

文章编号: 1001-3806(2012)05-0657-05

离轴抛物面镜对超短激光脉冲紧聚焦特性的研究

刘作业 李 露 胡碧涛*

(兰州大学 核科学与技术学院, 兰州 730000)

摘要: 为了研究超短激光脉冲光束质量对焦斑的影响,采用经典的几何模型进行了理论模拟分析,并实验研究了离轴 90° 抛物面镜的飞秒激光光束的紧聚焦特性。由理论分析和实验结果可知,当入射失准角为 3mrad 时,将从空间上使焦斑峰值功率密度减半,失准角的存在将引起到达靶面的激光脉冲的时间展宽从而降低焦斑峰值功率密度;利用 3TW 钛宝石飞秒激光系统,通过 $f/1$ 离轴 90° 抛物面镜对激光束进行紧聚焦,得到最佳焦斑尺寸为 $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$,对应于 3mJ 和 96mJ 的飞秒脉冲激光光束的焦斑峰值功率密度分别为 $3.83 \times 10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $1.23 \times 10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ 。结果表明,该研究为开展激光与固体、气体、团簇等物质相互作用的相关实验提供了重要的参考。

关键词: 激光光学; 峰值功率密度; 超短激光脉冲紧聚焦; 离轴抛物面镜

中图分类号: O435 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.05.021

Focusing property for ultra-short pulse laser reflected by off-axis parabolic mirrors

LIU Zuo-ye, LI Lu, HU Bi-tao

(School of Nuclear Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the dependence of the focus on the quality of the femtosecond laser beam, the tighten focusing of the femtosecond laser beam reflected by a 90° off-axis parabolic mirror was studied experimentally and theoretically through the classical geometrical optical model. The obtained theoretical and experimental results indicate that the peak power density of the laser spot will reduce by half when the declination reaches 3mrad . Simultaneously the optical path difference resulted from incident angle causes time broadening of the spot on the target surface and impairs the focal spot intensity to some degrees. A 3TW Ti:sapphire laser system was adopted in the present work. The best focal spot obtained in the present work with an $f/1$ off-axis parabolic mirror is $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$ and the peak power density is $3.83 \times 10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ and $1.23 \times 10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ for 3mJ and 96mJ ultra-short pulse laser separately. The study of the tighten focusing for ultra-short laser pulse reflected by 90° off-axis parabolic mirror. This research provides important information for the study on the interactions between the femtosecond laser pulses and solid, gas, clusters and so on.

Key words: laser optics; peak power density; focal spot of ultra-short laser pulse; off-axis parabolic mirror

引言

近年来超短激光的飞速发展^[1-2],开启了对超快X射线源的产生、电子加速、激光聚变、相对论等离子体物理及强场物理等领域的研究^[3-10]。在超强激光脉冲与物质相互作用的研究中,焦斑处的峰值功率密度直接决定相互作用的强弱,因此超强激光的聚焦已成为实验上首要解决的问题。而普通透射式的聚焦透镜存在很大局限性,随着磨制、加工、测试和装调技术^[11-12]

的涌现,离轴抛物面镜(off-axis parabolic, OAP)已成为超短脉冲激光束聚焦的最佳选择。

在理想情况下,不同波长的入射光平行于离轴抛物面镜光轴时,反射光都将聚焦于焦点处,其球差为0,大大降低了光的扰动。并且其对超强激光的耐用性强,已被广泛的用于超强激光束的聚焦中。离轴抛物面镜对光轴失准的敏感度极高,失准导致的焦斑空间和时间的展宽将极大地降低焦斑处的功率密度。因此,要得到高质量的焦斑,需对离轴抛物面镜进行精密的调节^[13-14]。

作者从入射光束质量对焦斑的影响出发,在理论和实验上对离轴抛物面镜的飞秒激光光束的聚焦进行了系统研究。理论上,模拟了入射光失准角所引起焦斑空间演化过程,同时对失准角所导致的靶面处焦斑

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91026021)

