

基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方案

王健 侯鹏程 张彬

A new scheme of spectral dispersion smoothing based on hybrid grating

Wang Jian Hou Peng-Cheng Zhang Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 204201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.204201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种新型 Si/SiGe/Si 双异质结 PIN 电学调制结构的异质结能带分析

Analysis of Si/SiGe/Si double heterojunction band of a novel structure of PIN electronic modulation

物理学报.2016, 65(5): 054201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054201>

激光间接驱动球形腔新型光路排布方案

A novel arrangement scheme of laser quads for spherical hohlraum in laser indirect-driven facility

物理学报.2016, 65(2): 024202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.024202>

基于弹光调制的高灵敏旋光测量

High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation

物理学报.2015, 64(18): 184206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184206>

负折射平板透镜景深特性仿真分析

Simulation analysis of the depth of field characteristic of negative refraction flat lens

物理学报.2014, 63(13): 134202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.134202>

光波导微环谐振器用于二进制格式变换研究

Study of data format transform with optical waveguide resonators

物理学报.2013, 62(19): 194201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.194201>

基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方案*

王健 侯鹏程 张彬†

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2016年5月11日收到; 2016年7月25日收到修改稿)

针对惯性约束聚变装置对提高靶面辐照均匀性的要求, 提出了基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方案, 即利用复合型光栅中不同的色散区域对激光束进行不同方向的色散, 例如, 内部色散区域 I 的色散方向为水平或垂直方向, 外部色散区域 II 的色散方向为圆周方向, 使得焦斑内部散斑在远场的扫动方向是平动和旋转两种方式的混合, 因而可以有效减小焦斑内部条纹状强度调制, 进而提高靶面辐照的均匀性. 本文建立了基于复合型光栅的光谱色散匀滑理论模型, 分析了复合型光栅方案的匀滑效果, 并与典型的光谱角色散方案和“星”光栅方案进行了比较. 在此基础上, 针对复合型光栅的色散区域面积比值、色散区域 I 和 II 的刻线密度等关键参数进行了讨论. 结果表明, 色散区域 I 面积占总色散区域面积比值在 0.3—0.5 时, 复合型光栅方案可有效减小焦斑内条纹状强度调制和沿径向的强度调制; 随着色散区域 I, II 的刻线密度在一定范围内增加, 焦斑均匀性得到改善, 但结合实际的加工情况, 应选取合理的光栅刻线密度; 与典型一维光谱色散 (1D-SSD) 匀滑方案相比, 该方案的靶面辐照均匀性更好, 且可实现与多维光谱色散匀滑类似的效果, 而与“星”光栅方案相比, 该方案中复合型光栅的加工相对较简单, 且其靶面辐照均匀性也更佳.

关键词: 惯性约束聚变, 辐照均匀性, 复合型光栅, 色散区域

PACS: 42.30.Lr, 42.68.Ay, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.65.204201

1 引言

在惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 装置中, 靶面的均匀辐照是实现靶丸均匀压缩的关键因素之一^[1]. 为了有效改善靶面的辐照均匀性, 发展了多种空域和时域光束匀滑技术. 在已有的空域光束匀滑技术中, 常采用连续相位板 (continuous phase plate, CPP) 来控制激光束的远场焦斑轮廓^[2], 但激光集束内子束间存在相干叠加, 使其远场焦斑内部出现散斑, 这将会导致激光束与靶丸相互作用时产生各种参量的不稳定性^[3,4]. 为了减小各种参量的不稳定性, 可以采用以光谱角色散 (smoothing by spectral dispersion, SSD)^[5] 为代表的时域匀滑技术来抑制焦斑内散斑的存在. 光谱色散匀滑技术是通过激光束进行时

间位相调制并利用光栅进行色散, 从而使焦斑内部散斑在其色散方向上扫动起来, 进而在较短积分时间内提高远场焦斑均匀性. 目前, 以美国国家点火装置 (national ignition facility, NIF) 为代表的间接驱动装置中, 采用了一维光谱角色散 (1D-SSD) 匀滑技术^[6,7]. 然而, 1D-SSD 仅能实现激光束在光栅方向上的扫动 (即水平方向 x 或垂直方向 y), 这会导致焦斑内部出现条纹状光强调制, 因而又进一步提出了二维光谱角色散匀滑技术 (2D-SSD)^[8]. 然而, 2D-SSD 存在激光束在远场不可避免产生相干现象, 致使焦斑内部强度调制抹平不够充分等缺点. 为了弥补线性光栅单色散方向的不足, 人们提出了圆光栅、“星”光栅^[9,10] 和阵列光栅等^[10,11] 特殊光栅的光谱角色散方法. 圆光栅的匀滑方向为径向, 其束匀滑效果与 1D-SSD 相比相对较差, 且在其圆周方向会出现衍射条纹, 同时, 当圆光栅在径

* 国家重大专项应用基础项目 (批准号: JG2015034) 和科技部创新人才推进计划重点领域创新团队 (批准号: 2014RA4051) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

向的色散量较大时, 焦斑尺寸会变大, 可能导致在注入孔处的“堵孔”问题^[12], 而采用变周期圆光栅色散的束匀滑方法, 虽能改善靶面的辐照均匀性, 但其加工难度将进一步增大. “星”光栅的匀滑方向沿圆周方向, 其形状为螺旋阶梯状且越靠近圆心刻线越密, 致使其内径的刻线密度受限于加工工艺和最小刻写能力, 加工比较困难^[13].

