

偏振控制板对焦斑消偏振特性的研究

钟哲强 李泽龙 周冰洁 张彬

(四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要 利用偏振控制板实现惯性约束聚变(ICF)驱动器靶面光束消相干叠加,以达到进一步改善靶面辐照均匀性的目的。通过分析偏振控制板对改变光束内部偏振态的作用,建立了偏振控制板透射函数模型。在此基础上,数值模拟和分析了偏振控制板对焦斑特性的影响,并采用焦斑偏振度的期望和标准差来描述焦斑的消偏振特性,使用光通量对比度评价焦斑强度均匀性。通过讨论偏振控制板单元数、光束带宽和积分时间等参数对焦斑消偏振特性及辐照均匀性的影响,得到利用偏振控制板能较好地实现焦斑消偏振,并改善靶面辐照均匀性的结论。

关键词 激光光学;偏振控制板;透射率函数;消偏振;均匀性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.1214002

Analysis of Depolarizing Characteristics on Focal Spot Using a Polarization Control Plate

Zhong Zheqiang Li Zelong Zhou Bingjie Zhang Bin

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

Abstract A polarization control plate (PCP) is applied to achieve incoherent superposition of beamlets on target for further improving illumination uniformity in inertial confinement fusion (ICF) driver. By analyzing the effect of PCP on the modification of the polarization of beamlets, the model for the transmittance function of PCP is built up. The effects of PCP on the characteristics on focal spot are simulated numerically and analyzed theoretically. The expectation and variance of degree of polarization (DOP) are used to describe depolarization characteristics on focal spot, and the contrast is employed to evaluate illumination uniformity. The effects of number of PCP elements, bandwidth and integral time on the characteristics on focal spot are discussed in detail. The results show that polarization control plate can well obtain depolarized laser beam and improve uniformity on target.

Key words laser optics; polarization control plate; transmittance function; depolarization; illumination uniformity

OCIS codes 140.3295; 260.5430

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)驱动器中,提高靶面辐照均匀性是一个至关重要的问题。结合时域和空域束匀滑技术,如光谱色散匀滑(SSD)^[1]与随机相位板(RPP)^[2]、光谱色散匀滑与连续相位板(CPP)^[3-4]的联用等,能实现热匀滑时间内的焦斑形态的扫动变化,从而在时间积分效果上消除焦斑的小尺度不均匀。1992年,Tsubakimoto等^[5]提出在相位

板前加入一块双折射光楔,以改变光束截面内的偏振态,产生两个偏振态正交的光斑,通过其强度的非相干叠加,使光强对比度进一步减小到原来的 $1/\sqrt{2}$,这表明聚焦光束偏振特性对靶面辐照均匀性具有一定的影响。1996年,Kruer等^[6]在研究靶腔内交叉光束相互作用过程中产生受激散射不稳定性时发现,交叉光束的波长偏差、偏振态及光强分布等因素均会对受激散射产生明显的影响。受激散射的

收稿日期:2013-06-25;收到修改稿日期:2013-08-21

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:钟哲强(1989—),男,硕士研究生,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。E-mail: scuzhongzq@163.com

导师简介:张彬(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事强激光的传输与控制方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

产生^[7-8]不仅会降低光束对靶腔的能量注入效率,减少压缩靶丸的可用能量,而且还会影响光束对靶面的辐照均匀性。通过改变打靶光束的偏振特性,实现多光束的消相干叠加,可以进一步改善焦斑均匀性并抑制受激散射。

偏振控制板(PCP)^[9-10]是基于改变光束内部的偏振态,以实现焦面处光束的消相干叠加而提出的。激光束经过 PCP 后分成多个子光束,各子光束的偏振态正交或者随机分布,则焦斑分布为各子光束独立斑纹的叠加。通常,偏振控制板可用石英半波片, KDP 晶体及向列型液晶制作而成。此外,通过对超金属材料微结构的设计,可以制作各向异性强的单元元件^[11],以实现对外射光束的偏振态控制。本文对“SSD+RPP+PCP”的束匀滑方案进行了数值模拟和分析,利用焦斑偏振度分布的期望和标准差来描述焦斑的消偏振特性,讨论了偏振控制板单元数、光束带宽和积分时间等参数对焦斑消偏振特性的影响。

