

## 小宽带光谱色散匀滑光束传输特性研究

刘兰琴 张颖 耿远超 王文义 朱启华 景峰 魏晓峰 黄晚晴<sup>†</sup>

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2014年2月20日收到; 2014年3月25日收到修改稿)

利用激光聚变研究中心自主开发的小宽带传输放大软件对小宽带光谱色散匀滑(SSD)光束进行具有“时间、空间、光谱分辨”的传输模拟,研究了SSD光束通过空间滤波器和自由空间的传输特性.给出了时间、空间、光谱的对应分布图,对比分析了SSD光束与非SSD光束的传输效应.研究结果对于合理设计SSD光束的发散角与空间滤波器小孔之间的匹配关系、选择适宜的调制频率,以及选择束匀滑色循环数等都有重要意义,同时对于光路设计特别是细光束自由传输距离的设计具有指导意义.

**关键词:** 光谱色散匀滑, 传输特性, 空间滤波器, 菲涅耳衍射

**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Fx, 42.60.Jf, 42.60.-v

**DOI:** 10.7498/aps.63.164201

## 1 引言

在惯性约束聚变研究中,为了尽可能抑制聚变靶丸压缩过程中产生的瑞利-泰勒流体力学不稳定性、等离子体不稳定性以及参量不稳定性(受激拉曼散射,受激布里渊散射)等<sup>[1-3]</sup>,阻止靶丸提前垮掉,或降低压缩过程中的能量散射损失,必须尽可能采用各种束平滑措施实现靶面均匀辐照<sup>[4-7]</sup>,实现靶面均匀辐照的核心技术是束匀滑.同时,为了抑制大口径光学元件中的横向受激布里渊散射<sup>[8,9]</sup>,保证驱动器自身安全稳定运行,要求激光脉冲具有一定的带宽.目前,比较常用的束匀滑技术路线为具有一定带宽的相位调制脉冲、光谱色散匀滑(SSD)<sup>[10]</sup>和连续位相板(CPP)<sup>[11,12]</sup>相结合技术路线,通过SSD实现时域匀滑,通过CPP实现空域匀滑.

但是,相位调制脉冲结合SSD的光束(以下简称SSD光束)与窄带脉冲相比具有完全不同的传输特性:光谱色散使焦斑变大进而影响空间滤波器过孔等.此外,调频到调幅转变(FM-to-AM)效应<sup>[13]</sup>是相位调制脉冲最为显著的特征.FM-to-AM效应是指经过相位调制具有一定带宽的信号,在传输过

程中由于光谱畸变而出现时间调制的现象.这种效应会带来一系列严重的后果<sup>[14]</sup>,如导致光学元件损伤、使得光束间的辐照不均匀、影响打靶脉冲的时间整形、放大了等离子体的不稳定性等.

美国罗彻斯特大学激光工程实验室(LLE)主管McCrory<sup>[15]</sup>认为,SSD技术的重要性可与20世纪70年代后期美国里弗莫尔国家实验室(LLNL)发展的空间滤波技术的重要性相比拟——空间滤波技术“挽救”了一代固体激光器.

关于SSD光束传输特性研究的资料比较少,美国LLNL主要在Beamlet装置上进行了SSD光束色散角对过孔及光束质量影响的实验<sup>[16]</sup>,研究认为对主放大级而言,SSD光束发散角增大,光束质量下降,而对预放大级SSD光束发散角的影响较小,同时还进行了B积分实验研究<sup>[17]</sup>.在美国国家点火装置和OMEGA装置上进行的大多数是关于SSD光束在束匀滑应用方面的研究<sup>[18-21]</sup>.国内方面,李菁辉等<sup>[22]</sup>报道了选取不同尺寸的空间滤波器小孔对SSD效果的影响研究,但仅限于前级滤波小孔谱截止对滤波小孔处光束匀滑效果的影响,未考虑光传输系统的影响以及最后对靶面匀滑效果的影响.江秀娟等<sup>[23]</sup>用一维算法研究了激光驱动

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: yellow-monkey@163.com

器系统中使用 SSD 单元后光束的衍射特性, 分析了 SSD 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. 文献 [24—27] 分别报道了 SSD 光束光谱色散均匀实验研究的进展.

