

文章编号: 0258-7025(2006)11-1486-04

载波包络相位稳定的 6 fs 超快强激光脉冲 及其在高次谐波产生中的应用

彭 滢¹, 徐 晗¹, 杨 旋¹, 吴 昆¹, 蔡 华¹, 曾和平^{1*},
郑颖辉², 熊 辉², 曾志男², 李儒新², 徐至展²

(¹ 华东师范大学物理系, 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062
² 中国科学院上海光学精密机械研究所强场激光物理国家重点实验室, 上海 201800)

摘要 脉冲宽度 40 fs, 功率 1.1 W 的载波包络相位(CEP)稳定的飞秒激光脉冲在充氩气的空芯光纤内由于自相位调制频谱展宽, 通过啾啾镜和斜劈补偿色散, 最终可获得脉冲宽度为 6 fs 的载波包络相位稳定的强激光脉冲。将之应用到高次谐波实验中得到了脉冲宽度为 500 as 的单个阿秒脉冲。

关键词 超快光学; 6 fs 脉冲; 频谱展宽; 载波包络相位稳定; 高次谐波

中图分类号 O 437.1 **文献标识码** A

Generation of Carrier-Envelope-Phase Stabilized 6 fs Ultrashort Pulses and Their Application in High-Order Harmonic Generation

PENG Yan¹, XU Han¹, YANG Xuan¹, WU Kun¹, CAI Hua¹, ZENG He-ping¹,
ZHENG Ying-hui², XIONG Hui², ZENG Zhi-nan², LI Ru-xin², XU Zhi-zhan²

¹ Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy of Ministry of Education,
Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062, China
² State Key Laboratory of High Field Laser Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract Carrier-envelope phase (CEP) stabilized 6 fs ultrashort intense pulses were generated by focusing 40 fs (full width at half maximum (FWHM)) 1.1 mJ (pulse energy) intense laser pulses into the hollow fiber filled with argon gas. The input pulse was broadened by self-phase modulation and the spectrum was compressed by chirped mirrors and two tilted quartz thin wedges. We applied the compressed pulse to the experiment of high-order harmonic generation and found it supporting a transform-limited 500 attosecond single pulse in time domain.

Key words ultrashort optics; 6 fs pulse; frequency-domain broadening; carrier-envelope phase locked; high-order harmonic

1 引 言

超快超强飞秒激光脉冲是研究快速变化的原子分子动力学的重要工具, 它在物理学、化学、生物学中都有广泛的应用^[1,2]。当脉冲光周期很短时, 电场的峰值强度与载波包络相位(CEP)的稳定有着直

接的关系。因此, 实现超快超强飞秒脉冲的载波包络相位稳定, 对一些依赖于光强的非线性光学过程尤为重要^[2,3]。2002 年 Andrius Baltuska 等^[4]利用光参量放大获得了载波包络相位稳定的、脉冲宽度低于 5 fs 及单脉冲能量为 1.6 μ J 的脉冲光; 2004 年

收稿日期: 2006-07-05; 收到修改稿日期: 2006-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(60478011, 10525416)和上海市科学技术委员会基础研究重大项目(04dz14001)资助课题。

作者简介: 彭 滢(1982—), 女, 安徽巢湖人, 华东师范大学物理系博士研究生, 现从事超快激光方面的工作。E-mail: 52060602024@student.ecnu.edu.cn

导师简介: 曾和平(1966—), 男, 湖南人, 华东师范大学物理系教授, 博士生导师, 主要从事超快激光方面的研究。E-mail: hpzeng@phy.ecnu.edu.cn

C. P. Hauri 等^[5] 又用啁啾脉冲光参量放大的方法获得了载波包络相位稳定的、单脉冲能量 85 μJ 的脉冲光, 脉冲宽度为 17.3 fs。这两个实验都得到了载波包络相位稳定的脉冲, 但都没能同时实现窄脉宽和高功率。最近, 我们利用脉冲宽度 40 fs, 功率 1.1 W 载波包络相位稳定的飞秒激光脉冲为光源, 在充 Ar 气的空芯光纤中通过自相位调制进行频谱展宽, 再由啁啾镜和斜劈补偿色散, 最终获得了脉冲宽度 6 fs, 单脉冲能量 0.6 mJ 的超快超强激光脉冲, 且通过调整斜劈的插入量微调系统中的色散量, 从而实现脉冲宽度的调节。将这一超快超强激光脉冲应用到高次谐波的实验中, 最终得到了较好的连续谱, 可支持变换极限为 500 as 的单个阿秒脉冲。

