以实现信号光与杂散光在空间中的分离。因此如何选择体光栅的参量, 来控制体光栅的衍射角谱带宽以及高衍射效率, 是体光栅能否实现光束空间滤波的关键。

对于图 1 中  $VPG_1$  对入射光束的衍射特性, 可由 Kogelnik 一维耦合波理论得到。对于这种折射率正弦型弱调制 ( $n_1 = n_{10} + n_{11} \cos(\mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{r})$ ,  $n_{11} \ll n_{10}$ ) 的透射型体相位光栅, 角谱为  $(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})$  的归一化平面波的衍射光波的复振幅以及衍射效率的表达式分别如下<sup>[13]</sup>:

$$S_1(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}) = -i(C_{R1}/C_{S1})^{1/2} \cdot \exp(-i\xi_1) \sin(v_1^2 + \xi_1^2)^{1/2} / (1 + \xi_1^2/v_1^2)^{1/2}, \quad (5)$$

$$\eta_1(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}, t_1) = \sin^2(v_1^2 + \xi_1^2)^{1/2} / (1 + \xi_1^2/v_1^2) \quad (6)$$

其中  $v_1 = \kappa_1 t_1 / (C_{R1} C_{S1})^{1/2}$ ,  $\xi_1 = (t_1/2) K_1 \sin(\alpha_{m_x,m_y} - \phi_1) - K_1^2/2\gamma_1 / C_{S1}$ ,  $C_{S1} = \cos \alpha_{m_x,m_y} + K_1 \sin \phi_1 / \gamma_1$ ,  $C_{R1} = \cos \alpha_{m_x,m_y}$ ,  $\gamma_1 = \omega[\mu\epsilon_0(\epsilon_{r0})_1]^{1/2}$ ,  $\kappa_1 = (\epsilon_{r1})_1 \gamma_1 (\mathbf{e}_{11} \cdot \mathbf{e}_{10}) / [4(\epsilon_{r0})_1]$ , 其中  $\epsilon_0, (\epsilon_{r0})_1$  和  $(\epsilon_{r1})_1$  分别表示自由空间中的介电常数、 $VPG_1$  中的相对平均介电常数以及介电常数调制度,  $\mathbf{e}_{11}, \mathbf{e}_{10}$  分别表示在  $VPG_1$  中的入射光与衍射光的偏振方向;  $VPG_1$  中的平均折射率  $n_{10} = \sqrt{(\epsilon_{r0})_1}$ , 折射率调制度  $n_{11} = (\epsilon_{r1})_1 / [2\sqrt{(\epsilon_{r0})_1}]$ ;  $\omega$  表示入射光的角频率;  $K_1$  表示光栅矢量  $\mathbf{K}_1$  的模, 其值为  $2\pi/\Lambda_1$ ;  $\phi_1$  表示  $VPG_1$  中的光栅平面在  $XOZ$  中的投影与  $Z$  轴的夹角;  $t_1$  表示  $VPG_1$  的厚度。

当光栅无倾斜, 即  $\phi_1 = 0^\circ$  时,  $v_1 = \pi n_{11} t_1 (\mathbf{e}_{11} \cdot \mathbf{e}_{10}) / (\lambda \cos \alpha_{m_x,m_y})$

考虑角度失配对衍射效率的影响, 对  $\xi_1$  在  $\varphi_1$  处做一阶泰勒级数展开, 可得

$$\xi_1 = \frac{t_1}{2} \left( \frac{K_1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{K_1^2}{4\pi n_{10}} \frac{\lambda \sin \varphi_1}{\cos^2 \varphi_1} \right) \cdot (\alpha_{m_x,m_y} - \varphi_1). \quad (7)$$

显然, 连续光束中心波矢成分集中了入射光束的大部分能量, 因此当中心波矢成分的衍射效率  $\eta_1(\varphi_1, 0, t_1) = 1$  时, 体光栅对此光束的衍射效率最高。此时,

$$\xi_1 = 0,$$

$$t_1 = (m_1 + 1)\lambda \cos \varphi_1 / [2n_{11} (\mathbf{e}_{11} \cdot \mathbf{e}_{10})].$$

$$(m_1 = 0, 1, 2, 3 \dots) \quad (8)$$

同理可求得图 1 中  $VPG_2$  对角谱为  $(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})$  的归一化平面波的衍射光波的复振幅  $S_2(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})$  以及衍射效率  $\eta_2(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}, t_2)$  表达式, 及其衍射效率最高时的条件, 此时:

$$t_2 = (m_2 + 1)\lambda \cos \varphi_2 / [2n_{21} (\mathbf{e}_{21} \cdot \mathbf{e}_{20})], \quad (9)$$