本文研究了小宽带 SSD 光束的传输特性, 研究结果可用于验证实验结果, 指导实验运行.

## 2 SSD 光束产生原理

SSD 光束的产生原理如图 1 所示. 假设初始光场为  $E_0(x, y, t)$ , 经过光栅 G1 后引入时间畸变, 光场变为  $E_0(x, y, t - \xi x)$ , 再经过一级相位调制器调制后, 光场变为

$$E_0(x, y, t - \xi x) \exp[i\delta \sin(2\pi f_m t)],$$

其中,  $f_m$  为调制频率,  $\delta$  为调制深度, 频宽  $\Delta v = 2\delta f_m$ .

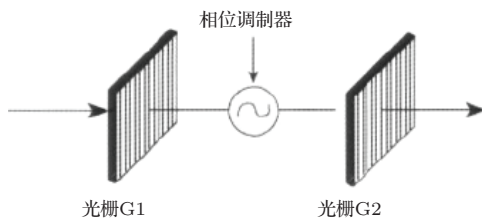


图 1 SSD 光束产生原理图

光栅 G2 用于补偿 G1 引入的时间畸变, 同时把光场色散, 通过 G2 后的光场为

$$E(x, y, t) = E_0(x, y, t) \exp\{i\delta \sin[2\pi f_m(t + \xi x)]\}, \quad (1)$$

式中,  $\xi$  为光栅角色散,  $\xi = \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} \cdot \frac{\lambda}{c}$ , 其中,  $\frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda}$  为光栅色散系数,  $\lambda$  为激光波长,  $c$  为真空中光速,  $\Delta\lambda$  为光谱宽度. (1) 式为 SSD 产生的光场.

对于 SSD 光束, 可以认为每一时间片的每一空间点对应单一的频率. 由 (1) 式可知, SSD 光束的初始相位为

$$\varphi = \delta \sin[2\pi f_m(t + \xi x)]. \quad (2)$$

由此可知,  $\varphi$  是时空耦合的. 若光束口径为  $a$ , 定义色循环数  $N_c = a\xi f_m$ , 它表示空间相位分布周期数, 其中  $t_D = a\xi$  为延迟时间.

## 3 SSD 光束通过空间滤波器的传输模拟

### 3.1 计算参数

如图 2 所示, SSD 光束通过菲涅耳数为 30.85 的一组空间滤波器. 计算所用软件为激光聚变研究中心自主开发的小宽带传输软件 FMPAP, 此软件能够解决具有“时间、空间、光谱分辨”的 SSD 光束传输问题. 数值模拟基本参数为激光中心波长为 1053 nm, 空间光束为方形 8 阶超高斯光束, 光束口径为 46 mm, 光谱宽度为 0.3 nm, 光栅刻线为  $635 \text{ l}\cdot\text{mm}^{-1}$ , 调制器调制频率为 9.2 GHz, 色循环数为 1.

经过空间传输后, SSD 光束的角色散为  $2.35 \text{ ns/m}$ , 发散角为  $202 \mu\text{rad}$ , 延迟时间为  $108.70 \text{ ps}$ .

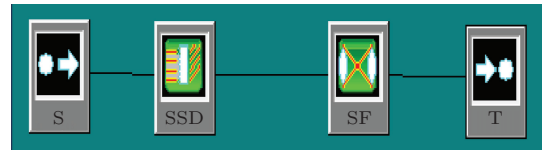


图 2 SSD 光束经过空间滤波器的计算光路图 (S 是光源, SSD 是由光栅 G1、相位调制器和光栅 G2 组成, SF 是空间滤波器, T 是目标)

光束的空间自由衍射传输可由薛定谔方程 [28] 简化得到:

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \frac{i}{2k} \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} \right). \quad (3)$$

### 3.2 空间滤波器对 SSD 光束的滤波效果

图 3 给出了 SSD 光束和非 SSD 光束通过空间滤波器不同滤波小孔的近场对比度  $C$ 、近场功率谱密度 (PSD) 曲线、透过率  $T$  以及近场调制度  $M$ . 其中 DL 表示衍射极限, 其大小为艾里斑直径.

