

驱动激光束间相干性以及对背向散射影响的研究

孟祥富 王琛[†] 安红海 贾果 方智恒 周华珍 孙今人 王伟 傅思祖

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2012 年 3 月 7 日收到; 2012 年 3 月 16 日收到修改稿)

早期的研究表明, 束匀滑技术能够有效地抑制高功率激光与等离子体相互作用中产生的各种参量不稳定性, 大大减少受激布里渊散射和受激拉曼散射. 但在 NIF 最近的实验研究中发现, 受激布里渊散射和受激拉曼散射份额远远高于预期, 原因可能与驱动激光束间的相干性有关. 本文利用“神光 II”装置两路倍频纳秒激光辐照金平面靶, 研究了小口径取样情况下两者背向散射的能量和光谱在不同驱动激光相干条件下的变化情况. 初步结果表明, 激光束间存在着较强的相干性, 并且随着束间相干程度的增加, 背向散射也逐渐增强.

关键词: 激光等离子体相互作用, 束间相干性, 背向散射

PACS: 52.38.-r, 52.57-z, 52.38.Dx

1 引言

激光等离子体之间的相互作用是非常复杂的, 在惯性约束聚变 (ICF) 间接驱动的条件下, 驱动激光在到达高-Z 黑腔内壁之前要穿过数毫米的等离子体, 在这个过程中存在多种参量不稳定性^[1], 其中受激布里渊散射 (SBS) 和受激拉曼散射 (SRS) 是备受关注的两种. 二者的背向散射, 会造成大量驱动激光能量的直接损失, 大大降低激光能量的利用率^[2-5]. SBS 和 SRS 背向散射与激光的功率密度, 或者说激光电场强度密切相关, 随着电场强度的增加会有较大幅度增长^[6-9]. 由于驱动激光自身具有相干性, 光斑功率密度分布不均匀, 在小尺度上存在电场强度调制, 会诱发并助长 SBS, SRS 背向散射的发展. 为此, 国内外各大实验室大力发展束匀滑技术^[10-13], 尽可能消除功率密度分布的不均匀, 从而达到抑制 SBS, SRS 背向散射的目的. 美国在 Nova, OMEGA 以及 NIF 装置上进行了大量的研究, 利用多种束匀滑技术将 SBS, SRS 的份额成功控制在驱动激光总能量的 15% 以下. 然而, NIF 上最近的研究中发现, 实际产生的背向散射份额远远高于预期. 对前后实验条件进行比较可以发现, 最

近研究中用的激光束的数目要比以往实验研究中多得多, 那么, 是否更多的激光路数之间的束间相干性对实验结果产生了较大的影响呢?

带着这样的疑问, 设计实验研究了两个问题: 高功率激光装置的各路激光之间是否存在较强的相干性; 束间相干性究竟会对 SRS 和 SBS 背向散射会产生什么样的影响.

2 实验方案

“神光 II”八路激光来自相同的种子源, 到靶面等光程, 线宽非常窄, 自身相干性很好, 因此从理论上来说各路之间相干性应当是存在的. 但是, 由于各路激光的传播路径、放大器条件、光路中元件的位置、角度等因素大不相同, 导致激光内部的时间特性、空间特性在传播的过程中产生不同程度的变化. 当到达靶室终端时, 各路激光之间的相干性是否依然存在, 存在一定的疑问. 对两束光之间相干性的测量, 最简单的方法是双光束干涉, 但由于高功率激光脉冲光束的时间特性等原因, 难以形成可供测量的稳定干涉条纹, 所以宏观上测量干涉条纹对比度的方法难以进行. 而与之对应的, 通过观测相干所带来的影响来反推相干程度的方法

[†] E-mail: wangch@mail.shcnc.ac.cn

则是可行的. 虽然不能形成稳定的干涉条纹, 但干涉引起的强度调制是客观存在的, 这就会引起功率密度的起伏, 进而影响到对功率密度非常敏感的 SBS、SRS 等背向散射的产生. 因此通过测量在不同相干条件情况下 SBS、SRS 背向散射的变化, 就能够在一定程度上反应激光束间的相干性.

