

偏振控制板对干涉斑纹的匀滑特性*

肖 峻^{1,2} 吕百达¹

(¹ 四川大学激光物理与化学研究所 成都 610064; ² 西南民族学院物理系 成都 610041)

提要 对偏振控制板匀滑随机位相板产生的干涉斑纹的特性进行了理论分析和数值模拟,用叠加在光强包络上的斑纹对比度来评价偏振控制板的匀滑作用,结果表明结构最简单的二单元偏振控制板对远场光斑具有最佳匀滑效果。

关键词 偏振控制板,随机位相板,光束匀滑,激光聚变

1 引 言

在激光聚变中,提高靶面辐照的均匀性是一个至关重要的问题。采用随机位相板(RPP)等列阵空间束匀化技术^[1,2],可有效地消除近场分布不均匀对靶面辐照的影响,并能控制靶面辐照的光强包络,使靶面的相对光强包络对入射光场的分布不敏感。但是,所付出的代价是,由于子束间的干涉,在光强包络上叠加了小尺度的光强起伏。这样,即使用最佳的光强包络辐照靶面,也会因为这些小尺度光强起伏的存在而使整体的辐照均匀性难以达到球靶内爆的要求。因此,必须进一步消除光斑的小尺度干涉斑纹。

由于偏振方向相互垂直的两束光不产生干涉,因此,通过控制子束的偏振方向可抑制子束间的干涉,从而起到匀滑干涉斑纹的作用。偏振控制板(PCP)就是基于这一概念而提出的。本文对偏振控制板匀滑随机位相板产生的干涉斑纹的特性进行了理论分析和数值模拟,按衍射理论计算远场光斑的二维光强分布,用叠加在光斑包络上的斑纹对比度来定量评价偏振控制板的匀滑作用,对不同单元形状和单元大小 PCP 的计算结果表明结构最简单的二单元偏振控制板对远场光斑具有最佳匀滑效果。

2 偏振控制板

偏振控制板通过在光束内局部旋转偏振光方向(0 和 $\pi/2$),能在大口径的光束内产生出偏振方向互相垂直的两类子光束。偏振控制板可由多片偏振旋转元(半波片等)按一定排布构成。偏振旋转元的形状一般为方形,按二维阵列配置;也可以是长条形的,按一维阵列配置。如图 1 所示,黑白两色分别对应子束偏振方向相互正交的两种单元。激光通过偏振控制板后形成偏振方向互相垂直的、且在空间互相分离的两部分偏振光。偏振控制板可用石英半波

* 国家高技术惯性约束聚变主题资助项目。

收稿日期: 1999-01-18; 收到修改稿日期: 1999-02-26

片^[3], KDP 晶体^[4]及向列型液晶^[5]制作。

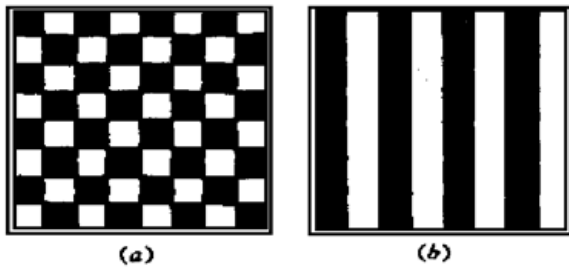


图 1 偏振控制板的结构
(a) 方格结构; (b) 条纹结构

Fig. 1 The structure of polarization control plate
(a) check-pattern PCP; (b) strip-pattern PCP

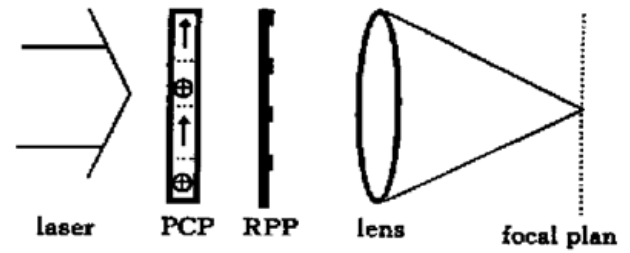


图 2 用偏振控制板匀滑斑纹的光学系统

Fig. 2 Optical system of PCP smoothing
RPP speckle

3 理论分析

如图 2 所示, PCP 在 RPP 前面, RPP 靠近聚焦透镜, 激光通过 PCP 和 RPP 后被分割成偏振方向互相垂直的两类子束, 远场光斑的光强分布为两独立斑纹的即时叠加。

