

文章编号: 0253-2239(2006)09-1439-2

7 fs 超快强激光驱动 Ar 原子产生支持单个阿秒脉冲的高次谐波连续谱

郑颖辉¹ 熊 辉¹ 彭 滢² 徐 晗² 曾志男¹ 杨 旋² 陈晓伟¹ 李儒新¹ 曾和平² 徐至展¹

(¹ 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)
(² 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)

摘要: 采用脉冲宽度为 7 fs, 脉冲能量为 0.4 mJ 的超快强激光脉冲与气体盒子中 Ar 原子作用获得了高次谐波截止区连续谱, 并发现当驱动激光稳定在不同的载波包络相位时, 高次谐波的谱结构、谱调制深度和连续谱的带宽都有很大区别。在某些载波包络相位时获得了平滑的连续谱, 调制深度小于 17%, 连续带宽达 10 eV, 从而支持时域上获得变换极限 500 as 的单个阿秒脉冲。

关键词: 超快光学; 阿秒脉冲; 高次谐波; 载波包络相位

中图分类号: O437 文献标识码: A

Generation of High-Order Harmonic Continuum Supporting Single Attosecond Pulse in Argon Driven by Intense 7 fs Laser Pulse

Zheng Yinghui¹ Xiong Hui¹ Peng Yan² Xu Han² Zeng Zhinan¹ Yang Xuan²

Chen Xiaowei¹ Li Ruxin¹ Zeng Heping² Xu Zhizhan¹

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

Abstract: High-order harmonic continuum in the cutoff region is demonstrated with an argon gas cell driven by 7 fs/0.4 mJ ultrashort intense laser pulses. It is found that the spectral structure, modulation depth and continuum bandwidth vary greatly when the carrier envelope phase (CEP) of driving laser pulse is stabilized at different value. At some CEP value, a smooth continuous spectrum with modulation depth less than 17% and 10 eV continuum bandwidth is achieved, supporting a transform-limited single 500 as pulse in time domain.

Key words: ultrafast optics; attosecond pulse; high-order harmonic; carrier envelope phase

阿秒(attosecond, as)脉冲的产生具有重要的意义,它使超快科学的研究进入了一个全新领域。阿秒脉冲可以跟踪电子的运动,观察原子、分子中电子的弛豫过程,如内壳层电子的动力学行为等。理论和实验研究表明,高次谐波具有优良的光谱特性,故将某些谐波级次的相位锁定可以合成阿秒脉冲链^[1,2]。然而,到目前为止如何产生单个的阿秒脉冲仍是一大挑战,主要困难在于要将谐波辐射限

制在驱动激光场的半个光周期内。2001年 Hentschel 等^[3]首次在实验上产生并测量了单个阿秒脉冲,采用的方法是用一个超短激光脉冲(7 fs)驱动产生高次谐波随后将截止区的谐波滤出获得阿秒脉冲(650 as),但当时其驱动激光的相位并未锁定。实际上,当驱动激光脉冲宽度小于等于 2.5 倍的光周期时,产生的高次谐波截止区的谱结构对驱动激光的载波包络相位有很强的依赖关系^[4]。最

作者简介: 郑颖辉(1979~),女,中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生,主要从事阿秒及高次谐波方面的研究。E-mail: yzhzheng@mail.siom.ac.cn

导师简介: 李儒新(1969~),男,福建人,中国科学院上海光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事阿秒脉冲产生与应用领域的研究。E-mail: ruxinli@mail.shcnc.ac.cn

收稿日期: 2006-06-19; 收到修改稿日期: 2006-08-11

近,我们利用 7 fs 超短激光脉冲与 Ar 原子在气体盒子中作用获得了连续的高次谐波谱,并将驱动激光的载波包络相位随机锁定在不同的位置,发现对于不同的载波包络相位,高次谐波级次的调制深度以及连续谱带宽也有很大不同。在某些载波包络相位时获得了很好的连续谱,可以支持变换极限 500 as 的单个阿秒脉冲。