对于“神光 II”之类大型激光装置, 输出的激光都是线偏振的, 这一点提供了一种很好的改变驱动激光束间相干性“表现”的方法, 即改变激光束的偏振方向. 对于两束相干的线偏振光, 如果偏振方向互相垂直, 那么表现出来的效果就是完全非相干; 如果偏振方向平行, 就能够表现出最佳的相干效果.

采用“神光 II”激光装置输出两路激光进行实验, 光路如图 1 所示, 1# 激光水平入射, 3# 激光从斜下方入射, 两路激光以约 42° 的夹角点聚焦叠加辐照 Au 平面靶, 焦斑尺寸约 $\Phi 120\ \mu\text{m}$. 激光均为倍频, 波长 $527\ \text{nm}$, 脉冲宽度约 $1\ \text{ns}$, 能量约 $250\ \text{J}$. 因为主要关心的是背向散射变化情况, 所以在实验中采用小口径取样的方法来获得部分背向散射光进行测量. 口径为 $\Phi 25\ \text{mm}$ 的平面取样镜放置在每路激光最后一块伺服反射镜后对背向散射光进行取样, 工作波长 $400\text{—}1000\ \text{nm}$. 各个元件以及测量仪器在实验过程中均保持不动, 以保证所记录的数据之间具有可比性.

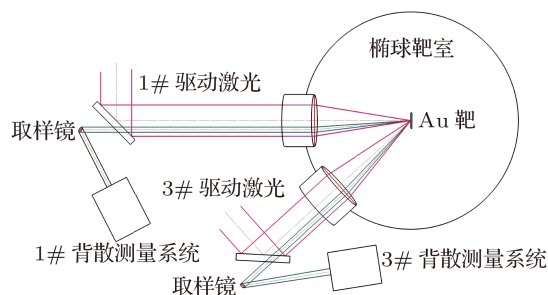


图 1 实验光路示意图

背向散射的主要成分为 SBS 和 SRS, 其中 SBS 波长基本上与驱动激光波长相近, 在 $527\ \text{nm}$ 附近, 而 SRS 的光谱比较发散, 范围在 1—2 倍入射激光波长之间, 峰值在 1.5 倍驱动激光波长附近. 背向散射系统光路如图 2 所示. 图 2(a), (b) 分别对应 1#, 3#. 两路背散光经反射镜 M1, M2 取样后进入测量系统, S1, S2 为分光镜, 对 $527\ \text{nm}$ 附近的光反射率高达 99%, 而对波长大于 $600\ \text{nm}$ 的光透射率大于 98%, 能将 SBS 和 SRS 很好地分离, 然后利用

能量卡计对 SBS、SRS 背向散射的能量分别进行测量. 对于 3#, 通过增加了一块宽带的半透半反镜, 把 SRS 分成两部分, 分别对能量和光谱进行测量.

实验的关键是如何获得 1# 与 3# 之间不同的相干状态. 倍频晶体在严格转动 90° 的情况下, 倍频转换效率是保持不变的, 但是从倍频晶体中出射的激光的偏振方向却发生了 90° 的变化. 因此, 通过旋转 3# 的倍频晶体, 实现了两种不同的相干情况. 图 3 给出了 1#, 3# 激光偏振方向在各自靶室窗口沿入射方向去看得到的情况. 事实上, 由于两束激光以 42° 角入射, 图 3 中偏振方向只是两束激光实际偏振方向在各自靶室窗口平面分别投影的图像, 并不是两束激光偏振方向的真实夹角. 通过空间几何关系, 可以计算得到两束激光偏振方向的空间夹角 θ 分别约为 80° 和 34° . 根据双光束干涉理论, 可以推出 1#, 3# 发生干涉时的条纹对比度为 $\gamma = \cos(\theta)$, 因此可以选用 γ 作为表征两束入射激光的相干程度的参数.

