

基于互补型偏振控制板的多光束叠加特性研究^{*}

李泽龙 钟哲强 张彬[†]

(四川大学电子信息学院, 成都 610064)

(2013年11月25日收到; 2014年1月27日收到修改稿)

为满足惯性约束聚变对靶面光场辐照特性的要求, 提出利用互补型偏振控制板改变光束内部偏振态, 实现多光束消偏振叠加, 进而改善聚焦光场均匀性的方案. 建立了光束通过互补型偏振控制板进行变换的物理模型, 理论分析了互补型偏振控制板影响聚焦光斑偏振特性的原因, 比较了互补型偏振控制板与非互补型偏振控制板对聚焦光斑偏振特性及均匀性的影响, 并进一步讨论了偏振控制板单元数的选取问题. 结果表明: 多光束通过互补型偏振控制板后, 聚焦光场不再是单一偏振光, 而是各类部分偏振光的随机混合; 与其他类型双块偏振控制板相比, 互补型偏振控制板能实现聚焦光斑的消偏振叠加且效果最佳, 使光斑偏振度下降至0.2以下, 并能有效地改善光斑的强度均匀性. 采用互补型偏振控制板时, 单元数对聚焦光斑偏振特性影响不大, 但对强度均匀性则存在一定程度的影响, 因而在实际工作中应根据应用需求合理选取单元数.

关键词: 惯性约束聚变, 互补型偏振控制板, 偏振特性, 均匀性

PACS: 52.57.-z, 42.79.Ci, 42.25.Ja, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.63.095204

1 引言

激光惯性约束聚变(ICF)的实现靶面光场均匀性提出了极高要求, 为此, 人们发展了多种束匀滑技术^[1-4], 偏振匀滑^[5](PS)技术由于其具有即时匀滑的特性而受到广泛关注. 作为偏振匀滑技术典型器件的偏振控制板^[6](PCP), 可导致光束局部产生偏振态不同的子光束, 经透镜聚焦后致使偏振态不同的子光束间消相干叠加, 进而使得焦斑得到进一步匀滑化. 偏振控制板一般可由多块不同类型的偏振控制元(如石英波片、KDP晶体等)制成. 国内外对偏振匀滑技术进行了大量研究, Tsubakimoto等^[6]最早提出PCP方案并分析了其强度匀滑效果; Skupsky和Kessler^[7]提出基于偏振控制的零相关位相板, 在理想的平面波入射情况下可在远场获得无散斑的光斑; 肖峻等^[8]开展了零相关位相板准远场应用的数值研究; Ling等^[9]提出了一种基于等离子超材料的特殊偏振控制板

(MRPCP), 并比较了其与传统偏振匀滑技术的优缺点. Froula等^[10]在大尺度高温腔中作了PS对受激布里渊散射(SBS)的影响的研究, 得到偏振匀滑能有效抑制SBS的结论. 近年来, 实验观察到靶腔内交叉光束能量转移现象的存在^[11], 这一过程会严重影响靶丸的均匀内爆, Kruer等^[12]通过对间接驱动靶腔中交叉光束相互作用产生受激散射不稳定性进行研究, 发现交叉光束的中心波长偏差、偏振特性及光束强度等因素对受激散射的产生均存在明显的影响.

迄今为止, 已有的研究主要关注的是单光束偏振匀滑对焦斑强度特性的影响, 而对多光束叠加时偏振匀滑控制光斑偏振特性及强度特性的探讨和分析较少. 由于在主流的惯性约束聚变装置如美国的国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)^[13]和法国在建的兆焦耳激光装置(The Laser Mégajoule, LMJ)^[14]中, 靶场激光束是以 2×2 集束作为基本单元进行光路排布, 聚焦后不同集束以不同空间立体角从靶腔入口进入腔内^[15,16], 各集

^{*} 国家重大专项应用基础项目(批准号: GFZX0205010502.7)、四川省教育厅创新团队计划项目(批准号: 13Td0048)和四川大学优秀青年学者计划(批准号: 2011-2-B17)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: zhangbinff@sohu.com

束在靶腔入口及其附近相互交叉叠加, 而集束内平行子光束经楔形透镜^[17]聚焦后将在焦面产生叠加^[18], 从而使得焦面及其附近的光束叠加问题更趋复杂. 本文针对光束叠加问题, 提出互补型偏振控制板 (complementary polarization control plate, CO-PCP) 的概念, 结合连续位相板^[1] (CPP)、光谱角色散^[19] (SSD) 的使用, 以实现多光束叠加时控制靶面偏振特性及改善均匀辐照特性的目的. 以双集束为例, 数值模拟和理论分析了集束交叉叠加时 CO-PCP 对靶面光斑偏振特性及强度均匀性的影响, 比较了其与非互补型偏振控制板组合的效果, 并讨论了偏振控制板单元数的选取问题.