作者简介: 刘作业(1986-),男,博士研究生,研究方向为飞秒激光脉冲的非线性效应。

* 通讯联系人。E-mail: hubt@lzu.edu.cn

收稿日期: 2012-02-17; 收到修改稿日期: 2012-03-02

的时间展宽进行了讨论。实验中采用 3TW 飞秒激光系统,利用焦距为 50.8mm($f/1$) 的离轴 90° 镀金抛物面镜对中心波长 810nm、脉冲持续时间 33fs、光束直径 8mm 的激光束进行聚焦。利用 CCD 探测器,对焦前焦后的焦斑特性进行了观测,并记录了不同偏角入射所引起的焦斑尺寸的变化。在最佳入射条件下,测得最小光斑为 $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$,对应于 3mJ 和 96mJ 的超强飞秒激光光束聚焦的峰值功率密度分别为 $3.83 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 和 $1.23 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ 。最后讨论了入射失准角所引起的焦斑在空间和时间上的展宽对峰值功率密度的影响。

1 理论计算

1.1 光学模型

构建高斯分布的激光入射光阵面,并采用离轴 90° 抛物面镜进行模拟光路^[15],光路图如图 1 所示。

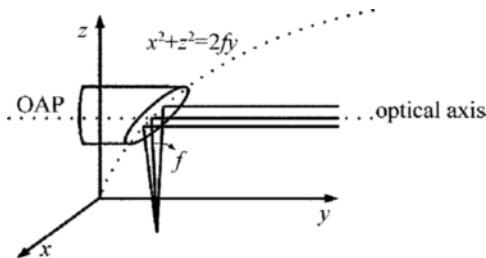


Fig. 1 Focusing of a 90° off-axis parabolic mirror

取图 1 中任意一点,假设入射光线的方程为:

$$\frac{x - x_0}{\cos\alpha_0} = \frac{y - y_0}{\cos\beta_0} = \frac{z - z_0}{\cos\gamma_0} \quad (1)$$

由图 1 可知抛物面方程为:

$$x^2 + z^2 = 2fy \quad (2)$$

其中抛物面镜的焦距 $f = 50.8\text{mm}$ 。由(1)式和(2)式可得出抛物面上光点的坐标 (x_1, y_1, z_1) ,由此可得出抛物面的法线方程为:

$$\frac{x - x_1}{x_1} = \frac{y - y_1}{y_1} = \frac{z - z_1}{z_1} \quad (3)$$

又由反射定律可解出反射聚焦光线的方程:

$$\frac{x - x_1}{\cos\alpha_1} = \frac{y - y_1}{\cos\beta_1} = \frac{z - z_1}{\cos\gamma_1} \quad (4)$$

故在 $z = a$ (a 为任意常数) 平面内的任意反射光点的坐标确定,取遍入射光面中的所有光点,可得 $z = a$ 平面上的光斑大小 $z = 0$ 平面为焦平面。

1.2 入射角失准在空间上对焦斑的影响

入射角对光轴的失准称为入射失准角,它将引起 $z = 0$ 平面即焦平面上的光斑分布的变化。本次模拟计算中,忽略入射光束发散角的影响,将入射光视为平行光束,直径为 8mm。考虑两种不同的入射失准角:(1) 入射光方向垂直于 x 轴,与抛物面镜光轴间的夹

角为 θ ; (2) 入射光方向垂直于 z 轴,与抛物面镜光轴间的夹角为 φ 。失准角 θ 和 φ 对焦斑尺寸的影响如图 2 所示,入射光束直径为 8mm,失准角 θ 对焦斑横向和纵向的影响存在差异,而失准角 φ 对焦斑横向和纵向的影响基本一致。在相同入射光强下,入射失准角的存在将降低焦斑处的峰值功率密度。

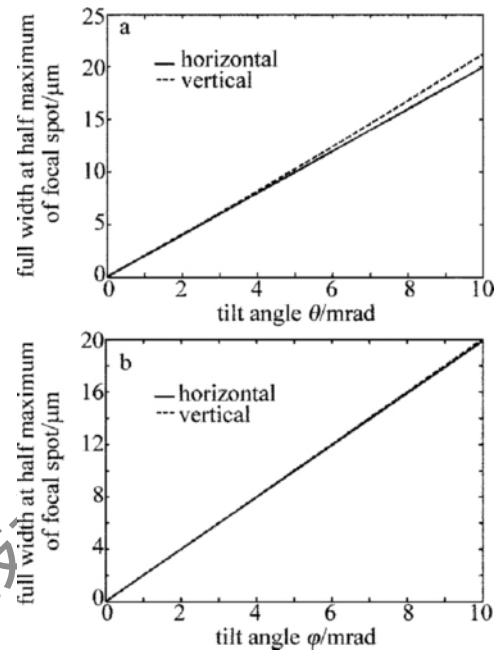


Fig. 2 Focal spot size in horizontal (solid line) and vertical (dashed line) direction for various incident angles