实验装置主要由激光系统、聚焦光路、气体靶室和软 X 射线光栅光谱仪组成,其中软 X 射线光栅光谱仪^[5]由前置光学系统、狭缝、变栅距平场光栅 (1200 mm^{-1}) 和软 X 射线 CCD (Princeton Instruments, PI-SX:400) 组成,它和气体靶室工作在真空状态下。实验中所用光谱物理公司生产的掺钛蓝宝石再生放大激光系统经腔外毛细管自相位调制实现光谱展宽,然后用啁啾镜进行相位补偿,最后压缩得到 7 fs 脉冲宽度(经气体靶室前的窗片后)、单脉冲能量约 0.4 mJ(经气体靶室前的窗片后)、重复频率 1 kHz、光斑直径约为 6.5 mm 的高斯光束。此高斯光束经焦距为 40 cm 的凹面反射镜聚焦在靶室中固定的气体盒子内,与其内的氩气发生作用,产生高次谐波辐射。然后,高次谐波穿过约 500 nm 厚的铝膜进入软 X 射线光栅光谱仪并由软 X 射线 CCD 记录,而驱动激光被铝膜完全挡住。实验中,驱动激光在焦点处的功率密度约为 $3 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。气体靶室前的窗片为熔石英,为了尽量减少驱动激光在传播过程中的脉冲展宽,窗片采用厚度仅为 0.6 mm 的石英片。靶室中气体盒子的长度为 5 mm,两端用钢片密封,气体压强通过一个微调气阀精确控制,可精确到 $1.333 \times 10^2 \text{ Pa}$ 。

图 1 给出了驱动激光脉冲载波包络相位稳定在两个不同值时获得的高次谐波谱,实验中高次谐波信号采集时间均为 10 s,气体盒子中氩气压为 $1.27 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。实验中,通过将激光振荡器输出脉冲的载波相位随机锁定在不同的位置来实现对驱动激光脉冲载波相位的改变。图中 73 eV 处(图中信号锐减处)对应于铝膜吸收边。从图中可以看出,当载波相位不同时高次谐波的谱结构、各级次的调制深度和连续谱带宽都有很大的区别。图中的点线和实线在 57.0~59.5 eV 范围内谱调制深度分别为 41% 和 17%,相差 24%,而实线表示的谐波谱在吸收边附近出现了 10 eV 带宽的连续谱。虽然目前还未测出驱动激光脉冲载波相位的绝对值,但是由图 1 可以发现截止区附近高次谐波谱的结构强烈依赖于驱动激光脉冲的载波相位,在某些载波相位处可以获得很好的

连续谱,而在另一些载波相位时只能产生分立谱。当载波相位不稳定时,由于载波相位任意改变所以截止区的谐波结构可能会被抹平^[4],这个时候并不能说明获得了真正的连续谱。将图 1 中实线所示的连续谱截取 62~73 eV 的一段作傅里叶反变换得到高次谐波发射的时域特性,发现在我们目前的实验条件下可获得变换极限 500 as 的单个阿秒脉冲。

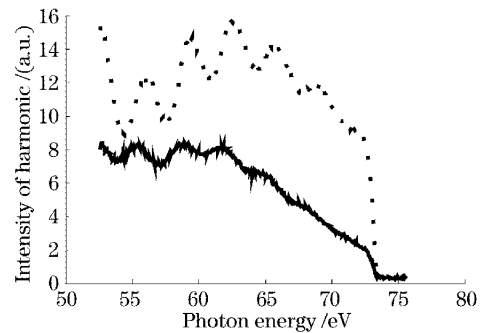


图 1 驱动激光稳定在两个不同的载波相位时所获得的高次谐波谱

Fig. 1 Harmonic spectra driven by stabilized laser pulses with two different carrier pulse phases

本文报道了采用 7 fs/0.4 mJ 的超短强激光脉冲在充氩气体盒子中获得了连续的高次谐波谱,并且发现当驱动激光稳定在不同的载波相位时,高次谐波的谱结构、谱调制深度和连续区域的带宽都有很大的区别。在某些载波相位时获得了很好的连续谱,可反推得到时域变换极限 500 as 的单个阿秒脉冲。这在载波相位连续可调情况下产生可控的单个阿秒脉冲、阿秒脉冲时域测量和阿秒脉冲动力学研究等工作奠定了基础。这也是首次在气体盒子而非气体喷流中获得支持单个阿秒脉冲产生的连续谱高次谐波。在气体盒子中产生高次谐波有望控制驱动脉冲的作用长度以及进一步调节控制谐波产生的相位匹配条件。

参 考 文 献

- 1 Gy. Farkas, Cs. Tóth. Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases [J]. *Phys. Lett. A*, 1992, **168**(5~6): 447~450
- 2 P. M. Paul, E. S. Toma, P. Breger *et al.*. Observation of a train of attosecond pulses from high harmonic generation[J]. *Science*, 2001, **292**(5522): 1689~1692
- 3 M. Hentschel, R. Kienberger, Ch. Spielmann *et al.*. Attosecond metrology[J]. *Nature*, 2001, **414**(6863): 509~513
- 4 A. Baltuška, Th. Udem, M. Uiberacker *et al.*. Attosecond control of electronic processes by intense light fields[J]. *Nature*, 2003, **421**(6923): 611~615
- 5 Li Ruxin, Fan Pinzhong, Xu Zhizhan *et al.*. Space resolved spectrograph for laser induced plasma diagnostics[J]. *J. Opt. (Paris)*, 1994, **25**(4): 143~150