2 理论模型

以“SSD+RPP+PCP”的束匀滑方案为例,分析偏振控制板对焦斑的消偏振特性和靶面均匀性的改善。图 1 给出了 SSD+RPP+PCP 的束匀滑方案示意图,RPP 放置在 PCP 前面,SSD 光束经过 RPP 和 PCP 后被分割成偏振态各异的子光束,远场焦斑的光强分布为各子光束的消相干叠加。

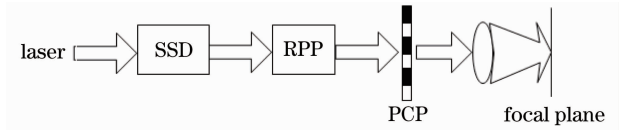


图 1 SSD+RPP+PCP 的匀滑方案

Fig. 1 Smoothing scheme of SSD+RPP+PCP

SSD 光束的场分布可表示为^[1]

$$E_1(x, y, t) = E(x, y, t) \exp[i\varphi(x, y, t) + i\varphi_d], \quad (1)$$

式中 $E(x, y, t) = A(x, y, t) \exp(-i\omega t)$, $\varphi(x, y, t)$ 为经光栅色散后相位的时空分布; $\varphi_d = \varphi_l + \varphi_h$ 为光束在传输放大时产生的相位畸变分布,可用随机相位屏^[12]模拟,其低频相位畸变 φ_l 可表示为

$$\varphi_l(x, y) = a \text{Random}(-1, 1) \otimes \exp\left\{-\left[\left(\frac{x}{g_x}\right)^2 + \left(\frac{y}{g_y}\right)^2\right]\right\}, \quad (2)$$

式中 a 为低频相位幅度系数,决定低频相位的峰谷值(PV)值; $\text{Random}(-1, 1)$ 表示从 -1 到 1 的均匀分布的二维随机数, \otimes 表示卷积, g_x 和 g_y 分别为 x

方向和 y 方向相位畸变起伏参数。

高频相位畸变 φ_h 可以表示为

$$\varphi_h(x, y) = \sigma \text{Random}(-1, 1), \quad (3)$$

式中 σ 为随机相位扰动的幅度。

经过偏振控制板后的子光束可以分解为 x, y 方向的线偏光,且振幅和相位均受到不同的调制,因此,各子光束可能是圆偏光、椭圆偏光和线偏光。于是,偏振控制板的透射率函数模型为

$$T = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q \text{rect}\left(\frac{x - mD/p}{D/p}\right) \times \text{rect}\left(\frac{y - nD/q}{D/q}\right) \begin{bmatrix} T_{mnx} e^{i\varphi_{mnx}} \mathbf{e}_x \\ T_{mny} e^{i\varphi_{mny}} \mathbf{e}_y \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 p, q 为偏振板在 x, y 方向的单元数, D 为 PCP 板的尺寸; $T_{mnx, y}$ 为单元 (m, n) 在 x, y 方向的振幅透射率,且假设 $T_{mnx}^2 + T_{mny}^2 = 1$; $\varphi_{mnx, y}$ 为单元 (m, n) 在 x, y 方向的附加相位, $\varphi_{mnx, y}$ 是随机变化的。特别地,当 $T_{mnx} = 0$ 或 $T_{mny} = 0$ 时,偏振控制板为正交偏振板(OPCP),各个子单元的出射光束只能是 x 或 y 偏振方向的线偏光。得到偏振控制板出射光束在 x, y 方向的偏振分量后,可以利用归一化的琼斯矢量确定子光束的偏振态^[13]。