(9) 式中各参量的定义与  $VPG_1$  中同类参量相对应。

因此对于角谱为  $(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})$  的平面波分量的衍射效率的表达式为

$$\eta(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}) = \eta_1(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}, t_1) \times \eta_2(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}, t_2). \quad (10)$$

对于角谱为  $(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})$  的平面波的衍射光在角谱域中的复振幅以及光强分别表示为

$$U'(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}) = U(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}) \cdot$$

$$S_1(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}) \cdot S_2(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}). \quad (11)$$

$$|U'(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})|^2 = |U(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y})|^2 \cdot$$

$$\eta(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}). \quad (12)$$

衍射光在空域中的光强表达式如下:

$$|E(x_n, y_n)|^2 = \left| \sum_{m_x=-M_x/2}^{M_x/2} \sum_{m_y=-M_y/2}^{M_y/2} U'(\alpha_{m_x,m_y}, \beta_{m_x,m_y}) \cdot \exp\{-i[m_x(2\pi/L_x)x_n + m_y(2\pi/L_y)y_n]\} \right|^2. \quad (13)$$

### 4 模拟结果

为简便起见, 本文选取连续高斯光束为入射光束, 其复振幅表达式如下:

$$E(x', y', z') = E_0[\omega_0/\omega(z')] \exp[-(x'^2 + y'^2)/\omega^2(z')].$$

$$\exp(i(\omega t + \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}')) \cdot \mathbf{e} \quad (14)$$

其中,  $\omega_0$ 、 $\omega(z') = \omega_0 [1 + (z'/f)^2]^{1/2}$  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,  $f$  表示共焦腔镜的焦距; 偏振方向  $\mathbf{e}$  平行于  $Y$  轴(图 1 中所示的激光光束在  $VPG_1$  入射面中为  $s$  光, 而在  $VPG_2$  入射面中为  $p$  光)。为讨论问题方便, 作如下假设: 1) 中心波矢  $\mathbf{k}_0$  分别满足图 1 中  $VPG_1$  和  $VPG_2$  的布拉格条件, 即  $2\Delta_1 \sin \varphi_1 = \lambda$ , 且  $2\Delta_2 \sin \varphi_2 = \lambda$ 。(主要在布拉格条件下, 光束的衍射效率才能达到最高); 2)  $VPG_1$  和  $VPG_2$  均为各向同性材料, 且为非倾斜透射型体相位光栅, 光栅周期相等; 3)  $VPG_1$  和  $VPG_2$  横向尺度较光束腰斑半径足够大, 以避免光束从光栅侧面输出, 且忽略光栅前后表面的反射。各参量的具体数值可参见表 1。

由以上假设以及选定的参量可知,  $t_1$  不等于  $t_2$

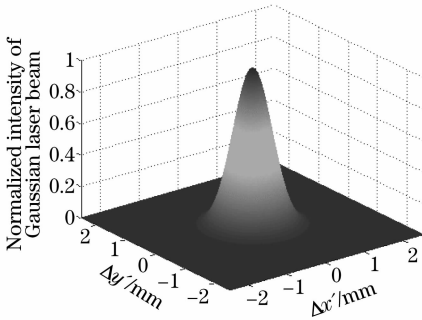


图 2 高斯光束在(a)空域以及(b)角谱域的强度分布

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

图 2(b)中的横坐标  $\Delta\alpha$  和  $\Delta\beta$  分别为偏离中心波矢方向的角度偏移量。

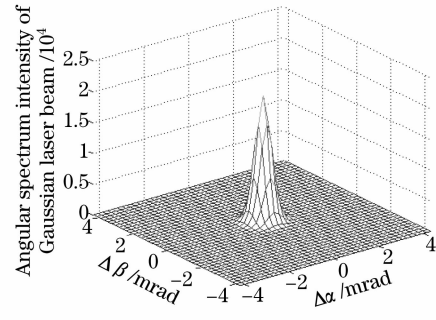
对于此种高斯光束, 其能量大部分均集中于中心角谱附近, 其角谱的中心带宽(半峰全宽)分别为 1 mrad 和 0.98 mrad, 这与文献[14]所求得的一致。

主要因为入射光束分别在  $VPG_1$  和  $VPG_2$  入射面中的偏振方向有关, 由入射光束和衍射光束分别在两光栅中的偏振方向以及公式(8)、(9)即可得出  $t_1$  和  $t_2$  的大小。

表 1 参量数值

Table 1 Parameters used in the simulation			
Parameters	Value	Parameters	Value
$\lambda$	1064 nm	$\Delta_1, \Delta_2$	5.08 $\mu\text{m}$
$\omega_0$	0.8 mm	$t_1, t_2$	1.77 mm, 1.80 mm
$\varphi_1$	6.0 ( $^\circ$ )	$n_{10}, n_{20}$	1.500
$\varphi_2$	6.0 ( $^\circ$ )	$n_{11}, n_{21}$	$3 \times 10^{-4}$
$M_x$	500	$M_y$	500
$f$	0.5 m	$m_1, m_2$	0
$L_x$	5 mm	$L_y$	5 mm

