

# 空气中等离子光栅诱导探测光丝三次谐波辐射放大的实验研究\*

刘作业 史彦超 胡碧涛†

(兰州大学核科学与技术学院, 兰州 730000)

(2014年2月13日收到; 2014年4月23日收到修改稿)

对探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用和探测光丝作用到等离子光栅不同位置引起三次谐波的增强进行了实验研究. 研究发现, 探测光丝的三次谐波信号强度对于探测光丝不同位置与等离子光栅相互作用和等离子光栅内部钳制的激光强度具有极强的依赖关系. 与等离子光栅相互作用, 三次谐波信号与等离子光栅基波信号的相位匹配与否是解释探测光丝三次谐波信号强度变化的关键. 控制探测光丝以小角度与等离子光栅相互作用是实现探测光丝三次谐波信号有效放大的最佳途径.

**关键词:** 等离子光栅, 三次谐波, 相干相消

**PACS:** 42.65.Ky, 42.65.Re, 52.38.Hb

**DOI:** 10.7498/aps.63.184206

## 1 引言

十年来, 很多科研工作者都在研究如何利用激光与气体的相互作用产生三次谐波来获得高强度的相干紫外光源<sup>[1-4]</sup>. 谐波的转化效率和激光的强度以及相互作用长度相关. 强激光在空气中传输时, 由于克尔自聚焦效应和等离子体自散焦作用的共同影响, 激光脉冲会在空气中形成较长的光丝通道. 以光丝<sup>[5-7]</sup>的形式, 激光脉冲可以以高强度的状态在空气中传播较长的距离. 实验和理论研究<sup>[8-11]</sup>表明, 激光可以通过在空气中的自导引传输传播多个瑞利长度. 因此, 利用强激光束在空气中的传输是得到高转换效率谐波的非常可行的途径.

最新的研究表明, 利用两束飞秒光丝相互作用可以实现三次谐波信号强度超过两个数量级的增强. 然而, 不同科研小组报道的三次谐波增强实验结果在很多方面相互冲突, Suntsov等<sup>[12,13]</sup>发现三次谐波的增强对于探测光和抽运光的相对偏振夹

角不存在依赖关系, 由于光丝相互作用而产生的高密度等离子体引起了三次谐波信号的增强, 并且三次谐波的增强会在大约40 ps的延迟时间内存在. Yang等<sup>[14]</sup>发现只有在两束相同偏振的激光脉冲以小角度相交且激光脉冲达到时间重合的情况下, 才能实现三次谐波信号的增强. 所以, 目前对飞秒光丝相互作用引起三次谐波信号增强的内在物理机制仍需进一步研究.

本研究小组利用等离子体光栅对探测光丝的三次谐波进行了控制, 在实现三次谐波增强的同时实现了谐波信号的光谱展宽<sup>[15]</sup>. 为了进一步探索飞秒光丝相互作用引起三次谐波增强的内在机制, 本文对探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用和探测光丝作用到等离子光栅不同位置引起三次谐波信号的增强进行了实验研究.

## 2 实验装置

实验是在兰州大学激光核物理实验室的飞秒激光系统上进行的, 该系统的重复频率是1 kHz,

\* 国家自然科学基金(批准号: 11135002, 11075069, 91026021)和教育部学术新人奖资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: [hobt@lzu.edu.cn](mailto:hobt@lzu.edu.cn)

单脉冲能量为3.0 mJ, 中心波长为810 nm, 脉宽约33 fs, 实验光路见图1. 两束抽运光的夹角为 $\varphi = 3.8^\circ$  并且通过焦距为60 cm的透镜聚焦形成飞秒光丝. 固定抽运激光脉冲的延迟时间为0 fs, 由于干涉作用两条飞秒光丝形成等离子体光栅. 探测光束的脉冲能量为0.6 mJ, 通过一个焦距为110 cm的透镜L1聚焦形成飞秒光丝与等离子体光栅相互作用. 当探测光通过反射镜M1与等离子光栅相互作用时, 探测光丝与等离子光栅的夹角为

$\theta = 3.5^\circ$ . 实验中可以通过引入反射镜M2和M3, 将夹角 $\theta$ 增大到 $85^\circ$ . 透镜L1被固定在一台一维步进电机上, 可以前后移动使探测光丝的不同部分与等离子体光栅相互作用. 在这里定义探测光丝靠近实验装置测量端的部分为探测光丝的前端, 远离探测端的为光丝的尾部. 调节反射镜M1或者M4可以调整探测光丝作用在等离子光栅上的相对位置. 在这里我们定义靠近隔板的部分为等离子光栅的尾部.