基于上述各种特殊光栅光束匀滑方法的不足, 本文提出一种基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方法. 该光栅在内、外两个色散区域对激光束进行不同方向的色散, 例如, 其内部色散区域的色散方向为水平或垂直方向, 而外部色散区域色散方向为圆周方向. 通过在不同色散区域对激光束进行不同方向的色散, 可有效减少焦斑内条纹状强度调制, 并进一步改善靶面的辐照均匀性. 由于该光栅可分为两个色散方向不同的色散区域, 因而将这一新型光栅称为复合型光栅. 复合型光栅内部色散方式为一维线性色散, 在选取合适参数的条件下, 复合型光栅能够有效改善靶面的辐照均匀性, 其光栅刻线密度相对较低且易于加工. 本文首先介绍复合型光栅光谱色散匀滑方案的原理, 进而建立复合型光栅光束匀滑方案的理论模型. 在此基础上, 着眼于复合型光栅色散方式以及色散面积等参数对匀滑特性的影响, 对其关键参数进行讨论和分析. 最后, 将复合型光栅方案与传统光栅方案的匀滑效果进行对比, 以说明该方案的有效性.

2 理论模型

2.1 复合型光栅模型

复合型光栅的结构如图 1 所示. 复合型光栅可根据入射激光束的形状加工成方形或圆形, 其尺寸比激光束口径略大. 为了保证激光束的中心对称传输特性, 复合型光栅的中心轴与激光束的中心轴共线. 根据色散方向的不同, 复合型光栅可划分为 I 和 II 两个色散区域, 以光栅中心向外半径为 R 的圆形区域为色散区域 I, 圆形区域以外的部分为色散区域 II. 色散区域 II 刻线延长线会聚于圆心, 刻线间的夹角均相等. 复合型光栅采用反射式结构, 色散区域 I 和 II 的刻槽面与光栅平面之间的夹角成闪耀角, 当激光束垂直于光栅刻槽面入射时, 经复合型光栅色散后的一级闪耀光按原路返回. 色散区域 I 的面积为 S_I , l_{RI} 为色散区域 I 的光栅刻线密度; 色

散区域 II 的面积为 S_{II} , l_{RII} 为色散区域 I, II 交界处色散区域 II 最大光栅刻线密度.

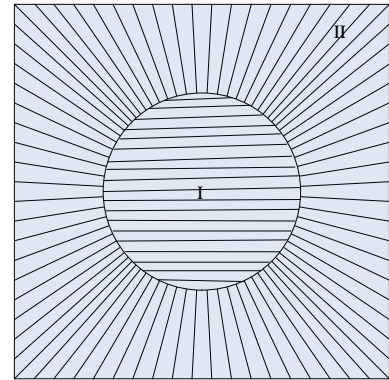


图 1 复合型光栅结构示意图 (俯视图)

Fig. 1. Schematic illustration of the Structure of hybrid grating (top view).

如图 1 所示, 色散区域 I 的刻线方向为 x 方向, 其色散方式为 y 方向的一维线性色散; 色散区域 II 的刻线方向为径向, 其色散方式为圆周方向色散. 当经时间相位调制的激光束通过复合型光栅时, 其激光束光场分区域进行不同方向的色散, 即处于色散区域 I 的部分光束按照一维色散方式进行色散, 而处于色散区域 II 的部分光束则按圆周色散方式进行色散, 从而使得远场焦斑内散斑同时在 y 方向和圆周方向快速的扫动, 进而使靶面焦斑得到有效匀滑.

假设复合型光栅中色散区域 I 的色散方向沿 y 方向, 则有

$$\eta_I = \varepsilon_1 y, \quad (1)$$

式中, η_I 为色散区域 I 在 y 方向的色散量; ε_1 为角色散, 其表达式为

$$\varepsilon_1 = 2\pi(d\theta_1/d\lambda_1) \frac{\omega_m}{\omega_0}, \quad (2)$$

式中, $d\theta_1/d\lambda_1$ 为色散区域 I 光栅的色散系数; ω_m 为调制角频率; ω_0 为激光束角频率.

复合型光栅中色散区域 II 为圆周方向色散, 其色散方向可看作是距离中心为 $R = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ 处的线性光栅在圆周方向进行色散, 则有

$$\eta_{II} = \varepsilon_2 \alpha R, \quad (3)$$

式中, η_{II} 为色散区域 II 沿圆周方向的色散量; (X, Y) 为复合型光栅面对应的坐标; ε_2 为角色散; α 为极角, 且 $\alpha \in [0, 2\pi]$; α 和 ε_2 的表达式分别为:

$$\alpha = \arctan(Y/X), \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \frac{\lambda}{c} (d\theta_2/d\lambda_2) = \frac{\lambda}{c} \frac{1}{d \cos \theta} \\ &= \frac{\lambda}{c} [d^2 - \lambda^2/4]^{-1/2} = \frac{\lambda}{c} \frac{M}{2\pi R}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $d\theta_2/d\lambda_2$ 为色散区域 II 光栅的色散系数; L_R 为色散区域 II 中距离复合型光栅中心为 R 处的周长, $L_R = \sqrt{(2\pi R)^2 + (M\lambda/2)^2}$, λ 为激光束中心波长; c 为真空中光速; M 为色散区域 II 的总刻线数; 色散区域 II 距中心 R 处的光栅周期 $d = L_R/M = 2\pi R/M$.

