

# 光谱色散后的相位调制光束 衍射特性研究\*

江秀娟<sup>1)†</sup> 周申蕾<sup>1)</sup> 林尊琪<sup>1)</sup> 朱 俭<sup>2)</sup>

1) 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

2) 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2005 年 9 月 29 日收到, 2006 年 2 月 23 日收到修改稿)

用数值方法研究了激光驱动器系统中使用光谱色散平滑单元后光束的衍射特性. 模拟结果表明, 光谱色散会使光束衍射光斑变大, 近场空间强度均匀性改善, 而远场光斑内部存在光强接近于均匀分布的区域. 进一步分析了光谱色散平滑单元中相位调制器的调制深度、调制频率及光栅色散系数等主要元件参数对光束传输特性的影响, 发现在一定情况下光斑内部会出现较强的强度调制.

关键词: 光谱色散平滑, 光束衍射, 近场, 远场

PACC: 4225B, 4230K

## 1. 引 言

在惯性约束聚变(ICF)实验中, 激光束的空间强度分布均匀性是一个重要的技术参数, 因为靶面辐照不均匀不仅使达到聚变点火所需的激光能量增加, 而且会引起等离子体的瑞利-泰勒不稳定性<sup>[1-3]</sup>. 为此, 各国的科研人员发展了多种靶面均匀辐照技术, 其中包括透镜列阵法, 随机相位板法, 诱导空间非相干法及部分相干光法等<sup>[4-6]</sup>. 光谱色散平滑(smoothing by spectral dispersion, SSD)是其中的一种方案, 它在 1989 年由 Skupsky 等人提出<sup>[7]</sup>, 并在美国罗切斯特大学的 OMEGA 装置和日本 GEKKO XII 装置上得到了应用<sup>[8-10]</sup>. 该项技术目前在国内也正在开展研究<sup>[11]</sup>.

在实际的激光驱动器系统中, SSD 单元置于振

荡器之后, 光束经过多级空间滤波器和放大器实现扩束和放大, 最后通过靶场部分的随机相位板类衍射光学元件照射到靶面, 如图 1 所示<sup>[11]</sup>. SSD 单元内部包含有相位调制器和衍射光栅, 将从振荡器出来的窄带激光的频谱在时间和空间上展开, 即产生光谱色散. SSD 单元的引入增加了激光系统的复杂性, 它必然会改变激光束原来的衍射特性, 对其在后续光路中的传输产生影响, 但在已有的文献中, 关于 SSD 的研究主要集中在光束在靶面的均匀照明及光束在靶面等离子体中的传播, 光谱色散后的光束在激光驱动器链中的传输未见有系统的报道. 为了对“神光 II”装置上 SSD 技术的实际应用提供理论参考, 本文通过数值计算详细研究了经过 SSD 后激光束在近场和远场的衍射特性, 并将其与单色光的传输进行了比较. 文中还分析了 SSD 单元的主要光学元件参数对光束传输特性的影响.

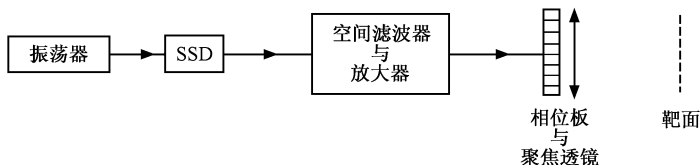


图 1 SSD 单元在激光系统中的位置

\* 国家 863 计划(2003AA842070)资助的课题.

† E-mail: jiang\_x\_j913@sohu.com

## 2. 基本理论

SSD 单元包含电光相位调制器(E-O)和衍射光栅,如图2所示<sup>[7]</sup>.激光脉冲经过E-O后的光场具有如下形式:

$$E_M(t) = A_0 e^{i\omega_0 t + i\delta \sin(\omega_m t)}, \quad (1)$$

其中  $A_0$  为包络振幅,  $\omega_0$  为脉冲中心频率,  $\delta$  和  $\omega_m$  分别为 E-O 的调制深度和圆调制频率(为了描述简明起见,此处的光场表达式隐藏了激光束的空间依赖关系).此光场可用傅里叶级数展开

$$E_M(t) = A_0 \sum_{-\infty}^{+\infty} J_n(\delta) e^{i(\omega_0 + n\omega_m)t}, \quad (2)$$

可见,经过 E-O 后激光频谱以  $\omega_0$  为中心被展宽,其频谱具有分立结构,相邻边频之间的间隔为  $\omega_m$ .  $J_n$  表示第  $n$  阶第一类贝塞尔函数,它是频率为  $\omega_0 + n\omega_m$  的光波分量的振幅.展宽后的频谱宽度可近似表示成  $\Delta\nu = 2\delta\nu_m$ , 其中  $\nu_m = \frac{\omega_m}{2\pi}$ .