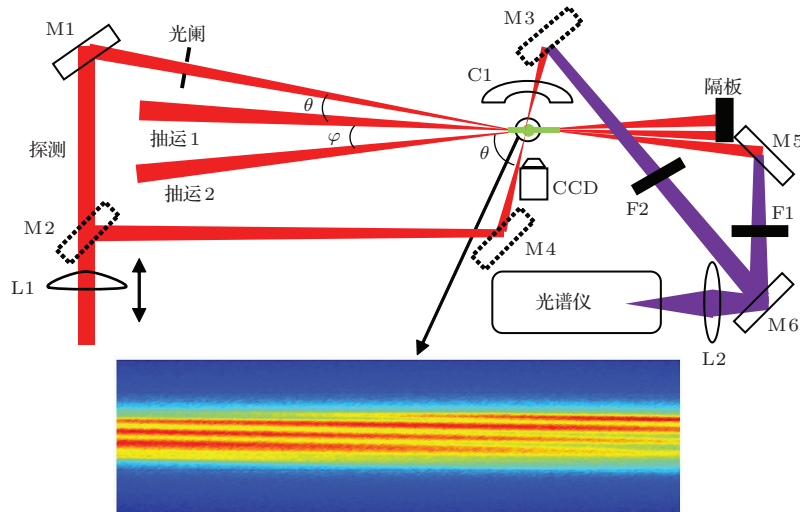


图1 实验装置示意图 L1, L2, 聚焦透镜; M1, M2, M3, 800 nm 的高反镜; M4, M5, M6, 266 nm 的高反镜; F1, F2为滤光片组; C1, 曲面镜

探测光束的基波信号和三次谐波信号可以通过反射镜M3或M5分离: 三次谐波信号会被反射同时基波信号会透射. 被反射的三次谐波信号被滤光片组衰减, 经反射镜M6反射被透镜L2收集, 最后由光谱仪(Ocean Optics, USB4000)测量. 实验中相互作用区域的等离子荧光信号被曲面镜C1收集并投射到电荷耦合器(CCD)上. 因此, 相互作用区域的等离子分布信息会被记录. 关于实验装置的详细介绍以及三次谐波光谱的探测和相互作用区域的成像已经在我们以前的工作中做了详细的介绍<sup>[15]</sup>.

### 3 实验结果与讨论

在我们以前的工作中<sup>[15,16]</sup>, 利用探测光和等离子体光栅间的强烈相互作用, 研究了探测光丝的三次谐波信号的增强和光谱展宽. 本文针对探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用和探测光丝作用在等离子光栅相对位置的变化引起三次谐波

信号强度的变化, 进一步探索飞秒光丝与等离子光栅相互作用的内在机制. 研究表明, 当探测光丝与等离子光栅的相对延迟时间为260 fs时<sup>[15]</sup>, 探测光丝的三次谐波信号最强. 本文中固定二者的延迟时间为260 fs, 调节步进电机使探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用. 如图2所示, 在不同夹角 $\theta$ 下三次谐波信号强度随着探测光丝不同位置与等离子光栅相互作用的变化关系(相对位置示数小的一侧对应于探测光丝的前端). 实验发现, 两种角度条件下都实现了三次谐波的增强, 但是小角度条件下探测光丝三次谐波信号增强得更加明显. 等离子体光栅<sup>[17-20]</sup>可以使得内部的激光强度打破由于自由电子发射<sup>[21]</sup>引起的强度限制, 实现光栅内部电子密度的增加. 非线性光丝之间的强烈相互作用会导致相互作用区域中的激光峰值强度增强, 而更高的基波能量和更高的电子密度会引起更强的非线性效应, 如自调制效应、自陡峭效应及交叉相位调制效应等. 换言之, 光丝间相互作用的增强会引起相互作用区域内激光脉冲时空调制的增强, 进

而实现探测光丝三次谐波信号强度的增加. 同时, 相互作用区域的长度, 即基波与三次谐波相位锁定的长度, 与三次谐波的强度成正比关系. 这就解释了为什么在小角度情况下探测光丝的三次谐波增强得更加明显.