a—incident misalignment angle θ b—incident misalignment angle φ

1.3 入射角失准在时间上对焦斑的影响

当入射光方向与抛物面镜光轴存在一定夹角时,不仅会引起焦平面处的光斑尺寸的变大,还会导致飞秒脉冲激光束到达靶面处(焦平面所在位置)的时间不同^[16]。这种时间上的差异称为时间展宽。焦斑处的激光脉冲时间特性很难实现直接的实验测量,所以理论计算就显得格外重要。如图 3 所示, $OB = O'B = f$ (f 为焦距),由不同位置 A, B, C 聚焦到 O 的时间是一致的。因此,靶面处焦斑时间的展宽是由 $O'A', O'B', O'C'$ 的光程差(optical path difference, OPD)所引起的。

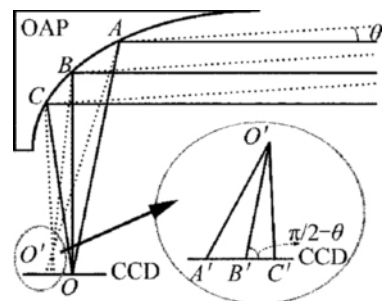


Fig. 3 Schematic diagram of OAP focus with incident angle θ

图 4 是直径分别为 6mm、8mm 和 10mm 的激光束经离轴 90° 抛物面镜聚焦后,不同入射失准角 θ 和 φ 与靶面上焦斑时间展宽之间的关系。图 5 是入射失准

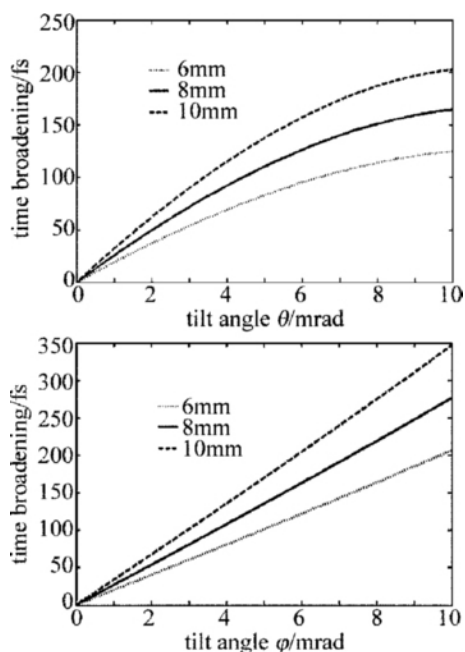


Fig. 4 Time broadening for different tilt angle θ and φ with the incident beam diameter at 6mm, 8mm, 10mm

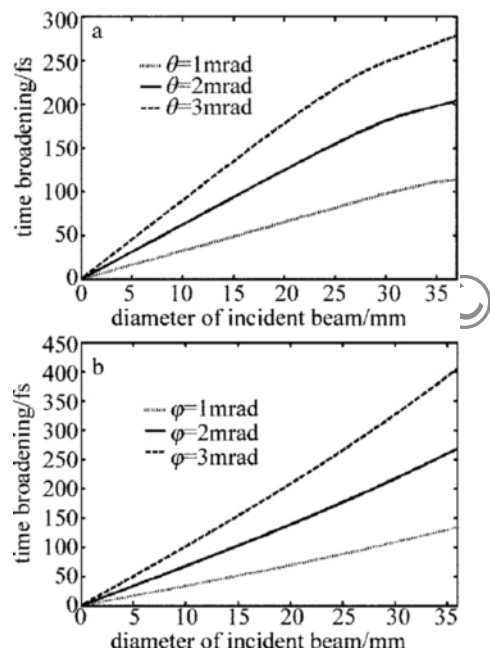


Fig. 5 Time broadening for different incident beam diameter with the misalignment angle θ and φ

