

多光束消偏振叠加对焦斑特性的影响

孟庆龙, 钟哲强, 李泽龙, 张彬

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 在惯性约束聚变(ICF)驱动器设计中,利用正交偏振板改变光束内部偏振态,实现靶面消相干叠加,以进一步改善靶面辐照均匀性。建立了正交偏振板的透过率函数,分别对单光束和多光束叠加两种情况下的焦斑偏振特性及均匀性进行数值模拟和分析。结果表明,利用正交偏振板能较好地实现光束消偏振叠加,焦斑在时间统计上表现为部分偏振光;采用正交偏振板互补组合方式时,消偏振效果随偏振板单元数的变化不敏感,因而可以选取单元数较少的正交偏振板,以降低对加工工艺的要求。

关键词: 束匀滑; 正交偏振板; 消偏振叠加; 单元数

中图分类号: O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0080-05

Influence of depolarized superposition of multi-beams on characteristics of focal spot

Meng Qinglong, Zhong Zheqiang, Li Zelong, Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In inertial confinement fusion (ICF) driver design, by varying the polarization of beamlets, a orthogonal polarization control plate (OPCP) is applied to achieve incoherent superposition of beamlets on target for improving illumination uniformity. The model for the transmittance function of OPCP was built up. The depolarizing characteristics and uniformity of focal spot of single beam and of multi-beam superposition were simulated numerically and analyzed. The effects of the element number of OPCP on the characteristics of focal spot were further discussed. The results show that, the depolarized laser beam could be achieved by using the orthogonal polarization control plate, and the light field exhibits partially polarization in time scale. The complementary combination of orthogonal PCPs is better for the superposition of depolarized multi-beams. Moreover, the depolarizing effect remains almost unchanged with the element number of OPCP. Thus, the number of elements could be fewer to reduce requirements of processing technology.

Key words: beam smoothing; orthogonal polarization control plate; depolarizing superposition; number of units

收稿日期:2013-11-25; 修订日期:2014-01-17

基金项目:四川省教育厅创新团队计划(13Td0048);四川大学优秀青年学者计划(2011-2-B17)

作者简介:孟庆龙(1989-),男,硕士生,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。Email:scumql@163.com

导师简介:张彬(1969-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。

Email:zhangbinff@sohu.com

0 引言

在间接驱动方式的惯性约束聚变(ICF)驱动器中,实现点火要求多束激光能高效且均匀地辐照在圆柱靶腔的腔壁上^[1]。激光束在靶腔内传输过程中的激光等离子体相互作用(LPI)将对靶面辐照均匀性产生极大影响。特别地,由于光路排布原因,多束激光会在靶腔入口附近交叠,与腔内等离子体相互作用而产生受激散射,不仅会影响靶腔的激光束能量注入率,而且还会导致交叉光束间的能量转移,进而降低辐照均匀性^[2-5]。在交叉光束间的能量转移过程中,主要存在受激拉曼散射(SRS)和受激布里渊散射(SBS)等非线性效应,影响因素有带宽、交叉光束间的波长偏移及偏振特性等^[6]。不同束匀滑技术对交叉光束间能量转移的影响不同,在NIF装置采用的光谱角色散(SSD)^[7]、连续相位板(CPP)^[8-9]和偏振匀滑(PS)^[10]联用的束匀滑方案中,SSD、CPP的使用虽然可有效提高靶面辐照均匀性,但对交叉光束间能量转移的改善作用较小,而PS能降低斑纹对比度,破坏受激散射的相位匹配条件,对能量转移的改善效果最为明显^[11]。由此可见,通过控制光束偏振特性来抑制非线性效应,可明显减小交叉光束间的能量转移。

偏振控制板(PCP)^[12-14]是利用旋光元件阵列来改变激光束内部的偏振态,使焦斑为不同偏振态子光束的叠加,从而进一步改善焦斑均匀性而提出的。与偏振匀滑采用的双折射光楔相比,采用偏振控制板可以使光束内部偏振态的变化更为复杂,以便更好地抑制SRS、SBS等非线性效应。文中以“二维SSD+RPP+PCP”的束匀滑方案为例,对采用正交偏振板(Orthogonal PCP, OPCP)时,单光束和多光束叠加的焦斑偏振特性及均匀性进行数值模拟和分析,并进一步讨论了多光束叠加时偏振板单元数对焦斑特性的影响。