由图 3 可知: 相对于非 SSD 光束, SSD 光束通过空间滤波器系统时, 当空间滤波小孔在 40 DL 以上时, 两者近场对比度没有明显差别; 在 40 DL 以下, SSD 光束近场对比度比非 SSD 光束近场对比度小一些, 说明 SSD 对近场有一定的平滑作用. 比较两者通过 30 DL 小孔的近场 PSD 曲线可见, 导致均匀的原因是 SSD 光束的发散角比非 SSD 光束的发散角大, 通过滤波小孔时, 更多的近场高频成分被小孔滤去, 使得近场更为均匀. 从图 3(c) (上轴

为截止频率, 右轴为两者的透过率之差  $\Delta T$ ) 可以看出, SSD 光束与非 SSD 光束相比, 被小孔滤掉的成分多, 故透过率低. 而近场调制度相比于近场对比度, SSD 光束与非 SSD 光束两者的差异特征并不明显.

通过以上分析, 结合激光传输中的非线性效应, 在能量损耗可容忍的程度下, 可利用一定发散角的 SSD 光束来规避非线性的最快增长频率, 但同时也要注意 SSD 光束的发散角与空间滤波器小孔之间的匹配关系. 在 SSD 光束发散角比较小 (9.2 GHz 调制器的发散角为 5.11 DL) 时, 对近场对

比度、近场 PSD 曲线、透过率以及近场调制度的影响都比较小; 但当 SSD 光束发散角比较大 (2 GHz 调制器的发散角为 23.52 DL) 时, 其作用非常明显.

图 4 给出了 SSD 光束和非 SSD 光束通过空间滤波器 30 DL 滤波小孔后的近场图, 图 4 (a) 为模拟光源光场分布, 图 4 (b) 为不加 SSD 的光场分布, 图 4 (c) 为加 SSD 的光场分布. 由图 4 可见, 经过空间滤波器后的光场与不加 SSD 的光场相比, 场强分布更为匀滑. 需要说明的是, 这里调制器调制频率为 2 GHz, 因为色散量较大, 对近场的作用比较明显.