由公式(14)所表示的归一化的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 所示。



$$U(\varphi_{d_{xoz}}, \varphi_{d_{yoz}}) = \begin{cases} U(\varphi_1, 0)/5 & (\varphi_{d_{xoz}} - \varphi_1 + 1.9)^2 + (\varphi_{d_{yoz}} + 1.9)^2 \leq 1 \\ 0 & \text{other} \end{cases} \quad (15)$$

公式(15)中的角度单位均为 mrad。

畸变高斯光束在空域以及角谱域的分布分别如图 3 所示。

从图 3(a)可看出, 光束在空域中发生了较大的畸变, 光强的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。为了获得较高质量的光束, 可采用滤除角谱域中数值较大成分

为了观察体光栅空间低通滤波的效果, 先假定此光束在入射至此体光栅系统前已发生了波形畸变, 在角谱域中混杂了一偏离中心波矢  $(\varphi_1, 0)$ , 以  $(-1.9 \text{ mrad}, -1.9 \text{ mrad})$  为中心的角谱成分  $(\varphi_{d_{xoz}}, \varphi_{d_{yoz}})$ , 其复振幅  $U(\varphi_{d_{xoz}}, \varphi_{d_{yoz}})$  的表达式如下:

的方法。当此畸变光束通过此体光栅系统后, 其光束在空域以及角谱域的分布分别如图 4(a)、4(b)所示。

图 4(a)中的横坐标  $\Delta x''$  和  $\Delta y''$  分别为当光束通过  $VPG_1$  和  $VPG_2$  后的以光束中心波矢方向为  $Z''$  为轴, 建立起直角坐标系  $X''Y''Z''O''$ , 偏离中心波矢的横向位置偏移量。

当畸变光束通过体光栅系统时,角谱域中偏离中心位置数值较大的成份被体光栅系统给滤除,只剩下了角谱域中偏离中心位置数值较小的成分,即未畸变光束的角谱成分。通过对比图 2 和图 4,可

以发现二者无论在空域以及在角谱域中的强度分布均很相似,滤波后的光束在空域的分布与未畸变高斯光束非常接近,因此串联级联型透射型体相位光栅很好地完成了光束空间低通滤波的功能。

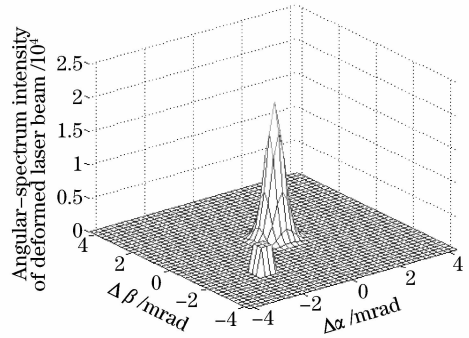
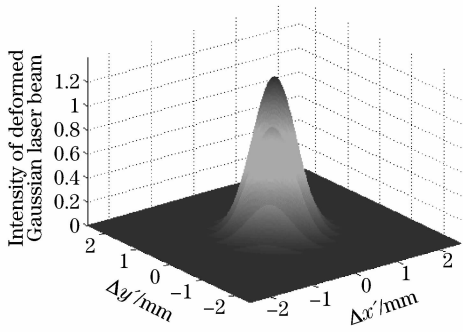


图 3 畸变高斯光束在(a)空域以及(b)角谱域中的强度分布

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

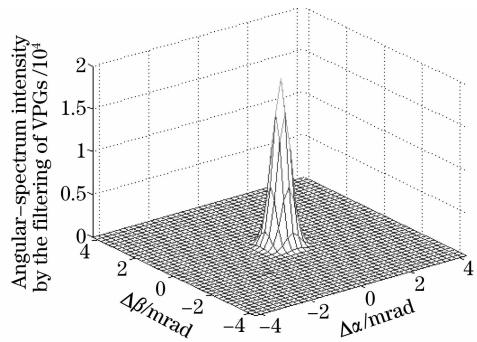
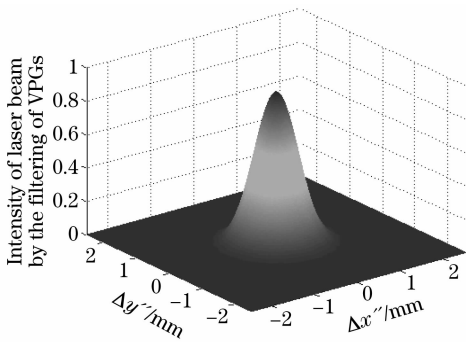