图 2 给出了 OPCP 和随机偏振板(RPCP)示意图。

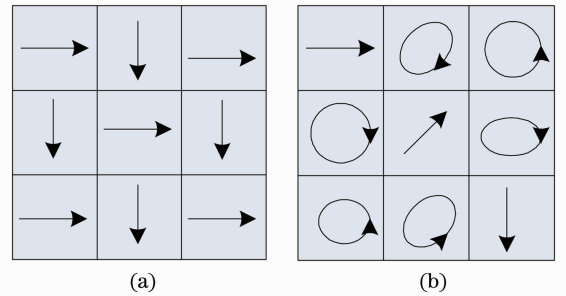


图 2 典型的偏振板示意图。(a)OPCP;
(b)RPCP

Fig. 2 Diagram of representative PCP. (a) OPCP;
(b) RPCP

由(1)~(4)式可知,经过 RPP 和 PCP 后的光场分布为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{E}_x(x, y, t) \\ \mathbf{E}_y(x, y, t) \end{bmatrix} = \sum_{m=1}^p \sum_{n=1}^q E_1(x, y, t) \exp(i\Phi) \times \text{rect}\left(\frac{x - mD/p}{D/p}\right) \text{rect}\left(\frac{y - nD/q}{D/q}\right) \begin{bmatrix} T_{mnx} e^{i\varphi_{mnx}} \mathbf{e}_x \\ T_{mny} e^{i\varphi_{mny}} \mathbf{e}_y \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 Φ 为 RPP 引入的 0 或 π 的随机相位。

在使用光谱色散匀滑和偏振控制板后,即便入

射光束中不同频率成分的初始偏振态是相同的,由于不同频率成分在光栅色散方向上展开,经过 PCP 时偏振态变化不同,因此,焦斑是具有不同偏振态的子光束聚焦光斑的叠加。

假定偏振控制板位于透镜的前焦面,焦面在 x, y 偏振方向的场分布可以用傅里叶变换计算得到,即

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_x(x, y, t) \\ \mathbf{U}_y(x, y, t) \end{bmatrix} = \mathcal{F} \left\{ \begin{bmatrix} \mathbf{E}_x(x, y, t) \\ \mathbf{E}_y(x, y, t) \end{bmatrix} \right\}, \quad (6)$$

式中 \mathcal{F} 表示傅里叶变换。

于是,相应的光强分布为

$$I(x, y, t) = |\mathbf{U}_x(x, y, t)|^2 + |\mathbf{U}_y(x, y, t)|^2. \quad (7)$$

在对焦斑消偏振特性进行定量描述时,对于完全偏振光,斯托克斯参数的定义为^[14]

$$\begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_x^2 + \mathbf{U}_y^2 \\ \mathbf{U}_x^2 - \mathbf{U}_y^2 \\ 2\mathbf{U}_x\mathbf{U}_y \cos \phi \\ 2\mathbf{U}_x\mathbf{U}_y \sin \phi \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 ϕ 为 $\mathbf{U}_x, \mathbf{U}_y$ 之间的相位差。

于是,偏振度(DOP, P)为^[14]

$$P = \frac{(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{1/2}}{s_0}. \quad (9)$$

根据偏振度的定义,偏振度是时间平均尺度内光束偏振态的描述,其中, $P=0$ 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。

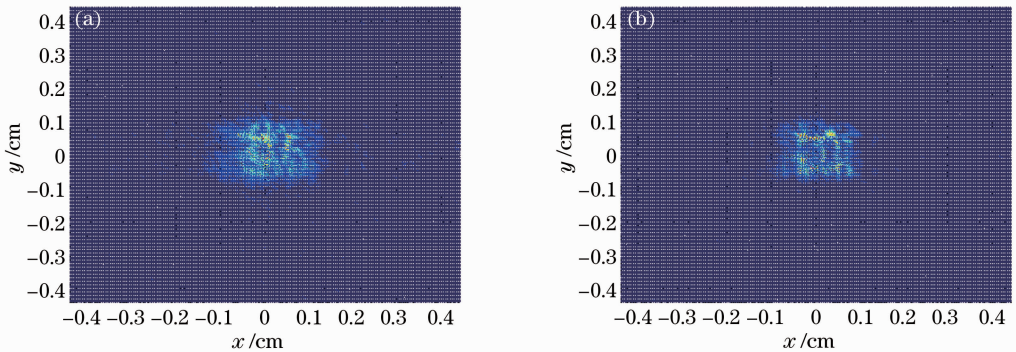


图3 焦斑强度分布。(a)有RPCP, $C=2.74$; (b)无RPCP, $C=3.80$

Fig. 3 Intensity distribution of focal spot. (a) With RPCP, $C=2.74$; (b) without RPCP, $C=3.80$

进一步分析图3可知,焦斑强度分布复杂且包络杂乱,因而在进行消偏振特性分析时,仅对包含整个焦斑75%能量的中心矩形区域求偏振度,其结果如图4所示。从图4可以看出,焦斑偏振度的空间分布没有明显的规律,而且需要关注的是光束在整个焦平面上的消偏振效果,因而采用统计的方式是

