

# 基于光克尔效应的径向匀滑方案参数优化

李腾飞 侯鹏程 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要** 在基于光克尔效应的径向匀滑方案中, 抽运光脉冲序列利用非线性介质的光克尔效应对激光束附加周期性的球面位相调制, 从而使激光束远场焦斑内部散斑产生周期性的径向扫动, 以改善远场焦斑均匀性。为了分析抽运光时间特性的改变对匀滑效果的影响, 建立了径向匀滑方案的理论模型, 并利用该模型对抽运光的时间特性参数进行了分析及优化。结果表明, 在抽运光子脉冲之间的延迟时间一定时, 子脉冲的脉宽过大或过小均会降低激光束远场的辐照均匀性, 而随着子脉冲脉宽的增大, 激光束远场的辐照均匀性随积分时间的波动相对趋于稳定, 因而在避免产生明显“拍频”现象的前提下, 选取较大的抽运光子脉冲脉宽更有利于实现稳定的匀滑效果。激光束与抽运光的时间同步精度对初期的匀滑效果有较大的影响, 当抽运光提前  $1/5$  个周期左右时, 可以在更短的积分时间内达到较好的径向匀滑效果。此外, 不同的抽运光时间波形所获得的匀滑效果也有所不同, 当抽运光的时间波形为三角波时, 焦斑内部散斑的径向扫动速度较为稳定, 可以使径向匀滑的整体效果及稳定性得到有效改善。

**关键词** 激光光学; 惯性约束聚变; 光克尔效应; 径向匀滑; 均匀性

**中图分类号** TN241 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1114002

## Parameters Optimization for Radial Smoothing Based on Optical Kerr Effect

Li Tengfei Hou Pengcheng Zhang Bin

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

**Abstract** In the scheme of radial smoothing based on the optical Kerr effect, pump laser pulse train uses optical Kerr effect of nonlinearity medium to add periodical spherical phase modulation, which makes the speckle inside the focal spot of the laser beam in far field sweep periodically at radial direction, and the uniformity of the focal spot in far field is improved. To analyze the influence of temporal characteristics change of the pump laser on beam smoothing effect, a theoretical model of the radial smoothing scheme has been established, and the time characteristic parameters of the pump laser has been analyzed and optimized. The results indicate that, for the given delay time between pump photon pulses, the sub-pulse with either too large or too small pulse width will reduce the irradiation uniformity of laser beam in far field. Meanwhile, with the increase of the pulse width of sub-pulse, the volatility of irradiation uniformity of laser beam in far field with integral time is trending toward stability relatively. Thus, the relatively large pulse width of the pump laser would be beneficial to obtain a more stable smoothing effect under the condition that the obvious beat wave effect should be avoided as far as possible. The time synchronous precision between the laser beam and the pump laser has a significant influence on the initial beam smoothing effect. For the pump laser of about one fifth period of the pulse train in advance, a better smoothing effect can be obtained in a relatively shorter integral time. In addition, for different temporal shapes of the pump laser, different smoothing effects can be achieved. When the temporal shape of the pump laser is triangular, the radial direction sweeping speed of the speckle inside the focal spot is relatively stable, and the radial smoothing effect and its stability can be improved effectively.