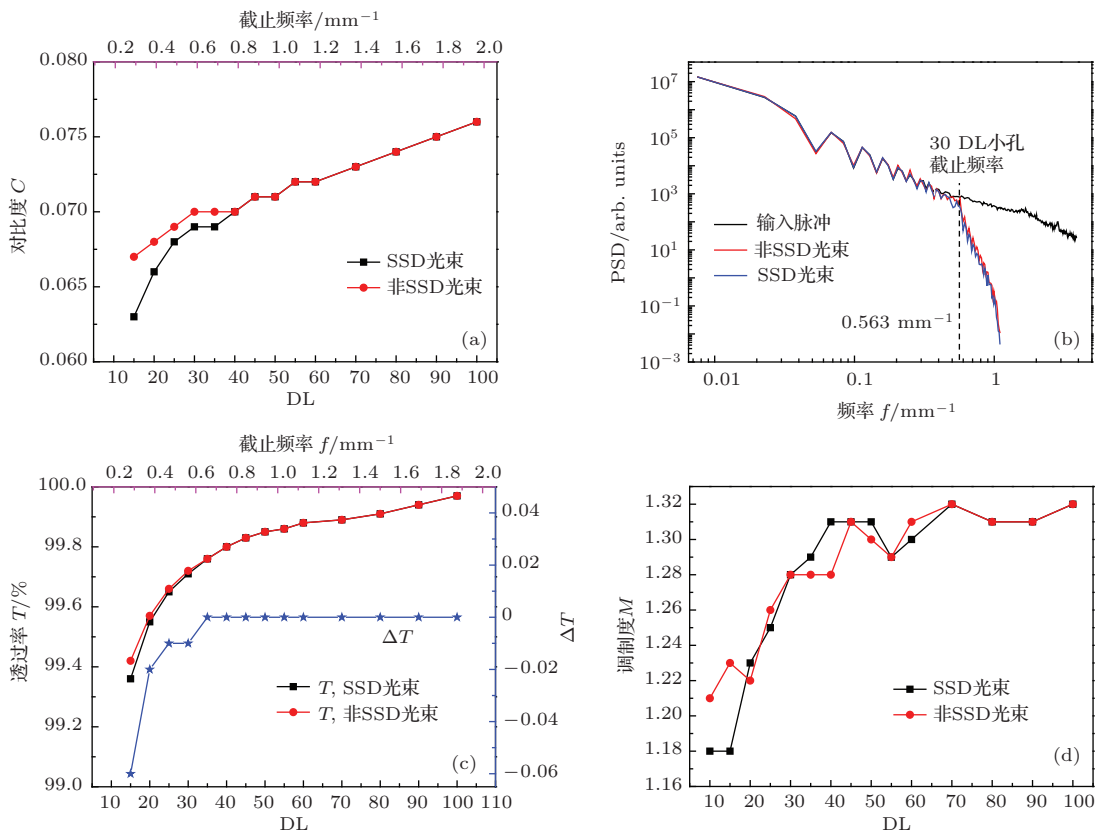


图 3 (网刊彩色) SSD 光束和非 SSD 光束通过空间滤波器的近场特性比较 (a) 通过不同滤波小孔的近场对比度; (b) 通过 30 DL 小孔的近场 PSD 曲线; (c) 通过不同滤波小孔的透过率; (d) 通过不同滤波小孔的近场调制度

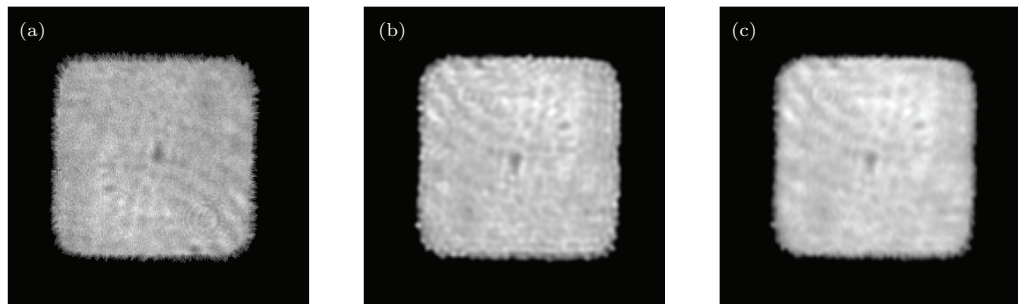


图 4 经过空间滤波器前后的近场分布 (a) 光束近场 ( $M = 1.32$ ,  $C = 0.076$ ); (b) 30 DL 下非 SSD 光束 ( $M = 1.28$ ,  $C = 0.07$ ); (c) 30 DL 下 SSD 光束 ( $M = 1.23$ ,  $C = 0.061$ )

## 4 SSD 光束衍射传输模拟

### 4.1 不同调制频率对 SSD 光束的调制影响

SSD 光束在传输中会因为光栅色散而形成光束扫动, 具有时空耦合特性, 因此, 不可避免地存在时间和空间的瞬态调制. 在物理需求的光谱宽

度  $\Delta\lambda$  和色循环数  $N_c$  一定的情况下, 相位调制器的调制频率  $f_m$  是 SSD 光束要选择的一个重要参数. 图 5 给出了在  $x$  方向对不同调制频率的 SSD 光束加光栅色散时瞬时强度的时间和空间分布, 也给出了光束中心点的时间脉冲与光谱的对应关系. 计算参数: 光束口径为  $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ , 传输距离为  $4\text{ m}$ , 菲涅耳数为  $95$ , SSD 光束  $N_c = 1$ .