角 θ 和 φ 分别为 1mrad, 2mrad, 3mrad 的激光束聚焦后光斑直径与靶面上焦斑时间展宽之间的关系。由模拟结果可知: (1) 入射光束直径为 8mm 条件下, 失准角 θ 分别为 1mrad 和 3mrad 时, 光束到达靶面处的时间展宽分别为 25.7fs 和 72.0fs; 失准角 φ 为 1mrad 和 3mrad 时, 光束到达靶面处的时间展宽分别为 26.8fs 和 80.6fs; 当入射光斑尺寸一定时, 焦斑的时间展宽随入射失准角的增大而增加, 失准角 φ 对时间展宽的影响大于失准角 θ ; (2) 图 5a 中失准角 $\theta = 1\text{mrad}$ 时, 入射光束直径为 8mm 和 30mm 的时间展宽分别为

25.7fs 和 97.6fs; 图 5b 中失准角 $\varphi = 1\text{mrad}$ 时, 入射光束直径为 8mm 和 30mm 的时间展宽分别为 26.8fs 和 108.2fs。当入射失准角一定时, 焦斑时间展宽随入射光斑直径的增大而增大。所以在尺寸大的入射光束下, 失准角对焦斑处峰值功率的影响更大。

2 实验测量

2.1 实验装置

实验中采用钛红宝石 (Ti:sapphire) 飞秒激光系统 (Quantronix, USA), 主要组成部分: 锁模振荡器、光栅全反射式的展宽器、两步多通放大器 (8 通和 2 通)、光栅对压缩器, 如图 6 所示。该装置为 3TW 飞秒激光系统的前端, 输出能量为 3mJ, 重复频率 1kHz, 光束直径 8mm, 光束发散角小于 $25\mu\text{rad}$, 中心波长为 810nm, 脉宽 30nm, 由频率分辨光学开关 (frequency resolution optical gating, FROG) 测量的激光束单脉冲持续时间 33fs。对于太瓦激光系统的后级输出: 单脉冲能量 96mJ, 重复频率 10Hz, 光束直径 30mm, 脉宽 33fs。

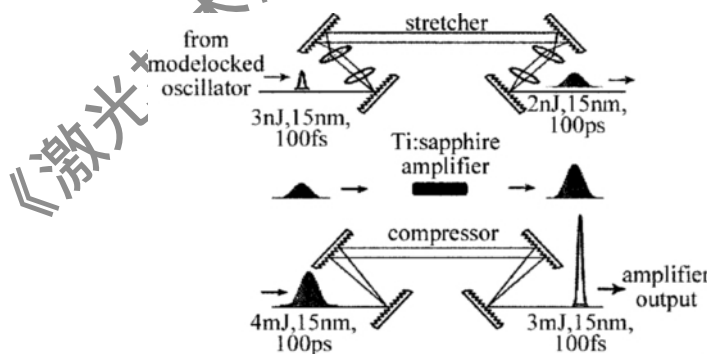


Fig. 6 Structure profile of fs-laser system

实验光路如图 7 所示。M₁ 和 M₂ 为反射镜, 与 OAP 5 维调整架形成激光入射质量调节系统; 3 是衰减片组, 用来保护 CCD 探测器^[17]; 4 是分光镜, 反射光束进入 FROG 探测器, 对激光脉冲持续时间进行测量; 聚焦采用离轴 90° 镀金抛物面镜 (Edmund, USA) 焦距为 50.8mm ($f/1$); 8 位 CCD 探测系统用来测量焦斑尺寸, 型号为 Guppy F-503B (AVT Camera, Germany), 像素为 2592×1994 , 最小像元为 $2.2\mu\text{m} \times 2.2\mu\text{m}$, CCD 所得到的信息由电脑软件进行分析处理。CCD 探头固定在 1 维电动导轨上, 平移精度小于 $3\mu\text{m}$, 用来寻找最佳焦斑。