为了定量描述焦斑的匀滑效果,引入衍射焦斑包络上斑纹的光通量对比度 C ^[15]:

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

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。(10)式表明,光通量对比度 C 越小,焦斑光强包络上各点的光强值越接近光强平均值,则焦斑光强分布越均匀。

3 数值模拟及分析

以“二维SSD+RPP+RPCP”方案为例,定量分析了RPCP的使用对焦斑的消偏振特性及束匀滑特性的影响。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 $\delta\lambda=0.3 \text{ nm}$,聚焦透镜焦距 $f=2 \text{ m}$,RPP单元数 64×64 ,PCP单元数 16×16 ,积分时间 $\Delta t=10 \text{ ps}$; (4)式中的 $T_{mrx,y}, \varphi_{mrx,y}$ 采用均匀随机数的产生方式得到。

图3给出了分别针对“二维SSD+RPP+RPCP”和“二维SSD+RPP”进行数值模拟计算得到的焦斑光强分布。从图3可以看出,有RPCP的焦斑比无PCP时光通量对比度更小,表明有RPCP时焦斑均匀性更好。这是因为偏振控制板改变了光束口径内部子光束的偏振态,各子束在焦面消相干叠加,进一步改善了焦斑均匀性。

可行的。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,定义为^[16]

$$E[P] = \frac{\sum_i \sum_j P_{i,j}(x, y)}{N_x N_y},$$

$$k[P] = \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j \{P_{i,j}(x, y) - E[P]\}^2}{N_x N_y}}, \quad (11)$$

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。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。

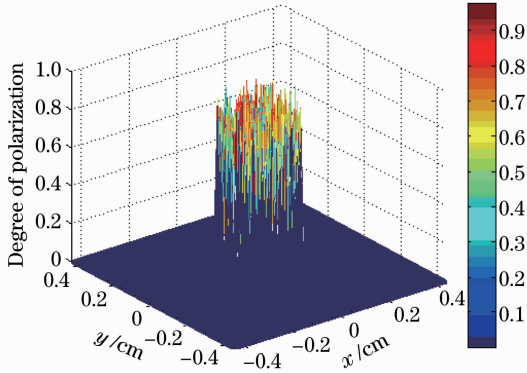


图4 焦斑偏振度, $E[P]=0.563$, $k[P]=0.225$

Fig. 4 Degree of polarization of focal spot,
 $E[P]=0.563$, $k[P]=0.225$

从图4可以看出, 焦面光场在时间统计特性上表现为部分偏振特性。激光束经过光谱角色散后, 不同频率成分由于光栅色散作用而在空间上分离, 且在空间上的分布随时间发生变化, 因此, 经过偏振控制板时, 不同时刻通过各子单元的频率成分也不同, 可以认为偏振控制板对光束偏振态的调制函数随时间发生变化。由此可见, 这一方案既在时域上通过调制入射光束的偏振态实现了时域消偏振, 同时又通过对不同频率的偏振态调制不同, 实现了频域消偏振。从(7)、(8)式可以看出, 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 $\langle s_1^2 \rangle + \langle s_2^2 \rangle + \langle s_3^2 \rangle < \langle s_0^2 \rangle$ ($\langle \rangle$ 表示求平均), 相应的偏振度小于1。光谱角色散与偏振控制板的联用, 使光束某一频率成分在不同时刻受到的偏振态调制不同, 称为时域消偏; 由于光栅的色散, 在某一时刻不同频率成分受到的偏振态调制也不同, 因此称为频域消偏。在时间统计效果上, 焦面光场为部分偏振光, 其强度消相干叠加的结果, 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, 因此整体效果是进一步改善了焦斑均匀性。

2010年, Davydov等^[17]利用 LiNbO_3 晶体的双折射特性, 通过同时在 x 、 y 方向加载电压, 使出射

光的偏振态随加载电压变化, 从时域实现了很好的消偏效果。SSD+RPP+PCP方案与之相比, 能实现时域和频域的消偏, 且不需要复杂的电路控制, 虽然消偏效果略差, 但能进一步改善靶面辐照均匀性。