2.2 复合型光栅匀滑模型

以 NIF 装置为例 [7], 图 2 给出了基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方案示意图, 其中, 复合型光栅置于预放大系统中. 激光束从左向右依次经过相位调制器、复合型光栅、主放大系统、频率转换单元和连续相位板, 最后, 经透镜聚焦到靶面. 经时间相位调制的激光束在经过复合型光栅时, 由于激光束在不同色散区域进行不同方向的色散, 致使焦斑内部散斑的扫动方向是平动和旋转两种方式的混合, 因而可以有效提高靶面的辐照均匀性.

假设入射激光束为超高斯光束, 其近场光场分布可表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}_0(x, y, t) \\ &= \mathbf{A}_0 [1 + a(x, y)] \\ & \quad \times \exp[-(x/w_x)^{2m} - (y/w_y)^{2m}] \\ & \quad \times \exp[i\Phi(x, y)], \end{aligned} \quad (6)$$

式中, \mathbf{A}_0 为归一化振幅; $a(x, y)$ 为振幅调制; w_x, w_y 为预放大系统中激光束的 $1/e$ 处束腰宽度; m 为空间超高斯阶数; $\Phi(x, y)$ 为初始位相.

激光束在经过时间相位调制后, 经过复合型光栅, 由于复合型光栅中色散区域 I, II 的色散方式不同, 激光束通过复合型光栅进行光谱色散的光场分布可表示为

$$\mathbf{E}_1(x, y, t)$$

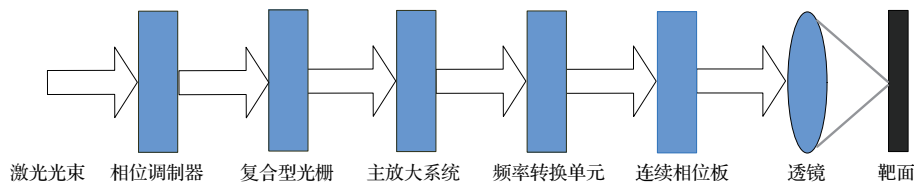


图 2 基于复合型光栅的光谱色散匀滑方案

Fig. 2. Schematic illustration of the spectral dispersion smoothing based on hybrid grating.

$$\begin{aligned} &= \mathbf{E}_0(x, y, t) R_I \exp[i\omega_0 t + i\delta \sin(\omega_m t + \eta_I)] \\ & \quad + \mathbf{E}_0(x, y, t) R_{II} \\ & \quad \times \exp[i\omega_0 t + i\delta \sin(\omega_m t + \eta_{II})], \end{aligned} \quad (7)$$

式中, ω_0 为激光束的角频率; δ 和 ω_m 分别为调制深度和调制角频率, 且 $\omega_m = 2\pi\nu_m$, ν_m 为调制频率; η_I 为色散区域 I 在 y 方向的色散量; η_{II} 为色散区域 II 沿圆周方向的色散量; R_I, R_{II} 分别用来划分激光束通过复合型光栅色散区域 I, II 的面积大小, 当 $X^2 + Y^2 < r^2$ 时, $R_I = 1, R_{II} = 0$, 而当 $X^2 + Y^2 > r^2$ 时, $R_I = 0, R_{II} = 1$ (r 为色散区域 I 的半径).

图 2 中, 激光束经过主放大系统、频率转换单元和连续相位板 (CPP) 后, 最终经透镜聚焦到靶面上. 根据 Collins 公式 [14], 靶面的光场分布可表示为

$$\begin{aligned} & \mathbf{E}_2(x, y, t) \\ &= \frac{\exp(ikL)}{i\lambda_1 f/B} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}_1(x, y, t) \exp(i\varphi_{CPP}) \\ & \quad \times \exp\left[\frac{ik}{f/B}(-x_0 x_f - y_0 y_f)\right] dx dy, \end{aligned} \quad (8)$$

式中, k 为波矢, $k = 2\pi/\lambda_1$, λ_1 为经频率转换单元后的中心波长; L 为透镜前焦面到透镜后焦面的距离, $L = 2f$, f 为透镜焦距; φ_{CPP} 为 CPP 的附加相位; B 为预放大系统至主放大系统的扩束比; $(x_0, y_0), (x_f, y_f)$ 分别为透镜前焦面和后焦面的坐标.

在积分时间 Δt 内, 靶面上的光强分布可表示为

$$\mathbf{I}_f = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |\mathbf{E}_2(x, y, t)|^2 dt. \quad (9)$$

为了对复合型光栅的匀滑特性进行分析, 采用了焦斑光通量对比度 (Contrast, C) 来评价焦斑的均匀性, 其表达式为 [15]

$$C = \frac{\sqrt{\sum_i \sum_j [I_{i,j}(x, y) - \bar{I}(x, y)]^2 / N_x N_y}}{\bar{I}(x, y)}, \quad (10)$$

式中, $I_{i,j}(x, y)$ 和 $\bar{I}(x, y)$ 分别为焦斑各点的光强和其平均值, N_x, N_y 为取样的点数. 光通量对比度 C 越小, 表明焦斑光强分布越均匀.