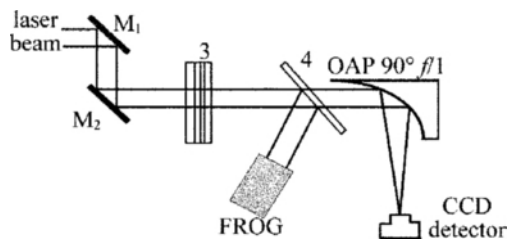


Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

2.2 实验结果分析与讨论

2.2.1 焦前焦后的光斑变化 当入射激光束与离轴抛物面镜的光轴方向重合时,聚焦光斑达到最小,此时入射条件为最佳入射条件。本次实验中测得最小焦斑为 $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$, 光斑形状示于图 8c。这里定义:靶面(CCD 探测面)到主光轴距离小于焦距,称为焦前;靶面到抛物面镜主光轴的距离大于焦距,称为焦后。通过精密电动位移台(精度小于 $3\mu\text{m}$)移动 CCD 探头,对聚焦光斑的焦前焦后信息进行了测量。图 8a 为焦前 $0\mu\text{m} \sim 120\mu\text{m}$ 和焦后 $0\mu\text{m} \sim -120\mu\text{m}$ 的不同位置的焦斑尺寸。图 8b、图 8c 和图 8d 分别为焦后 $60\mu\text{m}$ 、焦平面处和焦前 $80\mu\text{m}$ 处的焦斑形状。由实验结果可知:焦后位置($-120\mu\text{m} \sim 0\mu\text{m}$)焦斑尺寸横向展宽较大;焦前位置($0\mu\text{m} \sim 120\mu\text{m}$)焦斑尺寸主要在纵向展宽;焦后的横向展宽比焦前的纵向展宽随距离变化更为灵敏。所以焦前、焦后的光斑形状分别为纵向和横向的椭圆光斑,这种焦前焦后空间上横向、纵向的展宽现象,对寻找焦平面(控制靶的位置)提供了可靠的依据。

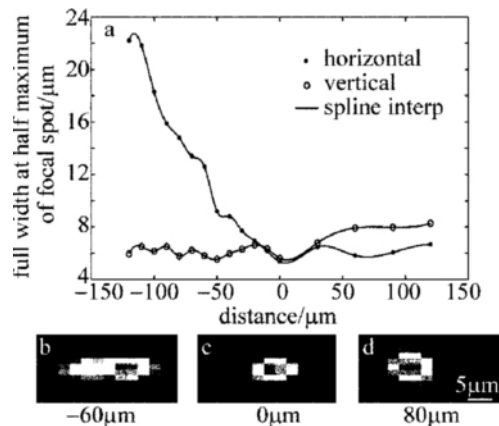


Fig. 8 Focal spot size in horizontal(closed cycles) and vertical(open cycles) direction for different position from focus, the inset shows the profile of diverse position

2.2.2 入射失准角的影响 根据第 1.2 节中的理论分析,入射光束与光轴方向存在一定夹角时,焦斑横向和纵向尺寸随之变化,本实验中测量了入射光束直径为 8mm 时,入射失准角 θ 对焦斑的影响。不同失准角 θ 的调节过程中,零点位置的光斑为 $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$ 。如图 9 所示,焦斑的尺寸随着入射失准角的增大而增大,变化关系是近似线性的。而图 2 所示的理论计算结果显示,激光光斑的尺寸随着入射失准角的增大而线性的增大。考虑到理论计算是采用的经典的几何光学模型和实验结果本身存在的误差,所以说实验结果与理论计算结果是相吻合的。零点位置为入射光方向与光轴平行,当入射失准角为 6mrad 时,焦斑尺寸增大 1 倍,由于焦斑的面积和焦斑处的峰值功率密度成反

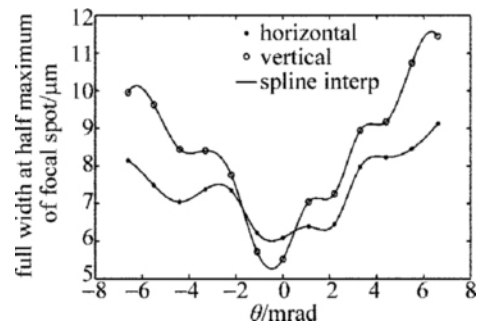


Fig. 9 Focal spot size in horizontal(closed cycles) and vertical(open cycles) direction for different incident angle θ with incident beam diameter at 8mm