图 4 畸变高斯光束通过体光栅系统后在(a)空域以及(b)角谱域中的分布

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

为了更直观地比较出体光栅的滤波效果,图 5 给出了未畸变高斯光束、畸变高斯光束以及通过串联级联体光栅衍射后的光束在空域中的分布,显然经串联级联型体相位光栅衍射后的光束在空域中的分布较接近与未畸变高斯光束,达到了光束空间低通滤波的目的。

体光栅滤波的效能,如:滤波带宽的大小与光栅各参量之间的关系可参见文献[14]。

### 5 结 论

本文分析了光栅矢量相互正交,且串联级联放置的两透射型体相位光栅对空域任意分布的激光光束的空间低通滤波特性。结果表明:利用透射型体相位光栅所具有非常良好的角度选择性,可选择适当的体光栅参量以及搭设合理的光路,并基于未畸变光与杂散光具有不同角谱成分的特点(一般而言,未畸变光的大部份能量均集中于中心角谱附近,而杂散光的大部分能量较未畸变光偏离中心角谱较多),串联级联透射型体相位光栅可有效地滤除入射光中的杂散光成分,完成对入射激光光束的空域整形。这种不需要经过聚焦方式即能实现光束空间低通滤波性能的光束空间滤波技术,为激光光束的空

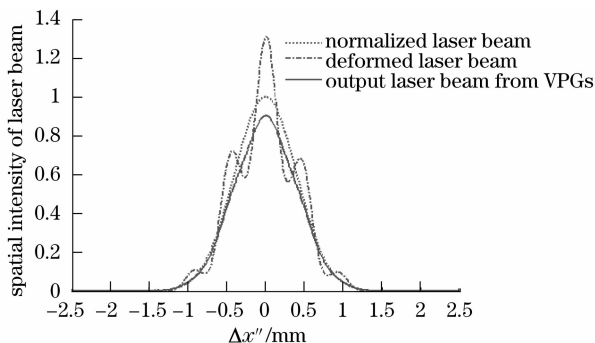


图 5 滤波效果二维示意图

Fig. 5 Two-dimensional schematic of filtering performance

间低通滤波提供了一种新的途径,尤其在功率激光空间低通滤波的应用上,其有效克服了针孔滤波小孔周边材料易被击穿等不利因素,给强光领域的激光光束质量的提高提供了一种有效方案。

### 参 考 文 献

- 1 T. Chung, A. Rapaport, Y. Chen *et al.*. Spectral narrowing of solid state lasers by narrow-band PTR Bragg mirrors[C]. *Laser Source and System Technology for Defense and Security I. SPIE*, 2006, **6216**: (03-1): 03~10
- 2 George B. Venus, and Armen Sevian. Stable coherent coupling of laser diodes by a volume Bragg grating in photothermorefractive glass[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(10): 1453~1455
- 3 Armen Sevian, Oleksiy Andrusyak, Igor Ciapurin *et al.*. Efficient power scaling of laser radiation by spectral beam combining[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(4): 384~386
- 4 Kai-Hsiu Liao, Ming-Yuan Cheng, Emilie Flecher *et al.*. Large-aperture chirped volume Bragg grating based fiber CPA system[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(8): 4876~4882
- 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,瞿荣辉等. 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 Bo Baoxue, Gao Xin, Qiao Zhongliang *et al.*. Characteristics of high power volume-bragg-grating external cavity semiconductor lasers[J]. *Chin. 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
- 7 Frank Havermeier, Wenhai Liu, Christophe Moser. Volume holographic grating-based continuously tunable optical filter[J]. *Opt. Engng.*, 2004, **43**(9): 2017~2021
- 8 J. Lumeau, L. B. Glebov. Tunable narrowband filter based on a combination of Fabry-Perot etalon and volume Bragg grating[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(16): 2417~2419
- 9 Jacques E. Ludman, Juanita R. Riccobono, Nadya O. Reinhand *et al.*. Very thick holographic nonspatial filtering of laser beams[J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1700~1705
- 10 Yu. L. Korzinin, I. V. Semenova, N. O. Reinhand *et al.*. Holographic nonspatial filter for laser beams: 2D selection[C]. *Optics for Science and New Technology. Proc of SPIE*. 1996, **2778**: 25~26
- 11 Michele Henrion, Jacques Ludman, Gennadi Sobolev *et al.*. Two-dimensional holographic nonspatial filtering for laser beams [C]. *Photopolymer Device Physics, Chemistry, and Application IV. 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 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *Bell Syst. Technol. J.*, 1969, **48**(9): 2909~2947
- 14 Zheng Guangwei, Liu Li, He Yanlan *et al.*. Research on diffraction of ultra-short pulsed Gaussian laser beam by transmitting volume grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 126~131  
郑光威,刘 莉,何焰蓝等. 透射型体光栅对超短脉冲高斯光束衍射特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 126~131