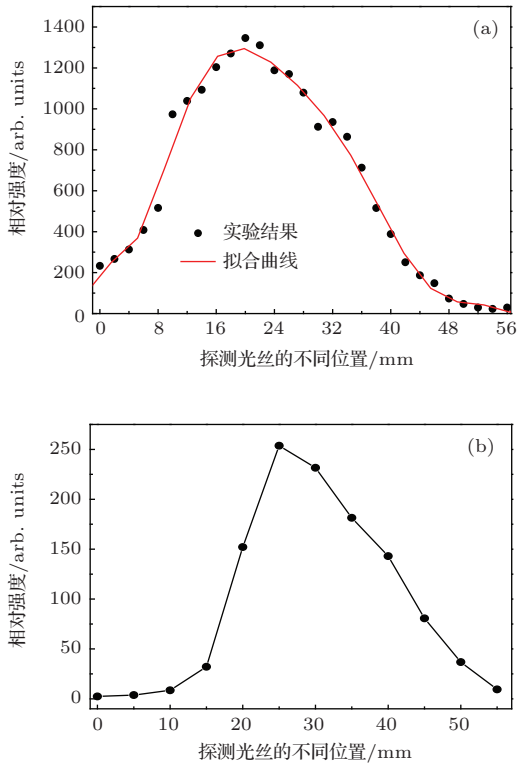


图2 当探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用时(保持二者的时间延迟为 260 fs), 三次谐波强度随着探测光丝不同位置与等离子光栅相互作用的变化 (a) 对应于探测光丝和等离子光栅的夹角为 3.5°; (b) 对应于探测光丝和等离子光栅的夹角为 85°

对于单个光丝而言, 光丝内部钳制的激光强度会在其前端迅速达到极大值并稳定一段距离. 但是随着激光脉冲在光丝中引起的自聚焦效应和自散焦效应动态平衡的丢失而导致了脉冲峰值功率的下降, 光丝开始逐渐消亡. 研究表明, 单个光丝其前端的电子密度一般高于其尾部的电子密度<sup>[22-24]</sup>. 单个光丝中基波和三次谐波会在光丝前端快速达到相位匹配并随着光丝消亡而相位失匹配. 当探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用时, 相互作用的强度随着探测光丝内部钳制的激光强度的变化而变化, 从而引起相互作用区域中对通过的脉冲的时空调制作用强度的变化. 探测光丝与等离子光栅的基波的相位在相互作用过程中一直保持相位匹配. 当探测光丝的前端与等离子光栅相互作用时, 等离子光栅中基波相位与探测光丝中三次

谐波之间相位匹配, 形成等离子光栅的抽运光的能量向探测光丝的三次谐波转化, 进而实现三次谐波能量的增加. 在探测光丝的尾部, 由于基波与次谐波的相位失匹配, 探测光丝的三次谐波信号急剧地衰减.

进一步对比图 2(a) 和 (b), 我们可以发现更多不同但有意义的现象. 当夹角为小角度(3.5°)时, 三次谐波的强度在 0 mm 位置时已经存在明显的增强并随着位置的增加不断增强, 当相对位置移动到 20 mm 时三次谐波的强度达到极大值, 随后三次谐波的强度开始出现缓慢的下降并在位置为 54 mm 时达到极小值(单丝时的三次谐波强度). 同时可以发现三次谐波强度随着相对位置(0—20 mm)增强的趋势比随着相对位置(20—54 mm)减弱的趋势更加剧烈. 而当二者夹角为大角度(85°)时, 从 0—10 mm 位置探测光丝三次谐波的强度并没有明显的增强, 之后(10—25 mm)三次谐波的强度出现了急剧的增强, 在 25 mm 左右达到极大, 随后三次谐波信号的强度开始减弱, 并在 55 mm 位置达到极小. 实验研究表明<sup>[11]</sup>, 光丝间的相互作用可以有效地延长光丝的长度. 探测光丝与等离子光栅相互作用区域的长度为  $L = \Delta l / \sin \theta$ , 其中  $\Delta l$  为相互作用区域等离子光栅的径向长度. 在小角度相互作用条件下, 探测光丝与等离子光栅具有更长的作用长度, 等离子光栅对于探测光丝具有更强的延长效应. 探测光丝长度的延长就代表着实现三次谐波增强的有效区域增加, 并且探测光丝产生的三次谐波与形成等离子光栅的基波实现相位匹配进而实现三次谐波的增强则在光丝的前端更容易实现.

