

# 对超短脉冲强激光在大气通道中产生的三次谐波偏振特性及白光光谱调制特性的研究\*

李 昆 徐妙华 金 展 刘运全 王兆华 令维军 张 杰

(中国科学院物理研究所光物理实验室,北京 100080)

(2005 年 11 月 17 日收到,2006 年 8 月 18 日收到修改稿)

研究了超短脉冲强激光在大气中传输产生电离通道后辐射的三次谐波强度随激光偏振的变化.此外,还研究了产生的白光辐射在短波长上的有规律的谱调制,分析了白光谱调制的产生机理.

关键词:超短脉冲激光,大气通道,超连续辐射,三次谐波

PACC:5235,5240D

## 1. 引 言

超短脉冲强激光在大气中传输时由于克尔自聚焦和等离子体散焦的动态平衡,在背景激光能量持续的补充下可以形成远长于瑞利长度的等离子体通道<sup>[1,2]</sup>,而通道呈锥角状<sup>[3,4]</sup>辐射出超连续白光<sup>[5,6]</sup>.在合适的激光和聚焦条件下,等离子体通道的长度甚至可达数百米,而超连续辐射的光谱从紫外一直延伸到  $4.5 \mu\text{m}$ <sup>[2,3]</sup>.这种等离子体通道不但产生超连续辐射,而且能高效率地辐射三次谐波<sup>[7]</sup>.通道内  $10^{13}$ — $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> 的高光强也会激发、电离通道内的大气分子和杂质成分,辐射出相应的谱线.与纳秒长脉冲激光在大气中聚焦相比,飞秒激光的长等离子体通道、超连续辐射、高效率的三次谐波以及通道只有线谱辐射这些性质都是它独有的,这给超短脉冲激光在大气中传输产生等离子体通道以独特的应用前景.

目前超短脉冲强激光在大气中的传输已应用到很多领域.例如,可利用其产生的高电导等离子体通道诱导雷电,称作激光引雷<sup>[8,9]</sup>;可利用长电离通道内的高光强电离大气中的杂质,测量其背向分子谱,进行大气污染的远距离监测,称作激光雷达<sup>[10]</sup>;也可利用其产生的超连续辐射的短脉冲特性测量介质的瞬态折射率的变化<sup>[11]</sup>.它的一些潜在用途还包括用来做光频标和产生更短的激光脉冲等.

关于大气通道辐射的特性,包括三次谐波的特性和超连续辐射的特性人们已经进行了详细的研究.但是据作者所知,关于三次谐波的强度随入射光的偏振度的变化以及大气通道超连续辐射谱的有规律调制的特性尚未见报道.本文将揭示这两个新现象并对其做定量和定性的解释.

## 2. 实验装置

实验中使用的光源为极光 II 号钛宝石飞秒激光系统,实验参数如下:中心波长 800 nm、脉宽 60 fs、单脉冲能量 40 mJ、光束直径 50 mm、重复频率 10 Hz、偏振状态为线偏振,聚焦透镜焦距为 4 m,实验装置示意图见图 1.激光经过透镜成丝前经过 1/4 波片、旋转波片的轴向角改变激光的偏振状态.通 Acton 光谱仪测量线偏光及近圆偏光产生的三次谐波谱和三次谐波强度随 1/4 波片轴向角的变化,如图 2(a)和(b).通过 Acton 光谱仪测量了白光光谱,见图 3.利用强度自相关仪和中心波长 770 nm 带宽 10 nm 的干涉滤光片测量了白光脉冲中 770 nm 强度自相关信号和主激光聚焦前的强度自相关信号,结果见图 4(a)和(b).强度自相关仪变化自迈克耳逊干涉仪,由两个透过波长为 650—900 nm 的 5/5 分束镜、定臂、调节精度为  $0.32 \mu\text{m}$  的动臂、倍频晶体(BBO)、滤光片、高信噪比的光探头和示波器组成,见图 4(c).

\* 国家自然科学基金(批准号:60478047,10574161)资助的课题.