由 Fraunhofer 公式可得焦面上的光场分布为

$$U_0(x, y) = S(x, y) \left[\vec{\epsilon}_a \sum_{l,m}^a U_{lm} \exp \left[\frac{-ik(x\xi_{lm} + y\eta_{lm})}{f} + i\varphi_{lm} \right] + \vec{\epsilon}_b \sum_{l,m}^b U_{lm} \exp \left[\frac{-ik(x\xi_{lm} + y\eta_{lm})}{f} + i\varphi_{lm} \right] \right] \quad (1)$$

式中, $\vec{\epsilon}_a$ 和 $\vec{\epsilon}_b$ 分别表示两个相互正交偏振方向的单位矢量, 求和仅限于偏振方向相同的位相元。 $k = 2\pi/\lambda$, λ 为光波波长, f 为透镜的焦距, (ξ_{lm}, η_{lm}) 为 RPP 第 (l, m) 位相元中心的坐标, U_{lm} 为入射光束的振幅分布, 位相 φ_{lm} 包括入射场的位相起伏和 RPP 引入的随机相移。式中已假设在各位相元中入射光的分布变化不大, PCP 靠近 RPP, 且偏振光旋转元不小于位相元, 可略去偏振光旋转元的衍射效应。 (x, y) 为焦面上的坐标, $S(x, y)$ 对应振幅为 1 的平面波通过单一位相元后在远场的衍射分布。

由上式可得焦面上的光强分布为

$$I(x, y) = I_0(x, y) \left[\left| \sum_{l,m}^a U_{lm} \exp \left[\frac{-ik}{f} (x\xi_{lm} + y\eta_{lm}) + i\varphi_{lm} \right] \right|^2 + \left| \sum_{l,m}^b U_{lm} \exp \left[\frac{-ik}{f} (x\xi_{lm} + y\eta_{lm}) + i\varphi_{lm} \right] \right|^2 \right] \quad (2)$$

式中 $I_0(x, y) = |S(x, y)|^2$ 为单元衍射远场光斑的光强分布。

匀滑斑纹就是要消除或抑制叠加在光斑包络上的斑纹。对于单光束而言, 斑纹的匀滑效果应以叠加在光斑包络上的斑纹大小来评价, 因此, 对于正方形位相元结构的随机位相板, 定义叠加在光斑包络上的斑纹对比度为

$$C = \left[\left(\frac{1}{2\pi} \right)^2 \int_{-\pi}^{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left| \frac{I(x, y) - I_c(x, y)}{I_c(x, y)} \right|^2 dx dy \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, 光斑包络 $I_c(x, y) = I_0(x, y) \sum_{l,m}^a U_{l,m}^2 + \sum_{l,m}^b U_{l,m}^2$, $I_0(x, y) = A \text{sinc}^2(\bar{x}) \text{sinc}^2(\bar{y})$, A 为常数, $\bar{x} = xkd/2f$, $\bar{y} = ykd/2f$ 。对于其他单元形状 RPP, 式中的积分上下限和常数因子有所不同。

根据斑纹的统计分析^[3], 多个独立的、不相干的斑纹叠加可降低斑纹对比度。只用 RPP 时, 焦面上只有一个独立斑纹, 斑纹对比度为 1。引入偏振控制板后, 焦面光斑由两个独立斑纹叠加而成, 若两斑纹平均光强相等且两斑纹完全重叠, 叠加后的斑纹对比度为 $1/\sqrt{2}$, 即斑纹对比度较只用 RPP 时降低了 30%。随着两叠加斑纹的平均光强差增大, 斑纹对比度的降低会减小。为使偏振控制板有效发挥其斑纹匀滑作用, 两光斑的平均光强应相等。因此, 在设计偏振控制板时, 应使两偏振方向的单元数相等。

