

基于固体薄片超连续飞秒光源驱动的高次谐波产生实验

刘阳阳 赵昆 何鹏 江昱佼 黄杭东 滕浩 魏志义

High harmonic generation experiments based on solid-state supercontinuum

Liu Yang-Yang Zhao Kun He Peng Jiang Yu-Jiao Huang Hang-Dong Teng Hao Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 134207 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.134207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

分子轨道高时空分辨成像

Molecular orbital imaging with high spatial and temporal resolutions

物理学报.2016, 65(22): 224207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224207>

吸收多个远紫外光子生成的高次谐波的多重截止结构

Multiple cutoffs in high harmonic generation via multi-XUV-photon absorption

物理学报.2016, 65(22): 224206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224206>

中红外飞秒激光场中氮分子高次谐波的多轨道干涉特性研究

Signature of multi-channel interference in high-order harmonic generation from N₂ driven by intense mid-infrared pulses

物理学报.2016, 65(22): 224208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.224208>

不同核轴取向的 O₂ 的高次谐波

High-order harmonic generation of O₂ molecules with different nuclear axis orientations

物理学报.2016, 65(11): 114205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.114205>

离轴涡旋光束弱走离条件下的倍频效应

Frequency doubling effect of off-axial vortex beam in the case of weak walk-off

物理学报.2015, 64(24): 244204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.244204>

基于固体薄片超连续飞秒光源驱动的高次谐波产生实验^{*}

刘阳阳¹⁾²⁾ 赵昆^{1)†} 何鹏³⁾ 江昱佼³⁾ 黄杭东³⁾ 滕浩¹⁾ 魏志义^{1)2)‡}

1)(中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710126)

(2017年4月7日收到; 2017年5月10日收到修改稿)

本文报道了采用基于熔石英薄片超连续的少周期飞秒光源驱动高次谐波产生的实验研究. 实验中通过将重复频率 1 kHz 的飞秒钛宝石激光放大器所输出的能量 0.8 mJ、脉宽 30 fs 的脉冲聚焦到 7 片 0.1 mm 厚的熔石英片中, 得到了覆盖带宽大于倍频程的展宽光谱. 利用啁啾镜补偿色散后, 经瞬态光栅频率分辨光学开关法测得脉宽为 6.3 fs, 对应约 2.3 个光学周期. 利用压缩后的激光脉冲聚焦作用于惰性气体, 并通过调节尖劈插入量改变脉宽, 分别测得了分立以及连续的高次谐波截止区信号, 结果与 6.3 fs 的脉冲宽度相符合.

关键词: 超连续光源, 非线性光谱展宽, 高次谐波

PACS: 42.65.Ky, 42.65.Jx, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.66.134207

1 引言

高能量周期量级飞秒激光在载波包络相位 (carrier-envelope phase, CEP) 锁定^[1]、相干合成^[2]、高次谐波产生^[3]以及孤立阿秒脉冲产生^[4]等领域有着广泛的应用, 尤其在孤立阿秒脉冲产生方面, 周期量级飞秒激光具有非常重要的优势. 作为原子、分子以及光物理领域的重要前沿分支, 阿秒物理一直是人们的研究热点. 虽然目前人们已经实验产生了脉宽短至 67 as 的孤立阿秒激光脉冲^[5], 但是由于效率太低^[6,7], 使得其能量非常低, 而过低的脉冲能量又进一步限制了孤立阿秒脉冲的应用. 目前, 阿秒激光领域的一个重要研究课题就是如何提升孤立阿秒脉冲的能量; 而提升驱动激光的能量, 采用高能量周期量级的飞秒激光作为驱

动光源, 是最为直接且有效地提升孤立阿秒脉冲能量的方法^[8].

为了获得高能量的周期量级飞秒激光, 一个最有效的技术方法就是先获得高能量的超连续光谱. 自激光诞生以来^[9], 基于自相位调制的光谱展宽一直是人们的研究热点^[10]. 目前, 利用空芯光纤进行光谱展宽是获得具有一定能量的周期量级飞秒激光最常用的单元技术, 并已获得产生倍频程超连续光谱的结果, 支持 1—3 个光周期的傅里叶变换极限脉冲^[11,12], 并具有光谱宽、光束质量好的优点. 但是, 空芯光纤也存在一些固有的缺点, 比如, 效率只有大约 50%, 光谱及能量不稳定, 调节复杂等. 最重要的是, 由于芯径限制, 空芯光纤无法产生大能量的周期量级飞秒激光. 因此, 发展新的高能量周期量级的飞秒光源就显得极为重要.