经过光栅的光场可写为

$$\begin{aligned} E_D(x, z, t) &= A_0 \sum_n J_n(\delta) e^{i\omega_0 t - ikz + in\left[\omega_m\left(t - \frac{z}{c}\right) + \alpha x\right]}. \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $k = \frac{\omega_0}{c}$  为中心频率光波( $n=0$ )的波数,  $z$  轴与中心频率光波的传输方向平行,  $x$  为与  $z$  轴垂直的横截面坐标(本文只考虑在横向一维产生光谱色散的情况,即 1D-SSD.下文研究光场传输时,也只给出沿  $x$  方向的横向强度分布).参数  $\alpha = 2\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_0}$ , 它是表征空间色散程度的量,其中  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$  是光栅色散系数.从(3)式可知,激光束通过光栅后不同频率的光波成分发生色散而在  $x$  方向被展开.

我们以刚经过 SSD 单元的光场为初始光场( $z=0$ ),研究其沿  $z$  方向的衍射传输特性.为了简化所要研究的问题,忽略激光脉冲时间包络的影响,仅考虑其初始空间强度分布,故初始光场可写为

$$\begin{aligned} E_D(x, 0, t) &= A_0(x) \sum_n J_n(\delta) e^{i\omega_0 t + in(\omega_m t + \alpha x)}, \end{aligned} \quad (4)$$

取  $A_0(x) = e^{-\left(\frac{x}{w_0}\right)^6}$ , 其中  $w_0$  为光束半宽.

将初始光场表达成另一种形式:

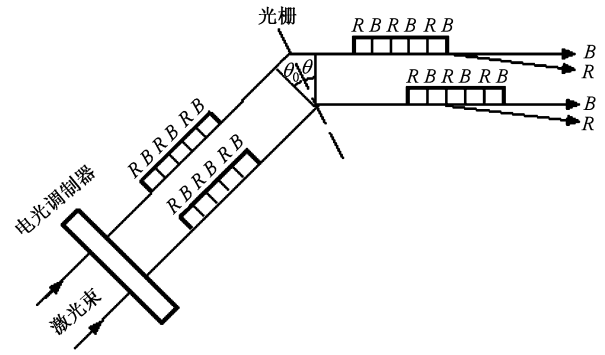


图2 SSD单元的示意图(图中B和R分别表示宽带光束中的高频和低频成分,  $\theta_0$ 和 $\theta$ 分别为光束照射到光栅时的入射角和衍射角)

$$\begin{aligned} E_D(x, 0, t) &= \sum_n J_n(\delta) A_0(x) e^{in\alpha x} e^{i(\omega_0 + n\omega_m)t}, \end{aligned} \quad (5)$$

易见,激光束经过 SSD 后频率为  $\omega = \omega_0 + n\omega_m$  的分量初始空间复振幅为  $E_n(x, 0) = J_n(\delta) A_0(x) e^{in\alpha x}$ .

按照菲涅耳衍射理论,在传输距离为  $z$  处的观察面上的总光场为<sup>[12,13]</sup>

$$E(x, z, t) = \sum_n E_n(x, z) e^{i(\omega_0 + n\omega_m)t}, \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} E_n(x, z) &= \left(\frac{i}{\lambda z}\right)^{1/2} e^{-ikz} \int_{-\infty}^{\infty} E_n(x_0, 0) \\ &\quad \times e^{-\frac{ik}{2z}(x_0 - x)^2} dx_0, \end{aligned} \quad (7)$$

时间  $\Delta t$  内观察面上的平均空间强度分布为

$$I(x, z) = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E(x, z, t)|^2 dt. \quad (8)$$

## 3. 数值计算结果及讨论

### 3.1. 经过 SSD 后光束的基本传输特性

根据上述理论,我们用数值方法对光束经过 SSD 后的衍射传输进行了计算.光束初始横向强度分布取为六阶超高斯型,全束宽 5.5mm,中心波长为  $1.053\mu\text{m}$ .图3是光束典型的演化过程,其近场衍射图样随传输距离发生变化,远场衍射图样趋于稳定,只是图样尺寸随传输距离增大成比例地增大.这种规律与图4所示的单色平面波的演化是相似的.菲涅耳数是判断光学系统衍射效应大小的一个重要物理量<sup>[14]</sup>.经过 SSD 的激光束虽然包含不同的频率成分,但其谱宽很窄(零点几个纳米的量级),故下文用其中心频率光波对应的菲涅耳数  $N$  作为判据来分

析整个激光束的衍射.