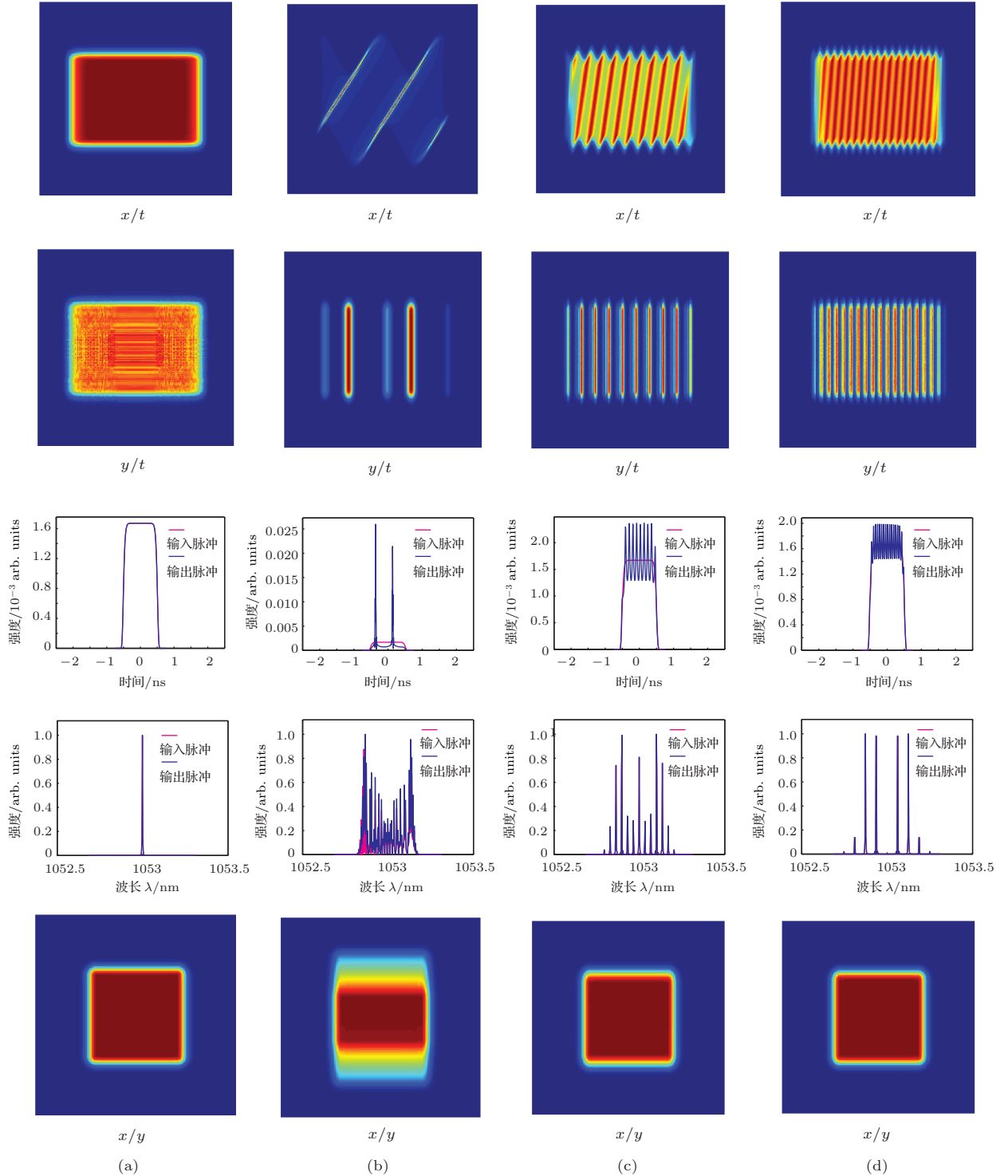


图 5 (网刊彩色) 不同调制频率对 SSD 光束的调制影响 (a) 窄带光; (b) 调制频率为 2 GHz; (c) 调制频率为 9.2 GHz; (d) 调制频率为 17 GHz

由图5可见, 相比于窄带光束, SSD 光束在时间维度上具有明显的调制. 色循环数相同的 SSD 光束瞬态调制周期是调制频率的倒数, 瞬态调制深度会随着调制频率的增大而减弱, 近场强度分布在调制频率较低时发生严重畸变, 光束具有明显的发散效应, 调制器调制频率越高, 影响越小. 究其原因都是因为低调制频率的光束发散角大. 因此, 选用较高的调制频率能够将光束的时空调制及近场控制在可接受的程度.

### 4.2 菲涅耳数对 SSD 光束的调制影响

高功率激光束在自由空间传输会发生衍射, 通常用菲涅耳数  $F\#$  表示 [29,30],

$$F\# = \frac{a^2}{\lambda Z}, \quad (4)$$

式中,  $a$  为光束口径,  $\lambda$  为激光波长,  $Z$  为传输距离,  $F\#$  是决定光束衍射传输性质的关键变量. 图6给出了菲涅耳数对 SSD 光束的调制影响, 主要计算参数同前. 从图6可以看出, 相比于窄带光束, SSD 光