1 理论模型

如图1所示,在激光束“2D-SSD+RPP+OPCP”的束匀滑方案中,激光束依次经过SSD、RPP和OPCP后被分割成多个偏振态正交的子光束,因而远场焦斑为各个子光束的非相干叠加。

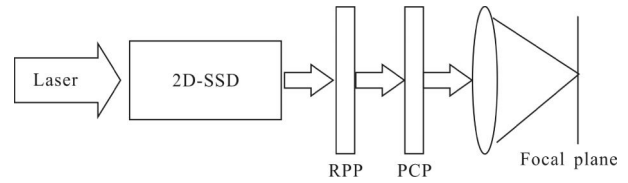


图1 单光束“二维 SSD+RPP+OPCP”的匀滑方案

Fig.1 Smoothing scheme of 2D-SSD+RPP+OPCP

根据OPCP的设计原理,激光束经过OPCP后分割成多个 x 、 y 方向的线偏光。于是,正交偏振板的透过率函数可表示为:

$$T(m, n) = \begin{cases} e^{i\pi x}, & \text{when } m+n \text{ is even} \\ 0 & \\ 0 & \\ e^{i\pi y}, & \text{when } m+n \text{ is odd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: (m, n) 表示偏振板第 (m, n) 个单元。可以看出,正交偏振板各个子单元的出射光束只是 x 或 y 方向的线偏光。

经过SSD、RPP和OPCP后的光场分布为:

$$\vec{E}(x, y, t) = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q E_1(x, y, t) \exp(i\Phi) T(m, n) \quad (2)$$

式中: $E_1(x, y, t) = A(x, y, t) \exp(-i\omega t) \exp[i\varphi(x, y, t)]$, $\varphi(x, y, t)$ 为经光栅色散后相位的时空分布; Φ 为RPP引入的0或 π 的随机相位。

经过OPCP后的光场只有 x 、 y 方向的线偏光,焦斑光场可采用傅里叶变换进行计算,于是,焦面处子光束非相干叠加后的光强分布为:

$$I(x, y, t) = \left| \vec{U}_x(x, y, t) \right|^2 + \left| \vec{U}_y(x, y, t) \right|^2 \quad (3)$$

式中: $\vec{U}_{x,y}(x, y, t)$ 为 $\vec{E}_{x,y}(x, y, t)$ 的傅里叶变换,下角标 x 、 y 分别表示 x 、 y 方向的线偏光。

在交叉光束能量转移过程中,可以通过抑制单光束以及多光束叠加在焦面的偏振特性,从而改善交叉光束间的能量转移以及提高靶面辐照均匀性,因而通过观察偏振控制板对光斑在焦面的偏振度是可行的。为了对焦斑消偏振特性进行定量描述,对于完全偏振光,根据斯托克斯参数,光场偏振度(Degree of Polarization, DOP)的定义为^[15]:

$$p = \frac{(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{1/2}}{s_0} \quad (4)$$

式中: $s_0 = \langle U_x^2 + U_y^2 \rangle$; $s_1 = \langle U_x^2 - U_y^2 \rangle$; $s_2 = \langle 2U_x U_y \cos \phi \rangle$;

$s_3 = \langle 2U_x U_y \sin \phi \rangle$, ϕ 为 U_x 、 U_y 之间的相位差, 其中 $\langle \rangle$ 表示求平均。

根据偏振度的定义, 偏振度 p 是对一定时间范围内光束偏振态的描述, $p=0$ 表示完全非偏振光, $p=1$ 表示完全偏振光, $0 < p < 1$ 表示部分偏振光, $p > 1$ 没有任何物理意义。

为了定量描述焦斑的匀滑效果, 引入焦斑包络上斑纹的光通量对比度 C , 即:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i \sum_j [I_{i,j}(x,y) - \bar{I}(x,y)]^2}{N_x N_y}}}{\bar{I}(x,y)} \quad (5)$$