FOPAI 曲线可用来定量表征焦斑内超过特定强度 I_0 的不同峰值热斑占焦斑总功率的份额, 其表达式为 [12]

$$FOPAI(I_0) = \frac{\int_{\text{where } I(x,y) > I_{\text{avg}}}^A I(x,y) dx dy}{\int_A I(x,y) dx dy}, \quad (11)$$

式中, $I(x, y)$ 为远场焦斑某点的光强值; I_{avg} 为平均光强; A 为焦斑观察面积.

3 数值模拟和分析

利用上述理论模型, 本文对复合型光栅光束匀滑方案的匀滑效果进行了分析, 并与现有光栅方案的匀滑效果进行了比较. 此外, 还进一步讨论了色散区域面积比值、色散区域 I 和 II 的线密度等关键参数对激光束匀滑特性的影响.

在基于复合型光栅的光谱色散匀滑方案中, 数值模拟时选取的参数如下 [11,16-18]: 预放大系统中激光束的口径为 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 主放大系统中的光束口径为 $360 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$, 扩束比 $B = 12$, 激光束的中心波长 $\lambda = 1053 \text{ nm}$, 经频率转换单元后的中心波长 $\lambda_1 = 351 \text{ nm}$; 激光束空间超高斯阶数为 $m = 6$; 激光束的振幅调制深度为 1.2, 位相畸变 PV 值为 2λ ; 中心角频率 $\omega_0 = 1.78 \times 10^{15} \text{ Hz}$; 调制频率 $\nu_m = 17 \text{ GHz}$, 调制深度 $\delta = 2.38$, 带宽 $\Delta\lambda = 0.3 \text{ nm}$; 聚焦透镜的焦距 $f = 7.7 \text{ m}$; 积分时间 $\Delta t = 50 \text{ ps}$. 在对焦斑均匀性和内部热斑进行定量分析时, 针对 86.5% 包围能量比的区域进行分析.

3.1 远场焦斑匀滑特性

在对远场焦斑匀滑效果进行分析时, 利用(10)式和(11)式对复合型光栅的匀滑效果进行评价. 图 3 分别给出了 1D-SSD, “星”光栅和复合型光栅匀滑的焦斑光强分布, 在选取复合型光栅参数时, 考虑到实际匀滑效果以及加工难度等因素, 选取了经过初步优化的参数, 并与选取典型参数的 1D-SSD 和“星”光栅的焦斑扫描特性进行了对比. 其中, 复合型光栅中 $S_I/S_{II} = 0.50$, 色散区域 I 的刻

线密度 $l_{RI} = 850 \text{ 条/mm}$, 色散区域 II 的最大刻线密度 $l_{RII} = 1260 \text{ 条/mm}$ ($M = 80000$); 1D-SSD 典型的光栅色散系数为 $554.9 \mu\text{rad/nm}$ [16,18]; “星”光栅总刻线数为 30000 [9].

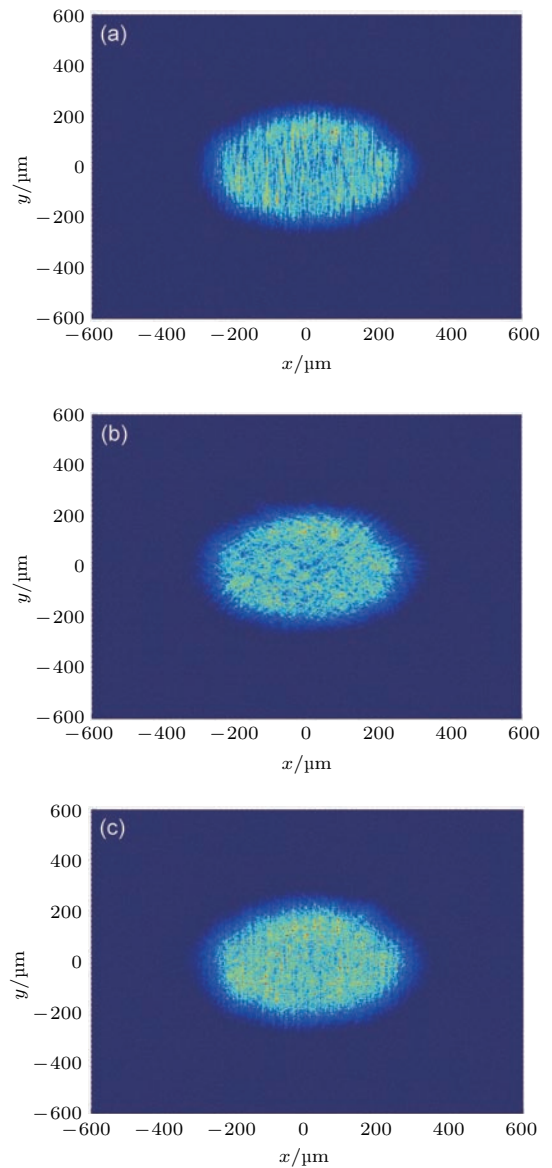


图 3 (网刊彩色) 焦斑光强分布 (a) 1D-SSD, $C = 0.59$; (b) “星”光栅, $C = 0.60$; (c) 复合型光栅, $C = 0.56$
 Fig. 3. (color online) Focused intensity distributions: (a) 1D-SSD, $C = 0.59$; (b) “star” grating, $C = 0.60$; (c) Hybrid grating, $C = 0.56$.