影响焦斑消偏振及匀滑特性的因素较多, 在该方案中采用的RPP可由玻璃或石英做基底, 在其表面直接蚀刻或镀膜制作而成, 其透射率高^[18], 在实际应用中RPP可用CPP代替, 以获得更高的能量利用率和更好的焦斑包络^[19]; 偏振控制板可用石英半波片、KDP晶体制作而成, 也可以获得高透射率^[20], 因而在讨论中忽略了各元件对激光强度的衰减作用。下面主要讨论PCP单元数、激光束带宽及积分时间等因素对偏振控制板方案中焦斑消偏振及匀滑特性的影响。

3.1 PCP单元数对焦斑消偏振及匀滑效果的影响

为了选择合适的偏振控制板单元数, 对OPCP和RPCP进行了比较和分析, 假设光束带宽 $\delta\lambda=0.3$ nm, 积分时间 $\Delta t=10$ ps时, 讨论单元数目对焦斑消偏振及匀滑效果的影响, 如图5所示。

从图5(a)可以看出, 在PCP单元数较少(少于 16×16)的情况下, RPCP焦斑偏振度分布的期望 $E[P]$ 和标准差 $k[P]$ 变化起伏较大, 且无规律, 这是因为RPCP单元数较少时, 各子单元出射光场偏振态的随机特性不满足统计规律, 总体效果可能偏向于某一类型的完全偏振光(如椭圆偏振光、线偏振光等); 当RPCP单元数较多(多于 16×16)时, 子光束偏振态的随机统计特性逐步体现出来, 因此, 焦斑偏振度的期望 $E[P]$ 和标准差 $k[P]$ 均呈现稳定变化趋势。对于OPCP来说, 随着单元数增多, 焦斑的消偏振特性逐步改善; 当单元数较多(多于 16×16)时, 焦斑偏振度的期望 $E[P]$ 和标准差 $k[P]$ 均呈现稳定变化趋势。当PCP单元数足够多时, 对于OPCP和RPCP, 焦斑偏振度的期望 $E[P]$ 和标准差 $k[P]$ 均随单元数的增加而变化不大, 此时, 难以通过继续增加单元数来大幅度提高焦斑的消偏振效果。

从图5(b)可以看出, 对于OPCP和RPCP, 焦斑的光通量对比度 C 均随着单元数的增加而明显减小, 焦斑均匀性变好。特别地, 单元数为 16×16 时, OPCP与RPCP对应的焦斑光通量对比度几乎相等, 两者的匀滑效果相当; 当单元数大于 16×16 时, RPCP对焦斑的匀滑效果要优于OPCP。

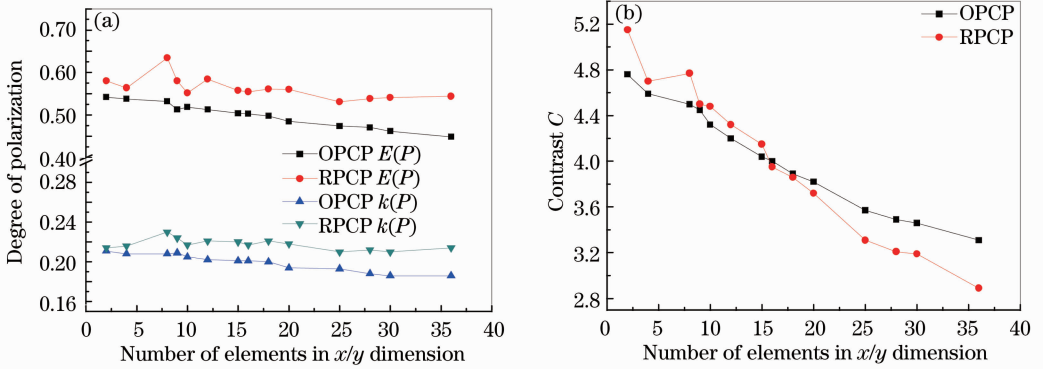


图5 OPCP与RPCP的比较。(a)不同单元数对消偏振特性的影响；
(b)不同单元数对焦斑均匀性的影响

Fig. 5 Comparison of OPCP and RPCP. (a) Depolarization characteristics with different numbers of element; (b) focal spot uniformity with different numbers of element