**Key words** laser optics; inertial confinement fusion; optical Kerr effect; radial smoothing; uniformity

**OCIS codes** 140.3295; 190.3270; 320.5540

**收稿日期:** 2016-04-29; **收到修改稿日期:** 2016-05-29

**基金项目:** 国家重大专项应用基础项目(JG2015034)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队资助项目(2014RA4051)

**作者简介:** 李腾飞(1993—), 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: gotovoid@126.com

**导师简介:** 张 彬(1969—), 女, 博士, 教授, 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)

## 1 引 言

在激光驱动惯性约束聚变(ICF)装置中,能否产生均匀的靶面辐照是打靶成功的关键因素之一<sup>[1]</sup>。为了有效改善靶面的辐照均匀性,研究者发展了多种束匀滑技术,包括连续相位板(CPP)、透镜阵列(LA)、偏振匀滑(PS)等空域匀滑技术,以及光谱色散匀滑(SSD)、空间诱导非相干(ISI)等时域匀滑技术<sup>[2-5]</sup>。在实际应用中,通常会同时使用多种束匀滑技术,例如,以美国国家点火装置(NIF)为代表的驱动装置中采用了SSD、CPP与PS联合的束匀滑技术<sup>[6]</sup>。然而,SSD引入的频率调制会使激光集束的带宽增大,而过高的调制频率会导致三倍频的转换效率降低。此外,由于SSD扫动方向单一,将导致一维SSD的焦斑出现明显的条纹状扫动痕迹,而二维SSD焦斑则会出现明显的相干斑纹<sup>[7]</sup>。为了避免上述缺点,本课题组提出了一种新型束匀滑技术——径向匀滑(RS)技术<sup>[8]</sup>。径向匀滑技术利用光克尔效应,当周期性超高斯脉冲序列抽运光与半球形光克尔介质作用时,光克尔介质产生近似球面的折射率分布,而激光束通过光克尔介质时的透射波前将受到周期性球面位相调制,从而周期性地改变激光集束远场焦斑尺寸,进而引起靶面光斑内部散斑在径向方向的快速周期性扫动,以抹平靶面焦斑在径向方向上的强度调制,改善靶面辐照均匀性。

在径向匀滑方案中,产生快速周期性变化的球面位相调制是该方案能否成功实施的关键因素之一,在之前的工作中,本课题组初步分析了方案中的光克尔介质的非线性折射率系数、介质的厚度、抽运光的峰值强度等关键参数对匀滑效果的影响<sup>[9]</sup>。然而,对抽运光的一些关键参数,如抽运光子脉冲的脉宽与子脉冲之间的延迟时间、抽运光与激光束的时间同步、抽运光子脉冲的时间波形等没有作出详尽分析。其中,抽运光子脉冲的时间波形决定了不同时刻激光束波前调制的大小,进而影响不同时刻焦斑径向扫动速度的快慢,最终影响靶面的辐照均匀性;同时,对于特定的时间波形,子脉冲的脉宽和子脉冲之间的时间延迟对焦斑扫动速度同样有着重要影响;此外,抽运光相对于激光束的时间同步问题会对初期的匀滑效果造成较大影响。为了进一步改善径向匀滑方案的匀滑效果,本文重点针对该方案中抽运光的关键参数进行了分析和优化,以期加深对径向匀滑方案的理解,为径向匀滑方案的工程应用提供有用参考。

## 2 理论模型

参照美国NIF装置而建立的单一子束径向匀滑方案的示意图<sup>[10]</sup>如图1所示。利用可调谐皮秒激光器产生高斯脉冲,并通过脉冲堆积的方式得到抽运光脉冲序列<sup>[11]</sup>。为了避免光克尔效应对抽运光造成的自聚焦影响,利用锯齿光阑对高斯脉冲进行空间整形,以得到空间分布为平顶分布的超高斯脉冲序列<sup>[12]</sup>。激光光子束与抽运光同时通过半球形光克尔介质,抽运光使光克尔介质的折射率分布作周期性的快速变化,进而对激光光子束附加周期性的球面位相调制。由光克尔介质的线性折射率引入的位相调制通过补偿介质进行位相补偿,并利用偏振片将光克尔介质作用后的抽运光滤掉,而后激光束再进一步经过扩束、放大、三倍频及CPP整形后,最终由透镜聚焦在靶面上。

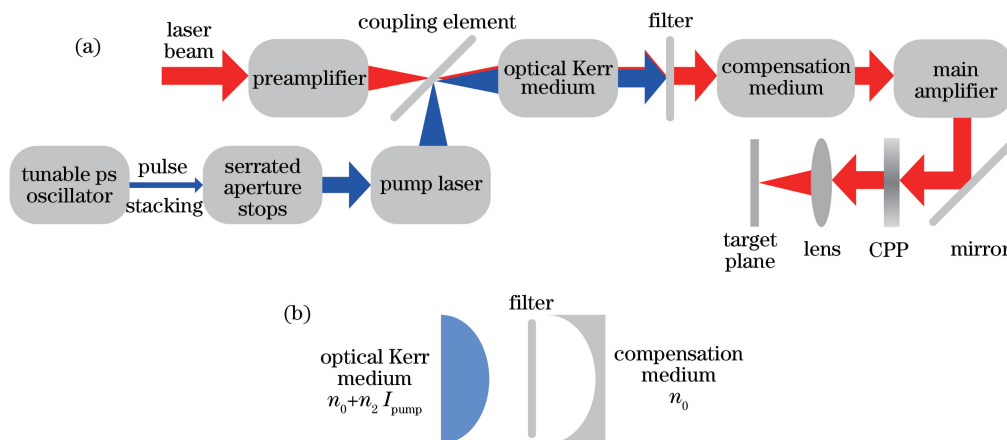


图1 (a)径向匀滑理论模型;(b)光克尔介质、滤光片及位相补偿介质示意图

Fig. 1 (a) Theoretical mode of radial smoothing; (b) illustration of optical Kerr medium, filter and compensation medium