2 理论模型

2.1 互补型偏振控制板模型

互补型偏振控制板 (CO-PCP) 是指在多光路中分别插入的偏振控制板, 其对应子单元出射子光束的偏振态正交. 图 1 给出了典型的互补型正交偏振控制板 (complementary orthogonal polarization control plates, CO-OPCP) 和互补型旋转偏振控制板 (complementary whirly polarization control plates, CO-WPCP) 的示意图.

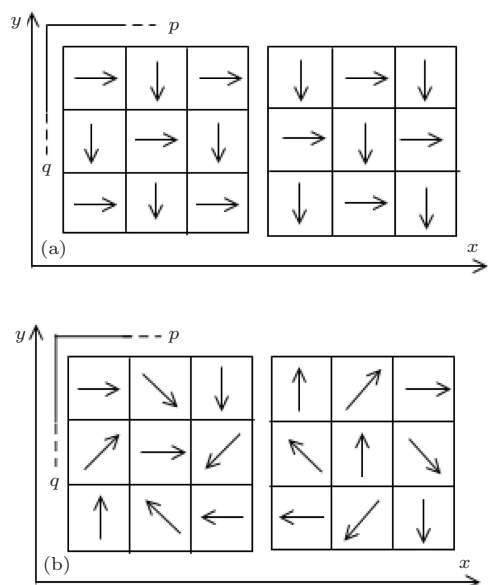


图 1 互补型偏振控制板示意图, p, q 分别为 x 方向和 y 方向的单元 (a) 互补型正交偏振控制板; (b) 互补型旋转偏振控制板

如图 1 所示, 对于互补型正交偏振控制板和旋转偏振板, 光束经过偏振控制板后, 子单元出射光

束为某一方向的线偏光, 则光束经过互补偏振控制板后, 对应子单元出射光束为偏振方向正交的线偏光. 于是, 偏振控制板的透过率函数可表示为

$$T = \sum_p \sum_q \left\{ t_x(p, q) e^{i\varphi_x(p, q)} \vec{x} + t_y(p, q) e^{i\varphi_y(p, q)} \vec{y} \right\}, \quad (1)$$

式中, (p, q) 为偏振控制板的子单元; $t_x(p, q)$, $t_y(p, q)$ 分别为偏振控制板不同子单元对透过该单元光场的 x 和 y 方向的振幅透过率; $\varphi_x(p, q)$, $\varphi_y(p, q)$ 为对应的 x 和 y 方向的附加位相.

对于正交偏振控制板, 相应的振幅透过率和附加位相为

$$\begin{aligned} t_x(p, q) &= 1, & \varphi_x(p, q) &= \pi, \\ t_y(p, q) &= 0, & \varphi_y(p, q) &= 0, \\ (p+q) &\text{为奇数}, \\ t_x(p, q) &= 0, & \varphi_x(p, q) &= 0, \\ t_y(p, q) &= 1, & \varphi_y(p, q) &= \pi, \\ (p+q) &\text{为偶数}. \end{aligned} \quad (2)$$

于是, 与其互补的正交偏振控制板的振幅透过率和附加位相可表示为

$$\begin{aligned} t_x(p, q) &= 0, & \varphi_x(p, q) &= 0, \\ t_y(p, q) &= 1, & \varphi_y(p, q) &= \pi, \\ (p+q) &\text{为奇数}, \\ t_x(p, q) &= 1, & \varphi_x(p, q) &= \pi, \\ t_y(p, q) &= 0, & \varphi_y(p, q) &= 0, \\ (p+q) &\text{为偶数}. \end{aligned} \quad (3)$$

对于图 1 (b) 所示的互补型旋转偏振控制板也可由相应表达式给出, 不同的互补型偏振控制板只是表现为 $t_x, t_y, \varphi_x, \varphi_y$ 的不同.

2.2 叠加光场分布

图 2 为光束交叉叠加的示意图, 两集束以夹角 2α 在焦面附近产生交叉叠加, 集束 1 的焦面在图中以虚线示出, 灰色区域为两集束的交叉重叠区域, 本文分析时所取观察面如图 2 中所示. 为简便起见, 本文仅考虑集束中两路光束 (如图 3 所示), 分别通过 SSD, CPP 和 CO-PCP, 最后再经楔形透镜聚焦^[18].