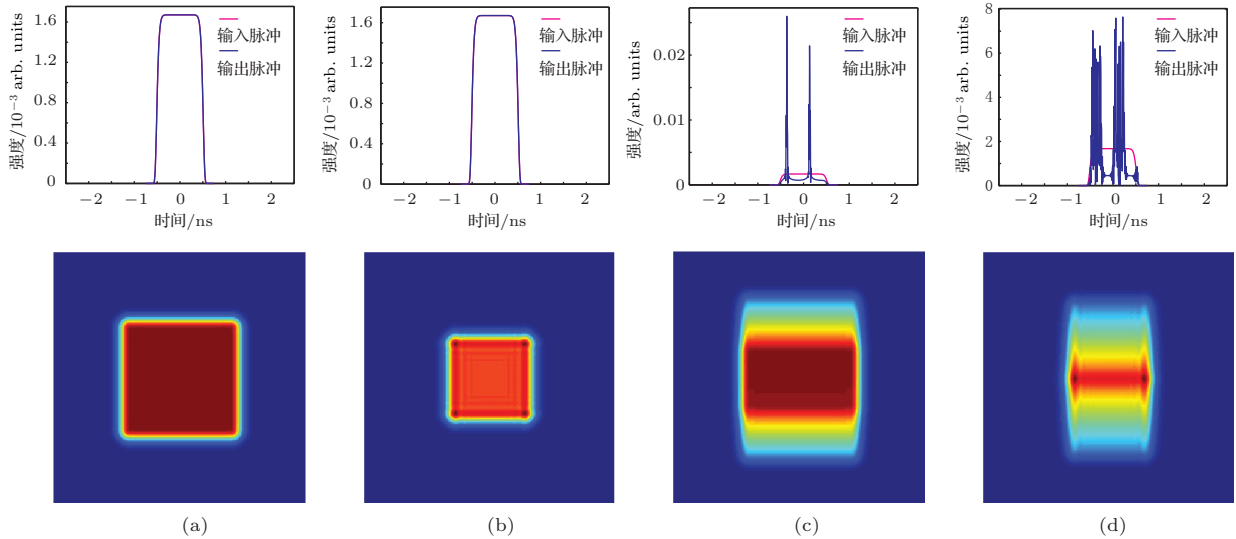


图6 (网刊彩色) 不同菲涅耳数下窄带光和 SSD 光束的时间瞬态调制和近场分布比较 (对应光束口径为 20 mm) (a) 窄带光传输,  $F\# = 95$ ; (b) 窄带光传输,  $F\# = 47$ ; (c) 2 GHz 传输,  $F\# = 95$ ; (d) 2 GHz 传输,  $F\# = 47$

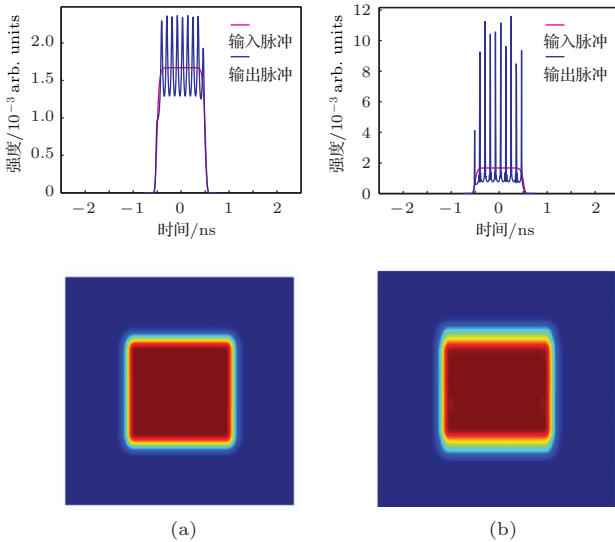


图7 (网刊彩色) 色循环数对 SSD 光束的影响 (调制频率为 9.2 GHz) (a)  $N_c = 1$ ; (b)  $N_c = 2$

束由于光谱色散具有明显的空间发散效应. 同时, 随着菲涅耳数的减小, 衍射效应加强, SSD 光束的时间瞬态调制加剧. 因此, 必须采用像传递光路避

免衍射传输距离较长, 同时要采样较小的 SSD 控制时空调制的增长.