式中: $I_{i,j}(x,y)$ 和 $\bar{I}(x,y)$ 分别为焦斑各点的光强及其平均值; N_x 、 N_y 为取样点数。在利用光通量对比度 C 描述光斑均匀性时, 焦斑光强分布越接近于平均值则均匀性越好。

2 数值模拟及分析

2.1 单光束消偏振效果

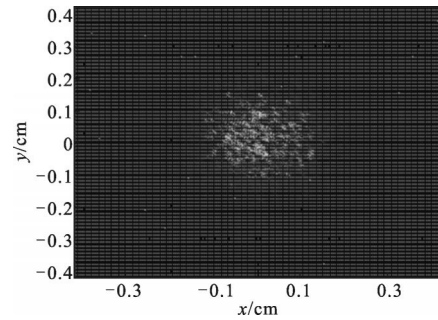
以“二维 SSD+CPP=PCP”方案为例, 数值模拟时采用的参数为: 光束口径 $D=40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$, 中心波长 $\lambda_0=1053 \text{ nm}$, 脉宽 $\tau=1 \text{ ns}$, 带宽 $\delta\lambda=0.3 \text{ nm}$, 畸变波前 PV 值为 $3\lambda_0$; 聚焦透镜焦距 $f=2 \text{ m}$, RPP 单元数 64×64 , 正交偏振板单元数 8×8 , 积分时间 $\Delta t=10 \text{ ps}$, 焦斑强度分布及偏振度如图 2 所示。

图 2(b) 中给出了包含整个焦斑 80% 能量的中心矩形区域的偏振度, 可以看出, 焦斑偏振度的空间分布无明显的规律。在衡量焦斑偏振特性时, 需要关注的是光束在整个焦面上的消偏振效果, 因而可以进一步采用统计的方式。对偏振度的统计特性采用期望 $E[p]$ 和标准差 $k[p]$ 进行描述, 其中, 期望表示偏振度的总体趋势, 期望越小, 说明焦斑整体偏振度越小, 消偏振特性越好; 而标准差越小, 则表明焦斑各处偏振度差异越小。期望 $E[p]$ 和标准差 $k[p]$ 的定义^[6] 为:

$$\left\{ \begin{aligned} E[p] &= \frac{\sum_i \sum_j p_{i,j}(x,y)}{N_x N_y} \\ k[p] &= \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j \{p_{i,j}(x,y) - E[p]\}^2}{N_x N_y}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

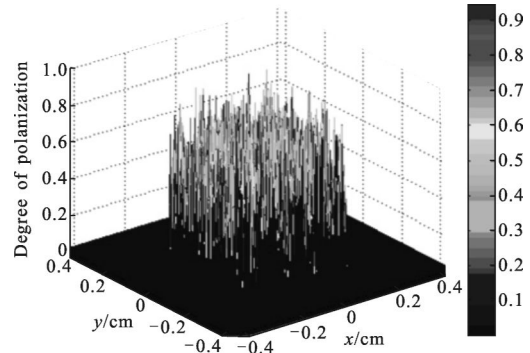
式中: $p_{i,j}(x,y)$ 为焦斑中心区域各点的偏振度; N_x 、 N_y 为取样点数。

从图 2(b) 可以看出, 焦面光场偏振度期望 $p < 1$, 即在时间统计特性上表现为部分偏振特性。从公式(4)可以看出, 如果 x 、 y 方向偏振分量的大小和相位差随时间变化, 偏振态就会发生改变, 对斯托克斯参量求时间平均后, 则满足 $s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 < s_0^2$, 相应的偏振度小于 1。由于 SSD 与 OPCP 的联用使激光束某一频率成分在不同时刻的偏振态调制不同(即时域消偏), 且某一时刻不同频率成分受到不同的偏振态调制(即频域消偏)。时域消偏和频域消偏的同时作用使激光束偏振度迅速下降。