图 1 主激光聚焦产生等离子体通道并测量通道辐射特性的实验示意图

### 3. 结果及讨论

#### 3.1. 三次谐波

从图 2(a) 和 (b) 可以看到, 随着激光偏振状态变成圆偏光, 三次谐波的强度越来越小, 而圆偏光不产生三次谐波. 这是因为大气通道中产生的三次谐波来自通道中大气分子的三阶非线性极化, 大气分子的三阶极化率张量和激光的偏振方向有关. 假设沿  $z$  方向入射的光脉冲的偏振方向与  $1/4$  波片的快轴夹角为  $\theta$ , 则经过  $1/4$  波片后光电场为  $E_x = E_0 \cos\theta, E_y = iE_0 \sin\theta$ . 由于大气是各向同性介质, 其三阶非线性极化强度可写作<sup>[12]</sup>

$$P_x(3\omega) = \chi E_0^3 \cos\theta \cos 2\theta,$$

$$P_y(3\omega) = \chi E_0^3 \sin\theta \cos 2\theta.$$

所以大气通道中产生的三次谐波的强度为

$$I(3\omega) = E(3\omega)E^*(3\omega) = I_0(3\omega)(\cos 2\theta)^2.$$

从图 2(b) 中可以看到, 理论计算和实验测量的结果符合得很好. 图中横坐标  $0^\circ$  对应上式  $\theta = \pi/4$ , 此时经过  $1/4$  波片后激光为圆偏振, 不能产生三次谐波.

#### 3.2. 白光光谱的调制

从图 3(a) 可以看到, 超短脉冲强激光在大气中

形成等离子体通道后产生的白光光谱从紫外的 200 nm 连续延伸到红外 1200 nm. 此光谱的短波长部分有强烈的有规律调制, 调制间距则随波长的增长而变大, 如图 3(b). 这部分的调制图样类似于两列光脉冲的干涉谱<sup>[13]</sup> 而不是由于自相位调制得到的谱调制 (如图 3(b), 它为低能量 10 mJ 聚焦时产生的白光光谱). 文献 [14] 也报道了飞秒激光在 LBO 中产生的远场锥角辐射的有规则的谱调制. 那里也认为此谱调制来自于被展宽的激光脉冲前后沿辐射的叠加.

为了进一步半定量的分析谱调制的调制周期, 假设两个相位相关, 时间延迟为  $\tau$  的相同光脉冲叠加在一起. 叠加后的光谱为

$$I(\omega, \tau) = 2I(\omega)(1 + F(\omega, \tau)\cos(\omega\tau)),$$

$$F(\omega, \tau) = E(\omega, \tau)E(\omega, 0). \quad (1)$$

当波长为 800 nm 时, 谱的调制周期为

$$\Delta\lambda(\text{nm}) = \frac{\lambda^2}{c\tau} = \frac{2.1}{\tau(\text{ps})}. \quad (2)$$

为了简化分析, 假设调制谱来源于两个光源的叠加. 那么根据图 3(b) 中 2—5 nm 的谱调制周期和 (2) 式可以得到, 此两个光脉冲时间间隔为 400—1000 fs. 而从白光的强度自相关信号图 4(b) 可以看到, 白光前沿和后沿的确可达到 1000 fs. 此外与聚焦前的主激光强度自相关信号图 4(a) 相比可见, 白光的时间包络曲线不再是平滑的高斯波形, 而是有很大的调制. 所以在前沿和后沿均可以通过自相位调制产生短波长的辐射. 因此, 白光光谱的调制不但来自于自相位调制, 还与白光不同部分产生的辐射的干涉效应有关. 此外, 由于在通道的锥角辐射现象中, 短波长的发散角较大, 所以在实验中测量短波长的谱调制时, 光谱仪要偏离光轴.