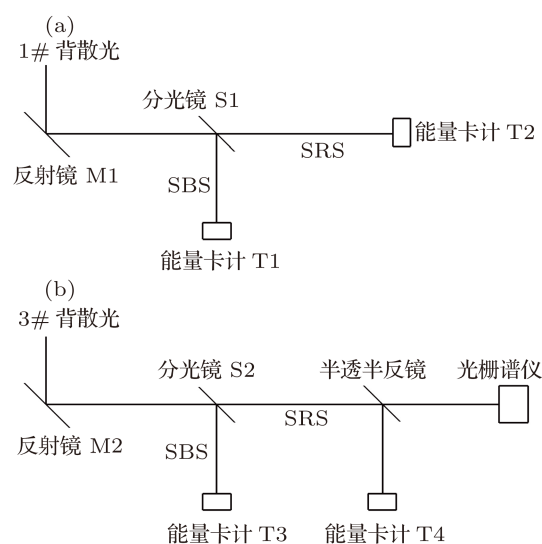


图 2 背向散射测量光路排布示意图

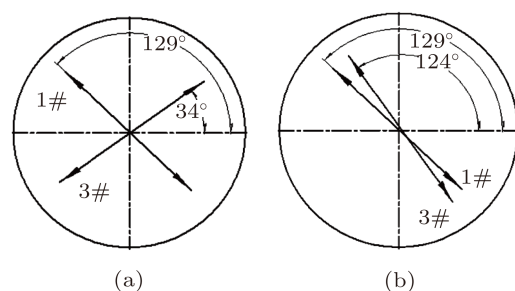


图 3 实验中两束入射激光偏振方向 (a) $\theta = 80^\circ$, $\gamma = 0.17$; (b) $\theta = 34^\circ$, $\gamma = 0.83$

3 实验结果与讨论

图 4 给出了不同相干条件下 1# 和 3# SBS, SRS 背向散射的能量测量结果. 图 4(a)—(d) 分别是 T1, T2, T3, T4 的测量结果, 纵坐标是归一化之后的能量计数 E , 横坐标 γ 代表两束激光相干程度. 从图上可以明显地看出, 随着两束激光相干程度 γ 的增加, 四组数据呈现一致的增长趋势.

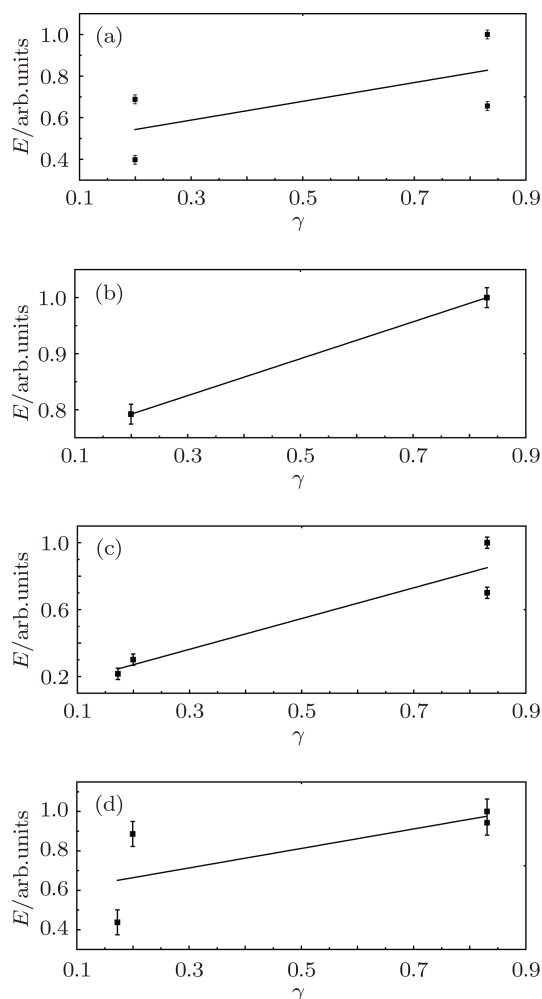


图 4 SBS, SRS 背向散射能量测量结果

对于 3#, 还利用 150 线对的可见光光栅谱仪对 SRS 光谱进行了测量, 如图 5 所示. 光谱的分布情况与晕区等离子体的物理状态密切相关^[14,15], 图 5(a), (b) 两种情况下所测到的 SRS 光谱呈现出不同的形状, 这表明不同束间相干条件下, 等离子体状态发生了很大的变化.