激光集束的子束为正弦调制且有位相畸变的矩形超高斯脉冲,其光场分布表达式为

$$E = E_0(t) \left[ 1 + 2\pi\beta \left( \sin \frac{2\pi x}{l_x} + \sin \frac{2\pi y}{l_y} \right) \right] \exp \left[ - \left( \frac{x^{2N}}{\omega^{2N}} + \frac{y^{2N}}{\omega^{2N}} \right) \right] \exp(i\sigma_{\text{random}}), \quad (1)$$

式中  $E_0(t)$  为电场强度,  $\beta$  为调制深度,  $l_x$  与  $l_y$  分别为  $x$  与  $y$  方向的调制周期,  $\omega$  为激光束的束腰,  $N$  为空间超高斯阶数,  $\sigma_{\text{random}}$  为初始位相畸变,  $x$  和  $y$  为激光束近场坐标。

抽运光脉冲序列由光纤脉冲堆积器产生,经空间整形后,单个子脉强度的时域分布为高斯型,空域分布为超高斯型,则抽运光强度可表示为

$$I_{\text{pump}} = I_p \exp \left[ - \left( \frac{x^{2M}}{\omega_{\text{pump}}^{2M}} + \frac{y^{2M}}{\omega_{\text{pump}}^{2M}} \right) \right] \sum_{m=0}^{\infty} \exp \left[ - 4 \ln 2 \left( \frac{t - mT_d}{T_w} \right)^2 \right], \quad (2)$$

式中  $I_{\text{pump}}$  为抽运光强度的时空分布,  $I_p$  为抽运光的峰值强度,  $M$  为抽运光的空间超高斯阶数,  $T_w$  为抽运光单个子脉冲全峰半宽的脉宽,  $T_d$  为抽运光子脉冲之间的延迟时间,亦即抽运光波形的时间周期。

将光克尔介质加工成半球形或将其封装在半球形容器中,抽运光与光克尔介质作用产生实时变化的球面折射率分布,从而使激光束透射波前受到周期性的球面位相调制,引起靶面上焦斑的径向扫动。其中,光克尔介质置于预放大系统和主放大系统之间<sup>[10,13]</sup>,此时,激光束的强度不足以产生光克尔效应,因而可以只考虑抽运光对光克尔介质折射率的改变。光克尔介质引入的球面位相可以表示为

$$\phi_{\text{RS}} = kn_2 I_{\text{pump}} (d - R + \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}) + \phi_0, \quad (3)$$

式中  $k = 2\pi/\lambda$  为激光束的波数,  $n_2$  为光克尔介质的非线性折射率系数,  $d$  为光克尔介质中心的厚度,  $R$  为光克尔介质球面的曲率半径,  $\phi_0$  为激光束通过光克尔介质与位相补偿介质而引入的固定位相。

根据柯林斯公式,激光光子束靶面的光场分布可表示为

$$E_f(x', y') = \frac{\exp(ik_{3\omega}L)}{i\lambda_{3\omega}B} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E \exp(i\phi_{\text{RS}} + i\phi_{\text{CPP}}) \exp \left[ - \frac{ik_{3\omega}}{B} (xx' + yy') \right] dx dy, \quad (4)$$

式中  $k_{3\omega} = 2\pi/\lambda_{3\omega}$  为三倍频后激光束的波数;  $B = f/\beta_0$ ,  $f$  为聚焦透镜的焦距,  $\beta_0$  为扩束系统的扩束比;沿光轴的光程  $L = 2f$ ;  $\phi_{\text{CPP}}$  为激光束经过 CPP 的附加位相;  $x'$  和  $y'$  为远场坐标。

假设积分时间为  $\Delta t$ , 则靶面焦斑的光强分布为

$$I_f = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} |E_f|^2 dt. \quad (5)$$

结合(2)~(5)式可知,径向匀滑方案利用抽运光和光克尔介质,使激光束受到快速变化的球面位相调制,从而引起远场焦斑内部散斑的快速周期性径向扫动。球面位相调制峰谷值的大小决定了径向扫动范围的大小,而球面位相最大的峰谷值可表示为

$$\phi_{\text{max}} = kn_2 d I_p. \quad (6)$$

$\phi_{\text{max}}$  过小则焦斑的径向扫动范围较小,径向匀滑的效果不明显;  $\phi_{\text{max}}$  过大会使焦斑包络明显增大,引起激光束在注入孔的“堵孔”效应。由此可见,在激光束波数不变的条件下,需要合理选择光克尔介质的类型、厚度以及抽运光的峰值强度,以获得较好的匀滑效果<sup>[9]</sup>。