4 数值模拟

对不同单元形状和不同单元大小的 PCP 对 RPP 远场斑纹的匀滑作用进行了数值模拟。即按(2)式计算远场光斑的二维光强分布, 再按(3)式计算光斑的斑纹对比度。由于 RPP 的远场光斑的相对光强分布对入射场分布不敏感, 为简单起见, 设入射场为一平面波。计算中取光波波长为 $0.6328 \mu\text{m}$, RPP 为 32×32 单元和 64×64 单元的, 位相元为正方形, 其边长为 1.8984 mm , 聚焦透镜焦距为 600 mm , 即远场光斑尺度为 $400 \mu\text{m}$ 。PCP 的单元形状为方格和长条形。

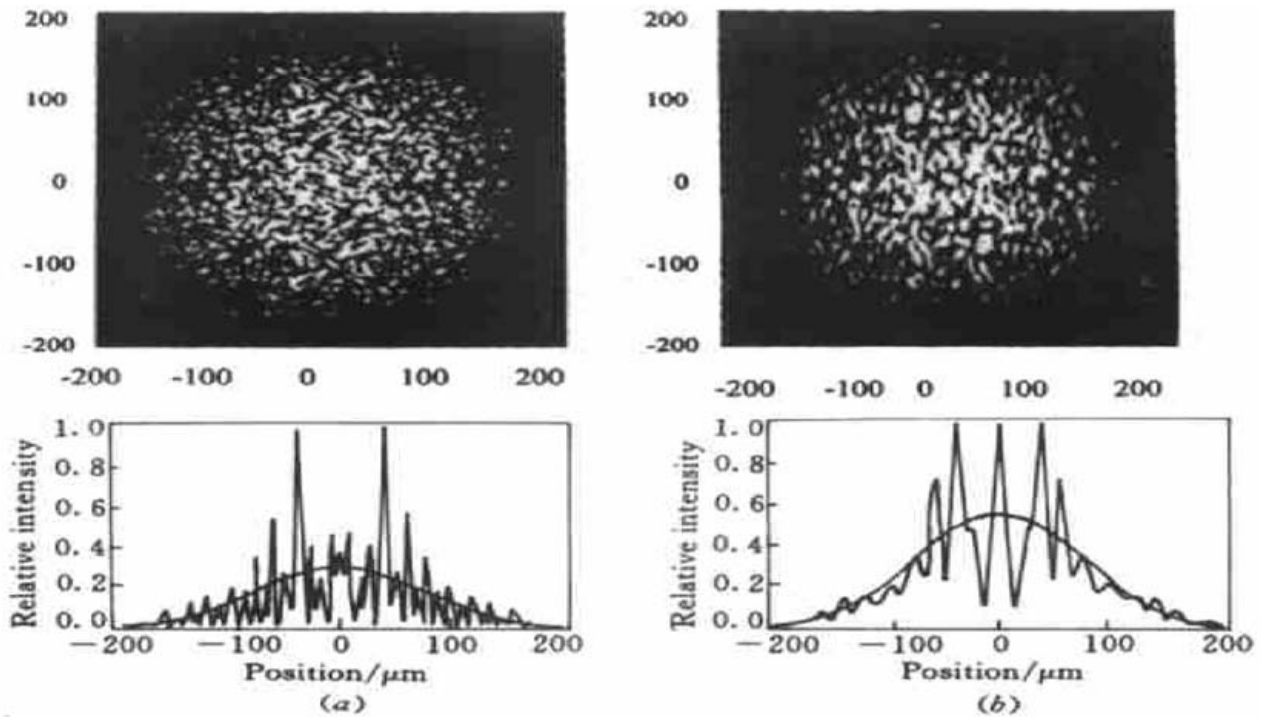


图3 数值计算的远场光斑及其一维光强分布

(a) 无 PCP; (b) 有 PCP

Fig. 3 Calculated far-field spots and their one-dimensional profiles

(a) without PCP; (b) with PCP

图3给出了只用 32×32 单元 RPP 和同时加入二单元 PCP 时, 数值计算出的远场光斑及其一维相对光强分布。为了比较, 图中还给出光强包络的相对分布。由此图可见, 偏振控制板的引入使相对于包络的斑纹起伏大幅度降低, 包络的相对高度明显增加(其最大值由 0.295 增加到 0.57)。两光斑对应的斑纹对比度分别为 0.9885 和 0.6902。即加入 PCP 后, 斑纹对比度降低了 30.17%。这与斑纹的统计分析结果基本一致。由此可见偏振控制板能有效地匀滑干涉