针对上述问题, 近年来人们发展了一种采用固

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 11434016)、国家自然科学基金 (批准号: 11574384, 11674386) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB922401, 2013CB922402) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhaokun@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

体介质展宽飞秒激光光谱的方法^[13], 尽管在一定程度上能够解决空芯光纤展宽光谱带来的问题, 但是目前所能得到的能量限制在 100 μJ 量级, 如何得到更高能量的结果, 仍是需要进一步研究的问题. 为此, 我们利用七片熔融石英薄片, 通过展宽 1 kHz 重复频率的飞秒钛宝石放大激光输出的脉冲光谱, 结合色散补偿得到了 0.68 mJ, 6.3 fs 的周期量级飞秒激光输出^[14]. 本文进一步利用该激光驱动惰性气体, 进行了高次谐波产生 (HHG) 实验, 通过调节尖劈插入量改变脉宽, 得到了截止区分立和连续的 HHG 信号, 结果与周期量级飞秒激光产生高次谐波的特点一致, 同时也说明了压缩后的脉冲宽度到了周期量级.

2 实验原理

超短激光脉冲在介质中产生光谱展宽的机理主要是自相位调制过程. 而自相位调制发生时, 不可避免地存在自聚焦现象. 如果固体材料较厚, 自聚焦过程会逐渐加强, 导致电离、多光子吸收等不利的非线性过程, 最终导致光束变差以及材料损伤. 为此, 我们采用 7 片薄的固体材料并分开放置的方法. 放置时需要注意: 1) 要控制好激光的峰值功率密度, 过低对光谱展宽不利, 过高容易引入不利的非线性过程进而损伤光束质量及材料; 2) 要计算好光束的瑞利距离, 薄片的位置一般在瑞利距离范围内; 3) 要有序地放置熔融石英薄片. 第一片熔融石英薄片应放置在激光焦点前, 激光与第一片薄片相遇时, 自相位调制过程导致光谱展宽, 自聚焦过程导致光束变小, 离开薄片后在空气中传播时, 激光由会聚变为发散, 光斑变大. 然后在适当的位置上, 依次放置第二到五片薄片. 第二到第五片薄

片的规律与第一片薄片相同, 经过薄片时由于自聚焦效应光斑变小, 之后在空气中发散. 但总体而言, 激光经历前五片薄片时, 光斑变化较小. 随后, 光束在经历第六和第七片薄片时, 光斑逐渐变大, 激光的峰值功率密度降低. 由于功率密度降低, 再放置薄片已不能引起有效的三阶非线性过程, 所以, 熔融石英薄片的数目为 7 片. 熔融石英薄片组的效果与波导类似. 这样放置的好处是能够有效地积累自相位调制过程, 达到光谱展宽的目的. 同时有效抑制自聚焦过程, 使之维持在较弱的范围内, 避免不利的非线性过程, 从而有效避免了光束变差以及材料损伤.

利用上述思路, 我们实现了 0.7 mJ 的超连续光谱产生, 该结构具有很好的稳定性和可重复性.

3 实验装置

我们利用固体薄片产生白光超连续光谱及进一步压缩脉宽、进行 HHG 的实验装置如图 1 所示. 实验所用驱动光源为飞秒钛宝石激光放大器, 输出单脉冲能量为 0.8 mJ, 脉冲 30 fs, 光斑直径为 12 mm, 重复频率为 1 kHz. 激光经过缩束系统后, 光斑直径变为 4 mm. 缩束系统由 $f = 300$ mm 的正透镜和 $f = -100$ mm 的负透镜组成, 两个透镜的间距为 200 mm. 缩束后的光束经过 $f = 2000$ mm 的透镜聚焦后, 腰斑直径为 600 μm ($1/e^2$ 强度下), 对应的瑞利距离为 35 cm, 焦点处的峰值功率密度为 9.4×10^{12} W/cm². 然后, 我们通过在焦点附近按照布鲁斯特角 (55.5°) 连续放置 7 片 0.1 mm 厚的熔融石英薄片, 获得了覆盖 460—980 nm 的超连续光谱. 第一片熔融石英薄片放置在焦点前 31 cm 处,