为了对匀滑效果进行评价,采用光通量对比度来评价焦斑质量<sup>[14]</sup>,其表达式为

$$C = \frac{1}{I_{\text{mean}}} \sqrt{\iint_{(x', y') \in A} [I_f(x', y') - I_{\text{mean}}]^2 dx' dy' / A}. \quad (7)$$

式中积分区域为激光束远场焦平面,  $A$  为积分区域的面积,  $I_f(x', y')$  代表区域内各点的光强,  $I_{\text{mean}}$  为区域内光强的平均值。

### 3 数值模拟与分析

根据上述理论模型,接下来对抽运光脉冲序列的脉宽和子脉冲序列之间的延迟时间、抽运光与激光光子束的时间同步问题以及不同抽运光的时间波形对径向匀滑方案的影响进行了分析。计算采用的参数如下:激光束的束腰宽度  $\omega = 0.186$  m,空间超高斯阶数  $N = 6$ ,激光束基频光波长  $\lambda = 1053$  nm,三倍频后激光束的光波长  $\lambda_{3\omega} = 351$  nm,正弦调制深度  $\beta = 0.01$ ,调制周期  $l_x = l_y = 4$  mm,初始位相畸变  $\sigma_{\text{random}}$  峰谷值为  $2\lambda$ ;抽运

光的束腰宽度  $\omega_{\text{pump}} = 0.025 \text{ m}$ , 抽运光的峰值强度  $I_p = 30 \text{ GW/cm}^2$ , 子脉冲之间的延迟时间  $T_d = 10 \text{ ps}$ ; 光克尔介质选用硫系玻璃, 其非线性折射率系数随不同组分和掺杂而变化<sup>[15-16]</sup>, 取  $n_2 = 3 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ , 球面的曲率半径  $R = 7.8 \text{ cm}$ , 中心的厚度  $d = 10 \text{ mm}$ ; 一维 SSD<sup>[17]</sup> 的调制频率为  $17 \text{ GHz}$ , 调制深度为  $2.4$ , 光栅色散系数为  $2156.8 \text{ } \mu\text{rad/nm}$ ; 扩束系统的扩束比  $\beta_0 = 12$ ; 聚焦透镜的焦距  $f = 7.7 \text{ m}$ ; 光通量对比度的积分区域为焦斑  $86.5\%$  环围能量。

### 3.1 抽运光的脉宽和延迟时间对匀滑特性的影响

在径向匀滑方案中, 抽运光为采用脉冲堆积方案以及空间整形技术得到的周期性超高斯脉冲序列, 即利用分束器将皮秒激光器输出的单个高斯脉冲分成多个高斯子脉冲, 各高斯子脉冲经长度不同的光纤传输至振幅调制器, 再经合束器合束后进行空间整形而得到。由 (2) 式可知, 子脉冲脉宽  $T_w$  和子脉冲间的延迟时间  $T_d$  的改变会同时影响抽运光的时间波形, 为了便于讨论, 将子脉冲的脉宽与子脉冲之间的延迟时间之比  $T_w/T_d$  作为变量进行讨论, 假设  $T_d = 10 \text{ ps}$ 。

由于在对靶丸压缩过程中, 需要保持持续且均匀的靶面辐照, 因而要求靶面焦斑能够持续保持较好的均匀性, 从而有必要分析抽运光参数变化对匀滑效果稳定性的影响。不同子脉冲脉宽下抽运光的时间波形如图 2(a) 所示, 激光束远场焦斑对比度随积分时间的变化如图 2(b) 所示, 图 2(c) 则进一步给出了第一个抽运光周期结束时 (10 ps) 的焦斑对比度 (图中实线所示)。同时, 为了分析抽运光时间波形对焦斑匀滑效果稳定性的影响, 将焦斑对比度下降到第一个极小值后随时间的变化进行分析, 计算该段时间内焦斑对比度的标准差, 如图 2(c) 中虚线所示。