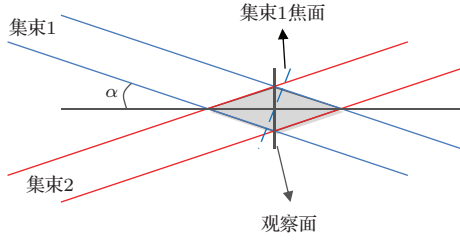


图2 交叉光束叠加系统示意图

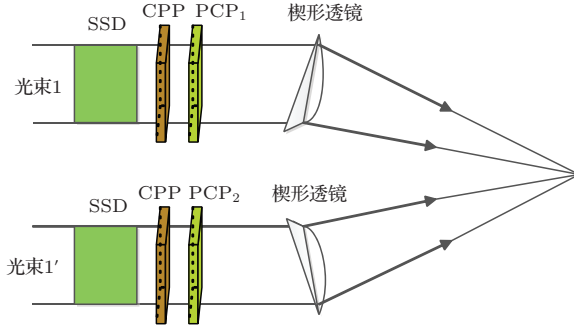


图3 集束中SSD+CPP+CO-PCP束匀滑示意图

在图3中, CPP可以控制聚焦后的光斑包络, SSD则能使聚焦光场的小尺度不均匀性得到进一步匀滑. 假设CPP和PCP相隔很近且位于透镜前焦面, 图中, PCP₁和PCP₂为互补型偏振控制板. 为了讨论方便, 假设入射光束的参数相同, 且通过相应的SSD和CPP的参数亦相同, 则单一光束通过2D-SSD及CPP后的光场分布均可表示为

$$E_0(x, y, t) = A(x, y, t) \exp[i(\omega_0 t + \varphi_R + \varphi_{\text{CPP}})] \times \exp\{i\beta[\sin(\omega_m t + \xi x) + \sin(\omega_m t + \xi y)]\}, \quad (4)$$

式中,

$$A(x, y, t) = A_0 \exp[-(x^2/w_x^2)^N - (y^2/w_y^2)^N - (t^2/\tau^2)^N]$$

为入射光束初始的时空振幅分布, w_x, w_y 分别为光束在 x 方向和 y 方向的束腰半径, τ 为脉冲半宽, N 为超高斯阶数; ω_0 为光束角频率; φ_R 为模拟的传输过程中产生的随机位相畸变^[20]; φ_{CPP} 为CPP对入射光场的位相调制; β 和 ω_m 为SSD的调制深度和调制角频率;

$$\xi = 2\pi(\Delta\theta/\Delta\lambda)(\omega_m/\omega_0)$$

为与 x 和 y 方向色散有关的量.

图2中, 集束1的两光束前焦面坐标为 $x_1 y_1$, 后焦面坐标为 $x'_1 y'_1$, 观察面坐标为 xy , 则满足 $x = x'_1$, $y = y'_1/\cos\alpha$. 假设PCP位于透镜前焦面, 则光束由前焦面到靶面的传输矩阵可由 $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$ 给出, 观察面与焦面的离焦距离 $d_1 = y'_1 \tan\alpha$, 且随焦面坐标 y'_1 的增大而增大. 于是, 集束1中两条平行光束在观察面处的光场分布可分别由柯林斯公式给出:

$$E_1(x, y, t) = \frac{\exp(ikL_1)}{i\lambda B_1} \iint_{\text{space}} E_0(x_1, y_1, t) T \times \exp\left\{\frac{ik}{2B_1} [A_1(x_1^2 + y_1^2) + D_1(x^2 + y^2 - 2(xx_1 + yy_1))]\right\} dx_1 dy_1 = E_{1x}\vec{e}_x + E_{1y}\vec{e}_y, \quad (5)$$

$$E'_1(x, y, t) = \frac{\exp(ikL_1)}{i\lambda B_1} \iint_{\text{space}} E_0(x_1, y_1, t) T' \times \exp\left\{\frac{ik}{2B_1} [A_1(x_1^2 + y_1^2) + D_1(x^2 + y^2 - 2(xx_1 + yy_1))]\right\} dx_1 dy_1 = E'_{1x}\vec{e}_x + E'_{1y}\vec{e}_y,$$

式中, $A_1 = -d_1/f$, $B_1 = f$, $C_1 = -1/f$, $D_1 = 0$, T, T' 分别为两互补型偏振控制板的透过率函数; 波矢 $k = 2\pi/\lambda$, L_1 为集束1从前焦面到靶面的传输距离, 且 $L_1 = 2f + d_1$, f 为透镜焦距; $E_1(x, y, t)$, $E'_1(x, y, t)$ 为集束1中两光束在观察面的光场分布, E_{1x} , E_{1y} 和 E'_{1x} , E'_{1y} 分别为两光束在观察面 x 方向偏振和 y 方向偏振的光场分布. 类似地, 可给出集束2在靶面的光场分布.

由于各光束在观察面非相干叠加, 故在积分时间 T 内的观察面总强度分布为

$$I = \sum_t \sum_{i=1}^2 (|E_{ix}(t)|^2 + |E'_{ix}(t)|^2 + |E_{iy}(t)|^2 + |E'_{iy}(t)|^2). \quad (6)$$

观察面上光场的偏振特性可由Stokes参数^[21]来定义, 则单一子光束的Stokes参数分别为

$$S_j = \begin{Bmatrix} I_j \\ M_j \\ C_j \\ Q_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} E_{jx}^2 + E_{jy}^2 \\ E_{jx}^2 - E_{jy}^2 \\ 2E_{jx}E_{jy} \cos \delta_j \\ 2E_{jx}E_{jy} \sin \delta_j \end{Bmatrix}, \quad (7)$$

式中, $j = 1, 1', 2, 2'$, 分别代表交叉叠加集束中的各子束, δ_j 为单一子光束在观察面上 x 方向和 y 方向偏振光之间的位相差.