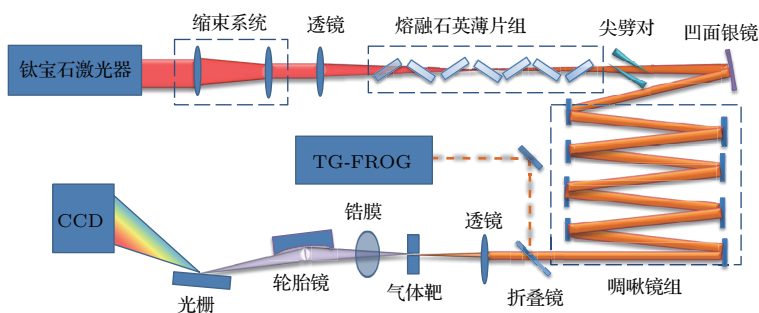


图 1 (网刊彩色) 固体超连续产生、脉冲压缩及高次谐波产生的整体实验光路

Fig. 1. (color online) Experimental setup for supercontinuum generation by thin solid media, pulse compression and HHG measurement.

第二至七片薄片与前一片的距离依次为20, 8.5, 4.5, 5, 5和5 cm. 熔融石英薄片组共占用空间约50 cm. 超连续光谱产生后依次经过尖劈对、凹面银镜以及8片啁啾镜. 尖劈对的材料为熔融石英, 按照布鲁斯特角(55.5°)摆放, 用于微调色散. 凹面银镜的焦距为1000 mm, 用于对超连续光进行准直. 啁啾镜组用于对超连续光谱的色散进行补偿, 压缩脉冲. 在0.8 mJ的注入能量下, 超连续光谱的能量为0.7 mJ, 对应于87.5%的转换效率. 经过啁啾镜压缩后, 压缩脉冲的能量为0.68 mJ. 瞬态光栅-频率分辨光学开关法(TG-FROG)^[15]测量结果显示, 脉冲宽度为6.3 fs.

我们使用压缩好的0.5 mJ, 6.3 fs的脉冲进行高次谐波产生实验. 准直后的压缩脉冲经过 $f = 400$ mm的透镜聚焦后, 焦点直径为 $150\text{ }\mu\text{m}$ ($1/e^2$ 强度下), 对应的峰值功率密度为 $8.1 \times 10^{14}\text{ W/cm}^2$. 气体靶放置在焦点附近. 气体靶厚度为1 mm, 里面充满Ne气, 背压为300 mbar. 强激光与气体靶中的Ne气相互作用可以产生极紫外(XUV)波段的高次谐波. 气体靶后面放置一片厚度为 $0.15\text{ }\mu\text{m}$ 的锆(Zr)膜, 其作用一是实现XUV与可见光的分离, 因为XUV可以穿透Zr膜, 而可见光无法穿过; 二是Zr膜可以补偿XUV产生时的内秉色散^[16]. 之后, 经过轮胎镜聚焦后, 高次谐波入射到XUV光谱仪上.

XUV光谱仪由平场变刻线凹面光栅和XUV-CCD(型号为PIXIS 2048)组成. 相比于平面光栅, 凹面光栅的优势在于既有衍射功能, 又有成像效果. 另外, 如果光栅间距一定, 不同频率的光的聚焦面不是平面, 而是圆面. 经过特殊设计的变刻线凹面光栅, 可以使不同频率的光聚焦在一个平面内^[17]. 因此变刻线凹面光栅又被称为平场光栅^[18]. 我们使用的平场光栅的型号为Hitachi Aberration-Corrected Concave Gratings for Flat-Field Spectrographs, Part No. 001-0437, 其结构如图2所示. 光栅刻线为1200线/mm, 狭缝到光栅中心的间距 $L_1 = 237\text{ mm}$, 入射角 $\alpha = 87^\circ$, 光栅衍射波长范围为5—20 nm (只有该波段的光经光栅衍射后, 可以聚焦到同一平面), 对应的光子能量大约是248—62 eV. 图中 $\lambda_1 = 5\text{ nm}$, 对应的衍射角 $\beta_1 = 83.04^\circ$; $\lambda_2 = 20\text{ nm}$, 对应的衍射角 $\beta_2 = 77.07^\circ$; 光栅中心与成像面的距离 $L_2 = 235\text{ mm}$, $L_3 = 25.3\text{ mm}$.