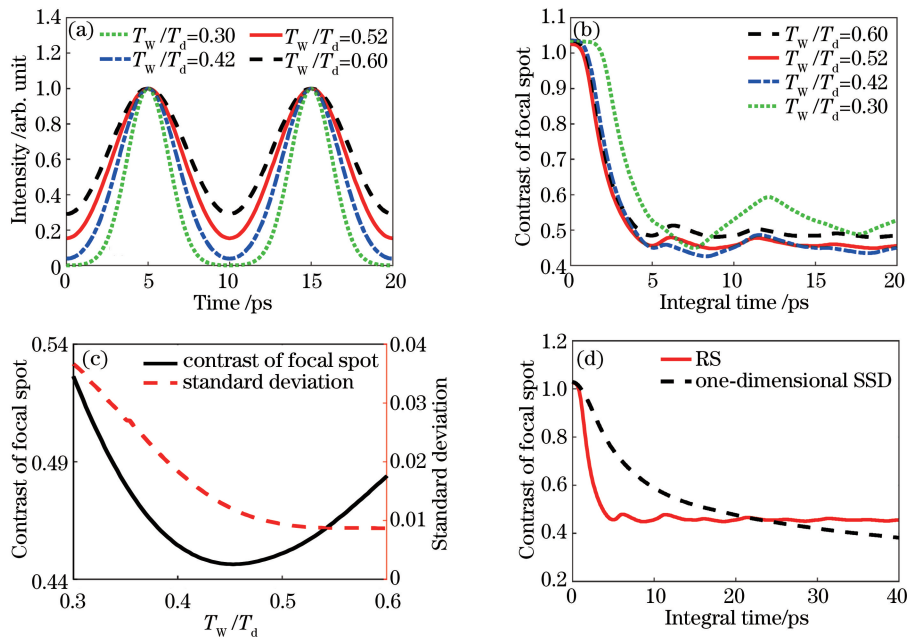


图 2 靶面焦斑光通量对比度的变化。(a) 不同  $T_w/T_d$  值的时间波形;(b) 不同  $T_w/T_d$  值的对比度随积分时间的变化;  
(c) 对比度及其标准差随  $T_w/T_d$  的变化;(d) 径向匀滑与一维 SSD 的对比

Fig. 2 Variation of luminous flux contrast of focal spot on target surface. (a) Temporal shapes with different  $T_w/T_d$ ;  
(b) variation of contrast with integral time with different  $T_w/T_d$ ; (c) variation of contrast and its standard deviation with  $T_w/T_d$ ; (d) comparison between radial smoothing and one-dimensional SSD

由图 2 分析可知, 当子脉冲间的延迟时间保持不变, 且子脉冲脉宽过大或者过小时, 远场焦斑在积分时间内趋于稳定的对比度略高。然而, 随着子脉冲脉宽增大, 焦斑对比度的波动有所减弱, 匀滑效果相对趋于稳定。进一步由图 2(a)、(b) 可知, 子脉冲脉宽过小时, 抽运光相邻子脉冲交叠的波谷部分强度较小且变化缓慢, 激光束通过光克尔介质受到的球面位相调制变化缓慢, 即在此时焦斑的径向扫动速度较小, 致使焦斑对比度有所上升, 对比度波动变大; 子脉冲脉宽过大时, 抽运光强度的峰值值较小, 焦斑的径向扫动范围减小且扫动速度较慢, 致使焦斑对比度略高。结合图 2(c) 可以看出, 随着子脉冲脉宽的增大, 对比度先减小而后

增大,对比度的波动则呈现出逐渐稳定的趋势。值得注意的是,在子脉冲之间的延迟时间一定且子脉冲脉宽过大时,会使相邻子脉冲明显交叠,从而引起脉冲堆积过程中不可避免的“拍频”现象<sup>[11]</sup>。由此可见,在实际应用中应综合进行考虑,当子脉冲间的延迟时间保持不变时,在避免产生明显“拍频”现象的前提下,应尽量选取较大的子脉冲脉宽,以降低对比度的波动,改善焦斑的匀滑效果。在本文的参数下,当  $T_w/T_d=0.5$  左右时,焦斑的光通量对比度较低且对比度的波动较小,因而整体的径向匀滑效果较好。

进一步对径向匀滑和一维 SSD 的匀滑效果进行比较。当  $T_w/T_d=0.52$  时,径向匀滑焦斑光通量对比度随积分时间的变化如图 2(d) 中的实线所示,一维 SSD 的焦斑光通量对比度随积分时间的变化如图 2(d) 中的虚线所示。从图 2(d) 可以看出,径向匀滑方案可在更短的时间内获得较好的匀滑效果,且其匀滑效果与一维 SSD 相当。径向匀滑与一维 SSD 均通过实时改变焦斑的空间强度分布实现束匀滑,其中,一维 SSD 扫动方向单一,焦斑会出现光栅色散方向上的条纹状强度调制;而径向匀滑则使焦斑内部散斑沿半径方向进行扫动,从而避免了条纹状强度调制的产生<sup>[9]</sup>。此外,进一步的数值计算结果表明,径向匀滑的径向扫动范围为数十微米,与一维 SSD 在其光栅色散方向的扫动范围相当<sup>[9-10]</sup>。