于是, 积分时间 T 内观察面光场的偏振度分布为

$$P = \frac{\sqrt{\sum_{t=0}^T \sum_j [M_j^2(t) + C_j^2(t) + Q_j^2(t)]}}{\sum_{t=0}^T \sum_j I_j(t)}. \quad (8)$$

当 $P = 1$ 时, 光场为完全偏振光; $0 < P < 1$ 时为部分偏振光; $P = 0$ 时为完全非偏振光.

3 数值模拟及分析

利用 (1)–(8) 式对图 2 中集束交叉叠加时观察面强度及偏振特性进行数值模拟, 取超高斯阶数 $N = 6$, 束腰半径 $w_x = w_y = 180$ mm, 激光脉冲半宽度 $\tau = 0.5$ ns, 光波长 $\lambda = 1053$ nm, SSD 的调制深度 $\xi = 2.03$, 调制频率 $\nu_m = 20$ GHz, 激光调制带宽 $\Delta\lambda = 0.3$ nm, 聚焦透镜焦距 $f = 4$ m, 夹角 $\alpha = 30^\circ$.

3.1 互补型偏振控制板对偏振特性的影响

互补型偏振控制板对聚焦光场偏振特性的影响分为瞬时状态的影响以及一定积分时间内的影响, 且这两种影响存在一定程度的联系. 以图 3 集束中的单光束通过正交偏振控制板为例, 某一时刻聚焦光斑的偏振状态可由琼斯矩阵模型给出^[22], 其偏振态分布可由 x 方向和 y 方向偏振光场间的位相差及振幅比的分布来描述. 图 4 分别模拟了 $t = 500$ ps 时刻, 采用 SSD+PCP+OPCP (16×16 单元) 系统时, 观察面观察区域 (包含观察面约 87% 的能量) x 方向和 y 方向偏振光的位相差分布及 x 方向偏振光场的强度分布 I_x .

由图 4(a) 可知, 在 $t = 500$ ps 时刻, 观察区域各点 x 方向和 y 方向偏振光场的位相差不相同, 其振幅分布可由光强分布给出. 由图 4(b) 可知, 观察区域各点 I_x 不为零且各不相同, 类似地, y 方向偏

振的光强分布 I_y 与 I_x 分布相似, 但值不同, 即观察区域各点 x 方向和 y 方向偏振光的振幅比也各不相同. 两叠加光场位相差及振幅比不同则意味着叠加后光波的偏振状态不同, 例如, 当某点叠加的 x 方向和 y 方向偏振光的振幅比不为 0 或 1, 位相差不为 0 或 $\pm\pi$ 的奇数倍时, 该点处合成光场偏振状态为椭圆偏振态. 于是, 根据模拟结果可知, 观察面光场各点主要以各类椭圆偏振态的形式存在, 进一步的数值分析表明, 左旋椭圆偏光和右旋椭圆偏光的比例近似为 1 : 1. 由此可见, 由于偏振控制板的作用, 观察面瞬时光场不再是单一偏振光, 而是在平面上不同位置为各种椭圆偏振态的随机分布的光场.

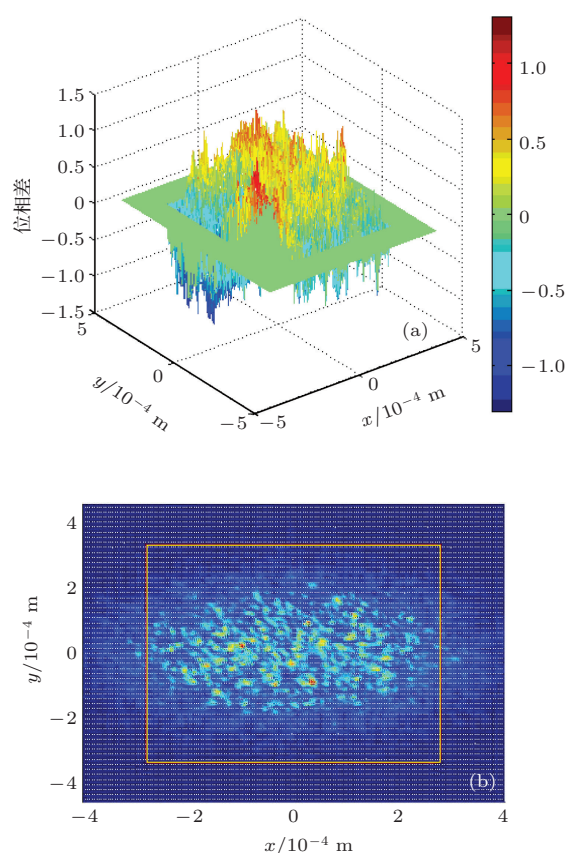


图 4 (网刊彩色) 单光束通过 SSD+CPP+OPCP 后, 观察面 x 方向和 y 方向偏振光场的位相差分布及 x 方向偏振光场光强 I_x 的分布, 红色画线为观察区域 (包含观察面约 87% 的能量) (a) 位相差分布; (b) I_x 分布