利用上述装置, 进行了高次谐波产生实验. 通过调节尖劈插入量来改变驱动脉冲的色散, 测量到了截止区分立和连续的高次谐波信号.

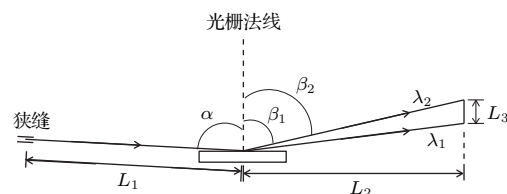


图2 平场光栅结构

Fig. 2. The setup of flat-field grating.

4 实验结果与分析

实验中, 我们尝试了不同材料、不同厚度的熔融石英薄片. 首先比较了熔融石英与氟化钙材料. 氟化钙的能隙较大, 不易引起电离等不利的非线性过程, 应该更适合进行固体超连续实验. 但是, 由于氟化钙材料的损伤阈值较低, 容易打坏, 所以我们选择了熔融石英. 其次, 尝试了0.1 mm和0.2 mm的熔融石英薄片. 两者输出的光谱差别不大, 但是0.2 mm的熔融石英薄片容易被打坏, 稳定性较差. 这是因为, 当材料较厚时, 自聚焦过程比较强烈, 容易引起不利的非线性过程, 导致光束变差以及材料损伤, 因此我们最终选用了0.1 mm的熔融石英薄片.

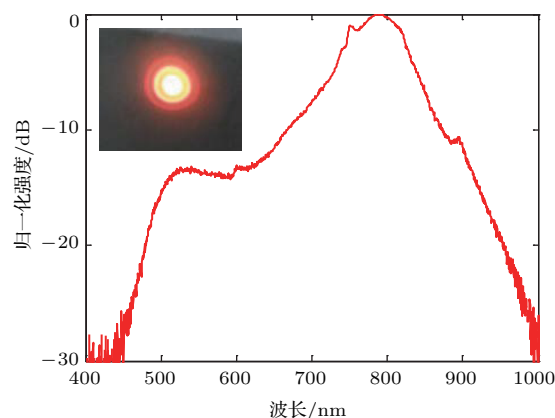


图3 (网刊彩色) 熔融石英薄片组后的超连续光谱和光斑

Fig. 3. (color online) Supercontinuum after 7 fused silica plates and the beam profile taken at the collimating mirror.

激光经过熔融石英薄片组后, 由于自相位调制和自陡峭效应, 光谱得到了展宽. 展宽后的光谱以及光斑形状如图3所示. 在对数坐标系下可以看到, 在-25 dB强度下, 光谱覆盖460—980 nm. 光斑类