图 3(a) 与 (b) 分别表示当小角度相交与大角度相交时, 三次谐波强度随着探测光丝穿过等离子光栅不同位置的变化关系. 对比两个角度下获得的实验结果可知, 三次谐波强度随着相对位置变化的基本趋势是相同的. 这是由于等离子光栅内部钳制的激光强度不是恒定而是沿着纵向具有不同的强度. 等离子光栅内部的激光强度的分布决定了等离子体的浓度分布, 而等离子体的浓度分布与等离子荧光强度正相关. 由图 3(a) 中插图可知, 光栅前段和尾部的电子密度太低, 以至于当探测光丝在这段区域内穿过时, 三次谐波的放大只有很小幅度的变化. 但是相对于等离子光栅尾部, 等离子光栅前端的电子密度较高, 所以前端的增强较明显. 所以, 探测光丝的三次谐波信号依赖于等离子光栅内部

的钳制的激光强度. 对比图 3(a) 和 (b) 可知, 小角度情况下三次谐波强度随着探测光丝穿过等离子光栅相对位置的变化趋势较缓慢, 这是由于在小角度情况下相互作用的长度更大, 三次谐波信号的强度对于探测光丝穿过等离子光栅的相对位置的依赖性相对较低.

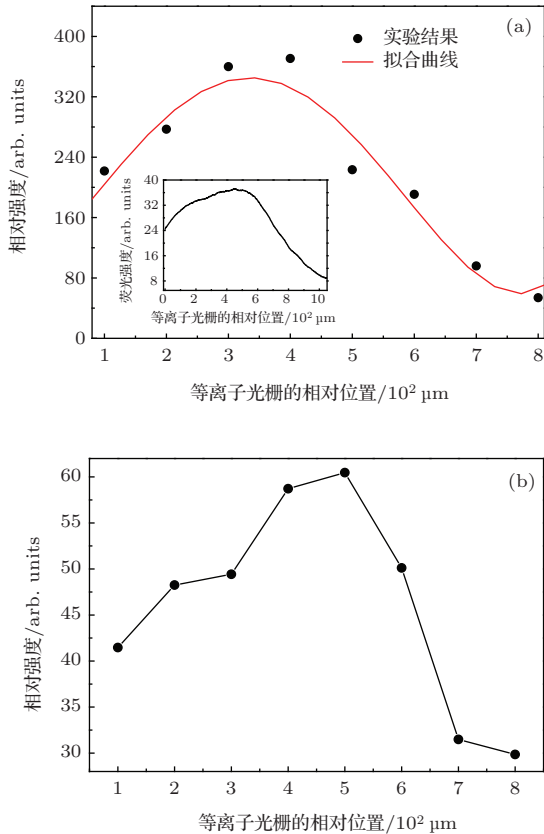


图3 当探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用时(保持二者的时间延迟为260 fs), 三次谐波的相对强度随着探测光丝作用在等离子光栅不同位置的变化关系 (a) 对应于探测光丝和等离子光栅的夹角为 $3.5^\circ$ , 插图为等离子荧光沿着等离子光栅纵向的强度分布; (b) 对应于探测光丝和等离子光栅的夹角为 $85^\circ$

## 4 结 论

本文对探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用和探测光丝作用到等离子光栅不同位置引起探测光丝的三次谐波信号的变化进行了研究. 实验发现, 探测光丝的三次谐波信号强度对于探测光丝的不同位置与等离子光栅相互作用和等离子光栅内部钳制的激光强度具有极强的依赖关系. 调整探测光丝与等离子光栅相互作用的角度, 实验发现探测光丝与等离子光栅在小角度相互作用条件下是实现探测光丝三次谐波增强的最佳方案. 同时, 实验表明控制多光丝间的相互作用是实现飞秒激光成丝应用的有效途径.