从以上实验结果可以明显看出, 维持其他条件不变, 只改变两路驱动激光之间的束间相干条件, SBS 能量、SRS 能量、SRS 光谱等都发生明显的

变化, 表明两束激光的束间相干性是存在的, 并且对背向散射带来的影响也是比较明显的.

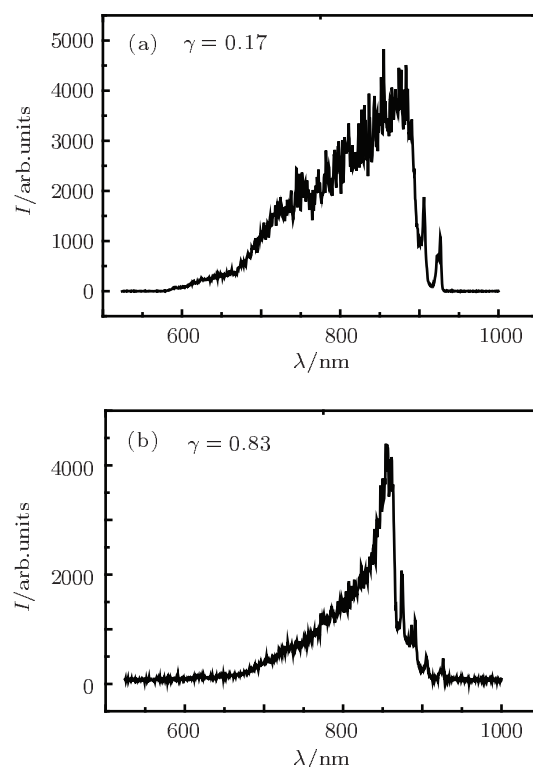


图 5 两种相干条件下测到的 SRS 光谱

当然, 由于实验发次有限, 获得的实验数据较少; 同时小口径取样可能受到不同发次之间驱动激光功率密度分布不均匀和不稳定等因素影响. 但对 1#, 3# 背向散射都是独立进行测量的, 而且四组实验数据的变化趋势比较一致. 从这一点来看, 虽然实验数据不太充足和小口径取样可能会存在一定的影响, 但上述结论应该还是可信的.

同频率、相同的振动分量和稳定的相位差是两束光波发生稳定干涉的三个条件, 束匀滑就是分别从这三个方面出发对激光束进行处理的. 比如谱色散束匀滑是从频率出发对光束进行谱色散; 随机相位板束匀滑打乱了光束之间的相位, 使之不能形成稳定的相位差; 极化束匀滑 (PS) 则从偏振方向的角度出发, 将光束分成振动方向垂直的两个子光束后, 进行非相干叠加. 这些束匀滑对单束激光所做的匀滑处理都是非常有效的, 但当多束匀滑后的激光重新叠加在一起的时候, 由于束间相干性的存在和影响, 效果可能会有所降低.