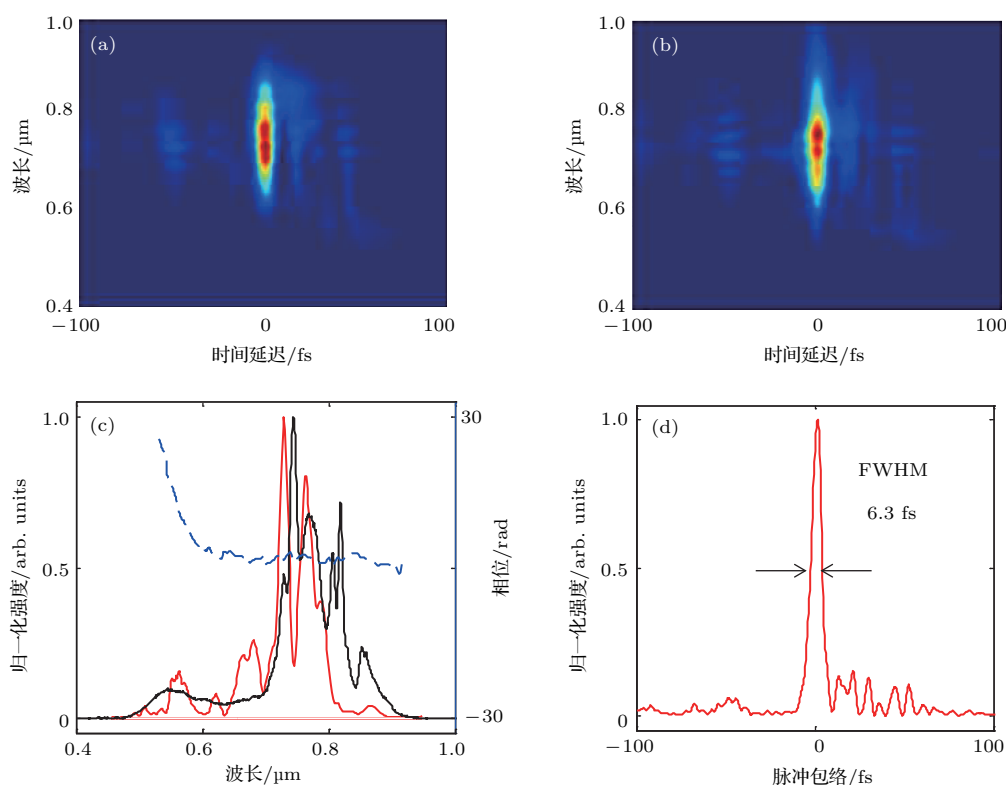


图4 (网刊彩色) 6.3 fs 脉冲测量结果

Fig. 4. (color online) The characterization of 6.3 fs pulse by TG-FROG.

似于0阶贝塞尔光束. 熔融石英薄片之前的光束质量(M 因子)为 $M_x^2 = 1.68$, $M_y^2 = 1.34$. 经过熔融石英薄片组后, 激光的光束质量为 $M_x^2 = 1.86$, $M_y^2 = 1.69$, 前后相差不大.

经过凹面银镜准直后, 我们利用尖劈对和4对啁啾镜对超连续光谱进行了压缩, 然后使用TG-FROG对压缩后的脉冲进行了测量, 测量结果为6.3 fs. TG-FROG 测量结果如图4所示. 图4(a)是原始的FROG光谱图, 图4(b)是反演得到的FROG光谱图; 图4(c)中红色实线是反演得到的光谱, 蓝色虚线是反演得到的相位, 黑线是实际测量的FROG之前的光谱; 图4(d)是反演得到的脉冲包络, 半高全宽为6.3 fs.

将压缩后的0.5 mJ, 6.3 fs激光与Ne气相互作用, 获得的HHG结果如图5所示. 通过增加尖劈插入量, 我们得到了图5(a)到图5(b)所示的高次谐波截止区由分立变化为连续的高次谐波谱. 进一步增加尖劈插入量, 高次谐波截止区的光谱由连续变化为分立, 如图5(b)到图5(c)所示. 高次谐波谱可划分为三个部分, 低能区, 平台区以及截止区, 其中低能区不在我们光谱仪的观察范围内. 在一定范围

内, 驱动激光的能量越强, 对应的高次谐波的光子能量越高^[19].

当驱动激光的脉冲短至约2个光学周期时, 光电场主峰处的电场强度比其他位置要强很多, 因此, 光电场主峰处能产生较高能量的高次谐波光谱. 如果把这部分高能光子分离出来, 一般能获得孤立阿秒脉冲, 对应于高次谐波谱中连续的截止区. 如果驱动激光的脉冲较长, 光电场不同峰值处的电场强度相差不大, 那么高能光子往往由两三个或者更多电场位置处获得. 根据光谱干涉效应, 这部分区域的光谱是分立的, 对应于分立的截止区. 因此, 对于少周期的零色散脉冲, 高次谐波的截止区应该是连续的. 此时, 无论减小还是增加尖劈插入量, 都会引入色散, 从而导致脉冲变长. 长脉冲对应于分立的高次谐波截止区. 我们测得的高次谐波结果为: 当尖劈位于位置(b)处, 高次谐波的截止区连续. 此时, 无论减小尖劈插入量到达位置(a), 还是增加尖劈插入量到达位置(c)时, 高次谐波的截止区都变为分立. 我们的结果与少周期飞秒激光产生高次谐波的特点相符合, 这是压缩后的脉冲处于周期量级的一个佐证.