通过比较图 3 和图 4 可以发现,在近场区,单色激光束在不同位置有着几乎一样的光斑包络,而经过 SSD 的激光束沿着传输方向逐渐扩散,光斑较单色时的要大.在高功率激光系统中,光束近场空间强度分布均匀性对于保持光束的高性能和提高器件的输出能力具有重要的意义.数值结果表明,有强度畸变的光束经过 SSD 后,不同频率的光波分量近场衍射图样叠加,能使光束整体的近场均匀性得到明显改善,见图 5.

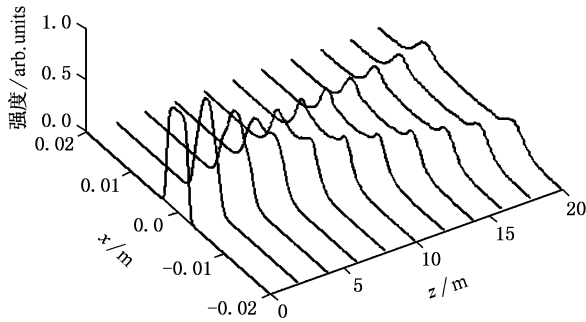


图 3 经过 SSD 的光束随传输距离的演化图 E-O 的调制频率  $\nu_m = 3\text{GHz}$ , 调制深度  $\delta = 10$ , 光栅的色散系数  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 5 \times 10^6 \text{rad/m}$

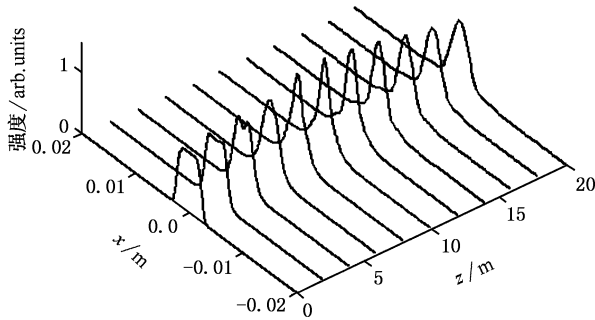


图 4 单色平面波随传输距离的演化图

图 6 是引入 SSD 前后光束在远场某一传输距离处的衍射图样比较图.无 SSD 时,光束远场为爱里斑分布,经过较弱的光谱色散后,光斑在横向略为扩大,光谱色散较强时,光斑进一步变大,其内部一定区域光强接近于均匀分布,而在靠近边缘处出现“肩状”的强度突起.SSD 使不同频率的光波分量在横向展开,故远场光斑变大是容易理解的.光束中包含多种频率分量,它们的传播方向稍有不同,在某一传输距离处,每个分量都形成自己的远场衍射图样,当光谱色散较强时,它们衍射图样的中心位置在横向错开足够的距离,所有这些图样叠加起来,彼此强区和

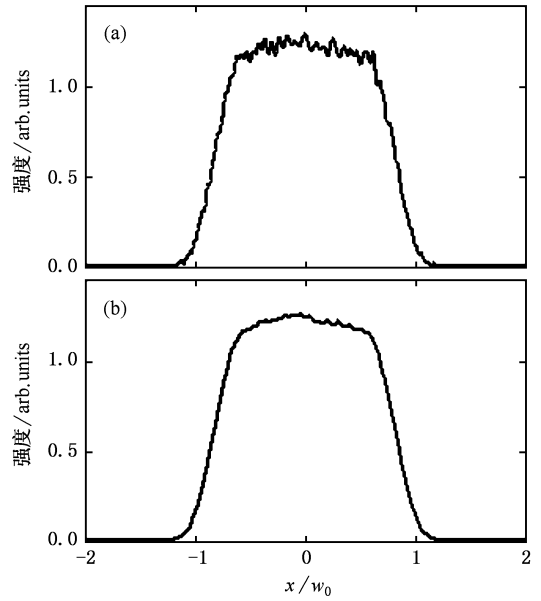


图 5 (a)存在强度畸变的单色激光束近场强度分布 (b)存在强度畸变的激光束经过 SSD 后的近场强度分布,SSD 单元中  $\nu_m = 3\text{GHz}$ ,  $\delta = 10$ ,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 3 \times 10^6 \text{rad/m}$ .近场观察面对应菲涅耳数  $N = 14.4$