从图 3(a) 中可以看出, 1D-SSD 远场焦斑在 y 方向得到了匀滑, 但焦斑内部存在明显的条纹状强度调制; “星”光栅的色散方向在圆周方向, 激光束在通过“星”光栅时, 焦斑内部散斑在圆周方向得到了匀滑, 焦斑内并不会产生条纹状强度调制, 但沿径向的强度调制也较为明显, 如图 3(b) 所示. 分析图 3(c) 可知, 采用复合型光栅的光谱色散匀滑

方案后, 焦斑内部散斑在远场的扫动方向是平动和旋转两种方式的混合, 因而条纹状强度调制和沿径向的强度调制明显减弱. 进一步分析图3可知, 1D-SSD, “星”光栅的光通量对比度基本相同, 而复合型光栅光通量对比度与二者相比略有减小, 说明复合型光栅能够更为有效地改善焦斑均匀性. 此外, “星”光栅为螺旋阶梯状, 越靠近圆心刻线越密集, 加工难度较大; 而复合型光栅划分为两个色散区域, 且其色散区域I为一维线性色散, 色散区域II最大刻线密度在与色散区域I交界处, 相对于“星”光栅圆心处刻线密度将极大的减小, 因而其加工难度显著降低. 复合型光栅的色散区域II色散方向为圆周方向, 通过优化复合型光栅和连续相位板的相关参数, 能使焦斑在径向的扫动范围比1D-SSD小, 因此, 基于复合型光栅的光谱色散匀滑方案在注入孔处并不会产生明显的“堵孔”问题.

3.2 色散区域面积比值 (S_I/S_{II}) 对焦斑均匀性的影响

复合型光栅的色散区域划分为I和II两个区域, 激光束在经过复合型光栅时, 色散区域I, II的面积比值不同, 两种色散量占比也会相应的改变, 这就导致焦斑内部形态发生相应的变化. 图4(a)—图4(c)给出了三种不同的 S_I/S_{II} 比值时的焦斑光强分布. 其中, 色散区域I的刻线密度 $l_{RI} = 536$ 条/mm, 色散区域II总刻线数 ($M = 80000$) 相同, 在 $S_I/S_{II} = 0.62$ 时, 色散区域最大光栅刻线密度 $l_{RII} = 1180$ 条/mm, 积分时间 $\Delta t = 20$ ps.

从图4(a)中可以看出, 在色散区域I面积 S_I 较小时, 焦斑中基本不存在条纹状强度调制, 但能够看到较为明显的沿径向的强度调制. 继续增加色散区域I的面积, 焦斑内部条纹状强度调制和沿径向的强度调制减小, 如图4(b)所示, 这是因为色散区域I面积占总色散区域面积并不大, 因而条纹状强度调制不明显, 而色散区域II中距离复合型光栅中心越大, 刻线密度越小, 光束截面内相同频率光的相干性减弱, 因而在径向条纹状的干涉结构也在相应减少. 同时, 远场焦斑内部散斑的扫动方向是平动和旋转两种方式的混合, 从而进一步减小了焦斑内部条纹状强度调制和沿径向的强度调制. 分析图4(c)可知, 当色散区域I与色散区域II面积比值更大时, 一维线性色散所占比例较大, 可以看到较为明显的条纹状强度调制.