### 4.3 色循环数对 SSD 光束的调制影响

色循环数是 SSD 光束的一个重要参数, 色循环数同样也会影响衍射传输特性. 从图7可以看到, 色循环数越大, 时间瞬态调制越大, 近场发散越严重. 文献[1]已研究证明, 选色循环数  $N_c = 1$  可获得很好的匀滑效果, 并未发现更大的色循环数会获得更好的匀滑效果. 从自由传输角度看, 色循环数越大反而对传输有害无益.

## 5 结 论

本文研究了空间滤波器对 SSD 光束的滤波效果以及 SSD 光束衍射传输特性, 研究发现: SSD 光束相比于非 SSD 光束, 由于光谱色散光束具有一定的发散角, 因此, 在通过空间滤波器小孔时会部



分高频成分滤掉, 改变光束的截止频率. 特别是小孔比较小的情况下, 虽然表现为近场对比度、近场 PSD 曲线较好, 但也会影响到系统透过率, 所以需要合理设计 SSD 光束的发散角与空间滤波器小孔之间的匹配关系; 色循环数相同的 SSD 光束瞬态调制随着调制频率的增大而减弱, 因此, 选用较高的调制频率能够将光束的时空调制控制在可接受的程度; 随着菲涅耳数的减小, 光束衍射效应加强, SSD 光束由于光谱色散具有明显的空间发散效应, 其时间脉冲的瞬态调制会加剧. 因此, 必须采用像传递光路避免衍射传输距离较长, 同时要采样较小的 SSD 控制时空调制的增长; 色循环数越大, 时间瞬态调制越大, 近场发散越严重. 色循环数为 1 基本上能够满足物理对束匀滑的需求, 色循环数越大反而对传输有害无益. 通过以上研究, 使我们对 SSD 光束传输特性有了更进一步的认识, 研究结果不仅能够指导实验工作, 同时将为束匀滑研究提供设计参考价值.

