

# 空气中激光等离子体通道的三次谐波辐射研究<sup>\*</sup>

郝作强<sup>1)</sup> 张 杰<sup>1)†</sup> 张 1) 奚婷婷<sup>1)</sup> 郑志远<sup>1)</sup> 远晓辉<sup>1)2)</sup> 王兆华<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>中国科学院物理研究所光物理院重点实验室,北京 100080)

<sup>2)</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室,西安 710068)

(2004 年 9 月 20 日收到,2004 年 11 月 1 日收到修改稿)

对超强飞秒激光脉冲在空气中形成的长等离子体通道的三次谐波辐射进行了研究.实验研究发现三次谐波的转换效率在通道范围内基本保持不变.还对等离子体通道锥角辐射中的三次谐波的辐射角进行了研究,结果表明其辐射角接近 6mrad,与理论计算结果符合得很好.

关键词:三次谐波,等离子体通道

PACC:4265K,5240D

## 1. 引 言

近年来,随着高功率超短脉冲激光技术的飞速发展,激光功率得到了很大的提高,使得原来只有在固体和液体中才能产生的非线性现象,也可以在空气中实现.1995年,人们首次观测到超强飞秒激光脉冲在空气中传输可以形成长达 20m 稳定的等离子体通道<sup>[1]</sup>.由于等离子体通道表现出的各种丰富多彩的现象和潜在的广阔应用前景,引起了各国科学家们的广泛重视.目前,对于超强飞秒激光在空气中传输如何形成等离子体通道,还没有一个完整的理论解释,但是一个被大家普遍接受的物理基础就是超强飞秒激光脉冲在空气中传输时,由于克尔自聚焦效应,激光强度逐渐增大,当达到空气的电离阈值时,电离空气产生等离子体,而产生的等离子体又会对激光束产生散焦作用,当这两种作用达到动态平衡时,激光脉冲在时间空间的分布上达到了稳定,激光束成丝传输,形成很长的等离子体通道.很多实验研究发现,高强度的飞秒激光脉冲可以产生长达百米量级<sup>[2]</sup>甚至公里量级的等离子体通道<sup>[3]</sup>,并且观测到了通道的一些十分有趣的现象,比如超连续白光的产生<sup>[4,5]</sup>,高转换效率三次谐波的产生<sup>[6,7]</sup>,锥角辐射<sup>[8-11]</sup>等等.这些现象和很多的应用密切相关,可以利用长通道产生的超连续白光进行大气污染和

大气层气溶胶成分分析<sup>[12]</sup>,利用通道的导电特性进行激光诱导闪电<sup>[13]</sup>;对等离子体通道中高次谐波的产生进行研究,有助于发展一种很有前景的波长能够达到紫外和 X 射线波段的相干光源<sup>[14-16]</sup>.

激光在空气中传输形成等离子体通道为高效率高次谐波的产生提供了很好的条件,因为谐波的转化效率不仅和激光的强度有关,还和相互作用长度有关,长等离子体通道形成就十分有效地提高了其相互作用长度.又因为研究气体中的三次谐波辐射有助于理解其他高次谐波发生的动态过程,对提高其他高次谐波的转换效率也具有很大的指导意义<sup>[17]</sup>.因此对空气中产生三次谐波的研究正引起越来越多研究人员的重视.本文对等离子体通道中的三次谐波辐射进行了实验研究,实验得到了三次谐波辐射随通道传输距离的演化,其转化效率高达 0.3%.本文还对等离子体通道锥角辐射中的三次谐波成分的发散角进行了测量,实验结果和理论计算的结果符合得很好.

## 2. 实验及结果分析

我们将中心波长为 800nm、脉宽为 30fs、频率为 10Hz 的超短强激光脉冲经焦距为 2m 的聚焦透镜后在空气中产生了很长的等离子体通道,实验中所用的激光能量为 20mJ.我们在通道上放置直径为

<sup>\*</sup>国家自然科学基金(批准号:10176034,10374116,10390160,60478047),国家重点基础研究专项资助(批准号:G1999075206)和国家高技术激光核聚变主题资助的课题.