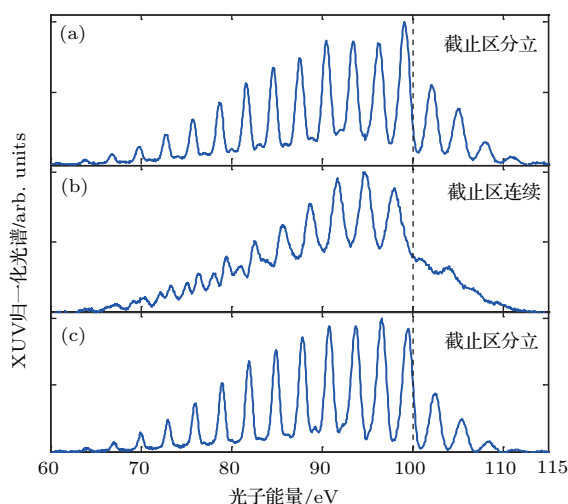


图5 不同尖劈插入量下的高次谐波光谱

Fig. 5. HHG spectrum at different wedge insertion.

5 结 论

本文报道了基于固体超连续光谱压缩脉冲驱动的HHG研究, 通过将0.8 mJ, 30 fs的钛宝石激光聚焦到7片0.1 mm厚的熔融石英薄片上, 我们得到了倍频程的超连续光谱. 利用啁啾镜补偿超连续光谱的色散后, 产生了0.68 mJ, 6.3 fs的超短脉冲并用于HHG实验. 对于周期量级的零色散脉冲, 实验表明HHG的截止区连续. 如果引入色散使得脉冲变长, 那么高次谐波的截止区就变为分立谱. 通过调节尖劈插入量来改变脉冲宽度, 我们得到了截止区连续以及分立的高次谐波信号. 此结果与少周期飞秒激光产生高次谐波的特点相符合, 是压缩后的脉冲处于周期量级的一个佐证. 研究结果表明, 相对于常用的气体波导光纤, 利用固体介质产生超连续是一种非常有潜力的宽带光谱展宽技术, 具有效率高、体积小、稳定性好、无需光束锁定等优点, 特别是避免了气体光纤光源受芯径限制很难实现大能量飞秒脉冲光谱展宽的影响, 适合产生大能量的周期量级飞秒激光脉冲. 但是对于更高能量的

驱动激光, 必须扩大激光光斑以维持相同的光功率密度来进行超连续光谱产生实验. 此时, 激光的波前可能面临不均匀以及不稳定等不利因素, 进而引发小范围自聚焦, 从而导致光斑变差. 高能量下固体薄片组产生超连续光谱的实验尚在进行中.

参考文献

- [1] Telle H R, Steinmeyer G, Dunlop A E, Stenger J, Sutter D H, Keller U 1999 *Appl. Phys. B* **69** 327
- [2] Wirth A, Hassan M, Grguraš I, Gagnon J, et al. 2011 *Science* **334** 195
- [3] McPherson A, Gibson G, Jara H, et al. 1987 *J. Opt. Soc. Am. B* **4** 595
- [4] Baltuka A, Udem T, Uiberacker M, et al. 2003 *Nature* **421** 611
- [5] Zhao K, Zhang Q, Chini M, Wu Y, Wang X, Chang Z 2012 *Opt. Lett.* **37** 3891
- [6] Mashiko H, Gilbertson S, Li C, Moon E, Chang Z 2008 *Phys. Rev. A* **77** 063423
- [7] Kim I J, Kim C M, Kim H T, Lee G H, Lee Y S, Park J Y, Cho D J, Nam C H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 243901
- [8] Chini M, Zhao K, Chang Z 2014 *Nat. Photonics* **8** 178
- [9] Shimizu F 1967 *Phys. Rev. Lett.* **19** 1097
- [10] Yang G, Shen Y R 1984 *Opt. Lett.* **9** 510
- [11] Nisoli M, De Silvestri S, Svelto O 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 2793
- [12] Cardin V, Thiré N, Beaulieu S, Wanie V, Légaré F, Schmidt B E 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 181101
- [13] Lu C H, Tsou Y J, Chen H Y, Chen B H, Cheng Y C, Yang S D, Chen M C, Hsu C C, Kung A H 2014 *Optica* **1** 400
- [14] He P, Liu Y Y, Zhao K, et al. 2017 *Opt. Lett.* **42** 474
- [15] Sweetser J N, Fittinghoff D N, Trebino R 1997 *Opt. Lett.* **22** 519
- [16] Ye P 2014 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [叶蓬 2014 博士学位论文 (北京: 中国科学院物理研究所)]
- [17] Wang X W, Chini M, Cheng Y, Wu Y, Chang Z H 2013 *Appl. Opt.* **52** 323
- [18] Tatsuo H, Kaoru T, Hideo S, Andrzej O 1999 *Appl. Opt.* **38** 2743
- [19] Corkum P B 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 1994