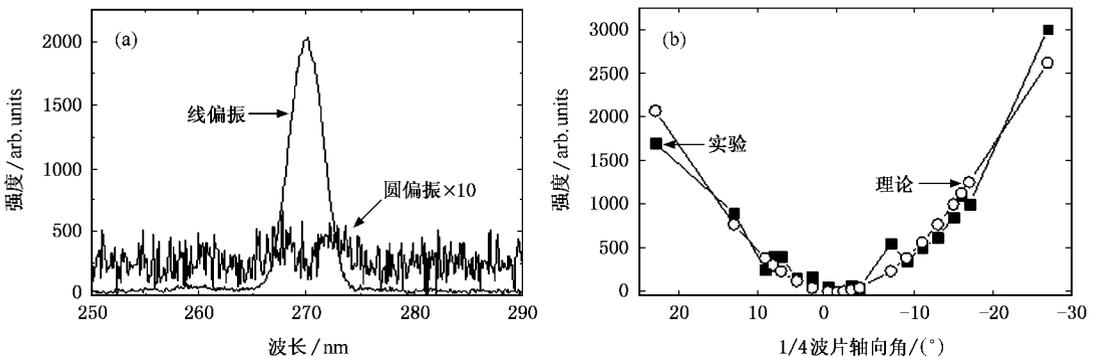


图 2 (a) 线偏振光和近圆偏振光产生的三次谐波 (b) 三次谐波强度与  $1/4$  波片轴角的关系的实验结果 (■) 和理论模拟结果 (○), 其中横坐标的  $0^\circ$  对应激光的圆偏振

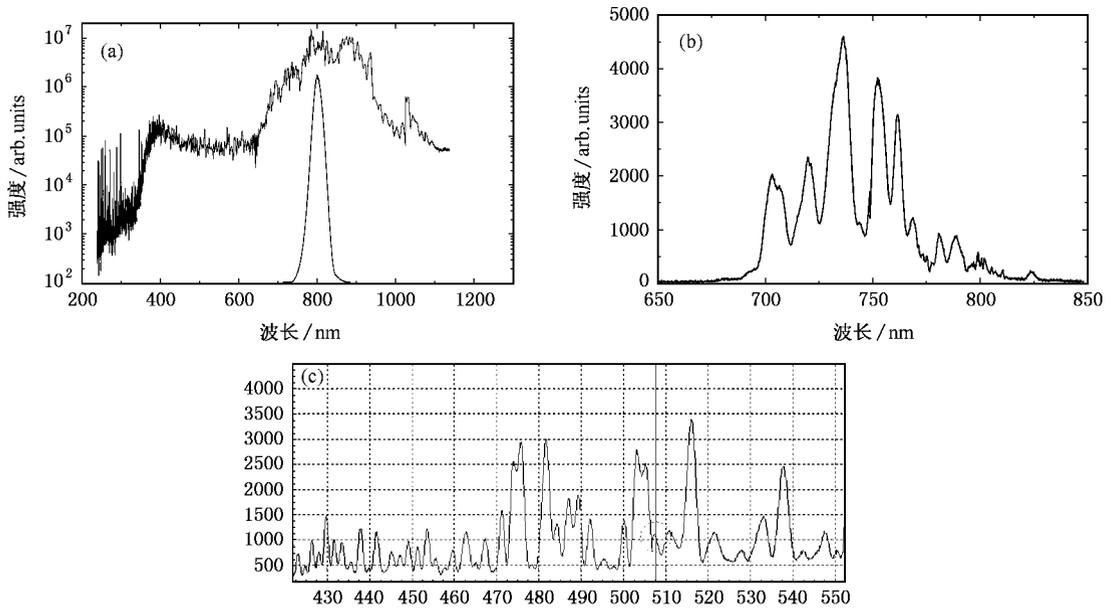


图 3 白光光谱 (a)40 mJ 和(b)10 mJ 聚焦时产生的白光光谱 (c)为 40 mJ 聚焦下锥角辐射光谱中的短波长部分

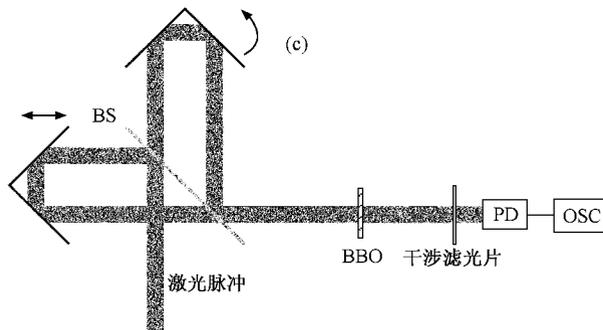
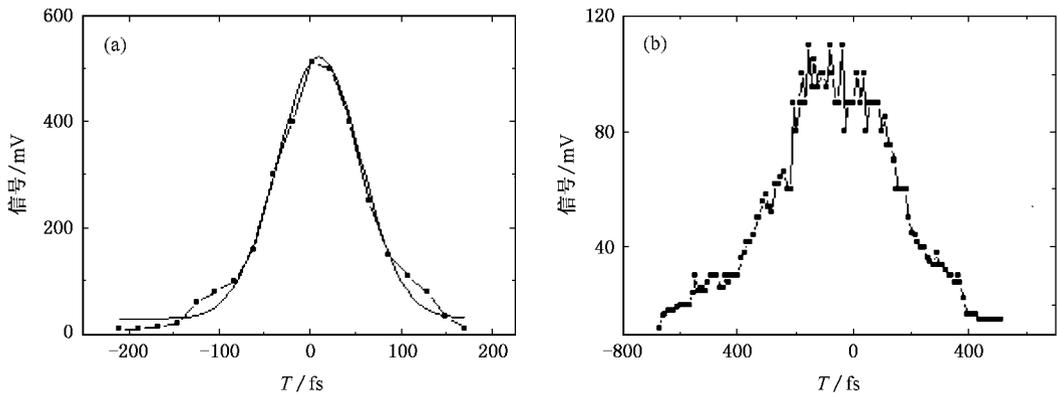