<sup>†</sup>E-mail: jzhang@aphy.iphy.ac.cn

500 $\mu\text{m}$  的小孔,通道被截止,这个位置处的基频光和三次谐波通过小孔后经衰减片和滤光片进入光谱仪进行测量<sup>[18]</sup>,实验装置示意图如图 1 所示.小孔可以沿着通道移动,光谱仪就可以测量通道不同位置处三次谐波信号及其转换效率,进而得到三次谐波辐射随通道传输距离的变化趋势.

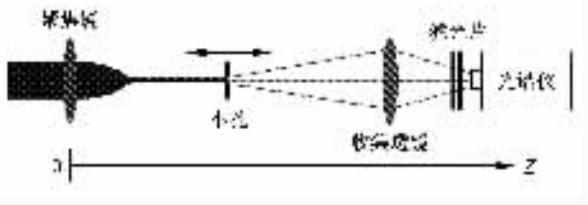


图 1 实验装置示意图

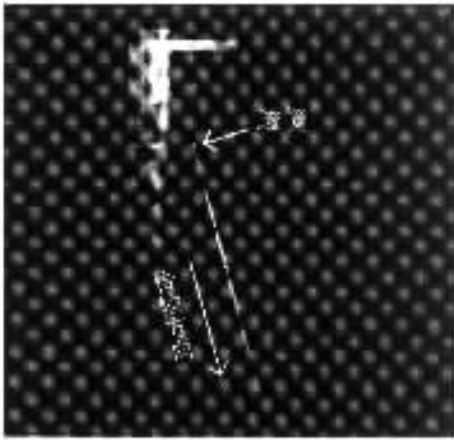


图 2 等离子体通道照片

我们在实验中产生了用肉眼就可以看见的很长的等离子体通道,照片见图 2.首先,将光谱仪放在离聚焦透镜 5m 的地方,直接对通道产生的光谱进行测量.实验测量到了很强的三次谐波辐射,图 3 (a)为一典型的光谱.从三次谐波的光谱来看,其中心为 278nm,相对于基频激光 807nm 来说,其三次谐波出现了红移,并且三次谐波的谱型具有很强的振荡<sup>[6]</sup>.激光在空气中自引导传输形成通道后,由于产生的三次谐波很弱,其自身的自相位调制作用可以忽略,所以基频波和三次谐波之间的交叉相位调制是造成三次谐波光谱的展宽和振荡的主要原因<sup>[19]</sup>.另外,由于自相位调制和其他一些非线性效应的作用,基频光的光谱得到了很大展宽,并且谱型出现了很强的调制,如图 3(b)所示,图中实线和虚线分别表示加聚焦镜形成通道和不加聚焦镜时的光谱,这也是造成三次谐波光谱不规则的原因<sup>[6]</sup>.

沿通道移动小孔,我们得到了基频光和三次谐

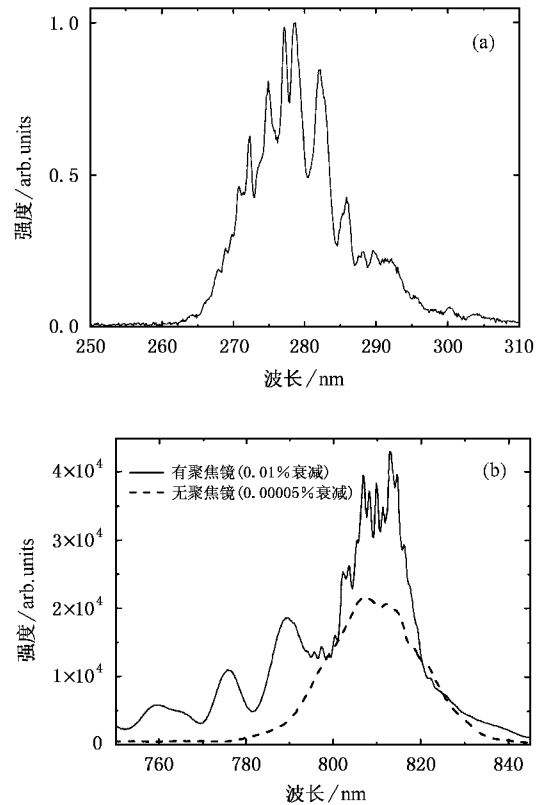


图 3 三次谐波 (a) 和基频激光的光谱 (b) (b) 中虚线和实线分别表示形成通道之前和之后的光谱)