通过偏振控制板后, 某一时刻观察面光场的瞬时偏振态是各点随机分布的椭圆偏振态, 而光场偏振态的时间统计特性可以用偏振度来度量. 利用 (7), (8) 式对图 2 所示系统, $t = 500$ ps 到 $t = 509$ ps 这一段时间内的观察区域偏振度分布进行数值模拟.

图 5 给出了交叉集束通过互补型正交偏振控

制板 (16×16 单元) 系统后, 观察面观察区域的偏振度分布 P . 可以看出, 聚焦光场偏振度值不再为 1, 光场各点偏振度值也不相同. 这是由于 E_x 和 E_y 均为时间 t 的函数, 即不同时刻观察面某一点处 E_x 和 E_y 不同, 表现为不同时刻该点偏振态不同, 致使时间积分上光场表现为部分偏振光, 各点偏振度不再为 1 且值分布随机.

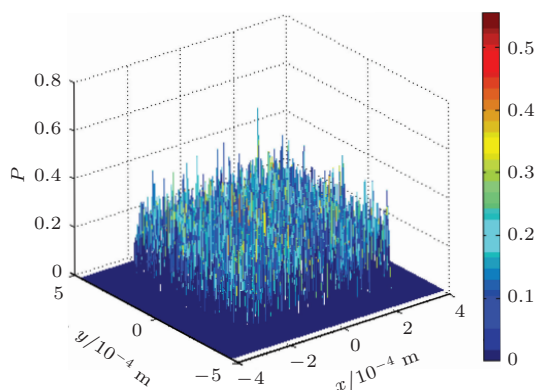


图5 (网刊彩色) 交叉集束通过 SSD+CPP+CO-OPCP 后, 观察区域偏振度分布

3.2 不同偏振控制板组合对聚焦光场特性的影响

图 5 中所示的偏振分布还可以用统计方法对其统计特性进行描述, 定义偏振度分布的期望 E_p 及标准差 D_p 分别为

$$E_p = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j), \quad (9)$$

$$D_p = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (P(x_i, y_j) - E_p)^2}, \quad (10)$$

式中, (m, n) 为观察面所取观察区域的点数, $P(x_i, y_j)$ 为观察区域内偏振度分布. 值得指出的是, E_p 和 D_p 反映了偏振度值的整体分布趋势.

定义光场斑纹的光通量对比度 C (contrast) 来描述强度均匀性, 其表达式为

$$C = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [I(x_i, y_j) - I_{\text{avg}}]^2} / I_{\text{avg}}, \quad (11)$$

式中, $I(x_i, y_j)$ 为所取观察区域内的光强分布, I_{avg} 为该区域的平均光强.

表 1 给出了双集束通过 SSD, CPP 以及不同偏振控制板组合后, 观察区域的光通量对比度 C 、偏振度分布的期望 E_p 以及标准差 D_p . 其中, 两块随

机偏振板组合 (two random control plates, TWO-RPCP) 子单元出射子光束为各种偏振态 (主要是椭圆偏振态) 的随机组合, 两块随机线偏振板组合 (two random linear control plates, TWO-LPCP) 子单元出射子光束为各种线偏振态 (偏振方向不同) 的随机组合, 偏振板单元数均为 16×16 单元.

表 1 双集束通过 SSD, CPP 与不同偏振控制板组合后观察区域的光斑特性

组合类型	C	E_p	D_p
互补正交偏振板	0.86	0.13	0.07
互补旋转偏振板	0.86	0.14	0.07
两块随机偏振板	0.89	0.31	0.15
两块随机线偏振板	1.08	0.25	0.11

由表 1 可知, 加入互补型偏振控制板后, 观察区域光通量对比度为 0.9 左右, 光斑强度分布已经较为均匀. 此外, 互补型偏振控制板与加入两块其他类型组合方式偏振控制板的光通量对比度相差不多, 且互补偏振板和两块随机偏振板的匀滑效果则相对较好. 加入互补正交偏振板后光斑强度均匀性有所改善是由于其近场产生的两类子光束偏振方向垂直, 这两类子光束在观察面非相干叠加的结果. 两块随机偏振板强度均匀性较好则是由于在近场各子光束间引入了随机偏振态, 这些偏振态分布随机的子光束在观察面部分相干叠加而使强度分布相对匀滑.