### 3.2 激光束与抽运光的时间同步对匀滑特性的影响

由于主脉冲激光持续时间为纳秒量级,而抽运光中堆积子脉冲持续时间为皮秒量级,且靶面辐照均匀性为数十皮秒时间累积的结果。为了实现对焦斑的快速匀滑,有必要分析激光束与抽运光的时间同步对径向匀滑特性的影响。抽运光子脉冲的时间波形为高斯型,取  $T_w=10$  ps,  $T_w/T_d=0.52$ ,为了讨论方便,假设激光束的时间波形为平顶分布。令  $\Delta t$  为抽运光相对于激光束的时间偏离量, $\Delta t=0$  表示抽运光时间波形的波谷与激光束的上升沿重合的情况。不同的时间偏离量下抽运光与激光束的时间波形如图 3(a) 所示,图 3(b) 则为采用图 3(a) 中对应的抽运光时,焦斑的光通量对比度随积分时间的变化。

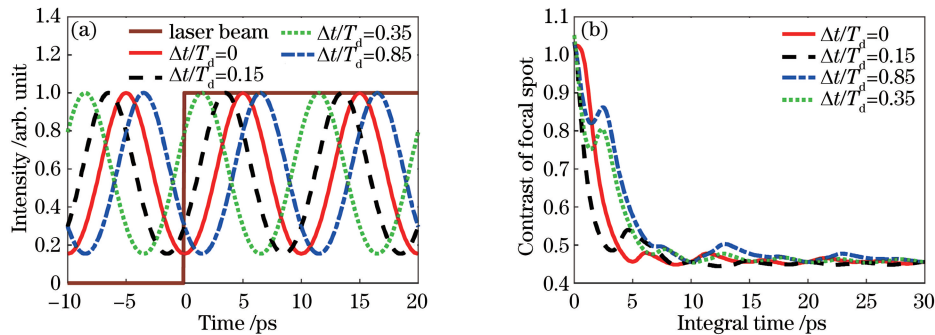


图 3 (a) 不同时间偏离量对应的激光束与抽运光的时间波形;(b) 焦斑对比度随积分时间的变化

Fig. 3 (a) Temporal shapes of laser beam and pump laser with different time offsets; (b) variation of focal spot contrast with integral time

结合图 3(a)、(b) 可以看出,当  $\Delta t=0.35T_d$  与  $\Delta t=0.85T_d$  时,在初始时刻,抽运光分别处于波峰和波谷处,此时,抽运光的强度变化缓慢,导致焦斑内部散斑在径向的扫动速度较慢,焦斑的光通量对比度在初期下降较慢,从而使匀滑效果较差;而当  $\Delta t=0.15T_d$  时,初始时刻抽运光的时间波形处于子脉冲的上升沿,焦斑径向扫动速度较快,因而焦斑对比度下降较快,径向匀滑效果较好。进一步分析可知,由于焦斑内部散斑的径向扫动是周期性的,在激光束强度保持基本不变的前提下,焦斑各点在一个周期内总的光通量是近似相等的,因此,当积分时间为抽运光时间周期的整数倍时,对于任意的  $\Delta t$ ,焦斑的光通量对比度近似相同。同时,随着积分时间的增加,匀滑效果逐渐趋于稳定,因而焦斑的光通量对比度将趋于同一渐近值。由图 3(b) 可以看出,第 3 个周期的焦斑对比度值已较为接近,激光束与抽运光的时间同步精度对数个周期后的匀滑效果影响不大。

综上所述,抽运光提前  $1/5$  个周期左右时,在初始时刻,径向匀滑速度较快,因而初期的匀滑效果较好;而当抽运光滞后  $1/5$  个周期左右时,初始时刻的径向匀滑速度较慢,从而使初期的匀滑效果较差。同时,由于抽运光子脉冲脉宽为皮秒量级,因而对系统的时间控制精度的要求为皮秒量级。