综合考虑 PCP 单元数对焦斑的消偏振及匀滑特性的影响,当 PCP 单元数为 16×16 时,RPCP 的随机统计特性已体现出来,对焦斑的消偏振及匀滑特性已较好;若进一步增加单元数,虽然焦斑光通量对比度会有所减小,但其消偏振特性且没有得到明显改善。同时,单元数越多,对加工工艺要求越高,越难实现。因此,在下面讨论光束带宽、积分时间等参数对焦斑消偏振特性的影响时,将 RPCP 的单元数设定为 16×16 。

3.2 光束带宽对焦斑消偏振及匀滑效果的影响

图 6 给出了 RPCP 单元数为 16×16 、积分时间 $\Delta t = 10$ ps 时,光束带宽对 RPCP 消偏振特性及匀滑效果的影响。

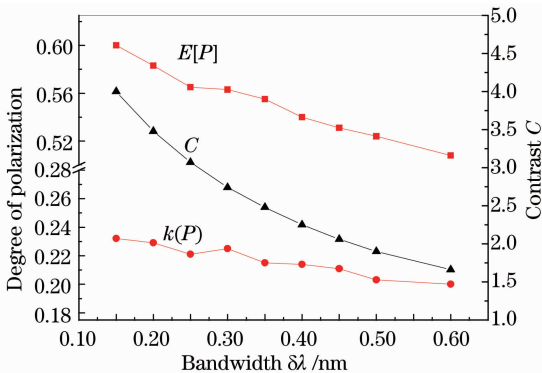


图6 光束带宽对RPCP消偏振及匀滑效果的影响

Fig. 6 Influence of different beam bandwidth on depolarization characteristics and illumination uniformity using a RPCP

当光束带宽增大时,一方面,就某一子单元而言,虽然其对不同频率光波的偏振态变换相同,但由于子单元的频率成分增多,其出射光波则是具有相同偏振态的不同频率光波的叠加;另一方面,对整个

RPCP 而言,同一时刻经过 RPCP 的光波频谱成分增多,在相同积分时间内偏振态的变化状况更多。因此,就频域消偏振的效果而言,光束带宽越大,消偏振效果越好,焦斑均匀性也越好,如图 6 所示。

4.3 积分时间对焦斑消偏振及匀滑效果的影响

图 7 给出了 RPCP 单元数为 16×16 、带宽 $\delta\lambda = 0.3$ nm 时,积分时间对焦斑消偏振特性及匀滑效果的影响。

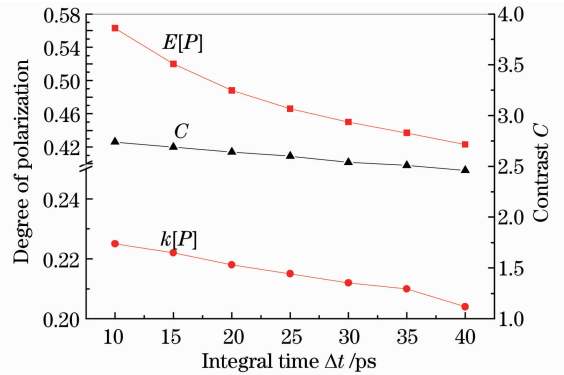


图7 积分时间对RPCP消偏振及匀滑效果的影响

Fig. 7 Influence of different integral time on depolarization characteristics and illumination uniformity using a RPCP

从图 7 可以看出,偏振度分布的期望 $E[P]$ 和标准差 $k[P]$ 均呈现出随积分时间延长而下降的趋势。这是由于 SSD 的作用使得激光束不同频率成分在焦面进行动态叠加,考虑到时间平均效应,致使焦面的光强分布得到了匀滑。因此,积分时间越长,焦面处叠加的光斑越多,光通量对比度 C 会明显下降。此外,由于偏振度是时间平均值,体现的是一定时间内光波偏振态的变化。因此,积分时间越长,消偏振特性越好。

4 结 论

在光谱角色散匀滑、RPP 以及偏振控制板联用的束匀滑方案中,不仅在时域上通过调制入射光束的偏振态实现了时域消偏振,而且还通过对不同频率成分的偏振态进行不同调制,实现了频域消偏振。结果表明,在时间统计效果上,焦面光场为部分偏振光,其各子光束的强度消相干叠加,使焦斑均匀性进一步得到改善。