## 参考文献

- [1] Tsang T Y F 1995 *Phys. Rev. A* **52** 4116
- [2] Fedotov A B, Gladkov S M, Koroteev N I, Zheltikov A M 1991 *J. Opt. Soc. Am. B* **8** 363
- [3] Yang H, Zhang J, Zhang J, Zhao L Z, Li Y J, Teng H, Li Y T, Wang Z H, Chen Z L, Wei Z Y, Ma J X, Yu W, Sheng Z M 2003 *Phys. Rev. E* **67** 015401
- [4] Hao Z Q, Zhang J, Zhang Z, Xi T T, Zheng Z Y, Yuan X H, Wang Z H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3173 (in Chinese) [郝作强, 张杰, 张喆, 奚婷婷, 郑志远, 远晓辉, 王兆华 2005 物理学报 **54** 3173]
- [5] Liu Z Y, Sun S H, Shi Y C, Ding P J, Liu Q C, Liu X L, Ding B W, Hu B T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 075204
- [6] Wang F, Jiang H B, Gong Q H 2014 *Chin. Phys. B* **23** 014201
- [7] Sun S H, Liu X L, Liu Z Y, Wang X S, Ding P J, Liu Q C, Guo Z Q, Hu B T 2013 *Chin. Phys. Lett.* **30** 045202
- [8] Couairon A, Mysyrowicz A 2007 *Phys. Rep.* **411** 47
- [9] Tzortzakis S, Bergé L, Couairon A, Franco M, Prade B, Mysyrowicz A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 5470
- [10] Couairon A, Bergé L 2000 *Phys. Plasmas* **7** 193
- [11] Duan Z L, Chen J P, Fang Z B, Wang X T, Li R X, Lin L H, Xu Z Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 473 (in Chinese) [段作梁, 陈建平, 方宗豹, 王兴涛, 李儒新, 林礼煌, 徐至展 2004 物理学报 **53** 473]
- [12] Suntsov S, Abdollahpour D, Papazoglou D G, Tzortzakis S 2009 *Opt. Express* **17** 3190
- [13] Suntsov S, Abdollahpour D, Papazoglou D G, Tzortzakis S 2010 *Phys. Rev. A* **81** 033817
- [14] Yang X, Wu J, Peng Y, Tong Y Q, Yuan S, Ding L E, Xu Z Z, Zeng H P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 111103
- [15] Liu Z Y, Ding P J, Shi Y C, Lu X, Sun S H, Liu X L, Liu Q C, Ding B W, Hu B T 2012 *Opt. Express* **20** 8837
- [16] Liu Z Y, Ding P J, Shi Y C, Lu X, Sun S H, Liu X L, Liu Q C, Ding B W, Hu B T 2012 *Laser Phys. Lett.* **9** 649
- [17] Durand M, Liu Y, Forestier B, Houard A, Mysyrowicz A 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 121110
- [18] Liu J, Li W X, Pan H F, Zeng H P 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 151105
- [19] Wahlstrand J K, Milchberg H M 2011 *Opt. Lett.* **36** 3822
- [20] Zhang Z X, Xu R J, Song L W, Wang D, Liu P, Leng Y X 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184209 (in Chinese) [张宗昕, 许荣杰, 宋立伟, 王丁, 刘鹏, 冷雨欣 2012 物理学报 **61** 184209]
- [21] Kosareva O G, Liu W, Panov N A, Bernhardt J, Ji Z, Sharifi M, Li R, Xu Z, Liu J, Wang Z, Ju J, Lu X, Jiang Y, Leng Y, Liang X, Kandidov V P, Chin S L 2009 *Laser Phys.* **19** 1776
- [22] Xu S, Sun X, Zeng B, Chu W, Zhao J, Liu W, Cheng Y, Xu Z, Chin S L 2012 *Opt. Express* **20** 299
- [23] Zeng B, Chu W, Gao H, Liu W, Li G, Zhang H, Yao J, Ni J, Chin S L, Cheng Y, Xu Z 2011 *Phys. Rev. A* **84** 063819
- [24] Sun X, Xu S, Zhao J, Liu W, Cheng Y, Xu Z, Chin S L, Mu G 2012 *Opt. Express* **20** 4790

# Efficient generation of third harmonic radiation of air filament induced by plasma grating\*

Liu Zuo-Ye Shi Yan-Chao Hu Bi-Tao<sup>†</sup>

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

( Received 13 February 2014; revised manuscript received 23 April 2014 )

## Abstract

In this paper, the dependences of the third harmonic generation (THG) of a probe filament on the relative position of the probe filament interacting with the plasma grating and the position of the plasma grating interacting with the probe filament are investigated. The phase matching between the third harmonic of the probe filament and the fundamental wave of the plasma grating is earlier to achieve when the head of the probe filament interacts with the plasma grating, inducing the enhancement of the third harmonic generation, while the phase mismatching happens when the trail of the probe filament interacts with the plasma grating. The distribution of the clamping laser intensity inside the plasma grating results in the dependence of the THG on the positions of the plasma grating interacting with the probe filaments. It is an effective method of promoting the THG by setting the crossing angle between the probe filament and the plasma grating to be very small.

**Keywords:** plasma grating, third harmonic generation, coherent subtraction

**PACS:** 42.65.Ky, 42.65.Re, 52.38.Hb

**DOI:** [10.7498/aps.63.184206](https://doi.org/10.7498/aps.63.184206)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11135002, 11075069, 91026021) and a scholarship award for Excellent Doctoral Student Granted by Ministry of Education of China.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [hibt@lzu.edu.cn](mailto:hibt@lzu.edu.cn)