### 3.3 抽运光子脉冲的时间波形对匀滑特性的影响

在径向匀滑方案中,焦斑内部散斑的径向扫动特性至关重要,径向扫动特性取决于径向扫动的速度,而抽运光脉冲的时间波形则决定了径向扫动速度的快慢,因此,下面对一些典型的时间波形(洛伦兹分布、高斯分布、泊松分布和锯齿波形等)进行分析比较,结果如图4所示。

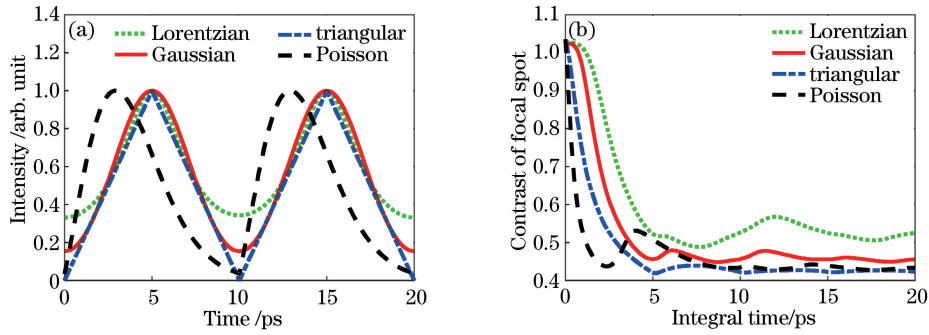


图4 (a)不同的时间波形及(b)其焦斑对比度随积分时间的变化

Fig. 4 (a) Different temporal shapes and (b) their focal spot contrast vary with integral time

时间波形为洛伦兹分布的抽运光强度随时间变化的关系可表示为

$$I_{\text{Lorentz}}(t) = I_p \sum_m \frac{1}{1 + 4 \left( \frac{t - mT_d}{T_w} \right)^2}, \quad (8)$$

计算中,取  $T_d = 10 \text{ ps}$ ,  $T_w/T_d = 0.45$ 。从图4可以看出,由于洛伦兹分布的时间波形上升和下降沿变化较慢,导致相邻子脉冲交叠的波谷处的强度相对较高,从而使焦斑整体的径向扫动范围减小且扫动速度减缓,致使其焦斑对比度相应地高于高斯分布的时间波形。并且,由于洛伦兹分布波谷部分的强度变化较慢,导致此时焦斑的径向扫动更为缓慢,因而其焦斑对比度的波动也大于高斯分布的时间波形。

由于抽运光强度变化的快慢决定了径向匀滑方案的匀滑效果,三角波的强度随时间变化的速度是恒定的,因而可以使焦斑保持稳定的径向扫动速度。由图4可以看出,使用时间波形为三角波的抽运光时,焦斑对比度随积分时间的下降较快且波动较低,焦斑的匀滑效果最好。

以上讨论的抽运光子脉冲的时间波形都是对称的,而泊松分布的上升沿比其下降沿更为陡峭。由于泊松分布是离散分布,用伽马函数拟合阶乘项,其强度随时间的变化为

$$I_{\text{Poisson}}(t) = \sum_m \frac{\lambda \frac{t - mT_d}{T_w} \exp(-\lambda)}{\Gamma\left(\frac{t - mT_d}{T_w}\right)}. \quad (9)$$

为了便于说明泊松分布抽运光时间波形的匀滑效果,以  $T_w$  作为子脉冲的脉宽,  $T_d$  为子脉冲间的延迟时间,且为了使其上升沿较为陡峭,取泊松分布的参数  $\lambda = 1$ ,  $T_d = 10 \text{ ps}$ ,  $T_w/T_d = 0.2$ 。进一步分析图4可知,当抽运光的时间波形为泊松分布时,由于抽运光子脉冲上升沿变化较快,焦斑对比度在短时间内快速降低,同时,抽运光相邻子脉冲交叠的波谷部分强度变化较快,因而波谷处焦斑对比度随时间的波动较小。然而,由于泊松分布的波峰部分强度变化较慢,且波峰往上升沿方向偏移,因而在第一个波峰处,焦斑对比度有较大的波动。

由上述分析可知,采用时间波形为三角波的抽运光时,可使焦斑保持稳定的径向扫动速度,得到较快且稳定的匀滑效果。然而,目前在工程上,高斯分布的时间波形更易实现。

## 4 结 论

针对惯性约束聚变中对激光辐照均匀性的要求,提出了一种基于光克尔效应的径向匀滑方法,该方案利用周期性变化的抽运光与光克尔介质相互作用产生周期性变化的球面位相,以使激光束波前产生周期性的球面位相调制,从而周期性地快速改变激光集束远场焦斑尺寸,实现靶面上高强度热斑快速的径向扫动,使