图 6 展示了单束激光和多束 (两束) 激光条件下, PS 束匀滑的效果. 对于单束激光来说, 初始的

电场强度为 E_0 , PS 束匀滑把激光分离成偏振方向互相垂直的 o 光和 e 光, 每个子光束的电场强度约为 $0.7E_0$ (即 $\sqrt{2}E_0/2$). 由于两子光束非相干, 在靶面叠加不会再干涉加强. 如果每一子束之间都不相干, 那么在 n 束激光的条件下, 等离子体中的有效电场强度仍是 $0.7E_0$. 对于两束激光来说, 分别经过 PS 束匀滑后, 将得到四束电场强度为 $0.7E_0$ 的光束, 由于电场所所在的二维空间内只允许有两个方向是相互垂直的, 因此四个子光束必然不可能彼此完全不相干, 尤其在图 6(b) 情况下 (两束入射激光的初始偏振方向一样), 经过 PS 束匀滑后, 来自不同光束的子光束间是完全相干的, 经过干涉叠加, 电场强度可达 $1.4E_0$. 依次类推, 当 n 束偏振方向一致激光相干叠加, PS 后电场强度为 $0.7nE_0$. 当然, 实际情况中激光束的初始偏振方向并不都是平行的, 也就是说各束驱动激光经过 PS 束匀滑后, 它们的子光束中只有很少一部分的偏振方向是一致的, 即大多数是部分相干的, 所以实际情况下光束叠加后的电场强度 $0.7E_0 < E < 0.7nE_0 (n > 1)$. 但是随着驱动激光数目的增加, 所有子光束间的干涉会越来越强, 从而导致 SBS 和 SRS 背向散射的增加. 也就是说, 同单光束条件下相比, PS 束匀滑在多光束下的作用效果比起预想的会有一定程度的下降, 或许这对理解多光束下背向散射份额增加的现象有一定的帮助.

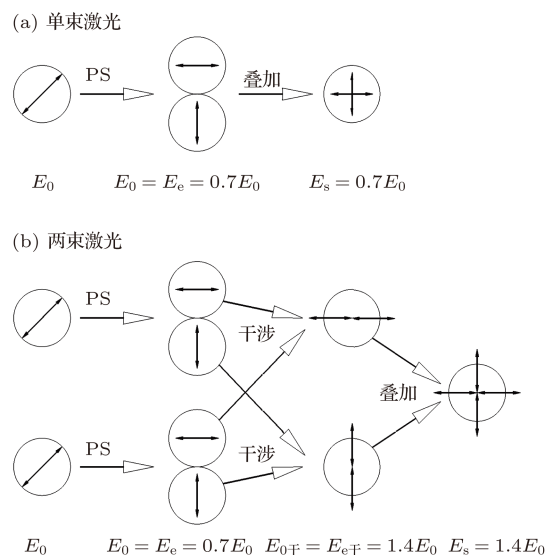


图 6 单束和两束激光条件下 PS 束匀滑的作用效果示意图

4 结论

在“神光 II”装置上, 利用小口径取样的方法, 进行了 SBS, SRS 背向散射的测量, 通过改变驱动激光之间可能存在的相干条件进行实验, 证实了“神光 II”装置各路激光之间存在较强的干涉, 而且激光束间相干程度越高, 背向散射越强.

- [1] Baldis H A, Montgomery D S, Moody J D, Labaune C, Batha S H, Estabrook K G, Berger R L, Kruer W L 1992 *Plasma Physics and Controlled Fusion* **34** 2077
- [2] Wang C K, Liu S Y, Wang Z B, Jiang G, Kuang L Y, Li W H, Jiang X H, Liu Y G, Tang X Q 2006 *Nucl. Phys. Rev.* **23** 59 (in Chinese) [王传珂, 刘慎业, 王哲斌, 蒋刚, 况龙钰, 李文洪, 蒋小华, 刘永刚, 汤小青 2006 原子核物理评论 **23** 59]
- [3] Wang C K, Jiang X H, Liu S Y, Kuang L Y, Wang Z B, Liu Y G, Li S W, Li W H 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1113 (in Chinese) [王传珂, 蒋小华, 刘慎业, 况龙钰, 刘永刚, 李三伟, 李文洪 2006 强激光与粒子束 **18** 1113]
- [4] Hinkel D E, Callahan D A, Langdon A B, Langer S H, Still C H, Williams E A 2008 *Physics of Plasmas* **15** 056314
- [5] Meezan N B, Atherton L J, Callahan D A, Dewald E L, Dixit S, Dzenitis E G, Edwards M J, Haynam C A, Hinkel D E, Jones O S, Landen O, London R A, Michel P A, Moody J D, Milovich J L, Schneider M B, Thomas C A, Town R P J, Warrick A L, Weber S V, Kidmann K, Glenzer S H, Suter L J, MacGowan B J, Kline J L, Kyrila G A, Nikroo A 2010 *Physics of Plasmas* **17** 056304
- [6] MacGowan B J, Afeyan B B, Back C A, Berger R L, Bonnaud G, Casanova M, Cohen B I, Desenne D E, DuBois D F, Dulieu A G,