波的强度随通道传输距离的变化(图 4).从图 4 中看到,三次谐波具有和主激光相似的变化趋势.在大约 160cm 处,主激光的强度开始显著增强,在 210cm 附近达到最大,到大约 270cm 处,强度显著减小,可以认为,在本文的实验条件下,激光在空气中形成了从 160cm 到 270cm 长达 110cm 的等离子体通道.在等离子体通道内,产生的三次谐波也随着基频光强度的变化而变化.由此可以得到通道不同位置处的三次谐波转换效率,如图 5 所示.其转换效率在通道范围内基本保持不变,大约都在 0.2% 附近,其中最大的超过了 0.3%,这些都和 Aközbeek 等人的理论结果基本相符<sup>[18,19]</sup>.另外,从图 5 中还可以看到,激光束在传输过程中出现了多次自聚焦和散焦过程,正是这些反复的动态过程,才使激光能够传输很长的距离,形成很长的等离子体通道.

由非线性光学理论可知,三次谐波的转换效率可表示为<sup>[20]</sup>

$$\eta \propto |\chi^{(3)}|^2 I^2 \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta kl}{2}\right), \quad (1)$$

其中  $\chi^{(3)}$  为介质的三阶非线性极化率,  $I$  为激光强

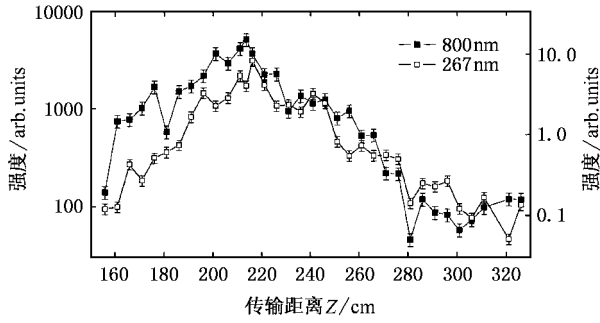


图 4 基频光和三次谐波强度随通道传输距离的变化

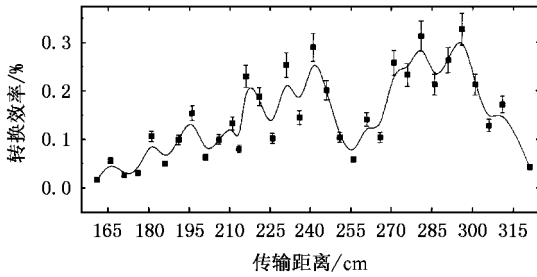


图 5 三次谐波转换效率随通道传输距离的变化

度  $l$  为介质长度  $\Delta k = \frac{3\omega}{c} [n(3\omega) - n(\omega)]$  为三次谐波的相位失配量,  $\omega$  为基频激光频率. 可见, 三次谐波的转换效率和相位失配及激光强度密切相关. 在等离子体通道内, 主要存在非线性光学克尔自聚焦效应和等离子体的散焦作用, 空气折射率  $n$  可以近似写为

$$n = n_0 + n_2 I - \frac{\omega_p^2}{2\omega^2}, \quad (2)$$

其中  $n_0$  是线性折射率,  $n_2$  为非线性折射率系数,  $\omega_p = [4\pi e^2 N_e / m]^{1/2}$  为等离子体频率,  $N_e$  为电子密度,  $e$  和  $m$  分别为电子电荷和质量. 那么, 三次谐波的相位失配量可以写为

$$\begin{aligned} \Delta k &= \frac{3\omega}{c} [n(3\omega) - n(\omega)] \\ &= \frac{3\omega}{c} \left[ n_0(3\omega) - n_0(\omega) + n_2 I(\omega) + \frac{16\pi e^2 N_e}{9m\omega^2} \right], \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} = \frac{\beta^{(K)} |E|^{2K}}{K\hbar\omega}. \quad (4)$$