## 参考文献

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [2] Rose H A, Mounaix P 2011 *Phys. Plasmas* **18** 042109
- [3] Hüller S, Porzio, Robiche J 2013 *New J. Phys.* **15** 025003
- [4] McCrory R L 1993 *Laser Phys.* **3** 1088
- [5] Skupsky S, Craxton R S 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2157
- [6] Zhang R, Li P, Su J Q, Wang J J, Li H, Geng Y C, Liang Y, Zhao R C, Dong J, Lu Z G, Zhou L D, Liu L Q, Lin H H, Xu D P, Deng Y, Zhu N, Jing F, Sui Z, Zhang X M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054204 (in Chinese) [张锐, 李平, 粟敬钦, 王建军, 李海, 耿远超, 梁樾, 赵润昌, 董军, 卢宗贵, 周丽丹, 刘兰琴, 林宏旻, 许党朋, 邓颖, 朱娜, 景峰, 隋展, 张小民 2012 物理学报 **61** 054204]
- [7] Kyrakis D T, Weiland T L 1991 *Proc. SPIE* **1441** 469
- [8] Ge Z M, Lü Z W, Cai J W, Ao S Y, Luo Y H 2006 *Chin. Phys.* **15** 2343
- [9] Hang W, Huang W Q, Li K Y, Wang F, Feng B, Jia H T, Li F Q, Xiang Y, Jing F 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 124205
- [10] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [11] Marozas J A 2007 *J. Opt. Soc. Am. A* **24** 74
- [12] Néauport J, Ribeyre X, Daurios J, Valla D, Lavergne M 2003 *Appl. Opt.* **42** 2377
- [13] Chen Y, Qian L J, Zhu H Y, Fan D Y 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 044209
- [14] Geng Y C 2010 *M.S. Thesis* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics Graduate Department) (in Chinese) [耿远超 2010 硕士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院研究生部)]
- [15] LLNL-LLE Partnership [https://www.llnl.gov/str/pdfs/06\\_99.3.pdf](https://www.llnl.gov/str/pdfs/06_99.3.pdf) [1999-06-19]
- [16] Rothenberg J E, Moran B D, Henesian M, van Wontterghem B 1997 UCRL-JC-124506
- [17] Rothenberg J E, Auerbach J M, Moran B D, Murray J E, Weiland T L, Wegner P J 1999 *Proc. SPIE* **3492** 970
- [18] University of Rochester Laboratory for Laser Energetics 1999 *LLE Review Quarterly Report* **79** 149
- [19] University of Rochester Laboratory for Laser Energetics 1999 *LLE Review Quarterly Report* **80** 197
- [20] University of Rochester Laboratory for Laser Energetics 2000 *LLE Review Quarterly Report* **85** 39
- [21] Depierreux S, Labaune C, Michel D T, Stenz C, Nicolaï P, Grech M, Riazuelo G, Weber S, Riconda C, Tikhonchuk V T, Loiseau P, Borisenko N G, Nazarov W, Hüller S, Pesme D, Casanova M, Limpouch J, Meyer C, Di-Nicola P, Wrobel R, Alozy E, Romary P, Thiell G, Soullié G, Reverdin C, Villette B 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 195005
- [22] Li J H, Zhang H J, Zhou S L, Feng W, Zhu J, Lin Z Q 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 827 (in Chinese) [李菁辉, 张琥杰, 周申蕾, 冯伟, 朱俭, 林尊琪 2010 光学学报 **30** 827]
- [23] Jiang X J, Zhou S L, Lin Z Q, Zhu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4595 (in Chinese) [江秀娟, 周申蕾, 林尊琪, 朱俭 2006 物理学报 **55** 4595]
- [24] Feng W, Li J H, Zhou S L, Zhang H J, Wu R, Jiang Y E, Zhu J, Ma W X 2012 *Laser Optoelectron. Prog.* **49** 053001 (in Chinese) [冯伟, 李菁辉, 周申蕾, 张琥杰, 邬融, 姜有恩, 朱俭, 马伟新 2012 激光与光电子学进展 **49** 053001]
- [25] Zhang R, Wang J J, Su J Q, Liu L Q, Deng Q H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1088 (in Chinese) [张锐, 王建军, 粟敬钦, 刘兰琴, 邓青华 2010 物理学报 **59** 1088]
- [26] Zhang R, Wang J J, Su J Q, Liu L Q, Ding L, Tang J, Liu H, Jing F, Zhang X M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6290 (in Chinese) [张锐, 王建军, 粟敬钦, 刘兰琴, 丁磊, 唐军, 刘华, 景峰, 张小民 2010 物理学报 **59** 6290]
- [27] Zhang R, Su J Q, Wang J J, Liu L Q, Li P, Jing F, Zhang X M, Xu L M, Ming H 2011 *Appl. Opt.* **50** 687
- [28] Yin Y L, Ding S Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 060205
- [29] Parent A, Morin M, Lavigne P 1992 *Opt. Quant. Electron.* **24** S1071
- [30] You K M, Hu W, Guo H, Liu C Y 2001 *Acta Photon. Sin.* **30** 120 (in Chinese) [游开明, 胡巍, 郭弘, 刘承宜 2001 光子学报 **30** 120]

# Propagation characteristics of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion in high power laser system

Liu Lan-Qin   Zhang Ying   Geng Yuan-Chao   Wang Wen-Yi   Zhu Qi-Hua  
Jing Feng   Wei Xiao-Feng   Huang Wan-Qing<sup>†</sup>

(Research Center of the Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

( Received 20 February 2014; revised manuscript received 25 March 2014 )

## Abstract

In this paper, we numerically study the propagation characteristics through spatial filter and free space of small-bandwidth pulsed beams with smoothing by spectral dispersion (SSD) in high power solid-state laser system. The numerical simulation with time-, space- and spectrum-resolution is achieved by using laser propagation and amplification software developed by Research Center of the Laser Fusion. The graphs of corresponding time-, space- and spectrum-distribution are presented, and the propagation characteristics between the SSD and non-SSD beam are compared. Besides, the effects of some SSD parameters on the diffraction propagation are further discussed. The results can help to choose the proper beam divergence of SSD which matches with the size of the spatial filter hole, to design the appropriate modulation frequency and the color circle number and so on. Moreover, it could guide the design of the light path, especially the design of free space propagation of small-diameter laser.

**Keywords:** smoothing by spectral dispersion, propagation characteristics, spatial filter, Fresnel diffraction

**PACS:** 42.25.Bs, 42.25.Fx, 42.60.Jf, 42.60.-v

**DOI:** [10.7498/aps.63.164201](https://doi.org/10.7498/aps.63.164201)

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [yellow-monkey@163.com](mailto:yellow-monkey@163.com)