比较表 1 中的 E_p 和 D_p 可知, 互补型偏振板组合的消偏振能力强于非互补的偏振板, 其 E_p 和 D_p 值分别为 0.13 和 0.07 左右, 光场偏振特性已得到很好的控制. 这是因为采用互补型偏振控制板时, 两块偏振控制板对应子单元出射的子光束为正交的线偏振态, 即 (5) 式中 E_{1x} 和 E'_{1y} , E'_{1x} 和 E_{1y} 近似相等 (集束 2 与集束 1 类似), 而积分时间为 T 时 x 方向的光强为

$$I_x = \sum_t \sum_{i=1}^2 \{E_{ix}^2(t) + E'_{ix}{}^2(t)\},$$

y 方向光强

$$I_y = \sum_t \sum_{i=1}^2 \{E_{iy}^2(t) + E'_{iy}{}^2(t)\},$$

由此可知, 时间积分上偏振垂直方向的光强值更为接近. 由于时间积分上的偏振特性为各种椭圆偏振态的叠加, 椭圆偏振态的旋向、长轴方向以及长短轴之比在时间尺度也是随机分布, 因而垂直方向光

强值越接近时各种偏振态的混合越充分, 致使光场偏振度越低^[23].

在对观察面光斑强度特性进行描述时, 光通量对比度 C 反映了强度分布的均匀性, FOPAI(fractional power above intensity)可表征超过光斑平均功率的不同峰值热斑占光斑总功率的份额^[24], 其定义为

$$\text{FOPAI}(I_{\text{avg}}) = \frac{\int_{\text{where } I(x,y) > I_{\text{avg}}} I(x,y) dx dy}{\int_A I(x,y) dx dy}, \quad (12a)$$

式中, I_{avg} 表征观察区域光斑的平均光强.

类似地, 在对光斑偏振特性进行描述时, 可定义偏振度的概率密度PD(probability density)表征超过某一偏振度值的光斑在观察区域中的比例, 即

$$\text{PD}(P_0) = \frac{\int_{\text{where } P(x,y) > P_0} P(x,y) dx dy}{\int_A P(x,y) dx dy}, \quad (12b)$$

式中, P_0 为0—1之间的偏振度值.

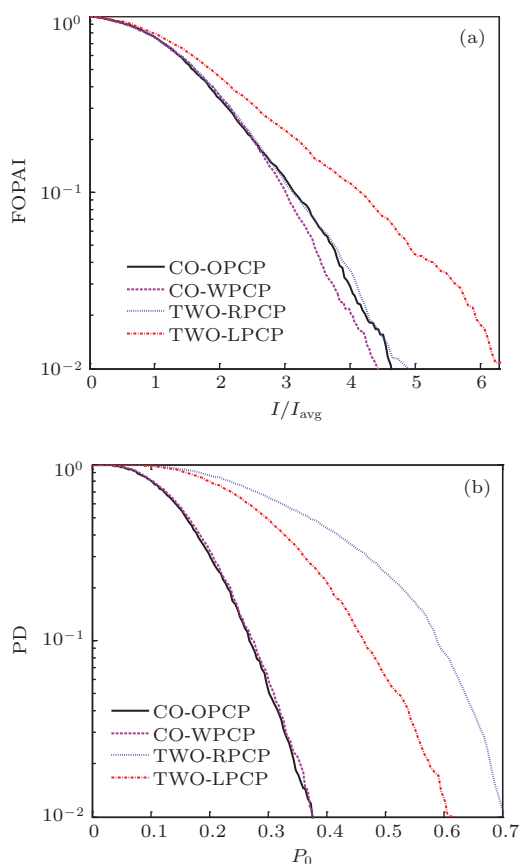


图6 (网刊彩色) 交叉集束通过互补偏振板后, 观察区域光场的 FOPAI 和 PD 曲线

图6给出了交叉集束通过互补偏振板后, 观察区域光场的FOPAI和PD曲线. 由图6可知, 采用互补偏振控制板与两块随机偏振板的组合时, FOPAI曲线接近且左移, 表明光斑中高峰值热斑所占比例下降, 进一步验证了表1中这几类方案束匀滑效果基本相当的结论. 由于偏振度为时间积分量且与垂直方向(x, y 方向)偏振光场的强度有关, 垂直方向强度越接近则偏振度值越小, 因此, 当采用互补型偏振控制板时, 其PD曲线左移, 消偏振效果明显优于非互补型偏振控制板.

3.3 采用互补型偏振控制板时, 单元数对光斑特性的影响比较

由以上分析可知, 采用互补型偏振控制板时, 抑制热斑和降低偏振度的效果相对较好. 对于偏振控制板而言, 其单元数是关键参数之一. 为此, 以互补型正交偏振控制板为例, 数值模拟了单元数对观察面光场特性的影响, 其典型结果列于表2. 类似地, 还进一步给出了观察区域光斑FOPAI, PD曲线, 如图7所示.