比,这将从空间域上降低焦斑处的激光峰值功率密度。另外,由图 4 所示的理论计算结果可知,入射失准角在影响光斑尺寸的同时,也将引起焦平面处激光脉冲的时间展宽,进而削弱焦斑处的激光峰值功率密度。

2.2.3 焦斑峰值功率密度分析 高斯光束焦斑处的激光强度不仅与焦斑大小有关,还跟激光脉冲的能量、脉冲宽度有关系。焦斑处的峰值功率密度为:

$$I = \frac{4E_p}{\pi d_x d_y (\tau + T)} \times 10^{20} \quad (5)$$

式中, E_p 为单脉冲能量(mJ), d_x 和 d_y 为焦斑半径(μm), τ 为激光脉冲时间宽度(fs), T 为靶面上焦斑的时间展宽(fs), I 为焦斑处的激光峰值功率密度(W/cm^2)。所以,对于单脉冲能量 3mJ 、脉冲持续时间 33fs 、光束直径 8mm 、中心波长为 810nm 的激光束,在最佳入射条件下,即不考虑焦斑时间展宽的影响, $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$ 的焦斑处的激光功率密度为 $3.83 \times 10^{17} \text{W}/\text{cm}^2$ 。当入射方向与光轴方向存在入射失准角时,入射失准角从焦斑空间上引起的焦平面处的激光功率密度的变化。在只考虑入射失准角对焦斑产生的空间变化的情况下,激光功率密度随着入射失准角的变化关系如图 10 所示。由于焦平面处的激光脉冲的时间信息不能直接测量得到,所以本文中采用了理论计算对焦斑处的激光脉冲的时间展宽进行了修正,进行修正后的焦斑处功率密度随着入射失准角 φ 的变化关系如图 11 所示。

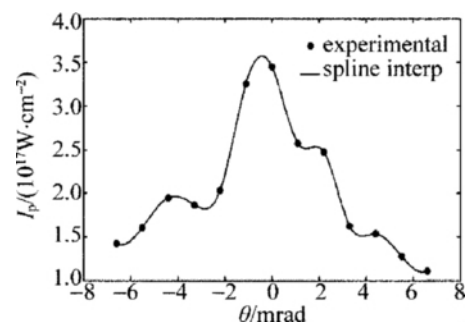


Fig. 10 Power density of the focal spot for different misalignment angle θ with neglecting the influence of time broadening

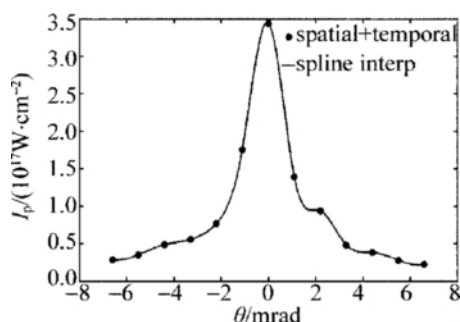


Fig. 11 Power density of the focal spot for different misalignment angle θ (taking into account of both spatial and temporal broadening of the focal spot)

根据第 1.3 节中的分析可知,当入射光直径为 8mm、失准角 $\theta = 1\text{mrad}$ 时,焦斑时间展宽为 25.7fs。由图 10 和图 11 可知,入射失准角对峰值功率密度的影响为:(1) 不考虑时间展宽的影响,当入射失准角为 3mrad 时,焦斑峰值功率密度减半;(2) 同时考虑焦斑空间和时间的展宽,当入射失准角为 1mrad 时,焦斑峰值功率密度减半。所以,在具体的工作中可采用波前修正系统来控制入射光与光轴方向的夹角,对聚焦激光束的空间域和时间域上进行校正^[18-49]。