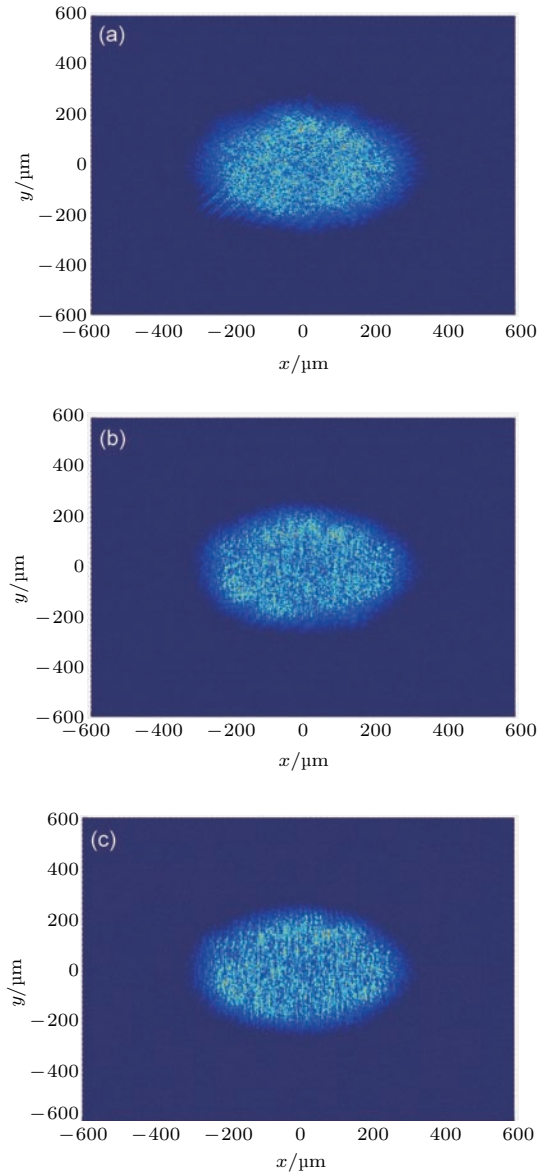


图4 (网刊彩色) S_I/S_{II} 比值对焦斑均匀性的影响 (a) $S_I/S_{II} = 0.08$; (b) $S_I/S_{II} = 0.62$; (c) $S_I/S_{II} = 2.43$
 Fig. 4. (color online) Influence of different area ratio in the different dispersion areas on beam smoothing effect: (a) $S_I/S_{II} = 0.08$; (b) $S_I/S_{II} = 0.62$; (c) $S_I/S_{II} = 2.43$.

图5进一步给出了以上三种不同 S_I/S_{II} 比值时的焦斑光通量对比度随积分时间的变化曲线.

从图5中可以看出, 在色散区域II总刻线数一定时, 增大色散区域I的面积, 焦斑的光通量对比度有所增加. 这是由于当色散区域I的面积增加时, 线性色散将导致远场焦斑产生条纹状强度调制, 而色散区域II的最大刻线密度 l_{RII} 却不断减小, 因而其匀滑效果也会相应变差. 进一步结合图4可知, 在色散区域I面积较小时, 主要表现为色散区域II对激光束进行圆周方向的色散; 在色散区域I面积

较大时, 主要表现为色散区域I对激光束进行 x 方向的匀滑. 由此可见, 为了获得更佳的靶面辐照均匀性, 应合理选取色散区域I, II的面积比值. 综合考虑, 当复合型光栅中色散区域I的面积占总面积比值为0.3—0.5时, 在不明显增大光栅加工难度的情况下, 能够在有效改善焦斑均匀性的同时实现对焦斑内条纹状的强度调制和沿径向的强度调制的抑制.

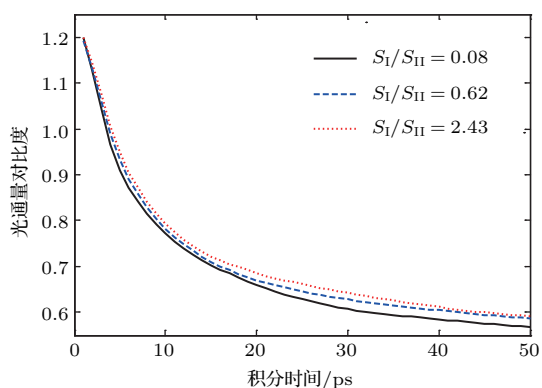


图5 S_I/S_{II} 比值不同时, 对比度随积分时间的变化
Fig. 5. When the area ratio in the different dispersion areas are different, variation of contrast with average time.

3.3 色散区域I, II线密度对远场焦斑均匀性的影响

在基于复合型光栅的光谱色散匀滑方案中, 色散区域I为一维线性色散, 色散区域II为圆周方向色散, 上面已针对色散区域I, II的不同面积占比对焦斑均匀性的影响进行了相关讨论, 而当色散区域I, II的刻线密度变化时, 焦斑均匀性也会相应的变

化, 图6(a)和图6(b)则进一步给出了复合型光栅中色散区域I, II在不同刻线密度下焦斑光通量对比度随积分时间的变化曲线和FOPAI曲线, 其中, $S_I/S_{II} = 0.62$.

从图6(a)中可以看出, 随着积分时间的增加, 焦斑的光通量对比度均先减小, 而后逐渐趋于稳定, 表明焦斑均匀性得到明显改善. 此外, 当色散区域I刻线密度一定时, 在一定范围内增加复合型光栅中色散区域II的刻线密度, 焦斑的光通量对比度将有所减小. 同时, 通过进一步优化色散区域II的刻线密度, 焦斑的光通量对比度将进一步减小(如图6(a)中红线所示). 分析图6(b)可知, 随着色散区域II刻线密度的增加, FOPAI曲线呈现略微向左移动的趋势, 表明焦斑中的热斑比例略有降低.

为了进一步比较复合型光栅方案与传统光栅方案的匀滑效果, 图7(a)和图7(b)分别给出了复合型光栅、1D-SSD、“星”光栅的焦斑光通量对比度随积分时间的变化曲线和FOPAI曲线. 计算中, 复合型光栅的色散区域I和II的面积比 $S_I/S_{II} = 1.0$, 色散区域I的刻线密度 $l_{RI} = 767$ 条/mm, 色散区域II的最大刻线密度 $l_{RII} = 1283$ 条/mm ($M = 100000$); 1D-SSD的刻线密度为536条/mm; “星”光栅的刻线数取30000.

从图7(a)和图7(b)中可以看出, 与传统1D-SSD和“星”光栅方案相比, 复合型光栅方案的匀滑效果相对较好. 此外, 采用复合型光栅分区域匀滑方法, 使色散方式多样化, 可有效减小焦斑内条纹状强度调制, 实现与多维光谱色散类似的匀滑效果.