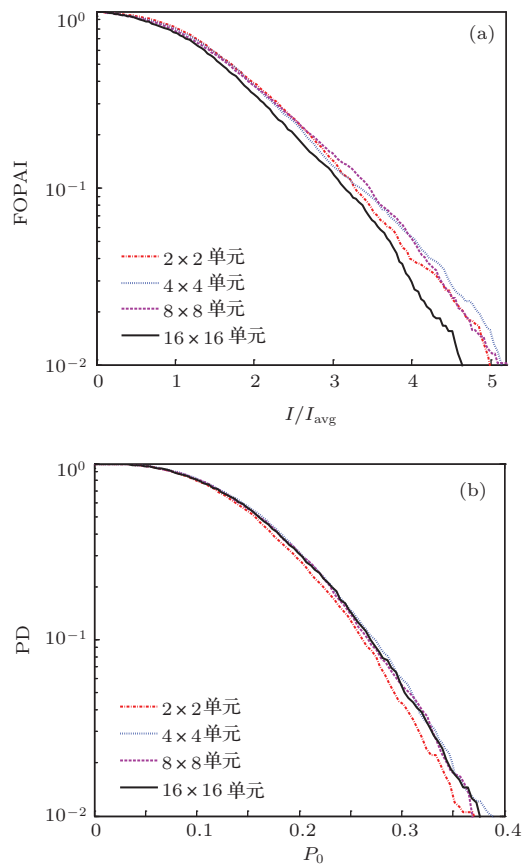


图7 (网刊彩色) 交叉集束通过不同单元数互补正交偏振板后, 观察区域的 FOPAI 和 PD 分布

由表 2 和图 7 可以看出, C 值随着单元数的增加呈下降趋势, 强度均匀性变好, 这是由于近场正交偏振的子光束增多, 光束波面进一步被打乱, 致使观察面叠加子光束的强度分布更加混乱且更符合统计特性, 故而使强度分布更为均匀. 进一步分析表 2 和图 7 可知, 光斑偏振特性随偏振控制板单元数的变化并不明显, 这是由于偏振度与偏振方向正交的光强有关, 加入任意单元数互补正交偏振板时, 其对偏振方向正交的光强影响几乎一致, 故偏振度随偏振板单元数变化不大.

表 2 交叉集束通过 SSD+CPP+CO-OPCP(不同单元)后观察区域 C , E_p , D_p 值

单元数	C	E_p	D_p
2×2	0.94	0.13	0.07
4×4	0.93	0.13	0.07
8×8	0.91	0.13	0.07
16×16	0.86	0.13	0.07

4 结 论

本文首先提出了基于互补型偏振控制板的多光束叠加的方案, 并建立了相应的物理模型. 理论分析了互补型偏振控制板影响聚焦光场偏振态的原因, 数值模拟和比较分析了不同类型互补型偏振控制板对交叉光束叠加光斑场特性的影响, 并讨论了互补型正交偏振控制板单元数对聚焦光场强度均匀性及偏振特性的影响. 研究结果表明: 多光束叠加时, 互补型偏振控制板的消偏振能力优于非互补偏振控制板, 能有效匀滑聚焦光场并降低其偏振度; 互补型偏振控制板的单元数对聚焦光场的强度特性存在影响, 但对其偏振特性的影响不大. 由此可见, 在实际工作中应选择互补型偏振控制板, 以实现聚焦光场均匀性的改善及消偏振的控制, 并需要合理选取偏振控制板单元数.

参考文献

- [1] Yang C L, Zhang R Z, Xu Q, Ma P 2008 *Appl. Opt.* **47** 1465
- [2] Skupsky S, Short R W, Kessler T, Craxton R S, Letzring S, Soures J M 1989 *J. Appl. Phys.* **66** 3456
- [3] Dixit S N, Lawson J K, Manes K R, Powell H T 1994 *Opt. Lett.* **19** 417
- [4] Jiang X J, Lin Z Q 2010 *Laser Optoelectron. Prog.* **47** 1407 (in Chinese) [江秀娟, 林尊琪 2010 激光与光电子学进展 **47** 1407]