斑纹。需要说明的是,这里计算所得的斑纹对比度降低率略高于统计分析的理论值是由于计算中 RPP 的单元数不够大(仅为 32×32),对单元数足够大的 RPP,斑纹对比度的降低率不会超过 30%。对 64×64 单元 RPP 计算模拟的斑纹对比度降低率为 29.23%。斑纹对比度的降低率是相对于只用 RPP 时的斑纹对比度而言的。

表 1 PCP 的单元形状和单元大小对斑纹匀滑作用的影响

Table 1 Influence of PCP element shapes and sizes on smoothing effect

32 × 32 element RPP			64 × 64 element RPP		
No. of PCP element	Speckle contract	Reduction rate/ %	No. of PCP element	Speckle contract	Reduction rate/ %
1	0.9885	—	1	0.9915	—
2	0.6902	30.17	2	0.7017	29.23
4	0.7098	28.19	4	0.7245	26.92
8	0.7324	25.91	16	0.7302	26.35
16	0.7154	27.63	64	0.7063	28.76
32	0.7289	26.26	2 × 2	0.7236	27.02
2 × 2	0.7101	28.16	4 × 4	0.7064	28.75
4 × 4	0.7129	27.88	8 × 8	0.7149	27.90
8 × 8	0.7368	25.46	16 × 16	0.7552	23.83
16 × 16	0.7244	26.71	32 × 32	0.7437	24.99
32 × 32	0.6941	29.78	64 × 64	0.7120	28.19

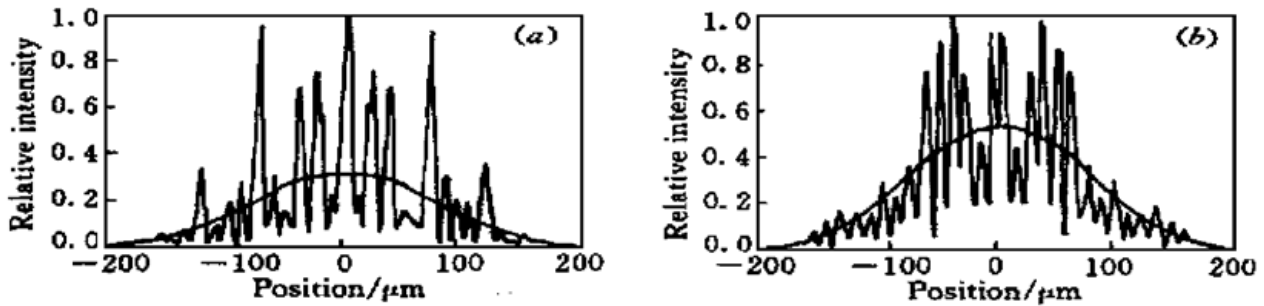


图 4 加入不同单元形状 PCP 时远场光斑的一维光强分布

Fig. 4 Far-field intensity profile for different element shapes PCPs

表 1 给出了引入不同单元形状、不同单元大小 PCP 时的斑纹对比度及其降低率(相对于不加入偏振控制板的情形)。为了利用 RPP 单元对光斑特性的控制,偏振光旋转元的大小应不小于 RPP 的位相元。由表 1 可知,PCP 的单元形状和单元大小对 PCP 的斑纹匀滑作用有一定的影响。在单元数相同的情况下,条纹结构 PCP 与方格型结构 PCP 的斑纹匀滑效果相差不多,图 4 所示为分别加入两种不同单元形状 PCP 时远场光斑的一维光强分布,图 4(a) 对应方格型四单元 PCP,图 4(b) 对应条纹型四单元 PCP,包络的相对高度分别为 0.32 和 0.55。