图 4 (a)为主激光聚焦前的强度自相关曲线和高斯拟合曲线 (b)为白光中 770 nm 成分的强度自相关曲线 (c)为强度自相关仪的示意图

### 4. 结 论

超短超强激光在大气通道中产生的三次谐波和

激光的偏振特性有关,白光的谱调制则不来自于自相位调制,而且与在不同时刻产生的辐射的干涉有关.所以,白光光谱特性是和通道中等离子体特性及白光的展宽有关,可以通过测量白光光谱的调制

来分析白光的脉宽和等离子体状态的变化.

- [ 1 ] Braun A , Korn G , Liu X , Du D , Squier J , Mourou G 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [ 2 ] Mlejnek M , Wright E M , Moloney J V 1998 *Opt. Lett.* **23** 382
- [ 3 ] Kosareva O G , Kandidov V P , Brodeur A , Chien C Y , Chin S L 1997 *Opt. Lett.* **22** 1332
- [ 4 ] Nibbering E T J , Curley P F , Grillon G , Prade B S , Franco M A , Salin F , Mysyrowicz A 1996 *Opt. Lett.* **21** 62
- [ 5 ] Nishioka H , Odajima W , Ueda K , Takuma H 1995 *Opt. Lett.* **20** 2505
- [ 6 ] Kasparian J , Sauerbrey R 2000 *Opt. Lett.* **25** 1397
- [ 7 ] Akozbek N , Iwasaki A , Becker A , Scalora M , Chin S L , Bowden C M 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 143901
- [ 8 ] Chin S L , Miyazaki K 1999 *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** 2011
- [ 9 ] Schillinger H , Sauerbrey R 1999 *Appl. Phys. B* **68** 753
- [ 10 ] Gravel J F , Luo Q , Boudreau D , Tang X P , Chin S L 2004 *Anal. Chem.* **76** 4799
- [ 11 ] Kim K Y , Alexeev I , Milchberg H M 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 4124
- [ 12 ] Zou Y H , Sun T H 1991 *Physics of Laser* ( Pecking University Press ) p363 ( in Chinese ) [ 邹英华、孙陶亨 1991 激光物理学( 北京大学出版社 ) p363 ]
- [ 13 ] Corsi C , Tortora A , Bellini M 2003 *Appl. Phys. B* **77** 285
- [ 14 ] Faccio Daniele , Trapani Paolo Di , Minardi Stefano *et al* 2005 *J. Opt. Soc. Am. B* **22** 862

## Polarization dependence of third-harmonics and spectral modulation properties of supercontinuum radiation from plasmas channels generated by femtosecond laser pulses propagation in air<sup>\*</sup>

Li Kun Xu Miao-Hua Jin Zhan Liu Yun-Quan Wang Zhao-Hua Ling Wei-Jun Zhang Jie  
( Laboratory of Optical Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China )

( Received 17 November 2005 ; revised manuscript received 18 August 2006 )

### Abstract

We carried out spectroscopic studies on the supercontinuum radiation from the plasma channels generated by femtosecond laser pulses propagating in air , which confirmed the polarization dependence of third harmonics and the spectral modulation of supercontinuum radiated from filaments . The new phenomenon of spectral modulation is also explored .

**Keywords :** ultrashort strong laser pulses , plasmas channels , supercontinuum radiation , third-order harmonics

**PACC :** 5235 , 5240D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60478047 , 10574161 ) .