- [5] Rothenberg J E 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3654
- [6] Tsubakimoto K, Nakatsuka M, Nakano H, Kanabe T, Jitsuno T, Nakai S 1992 *Opt. Commun.* **91** 9
- [7] Skupsky S, Kessler T J 1993 *J. Appl. Phys.* **74** 4310
- [8] Xiao J, Lu B D, Jiang M 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 2383 (in Chinese) [肖峻, 吕百达, 姜明 2000 物理学报 **49** 2383]
- [9] Ling X H, Luo H L, Zhao C J, Wen S C, Fan D Y 2012 *Appl. Opt.* **51** 4749
- [10] Froula D H, Divol L, Berger R L, London R A, Meezan N B, Strozzi D J, Neumayer P, Ross J S, Stagnitto S, Suter L J, Glenzer S H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 115002
- [11] Michel P, Divol L, Williams E A, Thomas C A, Callahan D A, Weber S, Haan S W, Salmonson J D, Meezan N B, Landen O L, Dixit S, Hinkel D E, Edwards M J, MacGowan B J, Lindl J D, Glenzer S H, Suter L J 2009 *Phys. Plasmas* **16** 042702
- [12] Kruer W L, Wilks S C, Afeyan B B, Kirkwood R K 1996 *Phys. Plasmas* **3** 382
- [13] Moses E I, Boyd R N, Remington B A, Keane C J, Al-Ayat R 2009 *Phys. Plasmas* **16** 041006
- [14] Fleurot N, Cavailler C, Bourgade J L 2005 *Fusion Eng. Des.* **74** 147
- [15] Moses E I 2010 *IEEE T. Plasma. Sci.* **38** 684
- [16] Michel P, Rozmus W, Williams E A, Divol L, Berger R L, Glenzer S H, Callahan D A 2013 *Phys. Plasmas* **20** 056308
- [17] Wegner P, Auerbach J, Biesiada T, Dixit S, Lawson J, Menapace J, Parham T, Swift D, Whitman P, Williams W 2004 *SPIE Photonics West* San Jose, California, January 24–29, 2004 p180
- [18] Kalantar D H 2000 *NASA STI/Recon Technical Report N* **3** 12615
- [19] Fan X M, Lu Z W, Lin D Y, Wang Y L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 104210
- [20] Fu F X, Zhang B 2011 *Chinese Journal of Lasers* **38** 44 (in Chinese) [付福兴, 张彬 2011 中国激光 **38** 44]
- [21] Jian X H, Zhang C M, Zhu B H, Zhao B C, Du J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7565 (in Chinese) [简小华, 张淳民, 祝宝辉, 赵葆常, 杜娟 2008 物理学报 **57** 7565]
- [22] Yu D Y, Tan H Y 2006 *Optical engineering* (second edition) (Beijing:China Machine Press) pp440–441 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2006 工程光学 (第二版) (北京: 机械工业出版社) 第 440—441 页]
- [23] Yu D Y, Tan H Y 2006 *Optical engineering* (second edition) (Beijing:China Machine Press) p420 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2006 工程光学 (第二版) (北京: 机械工业出版社) 第 420 页]
- [24] 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, 栗敬钦, 王建军, 李海, 耿远超, 梁樾, 赵润昌, 董军, 卢宗贵, 周丽丹, 刘兰琴, 林宏煊, 许党朋, 邓颖, 朱娜, 景峰, 隋展, 张小民 2012 物理学报 **61** 054204]

Study on multi-beam superposition using complementary polarization control plates^{*}

Li Ze-Long Zhong Zhe-Qiang Zhang Bin[†]

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

(Received 25 November 2013; revised manuscript received 27 January 2014)

Abstract

In order to meet the requirement for uniform irradiation on the target in inertial confinement fusion, a scheme is proposed for achieving the depolarized superposition of multi-beams and further improving the uniformity of the focus spot by using complementary polarization control plates to change the polarization state of the beam. A physical model of multi-beam transformation by complementary polarization control plates is built up, and the mechanism how complementary polarization control plates affect the polarization characteristics of the focus spot is analyzed theoretically. The polarization properties and uniformity of the focus spot are compared for the two cases: viz the complementary polarization control plates and the un-complementary polarization control plates. Furthermore, the selection of elements of polarization control plates is discussed. Results show that after beams propagating through the complementary polarization control plates, the focal spot is not completely polarized but mixed randomly with various kinds of partially polarized states. Compared with the un-complementary polarization control plates, the complementary polarization control plates can achieve better depolarization effect on focus plane, resulting in the degree of polarization dropping to below 0.2, and thus achieving the effective improvement of intensity uniformity. When the complementary polarization control plates are utilized, the number of elements of polarization control plates has little effect on the polarization characteristics of the spot, but it can influence the intensity uniformity to some extent. Consequently, the number of elements of polarization control plates should be chosen appropriately in practical application.

Keywords: inertial confinement fusion, complementary polarization control plates, polarization properties, uniformity

PACS: 52.57.-z, 42.79.Ci, 42.25.Ja, 42.60.Jf

DOI: 10.7498/aps.63.095204

^{*} Project supported by the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. GFZX0205010502.7), the Scientific Research Foundation of the Education Department of Sichuan Province, China (Grant No. 13Td0048), and the Research Award Fund for Outstanding Young Teachers in Higher Education Institutions, China (Grant No. 2011-2-B17).

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