弱区恰好互补,光斑内部就形成了强度接近于均匀分布的区域.至于光斑存在“肩状”强度突起,是因为 SSD 中的电光调制器采用正弦型相位调制方式,所得频谱的边频具有较大的强度.

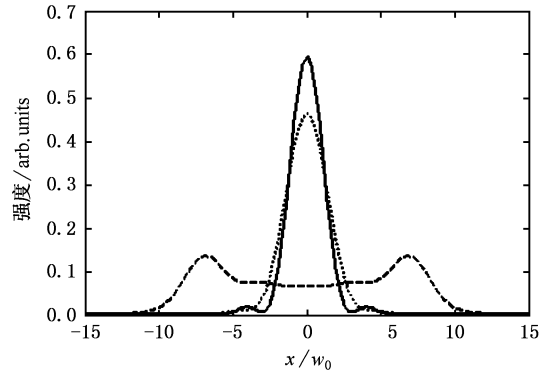


图 6 无 SSD(实线)与有 SSD 时,激光束在远场某一传输距离处的横向强度分布比较.点线表示弱光谱色散的情况( $\nu_m = 3\text{GHz}$ ,  $\delta = 3$ ,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 2.4 \times 10^6 \text{rad/m}$ );虚线表示强光谱色散的情况( $\nu_m = 3\text{GHz}$ ,  $\delta = 10$ ,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 5 \times 10^6 \text{rad/m}$ ).观察面处的菲涅耳数  $N = 0.18$

### 3.2. SSD 单元参数对光束衍射特性的影响

由(5)式可知,通过 SSD 后的光场受到几个参数的影响,它们分别是 E-O 的调制深度  $\delta$ 、调制频率

$\nu_m$  及光栅的衍射常数  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$ . 下面研究这些参数如何影响光束的传输特性. 由于远场的衍射图样不随传输距离变化, 比较便于作对照, 本文主要讨论这一区域的光束特性.

$\delta$  和  $\nu_m$  对光束远场横向强度分布的影响分别见图 7 和图 8. 如图所示,  $\delta$  加大或  $\nu_m$  升高, 光束在一定传输距离处都会被展得越宽. 激光束的带宽  $\Delta\nu = 2\delta\nu_m$ , 增大  $\delta$  或提高  $\nu_m$  都加大了光束带宽, 可见, 当 SSD 单元中的光栅元件选定以后, 激光束的频谱越宽, 它在之后的传输过程中发散得越快. 但以上两图中的数值结果同时表明, 通过增大  $\delta$  和提高  $\nu_m$  这两种途径来增加带宽, 对光束衍射的影响并不完全相同. 具体表现为, 增大  $\delta$  时, 在特定的传输距离处光斑变大, 光斑中心附近强度均匀分布的面积也变大. 但是提高调制频率  $\nu_m$  时, 光斑的强度均匀分布区并没有单调地随整个光斑的增大而增大, 因为光斑内部会出现明显的强度调制. 在图 8(d) 所示的参数条件下, 光斑内部已经完全没有光强均匀分布的区域.

光栅色散系数  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$  对光束传输特性的影响见图 9. 易见, 频谱宽度一定的激光束通过光栅, 光栅色散

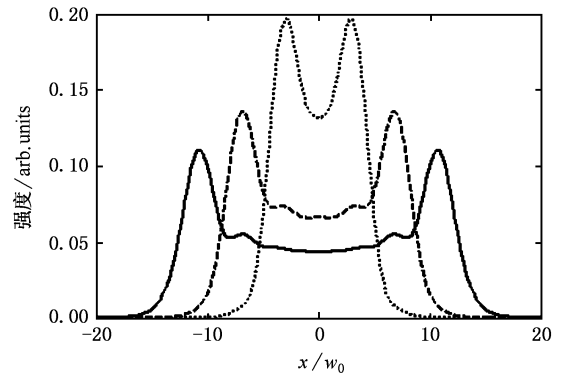


图 7 不同调制深度时, 光束在远场某一传输距离处横向强度分布的比较. 点线、虚线和实线分别对应于调制深度为 5, 10 和 15. 其他参数为  $\nu_m = 3\text{GHz}$ ,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 5 \times 10^6 \text{rad/m}$ . 观察面处菲涅耳数  $N = 0.18$