2 实验装置及结果

产生高次谐波的实验装置如图 1 所示。振荡级 (Rainbow, Femtosecond Scientific) 输出频率 80 MHz, 功率 150 mW, 中心波长在 800 nm 的飞秒激光脉冲 (频谱图见图 2(a)), 它的载波包络相位通过相位稳定反馈系统锁定。将这一相位锁定的脉冲注入钛宝石放大系统中进行再生放大, 得到脉冲宽度 40 fs, 功率 2.5 W, 频率 1 kHz 的超强飞秒激光脉冲 (频谱图见图 2(b))。由于放大介质对载波包络相位波动的影响很小, 不足以破坏相位之间的相干性, 所以在此放大过程中脉冲的载波包络相位是保持不变的。为了证明这一点, 我们搭建了一个 $1f \sim 2f$ 系统来测量载波包络相位, 测量装置及脉冲干涉

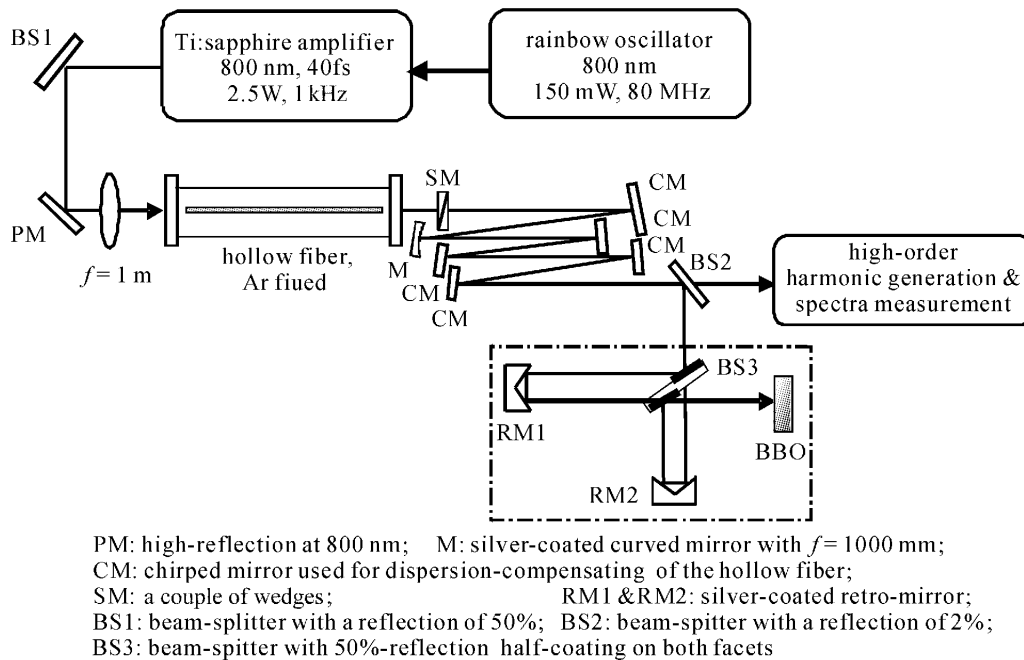


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for high harmonic generation

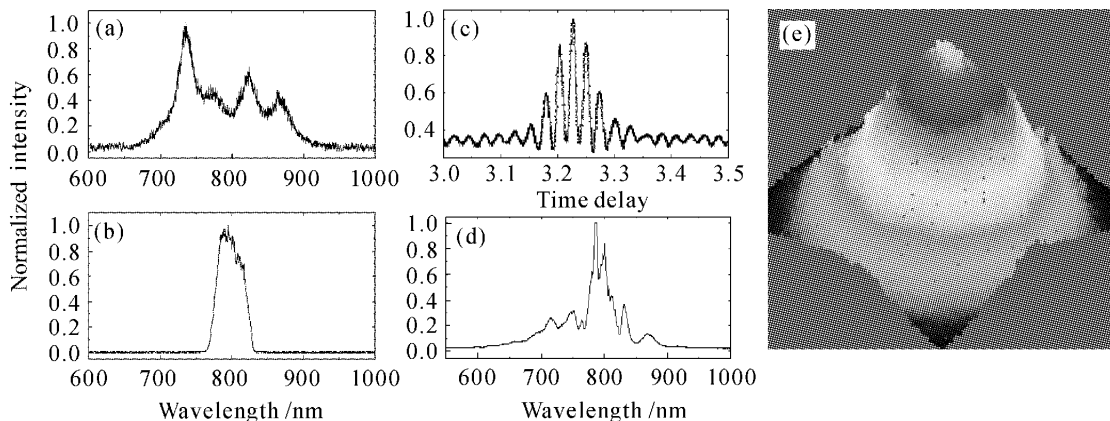


图 2 (a) 振荡级脉冲的频谱; (b) 放大级脉冲的频谱; (c) 自相关仪测得的信号; (d) 光纤展宽后的频谱; (e) 光纤输出的光斑

Fig. 2 (a) Output spectrum of the fs oscillator; (b) spectrum of the amplified pulse; (c) autocorrelation signal;