3 结 论

对离轴 90° 抛物面镜的紧聚焦特性进行了模拟计算,分析了激光入射失准角对聚焦光斑大小和到达靶面处的时间所造成的影响。并在实验上利用离轴 90° 抛物面镜对超强飞秒激光束进行了紧聚焦,得到了不同入射失准角和激光焦斑形变之间的关系。所得最小焦斑为 $5.6\mu\text{m} \times 5.4\mu\text{m}$, 对应于 3mJ 的飞秒激光脉冲焦斑功率密度为 $3.83 \times 10^{17} \text{W/cm}^2$ 。入射角失准从时间上和空间上对焦斑处的功率密度进行分散,对于 3mJ 8mm 的激光光束:(1) 不考虑时间展宽的影响,3mrad 的失准角将导致焦面处的激光功率密度减半;(2) 考虑时间展宽的影响,入射失准角为 1mrad 时,焦斑峰值功率密度减半;(3) 随着入射光束直径的增大,失准角对焦斑强度的影响增大。对离轴抛物面镜紧聚焦特性的研究为开展激光与固体、气体、团簇等物质相互作用的相关实验提供了重要的参考依据。

参 考 文 献

[1] BALTUSKA A, WEI Z Y, PSHECHNIKOV M S, *et al.* Optical pulse compression to 5fs at a 1MHz repetition rate [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(2): 102-104.
[2] YANOVSKY V, CHVYKOV V, KALINCHENKO G, *et al.* Ultra-high intensity 300TW laser at 0.1Hz repetition rate [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2109-2114.

[3] BAKE M, ZAKIR E, DULAT S. Photon acceleration in laser-plasma interaction [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 282-284 (in Chinese).
[4] CHEN B F, LIU T F. Estimation chirp in ultrashort laser pulses using interferometric autocorrelation envelope width [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 851-854 (in Chinese).
[5] LI Y T, ZHANG J, SHENG Z M, *et al.* Spatial distribution of high-energy electron emission from water plasmas produced by femtosecond laser pulses [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(16): 165002-165005.
[6] YE W, XU H, HE F, *et al.* Direct acceleration of solid-density plasma bunch by ultraintense laser [J]. *Physical Review*, 2005, E72(4): 046401-046406.
[7] XIONG H, LIU S Q, LIAO J J, *et al.* Self-focusing of intense laser pulse propagating in underdense plasma [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(2): 272-272 (in Chinese).
[8] YIN F, TAO X Y. Acceleration of relativistic electron in Gaussian laser electromagnetic field [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(3): 384-387 (in Chinese).
[9] MEGERLE U, PUCHLITSCH, SCHRIEVER C, *et al.* Sub-50fs broadband absorption spectroscopy with tunable excitation: putting the analysis of ultrafast molecular dynamics on solid ground [J]. *Applied Physics*, 2009, B96(2): 215-231.
[10] BISSELL J J, RIDGERS C P, KINGHAM R J. Field compressing magnetothermal instability in laser plasmas [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(17): 175001-175004.
[11] CUI X Q, GAO B L, WANG D X, *et al.* A new polishing technology for large diameter and deep aspherical mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(3): 402-407 (in Chinese).
[12] PAN J H. The methodic design of the IR imaging system with large aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1475-1479 (in Chinese).
[13] MATSUOKA S, NAMAKWA K. Wave-front measurements of terawatt-class ultrashort laser pulses by the Fresnel phase-retrieval method [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2000, B 17(4): 663-667.
[14] LIU X L, SUN Sh H, REN Zh G, *et al.* Micro-displacement measurement system of pulse equivalent and return difference of a stepping motor [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(5): 603-606 (in Chinese).
[15] LUO X, CHEN P F, WANG Y. Analysis of 90° off-axis parabolic mirror focal spot characteristic [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 682-687 (in Chinese).
[16] LIU L Q, PENG H S, ZHOU K N, *et al.* Optical measurement systems for industrial inspection IV [J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5856: 646.
[17] JIANG J J, LUO F, CHEN J G. Research on femtosecond laser induced damage to CCD [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 515-517 (in Chinese).
[18] WANG Z H, JIN Z, ZHENG J A, *et al.* Wave front correction of ultra-short ultra-intense laser pulses [J]. *Science in China*, 2004, G34(6): 620-629 (in Chinese).
[19] HOU B, NEES J, MORDOVANAKIS A, *et al.* Hard X-ray generation from solids driven by relativistic intensity in the lambda-cubed regime [J]. *Applied Physics*, 2006, B83(1): 81-85.