(a) 强度分布, $C=2.59$

(a) Intensity distribution, $C=2.59$



(b) 偏振度分布, $E(p)=0.343$, $k(p)=0.171$

(b) DOP distribution, $E(p)=0.343$, $k(p)=0.171$

图 2 采用正交偏振板时, 焦斑强度分布及偏振度

Fig.2 Intensity and DOP distributions of focal spot, using a OPCP

因此, SSD 和 OPCP 的联用同时实现了时域消偏和频域消偏, 导致焦斑为不同偏振态子光束的叠加, 且在时间统计效果上表现为部分偏振光。其强度消相干叠加使焦斑均匀性进一步得到改善。这是因为部分偏振光可以看作线偏光与自然光的合成, 在叠加过程中, 自然光非相干叠加的结果是能抹平焦斑

强度调制,而线偏光叠加产生的干涉峰峰值下降,因而整体效果是进一步改善了焦斑均匀性。

2.2 多光束叠加消偏振效果

在讨论多光束消偏振叠加对焦斑特性的影响时,以采用正交偏振板的共轴双光束的叠加为例进行数值模拟和分析。图 3 给出了双光束叠加时采用的正交偏振板的互补组合方式,即对应于子单元的出射光束偏振态正交,图 4 给出了相应的焦斑的强度分布与偏振度分布。

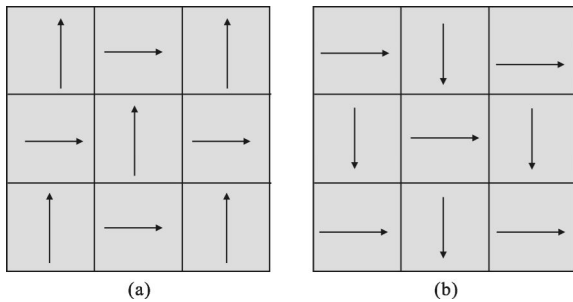
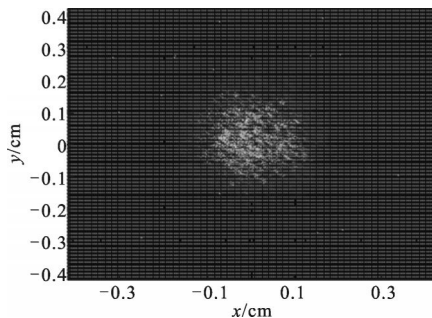


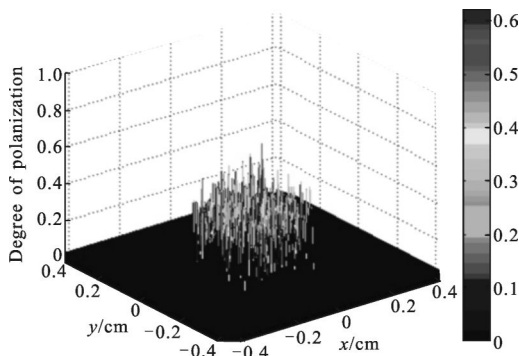
图 3 正交偏振板的互补组合

Fig.3 Complementary combination of OPCPs



(a) 强度分布, $C=2.41$

(a) Intensity distribution, $C=2.41$



(b) 偏振度分布, $E(p)=0.174, k(p)=0.094$

(b) DOP distribution, $E(p)=0.174, k(p)=0.094$

图 4 采用正交偏振板互补组合时,焦斑强度分布及偏振度分布

Fig.4 Intensity and DOP distributions of focal spot using a complementary combination of OPCPs

比较图 2 和图 4 可以看出,采用正交偏振板互补组合时,双光束消偏振叠加得到的焦斑与单光束相比,其光强分布包络基本不变,但是消偏振效果明显变好,表现为偏振度期望大幅下降,且整体偏振度分布比较接近。此外,光通量对比度也相应减小,焦斑均匀性得到了改善。

影响焦斑消偏振及均匀特性的因素较多,对于多光束消偏振叠加而言,偏振控制板单元数的影响比较重要。假定双光束叠加时两偏振控制板单元数相同且同时改变,图 5 给出了焦斑特性随偏振板单元数的变化。