在光束口径 ($L \times L$) 一定的情况下,二单元 PCP 能把偏振方向相同的位相元限制在最小的范围 ($L/2 \times L$) 内,这对于消除相距较远的位相元子束间干涉形成的小尺度起伏最为有效。对激光聚变来说,消除小尺度的不均匀性,意味着消除瑞利-泰勒流体不稳定性增长率最快的

高阶模,这对于靶面辐照初期是非常重要的。随着 PCP 的单元数增大,由相距较远的位相元子束间的干涉形成的小尺度不均匀性增大,图 5 所示为分别加入两种不同单元大小 PCP 时远场光斑的一维光强分布,比较图 5 (a) (对应二单元 PCP) 和图 5 (b) (对应 32×32 单元 PCP) 可以明显地看出这点。当 PCP 的单元数增加时,斑纹对比度略有增加,即斑纹匀滑作用有所减弱。但是,当 PCP 的单元数增加到与 RPP 单元数相同(即 PCP 的单元与 RPP 的单元同样大)时,斑纹对比度又明显降低,这是由于在这种情况下,PCP 对相邻位相元子束间干涉(产生较低频不均匀性)的抑制作用最强,但其斑纹对比度仍高于二单元 PCP 的斑纹对比度。因此,相比之下,从降低斑纹对比度来看,二单元 PCP 对远场光斑的匀滑效果最佳。

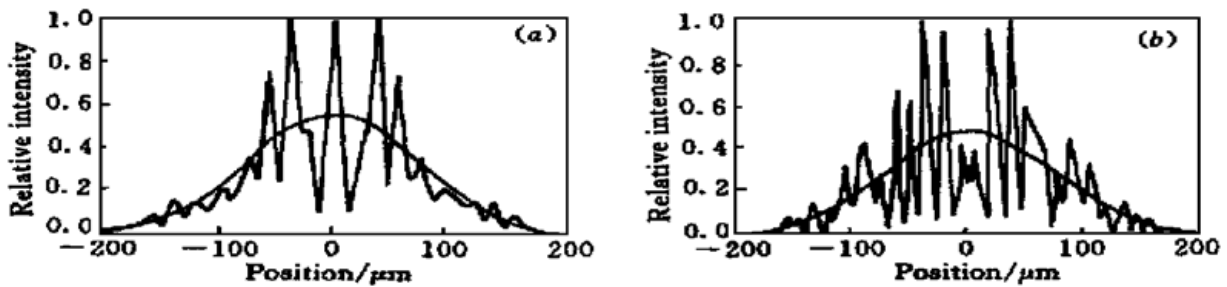


图 5 加入不同单元大小 PCP 时远场光斑的一维光强分布

Fig. 5 Far-field intensity profile for different element size PCPs

5 结 论

PCP 通过控制 RPP 子束间的偏振方向能部分抑制子束间的干涉,在靶面形成两个独立斑纹的叠加,从而降低光斑斑纹对比度,实现斑纹匀滑。理论分析和数值模拟都表明 PCP 能有效地降低 RPP 的干涉斑纹。对于远场光斑,由于各子束能完全重叠,二单元的 PCP 具有最佳的匀滑效果。由于二单元 PCP 的结构最简单,其制作也最为容易,这在实际应用中是非常有意义的。PCP 对准远场光斑的匀滑特性可用同样的方法来分析和计算,但对准远场的光斑,由于 RPP 的各子束不完全重叠,二单元 PCP 不可能获得最佳的匀滑效果,为使两类偏振光子束分别产生的干涉斑纹尽可能重叠,随着离焦距离增大应相应地增大 PCP 的单元数。

PCP 对干涉斑纹的匀滑作用不需要时间,属于一种即时匀滑法。在激光聚变中,这种方法用于靶面辐照初期的光斑匀滑更有意义。然而,由于 PCP 对斑纹对比度最多只能降低 30%,不能完全除去斑纹,要进一步消除斑纹,达到激光聚变要求,还需结合其他斑纹匀滑技术。