- Estabrook K G, Fernandez J C, Glenzer S H, Hinkel D E, Kaiser T B, Kalantar D H, Kauffman R L, Kirkwood R K, Kruer W L, Langdon A B, Lasinski B F, Montgomery D S, Moody J D, Munro D H, Powers L V, Rose H A, Rousseaux C, Turner R E, Wilde B H, Wilks S C, Williams E A 1996 *Physics of Plasmas* **3** 2029
- [7] Niemann C, Divol L, Froula D H, Gregori G, Jones O, Kirkwood R K, MacKinnon A J, Meezan N B, Moody J D, Sorce C, Suter L J, Bahr R, Seka W, Glenzer S H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 85005
- [8] Froula D H, Divol L, Meezan N B, Dixit S, Moody J D, Neumayer P, Pollock B B, Ross J S, Glenzer S H 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 85001
- [9] Froula D H, Divol L, London R A, Michel P, Berger R L, Meezan N B, Neumayer P, Ross J S, Wallace R, Glenzer S H 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 15002
- [10] Jiang X J, Lin Z Q 2010 *Laser & Optoelectronics Progress.* **9** 22 (in Chinese) [江秀娟, 林尊琪 2010 激光与光电子学进展 **9** 22]
- [11] Froula D H, Divol L, London R A, Berger R L, Döppner T, Meezan N B, Ralph J, Ross J S, Suter L J, Glenzer S H 2010 *Physics of Plasmas* **17** 056302
- [12] Niemann C, Berger R L, Divol L, Froula D H, Kirkwood R K, Meezan N, Moody J D, Ross J, Sorce C, Suter L J, Glenzer S H

- 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 45002
- [13] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Physics of Plasmas* **11** 339
- [14] Wang Z B, Zheng J, Jiang X H, Liu S Y, Li W H, Liu W D, Yu C X, Liu Y G, Zhang H Y, Tan X Q, Peng X S, Ding Y K, Zheng Z J 2004 *High Power Laser and Particle Beams* **16** 45 (in Chinese)
- [王哲斌, 郑坚, 蒋小华, 刘慎业, 李文洪, 刘万东, 俞昌旋, 刘永刚, 张海鹰, 谭晓青, 彭晓世, 丁永坤, 郑志坚 2004 强激光与粒子束 **16** 45]
- [15] Zhang J T 1999 *Laser Plasma Interaction Physics and Simulation* (1st Ed.) (Zhengzhou: Henan Science and Technology Press) 116–134 (in Chinese) [张家泰 1999 激光等离子体相互作用物理与模拟 (第 1 版) (郑州: 河南科学技术出版社) 第 116—134 页]

Research of coherence between driven-laser beams and its influence on backscatter

Meng Xiang-Fu Wang Chen[†] An Hong-Hai Jia Guo Fang Zhi-Heng
Zhou Hua-Zhen Sun Jin-Ren Wang Wei Fu Si-Zu

(Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

(Received 7 March 2012; revised manuscript received 16 March 2012)

Abstract

Previous studies have shown that the technology of beam smoothing may effectively control parameter instabilities within the laser-plasma interaction, and greatly reduce stimulated Brillouin scattering (SBS) and stimulated Raman scattering (SRS). However, the recent experimental results on NIF revealed a much higher SBS and SRS than expected, one possible reason is due to the coherence between incident laser beams. In our research, two laser beams from “Shenguang II” facility are employed to irradiate an Au plate target, the energy and spectra of the backscattered light are measured in different coherent conditions. The results show that the driven-laser beams strongly interfere with each other, and usually the backscatter becomes strong gradually with the increase of coherent degree between the incident beams.

Keywords: laser plasma interaction, coherence between beams, backscatter

PACS: 52.38.-r, 52.57-z, 52.38.Dx

[†] E-mail: wangch@mail.shcnc.ac.cn