(d) spectrum of the pulse after spectral broadening in hollow fiber; (e) spatial profile of output pulse after the hollow fiber

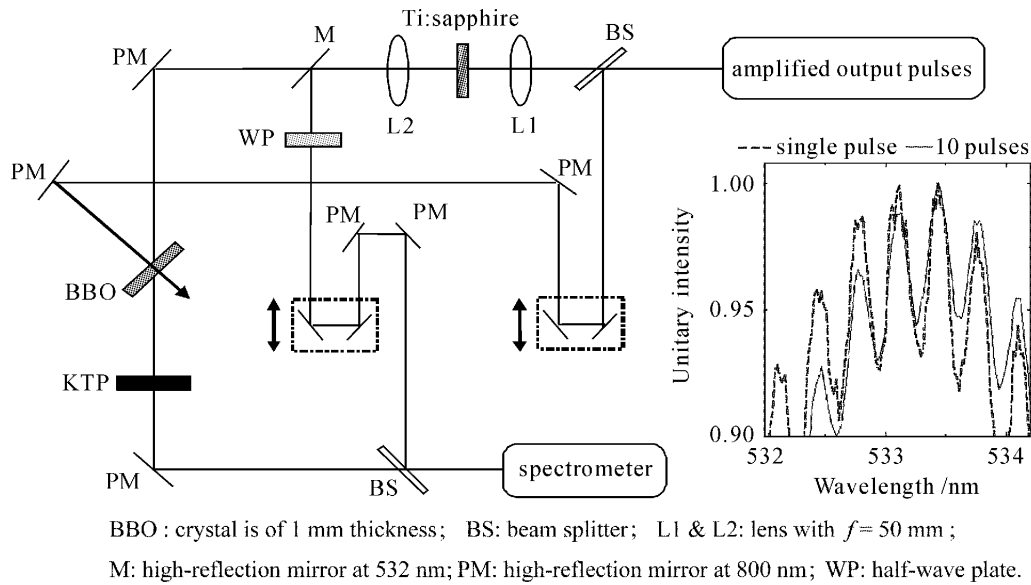


图 3 载波包络相位测量装置图及脉冲干涉条纹

Fig. 3 Schematic of the CEP measurement setup and interference fringe of pulses

条纹见图 3。从图 3 可以看到,单脉冲的干涉条纹和多脉冲的干涉条纹的波峰与波谷重合得很好,从而在实验上证明了再生放大不会改变种子光的载波包络相位,放大后的光仍然是载波包络相位稳定的。分束出 1.1 W,耦合到空芯光纤中去,光纤芯径 200 μm ,长 1 m,管内充有 0.5×10^5 Pa 的 Ar 气。由于波导内的强非线性效应,脉冲在光纤内进行自相位调制,频谱被展宽,范围 600~900 nm(频谱见图 2(d)),利用啁啾镜和斜劈补偿色散,将脉冲压缩至最窄,最后在相关仪中进行测量,所得自相关信号见图 2(c)。微调斜劈的插入量,即改变系统中的色散量,脉冲的脉冲宽度也随之变化。压缩后脉冲的单

脉冲能量约为 0.6 mJ,光纤输出的光斑见图 2(e)。由图 2 可知,由于空芯光纤的空间滤波作用,光斑有良好的输出模式,这样的光斑聚焦后可以得到很高的峰值功率,有利于后续实验的进行。

我们将压缩后的飞秒脉冲用于高次谐波实验,获得了连续的高次谐波谱,实验结果见图 4。从图中可以看到,高次谐波的调制深度和连续谱的带宽主要取决于激光的脉冲宽度。取出一段平滑连续谱进行傅里叶变换,可获得变换极限为 500 as 的单个阿秒脉冲。此外,还发现当抽运光的载波包络相位随机锁定时,高次谐波的谱结构、调制深度及连续区域的带宽也随之改变。

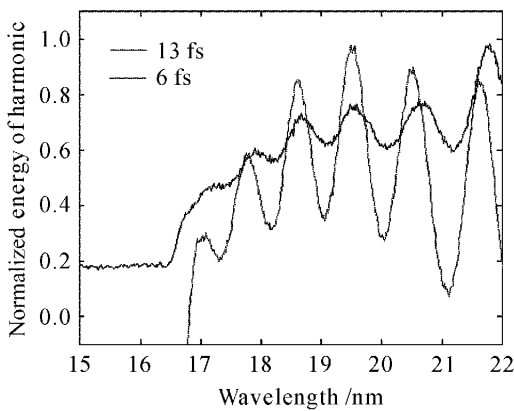


图 4 脉冲宽度分别为 6 fs 和 13 fs 时的高次谐波谱
高次谐波信号采集时间均为 10 s,
气体盒中氩气的压强约为 2.4×10^3 Pa

Fig. 4 High-order harmonic spectra under the fundamental pump with the pulse duration of 6 and 13 fs
The spectra were attained with the accumulation time of 10 s, and Ar gas pressure is 2.4×10^3 Pa