High harmonic generation experiments based on solid-state supercontinuum*

Liu Yang-Yang¹⁾²⁾ Zhao Kun^{1)†} He Peng³⁾ Jiang Yu-Jiao³⁾ Huang Hang-Dong³⁾
Teng Hao¹⁾ Wei Zhi-Yi^{1)2)‡}

1) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

2) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710126, China)

(Received 7 April 2017; revised manuscript received 10 May 2017)

Abstract

Intense few-cycle pulses are widely used in transient light synthesis, high harmonic generation (HHG) and especially in isolated attosecond pulse generation. To obtain intense few-cycle pulses, the intense supercontinuum is needed. The traditional way to generate intense supercontinuum is using rare gas filled hollow-core fibers. Since the input energy of hollow-core fiber system is limited to a level of tens of mJ, it is necessary to find new ways to achieve energy scaling. In this paper we demonstrate the efficient generation of supercontinuum by solid thin plates, compression and its application in HHG.

The Ti:sapphire laser used in the present experiment emits 0.8 mJ in energy with a duration of 30 fs at 1 kHz. After passing through a 3:1 telescope, the beam has a diameter changed from 12 mm to 4 mm. Then the laser is focused by an $f = 2000$ mm lens into a 600 μm -diameter spot. After propagating through 7 fused silica plates placed at Brewster's angle (55.5°) with a thickness of 0.1 mm, the 0.7 mJ octave spanning supercontinuum is achieved, corresponding to an efficiency of 87.5%. The first three plates are placed at 31, 11, 2.5 mm in front of the beam waist, and the last four plates are placed at 2, 7, 12, 17 mm behind the beam waist respectively. With a pair of wedges and 4 pairs of chirped mirrors, the 0.68 mJ supercontinuum is compressed to a duration of 6.3 fs, which is measured by TG-FROG.

The 0.5 mJ, 6.3 fs pulse is used to perform high-harmonic generation experiment. The beam diameter is 150 μm when focused by an $f = 400$ mm lens, with a laser intensity of 8.1×10^{14} W/cm². The 1 mm Ne gas jet is used to perform HHG experiment with a back pressure of 300 mbar. To block the near-infrared light, a 150 μm Zirconium foil is placed behind the gas jet. Then the XUV spectrum is detected by a spectrometer, which consists of a flat field grating and a CCD camera. For driving pulses of few-cycle regime without dispersion, the cutoff spectrum of HHG is continuous. But when the pulse is stretched by positive or negative dispersion, the cutoff spectrum turns discrete. The HHG result is that the cutoff region is continuous when the wedge is in a certain place. Then by increasing or reducing the insertion of the wedge, the cutoff spectrum becomes discrete. Our result is consistent with HHG generated by few-cycle pulses.

In conclusion, we demonstrate high-harmonic generation based on supercontinuum generated by solid thin plates. The 0.7 mJ supercontinuum is achieved when 0.8 mJ pulses are injected to 7 thin fused silica plates. The supercontinuum is compressed to 0.68 mJ, 6.3 fs. The 0.5 mJ, 6.3 fs pulse is used to perform HHG experiments. The HHG result was consistent with few-cycle driving pulses. Our research indicates that solid state supercontinuum has great potential applications in HHG and isolated attosecond pulse generation.

Keywords: supercontinuum generation, nonlinear spectral broadening, high harmonic generation

PACS: 42.65.Ky, 42.65.Jx, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.66.134207

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11434016, 11574384, 11674386) and the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2013CB922401, 2013CB922402).

† Corresponding author. E-mail: zhaokun@iphy.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zywei@iphy.ac.cn