通过对 RPCP 进行焦斑消偏振及匀滑特性的数值模拟和分析可得到以下结论:1)RPCP 的单元数足够多($\geq 16 \times 16$)的情况下,即子光束偏振态大致满足随机统计特性时,焦斑消偏振及匀滑效果才会较好;2)光束带宽的增大以及积分时间的增长均会导致焦斑消偏振效果的改善,前者体现出该束匀滑方案的频域消偏效果,而后者则是时域消偏效果的表现。

参 考 文 献

- 1 S Skupsky, R W Short, T Kessler, *et al.*. Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light [J]. *J Appl Phys*, 1989, 66(8): 3456—3462.
- 2 Y Kato, K Mima, N Miyanaga, *et al.*. Random phasing of high power lasers for uniform target acceleration and plasma instabilities suppression [J]. *Phys Rev Lett*, 1984, 53(11): 1057—1060.
- 3 Y Lin, T J Kessler, N L Lawrence. Distributed phase plates for super-Gaussian focal-plane irradiance profiles [J]. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 764—766.
- 4 J Néauport, X Ribeyre, J Daurios, *et al.*. Design and optical characteristic of a large continuous phase plate for laser integration line and laser Megajoule facilities [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(13): 2377—2382.
- 5 K Tsubakimoto, M Nakatsuka, H Nakano, *et al.*. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate [J]. *Opt Commun*, 1992, 91(1): 9—12.
- 6 W L Kruer, S C Wilks, B B Afeyan, *et al.*. Energy transfer between crossing laser beams [J]. *Phys Plasmas*, 1996, 3(1): 382—385.
- 7 C J Mckinstrie, E A Starstev. Forward and backward stimulated Brillouin scattering of crossed beams [J]. *Phys Rev E*, 1999, 60(5): 5978—5986.

- 8 D S Montgomery, B B Afeyan, J A Cobble, *et al.*. Evidence of plasmas fluctuations and their effect on the growth of stimulated Brillouin and stimulated Raman scattering in laser plasmas [J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(5): 1973—1980.
- 9 Xiao Jun, Lü Baida. Characteristics of polarization control plate smoothing interference speckles [J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(7): 627—632.
肖 峻, 吕百达. 偏振控制板对干涉斑纹的匀滑特性 [J]. *中国激光*, 2000, 27(7): 627—632.
- 10 Zhongyong Liu, Yu Zhao, Dianyuan Fan. Improvement of the illumination uniformity in ICF using a random polarization control plate [J]. *Opt Commun*, 1998, 152(1): 1—5.
- 11 D R Smith, J B Pendry, C K Wiltshire. Metamaterials and negative refractive index [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 788—792.
- 12 Yang Yisong, Li Qiang, Zhang Bin. Influence of phase perturbation on the focal spot in third harmonics generation [J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(10): 1333—1336.
杨毅松, 李 强, 张 彬. 相位畸变在三次谐波转换中对聚焦光斑形态的影响[J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1333—1336.
- 13 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: Chinese Machine Express, 2008. 440—441.
郁道银, 谈恒英. *工程光学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008. 440—441.
- 14 Liao Yanbiao. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 51—55.
廖延彪. *偏振光学*[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 51—55.
- 15 Li Kun. Study on the Properties of the Harmonic Generation and the Propagation of High Power Laser in the Final Optical System [D]. Chengdu: Sichuan University, 2007. 146.
李 琨. 靶场强激光频率变换及其传输特性研究[D]. 成都: 四川大学, 2007. 146.
- 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.
- 17 B L Davydov, V Yu Mironov. Time-domain polarization scrambler on one bulk LiNbO₃ crystal with quadrupole electrodes [J]. *Quantum Electronics*, 2010, 40(2): 183—187.
- 18 A Kalesyński, B Smolińska. Multiple image formation by sampling Fraunhofer diffraction patterns [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1977, 24(11): 1115—1124.
- 19 J Neauport, X Ribeyre, J Daurios, *et al.*. Design and optical characterization of a large continuous phase plate for laser integration line and laser Megajoule facilities [J]. *Appl Opt*, 2003, 42(13): 2377—2382.
- 20 Moriaki Wakaki, Keiei Kudo, Takehisa Shibuya. Physical Properties and Data of Optical Materials [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang *et al.* Transl.. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. 290, 314.
若木守明 等. *光学材料手册*[M]. 周海宪, 程云芳 等译. 北京: 化学工业出版社, 2009. 290, 314.

栏目编辑: 宋梅梅