因为产生的三次谐波强度很弱 (3) 式中忽略了与其强度有关的克尔自聚焦项. 主要考虑多光子电离时, 电子密度可表示为 (4) 式, 其中  $\beta^{(K)}$  为  $K$  个光子的

吸收系数. 从 (3) (4) 两式可以看出, 相位失配量与激光强度和电子密度有关, 激光强度越大, 电子密度也会越大, 其相位失配量也会变大, 那么, 三次谐波的转换效率就会减小. 此外, 实验还验证三次谐波转换效率存在饱和效应, 转换效率并不会像 (1) 式中那样, 随着激光强度的增加而无限增加<sup>[21]</sup>, 所以靠单纯提高激光光强度并非获得高转换效率三次谐波的有效手段, 这已经得到了很多实验证实<sup>[6,7,17]</sup>. 但是, 我们可以在不影响  $\chi^{(3)}$  的前提下, 采用电离率较小的气体介质或者  $n_0(3\omega)$  与  $n_0(\omega)$  相接近甚至  $n_0(3\omega)$  比  $n_0(\omega)$  小的介质来优化相位失配量, 从而提高谐波的转换效率<sup>[17]</sup>.

当超短强激光脉冲在大气中传输时, 形成了等离子体通道, 但是大约只有激光总能量的 8% 集中到了光丝中<sup>[22]</sup>, 另外有一部分能量从通道中以一定的角度辐射出来, 形成类似于切伦科夫辐射的彩色光环, 光环的排列是长波在内, 短波在外, 与正常衍射的排列顺序刚好相反. Golub<sup>[23]</sup> 的研究发现, 锥角辐射产生于等离子体通道的表面, 产生的锥角辐射可以用切伦科夫辐射理论很好地解释. 激光会引起介质的非线性极化, 这个极化以激光的群速度  $v_{gr}$  传播, 产生锥角辐射, 产生的辐射服从切伦科夫辐射理论  $\cos\theta = v_{ph} / v_{gr}$ , 其中  $v_{ph}$  是辐射出来的光在介质中的相速度. 锥角辐射的角度还可以写成

$$\cos\theta = n(\omega) / n(\omega'), \quad (5)$$

其中  $n(\omega_0)$  和  $n(\omega')$  分别表示基频激光和辐射光在介质中的折射率.

通道产生的三次谐波也会有一部分以一定角度辐射出来, 为了对三次谐波的辐射角进行研究, 我们

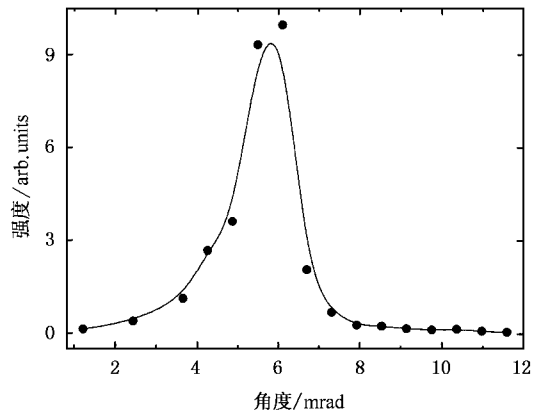


图 6 三次谐波发散角

采用了文献 [24] 中的方案对三次谐波的辐射角进行了测量, 测量结果见图 6.

从图 6 看到, 三次谐波的辐射角大约为 6mrad. 而依据切伦科夫理论, 计算得到在标准大气条件下的三次谐波的辐射角

$$\begin{aligned}\cos\theta &= n(\omega)/n(3\omega) \\ &= 1.000275/1.000295 \\ &= 0.99998.\end{aligned}\quad (6)$$

所以, 三次谐波的辐射角  $\theta \approx 6.3\text{mrad}$ , 这和实验测量结果符合得很好, 进一步证实了通道的锥角辐射可以看作是切伦科夫辐射<sup>[8]</sup>.