系数越大, 激光束也会被展得越宽. 图 9(a) 所示的是 SSD 单元中只有 E-O 但不加光栅元件时, 光束在远场某点处的光强分布, 该衍射图样实际上与激光系统中完全没有 SSD 单元时差别不大, 这是因为相位调制器只将光束的频谱展宽到零点几个纳米, 当没有光栅所产生的空间色散作用时, 如此窄的带宽对光束传输的影响很微小. 从图 9(d) 还可以看出, 当色散系数取较大值时, 光斑内部也存在较强的强

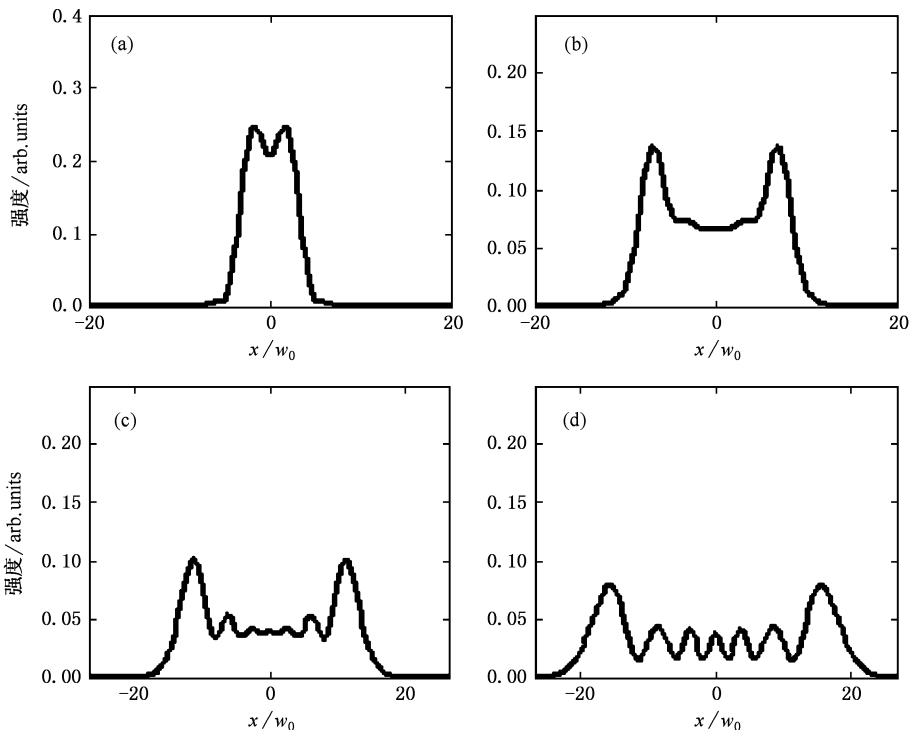


图 8 不同调制频率时, 光束在远场某一传输距离处横向强度分布的比较. (a) (b) (c) 和 (d) 分别对应于调制频率为 1GHz, 3GHz, 5GHz 和 7GHz. 其他参数为  $\delta = 10$ ,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = 5 \times 10^6 \text{rad/m}$ . 观察面处菲涅耳数  $N = 0.18$

度调制.

E-O 的调制频率升高或者光栅色散系数增大都会造成光斑内部的强度调制,其物理机理可作如下分析.如(3)式和图 2 所示,经过 SSD 单元后不同频率的光波在  $x$  方向被展开,或者说,瞬时频率沿  $x$  方向变化,其变化周期为  $X = 2\pi/\alpha$ .当  $X$  小于光束直径时,某一时刻光束中频率相同的光波成分会出现一次以上,这就是所谓的“色循环”现象<sup>[7]</sup>.由上文可知  $\alpha = 2\pi \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\omega_m}{\omega_0}$ ,所以 E-O 的圆调制频率  $\omega_m$  或光

栅的衍射常数  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$  增大,光束频率横向空间变化周期都会减小,这意味着在光束直径一定的情况下,“色循环”次数增多,或者说光束中同一频率的光波成分会多次出现.频率相同的光波叠加会产生稳定的干涉结构,正是光束中的这种相干叠加造成了光斑内部的强度调制.在应用 SSD 实现靶面均匀辐照时,需要采用合适的色循环数来实现较优的光束平滑效果,具体可见文献 7 和 [11].