焦斑得到匀滑。本文重点分析了抽运光的时间波形及其参数对匀滑效果的影响。分析结果表明,在抽运光子脉冲之间的延迟时间一定时,抽运光子脉冲的脉宽过大或过小均会使匀滑的整体效果变差,在避免产生明显的“拍频”现象的前提下,适当增加抽运光子脉冲的脉宽可以使匀滑效果较为稳定,并获得与一维 SSD 相当的匀滑效果。激光束与抽运光的时间同步精度会对初期的匀滑效果产生较大影响,当抽运光提前  $1/5$  周期左右时,径向匀滑可以更快地达到较好的匀滑效果。抽运光的时间波形决定了焦斑径向扫动的速度,抽运光时间波形为三角波时的径向扫动速度较为稳定,因而其整体的匀滑效果及稳定性较高。

## 参 考 文 献

- 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]. *Physics of Plasmas*, 2004, 11(2): 339-491.
- Wen Shenglin, Yan Hao, Zhang Yuanhang, *et al.* Calculation and experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with incident wavefront distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314001.  
温圣林, 颜浩, 张远航, 等. 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314001.
- Jiang Xiujuan, Zhou Shenlei, Lin Zunqi. Improved target irradiation uniformity using two-dimensional spectral dispersion and lens array[J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(11): 1533-1537.  
江秀娟, 周申蕾, 林尊琪. 利用二维光谱色散和透镜阵列改善靶面辐照均匀性[J]. *中国激光*, 2007, 34(11): 1533-1537.
- Li Ping, Wang Wei, Zhao Runchang, *et al.* Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(21): 215202.  
李平, 王伟, 赵润昌, 等. 基于焦斑空间频率全域优化的偏振匀滑设计[J]. *物理学报*, 2014, 63(21): 215202.
- Lehmberg R H, Schmitt A J, Bodner S E. Theory of induced spatial incoherence[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(7): 2680-2701.
- Kline J L, Glenzer S H, Olson R E, *et al.* Observation of high soft X-ray drive in large-scale Hohlräume at the National Ignition Facility[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(8): 085003.
- Miyaji G, Miyanaga N, Urushihara S, *et al.* Three-directional spectral dispersion for smoothing of a laser irradiance profile[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 725-727.
- Zhong Z Q, Hou P C, Zhang B. Radial smoothing for improving laser-beam irradiance uniformity[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(24): 5850-5853.
- Zhong Zheqiang, Hou Pengcheng, Zhang Bin. A novel radial beam smoothing scheme based on optical Kerr effect[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(9): 094207.  
钟哲强, 侯鹏程, 张彬. 基于光克尔效应的径向光束匀滑新方案[J]. *物理学报*, 2016, 65(9): 094207.
- Haynam C A, Wegner P J, Auerbach J M, *et al.* National Ignition Facility laser performance status[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(16): 3276-3303.
- Zeng Shuguang, Hu Jing, Wang Fei, *et al.* Pulse stacking scheme based on wavelength division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0514001.  
曾曙光, 胡静, 王飞, 等. 基于波分复用思想的啁啾脉冲堆积方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0514001.
- Bel'kov S A, Voronich I N, Garanin S G, *et al.* Study of the apodization of a laser beam by serrated aperture stops for high-power installations of laser thermonuclear synthesis[J]. *Journal of Optical Technology C*, 2015, 82(6): 330-338.
- Bowers M, Burkhart S, Cohen S, *et al.* The injection laser system on the National Ignition Facility[C]. *SPIE*, 2007, 6451: 64511M.
- Zhang Rui. Research on precise control technologies of intensity distribution on target of high power laser facilities[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013.  
张锐. 高功率激光装置靶面光强分布精密控制技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- Qiao B, Dai S, Xu Y, *et al.* Third-order optical nonlinearities of chalcogenide glasses within Ge-Sn-Se ternary system at a mid-infrared window[J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(10): 2359-2365.
- Qiao B, Chen F, Huang Y, *et al.* Investigation of mid-infrared optical nonlinearity of  $\text{Ge}_{20}\text{Sn}_x\text{Se}_{80-x}$  ternary chalcogenide glasses[J]. *Materials Letters*, 2016, 162: 17-19.
- Jiang Y, Zhou S, Wu R, *et al.* Experimental investigation on beam smoothing by combined spectral dispersion and lens array technology[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(8): 081404.