### 3. 结 论

我们对超强飞秒激光脉冲在空气中形成的等离子体通道的三次谐波辐射进行了研究. 实验结果表明, 在等离子体通道范围内, 三次谐波的强度具有和基频光相似的变化趋势, 并且其转换效率基本保持不变, 维持在 0.2% 左右, 最大可达 0.3%. 此外, 我们还对通道的锥角辐射中的三次谐波成分进行了研究, 发现三次谐波的发散角大约为 6mrad, 这和用切伦科夫辐射理论计算得到的结果符合得很好.

- 
- [ 1 ] Braun A *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 73
- [ 2 ] Fontaine B La *et al* 1999 *Phys. Plasmas* **6** 1615
- [ 3 ] Wöste L *et al* 1997 *Las. Optoelectron.* **29** 51
- [ 4 ] Kasparian J *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1397
- [ 5 ] Nishioka H *et al* 1995 *Opt. Lett.* **20** 2505
- [ 6 ] Yang H *et al* 2003 *Phys. Rev. E* **67** 015401
- [ 7 ] Zhu C J *et al* 2001 *Chin. Phys. Lett.* **18** 57
- [ 8 ] Nibbering E T J *et al* 1996 *Opt. Lett.* **21** 62
- [ 9 ] Chin S L *et al* 2001 *Opt. Comm.* **188** 181
- [ 10 ] Chin S L *et al* 2002 *Opt. Comm.* **210** 329
- [ 11 ] Golubtsov I S and Kosareva O G 2002 *J. Opt. Tech.* **69** 21
- [ 12 ] Kasparian J *et al* 2003 *Science* **301** 61
- [ 13 ] Zhao M X *et al* 1995 *IEEE J. Quantum Electron.* **31** 599
- [ 14 ] Macklin J J *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 766
- [ 15 ] Spielmann C *et al* 1997 *Science* **278** 661
- [ 16 ] Chang Z and Kapteyn H C 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2967
- [ 17 ] Zhong F C *et al* 2002 *Acta Opt. Sin.* **22** 10 (in Chinese) [ 钟方川等 2002 光学学报 **22** 10 ]
- [ 18 ] Aközbek N *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **89** 143901
- [ 19 ] Aközbek N *et al* 2003 *Appl. Phys. B* **77** 177
- [ 20 ] Shi S X *et al* 2003 *The Nonlinear Optics* ( Xi 'an : University of Electronic Science and Technology of Xi 'an Press ) p177 ( in Chinese ) [ 石顺祥等 2003 非线性光学 ( 西安 西安电子科技大学出版社 ) 第 177 页 ]
- [ 21 ] Fedotov A B *et al* 1997 *Opt. Comm.* **133** 587
- [ 22 ] Tzortzakos S *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 1270
- [ 23 ] Golub I 1990 *Opt. Lett.* **15** 305
- [ 24 ] Kosareva O G *et al* 1997 *Opt. Lett.* **22** 1332

# Third harmonic generation in plasma channels in air induced by intense femtosecond laser pulses<sup>\*</sup>

Hao Zuo-Qiang<sup>1)</sup> Zhang Jie<sup>1)†</sup> Zhang Zhe<sup>1)</sup> Xi Ting-Ting<sup>1)</sup> Zheng Zhi-Yuan<sup>1)</sup>  
Yuan Xiao-Hui<sup>1)2)</sup> Wang Zhao-Hua<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Beijing 100080, China)

<sup>2)</sup>(State Key Laboratory of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China)

(Received 20 September 2004; revised manuscript received 1 November 2004)

## Abstract

Strong third-order harmonic (TH) emission is observed from long plasma channels formed when intense femtosecond laser pulses propagate in air. The conversion efficiency between the fundamental wave and the TH emission is roughly constant over the length of the plasma channels. The divergence angle of the TH emission in the conical emission of the plasma channels is also investigated, which is in good agreement with calculations.

**Keywords** : third harmonic emission, plasma channels

**PACC** : 4265K, 5240D

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10176034, 10374116, 10390160, 60478047), the Special Foundation for State Major Basic Research Program of China (Grant No. G1999075206) and National Hi-Tech ICF program.

<sup>†</sup>E-mail : jzhang@aphy.iphy.ac.cn