3 结 论

采用单脉冲能量 1.1 mJ,脉冲宽度 40 fs 载波包络相位稳定的激光脉冲为抽运光,在充氩气体的空芯光纤中进行频谱展宽,配合啁啾镜及斜劈补偿色散,最终得到 6 fs 的载波包络相位稳定的超快强激光脉冲。将此脉冲宽度的脉冲应用到高次谐波实验中,获得了连续的高次谐波谱,并且发现高次谐波的调制深度和连续谱的带宽主要由激光脉冲的宽度决定,且随机锁定抽运光的载波包络相位时,高次谐波的谱结构、谱的调制深度及连续区域的带宽也都随之变化。这为进一步研究高次谐波的产生及高次谐波与载波包络相位的确切关系等工作提供了实验基础。利用周期量级超短强激光脉冲在气体靶室获得连续谱高次谐波产生,可支持单个阿秒脉冲产生,

与当前普遍采用的气体喷流中产生阿秒脉冲方案相比,在气体靶室中产生高次谐波有望控制驱动脉冲的作用长度、调节控制谐波产生的相位匹配条件、提高连续谱高次谐波的产生效率从而提高相应的阿秒脉冲强度等。

参 考 文 献

- 1 Guanhua Yao, Shih-I Chu. Molecular-bond hardening and dynamics of molecular stabilization and trapping in intense laser pulses [J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **48**(1):485~494
- 2 Ivan P. Christov, Margaret M. Murnane, Henry C. Kapteyn.

- High-harmonic generation of attosecond pulses in the "single-cycle" regime [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(7):1251~1254
- 3 Christian Spielmann, Clarence Kan, Neal H. Burnett *et al.*. Near-keV coherent x-ray generation with sub-10-fs lasers [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 1998, **4**(2):249~265
 - 4 Andrius Baltuska, Takao Fuji, Takayoshi Kobayashi. Controlling the carrier-envelope phase of ultrashort light pulses with optical parametric amplifiers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(13):133901
 - 5 C. P. Hauri, P. Schlup, G. Arisholm *et al.*. Phase-preserving chirped-pulse optical parametric amplification to 17.3 fs directly from a Ti:sapphire oscillator [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(12):1369~1371

欢迎成为《中国光学期刊网》企业会员

为进一步提高服务水平,中国光学期刊网从 2006 年起在信息服务上实行会员制度,凡光电子、激光、光通信等相关的企业均可申请成为中国光学期刊网的企业会员,中国光学期刊网将为企业会员提供优质超值的专业服务。

一、会员企业享受的服务包括:

- 1) 企业名称在中国光学期刊网首页的“会员企业”栏目中出现,并链接到企业自己的网址。
- 2) 会员企业可获赠光学类期刊一份,全年 12 册,请在《中国激光》、《光学学报》、《激光与光电子学进展》和 *Chinese Optics Letters* 中任选一种。
- 3) 可免费在本站“特别推荐”栏目发布文字信息(含广告) 10 条,每篇不过 2000 字。
- 4) 如在中国光学期刊网发布广告,可享受广告报价的 80% 优惠。
- 5) 优先或免费参加光学期刊网组织的各类学术和业务活动。
- 6) 可免费阅读本网站期刊全文 300 篇次。

二、会员义务:

1. 注册时向中国光学期刊网递交企业真实信息。
2. 每年交纳会员费 2800 元,会员资格从交费之日起计算,一年内有效。
3. 不得将中国光学期刊网提供给会员的信息转给第三方使用。
4. 尊重并保护本网及论文作者的知识产权。
5. 在本网发布信息必须遵守中华人民共和国相关法律法规。

三、成为企业会员的步骤:

- ① 注册成为中国光学期刊网的一般用户,也可以直接填写广告投放申请表单,说明您的意向。
- ② 来信至 mail@opticsjournal.net 告知您已经注册成功。并请告知选择何种期刊及收刊地址、联系人。
- ③ 银行汇款 2800 元至下列帐户:
开户行:工商银行上海嘉定支行营业部 户 名:中国科学院上海光学精密机械研究所
帐 号:1001700809026400195
- ④ 联系人:郑继承; 电话:021-69918253; Email:expert@mail.siom.ac.cn