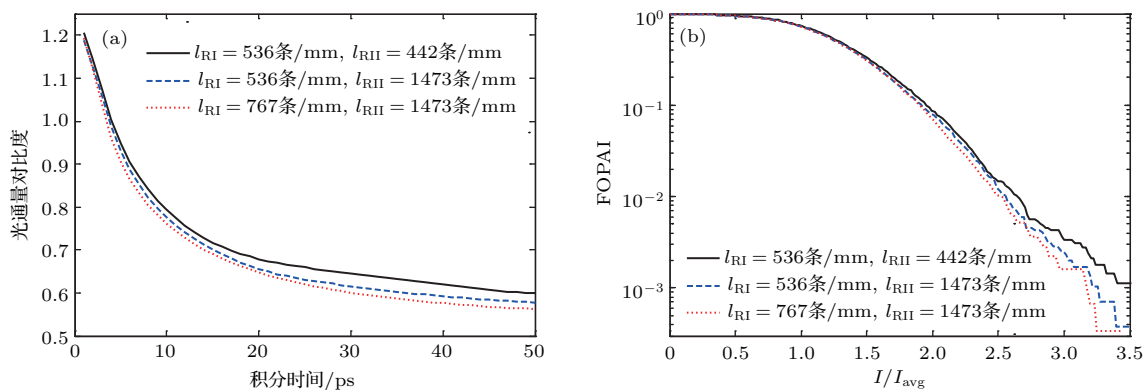


图6 (网刊彩色) 不同刻线密度对焦斑均匀性的影响 (a) 光通量对比度随积分时间的变化; (b) FOPAI曲线
Fig. 6. (color online) Influences of the different groove density in the different dispersion areas on beam smoothing effect: (a) Variation of contrast with average time; (b) FOPAI curves.

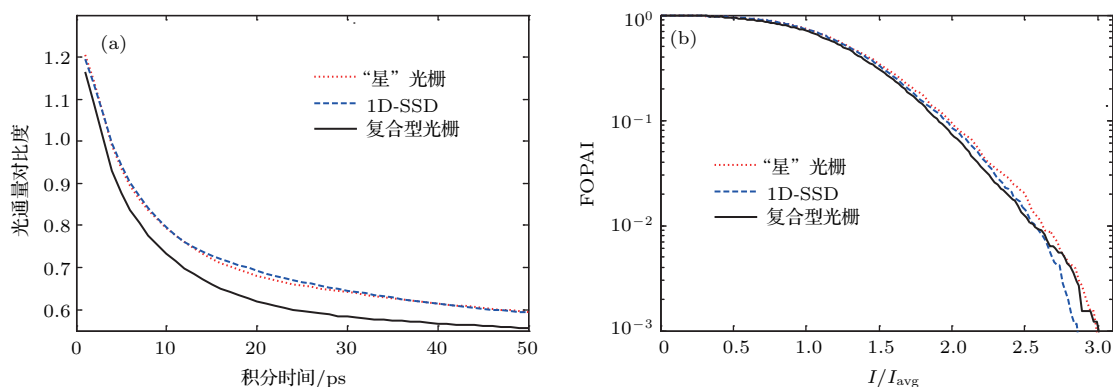


图7 (a) 光通量对比度随积分时间的变化; (b) FOPAI 曲线

Fig. 7. (a) Variation of contrast with average time; (b) FOPAI curves.

4 结 论

针对 ICF 装置中实现靶面均匀辐照的需求, 提出了一种基于复合型光栅的光谱色散匀滑新方案. 该方案利用复合型光栅分区域色散, 使处于不同色散区域的激光束进行不同方向的色散, 致使焦斑内部散斑的扫动方向是平动和旋转两种方式的混合, 从而进一步提高靶面辐照的均匀性. 本文利用建立的复合型光栅束匀滑模型对该方案的匀滑效果进行了分析. 研究表明, 与传统的 1D-SSD 和“星”光栅相比, 复合型光栅分为两个色散区域, 远场焦斑内散斑以平动和旋转两种方式混合进行快速的扫动, 可有效减小条纹状强度调制和沿径向的强度调制的产生, 同时, 复合型光栅相对“星”光栅加工更加简单, 且可实现与多维光谱色散匀滑类似的效果. 此外, 本文还讨论了复合型光栅色散方式以及色散面积等参数对匀滑特性的影响. 研究表明, 在选取合理色散区域 I, II 的刻线密度和面积比值时, 能达到较好的匀滑效果, 且靶面的辐照均匀性均比 1D-SSD 和“星”光栅更佳.

参考文献

[1] Zhong Z Q, Hu X C, Li Z L, Ye R, Zhang B 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 054209 (in Chinese) [钟哲强, 胡小川, 李泽龙, 叶荣, 张彬 2015 物理学报 **64** 054209]
 [2] Weng S L, Yan H, Zhang Y H, Yang C L, Wang J, Shi Q K 2014 *Acta Opt. Sin.* **34** 154 (in Chinese) [温圣林, 颜浩, 张远航, 杨春林, 王健, 石琦凯 2014 光学学报 **34** 154]
 [3] Desselberger M, Willi O 1993 *Phys. Plasmas* **05** 896
 [4] Smalyuk V A, Boehly T R, Bradley D K, Goncharov V N, Delettrez J A, Knauer J P, Meyerhofer D D, Oron D, Shvarts D 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5342
 [5] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456