参 考 文 献

- 1 Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga *et al.*. Random phasing of high power lasers for uniform target acceleration and plasma instability suppression. *Phys. Rev. Lett.*, 1984, **53**(11): 1057~ 1060
- 2 X. Deng, X. Liang, Z. Chen *et al.*. Uniform illumination of large targets using lens array. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(3): 377~ 381
- 3 K. Tsubakimoto, M. Nakatsuka, H. Nakano *et al.*. Suppression of interference speckles produced by a random phase plate, using a polarization control plate. *Opt. Commun.*, 1992, **91**(1,2): 9~ 12
- 4 K. Tsubakimoto, T. Jitsuno, N. Miyanaga *et al.*. Suppression of speckle contrast by using polarization property on second harmonic generation. *Opt. Commun.*, 1993, **103**(3,4): 185~ 188
- 5 K. Tsubakimoto. Study on improving irradiation uniformity of spherical target for laser fusion. Ph. D. Dissertation. Chap. V. Osaka University, 1993. 77~ 87

Characteristics of Polarization Control Plate Smoothing Interference Speckles

Xiao Jun^{1,2} Lü Baida¹

¹*Institute of Laser Physics and Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610064*

²*Department of Physics, Southwest Nationalities College, Chengdu 610041*

Abstract Characteristics of polarization control plate smoothing interference speckles produced by random phase plates are analyzed theoretically and simulated numerically. When the smoothing effect is valued by the speckle contrast over the intensity profile, the results show that the simplest two-element polarization control plate has the best smoothing effect for the far-field spot.

Key words polarization control plate, random phase plate, beam smoothing, laser fusion

激光二极管抽运高浓度掺杂 Yb: YAG 晶体获得 3.8 W 连续激光输出

在热力学性质优良的 YAG 晶体中, Yb³⁺ 离子仅有的两个电子态产生 Stark 分裂后, 形成准三能级的激光能级, 具有高的激光效率和掺杂浓度, 较 Nd³⁺ 离子的四能级分布更容易在激光二极管抽运下产生高功率激光输出。

我们采用 Al₂O₃, Y₂O₃ 和高纯 Yb₂O₃ 粉料, 已经能够生长掺杂浓度高达 30 at-% 的 Yb: YAG 晶体毛坯, 尺寸约为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 80 \sim 100 \text{ mm}$ 。Yb: YAG 晶体中色心的形成与生长气氛有关, 即在中性气氛下生长出来的晶体是缺氧的, 其中位于 375 nm 的吸收带及 430 nm 发光带可能对应于 Yb²⁺ 离子的 $A_{1g}-T_{1u}$ 跃迁, 而位于 625 nm 的吸收带为晶体中因 Yb²⁺ 离子而产生的 F 色心吸收, 它们对激光性能有比较严重的影响, 必须进行高温氧化退火来消除色心。

用本课题组生长的 5 at-% 掺杂 Yb: YAG 晶体, 在以色列本·古里安大学进行了高功率激光二极管抽运的激光实验。抽运波长为 940 nm。实验中 Yb: YAG 晶体为 $\varnothing 2 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 圆柱形短棒, 两平行端面抛光处理。镀膜情况如下: 第一面镀对 1030 nm 波长的 AR 增透膜; 第二面镀对 940 nm 波长的 HT 增透膜和 1030 nm 波长的 HR 高反膜。1030 nm 波长的激光输出腔镜的透过率为 5%, 该腔镜距离激光棒 35 mm。当 Yb: YAG 晶体被冷却到 10 °C, 15 °C 和 20 °C 时, 激光斜率效率在 24.1% ~ 24.5% 之间, 激光阈值从 10.8 W (10 °C) 上升到 14.9 W (20 °C)。在 10 °C 低温条件下, 激光二极管抽运功率为 32 W 时, 获得的最大连续激光输出功率为 3.8 W。

邓佩珍¹ 陈伟¹ Y. Kalisky²

¹ 中国科学院上海光机所 上海 201800

² 以色列本·古里安大学

收稿日期: 2000-04-18