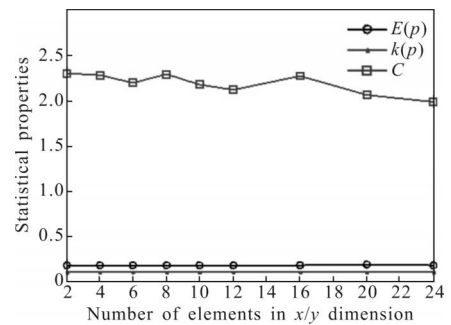


图 5 正交偏振板互补组合时,焦斑消偏振特性、均匀性随单元数的变化

Fig.5 Variation of depolarization and uniformity of focal spot with element numbers of OPCPs

从图 5 可以看出,对于正交偏振板互补组合来说,消偏振效果随偏振板单元数的变化不敏感,且焦斑均匀性变化也较小。其原因在于:采用正交偏振板互补组合后,双光束经过正交偏振板后的对应位置均存在 x, y 方向的线偏光,几乎不改变聚焦光场的偏振特性,从而在时间统计尺度内偏振特性接近,因而偏振度期望和标准差几乎不随单元数的改变而明显变化。

3 结论

正交偏振板通过将入射光束分成多个偏振态正交的子光束,与光谱角色散技术联用,使焦斑为各个子光束独立斑纹的叠加。在改善靶面辐照均匀性的同时,使焦面光场在时间统计特性上表现为部分偏振光,进而改善间接驱动靶腔内交叉光束间的能量转移。文中分析了采用正交偏振板实现单光束、多光束叠加的消偏振控制及其对焦斑特性的影响,得到

以下主要结论:(1) 焦斑为不同偏振态子光束的消相干叠加,均匀性进一步得到改善,且在时间统计效果上表现为部分偏振光;(2) 当双光束叠加时,采用正交偏振板互补组合方式,焦斑光场的消偏振效果比单光束更好,且随单元数的变化而不敏感。因而在兼顾改善焦斑均匀性的前提下,适当选取单元数较少的正交偏振板组合即可达到多光束消偏振叠加控制的目的,从而可降低对加工工艺的要求,也更容易实现。

参考文献:

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility[J]. *Phys Plasmas*, 2004, 11(2): 339-479.
- [2] Glenzer S H, MacGowan B J, Michel P, et al. Symmetric inertial confinement fusion implosions at ultra-high laser energies[J]. *Science*, 2010, 327: 1228-1231.
- [3] Kruer W L, Wilks S C, Afeyan B B, et al. Energy transfer between crossing laser beams[J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(1): 382-385.
- [4] Kirkwood R K, Afeyan B B, Kruer W L, et al. Laser plasmas interactions in ignition-scale hohlraum plasmas[J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(5): 2029-2040.
- [5] Kruer W L. The Physics of Laser Plasmas Interactions[M]. US: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1988.
- [6] Kruer W L, Wilks S C, Afeyan B B, et al. Energy transfer between crossing laser beams[J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(1): 382-385.
- [7] Skupsky S, Short R W, Kessler T, et al. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light[J]. *J Appl Phys*, 1989, 66(8): 3456-3462.
- [8] Lawrence G N, Lin Y, Kessler T J. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 764-766.
- [9] Néauport J, Ribeyre X, Daurios J, et al. Design and optical characteristic of a large continuous phase plate for laser integration line and laser Megajoule facilities [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(13): 2377-2382.
- [10] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, et al. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate [J]. *Opt Commun*, 1992, 91: 9-12.
- [11] Michel P, Divol L, Williams E A, et al. Energy transfer between laser beams crossing in ignition [J]. *Phys Plasmas*, 2008, 3(1): 382-386.
- [12] Xiao Jun, Lü Baida. Characteristics of polarization control plate smoothing interference speckles [J]. *Chinese J Laser*, 2000, 27(7): 627-632. (in Chinese)
肖峻, 吕百达. 偏振控制板对于干涉斑纹的匀滑特性 [J]. 中国激光, 2000, 27(7): 627-632.
- [13] Zhongyong Liu, Yu Zhao, Dianyuan Fan. Improvement of the illumination uniformity in ICF using a random polarization control plate[J]. *Optics Commun*, 1998, 152(1): 1-5.
- [14] Smith D R, Pendry J B, Wiltshire C K. Metamaterials and negative refractive index[J]. *Science*, 2004, 305: 788-792.
- [15] 廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 51-55.
- [16] 数学手册编写组. 数学手册 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 788-789.