[6] Rothenberg J E, Moran B D, Henesian M A, Wontergthem B M V 1996 *Second International Conference on Solid State Lasers for Application to ICF* Paris, France, October 22, 1997 p313
 [7] Zhang R, Su J Q, Wang J J, Li P, Dong J, Hu D X 2014 *International Optical Design* Hawaii, United States, June 22–26, 2014 IM2B. 8
 [8] Rothenberg J E 1995 *Proc. SPIE* **2633** 634
 [9] Sui Z 2006 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Fudan University) (in Chinese) [隋展 2006 博士学位论文 (上海: 复旦大学)]
 [10] Zhang R, Zhang X, Sui Z, Hai M 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 1073
 [11] Zhong Z Q, Zhou B J, Ye R, Zhang B 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 035201 (in Chinese) [钟哲强, 周冰洁, 叶荣, 张彬 物理学报 **2014** 63 035201]
 [12] Li J C 2008 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [李锦灿 2008 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
 [13] Yang B, Li Z Y, Xiao X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 184214 (in Chinese) [杨彪, 李智勇, 肖希 2013 物理学报 **62** 184214]
 [14] Li Y Y, Liu L S, Wang T F, Shao J F, Guo J 2015 *Infrared Laser Eng.* **44** 857 (in Chinese) [李远洋, 刘立生, 王挺峰, 邵俊峰, 郭劲 2015 红外与激光工程 **44** 857]
 [15] Wen P, Li Z L, Zhong Z Q, Zhang B 2015 *Acta Opt. Sin.* **35** 167 (in Chinese) [文萍, 李泽龙, 钟哲强, 张彬 2015 光学学报 **35** 167]
 [16] Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, Bowers M W, Dixit S N, Erbert G V, Heestand G M, Henesian M A, Hermann M R, Jancaitis K S, Manes K R, Marshall C D, Mehta N C, Menapace J, Moses E, Murray J R, Nostrand M C, Orth C D, Patterson R N, Sacks R A, Shaw M J, Spaeth M, Sutton S B, Williams W H, Widmayer C C, White R K, Yang S T, Wontergthem B M 2007 *Appl. Opt.* **46** 3276
 [17] Wisoff P J, Bowers M W, Erbert G V, Browning D F, Jedlovec D R 2004 *Proc. SPIE* **5341** 146
 [18] Hou P C, Zhong Z Q, Zhang B 2016 *Opt. Laser Technol.* **85** 48

A new scheme of spectral dispersion smoothing based on hybrid grating*

Wang Jian Hou Peng-Cheng Zhang Bin[†]

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

(Received 11 May 2016; revised manuscript received 25 July 2016)

Abstract

The irradiance uniformity on target plane is a key issue in laser-driven inertial confinement facilities. In the typical schemes of one-dimensional smoothing by spectral dispersion (1D-SSD) and the “star” grating, the stripe pattern inside the focal spot appears inevitably, besides, the fabrication of the “star” grating is relatively difficult. Thus, a new spectral dispersion smoothing scheme based on a hybrid grating is proposed, which not only achieves the better smoothing effect, but also exhibits some specific advantages in the fabrication and the dispersion way. According to the different direction of the spectral dispersion, the hybrid grating is divided into inner and outer dispersion areas. That is, the dispersion direction of the inner dispersion area is in the horizontal or vertical direction, and the dispersion direction of the outer dispersion area is in the azimuthal direction. When the laser beam with the temporal phase modulation propagates through the hybrid grating, the dispersion directions of the laser beam in the inner and the outer dispersion areas are different, leading to the redistribution of the speckles inside the focal spot in the resultant direction of the translation and rotation on the target plane. Consequently, the focal spot on the target plane achieves the beam smoothing in radial and horizontal or vertical direction. In the present paper, the theoretical model of the hybrid grating scheme based on the spectral dispersion smoothing is built up. Using the theoretical model, the smoothing effect of the hybrid grating scheme is analyzed, and compared with those of the typical schemes of 1D-SSD and the “star” grating. The contrast and the fractional power above the intensity (FOPAI) are used to evaluate the smoothing characteristic of the focal spot. In addition, the influences of the area ratio and groove density in the different dispersion areas of the hybrid grating on beam-smoothing effect are also discussed. Results indicate that when the inner dispersion area accounts for the 0.3–0.5 of the total dispersion area, the hybrid grating scheme can effectively suppress the stripe intensity modulation both in the radial direction and the vertical direction. With increasing the groove densities of the inner and the outer dispersion area in a certain range, the irradiance uniformity of the focal spot is further improved. However, considering the actual processing of the hybrid grating, the appropriate groove density should be selected. Compared with the typical scheme of the 1D-SSD, the scheme of the hybrid grating can achieve the better smoothing effect with the multi-direction spectral dispersion smoothing. Furthermore, the fabrication of the hybrid grating is relatively simple and the irradiation uniformity on the target plane is also good compared with those of the “star” grating scheme.

Keywords: inertial confinement fusion, irradiance uniformity, hybrid grating, dispersion area

PACS: 42.30.Lr, 42.68.Ay, 42.79.-e

DOI: 10.7498/aps.65.204201

* Project supported by the Basic Research Program of the National Major Project of China (Grant No. JG2015034) and the China Innovative Talent Promotion Plans for Innovation Team in Priority Fields (Grant No. 2014RA4051).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangbinff@sohu.com