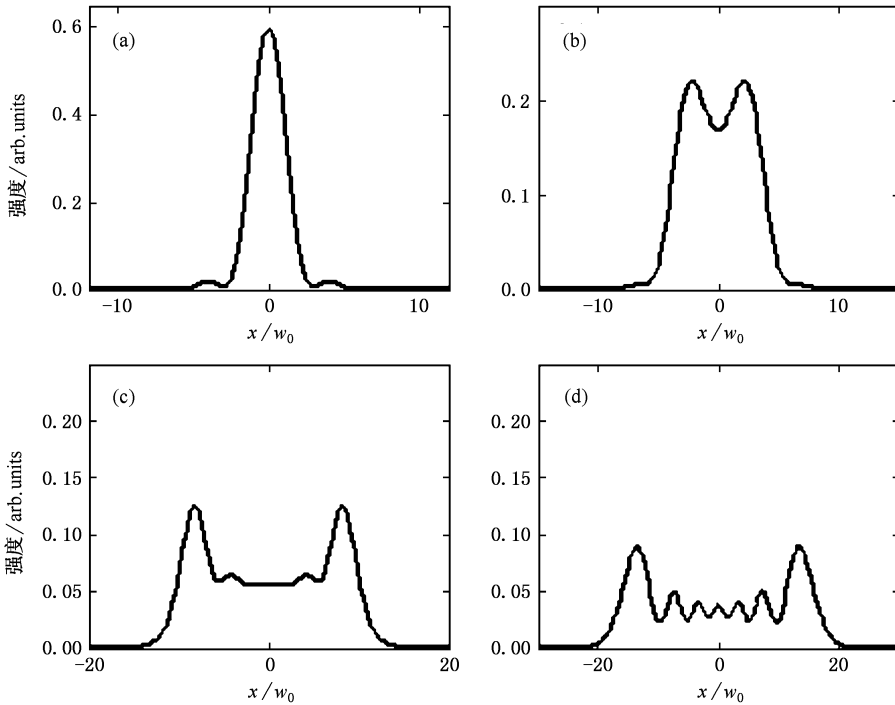


图 9 不同光栅色散系数时,光束在远场某一传输距离处横向强度分布的比较 (a)(b)(c)和(d)分别对应于光栅色散系数为  $0, 1 \times 10^6 \text{ rad/m}, 3 \times 10^6 \text{ rad/m}$  和  $5 \times 10^6 \text{ rad/m}$ .其他参数为  $\nu_m = 6\text{GHz}, \delta = 10$ .观察面处菲涅耳数  $N = 0.18$

### 3.3. 数值结果与实验结果的比较

美国罗切斯特大学的 OMEGA 装置从实验上观测过激光束经过 2D-SSD 后的远场图像<sup>[9]</sup>,见图 10. 2D-SSD 采用两套如图 2 所示的 SSD 单元(两单元中调制频率不等,光栅色散方向互相垂直),激光束通过后,将在互相垂直的两个方向上产生光谱色散.图 10 所示的激光束在两个方向上获得的频谱宽度不相等,分别为  $0.15\text{nm}$  和  $0.09\text{nm}$ ,该图像是光束经过 2D-SSD 的最后一块光栅后的远场.由该图可得以下结论:1)光束在某个方向的色散展宽程度与其在该方向上的频谱宽度成比例;2)某一方向的最大强度出现在边缘区域,即呈“肩状”强度突起;3)光束内部

光强分布出现周期性的强度调制,频谱越宽,调制峰越多.前文所得的远场数值结果与这些结论一致,说明本文进行的理论计算是可靠的.

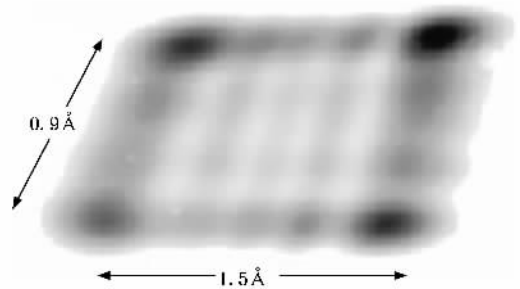


图 10 OMEGA 装置中激光束经过 2D-SSD 后的远场图像

## 4. 结 论

从理论上详细研究了激光驱动器中加入 SSD 单元后光束的衍射特性. 结果显示, 经过光谱色散后, 光束衍射光斑变大, 近场均匀性得到改善, 远场光斑中心附近出现光强接近于均匀分布的区域. 文中还对 SSD 单元中各主要元件参数对光束传输的影响进行了分析. 数值结果表明, 光束的频谱越宽或光栅的色散系数越大, 光束在经过光谱色散后就被

展得越宽, 在一定条件下, 可在光斑内部获得较大的强度均匀分布区. 加大相位调制器的调制深度或提高其调制频率可获得较大的光束带宽, 但这两种方式对光束衍射特性的影响不尽相同. 由于色循环现象的存在, 调制频率提高或者光栅色散系数增大会使远场光斑内部产生强度调制. 因此, 在实际应用 SSD 时, 要合理地选择元件参数以获得理想的光束传输效果. 本文所得结论为 SSD 技术在“神光 II”装置上的应用提供了理论参考.

- 
- [ 1 ] Skupsky S, Lee K 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 3662
- [ 2 ] Desselberger M, Afshar-rad T, Khattak F *et al* 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 1539
- [ 3 ] Cheng J X, Zhen Z J, Chen H S *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3419 ( in Chinese ) [ 成金秀、郑志坚、陈红素等 2004 物理学报 **53** 3419 ]
- [ 4 ] Deng X, Liang X, Chen Z *et al* 1986 *Appl. Opt.* **25** 377
- [ 5 ] Rothenberg J E 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 1664
- [ 6 ] Xiao J, Lü B D, Zhang B 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 1891 ( in Chinese ) [ 肖 峻、吕百达、张 彬 1999 物理学报 **48** 1891 ]
- [ 7 ] Skupsky S, Short R W, Kessler T *et al* 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [ 8 ] Regan S P, Marozas J A, Kelly J H *et al* 2000 *J. Opt. Soc. Am. B* **17** 1483
- [ 9 ] *Laboratory for Laser Energetics ( LLE ) Review* 1996 **69** 1
- [ 10 ] Miyanaga N, Nakatsuka M, Kanabe T *et al* 1995 *Laser Interaction with Matter. Proceedings of the 23rd European Conference* : 81-4
- [ 11 ] Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J *et al* 2005 *Chin. J. Lasers* **32** 341 ( in Chinese ) [ 周申蕾、林尊琪、朱 俭等 2005 中国激光 **32** 341 ]
- [ 12 ] Siegman A E 1986 *Lasers* ( California : University Science Books ) p634
- [ 13 ] Lü B D 1999 *Propagation and control of high-power lasers* ( Beijing : National Defence Industry Press ) p22 ( in Chinese ) [ 吕百达 1999 强激光的传输与控制 北京 : 国防工业出版社 ] 第 22 页 ]
- [ 14 ] Parent A, Morin M, Lavigne P 1992 *Optical and Quantum Electronics* **24** S1071

# Research on the diffraction characteristics of phase modulated laser beams dispersed spectrally<sup>\*</sup>

Jiang Xiu-Juan<sup>1)†</sup> Zhou Shen-Lei<sup>1)</sup> Lin Zun-Qi<sup>1)</sup> Zhu Jian<sup>2)</sup>

1) *National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

2) *Shanghai Institute of Laser Plasmas, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China*

( Received 29 September 2005 ; revised manuscript received 23 February 2006 )

## Abstract

It is simulated numerically the transmission of beams phase modulated and spectrally dispersed by the unit for smoothing by spectral dispersion put in the laser driver for inertial confinement fusion. The results show that the diffraction spot of a spectrally dispersed beam becomes larger and its near-field uniformity is improved, while there exists area where the intensity is nearly even within the far-field spot. The effects of the main parameters of the electro-optic phase modulator and the grating in the unit on the diffraction characteristics of the beams are further discussed, and it is found that intensity modulation emerges in the far-field spot under some conditions.

**Keywords** : smoothing by spectral dispersion, diffraction, near-field, far-field

**PACC** : 4225B, 4230K

<sup>\*</sup> Project supported by the National 863 Project ( Grant No. 2003AA842070 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : jiang\_x\_j913@sohu.com